Modelação dos fenómenos de transferência de calor em ambientes subterrâneos:

uma caracterização do estado e da evolução de temperatura utilizando metodologias de Dinâmica dos Fluidos Computacional

Vitor Ramirez Colombo

Tese de Doutoramento apresentada no âmbito do Programa Doutoral em Engenharia de Minas e Geo-Recursos
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Departamento de Engenharia de Minas

Orientação:
Professor Dr. José Soeiro Carvalho
Professora Dra. Maria de Lurdes Dinis

Modelação dos fenómenos de transferência de calor em ambientes subterrâneos by Vitor Colombo is licensed under CC BY-NC-ND 4.0.
To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/

Este documento foi produzido no âmbito do
Programa Doutoral em Engenharia de Minas e Geo-Recursos
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Vitor Colombo (up201802202@fe.up.pt)

Version 0, LaTeX *Private*
Printed 2022-07-01

Conteúdo

Agradecimentos xiii

Abstract xv

Resumo xvii

Lista de símbolos xix

Estrutura do documento xxi

1 Introdução 1

2 Motivação e Objetivos 5
2.1 Motivação do projeto de investigação . . . 5
2.1.1 O ponto de vista ambiental . . . 6
2.1.2 O ponto de vista económico . . . 6
2.1.3 O ponto de vista social . . . 7
2.1.4 Desafios técnicos, otimização e eficiência . . . 7
2.2 Objetivos da investigação . . . 7

3 Modelação de Temperatura em Minas Subterrâneas 9
3.1 Modelos de troca de calor . . . 10
3.1.1 Modelos de recuperação de calor do ar de ventilação . . . 10
3.1.2 Modelos de estimação da temperatura do ar de ventilação . . . 10
3.1.3 Utilização de galerias preenchidas por água em sistemas geotérmicos . . . 14
3.1.4 Utilização do potencial bioclimático de ambientes subterrâneos . . . 14

4 Transferência de Calor em Galerias Subterrâneas 15
4.1 Os conceitos de calor e de temperatura . . . 15
4.1.1 Energia Geotérmica . . . 16
4.2 O Movimento de um fluido . . . 19
4.2.1 A ventilação e o escoamento de ar na mineração . . . 21
4.3 Fenómenos Termodinâmicos em uma Galeria . . . 28
4.3.1 Troca de calor por Condução . . . 28
4.3.2 Troca de calor por Convecção . . . 29
4.4 Escoamento em um ducto . . . 31
4.4.1 Perfil de velocidade para um escoamento laminar em um ducto circular . . . 31
4.4.2 Modelação de um escoamento turbulento . . . 32
4.4.3 Comparação entre perfis de velocidade laminar e turbulento . . . 35
4.5 Outras fontes de calor . . . 36
4.5.1 Auto-compressão adiabática do ar . . . 36
4.5.2 Fontes de calor . . . 36
4.6 Domínio Geométrico . . . 39
4.6.1 Região interna do maciço rochoso . . . 41
4.6.2 Região interna da galeria . . . 41
4.6.3 Interface rocha-fluido . . . 41
4.7 Analogias entre ducto e galeria . . . 42

5 Solução do Balanço de energia 45
5.1 A Tarefa . . . 45

5.2 Métodos de CFD . . . 45
5.2.1 Métodos Numéricos aplicados à CFD . . . 46
5.3 Aplicação do Método do Volume Finito . . . 50
5.4 Definições Geométricas . . . 50
5.5 Solução da Equação de Balanço de Energia . . . 51
5.5.1 Esquemas de discretização no tempo . . . 53
5.5.2 Cálculo da difusividade témica α_x local . . . 56
5.6 Propriedades termofísicas . . . 57
5.7 Condições iniciais e de contorno . . . 57
5.8 Algoritmo do Modelo . . . 59
5.8.1 Pré-processamento . . . 60
5.8.2 Solução . . . 62
5.8.3 Pós-processamento . . . 71
5.8.4 Fluxograma do algoritmo . . . 72
5.8.5 Depuração . . . 72
5.8.6 Problemas numéricos e geométricos no cálculo das trocas de calor por convecção . . . 72
5.8.7 Simulações preliminares e comparações com outros modelos . . . 76
5.9 Sobre a necessidade de validação do modelo teórico através de dados experimentais . . . 89

6 Amostragem de temperatura em uma galeria subterrânea 91
6.1 Monitorização ambiental na mineração subterrânea . . . 91
6.2 Planeamento experimental . . . 93
6.3 Tecnologias de monitorização subterrânea . . . 93
6.4 Desenvolvimento do sistema de amostragem de temperatura . . . 95
6.4.1 Escolha dos microcontroladores, transmissores e sensores . . . 95
6.4.2 Prototipagem de unidades de amostragem de temperatura - Protótipo zero . . . 101
6.4.3 Protótipo 1 - Transmissão de dados para a nuvem . . . 105
6.4.4 Processo *DIY* de impressão de circuitos . . . 114
6.4.5 Protótipo 2 - Rede de sensores com protocolo DigiMesh . . . 115
6.4.6 Estudo da autonomia de unidades remotas de medição . . . 132
6.4.7 Protótipo 3 - Confeção de placas *barebones* de baixo consumo . . . 136
6.4.8 Montagem final das unidades de medição . . . 138
6.4.9 Equipamentos utilizados nas campanhas de amostragem . . . 141

7 Recolha de dados experimentais e Validação do Modelo 145
7.1 Recolha de temperatura . . . 145
7.1.1 Testes preliminares num corredor subterrâneo . . . 145
7.1.2 Campanha de amostragem das Caves da Murganheira . . . 146
7.1.3 Campanha de amostragem das Minas da Panasqueira . . . 170
7.2 Dados brutos de temperatura . . . 178
7.3 Filtragem e pré-processamento dos dados . . . 179
7.3.1 A Transformada de Fourier como ferramenta de processamento de sinais . . . 180
7.4 Análise preliminar dos dados de temperatura . . . 186
7.4.1 Caves da Murganheira - Primeira amostragem . . . 188
7.4.2 Caves da Murganheira - Segunda amostragem . . . 193
7.4.3 Minas da Panasqueira - Primeira e Segunda amostragens . . . 193
7.5 Modelação numérica - Minas da Panasqueira . . . 199
7.5.1 Validação propriamente dita do modelo - Minas da Panasqueira . . . 201
7.6 Outras estimações do coeficiente de convecção (h) . . . 210
7.7 Modelação de um Número de Nusselt Experimental . . . 215
7.8 Modelação numérica - Caves da Murganheira . . . 219
7.8.1 Validação propriamente dita do modelo - Caves da Murganheira . . . 222
7.9 Validação numérica - tratamento estatístico dos resultados do modelo . . . 224
7.9.1 Métodos e métricas de análise . . . 229
7.9.2 Desempenho do modelo . . . 233
7.10 Considerações gerais para a validação do modelo . . . 236

8 Conclusões e considerações finais **241**
8.1 Enquadramento do projeto de investigação nos objetivos . . . 241
8.2 Modelação Numérica a partir da teoria . . . 242
8.3 Sistema de monitorização e dataloggers . . . 244
8.4 Algoritmo e funcionamento do modelo . . . 244
8.5 Validação e desempenho do modelo . . . 245
8.6 Trabalhos futuros . . . 246
8.7 Competências desenvolvidas . . . 247

Apêndice A - Filtragem de Temperatura das Minas da Panasqueira (1ª) **257**
A1 Série n3 . . . 258
A2 Série n5 . . . 261
A3 Todas as séries filtradas . . . 264

Apêndice B - Filtragem de Temperatura das Minas da Panasqueira (2ª) **267**
B1 Série n1 . . . 268
B2 Série n3 . . . 272
B3 Série n4 . . . 276
B4 Série n5 . . . 279
B5 Série n6 . . . 283
B6 Série n7 . . . 287
B7 Todas as séries filtradas . . . 291

Apêndice C - Filtragem de Temperatura das Caves da Murganheira (1ª) **295**
C1 Série n1 . . . 296
C2 Série n2 . . . 299
C3 Série n3 . . . 302
C4 Série n4 . . . 305
C5 Série n5 . . . 308
C6 Série n9 . . . 311
C7 Série n10 . . . 314
C8 Série n11 . . . 317
C9 Todas as séries filtradas . . . 320

Apêndice D - Filtragem de Temperatura das Caves da Murganheira (2ª) **323**
D1 Série n1 . . . 324
D2 Série n2 . . . 327
D3 Série n9 . . . 330
D4 Série n10 . . . 333
D5 Série n11 . . . 336
D6 Todas as séries filtradas . . . 339

Lista de Figuras

1.1 Mineiros da antiguidade 1

4.1 Diagrama de Líndal para mineração 18
4.2 Métodos rudimentares de ventilação 22
4.3 Escoamento laminar 32
4.4 Escoamento turbulento 33
4.5 Escoamento turbulento sobre uma placa 34
4.6 Perfil laminar versus turbulento 36
4.7 Experimento de Reynolds 37
4.8 Perfil de velocidade com fio de telúrio 38
4.9 Regiões de troca de calor em uma galeria 39

5.1 Malha regular sobre um ducto cilíndrico 47
5.2 Diferença finita progresiva 48
5.3 Célula de controle 50
5.4 Definição da geometria do problema 51
5.5 Esquemas de discretização temporal 55
5.6 Discretização temporal de um ponto 55
5.7 Domínio e condições de contorno 58
5.8 Matriz binária T_{bin} 61
5.9 Matriz de temperatura deslocada 64
5.10 Evolução de temperatura (processo numérico) 73
5.11 Fluxograma do algoritmo 74
5.12 Gradiente vertical de temperatura 77
5.13 Temperatura vs. velocidade 78
5.14 Temperatura vs. diâmetro 79
5.15 Temperatura vs. difusibilidade térmica 80
5.16 Temperatura vs. rugosidade 81
5.17 Algoritmo divergindo - Simulação A 82
5.18 Algoritmo divergindo - Simulação B 82
5.19 Algoritmo divergindo - Simulação C 83
5.20 Algoritmo divergindo - Simulação D 83
5.21 Simulação 1: galeria vazia ventilada 84
5.22 Simulação 2.1: galeria com fontes de calor 86
5.23 Simulação 2.2: fontes de calor e caudal reduzido 86
5.24 Perfil de temperatura em um sistema geotérmico 87
5.25 Comparação entre modelos - Springhill 87
5.26 Plano de convergência do modelo 88
5.27 Tempo de execução vs. número de pontos 88

6.1 Ligação entre Pt1000 e MAX31865 97
6.2 Curva característica de um sensor Pt100 97
6.3 Placa Arduino UNO REV3 100
6.4 Digi Xbee 3 **Zigbee** Mesh Kit 102
6.5 Raspberry Pi Zero W 102
6.6 Protótipo inicial. 103
6.7 Projeto do Protótipo 1 113
6.8 Montagem final do Protótipo 1 114
6.9 Impressões de circuito em acetato 116
6.10 Placa de circuito gravada com luz UV 116

6.11 Placa de circuito gravada por contacto . . . 117
6.12 Placa de cobre imersa em percloreto de ferro . . . 117
6.13 Falha na impressão de um circuito . . . 118
6.14 Funções de um rádio Xbee 3 em uma rede sem fio . . . 119
6.15 Topologia de uma rede zigbee . . . 120
6.16 Topologia de uma rede **Zigbee** . . . 120
6.17 Topologia de uma rede Digimesh . . . 121
6.18 Modos de dormência para rádios Xbee 3 . . . 121
6.19 Modos de dormência síncrono . . . 122
6.20 Interação entre microcontroladores e rádios . . . 123
6.21 Ligações entre Xbee3 e `Raspberry Pi` . . . 126
6.22 *Shields* de sensores . . . 128
6.23 Montagem *barebones* de um Arduino . . . 133
6.24 Circuito típico *high-side switching* com MOSFETS . . . 134
6.25 Configuração dos pinos de um rádio Xbee 3 . . . 135
6.26 Projeto para a placa barebones . . . 136
6.27 Projeto para as placas liga-desliga e Xbee . . . 137
6.28 Montagem final da placa *barebones low-power* . . . 137
6.29 Montagem final das unidades remotas . . . 139
6.30 Problema de soldagem . . . 140
6.31 Oxidação de um circuito . . . 141
6.32 Datalogger utilizado nas Minas da Panasqueira . . . 143
6.33 Circuito do datalogger . . . 144

7.1 Teste preliminar de unidade de medição . . . 146
7.2 Segundo teste preliminar de unidade de medição . . . 147
7.3 Galeria das Caves da Murganheira . . . 148
7.4 Encosta sobre as galerias das Caves da Murganheira . . . 149
7.5 Vista da adega a partir das vinhas das Caves da Murganheira . . . 149
7.6 Cubas refrigeradas e acesso à galeria . . . 150
7.7 Pontos de amostragem das Caves da Murganheira . . . 151
7.8 Troço T2 - Caves da Murganheira . . . 152
7.9 Troço T4 - Caves da Murganheira . . . 152
7.10 Mapa geológico - Caves da Murganheira . . . 154
7.11 Temperatura em detalhe - T1 (Murganheira) . . . 155
7.12 Temperatura em detalhe - T2 (Murganheira) . . . 155
7.13 Temperatura em detalhe - T3 (Murganheira) . . . 155
7.14 Temperatura em detalhe - T4 (Murganheira) . . . 155
7.15 Temperatura em detalhe - T5 (Murganheira) . . . 155
7.16 Temperatura em detalhe - Vista geral (Murganheira) . . . 157
7.17 Gradiente de temperatura - Murganheira . . . 157
7.18 Temperatura em detalhe - T6 (Murganheira) . . . 158
7.19 Temperatura em detalhe - T7 (Murganheira) . . . 158
7.20 Temperatura em detalhe - Vista geral da adega (Murganheira) . . . 158
7.21 Termografia do Acesso A1 (Murganheira) . . . 159
7.22 Termografia do Acesso A2 (Murganheira) . . . 159
7.23 Termografia no ponto 2 de T1 (Murganheira) . . . 159
7.24 Termografia no ponto 12 de T1 (Murganheira) . . . 159
7.25 Termografia no ponto 16 de T2 (Murganheira) . . . 159
7.26 Termografia no ponto 15 de T2 (Murganheira) . . . 159
7.27 Termografia entre os pontos 14 e 23 (Murganheira) . . . 160
7.28 Termografia no ponto 25 de T3 (Murganheira) . . . 160
7.29 Termografia no ponto 31 de T4 (Murganheira) . . . 160
7.30 Termografia no ponto 33 de T4 (Murganheira) . . . 160
7.31 Termografia no ponto 39 de T4 (Murganheira) . . . 160
7.32 Termografia no ponto 41 de T5 (Murganheira) . . . 160
7.33 Termografia no ponto 53 de T7 (Murganheira) . . . 161

7.34 Termografia entre o ponto 46 e o acesso A1 (Murganheira) . . . 161
7.35 Portão da Murganheira (ponto 48) . . . 162
7.36 Portão da Murganheira (ponto 48) . . . 162
7.37 Georreferenciamento da galeria (Murganheira) . . . 163
7.38 Superfície sobre as galerias da Murganheira . . . 164
7.39 Pontos da superfície do terreno sobre a galeria . . . 165
7.40 Perfil topográfico sobre T1 (Murganheira) . . . 165
7.41 Perfil topográfico sobre T2 e T3 (Murganheira) . . . 166
7.42 Perfil topográfico sobre T4 e T5 (Murganheira) . . . 166
7.43 Perfil topográfico sobre as Caves da Murganheira . . . 167
7.44 Posicionamento dos dispositivos do sistema de Monitorização . . . 168
7.45 Posicionamento de duas unidades remotas . . . 169
7.46 Trecho de galeria das Minas da Panasqueira . . . 171
7.47 Mapa das galerias das Minas da Panasqueira . . . 172
7.48 Secção da galeria de testes das Minas da Panasqueira (1) . . . 173
7.49 Secção da galeria de testes das Minas da Panasqueira (2) . . . 173
7.50 Mapa geológico das Minas da Panasqueira . . . 174
7.51 Provetes para ensaios de condutividade térmica (Panasqueira) . . . 175
7.52 Termografia no ponto V2 (Panasqueira) . . . 176
7.53 Termografia no ponto V3 (Panasqueira) . . . 176
7.54 Termografia no ponto V5 (Panasqueira) . . . 177
7.55 Termografia no ponto V6 (Panasqueira) . . . 177
7.56 Série temporal de temperatura com ruídos de resolução do sensor . . . 179
7.57 Série de temperatura de nos domínios do tempo e da frequência . . . 182
7.58 Filtro de sinal no domínio da frequência . . . 182
7.59 Séries temporais de temperatura bruta e filtrada (parte 1 de 50) . . . 183
7.60 Séries temporais de temperatura bruta e filtrada (parte 10 de 50) . . . 183
7.61 Séries de temperatura bruta e filtrada . . . 187
7.62 Séries de temperatura da Murganheira (parte 1 de 2) . . . 189
7.63 Séries de temperatura da Murganheira (parte 2 de 2) . . . 190
7.64 Séries de temperatura da Murganheira (2ª) . . . 192
7.65 Séries de temperatura da Panasqueira (primeira campanha) . . . 194
7.66 Séries de temperatura da Panasqueira (2ª) . . . 196
7.67 Série de temperatura da Panasqueira (5 dias de intervalo) . . . 197
7.68 Medições indiretas através da temperatura . . . 198
7.69 Definição dos dados de input do modelo (Panasqueira) . . . 200
7.70 Definição dos dados de output do modelo . . . 202
7.71 Critério de definição do input: caudal na direção positiva . . . 203
7.72 Critério de definição do input: caudal na direção negativa . . . 203
7.73 Pré-condicionamento do gradiente de temperatura da rocha . . . 204
7.74 Evolução de temperatura da Panasqueira (2ª) . . . 205
7.75 Validação Fenomenológica - Panasqueira (2ª) . . . 207
7.76 Validação Fenomenológica - Panasqueira (partes 1 e 2) . . . 208
7.77 Validação Fenomenológica - Panasqueira (partes 3 e 4) . . . 209
7.78 Validação Gráfica - Panasqueira parte 1 . . . 211
7.79 Validação Gráfica - Panasqueira parte 2 . . . 211
7.80 Validação Gráfica - Panasqueira parte 3 . . . 211
7.81 Erro relativo - Panasqueira (2ª) . . . 212
7.82 Validação Fenomenológica - Panasqueira (1ª) . . . 213
7.83 Erro relativo - Panasqueira (1ª) . . . 215
7.84 Validação - outras estimações da convecção . . . 216
7.85 Erro relativo - outras estimações da convecção . . . 217
7.86 Pontos de temperatura otimizados . . . 218
7.87 Validação do modelo com Nu experimental . . . 220
7.88 Erro relativo - otimização vs. teoria . . . 221
7.89 Geometria das galerias da Murganheira . . . 223
7.90 Evolução de temperatura da Murganheira . . . 225

7.91 Validação Fenomenológica - Murganheira (2ª) - ar . . . 226
7.92 Validação Fenomenológica - Murganheira (2ª) rocha . . . 227
7.93 Erro relativo - Murganheira (2ª) - ar . . . 228
7.94 Erro relativo - Murganheira (2ª) - rocha . . . 228

A.1 Série de temperatura de n3 nos domínios do tempo e da frequência. . . . 258
A.2 Filtro do sinal no domínio da frequência. . . . 258
A.3 Séries n3 bruta e filtrada. . . . 259
A.4 Séries temporais completas de n3. . . . 260
A.5 Série de temperatura de n5 nos domínios do tempo e da frequência. . . . 261
A.6 Filtro do sinal no domínio da frequência. . . . 261
A.7 Séries n5 bruta e filtrada. . . . 262
A.8 Séries temporais completas de n5. . . . 263
A.9 Séries filtradas. . . . 264
A.10 Séries temporais filtradas completas. . . . 265

B.1 Série de temperatura de n1 nos domínios do tempo e da frequência. . . . 268
B.2 Filtro do sinal no domínio da frequência. . . . 268
B.3 Séries n1 bruta e filtrada. . . . 269
B.4 Séries n1 bruta e filtrada. . . . 270
B.5 Séries temporais completas de n1. . . . 271
B.6 Série de temperatura de n3 nos domínios do tempo e da frequência. . . . 272
B.7 Filtro do sinal no domínio da frequência. . . . 272
B.8 Séries n3 bruta e filtrada. . . . 273
B.9 Séries n3 bruta e filtrada. . . . 274
B.10 Séries temporais completas de n3. . . . 275
B.11 Série de temperatura de n4 nos domínios do tempo e da frequência. . . . 276
B.12 Filtro do sinal no domínio da frequência. . . . 276
B.13 Séries n4 bruta e filtrada. . . . 277
B.14 Séries temporais completas de n4. . . . 278
B.15 Série de temperatura de n5 nos domínios do tempo e da frequência. . . . 279
B.16 Filtro do sinal no domínio da frequência. . . . 279
B.17 Séries n5 bruta e filtrada. . . . 280
B.18 Séries n5 bruta e filtrada. . . . 281
B.19 Séries temporais completas de n5. . . . 282
B.20 Série de temperatura de n6 nos domínios do tempo e da frequência. . . . 283
B.21 Filtro do sinal no domínio da frequência. . . . 283
B.22 Séries n6 bruta e filtrada. . . . 284
B.23 Séries n6 bruta e filtrada. . . . 285
B.24 Séries temporais completas de n6. . . . 286
B.25 Série de temperatura de n7 nos domínios do tempo e da frequência. . . . 287
B.26 Filtro do sinal no domínio da frequência. . . . 287
B.27 Séries n7 bruta e filtrada. . . . 288
B.28 Séries n7 bruta e filtrada. . . . 289
B.29 Séries temporais completas de n7. . . . 290
B.30 Séries filtradas. . . . 291
B.31 Séries filtradas. . . . 292
B.32 Séries temporais filtradas completas. ▶ . . . 293

C.1 Série de temperatura de n1 nos domínios do tempo e da frequência. . . . 296
C.2 Filtro do sinal no domínio da frequência. . . . 296
C.3 Séries n1 bruta e filtrada. . . . 297
C.4 Séries temporais completas de n1. . . . 298
C.5 Série de temperatura de n2 nos domínios do tempo e da frequência. . . . 299
C.6 Filtro do sinal no domínio da frequência. . . . 299
C.7 Séries n2 bruta e filtrada. . . . 300
C.8 Séries temporais completas de n2. . . . 301

C.9 Série de temperatura de n3 nos domínios do tempo e da frequência. . . . 302
C.10 Filtro do sinal no domínio da frequência. . . . 302
C.11 Séries n3 bruta e filtrada. . . . 303
C.12 Séries temporais completas de n3. . . . 304
C.13 Série de temperatura de n4 nos domínios do tempo e da frequência. . . . 305
C.14 Filtro do sinal no domínio da frequência. . . . 305
C.15 Séries n4 bruta e filtrada. . . . 306
C.16 Séries temporais completas de n4. . . . 307
C.17 Série de temperatura de n5 nos domínios do tempo e da frequência. . . . 308
C.18 Filtro do sinal no domínio da frequência. . . . 308
C.19 Séries n5 bruta e filtrada. . . . 309
C.20 Séries temporais completas de n5. . . . 310
C.21 Série de temperatura de n9 nos domínios do tempo e da frequência. . . . 311
C.22 Filtro do sinal no domínio da frequência. . . . 311
C.23 Séries n9 bruta e filtrada. . . . 312
C.24 Séries temporais completas de n9. . . . 313
C.25 Série de temperatura de n10 nos domínios do tempo e da frequência. . . . 314
C.26 Filtro do sinal no domínio da frequência. . . . 314
C.27 Séries n10 bruta e filtrada. . . . 315
C.28 Séries temporais completas de n10. . . . 316
C.29 Série de temperatura de n11 nos domínios do tempo e da frequência. . . . 317
C.30 Filtro do sinal no domínio da frequência. . . . 317
C.31 Séries n11 bruta e filtrada. . . . 318
C.32 Séries temporais completas de n11. . . . 319
C.33 Séries filtradas. . . . 320
C.34 Séries filtradas. . . . 321
C.35 Séries temporais filtradas completas. ▶ . . . 322

D.1 Série de temperatura de n1 nos domínios do tempo e da frequência. . . . 324
D.2 Filtro do sinal no domínio da frequência. . . . 324
D.3 Séries n1 bruta e filtrada. . . . 325
D.4 Séries temporais completas de n1. . . . 326
D.5 Série de temperatura de n2 nos domínios do tempo e da frequência. . . . 327
D.6 Filtro do sinal no domínio da frequência. . . . 327
D.7 Séries n2 bruta e filtrada. . . . 328
D.8 Séries temporais completas de n2. . . . 329
D.9 Série de temperatura de n9 nos domínios do tempo e da frequência. . . . 330
D.10 Filtro do sinal no domínio da frequência. . . . 330
D.11 Séries n9 bruta e filtrada. . . . 331
D.12 Séries temporais completas de n9. . . . 332
D.13 Série de temperatura de n10 nos domínios do tempo e da frequência. . . . 333
D.14 Filtro do sinal no domínio da frequência. . . . 333
D.15 Séries n10 bruta e filtrada. . . . 334
D.16 Séries temporais completas de n10. . . . 335
D.17 Série de temperatura de n11 nos domínios do tempo e da frequência. . . . 336
D.18 Filtro do sinal no domínio da frequência. . . . 336
D.19 Séries n11 bruta e filtrada. . . . 337
D.20 Séries temporais completas de n11. . . . 338
D.21 Séries filtradas. . . . 339
D.22 Séries filtradas. . . . 340
D.23 Séries temporais filtradas completas. ▶ . . . 341

Lista de Tabelas

4.1 Propriedades termofísicas para alguns materiais . . . 17
4.2 Propriedades reológicas para alguns fluidos . . . 20
4.3 Composição do ar seco. . . . 25
4.4 Fator de produção para a ventilação . . . 28
4.5 Correção da fricção para casos não isotérmicos . . . 31

5.1 Esquemas de Discretização no tempo. . . . 53
5.2 Coeficientes da equação 5.11 . . . 56
5.3 Propriedades reológicas e termofísicas do ar e da água . . . 57

6.1 Ligações entre **`Raspberry Pi`** e Xbee 3 na unidade central . . . 125
6.2 Ligações entre entre componentes do circuito e **`Arduino`** . . . 131
6.3 *Sleep-modes* para **`Arduino`** e respetivos consumos . . . 134
6.4 Consumo de corrente para os Protótipos 2 e 3 . . . 135
6.5 Custo de produção de uma unidade remota . . . 140
6.6 Custo de produção de uma unidade central . . . 140

7.1 Dimensões das galerias da Murganheira . . . 153
7.2 Propriedades termofísicas da rocha da Murganheira . . . 153
7.3 Propriedades termofísicas da rocha da Panasqueira . . . 175
7.4 Temperaturas medidas através de termografias (Panasqueira) . . . 175
7.5 Pontos de instalação dos dataloggers (Panasqueira) . . . 178
7.6 Metodologias teóricas de estimação da convecção . . . 214
7.7 Média e variância dos dados da validação . . . 231
7.8 Desempenho do modelo - Primeira Campanha da Panasqueira . . . 235
7.9 Desempenho do modelo - Segunda Campanha da Panasqueira . . . 237
7.10 Desempenho do modelo - Segunda Campanha da Murganheira . . . 238

Agradecimentos

Gostaria de agradecer às pessoas e instituições que colaboraram para o desenvolvimento deste projeto de investigação.

Agradeço à Beralt Tin and Wolfram Portugal, nas pessoas dos Engenheiros João Real e Manuel Pacheco, por nos terem aberto espaço para realizarmos parte fundamental das recolhas de dados de temperatura utilizados na validação do modelo. Fica também um agradecimento especial ao Engenheiro Luís Silva, ao Geólogo Filipe Pinto, e ao técnico de segurança Pedro Correia, que nos apoiaram nos trabalhos realizados na mina e nos forneceram informações importantes para a compreensão dos dados recolhidos.

Agradeço também às Caves da Murganheira, que nos permitiram realizar grande parte dos testes de desenvolvimento do sistema de monitorização e longas recolhas de dados de temperatura. Ao Professor Orlando Lourenço, à Engenheira Marta Lourenço, e ao senhor Herlander Lourenço, agradeço pelo apoio, colaboração e disponibilidade, sem contar, é claro, pelos maravilhosos vinhos espumantes oferecidos.

Agradeço à Cooperativa de Produção dos Operários Pedreiros Portuenses e aos senhores Fernando Carvalho e Nelsone Mateus, vice-presidente e presidente da Cooperativa, por nos terem apoiado no corte, polimento e preparação de amostras de rocha para ensaios térmicos.

Por fim, agradeço à Professora Luisa Durães do Departamento de Engenharia Química da Faculdade de Ciências da Universidade de Coimbra e ao investigador Cláudio, que realizaram os ensaios de caracterização térmica das rochas presentes nos locais de testes, o que foi de fundamental importância para a validação do modelo.

Agradecimentos pessoais

Gostaria também de agradecer nominalmente às pessoas próximas de mim que participaram deste processo e de tantas outras etapas que me trouxeram até este ponto.

Começo agradecendo à minha esposa Bruna. É difícil quantificar o quanto existe de você em tudo que eu faço, mas posso dizer que é muito. Obrigado pela paciência (e quanta) e pelo carinho ao longo deste período árduo. Obrigado pelo companheirismo e por ter aceitado ficar tão longe de casa por tanto tempo para que realizássemos este sonho. Sem você eu não teria levado este trabalho até o final. Quero dizer que me orgulho muito de nossa trajetória juntos e que você é minha parceira de vida, agora e para sempre.

Gostaria de agradecer aos meus pais, Sergio e Débora, que além de terem investido tanto em minha educação, sempre acreditaram que eu poderia atingir grandes objetivos. Não poderia deixar de dizer o quanto a dedicação de vocês me impactou e me fez ter vontade de lutar: vê-los terminar um curso superior após os 40, chegando em casa de madrugada, para tentar me proporcionar uma vida mais confortável, é algo que eu jamais vou esquecer e que vai me marcar para sempre. Obrigado pelo amor incondicional e pelo apoio em todas as horas.

Para minha avó Maria Helena, que sempre foi uma mãe para mim, agradeço pelos exemplos de superação e humanidade. Você me acompanhou em todos os grandes testes pelos quais passei, e agora está participando deste momento tão especial. Você é minha referência de ser humano e de sabedoria.

Ao meu avô Pedro, agradeço pelo suporte e apoio de sempre. Mesmo não estando mais aqui, você é um dos responsáveis por eu ter tido esta oportunidade de estudo. Obrigado, vô. Agradeço muito à minha também saudosa avó Amélia Aparecida por tanto carinho, amor, e por ter participado de perto de todo meu crescimento. Espero que vocês dois estejam comemorando este momento junto com a gente aí de cima.

Agradeço aos meus tios Marcos, Delmer e Maria do Carmo por sempre participarem e vibrarem junto comigo em todas as etapas importantes de minha vida. Vocês são parte fundamental de meu alicerce. Agradeço também aos meus primos-irmãos Bárbara e Pedro; é um privilégio ter crescido junto com vocês e tê-los ao meu lado sempre.

Não poderia deixar de agradecer à família de minha esposa. Aos meus sogros Ângelo e Ana, muito obrigado por todo o apoio e confiança. Ao meu cunhado Marcelo, e aos meus tios adquiridos Ricardo e Márcia, muito obrigado pela amizade e carinho de sempre.

Agradeço também à minha coorientadora, Professora Maria de Lurdes Dinis, que tem significativa participação no meu percurso como estudante de doutoramento. Foi muito importante o teu apoio quando da minha chegada à Portugal e o direcionamento que me deu no início do projeto de investigação, além de diversas contribuições ao longo dos desenvolvimentos do modelo. Muito obrigado por fazer parte deste processo.

Não poderia deixar de lembrar também da Professora Aurora Futuro, a quem agradeço pelo acolhimento, incentivo, e pela forma carinhosa com que sempre me tratou. Estendo estes agradecimentos também aos Professores Alexandre Leite e Joaquim Góis, que sempre foram muito gentis e solícitos para comigo.

Por fim, quero agradecer ao meu orientador, o Professor José Soeiro de Carvalho. Este trabalho reflete uma parceria e sintonia incrível que tivemos desde o começo. Quero agradecer por ter acreditado em minhas capacidades, por inúmeras boas ideias que nos desenrascaram ao longo do trabalho, e pela paciência e cuidado em transmitir conhecimento ao longo deste processo. Você é, sem dúvidas, minha grande referência de Professor e será sempre uma figura marcante por toda minha carreira daqui para frente. É um privilégio trabalhar contigo.

Abstract

The thermal processes inside underground mining galleries have been known since ancient times when men came across hostile environments and developed ways to modify them to assure their well-being. As it is evident, those conditioning processes were, in the beginning, primarily empirical. With the advance in science and the understanding of the underground environments, it was possible to control more satisfactorily the conditioning processes: the more extensive the knowledge of the phenomenology involved in the heat-exchange processes in underground galleries, the wider the possibilities for human control and intervention. Over the years, other environmental and earth-related sciences have progressed significantly, such as geothermal, which has an entirely inverse perception of the thermal process in the subsurface: for geothermal sciences, heat is usually a resource, while in mining sciences, it is essentially a problem. This research project is an effort to reconcile these two opposite points of view and aims to integrate underground heat flux into the mining resources, which exploitation is characterizable in terms of economic value and viability. This perception of heat as a quantifiable resource is present in different parts of this work, such as the **comprehension** of energy flows, the **modeling** of heat-exchange phenomena to estimate temperature variation and air's (or water's) energetic content, the **monitoring** of real underground environments, and the **confrontation** of the proposed model's estimations with experimental data. The intention behind the development of the model is to create an analytical tool to identify opportunities for recovering heat in underground mines by estimating the temperature increase of a fluid, which can be ventilation air in active mines or water in decommissioned flooded galleries. There are historical precedents that justify this effort once the partial recirculation of exhaust air and the utilization of flooded mines as heat-exchangers are concepts that were materialized in numerous mines allowing for the use of the heat available in underground galleries, but always with very little planning or technical-theoretical support; this is precisely where the model can contribute the most to geothermal exploitation. Beyond that, the model can also be applied to optimize ventilation and climatization operations. However, the investigation demonstrated that the mere modeling of phenomena is insufficient and that it is crucial to validate the model through well-defined metrics, allowing for applying systematic criteria to assess its performance. As the validation of such models is underdeveloped and rarely discussed, this work also proposes an innovative approach toward model validation. Along with the development of this research project, a non-invasive, real-time, and wireless monitoring system based on the most promising current trends in underground monitoring was developed to collect experimental data for the validation process. Nevertheless, the efforts to expand the comprehension of thermal phenomena in underground spaces (which are profoundly intricate and complex) permeated all the stages of this work, which ends the same way it began, but with a considerable maturation of ideas and concepts: seeking a broader view of the energy flows in underground structures. The highlights of this research project are the creation of a model that proved to be robust and adequate for its original purpose (through validation), the proposition of a validation methodology that is more coherent with the physical quantities involved in the studied phenomena, and the development of a novel monitoring system. The results achieved with this research project respond to several challenges of modern-day mining, such as the need to increase process efficiency, reduce costs, enable mining projects at greater depths where higher temperatures are often found, and the urge to develop safer methodologies for underground-environment monitoring.

Resumo

Os processos térmicos que ocorrem no interior de minas subterrâneas são conhecidos desde a antiguidade, quando o homem se deparou com ambientes hostis à sua presença e buscou formas de modificá-los para garantir seu bem-estar. Como é de se imaginar, estes processos de climatização eram, inicialmente, predominantemente empíricos. Com o avanço da ciência e do conhecimento sobre os ambientes subterrâneos, passou-se a ter um controle maior sobre as dinâmicas ambientais: quanto maior o conhecimento sobre a fenomenologia envolvida nas trocas de calor em galerias subterrâneas, maiores as possibilidades de intervenção humana para controlar as condições-ambiente. Paralelamente ao estudo da temperatura em minas subterrâneas, deu-se o desenvolvimento das ciências geotérmicas, com perspetiva inversa: na geotermia o calor em subterrâneo pode ser um recurso, ao passo que na mineração é usualmente um problema. Este projeto de investigação busca uma conciliação entre estes pontos de vista e almeja integrar os fluxos de calor em subterrâneo aos recursos aproveitáveis e de valor económico caracterizável que encontramos em sub-superfície. Esta perceção do calor como recurso quantificável está presente em diferentes etapas deste trabalho, sendo elas, principalmente, a **compreensão** dos fluxos de energia, a **modelação** das trocas de calor para estimar a variação de temperatura e conteúdo energético do ar (ou água), a **monitorização** de ambientes subterrâneos reais, e a **confrontação** do modelo com a realidade. O que se pretende com o modelo é criar uma ferramenta analítica para identificar oportunidades de recuperação de calor em minas subterrâneas através da estimação da temperatura de saída de um fluido, que pode ser ar, no caso da ventilação de minas em operação, ou água, no caso de minas desativadas. Há precedentes históricos que justificam estes esforços, já que a utilização de redes de galerias inundadas como permutadores de calor e a recirculação parcial de ar de exaustão são ideias que já foram colocadas em prática em diversas minas, permitindo o reaproveitamento do calor disponível em redes subterrâneas de galerias, mas sempre com pouco planeamento ou suporte teórico prévio; é justamente nesta etapa de estudo de viabilidade que o modelo pode ser útil. Além disto, há possibilidades de utilizar esta ferramenta de estimação de variação de temperatura para otimizar operações de ventilação e climatização. O decorrer da investigação demonstrou, por outro lado, que a modelação em si é insuficiente, sendo necessário validar o modelo através de métricas bem definidas e que permitam aplicar critérios sistemáticos para avaliar seu desempenho; a validação deste tipo de modelo é subdesenvolvida e pouco discutida, no que esta tese é também propositiva de uma abordagem sistemática inovadora para a validação de modelos análogos. Para a recolha de dados experimentais utilizados na validação, desenvolveu-se um sistema de monitorização não-invasivo e em tempo real com transmissão de dados sem fio, baseado nas tendências atuais mais promissoras da monitorização subterrânea. Os esforços para a compreensão fenomenológica dos mecanismos de transferência de calor em subterrâneo, profundamente intrincados e complexos, permearam todas as outras etapas do trabalho, que termina da mesma forma que se inicia, mas com considerável amadurecimento de ideias e conceitos: buscando uma visão mais ampla dos fluxos de energia em estruturas subterrâneas. Como resultados principais deste trabalho, destacam-se a criação de um modelo cuja validação demonstrou ser robusto e, no mínimo, adequado à finalidade para a qual foi desenvolvido, a criação de uma sistemática de validação mais ampla e coerente com as grandezas envolvidas na modelação dos fenómenos estudados, e o desenvolvimento de um sistema de monitorização ambiental em tempo real. A investigação realizada, de modo geral, responde a diversos desafios da mineração contemporânea, como a necessidade de aumentar a eficiência de processos, reduzir custos, viabilizar projetos mineiros a grandes profundidades onde frequentemente se encontram temperaturas elevadas e desenvolver metodologias mais seguras de monitorização ambiental. Este projeto de investigação deixa também alguns caminhos a serem seguidos futuramente que podem produzir resultados valiosos para a mineração.

Lista de símbolos

Símbolo	Unidade	Descrição
k	$\mathrm{W\,m^{-1}\,{}^{\circ}C^{-1}}$	condutibilidade térmica
C_p	$\mathrm{J\,kg^{-1}\,K}$	calor específico
ρ	$\mathrm{kg\,m^{-3}}$	
α	$\mathrm{m^2\,s^{-1}}$	difusividade térmica
T	°C,K	temperatura
μ	$\mathrm{Pa\,s}$	viscosidade dinâmica ou absoluta
ν	$\mathrm{m^2\,s^{-1}}$	viscosidade cinemática
v,u	$\mathrm{m\,s^{-1}}$	velocidade
p	Pa	pressão
w	$\mathrm{N\,m^{-3}}$	peso específico
E	J	energia
r_h	m	hidráulico
A	$\mathrm{m^2}$	área
P	m	perímetro
Q	$\mathrm{m^3\,s^{-1}}$	fluxo volumétrico
Q_m	$\mathrm{kg\,s^{-1}}$	fluxo mássico
q	$\mathrm{W^2\,m^{-1}}$	fluxo de calor
h	$\mathrm{W\,m^{-2}\,K^{-1}}$	coeficiente de convecção
Nu	-	Número de Nusselt
D	m	diâmetro de um ducto ou galeria
L	m	comprimento de um ducto ou galeria
f, Λ	-	fator de fricção de Darcy
Re	-	Número de Reynolds
Pr	-	Número de Prandtl
v^*	$\mathrm{m\,s^{-1}}$	velocidade de fricção
u^+	-	velocidade adimensional
κ	-	Constante de Kárman
Π	-	Constante de Cole
k_m	metre	rugosidade média
C_f	-	Fator de Fricção de Fanning
τ	Pa	tensão de cisalhamento
n, s, e, w	-	fronteiras de um volume de controle
N, S, E, W	-	pontos vizinhos a um volume de controle
T_p	°C	temperatura em um ponto
T_P^*	°C	temperatura em um ponto após passo de tempo

Estrutura do documento

Gostaria, antes de apresentar o conteúdo realmente importante da tese, de fazer alguns comentários sobre a forma como organizei este texto.

A Introdução contém, de forma bastante superficial, a contextualização da temperatura no interior de minas subterrâneas, da ventilação, e da modelação dos fenómenos físicos que ocorrem nestes ambientes, assuntos que retomo em outras partes do texto de forma mais aprofundada. Neste capítulo, pretendi expor as ideias básicas que permeiam este projeto de investigação.

Poderia dizer que o capítulo subsequente, ao qual chamei de Motivação e Objetivos, é também um capítulo introdutório. Por **motivação**, me refiro a um potencial de influência deste trabalho na realidade mineira atual; em outras palavras, falo sobre as razões pelas quais penso que esta tese é relevante para a mineração e para a ciência. Quando falo em **objetivos**, me refiro a onde quero chegar com este projeto de investigação (os objetivos que espero alcançar), e quais são os *milestones* que imagino que me levariam a atingí-los, ou seja, falo também sobre os objetivos que motivam a realização de cada etapa do projeto de investigação como forma de atingir os resultados finais esperados.

Quando falo em Revisão do estado-da-arte da modelação, tenho intenção de contextualizar a existência de meu projeto de investigação frente a projetos de investigação similares. Procuro mostrar parte do que já foi feito neste tema e identificar lacunas, que tento preencher com o meu trabalho. É, em última análise, uma busca por antecedentes, para que eu possa garantir a originalidade de meu trabalho e sua razão de existir. Não é, no entanto, o único capítulo de revisão bibliográfica, pois faço isto em praticamente todos os outros capítulos, mas de forma mais direcionada a seus respetivos conteúdos.

Em Transferência de Calor em Galerias Subterrâneas, discuto os aspetos mais importantes que estão associados aos fenómenos que quero modelar. Aqui também há uma extensa revisão bibliográfica, em que faço um enquadramento teórico do problema. Começo o capítulo discutindo conceitos básicos, e depois particularizo estes conceitos para o ambiente (galeria subterrânea) que desejo investigar. No final do capítulo, aplico um balanço de energia para uma galeria subterrânea, que considerei ser um ducto de grandes dimensões com paredes espessas. Ao longo do capítulo, a revisão bibliográfica torna-se síntese a medida em que adapto conceitos para uma galeria subterrânea. Podemos dizer que é aqui que eu estudo, compreendo e penso sobre o problema das trocas de calor e escoamento de fluidos no interior de galerias subterrâneas.

No capítulo seguinte chamado Solução Numérica da Equação de Balanço de Energia, falo um pouco sobre métodos utilizados em dinâmica dos fluidos computacional e os aplico para solucionar o balanço de energia do capítulo anterior. É aqui que a modelação matemática é realmente feita, e onde descrevo a heurística e algoritmia do modelo, além de discutir suas limitações numéricas. Termino este capítulo mostrando algumas simulações preliminares e dizendo porque considero fundamental a validação do modelo.

No capítulo Amostragem de temperatura em uma galeria subterrânea, faço uma revisão bibliográfica do que considero mais interessante e promissor na monitorização ambiental em subterrâneo. Falo sobre como o próprio desenvolvimento do trabalho nos empurrou para confecionar nossos próprios aparelhos de recolha de temperatura e detalho este desenvolvimento. Apesar de não sermos *experts* em eletrónica digital, o Professor José Soeiro e eu decidimos tentar desenvolver uma aplicação com recolha automática e transmissão de dados sem fio, para tentar emular os sistemas mais modernos que já existem em algumas minas. Justamente por não sermos peritos no assunto, este capítulo é uma ode à **gambiarra**[1].

O capítulo em que trato da Recolha de dados experimentais e Validação do Modelo é o mais longo. Poderia ter separado em mais partes, mas penso que sua extensão é um bom demonstrativo de que é uma parte longa, dispendiosa, e complexa do trabalho. Para modelar, precisamos conhecer os ambientes. Para mim, a aplicação e validação de um modelo como o que proponho neste texto começa quando colocamos o pé dentro de uma galeria: tudo o que se segue importa, pois todos os estudos do ambiente são tentativas de enxergar a **realidade**; não se observa a realidade de dentro de uma sala, e não se aplica um modelo sem se conhecer muito bem o ambiente estudado. Quando terminei este capítulo, percebi que é na validação que realmente está boa parte do mérito do trabalho, pois é através dela que se conhece o poder preditivo de

[1] Expressão que utilizamos no Brasil para descrever uma solução inventiva utilizando improviso e criatividade. Talvez o maior expoente da gambiarra seja o personagem televisivo MacGyver, conhecido por desativar mísseis com clipes de papel e confecionar metralhadoras com fósforos, gravetos e corda.

um modelo e que se pode pormenorizar suas limitações de aplicação. Sem isto, não há sentido prático em modelar coisa alguma.

Os capítulos têm, individualmente, começo, meio e fim. Na Conclusão, retomo algumas discussões e falo sobre o que considero mais importante sobre cada capítulo. Também falo um pouco sobre o processo de desenvolvimento do projeto de investigação de um ponto de vista um pouco mais pessoal, e encerro o trabalho.

Por fim, nos Apêndices A - D mostro o processo de filtragem de todas as séries de dados. É uma forma que encontrei de mostrar os dados experimentais, que são muito numerosos. Gostaria de tê-los apresentado numericamente na tese, mas seria preciso colocar tabelas com algumas centenas de milhares de linhas. Se houver interesse em olhar para os números, peço que entre em contacto para que eu envie os ficheiros Excel.

Alguns outros comentários que valem para todo o texto:

- Só coloquei na Lista de Símbolos as variáveis que mantém mesma simbologia para todo o texto e as que são mais importantes. Julguei que não valia muito a pena acrescentar à lista alguns símbolos que aparecem de forma esporádica; neste caso, explico ao longo do próprio texto o que o símbolo representa. Os símbolos estão listados em ordem de aparição no texto.

- Quando aparecer o símbolo ▶ na legenda de alguma imagem, há um vídeo associado à figura; basta clicar no símbolo para abrir.

- . Principalmente para expressar ideias diferentes. Utilizo, por exemplo, **o roxo** para destacar coisas que são referentes ao meu trabalho: quando escrevo **modelo**, me refiro ao meu modelo. Uso **este tom de azul** quando falo de Leis físicas, equações, cientistas, e outras coisas que considero cientificamente importantes. Quando quero somente destacar alguma informação do texto, sem atribuir nenhum significado além do que realmente está escrito, **o faço em negrito**. Isto, por mais que pareça algo inocente, me ajuda a fazer um mapa mental para conectar ideias; é um recurso que considero muito útil.

- O texto está escrito em português luso-brasileiro. O Brasil é minha terra natal, mas passei os últimos quatro anos em Portugal; é inevitável que as formas de expressão se misturem um pouco no texto. Tentei utilizar a grafia de Portugal e segui ao máximo o acordo ortográfico. O Professor José Soeiro me ajudou a substituir algumas expressões brasileiras por seus correspondentes em português de Portugal, mas certamente algumas coisas ainda ficaram da forma que escrevemos no Brasil. Não foi por falta de esforço, e a única culpada nisto é a língua portuguesa, que insiste em ser rica, plural e bela.

- Valorizo muito o lúdico e a criatividade. Como o genial ator e comediante John Cleese disse certa vez em uma palestra sobre a criatividade ministrada para gestores[2], há uma diferença fundamental entre seriedade e solenidade: é possível ser sério com bom-humor; a criatividade e a liberdade de pensamento e expressão em nada diminuem a importância que se dá a um problema sério. A solenidade é, por si, inútil. Não é impossível fazer um doutoramento e divertir-se no processo; ao contrário, isto deveria ser norma. Algumas poucas vezes me permito fugir um pouco da formalidade no texto, pois percebo a tese como um documento pessoal, e que deve refletir, na medida do bom-senso, a personalidade de quem escreve.

Agradeço, por fim, a quem estiver lendo esta tese. Quem faz um trabalho como este tem de se sentir muito honrado quando alguém se dispõe a ler um texto tão extenso. Muito obrigado pela tua paciência e disponibilidade em pensar junto comigo sobre o problema que agora tentarei lhe apresentar.

[2] Vale a pena ser vista, está disponível em https://www.youtube.com/watch?v=toWQ_BQF8Aw (dica do Professor Soeiro!)

Cada um de nós compõe a sua história
Cada ser em si
Carrega o dom de ser capaz
E ser feliz

Tocando em Frente, Almir Sater & Renato Teixeira

1 Introdução

A questão da temperatura em minas subterrâneas é conhecida e documentada desde a antiguidade. Placas com pinturas datadas do século VI a.C contém representações de mineiros trabalhando nus devido à ocorrência de altas temperaturas em galerias de mineração, o que indica que este era um problema comum já nesta época. O fluxo de ar em subterrâneo foi concebido pelos romanos para lidar com questões de qualidade do ar e temperatura, através da escavação de poços de ventilação que permitiam a saída do ar quente e entrada de ar mais fresco pelo movimento natural de convecção.

Figura 1.1: Trabalhadores mineiros da antiguidade. Imagem retirada de Ancient Mining.

Por outro lado, a ocorrência de baixas temperaturas em subterrâneo não é incomum em algumas regiões: as minas mais frias do mundo chegam a registar temperaturas médias abaixo dos $-40\,^{\circ}\mathrm{C}$ por exemplo (Els, 2016). Os desafios impostos pelas condições de temperatura em subterrâneo podem ser bastante restritivos e exigir operações de condicionamento para promover condições mínimas para a presença humana.

Promover conforto térmico em galerias subterrâneas é crucial para garantir o bem estar dos trabalhadores mineiros, e é, na maioria dos casos, um processo complexo que implica modificar as condições naturais de temperatura encontradas no interior de maciços rochosos. Sistemas subterrâneos são redes intrincadas de galerias, poços, estopes e aberturas dos mais diversos tipos, de modo que planear o condicionamento destes ambientes é uma tarefa complicada. Alterar um estado de equilíbrio natural, como se sabe, requer a realização de *trabalho*.

O condicionamento de ambientes subterrâneos envolve fluxos e transferências de energia (processo que chamamos de **calor**) como resultado do movimento do ar e da diferença de temperatura entre fluido (ar) e sólido (rocha), além de outras fontes de calor frequentemente encontradas em minas subterrâneas. Ao final deste processo, o ar que flui por uma rede de galerias retorna à superfície com temperatura diferente do ar de entrada, podendo ser mais frio ou mais quente.

Este ar de saída ou de exaustão é tratado historicamente como um resíduo indesejado ou rejeitado na mineração, raramente sendo aproveitado. O potencial de aproveitamento do ar de exaustão está relacionado com o fato de ser exposto, em subterrâneo, a condições que podem ser bastante distantes das atmosféricas; o ar de exaustão tem como característica interessante o fato de ser diferente do ar atmosférico quanto ao seu conteúdo energético.

Observando-se uma mina subterrânea como um sistema, realiza-se trabalho para condicionar os ambientes subterrâneos e descarta-se o ar que resulta de processos termodinâmicos e que sai da mina. Este é um procedimento altamente ineficiente e que deixa de aproveitar o ar de exaustão como fonte de energia térmica para aquecimento ou arrefecimento em outros processos da mina ou até na climatização de diferentes ambientes na superfície.

A operação de ventilação é historicamente concebida como forma de garantir condições adequadas de trabalho em subterrâneo, mas muito raramente se leva em consideração o seu produto final, que é o ar de exaustão. O não aproveitamento do calor é fruto, principalmente, de uma falta de perspetiva de recuperação de calor e de conhecimento técnico dos processos térmicos que ocorrem em uma mina subterrânea.

Como os processos termodinâmicos que se dão a partir da circulação de ar em galerias subterrâneas são de grande interesse na mineração, há uma necessidade de compreende-los para que possam ser dimensionadas as operações de climatização de forma adequada. As metodologias existentes são divididas em empíricas e teóricas, e raramente incluem aspetos transientes do estado e distribuição de temperatura no interior de galerias, o que é uma limitação importante.

As metodologias empíricas baseiam-se na experiência e em observações e procedimentos práticos, que muitas vezes são suficientes para a climatização mas não levam a uma compreensão profunda dos fenómenos físicos. As abordagens estritamente teóricas, por outro lado, são complexas e podem não ser adaptáveis a prática quotidiana. É buscando um equilíbrio entre estes pontos de vista que o estudo da ventilação tem se desenvolvido ao longo dos anos. Mais recentemente, os recursos computacionais permitiram um salto de qualidade no dimensionamento e planeamento destas operações, que pode ser feito através de softwares que se baseiam na **modelação dos fenómenos físicos em ambientes subterrâneos**.

A modelação é um recurso utilizado para descrever o comportamento de um sistema físico real através da representação de parte dos fenómenos envolvidos. O desafio da modelação é o de selecionar as características mais importantes de um sistema e descartar comportamentos menos importantes. É, antes de qualquer coisa, um processo iterativo que tem na experiência prática e experimentação um indicativo de sucesso ou fracasso das premissas inicialmente adotas. A modelação se dá, portanto, na interface entre teoria e prática.

O aproveitamento de calor na mineração depende da caracterização adequada do potencial energético dos recursos, o que envolve sua modelação. O que um modelo de estimação de trocas de calor pode fazer, dentre outras coisas, é determinar a viabilidade do aproveitamento energético de um recurso geotérmico em sub superfície. Esta seria uma aplicação prática mais direta para os modelos de estimação de trocas de calor, mas não a única: também permitem simular condições ideais para o bem estar humano em subterrâneo, otimizar a ventilação através do ajuste do caudal para um valor mínimo requerido, e também podem ser ferramentas analíticas interessantes para descrever o comportamento termodinâmico de um sistema.

O aproveitamento energético e o aumento da eficiência energética são, nos dias atuais, focos de discussão nas mais diversas áreas das ciências e da engenharia. Este trabalho visa absorver esta perceção e aplicá-la às operações mineiras em subterrâneo. Parte de uma observação dos fenómenos físicos através da uma ótica de eficiência energética de processos, isto é, de uma perspetiva termodinâmica dos fluxos de energia relacionados aos ambientes subterrâneos.

A partir da observação, tenta-se emular estes fenómenos por meio de um modelo numérico, que é a base deste trabalho, mas à qual não se resume. Este se dedica à compreensão dos fluxos de energia em subterrâneo em toda a sua complexidade, da modelação à monitorização ambiental. O contexto é a expansão de uma cultura de desperdício zero de recursos na mineração, no caso, de recursos energéticos. A intenção por trás desta investigação é a de identificar oportunidades de aproveitamento térmico para viabilizar projetos de recuperação de calor.

O projeto de investigação tem um caráter propositivo e experimental, em que todas as oportunidades de caracterização térmica de ambientes subterrâneos são aproveitadas e desenvolvidas. Por diversas vezes, a investigação cruza os limites da mineração e agrega outras áreas do conhecimento, usualmente inexploradas

por mineiros, como a termodinâmica e a eletrónica digital. Considera-se que os profissionais de mineração têm uma visão privilegiada dos processos mineiros e que devem utilizá-la para propor soluções concretas para os seus próprios problemas.

O plano de fundo da investigação é também bastante diverso. Envolve a perceção social da mineração no que diz respeito a um melhor aproveitamento de recursos e de uma redução de impactos e desperdícios, os desafios técnicos intrínsecos à mineração profunda, as restrições económicas associadas às flutuações de preços das *commodities*, a otimização de operações de climatização, e a uma promoção de bem-estar humano em ambientes subterrâneos.

Deseja-se inverter a perceção do calor como resíduo na mineração, buscando alternativas para transformá-lo em recurso económico. O calor em subterrâneo é um recurso mineral que pode ser minério: este projeto de investigação visa caracterizar os processos térmicos e demonstrar que é possível quantificar, através de estimações, o conteúdo energético do ar de exaustão, para eventualmente, se demonstrar seu potencial de exploração como recurso.

2 Motivação e Objetivos

"O conteúdo de **calor** do ar da mina é mantido dentro de **limites** estabelecidos para **conforto**, **segurança**, e eficiência de trabalho dos seres humanos (...) o condicionamento de ar se torna necessário quando a ventilação por si só é inadequada para manter padrões atmosféricos e de calor **aceitáveis**" (Hartman et al., 1997).

"Outro parâmetro a ser considerado em ambientes subterrâneos é o **calor**, sendo que a ventilação desempenha um papel importante em sua **dissipação**" (Sierra, 1989).

"As técnicas para a **atenuação ou redução de temperaturas** que superem os níveis de **conforto** dependem da profundidade em que se localizam os ambientes de trabalho subterrâneo" (Vidal Félix Navarro Torres e da Gama, 2005).

"Embora a definição de ambiente adequado varie de país para país, geralmente significa garantir a circulação suficiente de ar para manter ao menos 19.5% de oxigénio em áreas em operação (...) e **calor e humidade abaixo de limites determinados** (Thakur, 2018).

2.1 Motivação do projeto de investigação

Na mineração, o calor e a temperatura em subterrâneo foram tratados historicamente como subproduto indesejável. A literatura relacionada à ventilação de minas utiliza conceitos de **balanço de energia** para calcular **dissipação de calor** e **adequação da temperatura às normas-padrão**, mas frequentemente ignora a outra direção da troca de calor, que é o **acréscimo de temperatura no ar de ventilação**. Quando se fala em perda de carga devido ao atrito, não se fala em ganho de temperatura devido a fricção; como se sabe, há transformação de energia, e não perda de energia.

A conservação de energia é utilizada como meio para atender aos objetivos da climatização de ambientes subterrâneos, o que é de fato indispensável para a segurança e o conforto nestes ambientes. Porém, habituamo-nos a ignorar uma parte importante do processo: há transformação energética no ar que sai da mina. Este projeto de investigação propõe uma inversão de ponto de vista: **o olhar para o ar de exaustão como fonte de energia**.

Quando se pensa em eficiência de um processo, deve-se observá-lo na sua totalidade. Há um evidente sub-aproveitamento do calor em subterrâneo, que através de processos físicos complexos, é transportado para fora da mina no ar de exaustão. Uma mina é, do ponto de vista térmico, um grande permutador de calor natural. Para além da ventilação, uma mina subterrânea desativada, por exemplo, mantém seu potencial térmico por tempo indefinido, que é raramente aproveitado.

A discussão acerca deste tema é mais complexa do que se possa ter dado a entender. Não é simples recuperar calor e não é sempre que uma mina possui as condições ideais para promover um aproveitamento geotérmico. O que este projeto de investigação almeja, por outro lado, não é que toda estrutura subterrânea seja aproveitada sob o ponto de vista térmico, mas que estejamos aptos a **compreender os fenómenos termodinâmicos**, a **identificar oportunidades de reaproveitar energia** e a **aumentar a eficiência termodinâmica** de certos processos em subterrâneo.

A partir desta perspetiva, existem motivações de diferentes naturezas para caracterizar os processos termodinâmicos em uma mina subterrânea, pois a questão da eficiência tem grande relevância **ambiental**, **económica** e **social**. Outras grandes motivações deste projeto são também a curiosidade e o desafio de contribuir para a construção de conhecimento nesta área, ainda pouco desenvolvida na mineração. As motivações para o desenvolvimento da investigação deste tema podem ser entendidas também como o **conjunto de razões que fazem este tema ser relevante para a mineração e para a ciência na atualidade**.

2.1.1 O ponto de vista ambiental

Sob a ótica ambiental, a eficiência termodinâmica de uma mina subterrânea é relevante devido ao alto consumo de energia elétrica e fóssil em operações de climatização dos ambientes subterrâneos, e também devido ao potencial de aproveitamento dos recursos geotérmicos associados a estes ambientes.

O impacte do consumo de energia elétrica na indústria mineira é grande, uma vez que:

1. 64.6% do total de energia elétrica gerada no mundo em 2018 foi produzida a partir de combustíveis fósseis (BP, 2018), sendo a geração de eletricidade e calor as maiores fontes de emissões de CO2, contabilizando 42% do total (International Energy Agency, s.d.);

2. A indústria mineira é uma das mais eletro-intensivas, consumindo frações consideráveis de eletricidade especialmente em países com maior participação da mineração na economia, como os Estados Unidos (3%) ou a África do Sul (6%) (Monica Carvalho e Millar, 2012);

3. a nível mundial, a mineração é responsável pelo consumo de aproximadamente 4% de toda a energia elétrica produzida (International Energy Agency, 2017);

O Roteiro para transformar a União Europeia em uma economia competitiva e com baixas emissões de carbono até 2050 (*Roadmap for moving to a competitive low-carbon economy in 2050*) destaca a necessidade de descarbonização da produção de energia e enfatiza um potencial na redução de emissões através de uma maior eficiência energética na indústria: "a aplicação de processos industriais e equipamentos mais avançados e eficientes (...) pode contribuir significativamente, permitindo que setores eletro-intensivos reduzam emissões pela metade ou mais" (The European Comission, 2011). Em Portugal, o RNC2050 tem como um de seus objetivos reduzir o consumo final de energia em ao menos 22% e a intensidade energética em 50% até 2050, relativo ao consumo em 2015 (*Roteiro para a Neutralidade Carbónica* 2018).

Com a necessidade de reduzir o consumo de energia na indústria, em especial nas indústrias eletro-intensivas através do aumento da eficiência de processos, pode-se pensar que uma melhor compreensão e gestão dos fluxos energéticos em minas subterrâneas pode, eventualmente, contribuir para uma **melhor distribuição da energia na forma de calor disponível em subterrâneo para outros processos da mina**.

A eficiência energética em edifícios também tem papel importante nesta discussão: "o ambiente da construção permite oportunidades de baixo-custo para a redução de emissões, principalmente através do aumento da performance energética. As análises da Comissão demonstram um potencial de redução de emissões de cerca de 90% até 2050" (The European Comission, 2011). A redução do consumo de energia em edifícios está intimamente relacionada a mineração subterrânea em ao menos dois aspetos: na **utilização do potencial bioclimático de construções subterrâneas para reduzir o consumo de energia**, e no **aproveitamento geotérmico de minas para a climatização de distritos e comunidades próximos**.

2.1.2 O ponto de vista económico

Do ponto de vista de custos, a caracterização termodinâmica de ambientes subterrâneos é relevante pois pode **reduzir custos associados a ventilação e ao pré-condicionamento do ar** através da otimização destas operações.

A ventilação é uma das operações mais dispendiosas de uma mina subterrânea, sendo responsável por cerca de 25 a 50% de seu consumo total de energia elétrica (Costa, 2020), que por sua vez pode representar de 15 a 40% do OPEX de uma mina em operação (ARENA, 2018).

Em regiões de temperaturas extremas, o pré-condicionamento do ar de ventilação é uma operação dispendiosa e intimamente relacionada com a queima de combustíveis fósseis. Estudos dos fluxos de calor, em especial relacionados ao ar de exaustão da ventilação, podem reduzir significativamente os custos de pré-condicionamento através da recirculação parcial de ar, como demonstrado por Hall et al. (1990). Kalantari e Ghoreishi-Madiseh (2019) demonstraram que um sistema de recuperação de calor do ar de exaustão pode representar uma redução da ordem de 400 mil dólares canadianos numa operação de pré-condicionamento de ar que consome tipicamente 530 mil dólares canadianos em combustíveis fósseis.

Uma modelação mais pormenorizada das trocas de calor em ambientes subterrâneos pode contribuir também para estimativas mais realistas das variações de temperatura induzidas pela variação do caudal de ar da ventilação ao longo do tempo. Isto é enriquecedor para a modelação termodinâmica de minas subterrâneas já que os modelos existentes são, em sua maioria, estáticos, e apresentam limitações quando são aplicados processos de ventilação do tipo **VOD** (*Ventilation on Demand*).

Operações de ventilação do tipo **VOD** têm como objetivo a redução de custos de ventilação através de otimização. A estratégia da **VOD** é de compartimentar o domínio da mina (do ponto de vista da ventilação) e ventilar de forma localizada, mediante demandas pontuais que podem variar com o tempo (só ventilar quando houver desmonte, por exemplo) e utilizando o mínimo caudal possível para atender aos requisitos ambientais desejados. Na **VOD**, passa a ser mais interessante compreender localmente os fluxos energéticos das estruturas subterrâneas em detrimento da caracterização de todo o sistema.

O **modelo**, que funciona para galerias (mas pode ser adaptado a outras estruturas), pode ser aplicado sistematicamente para diversas partes da mina, de modo a estimar as necessidades locais de ventilação do ponto de vista **temporal**. Há, portanto, uma motivação de caráter económico para o desenvolvimento do **modelo**, já que pode ser utilizado para estimar o **potencial de reaproveitamento de energia térmica**, poupando custos de climatização e pré-condicionamento, e dar **suporte à otimização da ventilação**, reduzindo o consumo de eletricidade consumida por ventiladores.

2.1.3 O ponto de vista social

O mero cumprimento das regulações impostas pelos Estados tem sido cada vez mais insuficientes como forma de atender às expectativas da sociedade em relação a questões que envolvem a mineração (Prno, 2013). Neste contexto, surge a necessidade crescente de uma **licença social para operar** (SLO), que está fortemente ligada a perceção da legitimidade da atividade mineira pela sociedade.

Um dos pontos de vista importantes da legitimidade da mineração é o campo moral, que abrange não só o cumprimento de objetivos visíveis, como a redução de emissões e a redução de acidentes, como também incorpora os meios utilizados para se atingir estes objetivos, como a adesão à melhores práticas e métodos de produção mais adequados (Saenz, 2019). Neste sentido, a mineração tem o desafio de reduzir os seus impactos ambientais e demonstrar que incorpora as melhores práticas operacionais como meio para obter a legitimidade requerida pelas comunidades locais, pelos seus *stakeholders*, pelo Estado e pela sociedade.

Torna-se indispensável implementar práticas operacionais que promovam uma maior eficiência, o que no contexto deste projeto de investigação está mais uma vez associado à **caracterização dos processos termodinâmicos que ocorrem no interior de galerias subterrâneas**, o que pode levar a implantação de medidas mais inteligentes na gestão de energia da mina.

2.1.4 Desafios técnicos, otimização e eficiência

Em relação á viabilização técnica de novos projetos, há uma urgência no desenvolvimento de novas tecnologias, uma vez que minérios de elevados teores são cada vez mais difíceis de obter e a sua produção feita em minas subterrâneas cada vez mais profundas (Thrybom et al., 2015). A mineração em profundidade ocorre em contexto desafiador, onde soluções inovadoras e o desenvolvimento de melhores práticas são requeridos, além da implementação de procedimentos de segurança adicionais, de modo a superar as dificuldades e garantir os ganhos económicos pretendidos (Ranjith et al., 2017).

Um dos aspetos críticos relacionados à mineração profunda é a questão da temperatura, que em determinadas regiões geográficas pode atingir valores extremos. A gestão dos fluxos de calor e da temperatura em subterrâneo passa a ser uma questão fundamental na viabilização de projetos mineiros a maiores profundidades, e está também alinhada com este projeto de investigação, que pode oferecer soluções quanto à **caracterização do estado de temperatura em estruturas subterrâneas**.

2.2 Objetivos da investigação

A investigação tem como objetivo final a **criação de um modelo numérico que dê suporte a uma gestão eficiente dos fluxos de calor em subterrâneo**, e que eventualmente **viabilize projetos de recuperação de calor de minas subterrâneas**. Entende-se por gestão eficiente um conjunto de ações para minimizar a introdução de energia e eventualmenmte maximizar a sua retirada, pelo reaproveitamento do calor do ar de exaustão e do calor disponível na rocha, pela otimização da ventilação e da climatização dos ambientes subterrâneos, e pelo aproveitamento de estruturas subterrâneas de minas desativadas como permutadores de calor. Estes objetivos estão alinhados às motivações do projeto de investigação, e podem ser compreendidos como os **objetivos finais** ou até mesmo como os **resultados esperados para o projeto de investigação**.

Os **objetivos específicos da investigação** são aqueles que viabilizam os **objetivos finais** e estão relacionados ao processo de desenvolvimento do modelo. Estes objetivos específicos são, principalmente:

Construção do modelo Criar um **modelo numérico** que inclua aspetos até agora pouco explorados em outros modelos mas que são de interesse para a mineração, mais especificamente o caráter transiente dos fenómenos termodinâmicos que ocorrem numa galeria ou via subterrânea envolta por grandes massas de rocha. Deve oferecer uma representação gráfica bi-dimensional compreensível em que se possa observar a ocorrência dos fenómenos (e não só estimar variação de temperatura) que afetam a evolução da temperatura no interior de vias subterrâneas e de seu entorno frente a diferentes condições iniciais e sua modificação ao longo do tempo.

Modelação dos fenómenos físicos Trazer para o contexto mineiro abordagens teóricas da mecânica dos fluidos e da troca de calor até agora pouco utilizadas em engenharia de minas, através de um balanço de energia que inclua os mecanismos mais importantes de troca de calor e que também agregue parâmetros relevantes e particulares das minas subterrâneas, como a rugosidade e o escoamento turbulento.

Heurística Adaptar e aplicar soluções de mecânica dos fluidos computacional ao problema que se deseja resolver através da criação de um novo algoritmo, que deve ser rápido e eficiente.

Abrangência de aplicações Desenvolver um **modelo** que possa ser aplicado tanto para sistemas geotérmicos quanto para galerias ventiladas, com ou sem equipamentos mecânicos, pessoas, e outras fontes de calor, considerando inclinação e variação de altitude. É importante que o **modelo** seja versátil e construído sobre uma base que permita uma adaptação simples a outros cenários.

Validação Validar o **modelo** frente a um conjunto de dados experimentais e através de sua aplicação a casos reais que envolvem troca de calor em ambientes subterrâneos. Deve ser submetido a testes e deve ser medido, quantitativamente e qualitativamente, acerca de sua eficácia na estimação do estado de temperatura destes ambientes.

Construção de conhecimento Expandir a compreensão dos fenómenos termodinâmicos de minas subterrâneas através da utilização de recursos computacionais e de metodologias de monitorização ambiental, que serão necessárias à obtenção de dados experimentais para validar o **modelo**. O **modelo** deve promover a abertura de um caminho de investigação que possa continuar a ser desenvolvido em outros projetos científicos. As conclusões deste projeto devem instigar o desenvolvimento de outras ideias relacionadas a este tema, e estes caminhos devem ser apontados no final do projeto de doutoramento.

Ao longo do desenvolvimento da investigação, descobriu-se outros objetivos relacionados ao projeto, dos quais se destaca o desenvolvimento de um sistema de monitorização ambiental em tempo real para minas subterrâneas. A modelação é condicionada em grande medida pela qualidade e quantidade dos dados recolhidos; quanto mais se conhece a realidade, melhor se incorpora certas características e comportamentos de um sistema.

Na mineração, estes sistemas inteligentes e integrados que permitem fluxos de informação de ambientes subterrâneos para a superfície estão subdesenvolvidos. Há um grande potencial de desenvolvimento para estas tecnologias, sobretudo por razões de segurança operacional, mas porque também podem contribuir significativamente para a caracterização termodinâmica dos ambientes subterrâneos sob um ponto de vista puramente científica. Os ambientes subterrâneos possuem bases de dados escassas, praticamente intocadas por ***Big data***, sendo que a construção de conjuntos de dados mais robustos dos parâmetros ambientais subterrâneos pode levar a novas descobertas.

Neste sentido, um **objetivo adquirido ao longo da investigação** foi o de recolher dados de temperatura associados a medidas temporais, na maior quantidade possível. Como será discutido mais a fundo em outros capítulos, isto levou a resultados inesperados, como a utilização da temperatura como parâmetro-chave da compreensão dos ciclos de operação da mina, da ocorrência de desmontes, do fechamento e abertura de portas, da mudança de turnos, e da mudança do regime de operação dos ventiladores.

Estes **objetivos adquiridos**, aliados aos **objetivos finais** e **objetivos específicos** da investigação, levaram de fato ao desenvolvimento de um projeto de investigação com resultados inéditos e com desdobramentos futuros promissores para a mineração.

3 Revisão do estado-da-arte da modelação de temperatura em minas subterrâneas

A ideia de realizar uma revisão do estado-da-arte numa tese de doutoramento tem diversos significados possíveis: pode-se pensar na revisão teórica do tema, na busca por uma base científica que dê suporte aos trabalhos, e também pode ser compreendido por uma **"busca por antecedentes"**. Neste capítulo, o que se chama de revisão do estado-da-arte é uma pesquisa cuidadosa do que já foi feito de similar dentro do tema em que se enquadra o projeto de investigação. É, em suma, uma análise crítica do que já foi feito, e uma inserção da investigação desenvolvida em lacunas identificadas nesta revisão, o que garante seu **ineditismo** e **relevância**, bem como justifica a sua existência e desenvolvimento.

No início deste projeto de investigação, foi feita uma busca mais abrangente por **projetos de recuperação de calor em minas subterrâneas** e de projetos de investigação envolvendo a **modelação das trocas de calor em ambientes subterrâneos**, temas que muitas vezes são tratados simultaneamente. Neste capítulo serão mencionados alguns modelos e estudos de casos que se propõem investigar estes fenómenos termodinâmicos a partir de abordagens bastante variadas, do empirismo puro à descrição teórico-analítica mais estrita.

Identificou-se uma lacuna, em especial no que diz respeito à modelação dos fenómenos de transferência de calor partindo de abordagem teórico-analítica, na caracterização das trocas de calor em galerias subterrâneas de um ponto de vista mais **genérico e universal**; isto é, que pudesse lidar ao mesmo tempo com a presença de água ou ar, com escoamentos laminares ou turbulentos, com a existência de outras fontes de calor no interior da própria galeria, com geometrias variadas, litologias diversas, e que se baseasse na mecânica dos fluidos clássica mas que fosse adaptável a um problema de mineração.

O que isto quer dizer, em linhas gerais, é que os modelos existentes pecam por funcionarem apenas para condições muito específicas, como para galerias inundadas por água em sistemas geotérmicos, para uma galeria escavada em certo tipo de rocha, para um depósito mineral com características específicas em determinada localidade, mas não para **uma galeria subterrânea qualquer preenchida por um fluido qualquer que escoa a uma velocidade qualquer**. Também, os modelos encontrados nesta revisão bibliográfica **raramente permitem uma descrição detalhada do estado de temperatura e da distribuição espacial de temperaturas em uma galeria subterrânea**, estimando apenas um **acréscimo de temperatura**.

Os modelos existentes são, desta forma, desenvolvidos com base em estudos de casos em contextos muito particulares e pouco generalizáveis. Muitas vezes são apresentados sem a devida validação ou com uma validação incompleta e baseada em dados limitados, pouco confiáveis ou inacessíveis. Os modelo existentes, portanto, são pouco **falseáveis** ou **refutáveis**[1], principalmente por uma dificuldade em obter os dados necessários para validá-los. Este é outro aspeto fundamental que este projeto de investigação procura suprir: o de **construir uma base de dados ampla, com informações claras e suficientes, e aberta à comunidade científica**, para que modelos exclusivamente teóricos possam também ser validados por seus autores.

Como referido, a modelação dos fenómenos termodinâmicos em ambientes subterrâneos está intimamente relacionada á ocorrência de fenómenos geotérmicos. Neste capítulo, optou-se por uma perspetiva mais relacionada com a modelação propriamente dita (já que, em última instância, é disto que o projeto de investigação trata), sem maior preocupação com os fenómenos geotérmicos. A discussão sobre geotermia encontra-se no capítulo seguinte, que trata do conceito de calor e de sua importância para os ambientes subterrâneos.

[1] Pela conceção de **Karl Popper**, a construção do conhecimento científico é progressiva, e o desenvolvimento de hipóteses deve permitir a contraposição de ideias e o surgimento de novas soluções a partir de vazios deixados por ideias anteriores.

3.1 Modelos de troca de calor e estimação de temperatura em subterrâneo

3.1.1 Modelos de recuperação de calor do ar de ventilação

Os modelos termodinâmicos encontrados em publicações científicas mais diretamente relacionados com a mineração subterrânea baseiam-se na ideia de recuperar calor do ar de exaustão de ventilação e aplica-lo ao pré-condicionamento do ar de entrada, através de permutadores de calor ou através da mistura destes fluxos de entrada e de saída. Esta ideia surge em um contexto de aumento do preço de combustíveis e energia, utilizados para aquecer o ar de entrada de ventilação em regiões frias. A vasta maioria das publicações são feitas como estudos de caso de minas canadianas.

A partir da ideia de recuperar o calor do ar, surge a necessidade de estimar o potencial de recuperação de calor do ar de exaustão, o que foi feito através de diversas abordagens propostas ao longo dos anos. M. J. G. Sylvestre (1999) relata uma aplicação de um sistema de recuperação de calor na mina de *Creighton*, no Canadá, no ano de 1955, em que se utilizou um sistema de ductos para submeter água ao calor contido no ar de exaustão da ventilação da mina; a água aquecida era então utilizada para aquecer o ar de entrada da ventilação. Sistemas similares de recuperação de calor do ar de exaustão foram implementados nas minas de *Strathcona*, *Williams* e *Kiena*, também no Canadá, utilizando princípios similares para a recuperação de calor (H. Sbarba, 2012).

Outro estudo deste tipo foi conduzido por Hall et al. (1990) em 1990, relatando o caso da mina da *Roncaville Division of Potash Corporation of Saskatchewan*, no Canadá, em que se avaliou o potencial de aquecimento do ar de entrada da ventilação através da recirculação parcial do ar de exaustão. Neste estudo, mediu-se a concentração de contaminantes no ar de exaustão, e induziu-se uma recirculação de ar para medir o acréscimo de temperatura.

Demonstrou-se, neste caso, a viabilidade em recircular parte do ar, promovendo um acréscimo de 1.0 °C no ar de ventilação. Estes estudos de caso foram conduzidos de forma totalmente experimental e prática, sem uma tentativa de estimação ou modelação dos fenómenos de permuta de calor, o que era comum em projetos desta natureza entre a metade e o final do século XX.

Um projeto recente para o estudo da recuperação de calor do ar de exaustão para poupar a queima de combustíveis fósseis no aquecimento do ar de entrada da ventilação, chamado **MEHR - Mine Exhaust Heat Recovery**, foi proposto por Kalantari e Ghoreishi-Madiseh (2019). Para avaliar o potencial de recuperação de calor do ar, foi desenvolvido um algoritmo em `MATLAB®`, e o modelo foi validado por um estudo realizado numa mina não identificada na Colúmbia Britânica, no Canadá.

Este projeto, embora envolva a modelação de fenómenos termodinâmicos do ar de ventilação, não o faz com base nas trocas que ocorrem no interior da mina, mas avalia o potencial de recuperação de calor do ar de exaustão com base nos estados de temperatura do ar de entrada e do ar de exaustão, com um maior foco na eficiência dos permutadores de calor. Não é, portanto, um estudo de caracterização dos fenómenos termodinâmicos de estruturas subterrâneas, mas um estudo da recuperação do calor do ar de saída.

Na sua publicação, Kalantari e Ghoreishi-Madiseh (2019) trazem uma revisão bibliográfica interessante sobre projetos desta natureza, e citam outros autores como H. D. Sbarba et al. (2012), que propõe um modelo de estimação da viabilidade económica de projetos de recuperação de calor. H. Sbarba (2012) também propõe, na sua tese, alternativas para a recuperação de calor do ar de exaustão em minas subterrâneas, de uma mesma perspetiva da circulação do ar de exaustão em permutadores de calor.

Cita-se também os estudos publicado por Morkun et al. (2015), que avalia a possibilidade de utilização de bombas de calor na recuperação do calor do ar de exaustão e de água subterrâneas numa mina na Ucrânia, e por Holmlund (2015), que discute a possibilidade de implantação de permutadores de calor na recuperação de calor do ar de exaustão de uma mina na Finlândia. A perspetiva, em todos estes estudos, é a de **utilização do calor contido no ar de exaustão**, e não dos **processos termodinâmicos em subterrâneo que levam o ar de ventilação a este estado de energia**.

3.1.2 Modelos de estimação da temperatura do ar de ventilação

Nesta categoria foram incluídos modelos que buscam caracterizar a evolução termodinâmica do ar de ventilação em minas subterrâneas em função dos processos de transporte e troca de calor que ocorrem. Estes trabalhos são os que mais se aproximam da ideia do **modelo desenvolvido neste projeto de investigação**, que é caracterizar o estado de temperatura no interior de galerias subterrâneas.

A modelação dos fenómenos termodinâmicos em minas subterrâneas, do ponto de vista computacional, teve início, muito provavelmente, no final da década de 1960, sendo a publicação de Starfield (1969) a mais antiga encontrada que faz uso de computadores para estimar acréscimos de temperatura em vias subterrâneas a partir de um valor conhecido para a temperatura de entrada do ar.

Os modelos numéricos que utilizam técnicas de **Computational Fluid Dynamics**, ou **CFD**, por outro lado, são mais encontrados em publicações do início do século XXI, sendo raros os modelos computacionais mais antigos como o de Starfield (1969) devido às limitações tecnológicas e computacionais de décadas passadas.

Muitos estudos de caso publicados entre a metade e o final do século XX foram revisitados através de modelações computacionais mais robustas em anos recentes, não sendo incomum encontrar publicações que tratam da temperatura numa mesma mina com trinta ou quarenta anos de intervalo.

Um estudo de caso interessante para a modelação da temperatura do ar de ventilação é o da mina de *Creighton*, no Canadá. A mina conta com uma cava que contém uma grande massa de rocha fragmentada, por onde há a possibilidade de injetar ar de ventilação, que é então direcionado para a parte subterrânea da mina. A pilha de rocha atua como um permutador de calor natural sob efeito de fenómenos sazonais: no verão, o ar de entrada da ventilação é condicionado pela rocha fragmentada que foi resfriada ao longo das estações mais frias; no inverno, o efeito é o inverso. Há, neste caso, um potencial de utilizar a energia armazenada na rocha em forma de calor sensível (devido à alternância sazonal de temperaturas e da capacidade da rocha em armazenar calor) no pré-condicionamento do ar de ventilação.

Sylvestre (2001) realizou um estudo do potencial térmico deste sistema, e os seus resultados foram utilizados por Ghoreishi-Madiseh et al. (2015) e Ghoreishi-Madiseh et al. (2017) na validação de um modelo que estima a variação de temperatura do ar após passar pela pilha de rochas. O balanço de energia utilizado é de grande interesse para a criação do modelo proposto neste projeto de investigação, pois inclui mecanismos de troca de calor que são comuns ao fluxo de ar em galerias, a partir de uma descrição matemática mais teórica dos fenómenos, apesar de algumas limitações importantes de adaptação:

1. Estima a variação de temperatura, mas não a distribuição de temperatura do ar;
2. O domínio geométrico é completamente diferente do que se verifica numa galeria subterrânea;
3. O calor total trocado por convecção baseia-se na porosidade da pilha de rochas, e não no escoamento de ar através de uma abertura subterrânea;
4. Utiliza softwares de **CFD** (*Computational Fluid Dynamics*), como o ANSYS Fluent, na solução das equações do balanço de energia;
5. Faz a validação com base em informações publicadas por outros autores, que são parâmetro de comparação na avaliação do desempenho do modelo, não havendo recolha de dados experimentais de forma direta;

Deste modelo, o mais relevante para o projeto de investigação é o **equacionamento matemático dos fenómenos de troca de calor**, sobretudo em relação às **trocas de calor por convecção**, em que o coeficiente de convecção é calculado através do **Número de Nusselt**, com base na literatura de referência da mecânica dos fluidos, assim como o que foi feito neste projeto para construir o balanço de energia do **modelo** através da utilização de equações adaptadas a um **ducto circular**. O **modelo** proposto utiliza um algoritmo próprio para a solução das equações diferencias do balanço de energia, e estima uma distribuição de temperatura para o ar (e outros fluidos) ao longo de seu escoamento em uma galeria subterrânea, o que difere significativamente do trabalho de Ghoreishi-Madiseh et al. (2015) e Ghoreishi-Madiseh et al. (2017).

Em revisão sobre a modelação climática em subterrâneo, Roghanchi et al. (2017) discute aspetos centrais que faltam aos modelos e softwares destinados para este fim, em particular:

1. O caráter transiente devido às trocas dinâmicas de calor entre rocha e ar, que segundo o autor, não pode ser estimado por softwares-padrão. Há fortes limitações nas estimativas feitas por estes modelos, por exemplo, quando há alteração no regime de funcionamento dos ventiladores.
2. A existência de fontes de calor diversas num sistema subterrâneo, que modificam o seu comportamento climático.
3. Variações temporais dos parâmetros ambientais, que podem impactar as estimativas feitas pelos modelos. A temperatura é tratada, na vasta maioria dos projetos de investigação, como estacionária, o que não é realista do ponto de vista prático.

Roghanchi et al. (2017) discute que uma maior eficiência na modelação climática em subterrâneo depende de uma monitorização contínua em certas regiões críticas da mina, o que de fato é indispensável para incorporar as variações temporais dos parâmetros críticos envolvidos.

O **modelo** concebido no desenvolvimento deste projeto de investigação busca preencher diversas destas lacunas, pois **lida com os fenómenos do ponto de vista transiente**, sendo capaz de **incorporar variações temporais na temperatura do ar de entrada e alterações no regime de escoamento do ar**. O **modelo**, visa, entretanto, estimar a **evolução termodinâmica no interior de uma galeria, e não de uma mina inteira**; isto implica que um modelo "macro" poderia ser construído a partir deste modelo "micro", compartimentando o domínio da mina toda em sub-domínios geométricos compostos por troços de galerias e vias. O que o modelo busca fazer é caracterizar o melhor possível a evolução de temperatura em regiões menores da mina, o que permite *enxergar* fenómenos locais e mais detalhados das trocas de calor, frequentemente desprezados ou impossíveis de serem incorporados em outros modelos.

As técnicas de **VOD** também apontam para uma tendência maior em compreender fenómenos ambientais sob um ponto de vista local, pois baseiam-se em fornecer as quantidades mínimas necessárias em áreas individuais de uma mina somente quando há necessidade (Dicks, 2006). Danko (2013) destaca que as grandes dimensões e a distribuição espacial complexa das estruturas subterrâneas que compõem uma mina são um obstáculo à modelação das condições ambientais, e também que as metodologias muito utilizadas baseadas em características estacionárias do ambiente subterrâneo são inadequados aos sistemas de **VOD**. Não obstante, parte significativa das variações climáticas de uma mina são consequência de fenómenos lentos que se acumulam ao longo do tempo, o que dificulta a sua modelação.

Danko (2013) propõe um modelo chamado **MULTIFLUX** para simulações climáticas e de ventilação na sub-superfície, que pode ser utilizado para lidar com variações sazonais da temperatura de entrada do ar de ventilação e incorporar a variação histórica dos parâmetros para determinar o estado de temperatura do maciço rochoso. O modelo foi validado utilizando comparações com softwares de ventilação, como **VENTSIM**, mas não através de dados experimentais.

Zhu et al. (2015) faz um levantamento detalhado das fontes de calor em uma mina subterrânea, tendo sido utilizadas algumas das equações reportadas[1] por este autor na construção do **modelo desenvolvido** de modo a contabilizar outras fontes de calor além da rocha. Zhu et al. (2015) desenvolveu também um modelo em `Visual Basic` para prever o incremento de temperatura do ar para minas ultra-profundas; apesar de bastante completo quanto às possíveis fontes de calor, o modelo utiliza relações empíricas e estáticas para estimar as trocas de calor entre rocha e ar, com a convecção calculada com base no período de tempo em que houve ventilação, não inclui outros mecanismos de troca de calor, como a condução, e também não incorpora de forma direta a conservação de movimento do ar. Esta abordagem simplifica os cálculos, mas deixa de contabilizar a influência dos fenómenos transientes, que como já se apontou, são de grande relevância e podem impactar significativamente os resultados de modelos de troca de calor em minas subterrâneas.

Além disto, o modelo estima um **acréscimo de temperatura**, mas não um **estado de temperatura** em ambientes subterrâneos. Não há, por exemplo, um balanço de energia transiente dependente da posição do ponto interior à galeria, e estima-se o calor total acrescido ao ar, de forma semelhante ao que é proposto na literatura de referência para a ventilação de minas subterrâneas.

Na validação, não há menção de como foi medida a temperatura e qual a sensibilidade do sensor utilizado; também não se sabe se as medições foram instantâneas ou se realizadas ao longo de certo intervalo de tempo. Como será mostrado em capítulos seguintes, a variação de temperatura em uma galeria pode ser bastante significativa ao longo de um dia: a depender de variações de caudal, a temperatura do ar pode oscilar mais de 1.5 °C dentro de poucas horas, para uma galeria de comprimento da ordem de centenas de metros. É difícil, portanto, aferir a precisão de um modelo utilizando **medições estáticas**. Na realidade, é ainda mais difícil avaliar a precisão de um **modelo estático**: um erro pequeno do modelo para um determinado horário do dia, pode se tornar um erro grosseiro em outros períodos.

O autor também expressa os erros em valores absolutos, na ordem das centésimas de grau Celsius. No entanto, não se pode afirmar que os erros do modelo são da ordem das centésimas de grau Celsius se a sensibilidade do sensor é da ordem das décimas de grau Celsius, por exemplo; tampouco se pode garantir, caso tenha sido feita apenas uma medição de temperatura, que o valor obtido não foi um *outlier*, pois não há **repetibilidade** suficiente para que se garanta isto. Não são contabilizados os erros de enviesamento ou sistemáticos do sensor ou instrumento de medição aos resultados publicados.

Por fim, não é particularmente útil à discussão dos resultados tratar o erro de forma absoluta: há sempre

[1] A publicação referida compila diversas equações publicadas anteriormente, que não são necessariamente de autoria de Zhu et al. (2015).

uma janela de valores possíveis para a temperatura; se a temperatura de entrada do ar é de 15.0 °C e a de saída é de 20.0 °C, o erro máximo é de 5.0 °C, o que faz com que um erro de 0.1 °C seja de 2%. De nada vale calcular um erro absoluto se há valores de temperatura que são fisicamente impossíveis em uma situação em particular. Neste caso, é mais coerente dizer que o erro é de 0.1 °C em 5.0 °C do que dizer que é de 0.1 °C em 15.0 °C. Esta análise crítica dos resultados é pouco desenvolvida na maior parte dos trabalhos publicados.

Wang et al. (2019) criou um modelo transiente para a predição da temperatura do ar em túneis subterrâneos construídos com *Tunnel Boring Machines*. A equação diferencial utilizada considera a temperatura como função do tempo, mas não do espaço. O cálculo do calor trocado por convecção se baseia em valores fixos recomendados para uma faixa de velocidades de escoamento do ar entre 0 e 1.5 $\mathrm{m\,s^{-1}}$, o que é delicado, pois o coeficiente de convecção em escoamentos desta ordem de velocidades, e para ductos de diâmetro elevado, pode variar em **ordem de grandeza**, já que também se esperam variações muito elevadas (das centenas para as centenas de milhares, por exemplo) no número de Reynolds, que é um parâmetro crítico para a convecção. Na validação do modelo, também não há menção à metodologia de recolha de dados, nem à sensibilidade do sensor utilizado, mas há neste caso medidas associadas ao tempo.

Como se nota, esta é uma situação muito encontrada em publicações de modelos de trocas de calor em minas subterrâneas: muitas vezes não há clareza quanto aos dados experimentais, não se discute os instrumentos utilizados na medição, e como já foi dito, os resultados não podem ser colocados à prova pois as informações são muito limitadas.

Desta forma, é na parte experimental que foram identificadas as principais fraquezas dos modelos de troca de calor em minas subterrâneas publicados até a data de realização deste projeto de investigação. Esta foi uma das principais preocupações consideradas ao longo do trabalho, que buscou também **discutir os dados recolhidos e as metodologias empregadas para a recolha** antes de tratar da validação propriamente dita.

O modelo proposto por Vidal F Navarro Torres et al. (2008) descreve de forma bastante detalhada as trocas de calor por convecção e estabelece uma metodologia de cálculo próxima à utilizada na construção do modelo proposto neste projeto de investigação, baseada na **Equação de Petukhov**. As trocas de calor no modelo de Vidal F Navarro Torres et al. (2008), por outro lado, foram consideradas estáticas, e calculou-se um acréscimo total em função do comprimento do poço ou da galeria, desconsiderando a distribuição espacial de temperatura ao longo das condutas.

O modelo foi validado com medições feitas na *Mina de Neves Corvo* e os dados brutos de temperatura e caudal foram apresentados em um gráfico na forma de séries temporais, o que também foi feito para a temperatura neste projeto de investigação. Os instrumentos utilizados para a medição de temperatura foram referidos, e a validação foi feita com base nos valores de variação de temperatura, com erros de estimação abaixo de 1.0 °C e da ordem de 10 a 80% em relação à variação de temperatura medida.

Outros modelos relevantes encontrados na revisão bibliográfica se dedicam ao problema da difusão de gases e partículas no ar de ventilação em minas subterrâneas, como os desenvolvidos por Widiatmojo et al. (2013) e Kurnia et al. (2014). O transporte e difusão de gases aproxima-s da modelação das trocas de calor, pois é condicionado pelos mesmos fenómenos de turbulência do escoamento de ar. Xu et al. (2017) aborda a modelação da turbulência em galerias subterrâneas através de diferentes técnicas, que pormenorizam o movimento desordenado de turbilhões e redemoinhos no escoamento dos fluidos; este ponto de vista da mistura do ar, considerando movimentos aleatórios de pequenas porções de ar, é utilizado mais na modelação da difusão de gases do que para a difusão de calor, embora também seja interessante acoplar esta modelação aos fenómenos de troca de calor em galerias subterrâneas. Por outro lado, a alta complexidade destes modelos de turbulência faz com que raramente sejam incorporados em modelos de temperatura e calor, à exceção de softwares profissionais de CFD.

Através da revisão bibliográfica do estado-da-arte dos modelos de estimação de temperatura em vias subterrâneas, entende-se que o modelo desenvolvido através desta investigação é, na realidade, um **modelo de caracterização do estado de temperatura em galerias subterrâneas**, e não um **modelo de predição de temperatura**. A diferença é a consideração da temperatura como função da posição e do tempo, em um balanço de energia transiente resolvido através de um algoritmo que admite cálculos e estimações ao longo do tempo. Um modelo com características similares quanto ao domínio geométrico e temporal é o proposto por Madiseh et al. (2012), que não lida com o escoamento de ar na ventilação e sim com água submetida a escoamentos muito lentos no interior de galerias subterrâneas que integram sistemas geotérmicos.

A metodologia utilizada por Madiseh et al. (2012) para a discretização geométrica e temporal do domínio do problema foi descrita originalmente por Patankar (1980), e é também empregada na solução da equação diferencial do balanço de energia neste modelo, o que será tratado em capítulos futuros.

3.1.3 Utilização de galerias preenchidas por água em sistemas geotérmicos

Um caso recorrente em que se aplica a modelação de trocas de calor em galerias subterrâneas é o de sistemas geotérmicos em minas desativadas, como o de *Springhill*, no Canadá. O aproveitamento do calor disponível em subterrâneo para aquecimento de alguns edifícios industriais localizados nas proximidades da mina é descrito por Jessop et al. (1995).

Rodríguez e Díaz (2009) desenvolveram um modelo semi-empírico para estimar o acréscimo de temperatura em função da distância percorrida pela água nas galerias subterrâneas da mina de *Springhill*, e posteriormente Madiseh et al. (2012) desenvolveram um modelo transiente bi-dimensional, em que as equações diferenciais são solucionadas através do **Método do Volume Finito**, permitindo calcular o gradiente de temperatura no maciço rochoso ao longo dos anos em função da taxa de extração/injeção de água nas galerias subterrâneas.

Com este modelo, Madiseh et al. (2012) estimou taxas ótimas para a extração de calor sustentável do sistema geotérmico. Emprega, como já foi referido, uma metodologia também utilizada para a construção do **modelo desenvolvido neste projeto de investigação**, e que se baseia em alguns princípios definidos por Patankar (1980) para a discretização do domínio geométrico e consequentemente das equações diferenciais envolvidas na modelação.

Destacam-se, portanto, os trabalhos de Ghoreishi-Madiseh et al. (2015), Ghoreishi-Madiseh et al. (2017) e Madiseh et al. (2012), Patankar (1980) e Zhu et al. (2015) como as principais referências para o desenvolvimento concetual do **modelo** e para a solução numérica das equações diferenciais, que foram orientados através de metodologias desenvolvidas ou aplicadas por estes autores.

3.1.4 Utilização do potencial bioclimático de ambientes subterrâneos

Espaços subterrâneos naturais ou escavados foram utilizados ao longo da história para diferentes necessidades humanas, como acomodação e conservação de alimentos e de produtos agrícolas (Pardo e Ignacio Cañas Guerrero, 2006). As construções subterrâneas fazem uso da inércia térmica do solo ou rocha, que isola o ambiente interno do ambiente externo e atenua as variações diárias ou sazonais de temperatura.

Pardo e Ignacio Cañas Guerrero (2006) fazem uma revisão de estruturas subterrâneas antigas utilizadas para a conservação e envelhecimento de vinho, chamadas de *aphotecas*, na região Central da Espanha, que em alguns casos datam do século I A.C. Estruturas subterrâneas deste tipo são comuns por toda a Península Ibérica.

A qualidade do vinho depende de um controle rigoroso das condições de temperatura e de humidade, especialmente na maturação e envelhecimento. Diversos autores definem uma faixa adequada entre 9.0 e 15.0 °C para um envelhecimento adequado, que pode variar conforme o tipo de vinho e o tempo decorrido do início do envelhecimento (Barbaresi et al., 2015). Porém, são raros os casos em que há monitorização contínua de temperatura ou modelação das variações sazonais de temperatura em subterrâneo.

Barbaresi et al. (2015) demonstra a variação de temperatura em diferentes pontos de uma cave de vinho, indicando que os espaços subterrâneos podem possuir capacidade térmica e isolante bastante variável; é esperado, ainda, que espaços subterrâneos mais amplos possuam menor uniformidade térmica e maior variabilidade da temperatura em diferentes pontos. Mazarrón et al. (2012) e Ignacio Canas Guerrero e Ocana (2005) publicaram análises experimentais para avaliar inércia térmica e comportamento da temperatura neste tipo de estrutura subterrânea, respetivamente. Tinti et al. (2014) desenvolve uma modelação numérica para avaliar o potencial de eficiência energética de uma cave de vinhos, para a qual estima, através de dados experimentais e regressão linear, um valor para a difusividade térmica local.

O **modelo proposto** também se adapta a este tipo de ambiente, podendo ser aplicado para estimar a distribuição de temperaturas no solo (ou rocha) que envolve a cave. Uma parte da validação do modelo foi feita justamente numa galeria escavada em rocha granítica e utilizada para o envelhecimento de vinho, permitindo estimar o fluxo de calor ao longo da cobertura rochosa da galeria em função da temperatura do ar externo e de sua espessura (que é variável), baseando-se no fenómeno de condução de calor em sólidos que compõe a equação diferencial transiente e bi-dimensional do modelo numérico. Não foram encontrados, na revisão bibliográfica, outros modelos similares ao **modelo desenvolvido** que tenham sido aplicados a caves de vinho.

4 Fundamentação física: Fenómenos de transferência de calor em galerias subterrâneas

Para compreender e descrever os fluxos de energia térmica que se dão em uma mina subterrânea, partiu-se de um estudo teórico dos fenómenos de transferência de calor, da termodinâmica, e da mecânica dos fluidos, que são os três pilares das ciências termo-fluidas (Schobeiri, 2010).

Como a literatura deste tema se concentra majoritariamente nos campos das engenharias química e mecânica, é necessário adaptar os conceitos presentes na literatura de referência aos elementos envolvidos em uma galeria subterrânea: o maciço rochoso é como um ducto de seção circular de paredes espessas com alta rugosidade; o interior deste ducto é a galeria, preenchida por água ou ar, que podem escoar com determinada velocidade ou se encontrar em repouso. Este capítulo tem como propósito elucidar os conceitos básicos para a construção de uma interpretação analítica do problema, empregando conceitos da **Fluidodinâmica**, da **Termodinâmica**, e da **Transferência de calor**.

4.1 Os conceitos de calor e de temperatura

O que é temperatura?

"A temperatura é um parâmetro que resume as populações relativas em diferentes níveis de energia para um sistema em equilíbrio" (Atkins, s.d.). Esta definição do conceito de temperatura vem da **Lei Zero da Termodinâmica**, em que a **Distribuição de Boltzmann** é aplicada para avaliar as propriedades de um conjunto de moléculas em função de suas distribuições em diferentes níveis de energia quando estão em equilíbrio, em relação aos estados de energia disponíveis. Também é possível entender a temperatura como uma medida de "agitação" de moléculas em um sistema através da **Distribuição de Maxwell-Boltzmann**, em que a temperatura é uma medida da velocidade média do conjunto de moléculas.

Embora esta seja a definição formal de temperatura, incorporamos o conceito de forma intuitiva no dia-a-dia. A temperatura influencia o comportamento humano, os hábitos, e o modo de vida de uma sociedade. O modo como compreendemos a temperatura é através da perspetiva sensorial e do conforto térmico: se está quente demais ou frio demais (em relação a temperatura do corpo humano), e se aquela temperatura provoca ou não uma sensação de desconforto. A manutenção da temperatura é crucial para o funcionamento do organismo, de modo que o corpo humano possui mecanismos sofisticados para compensar temperaturas altas ou baixas demais.

O que é calor?

"O calor é um modo de transferência de energia...é o nome de um processo, e não de uma entidade" (Atkins, s.d.). Entende-se por energia a capacidade de um sistema de realizar trabalho; quando a diferença de temperatura resulta na transferência de energia, chama-se este processo de calor. Entretanto, é comum utilizar-se o termo calor no sentido de "transferência de calor", que na verdade significa "transferência de energia como resultado da diferença de temperaturas".

A equivalência entre calor e trabalho mecânico foi demonstrada em um experimento pelo físico **James Prescott Joule**. Neste experimento, existem três elementos: um recipiente inicialmente adiabático (isto é, isolado, ou "impenetrável"), uma hélice presa a um eixo movido por roldanas e ligado a um peso, localizado no exterior do recipiente; quando o peso cai, provoca o movimento da hélice no interior do recipiente. Mede-se então a temperatura no interior do recipiente durante o movimento da hélice e verifica-se um aumento de seu valor, de modo que o trabalho realizado pelo peso provoca uma alteração da temperatura no interior do recipiente. Removem-se então as barreiras adiabáticas e observa-se que o sistema volta ao seu estado inicial como consequência da transferência de energia pela diferença de temperatura, e a conclusão é que o trabalho realizado é equivalente ao calor. Este experimento ajuda e ilustrar a **Primeira Lei da Termodinâmica**, que, de forma simples, diz respeito à conservação de energia.

A ideia de **temperatura** como medida do estado de energia da matéria, e de calor como processo de transferência de energia como resultado da diferença de temperatura, são fundamentais para a compreensão dos fenómenos que ocorrem no interior de uma galeria subterrânea. Uma porção de um maciço rochoso a uma determinada profundidade se aproxima de um sistema adiabático pois tem pouca influência das condições-ambiente externas; o movimento de fluido no interior da galeria é consequência da variação de sua energia cinética, e os processos térmicos são consequência das diferenças de temperatura entre fluido e rocha. Os processos de calor, ou de troca de calor (no sentido de troca de energia em decorrência da diferença entre temperaturas), estão associados às propriedades físicas da matéria, que determinam a taxa com que estes fenómenos ocorrem: materiais diferentes podem exigir maiores ou menores quantidades de energia para sofrerem alterações de temperatura, podem ser mais ou menos propensos a perder energia, e podem ter mais ou menos facilidade em transmitir calor através das moléculas que os compõem.

Propriedades termofísicas da matéria

As propriedades físicas da matéria fundamentais para o estudo dos fenómenos de calor são a **condutividade térmica**, a **difusividade térmica**, **o calor específico**, e a **densidade** ou **peso específico**.

Quando há um gradiente de temperatura em um corpo, há transferência de energia da região de maior temperatura para a região de menor temperatura, como prevê a **Segunda Lei da Termodinâmica**. A condutibilidade térmica, designada por k e medida em $\mathrm{W\,m^{-1}\,{}^{\circ}C^{-1}}$, representa a quantidade de calor que atravessa uma unidade de área de um determinado corpo por uma unidade de tempo, quando o gradiente de temperatura é unitário (Figueiredo et al., 2011). Essencialmente, o que esta propriedade define é a taxa com que se dão as trocas de energia e momento entre moléculas de um material, entre as regiões de maior e menor temperatura. Medidas experimentais podem ser realizadas para determinar a condutibilidade térmica de diferentes materiais (Holman, 2001). Há forte dependência entre condutibilidade térmica e a temperatura do corpo.

O calor específico para pressão constante, denotado por C_p e medido em $\mathrm{J\,kg^{-1}\,K^{-1}}$, quantifica a variação de temperatura de um material em função da quantidade de energia que recebe. Quando C_p é multiplicado pela densidade ρ do material, obtém-se o calor específico volumétrico, que representa o calor específico por unidade de volume. Um valor baixo para o calor específico volumétrico indicaria que que uma menor quantidade de energia que se move através do corpo seria absorvida e utilizada para aumentar sua temperatura, de modo que haveria mais energia disponível para continuar a ser transmitida através do corpo (Holman, 2001).

A relação entre condutividade térmica e calor específico volumétrico corresponde à difusividade térmica do material $\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$, expressa em $\mathrm{m^2\,s^{-1}}$, que mede a taxa com a qual a energia se propaga através do material. Quanto maior o valor de α, mais rapidamente a energia térmica se difunde. Um valor alto de α poderia indicar, por exemplo, que há uma rápida transferência de energia através do corpo (um valor alto de k), ou uma menor absorção de energia térmica pelo material (um valor baixo de ρC_p) de modo a reter menos energia e disponibilizar uma maior energia para ser transmitida.

É necessário observar que estas propriedades dependem tanto da composição do material quanto de sua estrutura. Isto explica que minerais tem valores praticamente fixos para estas propriedades físicas, mas rochas tem valores bastante variados pois podem apresentar diferentes características em termos de composição, dureza, densidade, porosidade, fraturas, e outros aspetos estruturais. As propriedades térmicas das rochas são, portanto, estritamente geográficas. Os valores para as propriedades térmicas de diferentes tipos de rocha publicados por Cermak e Rybach (1982), Xiaoqing et al. (2018) e Kushnir et al. (2012) demonstram esta variação de propriedades para rochas com a mesma classificação, mas que são formadas por diferentes processos e encontradas em diferentes contextos geológicos.

4.1.1 Energia Geotérmica

A Energia Geotérmica é a energia térmica gerada e armazenada na Terra, sendo originada pelos processos de formação do planeta (20%) e pelo decaimento radioativo de minerais presentes nas rochas (80%) (Mohamed, 2021). O fluxo de calor terrestre é a quantidade de calor que flui do interior da Terra para a superfície, sendo que até 70% do fluxo de calor em porções continentais é gerado entre os 10 e 20 km superiores da crosta devido ao decaimento radioativo (Bodri e Cermak, 2007). A temperatura das rochas varia de acordo com a profundidade devido à existência de um gradiente geotérmico, definido como o aumento da temperatura em função do aumento de profundidade (DiPietro, 2013). Este gradiente varia de acordo com as características

Material	T K	ρ $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	C_p $\left(\frac{kJ}{kg\,^\circ C}\right)$	k $\left(\frac{W}{m\,K}\right)$	α $\left(\frac{m^2}{s} \times 10^5\right)$
ar	300	1.1774	1.0057	0.0262	2.2160
água	300	995.8	4.179	0.614	0.0146
madeira (pinho)	300	640	2.8	0.174	0.0082
granulado de cortiça	305	45 - 120	1.88	0.045	0.02 - 0.053
vidro	293	2700	0.84	0.78	0.034
cobre puro	293	8954	0.3831	386	11.234
granito		2640	0.82	1.73 - 3.98	0.08 - 0.18
calcário		2500	0.9	1.26 - 1.33	0.056 - 0.059

Tabela 4.1: Propriedades físicas para alguns materiais. Valores retirados de Holman (2001).

geológicas locais, e pode representar maiores variações de temperatura em razão da profundidade em algumas regiões relativamente a outras.

Estas são as fontes de calor predominantes no interior dos maciços rochosos, que justificam a ocorrência de temperaturas diferentes em subterrâneo do que se verifica para porções mais próximas da superfície. o termo **Recurso geotérmico** pode ser definido como "parte acessível do calor disponível na crosta terrestre sob determinada área que pode ser extraído de forma competitiva em relação a outras formas de energia em algum momento no futuro" (Muffler e Cataldi, 1977). Um reservatório geotérmico corresponde ao recurso económico identificado.

Recursos geotérmicos vem sendo utilizados comercialmente há mais de um século, sendo aproveitados para a geração de energia elétrica em 24 países, e para aquecimento ou arrefecimento em outros 78 (Goldstein et al., 2011). Quando há ocorrência de fenómenos geotérmicos sem um aproveitamento económico associado, entende-se que o calor disponível é um resíduo, e não um recurso. No caso das minas subterrâneas, a energia geotérmica é entendida como resíduo e é, até ao presente, pouco aproveitada como recurso, com menos de 20 casos documentados de sistemas geotérmicos em minas, segundo dados mundiais de 2013 (Preene e Younger, 2014).

O **Diagrama de Lindal**, publicado por Gudmundsson et al. (1985), destaca possíveis aplicações para os recursos geotérmicos encontrados a diferentes faixas de temperatura. Uma adaptação mais recente deste diagrama, O **Diagrama de Lindal para Engenharia de Minas**, proposto por Patsa et al. (2014) e adaptado conforme a Figura 4.1, destaca oportunidades para o aproveitamento dos recursos geotérmicos em sinergia com a mineração, de modo que a energia térmica possa ser empregada nos próprios processos da mina ou destinada a propósitos mais abrangentes como aquecimento urbano ou geração de eletricidade. Como destaca M. Carvalho et al. (2014), de forma geral o aproveitamento de calor ainda não foi considerado de forma integrada na mineração.

A energia geotérmica pode ser aproveitada através de diversas tecnologias, embora geralmente, mas não exclusivamente, envolva a perfuração e bombeamento de água a partir de certa profundidade em um maciço rochoso, sendo a energia renovável mais extensivamente utilizada no mundo desconsiderando a energia hidroelétrica (Hurter e Schellschmidt, 2003). Os recursos geotérmicos podem ser utilizados de forma direta (imediata, na forma de calor) ou indireta, sendo convertidos para outras formas de energia, como eletricidade. A energia geotérmica encontrada como sub-produto na mineração não atinge, usualmente, temperaturas suficientes para a utilização indireta, mas pode ser aproveitada diretamente. Formas comuns de aproveitamento destes recursos incluem aquecimento e arrefecimento de espaços incluindo aplicações urbanas e agrícolas, processos industriais, e recuperação em bombas de calor, que são capazes de lidar com fluidos a temperaturas baixas (Lund, 2012).

A combinação entre um baixo gradiente geotérmico e temperaturas-ambiente muito frias, por exemplo, pode fazer necessário um pré-condicionamento para aquecer o ar de entrada, de modo a proporcionar condições adequadas à presença humana, que acaba por ser resfriado ao percorrer a rede de galerias. Como as temperaturas em subsuperfície estão menos condicionadas às variações da temperatura atmosférica, é muito comum verificar-se casos em que maciços rochosos atuam não apenas como permutadores de calor mas como isolantes térmicos, caso comum em caves de vinho e espumante que utilizam este efeito para manter temperaturas aproximadamente constantes na maturação. Para quantificar os recursos geotérmicos, alguns parâmetros que afetam a extração de calor devem ser estimados, dentre eles a quantidade de calor disponível

<table>
<tr><th rowspan="2">Temperatura (°C)</th><th rowspan="2">Produção de Energia</th><th colspan="2">Aplicações em Mineração</th><th rowspan="2">Uso direto de calor</th></tr>
<tr><th>Propriedades minerais</th><th>Processos mineiros</th></tr>
<tr><td>260</td><td></td><td>Extração de zinco</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>250</td><td rowspan="7">Produção de energia (vapor/água dominante)</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>210</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>200</td><td>Cristalização de sais</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>190</td><td>Secagem de diatomita</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>180</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>170</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>150</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>140</td><td rowspan="9">Geração de energia (ciclo binário)</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>130</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>120</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>110</td><td>Extração de lítio</td><td rowspan="4">Lixiviação de ouro</td><td></td></tr>
<tr><td>100</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>90</td><td></td><td rowspan="3">Aquecimento Urbano</td></tr>
<tr><td>80</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>70</td><td></td><td></td><td>Lixiviação de cobre</td></tr>
<tr><td>30</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>20</td><td></td><td></td><td></td><td>Aquecimento urbano</td></tr>
<tr><td>10</td><td></td><td></td><td></td><td>Aquecimento de ambientes</td></tr>
</table>

Figura 4.1: O diagrama de Líndal para aplicações em mineração. Adaptado de Patsa, Zrrouk e Van Zyl.

em rocha, que varia significativamente ao longo da superfície terrestre (Sas et al., 2018), sendo subdivididos em recursos de baixa, média ou alta entalpia. A utilização dos recursos geotérmicos depende também da temperatura encontrada em rocha e dos fluidos geotérmicos que permeiam o maciço rochoso, havendo diversas faixas de aplicações. Embora o aproveitamento dos recursos geotérmicos seja muito restrito no que concerne à geração de energia elétrica, reservadas aos fluidos geotérmicos acima dos 80 °C, existem possibilidades de recuperação de energia térmica em fluidos a partir dos 10 °C. A maior parte das aplicações práticas utilizam fluidos geotérmicos de temperatura baixa e moderada, que tem uma maior prevalência geográfica do que os recursos a altas temperaturas.

Aproveitamento Geotérmico na Mineração

Dentre os projetos existentes para o aproveitamento sinérgico de recursos minerais e geotérmicos, a maior parte dos registos envolve minas subterrâneas desativadas. Jessop et al. (1995) descreve a utilização de uma mina de carvão abandonada na Nova Escócia no Canadá como permutador de calor. Com uma interligação adequada entre galerias, poços e acessos, foi possível circular água através da mina e recuperar o calor disponível na rocha através de bombas de calor. Este calor recuperado foi aproveitado para o aquecimento de estabelecimentos industriais e comerciais de uma cidade situada na vizinhança da mina. A operação se iniciou em 1989, e documentos datados de 1992 apontam uma economia de 160 mil dólares (em valores da época) com climatização por uma das empresas beneficiadas pelo projeto.

Projetos mais recentes neste âmbito utilizam modelações numéricas e recursos computacionais, em oposição a métodos empíricos empregados em décadas passadas. Como exemplo, pode-se destacar os casos reportados por Rodríguez e Díaz (2009), que propuseram um modelo de predição de recuperação de calor para minas de carvão na região das Astúrias, na Espanha, e Madiseh et al. (2012) que desenvolveu um algoritmo para otimizar a extração sustentável de calor da rocha através da circulação de água em galerias subterrâneas, para que seja extraída a maior energia possível da rocha sem esgotar o recurso geotérmico.

Outros autores descrevem situações onde projetos equivalentes aos mencionados têm potencial de aplicação. Hytiris et al. (2014) descreve uma situação favorável ao aproveitamento de calor em galerias abandonadas preenchidas por água na região de Glasgow, na Escócia. Morkun et al. (2015) discute a possibilidade de

aproveitamento de calor contido na água e no ar de minas localizadas em Kryviy Rih, na Ucrânia. Ghomshei (2007) realizou um estudo concetual para o aproveitamento dos recursos geotérmicos disponíveis em uma mina de ouro abandonada na região de Yellowknife, no Canadá. Além destes locais, aplicações nos Estados Unidos e Noruega foram descritos por Banks et al. (2004).

Um outro panorama para o aproveitamento de energia térmica na mineração é o desenvolvimento de projetos integrados e concomitantes de mineração e geotermia, seja para fins de produção de calor, energia elétrica, ou ambos. Diferente dos casos já mencionados, esta abordagem envolve a utilização de recursos geotérmicos enquanto a mina ainda está em atividade. Patsa et al. (2014) reporta regiões com maior potencial para o aproveitamento simultâneo de recursos minerais e geotérmicos, entre elas as regiões de Califórnia e Nevada nos Estados Unidos, El Salvador, Guatemala, Honduras, Nicarágua, Chile, Peru, República Democrática do Congo, Eritreia, Etiópia, Quénia, Filipinas e Nova Zelândia.

Um exemplo de investigação voltada ao aproveitamento conjunto de recursos minerais e geotérmicos é o projeto CHPM 2030. Este projeto é direcionado às ocorrências geotérmicas em que estão presentes fluidos super-aquecidos e ricos em iões metálicos. Os fluidos podem ser utilizados para a co-geração de energia e calor, combinadas com a extração de metais em um processo interligado, desenvolvido a partir de novas tecnologias e conceitos para o aproveitamento de depósitos metálicos ultra profundos (É. Hartai et al., 2016).

Em relação ao aproveitamento do calor transferido para o ar de ventilação da mina pelo maciço rochoso, existem registros de projetos desenvolvidos desde a década de 1990 com foco na recuperação de calor no ar de exaustão, já descritos no capítulo anterior.

Para além do aproveitamento de energia geotérmica, outros projetos com foco em uma maior eficiência termodinâmica dos processos envolvidos na cadeia produtiva da mineração utilizam o conceito de poligeração de energia como tentativa de aumentar a eficiência da utilização de recursos naturais e de mitigar impactos ambientais. A poligeração refere-se ao aproveitamento de eletricidade, calor e arrefecimento, através de uma integração de processos baseada em análises termodinâmicas e económicas do sistema produtivo como um todo. Monica Carvalho e Millar (2012) propõem uma metodologia para a otimização do suprimento de energia em minas partindo destas premissas.

A **eficiência termodinâmica** e o estudo do **calor** nas minas são assuntos que têm atraído interesse crescente dos investigadores da área nos últimos tempos, e não podem ser desenvolvidos propriamente sem que antes se conheçam os princípios físicos que envolvem os mecanismos de troca de calor e os processos termodinâmicos que ocorrem no interior de galerias subterrâneas. Todos os trabalhos e projetos citados são construídos através de óticas diversas de um mesmo problema, e servem como guião para este projeto de investigação, cumprindo função dupla de garantir seu ineditismo e de direcionar o seu desenvolvimento partindo do que já está estabelecido. Compreender **o que é o calor**, no âmbito deste projeto de investigação, é tão importante quanto entender **como é percebido na mineração**, **como é abordado em projetos de investigação**, e **como pode ser utilizado como recurso**.

4.2 O Movimento de um fluido

Os problemas de Mecânica dos Fluidos são conhecidos desde antiguidade, quando foram publicados os **Postulados de Arquimedes** e a engenharia Romana desenvolvia sistemas complexos de abastecimento de água (White, 2006). Na Idade Média, a equação de conservação de massa para o escoamento viscoso unidimensional foi deduzida por **Leonardo da Vinci**, que também descreveu inúmeros outros fenómenos relacionados ao movimento de fluidos. **Torricelli** e **Pascal** demonstraram a existência da pressão atmosférica, do peso do ar e do vácuo, e as contribuições de **Euler**, **Bernoulli**, **Navier**, **Stokes**, **Poiseuille**, que formularam os conceitos da viscosidade, marcam o início da Dinâmica dos Fluidos (Rieutord, 2015).

Conforme Shames (1991), historicamente o estudo dos fluidos se dividiu em dois grupos de investigadores: os **matemáticos**, que observavam os fenómenos por um ponto de vista analítico e os **hidráulicos**, que se valiam de uma abordagem mais empírica. Demonstrou-se, porém, que a mecânica dos fluidos é uma ciência desenvolvida por uma combinação de ambas as perspetivas, pois a matemática carece de informações experimentais e o empirismo carece de generalização teórica das observações. Este projeto de investigação nasce de uma abordagem teórica que não satisfaz propriamente condições específicas da mineração, e portanto, já se inicia carente de experimentação; a perspetiva analítica leva a simplificações, e criam-se lacunas que só podem ser preenchidas pela experiência prática e pela observação direta da realidade.

Em um primeiro momento, no entanto, se faz necessário compreender os conceitos essenciais envolvidos no objeto de estudo deste projeto de investigação, uma galeria subterrânea por onde escoa um fluido, o que passa em grande medida pelo estudo da fluido-dinâmica.

O conceito de fluido

A ideia de fluido é intuitiva e parte das diferenças observacionais para aquilo que são considerados sólidos. Há ainda um ponto de vista qualitativo das diferenças entre sólidos e fluidos no que diz respeito à estrutura molecular e às forças intermoleculares, mais esparsa e mais fracas para o caso dos fluidos. Entretanto, uma definição mais formal de fluido seria, conforme Munsen et al. (2013), "uma substância que se deforma continuamente quando sofre a ação de forças de cisalhamento de qualquer magnitude", ou seja, uma substância que tenha a capacidade de fluir. Ao movimento de fluido, atribui-se o termo escoamento.

Esta definição se adequa à fluidos e gases, pois embora conservem diferenças a nível molecular, a mecânica dos fluidos busca estudar um comportamento macroscópico (ou seja, uma tendência de comportamento médio para as moléculas do fluido), de modo que o escoamento de gases e líquidos é dinamicamente igual contanto que não sofram variação de volume durante o fluxo (Spurk e Aksel, 2020). Gases são fluidos significativamente mais compressiveis do que líquidos, e caso haja variações substanciais de temperatura e pressão ao longo do escoamento (entenda-se por substanciais valores que causem mudanças relevantes nas propriedades físicas do gás em questão), a variação de volume deve ser levada em consideração na caracterização do movimento; caso contrário, trata-se o fluido como **incompressível**.

Os fluidos não são entes contínuos sob o ponto de vista microscópico, porém a mecânica dos fluidos adota um conceito de *continuum* de partículas de fluidos para que seja possível investigar os fenómenos relacionados ao movimento mecânico destas substâncias (Song, 2018). Assim, uma partícula de fluido é um conjunto de moléculas, e tem propriedades físicas definidas para porções macroscópicas do fluido, evitando-se a necessidade de utilizar informações a nível de movimento molecular. Considerando ainda que partículas do fluido possuem tamanho infinitesimal quando comparadas com o volume total ocupado pelo fluido, forma-se a base da **Hipótese de Continuidade** (Spurk e Aksel, 2020). Desta forma, o movimento deste conjunto de partículas passa a ser expresso por equações diferenciais parciais. Caso a velocidade de escoamento do fluido seja inferior a 30% da velocidade do som, considera-se que há um **escoamento incompressível**.

Viscosidade e outras propriedades dos fluidos

A viscosidade é a medida da resistência de um fluido ao escoamento devido à fricção interna (Song, 2018). Esta grandeza pode ser quantificada através do coeficiente de viscosidade ou viscosidade dinâmica μ, expresso em Pa s. É uma consequência da **Lei da Viscosidade de Newton**, que garante a proporcionalidade entre tensão de cisalhamento em uma interface tangente à direção do escoamento e a razão de variação da velocidade na direção normal à interface (Shames, 1991). Esta relação é válida para um tipo específico de fluido, os chamados **fluidos Newtonianos**, dentre os quais estão água e ar, por exemplo.

Um fluido só exibe viscosidade quando colocado em movimento, tratando-se de uma propriedade dinâmica. O fluxo de um fluido viscoso é chamado escoamento viscoso, e quando a viscosidade de um fluido é desprezível, o escoamento é chamado invíscido. Os fluidos de interesse para este projeto de investigação são água e ar, sujeitos a escoamentos viscosos incompressíveis, e são supostos também fluidos incompressíveis, por razões que serão discutidas mais adiante. Os escoamentos viscosos podem ser classificados em laminares ou turbulentos.

Um parâmetro essencial para descrever o padrão de fluxo de um fluido é o Número de Reynolds, dado pela equação 4.18 para ductos circulares, que quantifica a ação da viscosidade do fluido no movimento (Spurk e Aksel, 2020). As características de cada tipo de escoamento são discutidas nas secções seguintes.

Fluido	T $^{\circ}C$	μ $\left(Pa\,s \times 10^4\right)$	ρ $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	$\nu = \frac{\mu}{\rho}$ $\left(\frac{m^2}{s} \times 10^7\right)$
água	30	7.975	995.7	8.009
mercúrio	20	15.48	13579	1.140
óleo de motor	20	0.799	888.2	0.900
ar	30	0.186	1.165	160.0
CO_2	27	0.150	1.797	83.21
Hidrogênio	27	0.090	0.082	1095

Tabela 4.2: Propriedades físicas para alguns fluidos. Valores retirados de Munsen et al. (2013) e Holman (2001).

As características mais importantes do escoamento, além de suas classificações em termos de compressi-

bilidade e viscosidade, são a secção transversal, a velocidade de escoamento, e a taxa de vazão. A secção transversal é uma região perpendicular a todas as linhas de fluxo do fluido, sobre a qual a velocidade de escoamento varia consoante à sua posição. A velocidade mede o deslocamento do fluido em $\mathrm{m\,s^{-1}}$ e a vazão define a quantidade de fluido que escoa através da secção transversal em $\mathrm{m^3\,s^{-1}}$ ou $\mathrm{kg\,s^{-1}}$.

Para ductos circulares, a velocidade de escoamento é máxima no centro do tubo e nula em suas paredes, de modo que existe um gradiente de velocidades explicado através do conceito de camada limite: nos escoamentos, há uma camada normalmente definida como a distância entre o corpo sólido e o ponto no qual a velocidade de fluxo viscoso é de 99% da velocidade da corrente livre, em que predominam as forças de atrito que desaceleram o fluido de sua velocidade na camada externa até atingir o repouso na parede do ducto (Freire, 1990).

As Leis de Movimento de um Fluido

Quando se considera um fluido composto por partículas ou elementos de fluido infinitesimais, há de se fazer algumas considerações sobre estes elementos para estabelecer a evolução de certas quantidades durante o movimento do fluido. Em especial, destacam-se:

1. A **Equação de Continuidade** $\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho \nabla . \vec{v}$, em que $\vec{v}$ é o campo de velocidades, que relaciona a variação de volume de um elemento com a sua variação de densidade já que a massa do elemento é assumida como constante. O mesmo princípio de conservação de massa pode ser utilizado para descrever matematicamente a conservação de outras propriedades, como energia e movimento;

2. A **Conservação da Quantidade de Movimento**, que equivale à expressão "a variação total da quantidade de movimento é igual à resultante das forças que atuam sobre o volume do elemento, mais a resultante das tensões aplicadas sobre a superfície do volume". Quando se descartam as forças externas atuantes sobre o fluido, e se supõem densidade e viscosidade constantes, pode se escrever a **Equação de Navier** $\rho \frac{\partial v}{\partial t} = -\nabla p + \mu \Delta v$ (Rieutord, 2015);

3. A **Equação de Conservação de Energia**, que se traduz por "a variação das energias cinética e interna por unidade de tempo é igual ao fluxo de calor no elemento mais o trabalho realizado sobre o elemento por forças externas" (Anderson, 1992);

Estes princípios são universais e valem para qualquer tipo de escoamento, porém nos capítulos seguintes serão discutidas simplificações que decorrem da própria natureza do escoamento estudado, que é unidimensional, viscoso e incompressível.

4.2.1 A ventilação e o escoamento de ar na mineração

A ventilação é o processo de levar ar fresco para as instalações subterrâneas de uma mina, com o propósito de remover ar contaminado ou viciado e arrefecer ou aquecer certas regiões da mina (DOE, 2007) de modo a promover um maior conforto térmico para os trabalhadores em subterrâneo. O problema da acumulação de gases, por exemplo, está entre as causas mais comuns de acidentes na mineração (Jo e Khan, 2018).

Na antiguidade, as minas utilizavam movimentos convectivos naturais do ar para promover a ventilação natural dos ambientes subterrâneos. A obra *De re metallica* de **Georgius Agricola**, publicada em 1556, já abordava metodologias vigentes à época para promover ventilação forçada em minas subterrâneas, como nas imagens mostradas em 4.2.

A depender da região e da distribuição das redes de galerias (em termos de aberturas, altitude, pressão, e outros parâmetros), aplica-se a ventilação natural através de movimentos espontâneos do ar quando possível, na maioria das vezes aliada à ventilação forçada. A outra hipótese é injetar ar ou remove-lo por meio de ventiladores elétricos, o que impacta significativamente os custos de operação de uma mina, pois trata-se de uma operação eletro-intensiva.

Um parâmetro importante no dimensionamento da ventilação é a velocidade do ar, através do qual é possível estimar se as normas serão respeitadas e se haverá condições adequadas de controle de risco (Belle, 2013). A velocidade deve ser suficiente para levar ar fresco a todas as partes da mina, promover condições adequadas de temperatura, e reduzir a concentração ou eliminar gases tóxicos que possam estar presentes, sem ultrapassar certo limite a partir do qual a velocidade do ar atua contrariamente à segurança operacional.

Parte dos acidentes relacionados à má ventilação devem-se à falta de monitorização do fluxo de ar e ausência de engenheiros de minas dedicados especificamente à ventilação (Belle, 2013). A falta de planeamento

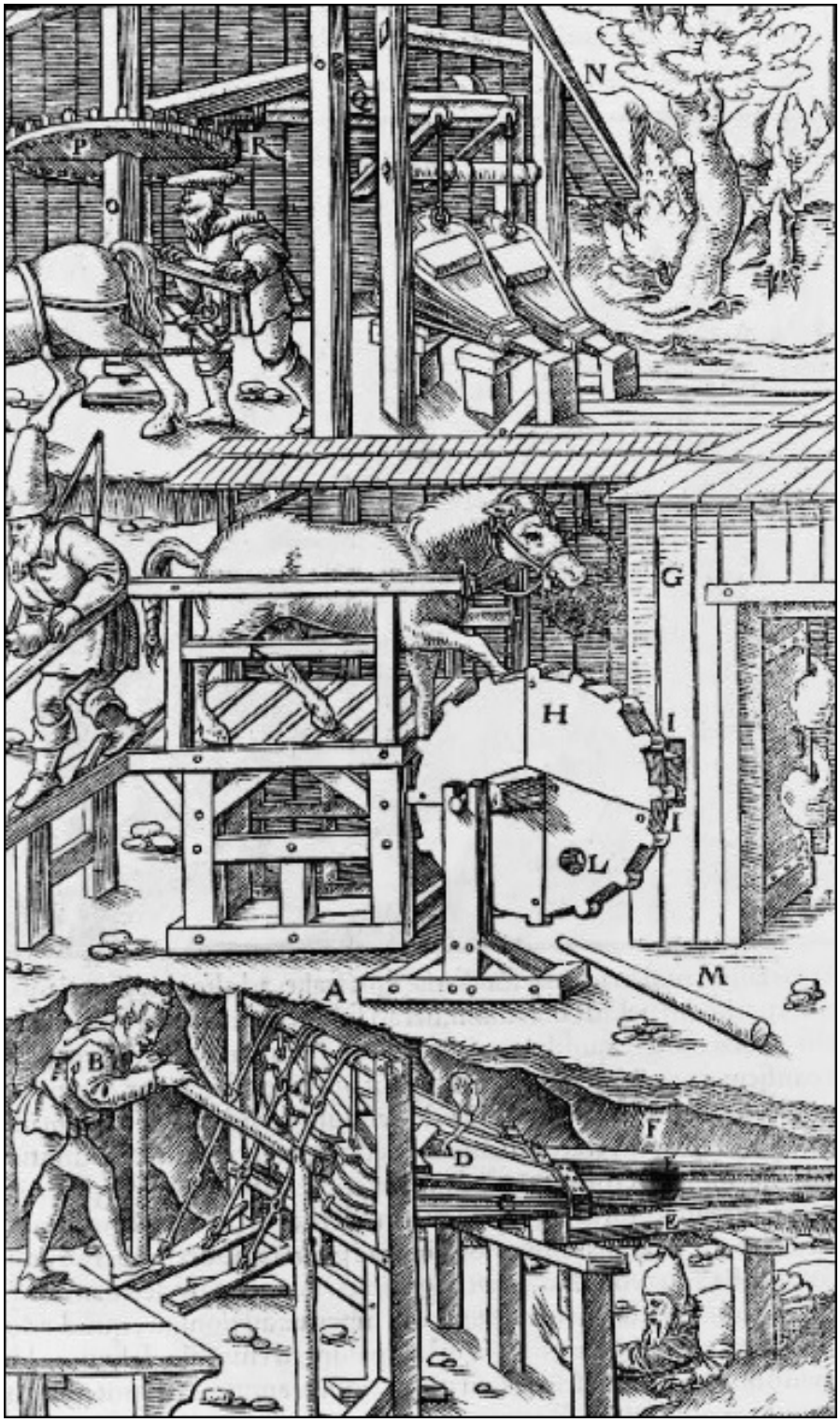


Figura 4.2: Métodos de ventilação de minas. Imagem retirada de: De Re Metallica

adequado destas operações e seu mau dimensionamento podem ter consequências catastróficas, de modo que o estudo dos fluxos de ar é parte fundamental da mineração subterrânea. A ventilação é, portanto, uma das áreas em que a mineração intersecta os conhecimentos da mecânica dos fluidos[1].

Perigos relacionados com a má ventilação em minas subterrâneas

O ambiente subterrâneo é confinado e pode contribuir para condições de risco quando há presença de gases, fumos, poeiras e outros **contaminantes**, produzidos no interior das galerias subterrâneas ou trazidos da superfície. O objetivo da ventilação, sob este ponto de vista, é diluir ou extrair estes contaminantes até que seja atingido um nível aceitável, que reflete as condições necessárias de segurança para os trabalhadores mineiros em subterrâneo.

Os principais contaminantes presentes no ar de uma mina subterrânea, e os perigos e riscos associados, são:

Poeiras e particulados a inalação de partículas respiráveis de materiais como sílica cristalina e poeiras de carvão pode causar doenças pulmonares severas como a silicose, doença de obstrução pulmonar cronica, pneumoconiose e até aumentar o risco de câncer de pulmão em casos de exposição prolongada (Donoghue, 2004). A presença destes materiais em minas subterrâneas pode ser controlada por técnicas de supressão de poeiras e dimensionamento adequado da ventilação.

Asbestos a dispersão de asbestos pode ser um problema em algumas minas subterrâneas. Em níveis mais baixos de exposição, podem causar doenças extrapulmonares, como espessamento pleural benigno e placas e calcificações pleurais; em níveis maiores de exposição, podem levar a fibrose pulmonar, asbestose, e câncer de pulmão, laringe, e pleura (Kähkönen et al., 2019). A dispersão de asbestos pode ser contida com exaustão local (complementada pela ventilação geral), tratamento do ar, e remoção das partículas o mais próximo possível de seu ponto de origem.

Fumos gerados por operações de desmonte devido à reação química envolvida na detonação de explosivos, gases tóxicos como NO_2, NO e CO são formados e devem ser rapidamente removidos e diluídos para concentrações seguras através da ventilação (Mainiero et al., 2007).

Material Particulado de Diesel (DPM) é produzido pela queima incompleta de combustível em motores a diesel, e tem na ventilação o principal método de controle na mineração subterrânea, diluindo-o a níveis adequados (Chang e Xu, 2019). Foi demonstrado que a exposição ao DPM tem potencial carcinogénico (The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), 1988).

Radão em minas contendo minerais uraníferos, a concentração de radão está intimamente associada ao caudal de ventilação (Sahu et al., 2015). A inalação destes gases, a depender do nível de exposição, pode provocar o depósito de produtos do decaimento radioativo do radão (como alguns isótopos de polónio, bismuto e chumbo) no pulmão, e aumentar o risco de cancro (Pickrell, 2009).

Gases em minas metálicas, reações químicas podem produzir gases como CO_2, SO_2, H_2S e outros, que podem ser tóxicos, asfixiantes, ou explosivos, podendo também causar incêndios (Department of Industry and Resources and Government of Western Australia, 1997). Em minas de carvão, a emissão de gases (como o metano) é muito comum, podendo levar a misturas explosivas entre gás e ar e provocar resultados catastróficos (Ulery, 2008). A ventilação é fundamental para a dispersão de gases na mineração subterrânea.

Além da diluição de contaminantes, a ventilação tem função de promover conforto térmico. O calor excessivo em uma galeria subterrânea, pode, no entanto, causar problemas maiores do que apenas desconforto: sintomas mais leves da exposição ao calor são irritações na pele, espasmos e cãibras musculares; em casos mais severos de hipertermia, podem ocorrer desmaios, tonturas, dores de cabeça, náuseas, fraqueza, desidratação, confusão mental, convulsões, e até a morte (Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention and National Institute for Occupational Safety and Health, 2017)).

A ventilação pode ser insuficiente para garantir as condições térmicas ideais caso o ar injetado também esteja a uma temperatura acima dos limites recomendados. A **Mine Safety and Heatlh Administration (MSHA)**, por exemplo, considera que são altas as temperaturas acima dos 26 °C, medida com dispositivo

[1] Todo livro de ventilação em minas subterrâneas tem ao menos um capítulo introdutório de mecânica dos fluidos.

WBGT (U. S. Department of Labor and Mine Safety and Health Administration, 2012). Nestes casos, pode ser necessário realizar operações de pré-condicionamento do ar de entrada da ventilação.

De acordo com a base de dados da **National Institute for Occupational Safety & Health (NIOSH)**, cerca de 20% dos desastres em minas subterrâneas dos Estados Unidos catalogados entre 1839 e 2019 e que estão relacionados as más condições encontradas em ambientes subterrâneos, podem ser consequência da ventilação inadequada[1].

Assim, o dimensionamento adequado da ventilação é fundamental para garantir condições subterrâneas que promovam a seguranças dos operários mineiros. Para um dimensionamento adequado, é necessário **conhecer** as condições-ambiente, **identificar** possíveis fontes de perigo, e **estimar** os parâmetros adequados para a ventilação.

O ar como fluido de interesse na ventilação de minas subterrâneas

As propriedades do ar que são de interesse maior para a ventilação são as chamadas propriedades psicrométricas, que correspondem às suas propriedades em repouso ou em movimento, e estão relacionadas ao seu comportamento termodinâmico (Hartman et al., 1997). O ar é, na realidade, uma mistura entre ar seco e vapor de água, e suas propriedades psicrométricas são altamente afetadas pelo estado de temperatura e de humidade, que modificam seu comportamento termodinâmico.

Assim, é necessário conhecer as propriedades do ar para um determinado **estado**, para então estudar o seu comportamento na ventilação e condicionamento de ambientes. Na mineração subterrânea, os parâmetros que são usualmente medidos e que permitem determinar estas propriedades do ar são a **pressão barométrica**, a **temperatura de bulbo seco** (que mede o conteúdo de calor do ar), e a **temperatura de bulbo húmido** (que é uma medida de temperatura de saturação e indica a capacidade de evaporação do ar).

Quando se fala em temperatura do ar, refere-se normalmente à **temperatura de bulbo seco**. A **temperatura de bulbo húmido** é igual à **temperatura de bulbo seco** quando a humidade do ar está a 100% e é menor quando a humidade relativa é inferior a 100%. Uma propriedade psicrométrica importante que pode ser determinada através destes parâmetros, mas também pode ser medida diretamente, é a **humidade relativa** do ar.

Conhecendo **temperatura**, **humidade** e **pressão** do ar, é possível conhecer suas principais propriedades termodinâmicas, como **peso específico**, **calor específico**, **condutividade**/**difusividade térmica**, e **viscosidade dinâmica**/**cinemática**. Estas tabelas de propriedades podem ser facilmente encontradas na literatura e em calculadoras *online*.

Destaca-se o facto de que entre 10.0 °C e 20.0 °C a humidade afeta pouquíssimo as propriedades termodinâmicas do ar; a própria temperatura do ar neste intervalo provoca também variações de menor ordem de grandeza. Isto é importante para o desenvolvimento do trabalho, especialmente em relação à validação do modelo, em que se supõem propriedades aproximadamente constantes para o ar. Diversos diagramas das propriedades termodinâmicas do ar em função da humidade e da temperatura podem ser consultadas em Boukhriss et al. (2013)[2].

Também, propriedades como a **viscosidade**, o **calor específico**, e a **condutividade térmica** são pouco afetados pela pressão, de acordo com Holman (2001). A baixa variação de pressão e de propriedades fortemente dependentes da pressão, como o **peso específico** do ar, também será importante em análises futuras. Por ora, basta dizer que galerias aproximadamente horizontais, com variações baixas de temperatura, são pouco favoráveis a variações de pressão, em especial se considerados troços de curta extensão.

Com as propriedades termodinâmicas do ar caracterizadas, é possível utilizar técnicas de dimensionamento da ventilação e de estimação de caudal em redes de galerias para controlar as condições-ambiente em subterrâneo.

Composição do ar e leis dos gases aplicáveis à ventilação

Considerando o ar seco, sua composição é uma mistura de gases, divididos essencialmente entre O_2 e N_2 e gases inertes, conforme a Tabela 4.3 retirada de Hartman et al. (1997).

Algumas **leis dos gases** importantes para dimensionamento da ventilação são:

[1] Foram desconsiderados os incêndios e consideradas apenas as explosões relacionadas a gases e poeiras, além de sufocamento, inalação de gases e outros problemas relacionados à qualidade do ar.

[2] Disponível integralmente em: https://www.researchgate.net/publication/271937026_Study_of_thermophysical_properties_of_a_solar_desalination_system_using_solar_energy (consultado em janeiro de 2022)

Gás	% volumétrica
N_2	78.09
O_2	20.95
CO_2	0.03
Outros	0.93

Tabela 4.3: Composição do ar seco.

1. **Lei de Boyle** - O volume específico de um gás é inversamente proporcional à pressão absoluta (a uma temperatura constante)
$$p_1 v_1 = p_2 v_2$$
2. **Lei de Charles** - O volume específico de um gás é diretamente proporcional à temperatura absoluta, e a pressão absoluta é diretamente proporcional à temperatura absoluta
$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2}$$
$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$$
3. **Lei Geral dos Gases** - O volume específico de um gás varia diretamente com a temperatura absoluta e inversamente à pressão absoluta
$$\frac{p_1 v_1}{T_1} = \frac{p_2 v_2}{T_2}$$
4. **Lei de Dalton** - a pressão total exercida por uma mistura gasosa é igual à soma das pressões parciais dos gases que a compõem
$$p_{mistura} = \sum^{n} p_i$$
5. **Lei de Graham** - a taxa de difusão de um gás no ar é inversamente proporcional à raiz quadrada da razão entre os pesos específicos do gás e do ar (gases mais leves do que o ar se difundem mais rapidamente do que gases mais pesados do que o ar)
$$\text{Taxa de difusão} = \sqrt{\frac{w_{ar}}{w_{\text{gás}}}}$$

Dimensionamento e cálculos de ventilação

O engenheiro responsável pela ventilação da mina deve se preocupar não apenas com a quantidade de ar injetado na mina, mas também com sua **qualidade** em termos de composição química (Hartman et al., 1997). O que se entende por ventilação é, portanto, um conjunto de processos de **condicionamento de ar**, em que a **quantidade de ar** é um dos parâmetros críticos, mas que também passa pela garantia de **condições térmicas adequadas** e da **qualidade adequada do ar respirável**.

A velocidade e o caudal de ar no ambiente subterrâneo (ou seja, a **quantidade de ar**) são parâmetros que influenciam a qualidade do ar respirável, pois impactam as condições térmicas e as concentrações de gases e poeiras, sendo fatores ambientais de primeira ordem na mineração subterrânea (Vidal Félix Navarro Torres e da Gama, 2005).

O caudal de ar resulta da ventilação natural ou artificial, e é consequência da **carga** (desnível entres as secções de entrada e saída, curva característica do ventilador, e diferenças de temperatura de entrada e saída) e da **resistência** (parâmetros geométricos como dimensões das galerias, comprimento total ou equivalente, área de secção, distribuição das redes de galerias, e rugosidade ou desvios de área das paredes da galeria).

O dimensionamento da ventilação não possui solução fechada, e existem diversas técnicas utilizadas para estimar o caudal de ar necessário para promover condições adequadas nos ambientes subterrâneos. Os requisitos da ventilação também variam largamente em função das características particulares de cada mina, a depender da existência de fontes de contaminação do ar, temperaturas extremas, riscos de incêndio, e

diversos outros fatores. A distribuição espacial das redes de galerias e o método de lavra empregado também são determinantes para os cálculos do caudal de ar, pois podem apresentar características variadas para a perda de carga.

É complicado, portanto, estabelecer uma metodologia padrão de dimensionamento da ventilação; na verdade são poucos os casos em que há generalização absoluta de técnicas e conceitos aplicados às operações de uma mina. Encontra-se na literatura uma ampla gama de livros e artigos que se dedicam à compreensão dos fenómenos de fluxos de ar em galerias subterrâneas para situações específicas, e livros de referência que se dedicam ao tema de forma mais ampla, dos quais foram retirados algumas das técnicas que são mencionadas neste capítulo.

Atualmente, existem também diversos *softwares* que dão suporte ao dimensionamento e controle da ventilação, além de modelos computacionais desenvolvidos para este fim.

Uma abordagem fundamental para que os cálculos de caudal sejam viáveis é a consideração do ar como fluido incompressível, que é uma simplificação fundamental e amplamente utilizada no dimensionamento da ventilação de uma mina (Hartman et al., 1997). Isto, como se sabe, não é verdadeiro, pois o ar é um gás compressível. Esta discussão será retomada em diversas partes deste texto com a finalidade de demonstrar que esta consideração inicial é aceitável, mas por agora este fato será tratado como ponto de partida para os cálculos realizados.

Um ponto de vista interessante para a ventilação é que esta operação é provavelmente a única que tem como domínio **toda a extensão subterrânea da mina**, passando muitas vezes por galerias desativadas, níveis em que já se concluíram as operações de lavra, e ambientes que estão isolados da parte ativa da operação mineira. Todas as demais operações se realizam em setores específicos, como a frente de lavra, as galerias de transporte, estopes, vias de acesso, e outras.

A ventilação exige, então, caracterizar uma região extensa e que envolve a mina em toda a sua complexidade. Não há forma praticável de realizar esta tarefa sem partir de simplificações do sistema. De modo mais abrangente, o que se faz é tratar a mina toda como uma *caixa*, em que a ventilação é um processo estático, mas que envolve **variações de energia**. A variação de energia de um fluido em movimento pode ser expressa pela **Equação de Bernoulli**:

$$\frac{p_1}{w_{ar}} + \frac{u_{ar_1}^2}{2g} + E_{p_1} = \frac{p_2}{w_{ar}} + \frac{u_{ar_2}^2}{2g} + E_{p_2} + P_{e_1} \tag{4.1}$$

Onde w_{ar} é o peso específico do ar, u_{ar} é a velocidade do ar, E_p é a energia potencial, e P_e é a perda de energia. Este balanço pode ser compreendido em termos de cargas e perdas; o fluido de entrada tem energia cinética e potencial que devem ser suficientes para superar as perdas encontradas ao longo de seu percurso, que podem ser causadas por diversos fatores, como **elevação**, e **fricção**.

As vias por onde o ar escoa, em minas subterrâneas, são como ductos extremamente rugosos (Thakur, 2018). O formato das vias nem sempre é circular e suas dimensões podem ser convertidas para um **raio hidráulico** r_h equivalente, em que se aplica a equação:

$$r_h = \frac{A}{P} \tag{4.2}$$

Onde A é a área de secção da via e P é o seu perímetro.

As perdas de carga (ou de pressão) por fricção podem ser calculadas através da **Equação de Atkinson**, que é na verdade uma adaptação da **Equação de Darcy-Weibach**, e que expressa estas perdas em termos da altura de uma coluna de água, em unidades do sistema imperial:

$$H = \frac{KPLQ^2}{5.2A} \tag{4.3}$$

Onde H é a altura da coluna de água em polegadas, L é a extensão da via em pés, Q é o caudal de ar em pés-cúbicos por minuto, A é a área em pés ao quadrado, e P é o perímetro em pés. O parâmetro K é chamado de **fator de fricção em vias de mineração** (ou ***Mine Airway Friction Factor***) obtido por medições diretas ou estimado através de dados históricos[1]. Os valores de K variam entre 20 e 200, a depender do tipo de abertura, forma, rocha, inclinação, suportes, e outras características das vias.

Quanto às perdas devido a elevação, pode-se calcular a variação da coluna equivalente de água em função da variação de altura do ar, fazendo $H_{\text{água}} = \frac{w_{ar}}{w_{\text{água}}} H_a r$, em unidades compatíveis. Também se utiliza

[1] Podem ser encontrados valores de referência em Thakur (2018), que compilou algumas tabelas publicadas anteriormente por Greenwald e McElroy (1929), Pursall (1960) e outros autores

comummente uma conversão de 0.83 m de ar para 1 mm de água ou 70 pés de ar para 1 polegada de água. A variação de elevação pode favorecer o movimento do ar, caso a cota considerada seja menor do que a cota de entrada, no que as perdas ou cargas podem ter sinal negativo ou positivo no balanço de energia.

Existem também perdas de carga por **mudanças de direção no fluxo de ar**, ou seja, por curvas ou obstruções das vias em que há escoamento de ar. Os cálculos destas perdas envolvem converter mudanças de direção em comprimentos equivalentes ou fatores de fricção equivalentes, no que se procede ao cálculo da perda de carga por fricção como descrito anteriormente. A conversão de desvios depende da forma, ângulo, direção, e grau de desvio dos mesmos, e existem diversas metodologias para os estimar, que podem ser encontradas em Thakur (2018), Hartman et al. (1997) e outros livros e manuais de ventilação de minas.

Como se nota, estes cálculos envolvem dividir as galerias em troços equivalente de comprimento L, para os quais seja possível supor uma certa variação de elevação, ou aplicar uma rugosidade constante ou aproximada. Há, portanto, uma diferença fundamental entre determinar as perdas de carga em galerias e poços, e determinar uma perda de carga/carga total requerida para toda a mina.

Após caracterizar as perdas em cada troço ou rede de galerias, constrói-se uma **curva característica da mina** através da equação $H = RQ^2$, que é uma modificação das equações anteriormente apresentadas. A variável R refere-se a uma resistência equivalente total ao movimento do fluido, podendo ser escrita como:

$$R = \frac{KPL}{5.2A^3} \tag{4.4}$$

A **resistência equivalente (R)** é calculada utilizando uma analogia com os circuitos elétricos: a carga total H é equivalente a tensão requerida para que uma certa corrente elétrica (equivalente a Q^2) passe por um circuito de resistência R. A resistência equivalente é calculada considerando os troços de galeria como resistores associados em série ou paralelo.

Com isto, é possível determinar a potência em *hp* requerida para o fluxo de ar, através da equação 4.5. Dividindo-se o valor obtido pela eficiência do motor, estima-se a potência do motor necessária para o ventilador.

$$\text{Potência do ar} = \frac{5.2PQ}{33000} \tag{4.5}$$

Este é um procedimento genérico para uma estimativa inicial da potência dos ventiladores a serem utilizados para a operação de ventilação de uma mina subterrânea. Existem outros pontos de vista importantes relacionados a condições extremas de temperatura, presença de gases e contaminantes, presença de equipamentos mecânicos e de trabalhadores, para os quais pode ser necessário empregar ventilação auxiliar, pré-condicionamento da temperatura do ar de entrada da ventilação, ou calcular o caudal de ar requerido para uma determinada região.

O caudal mínimo de ar, que é corrigido para compensar as perdas de carga descritas anteriormente, pode ser calculado através de diferentes metodologias; dentre elas, há a soma dos caudais necessários para lidar com diferentes parâmetros ambientais, como na 4.6, segundo Vidal Félix Navarro Torres e da Gama (2005):

$$Q_t = Q_h + Q_c + Q_g + Q_p \tag{4.6}$$

Onde Q_t é o caudal mínimo total, Q_h é o caudal de ar relativo à presença humana, Q_c é o caudal necessário para garantir o conforto térmico, e Q_g e Q_p são os caudais necessários para a dispersão de gases e poeiras, respetivamente. Existem inúmeras formulações para o cálculo dos caudais parciais de ar, que derivam de modelos matemáticos, relações empíricas, *thumb rules*, e normas ambientais, que podem ser encontrados em detalhes na literatura de referência, como em Vidal Félix Navarro Torres e da Gama (2005).

Outra metodologia para estimar o caudal mínimo de ar para ventilar toda a mina leva em conta o método de lavra utilizado, traduzido por um fator de produção α (dado pela tabela 4.4), pelo caudal de ar necessário para ventilar a infraestrutura da mina β, e pela produção média anual t, de acordo com a equação 4.7, segundo Howes (1998):

$$Q = \alpha t + \beta \tag{4.7}$$

Há uma abundante quantidade de publicações que trazem formulações empíricas ou semi-empíricas ((Zhu et al., 2015), (Rodríguez e Díaz, 2009), (Xu et al., 2017)), e combinações de métodos teóricos e analíticos com métodos computacionais e numéricos ((Jo e Khan, 2018), (Shalimov, 2011), (Nam et al., 2020), (Widiatmojo et al., 2013), (Wang et al., 2019), e outros) para avaliar o comportamento do ar em minas subterrâneas. Entretanto, todos estes derivam, em certa medida, da mecânica dos fluidos clássica, que será um dos pontos

Método de lavra	$\alpha \left(\frac{m^3}{s \frac{Mt}{ano}}\right)$
Block caving	50
Room and pillar	75
Sublevel caving	120
Open stoping	
Produção alta (>5 Mt/ano)	160
Produção baixa (<5 Mt/ano)	240
Cut and fill	
Mecanizada	320
Manual	400

Tabela 4.4: Valores para o fator de produção α, retirado de Howes (1998).

de partida deste projeto de investigação para estudar o movimento do ar e suas consequências em uma galeria subterrânea, sob o ponto de vista das **trocas de calor** e da **evolução de temperatura do ar**. A evolução termodinâmica do ar (ou água) em uma galeria subterrânea é bastante complexa, e modelar este comportamento implica identificar a ocorrência dos principais fenómenos físicos envolvidos, como é demonstrado na continuação deste capítulo.

4.3 Fenómenos termodinâmicos no interior de uma galeria subterrânea

Em secções anteriores, buscou-se introduzir os conceitos básicos relacionados aos fenómenos físicos que se dão quando há escoamento de um fluido no interior de uma galeria, elucidando brevemente conceitos de **calor**, **escoamento**, e suas correspondências em ambientes subterrâneos. Agora estes conceitos, que são universais, serão desenvolvidos para o caso específico ao qual se dedica este projeto de investigação, buscando caracterizar de forma mais completa os **fenómenos termodinâmicos que ocorrem no interior de uma galeria subterrânea**.

Nas subsecções seguintes são feitas as devidas descrições matemáticas dos fenómenos físicos de interesse, e é desenvolvido um balanço de energia aplicável a todo o domínio do problema. As equações utilizadas foram compiladas neste trabalho com base em inúmeros textos de referência da literatura, com destaque para Patankar (1980), Holman (2001), Bayazitoglu e Ozisik (1988), White (2006), e outros.

4.3.1 Troca de calor por Condução

A condução é o mecanismo de fluxo de calor no qual energia é transportada da região de maior temperatura para a região de menor temperatura pela deriva de elétrons (Bayazitoglu e Ozisik, 1988). A condução é um fenómeno de troca de calor que ocorre no interior de um sólido ou de um fluido, entre sólidos, ou entre um sólido e um fluido, desde que o fluido esteja em repouso.

Este mecanismo se traduz matematicamente pela **Lei de Fourier da condução de calor**, expressa pela equação 4.8.

$$q = kA\frac{\partial T}{\partial x} \tag{4.8}$$

Onde q é o fluxo de calor, A é a área de contacto, e $\frac{\partial T}{\partial x}$ é o gradiente de temperatura na direção x.

Quando se considera a temperatura como função do tempo, e que fontes de calor podem estar presentes dentro corpo, pode ser feito o seguinte balanço de energia, segundo Holman (2001): **energia conduzida na face esquerda + energia gerada = mudança na energia interna + energia conduzida na face direita**. Este balanço é traduzido pela equação 4.9:

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right)}_{\text{I}} + \underbrace{\dot{q}}_{\text{II}} = \underbrace{\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}}_{\text{III}} \tag{4.9}$$

O termo **I** indica a energia transferida entre dois pontos do corpo, o termo **II** representa a energia gerada dentro do corpo, e o termo **III** corresponde à mudança na energia interna, c_p o calor específico, $\dot{q}$ a energia

gerada por unidade de volume, e $\frac{\partial T}{\partial t}$ a variação da temperatura com o tempo. Adaptando a equação 4.9 para a condução de calor em três dimensões, obtém-se a equação 4.10. A equação 4.11 vale para o caso em que a condutividade térmica é constante.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right) + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \tag{4.10}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t} \tag{4.11}$$

Sendo α a difusividade térmica do material.

Quanto maior o valor da difusividade térmica, mais rapidamente o calor se irá difundir através do material (Holman, 2001). O lado esquerdo da equação 4.11 define o fluxo de calor no sólido, partindo das superfícies externas, que se dá ao longo de certo intervalo, e o lado direito da equação define o aumento da energia interna do sólido neste intervalo. A temperatura é, portanto, função do tempo e espaço.

Adaptando a equação 4.11 para coordenadas cilíndricas, desprezando a geração de energia no corpo, e supondo uma distribuição de temperaturas uniforme na direção φ, escreve-se:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\alpha r \frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\alpha \frac{\partial T}{\partial z}\right) \tag{4.12}$$

A utilização de **coordenadas cilíndricas** é particularmente interessante para descrever uma galeria subterrânea. O formato cilíndrico favorece a descrição matemática dos fenómenos de transporte pois permite simplificações e é bem desenvolvido na literatura. Formatos diferentes de secção transversal podem ser eventualmente convertidos para um raio hidráulico equivalente, o que permite adotar um formato cilíndrico para galerias de secções diversas.

4.3.2 Troca de calor por Convecção

O fenómeno de convecção ocorre quando um fluido escoa em contacto com um sólido submetido a temperatura diferente. O movimento do fluido está diretamente associado a transferência de calor que ocorre entre o fluido e a superfície do sólido, alterando as taxas em que se dão as trocas de calor. A convecção ocorre simultaneamente à condução de calor (Bayazitoglu e Ozisik, 1988). Este mecanismo de troca de calor pode ser descrito de forma geral através da equação 4.13, chamada de **Lei de Newton para o arrefecimento**.

$$q = hA\,(T_r - T_f) \tag{4.13}$$

Em que T_r é a temperatura na parede do sólido, T_f é a temperatura do fluido, A é a área de contacto entre fluido e sólido, e h é o coeficiente de transferência de calor por convecção em $\mathrm{W\,m^{-2}\,K^{-1}}$.

Coeficiente de transferência de calor por convecção (h)

Para que seja possível determinar inteiramente a equação 4.13, é necessário avaliar o **coeficiente de transferência de calor por convecção**, também chamado de **coeficiente de convecção** e representado pela letra **h**, que quantifica a influência do escoamento do fluido (em função de sua intensidade) nas trocas de calor. Este coeficiente possui o mesmo valor para rocha e para o fluido e depende das propriedades do escoamento.

Para determinar o valor de **h**, algumas considerações devem ser feitas: se supõe uma temperatura constante da parede do ducto ao longo do tempo (constante, na prática, pode significar variação desprezável), o que implica que na solução da equação diferencial deverão ser considerados intervalos de tempo muito pequenos, o escoamento do fluido é considerado plenamente desenvolvido, e a razão entre o comprimento da ducto e seu diâmetro é superior a 60. Como se assume uma temperatura constante da parede do ducto, há duas possibilidades: recalcular o **h** a cada passo de tempo, caso a variação de temperatura da parede do ducto seja significativa a longo prazo, ou considera-lo constante caso a variação de temperatura da parede do ducto seja desprezável ao longo do tempo.

Partindo destas hipóteses, segundo Janna (2000), o coeficiente h pode ser determinado por:

$$h = \frac{Nu\,.\,k}{D} \tag{4.14}$$

Onde Nu é o **Número de Nusselt** e D é o diâmetro da galeria. Com o comprimento da galeria $L >>> D$, Nu pode ser aproximado por $Nu \approx 3.66$, segundo a **Equação de Hausen** (Holman, 2001). O significado físico de Nu é a razão entre as trocas de calor por convecção e por condução, ou seja, o quão mais prevalecente é o fenómeno de convecção se comparado ao fenómeno de condução[1], e espera-se quanto mais intenso seja o escoamento, maior seja o Nu; por outro lado, se $Nu = 1$, pode-se considerar que o fluido está em repouso.

Para um escoamento turbulento, o **Número de Nusselt** pode ser aproximado pela **Equação de Pethukov**. Esta equação, também aplicável a ductos rugosos, foi desenvolvida por **Petukhov** e investigadores do **Moscow Institute for High Temperature**. Dentre as formulações descritas na literatura, considera-se que esta é a mais rigorosa e versátil, por não ser aplicável somente a ductos lisos, como destaca Bayazitoglu e Ozisik (1988). A **Equação de Pethukov** é dada por:

$$\begin{aligned} Nu &= \frac{Re\,.\,Pr}{X}\left(\frac{f}{8}\right)\left(\frac{\mu_f}{\mu_r}\right)^n && \text{para líquidos} \\ Nu &= \frac{Re\,.\,Pr}{X}\left(\frac{f}{8}\right)\left(\frac{T_f}{T_r}\right)^n && \text{para gases} \end{aligned} \tag{4.15}$$

Onde f é o **fator de fricção** das paredes do ducto, também chamado de **fator de fricção de Darcy**, μ_f é a viscosidade dinâmica do fluido avaliada a temperatura do fluido, μ_r é a viscosidade dinâmica do fluido avaliada a temperatura da parede da galeria, T_f é a temperatura média do fluido, T_r é a temperatura média da parede, Re é o **Número de Reynolds**, Pr é o **Número de Prandtl**, e X é calculado por:

$$X = 1.07 + 12.7\,(Pr^{\frac{2}{3}} - 1)\left(\frac{f}{8}\right)^{1/2} \tag{4.16}$$

Fisicamente, Re representa uma quantificação da turbulência, e mede a razão entre energia turbulenta produzida por unidade de volume e a taxa correspondente de dissipação viscosa[1]. Já o **Número de Prandtl** representa uma propriedade estática do fluido, que corresponde a uma razão entre sua capacidade de difusão de movimento e sua capacidade de difusão de calor[1].

Quando um fluido escoa no interior de um ducto e há uma diferença de temperatura entre sólido e fluido, desenvolve-se um gradiente de temperatura ao longo da secção transversal. Para líquidos, a viscosidade é significativamente afetada pela variação de temperatura, que alteram suas propriedades físicas. Já no caso dos gases, as propriedades físicas estão associadas à temperatura absoluta (Bayazitoglu e Ozisik, 1988). Sendo assim, os termos de expoente n em 4.15 são fatores de correção no cálculo de Nu, para que se incluam efeitos causados por condições não-isotérmicas.

O mesmo tipo de correção deve ser feito para o fator de fricção, também afetado pela variação das propriedades físicas dos fluidos, segundo as relações:

$$\begin{aligned} f &= f_{iso}\left(\frac{\mu_f}{\mu_r}\right)^m && \text{para líquidos} \\ f &= f_{iso}\left(\frac{T_f}{T_r}\right)^m && \text{para gases} \end{aligned} \tag{4.17}$$

Onde f é o fator de fricção em condições não-isotérmicas e f_{iso} é o fator de fricção em condições isotérmicas. Os valores dos expoentes n e m presentes nas equações anteriores tomam valores de acordo com a Tabela 4.5, adaptada de Bayazitoglu e Ozisik (1988).

Ainda, para que possa ser estimado o número de Nusselt, devem ser calculados os números de Reynolds de Prandtl.

$$\begin{aligned} Re &= \frac{u_m\,.\,D}{\nu} && \text{Número de Reynolds} \\ Pr &= \frac{\nu}{\alpha} && \text{Número de Prandtl} \end{aligned} \tag{4.18}$$

Sendo que u_m é a velocidade média de escoamento, ν é a viscosidade cinemática, e α é a difusividade térmica.

[1] Algumas definições de grandezas e propriedades termofísicas foram retiradas da **Thermopedia**, disponíveis em https://thermopedia.com/.

Regime de escoamento	Fluido	Condição	n	m
Laminar	Líquido	Aquecimento ou resfriamento	0.14	
	Gás	Aquecimento ou resfriamento	0.00	-1.00
Turbulento	Líquido	Resfriamento	0.25	
		Aquecimento	0.11	
		Aquecimento ou resfriamento		-0.25
	Gás	Resfriamento	0.00	0.10
		Aquecimento	0.50	0.10

Tabela 4.5: Coeficientes de correção da fricção para situações não isotérmicas.

Por fim, é necessário avaliar o fator de fricção das paredes do ducto. Este parâmetro pode ser estimado de diversas formas, seja através da rugosidade média das paredes, ou pela **Equação de Darcy–Weisbach** (4.19), onde Δp é a variação de pressão (perda de carga) ao longo de um segmento de ducto de comprimento L.

$$f = \frac{2 \,.\, \Delta p \,.\, D}{L \,.\, \rho \,.\, u_m^2} \tag{4.19}$$

Assim, define-se o procedimento de cálculo para a estimação do coeficiente de convecção através de **um das formulações empíricas existentes**, que foi inicialmente adotada como metodologia mais adequada ao caso estudado. Entretanto, não é incomum que formulações para o cálculo do coeficiente de convecção resultem em erros de até 25%; tendo isto em vista, a melhor aproximação do coeficiente de convecção será a que se adaptar melhor ao modelo, e não necessariamente a aproximação feita pela **Equação de Petukhov**.

O modelo foi construído acomodando a **Equação de Pethukov**, e mais adiante, já na fase de de validação, passa a aceitar também outras metodologias de cálculo do **coeficiente de convecção**. Esta discussão da **estimação** do coeficiente de convecção, bem como da sua **aplicação** dentro da equação do balanço de energia e implementação através do método numérico utilizado, será retomada futuramente neste texto.

Adianta-se, por ora, que do ponto de vista matemático e numérico, é neste ponto que se encontra o maior desafio da modelação das trocas de calor, e que problemas de diversas naturezas emergem se os cuidados necessários não forem tomados. O coeficiente de convecção é um dos pontos sensíveis da modelação das trocas de calor em uma galeria.

4.4 Escoamento de um fluido em um ducto circular

Como visto, o fenómeno de condução ocorre em corpos sólidos ou líquidos em repouso quando há um determinado gradiente de temperatura. A convecção, por sua vez, é o mecanismo de troca de calor que ocorre entre um sólido e um fluido que escoa sobre o primeiro. É necessário descrever o balanço de energia de um fluido com determinado escoamento, uma vez que o seu movimento também contribui para o transporte de energia térmica.

Segundo Kakaç e Yener (1995), a equação de energia para fluidos Newtonianos em escoamento incompressível pode ser escrita, em coordenadas cilíndricas, como:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\alpha r \frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\alpha \frac{\partial T}{\partial z}\right) + \phi \tag{4.20}$$

Em que ϕ é a função de dissipação, que representa a taxa com a qual as forças viscosas realizam trabalho irreversível nas partículas do fluido por unidade de volume e u é a função de velocidade de escoamento do fluido na direção z. A função u depende essencialmente do regime de escoamento, que altera o perfil de velocidade na secção transversal do ducto devido a uma resistência ao movimento do fluido imposta por suas paredes, e da distância entre o ponto e as paredes do ducto.

4.4.1 Perfil de velocidade para um escoamento laminar em um ducto circular

Para um escoamento laminar completamente desenvolvido no interior de um ducto com secção circular, a velocidade na direção z possui perfil aproximadamente parabólico, e os valores locais da função velocidade

dependem de suas coordenadas radiais e da distância para a parede do ducto. Sendo a velocidade máxima no centro do ducto e nula no ponto de contacto entre o fluido e a parede, uma expressão simplificada para a velocidade local pode ser escrita, de acordo com Kays (1980), como:

$$u = 2u_m \left(1 - \frac{r^2}{r_0^2}\right) \tag{4.21}$$

Sendo u o valor local da velocidade, r_0 o raio do ducto, r o valor da coordenada do ponto nesta direção, e u_m a velocidade média de escoamento. Assumindo propriedades físicas constantes para o fluido e desprezando-se a dissipação viscosa, obtêm-se, substituindo 4.21 em 4.20, uma equação aproximada para o balanço energético de um fluido escoando em regime laminar no interior de um ducto cilíndrico circular:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + 2u_m \left(1 - \frac{r^2}{r_0^2}\right) \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\alpha r \frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\alpha \frac{\partial T}{\partial z}\right) \tag{4.22}$$

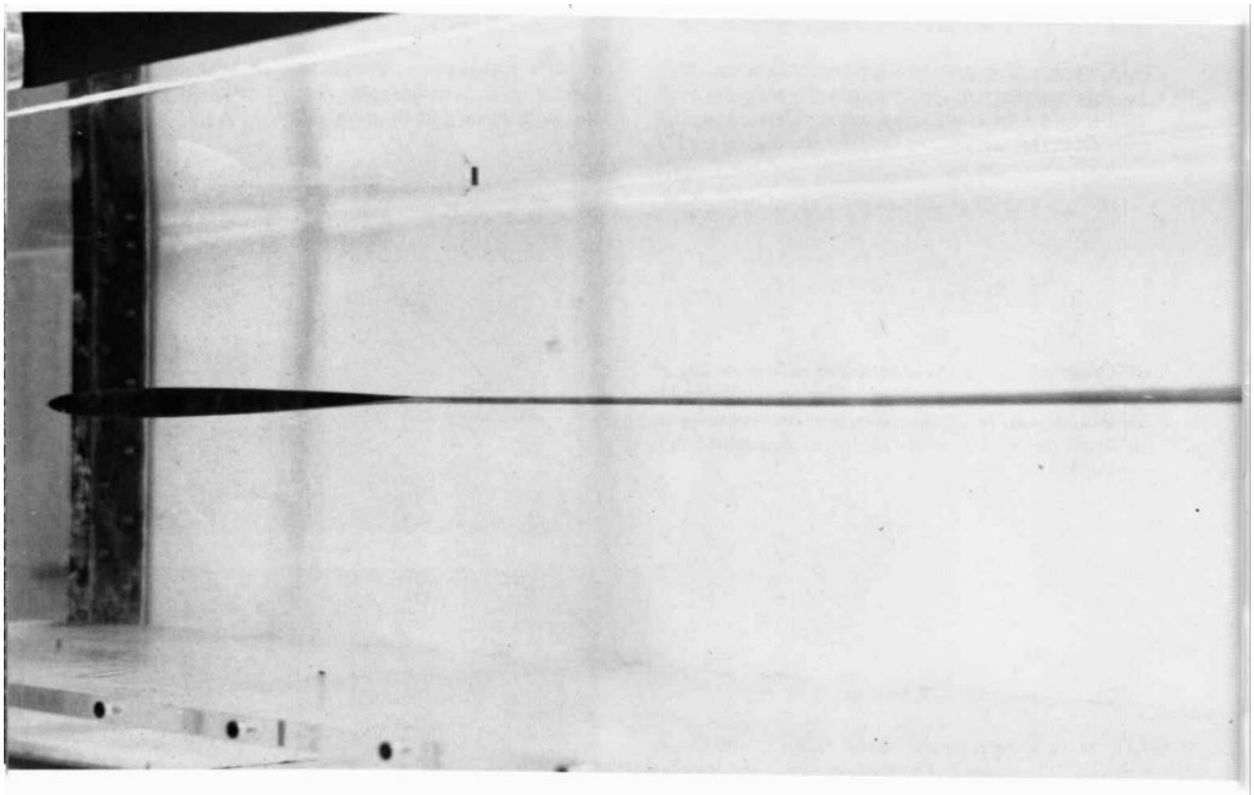


Figura 4.3: Escoamento laminar no interior de um corpo de revolução. Imagem retirada de van Dyke e White (1982).

4.4.2 Modelação de um escoamento turbulento

Ao contrário do escoamento laminar, que é regular e determinístico, o escoamento turbulento é caótico: é sempre tri-dimensional, instável, rotacional e irregular, sendo necessário utilizar modelação matemática para prever uma tendência de comportamento (Chen e Jaw, 1998). Uma característica importante do escoamento turbulento é a capacidade de transportar e misturar fluido de forma muito mais eficiente do que os fluxos laminares (Pope, 2000).

Existem duas características centrais da turbulência para o desenvolvimento do modelo: a primeiro é a influência da turbulência nos fenómenos de troca de calor, através do coeficiente de convecção h; a segunda é a influência da turbulência no movimento do fluido e na conservação de energia cinética. Existem inúmeras formulações, relações empíricas e modelações de equações teóricas disponíveis na literatura, mas é necessário compreender primeiro o contexto de aplicação e a perspetiva do problema que se deseja resolver, que é aproximar um comportamento para o fluxo turbulento na **transferência de calor por convecção** e **aproximar**

Figura 4.4: Escoamento turbulento no interior de um cilindro. Imagem retirada de van Dyke e White (1982).

uma distribuição de velocidades no interior de um **ducto rugoso de secção circular**. Por um ponto de vista diferente, a modelação de turbulência na mineração também é de interesse particular no estudo da dispersão de poeiras e gases, como mostra Xu et al. (2017), o que levaria a abordagens diferentes da que foi utilizada neste projeto de investigação, pois neste caso a concentração de contaminantes e a **mistura** destes com o ar é de grande interesse.

Há também uma diferença de perspetiva em função da escala do problema. Em escalas macroscópicas, a turbulência é influenciada em grande medida pela geometria do fluxo, sendo responsável pelo transporte e mistura. O comportamento turbulento analisado em escalas menores tem seu movimento condicionado à taxa com que recebem energia das porções de maior e menor viscosidades, tem caráter universal e é independente da geometria (Pope, 2000). Sabe-se que o escoamento de ar em galerias subterrâneas é altamente turbulento devido as propriedades reológicas do ar, porém as velocidades de escoamento são baixas se comparadas a outros tipos de escoamento, como os escoamentos sónicos, com $10^3 < Re < 10^6$. Desta forma, deseja-se definir um comportamento médio para a turbulência em termos de transporte de energia e em relação à geometria do perfil de velocidades aproximado dentro da galeria, sem maior preocupação com fenómenos em escala microscópica.

Um fator importante para estudar o comportamento turbulento do escoamento de ar em uma galeria é a presença de paredes que restringem o escoamento do fluido, em oposição a fluxos turbulentos livres ou não-confinados. Este facto direciona a metodologia de caracterização da turbulência para o que é chamado de **Lei da Parede**, também chamada de **Near-wall turbulence** ou **Wall flows**, em que o escoamento está relacionado às tensões exercidas pelo fluido nas paredes, a fricção entre estes, e a distância da parede para um determinado ponto do fluido, sendo estes os fatores determinantes para estabelecer um perfil de velocidades. A geometria da galeria, como já discutido, será aproximada por um ducto de secção circular e alta rugosidade em que ocorre um escoamento plenamente desenvolvido.

Para este caso, definem-se duas regiões principais de escoamento turbulento: uma sub-camada laminar na região de contacto entre o fluido e a parede, e uma região central turbulenta, separadas por uma camada de transição (Holman, 2001).

Na Figura 4.5 observam-se claramente as três regiões distintas de um escoamento turbulento: mais acima, uma camada laminar, quando o fluido está em contacto com a placa plana; uma região central de transição, dividida por escoamento ora turbulento, ora laminar; e por fim, uma região inferior correspondente à camada turbulenta.

Perfil de velocidade para um escoamento turbulento em um ducto circular rugoso

Conforme White (2006), em ductos circulares a **Lei da Parede** é aplicável para toda a secção do ducto, pois o perfil de velocidades neste caso diverge pouco de uma relação logarítmica única ao longo da secção. Esta divergência ou perturbação do perfil de velocidades é elucidada pela **Lei de Cole**, em que a **Constante de Cole** é introduzida na **Lei da Parede** para lidar com "quebras" de comportamento entre as sub-camadas do escoamento, e escreve-se:

$$u^+ \approx \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{yv^*}{\nu}\right) + B + \frac{2\Pi}{\kappa} f\frac{y}{r} \tag{4.23}$$

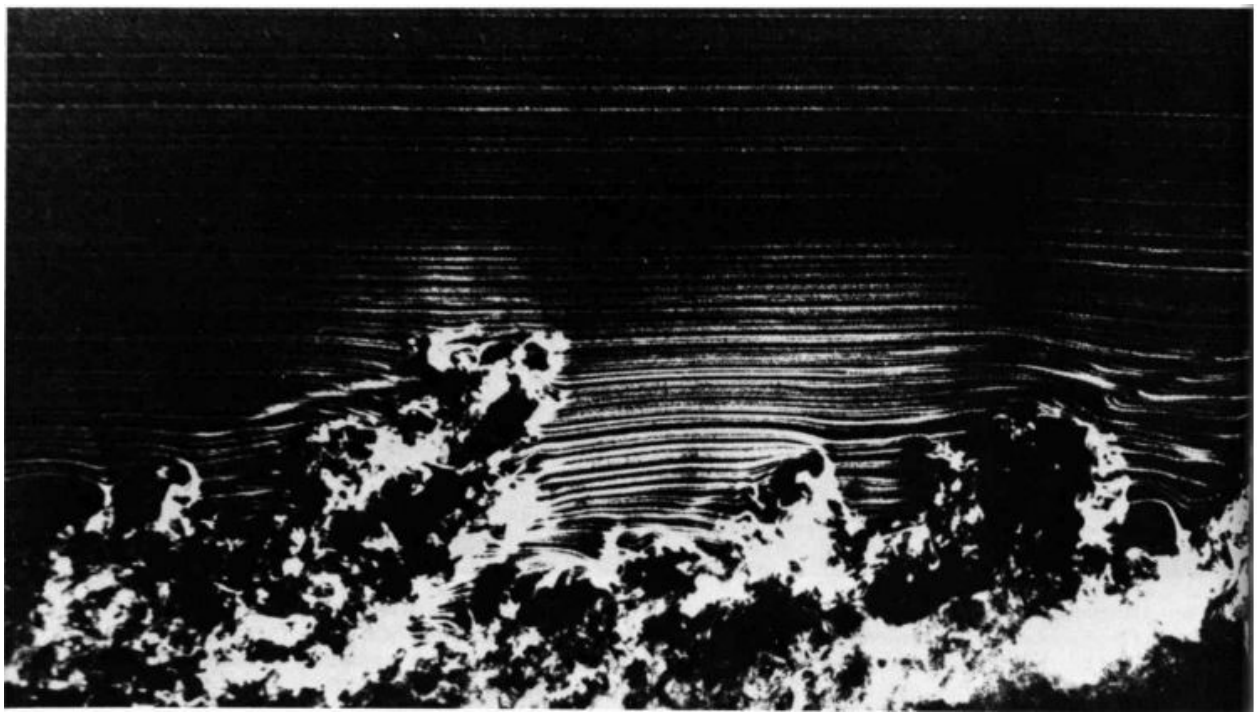


Figura 4.5: Escoamento turbulento sobre uma placa plana suspensa. Imagem retirada de van Dyke e White (1982).

Em que u^+ é a velocidade adimensional de escoamento em função da distância y até a parede do ducto, $\kappa = 0.41$ é a **Constante de Kármán**, v^* é a velocidade de fricção, r é o raio do ducto ou a distância máxima para a parede, e Π é a **Constante de Cole**.

Como para ductos de secção circular $\Pi \approx 0$, a lei da parede para ductos circulares é deduzida por:

$$u^+ \approx \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{yv^*}{\nu}\right) + B \tag{4.24}$$

Considera-se o caso em que o ducto possui paredes internas com elevada rugosidade, introduzindo a variável k_m, que corresponde a altura média da rugosidade. Agora, para ductos rugosos, e assumindo uma rugosidade tipo grão de areia, a equação 4.25 passa a valer:

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{y}{k_m}\right) + 8.5 \tag{4.25}$$

Utilizou-se este tipo de rugosidade pois é a que está mais explicitamente descrita na literatura, com valores numéricos obtidos através de dados empíricos, e torna-se um ponto de partida para a incorporação da rugosidade à modelação matemática pretendida. Assume-se que erros podem ser introduzidos caso a geometria da rugosidade seja diferente da que foi originalmente adotada. Inicialmente, supor-se-á que, guardadas as diferenças de escala, esta se assemelha à textura encontrada nas paredes de galerias subterrâneas: assume-se que um grão de areia está para a parede de um ducto de baixo diâmetro, em termos de ordem de grandeza e de proporção, como as irregularidades de um maciço rochoso estão para uma galeria de mineração de diâmetro elevado.

As deduções e simplificações matemáticas que levam a esta equação são detalhadas em White (2006), de onde são obtidas as equações relacionadas ao perfil da velocidade e cálculos do fator de fricção a partir da rugosidade. A equação 4.26 relaciona $\overline{u}$ (velocidade média do escoamento) com u^+ (velocidade em função da distância do ponto à parede) e v^* (velocidade de fricção), e é dada por:

$$u^+ = \frac{\overline{u}}{v^*} \tag{4.26}$$

Escreve-se então a equação 4.27 para o fator de fricção de Darcy, para um ducto com rugosidade do tipo grão de areia:

$$\frac{1}{\Lambda^{1/2}} \approx 2\log_{10}\left[\frac{\mathrm{Re}\sqrt{\Lambda}}{1 + 0.1\frac{k_m}{D}\mathrm{Re}\sqrt{\Lambda}}\right] - 0.8 \tag{4.27}$$

Como a rugosidade pode ter comportamento diferente de uma rugosidade do tipo grão de areia, **C. F. Colebrook** propôs uma equação mais genérica para o fator de fricção, levando em conta também a rugosidade média. A equação 4.28 é uma equação iterativa da qual se deriva o **Diagrama de Moody**, e é dada por:

$$\frac{1}{\Lambda^{1/2}} \approx -2\log_{10}\left[\frac{k_m/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re\sqrt{\Lambda}}\right] \tag{4.28}$$

Em que Λ é o fator de fricção de Darcy. O parâmetro Λ é usualmente denotado por f, como na equação 4.19; no entanto, optou-se por manter a notação do autor na equação 4.27. Com o valor de Λ determina-se o **fator de fricção de Fanning** C_f, pois conservam a relação $\Lambda = 4C_f$. O fator de fricção de Fanning, por sua vez, se relaciona com a tensão de cisalhamento τ_w na parede de um ducto circular através de 4.29.

$$\tau_w = \frac{C_f \,.\, \rho \,.\, {u_m}^2}{2} \tag{4.29}$$

Sendo u_m a velocidade média de escoamento no ducto.

Usando 4.29, determina-se a tensão de cisalhamento na parede e calcula-se, pela equação 4.30, o parâmetro v^*, que é a velocidade de fricção na parede.

$$v^* = \left(\frac{\tau_w}{\rho}\right)^{1/2} \tag{4.30}$$

Nesta análise, foi desprezada a variação da velocidade em relação ao tempo, e $\overline{u} = u$ é a função da velocidade para um determinado ponto a uma distância y da parede do ducto. Substituindo as equações 4.25 e 4.30 em 4.26, obtém-se:

$$u(y) = \left[\frac{1}{\kappa}\ln\left(\frac{y}{k_m}\right) + 8.5\right]\left(\frac{\tau_w}{\rho}\right)^{1/2} \tag{4.31}$$

Esta equação representa a função da velocidade para o escoamento turbulento em ductos de secção circular com alta rugosidade, em função da posição de um ponto e sua distância y para a parede. Assim como feito para o regime laminar, define-se o balanço de energia para o fluido em regime turbulento substituindo 4.31 em 4.20.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \left(\left[\frac{1}{\kappa}\ln\left(\frac{r_0 - r}{k_m}\right) + 8.5\right]\left(\frac{\tau_w}{\rho}\right)^{1/2}\right)\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\alpha r\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\alpha\frac{\partial T}{\partial z}\right) \tag{4.32}$$

4.4.3 Comparação entre perfis de velocidade laminar e turbulento

Para demonstrar as diferenças entre os perfis de velocidade em regime laminar e turbulento, foram construídos os gráficos das respetivas funções, expressas por 4.21 e 4.31. Para o caso laminar, imaginou-se um fluido a uma velocidade média de $1\,\mathrm{m\,s^{-1}}$ escoando no interior de um ducto circular de 4.2 m de diâmetro em regime laminar. Para o caso turbulento, considerou-se um escoamento de ar a uma velocidade média de $1\,\mathrm{m\,s^{-1}}$ no interior de um ducto circular de 4.2 m com rugosidade média de 0.1 m, com base em valores típicos para galerias de mineração (Montecinos e K. Wallace, 2010). Os perfis de velocidade são apresentados na Figura 4.6.

Nota-se que no escoamento turbulento o fluido atinge uma velocidade máxima menor do que no caso laminar. No entanto, em regiões mais próximas das paredes do ducto, o escoamento turbulento proporciona velocidades maiores do que o escoamento laminar. Também estas características particulares de cada regime de escoamento que se pretendeu incorporar à modelação do fenómeno físico adicionando funções de velocidade distintas para os casos laminar e turbulento.

A Figura 4.7 mostra a reprodução do experimento de Reynolds, em que um filete de tinta é introduzido em um tubo de vidro contendo água a certa velocidade; a sequência de imagens mostra a transição de regime laminar para turbulento, com Números de Reynolds progressivamente maiores. A Figura 4.8 mostra a formação de um perfil de velocidades para o escoamento sobre uma superfície plana, característica do escoamento incorporada ao modelo através da **Lei da Parede**.

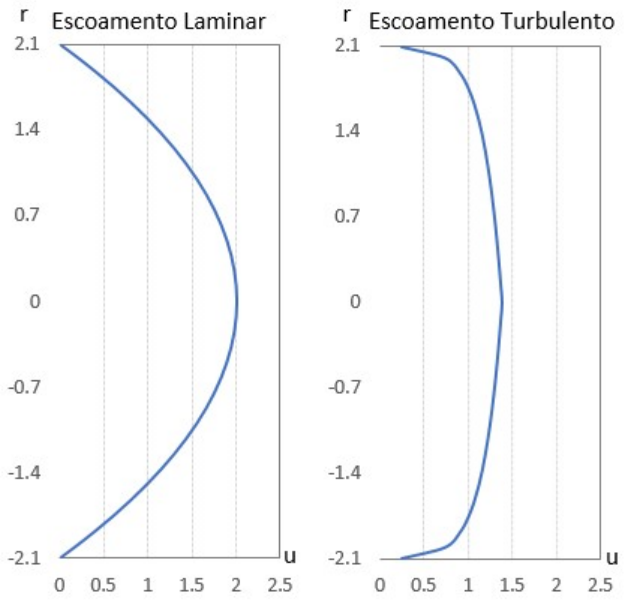


Figura 4.6: Perfis de velocidade de fluidos em regimes laminar e turbulento.

4.5 Outras fontes de calor no interior de uma galeria

Além da troca de calor entre rocha e fluido, existem outros fenómenos que podem contribuir para o aumento da temperatura no interior de galerias subterrâneas, como fenómenos de auto-compressão do fluido e a presença de outras fontes de calor no interior das galerias.

4.5.1 Auto-compressão adiabática do ar

O movimento descendente de ar nos poços de ventilação provoca efeitos de auto-compressão, de modo que o peso do ar sobre si mesmo causa uma variação de pressão que se converte parcialmente em ganhos de temperatura. Este efeito pode ser incorporado ao **modelo** por meio de uma equação empírica, que se escreve, conforme Zhu et al. (2015), por:

$$q_s = -0.976 Q_m \left(273 + T_{in}\right) \left[\left(1 + \frac{0.0124h}{101.325 + 0.012H} \right)^{0.286} - 1 \right] \tag{4.33}$$

Sendo q_s o calor transferido nos poços verticais, Q_m o fluxo mássico do ar, T_{in} a temperatura de entrada do ar em superfície, h a profundidade do poço, e H a elevação da entrada do poço.

Assim como no caso dos poços verticais, pode-se adaptar a equação 4.33 para o caso das galerias inclinadas, em que a variação de profundidade causaria um efeito de auto-compressão do ar e provocaria o surgimento de um gradiente de temperatura.

4.5.2 Fontes de calor

Para galerias ativas, pode haver a presença de outros elementos dissipadores de calor, como a presença humana, iluminação, e equipamentos mecânicos como ventiladores auxiliares, perfuratrizes e carregadeiras. O calor dissipado por um trabalhador pode ser considerado 117.24 W, aproximadamente (Bauer e Kohler, 2009). Para equipamentos mecânicos, o calor dissipado é dado pela equação 4.34 adaptada de Zhu et al. (2015).

$$q_M = \Phi_1 \Phi_2 \Phi_3 N \tag{4.34}$$

Onde q_M é o calor gerado por equipamentos mecânicos, Φ_1 é o fator de instalação (relação entre a potência máxima de consumo do motor e a potência nominal) geralmente considerado 0.7, Φ_2 é o fator de simultaneidade (relação entre a soma da potência nominal utilizada do motor e a potência nominal total), Φ_3 é o

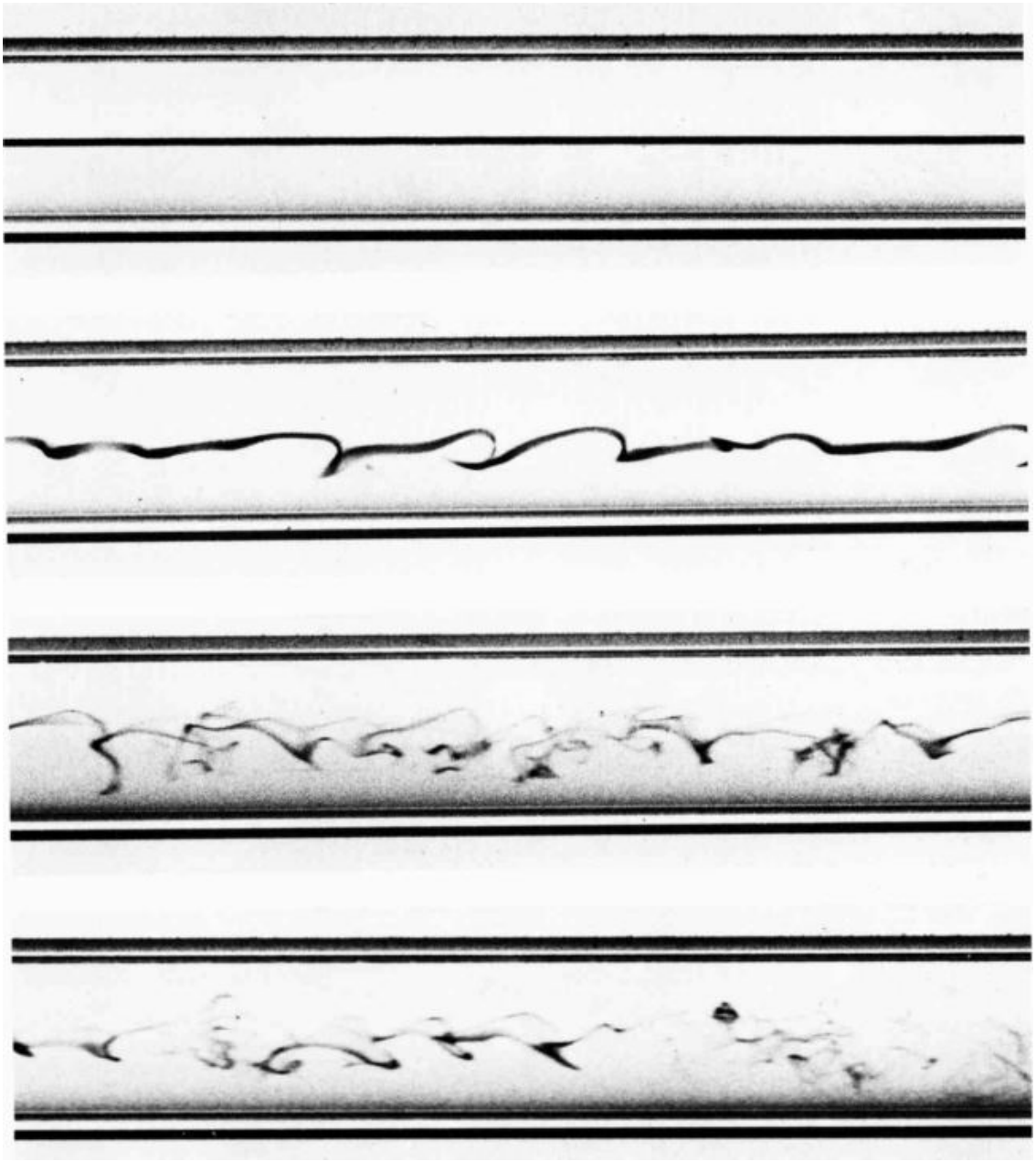


Figura 4.7: Experimento de Reynolds. Imagem retirada de van Dyke e White (1982).

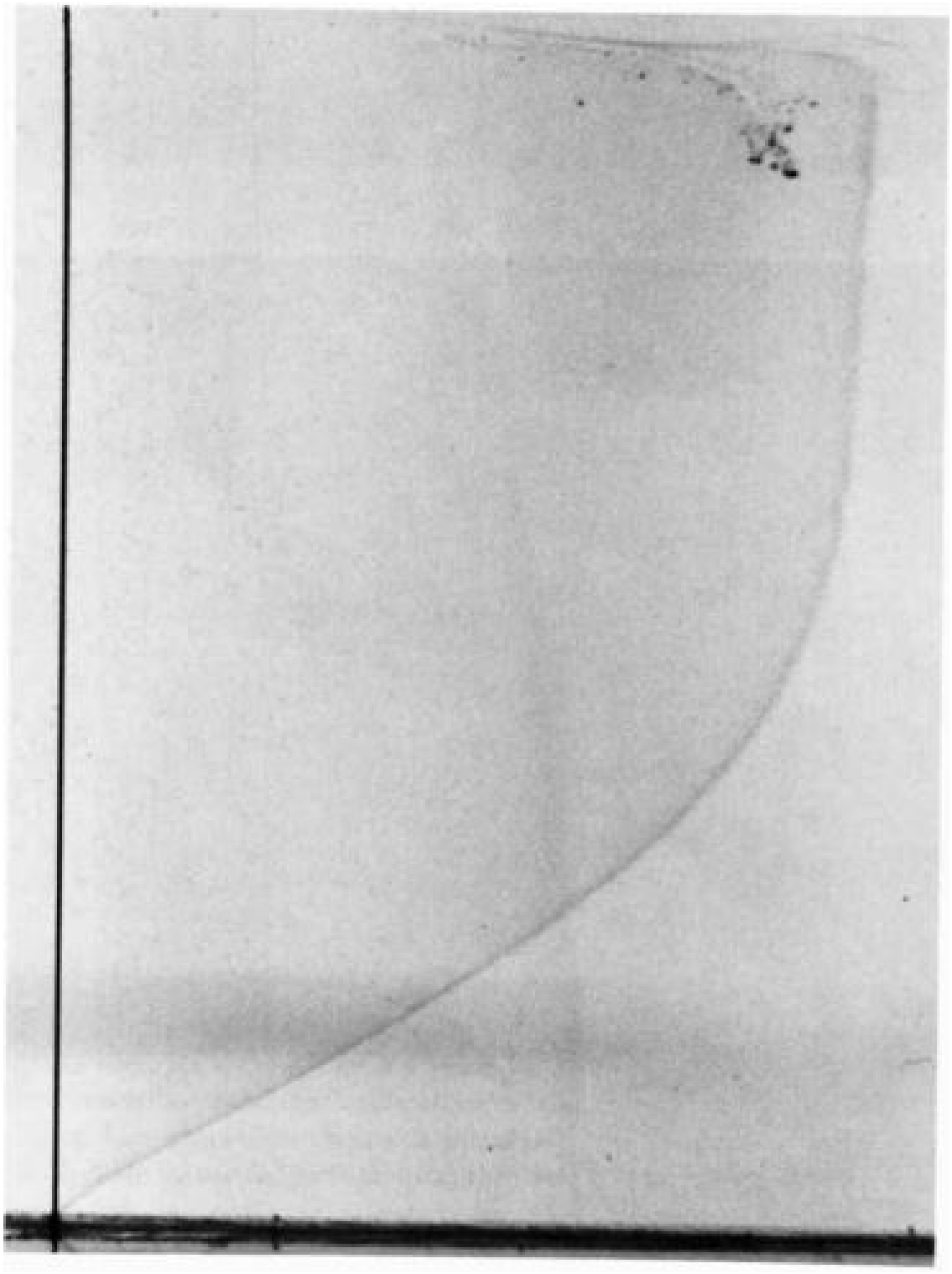


Figura 4.8: Escoamento de água sobre uma placa plana, em que o perfil de velocidade é evidenciado por uma nuvem coloidal formada por impulsos elétricos sobre um fio de telúrio. Imagem retirada de van Dyke e White (1982).

fator de carga (razão entre a carga média e carga máxima em um período de tempo) geralmente considerado entre 0.4 e 0.5, e N é a potência nominal do equipamento.

O calor dissipado por estas fontes causa um aumento da temperatura em suas proximidades, de modo que o ar aquecido se mistura com o ar que escoa através da galeria. Caso a quantidade de calor seja significativa, pode haver uma substancial modificação nas taxas de trocas de calor no interior da galeria, contribuindo para um aumento da temperatura do ar de exaustão.

4.6 Domínio geométrico do problema: subdivisão da galeria para delimitar os fenómenos termodinâmicos

Pretende-se descrever os fluxos de calor que ocorrem dentro de uma galeria subterrânea por onde escoa um determinado fluido. Os elementos envolvidos são a rocha e o fluido, que se encontram a diferentes temperaturas, e as taxas de troca de calor estão relacionadas com a passagem do tempo, a distribuição espacial, e o escoamento do fluido.

A descrição dos fenómenos físicos não pode ser simplificada através de uma relação matemática única, pois os elementos envolvidos se comportam de formas distintas. É necessário dividir o problema em regiões que respeitem as diferenças entre as propriedades físicas dos materiais e que delimitem os locais onde ocorrem os diferentes fenómenos de movimento e de troca de calor.

Assim, são consideradas três regiões principais: I) região interna do maciço rochoso; II) região interna da galeria; III) região de interface entre sólido e fluido, ou seja, regiões externas e internas à galeria muito próximas da parede.

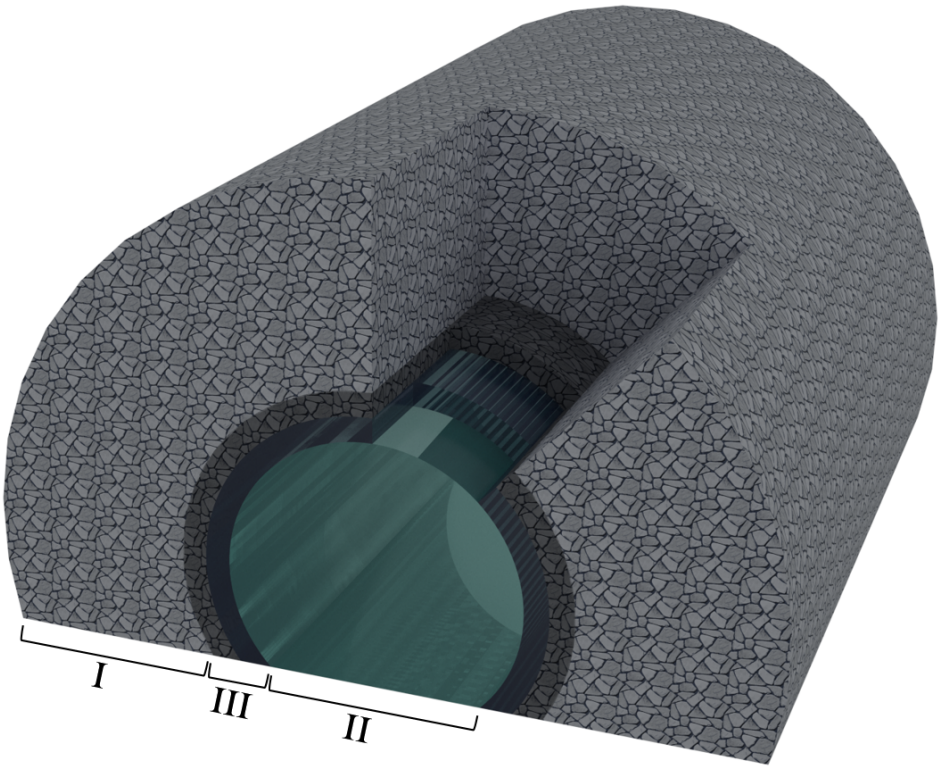


Figura 4.9: Galeria dividida em regiões onde ocorrem diferentes fenómenos de troca de calor.

É necessário assumir certas propriedades e comportamentos do fluido e do escoamento para que se possa utilizar as equações enunciadas. Primeiramente, sabe-se que o fluido em questão é um fluido Newtoniano e supõe-se uma densidade constante em todos os pontos no interior da galeria. Assumir uma densidade constante para o fluido é o mesmo que dizer que este é incompressível (Gilbrech, 1965). É possível considerar as variações de densidade desprezíveis uma vez que se supõe oscilações de temperatura e de velocidade de escoamento pequenas para o fluido. Com isto, despreza-se o trabalho realizado por compressão.

De forma geral, a modelação numérica dos fenómenos de transporte se dá para duas classes de escoamento: os de alta velocidade são compressíveis e lidam com problemas de aerodinâmica e aerotermodinâmica; os de baixa velocidade se relacionam normalmente a problemas de transferência de calor, em que se deseja determinar a troca de calor convectivo na interface sólido-fluido, e para os quais se aplica a formulação incompressível, em que a massa específica pode ser considerada constante ou como função da temperatura (Maliska, 2004).

Ainda, em problemas de convecção forçada, o acoplamento entre velocidade e temperatura é de segunda ordem de importância, tendo influência mais fraca, que deriva do facto das propriedades físicas dependerem da temperatura (Maliska, 2004).

Para efeitos de modelação, algumas simplificações tiveram de ser feitas, o que afeta a criação do algoritmo e pode causar enviesamentos nos resultados do modelo:

1. Os fluidos que são objeto de estudo deste projeto de investigação, água e ar, são compressíveis; no entanto, para efeitos de simplificação do modelo, será considerado que não existem forças no interior da galeria que atuem de forma significativa para a compressão do fluido, a exceção, é claro, da variação de temperatura. Entretanto, trabalha-se com variações de temperatura da ordem das décimas ou das unidades de graus Celsius ao longo de galerias de comprimentos da ordem de centenas de metros, o que indica que a variação de temperatura impacta pouco a densidade (e portanto o volume e compressão) do ar e da água. Não se justifica portanto, fazer correções para a pressão e densidade através de equações de conservação de movimento e da continuidade, mas admite-se que o modelo irá incorporar erros de estimativa em decorrência desta simplificação. Ainda, segundo Maliska (2004), não se justifica aplicar equações de estado para determinar a pressão e massa específica quando há escoamento de baixa velocidade por razões de instabilidade numérica devido ao fraco acoplamento entre pressão e massa específica.

2. Será considerado também que não há variação de velocidade ao longo da galeria, o que novamente implica em não lidar com equações de conservação de movimento que regem o escoamento. Na realidade, há perda de pressão ao longo da galeria e ocorre trabalho pela fricção entre ar e rocha, que desacelera o escoamento devido à rugosidade das paredes da galeria. No entanto, pode-se imaginar duas situações: para a ventilação natural, a velocidade de escoamento do fluido é muito baixa, a ponto do escoamento impactar de forma muito subtil a troca de calor na sua totalidade; já para ventilação forçada, há a necessidade de se manter um determinado caudal de ar constante, de modo que a própria ventilação auxiliar restaura em certa medida a velocidade de escoamento do ar, que decresce quanto maior o trajeto percorrido, o que acaba por compensar a perda de pressão/carga. Isto não significa que não se admita a existência destes fenómenos de variação de pressão e velocidade no interior de uma galeria em uma situação real, mas que para efeitos de cálculo, não serão feitas as correções relativas a estes fenómenos, e aceita-se que o modelo cometerá erros em função disto.

3. Quando a temperatura de um fluido muda, sua densidade muda, o que significa que a gravidade exerce uma força diferente em porções diferentes do fluido, fazendo com que regiões mais quentes tentem ascender sobre porções mais frias, como descrito por Shaw (1992). A relação entre diferentes densidades se traduz pela variação de temperatura utilizando-se o coeficiente de expansão volumétrica, resultando em um termo adicional na equação de movimento. Por razões de simplificação, este efeito também será omitido no modelo.

4. Como consequência dos pontos 1), 2) e 3) não são incorporados ao modelo algoritmos como SIMPLE, SIMPLER, SIMPLEC, e PISO[1], o que por um lado ocasionará distorções nas estimações do modelo, mas que por outro lado resultará em uma simplificação considerável do algoritmo, que lida com uma função bidimensional para o perfil de velocidades em função da distância para a parede do ducto ao invés de computar um campo de velocidades. Como o fluxo e a pressão são consideradas constantes dentro das premissas adotadas para a aplicação do modelo, garante-se que a equação de continuidade é satisfeita.

[1] Algoritmos utilizados em diversos cenários em CFD para aproximar soluções das equações de Navier-Stokes. Nestes algoritmos, realiza-se uma correção da velocidade e dos fluxos de massa em função da variação de pressão. O algoritmo SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*) foi desenvolvido por Brian Spalding e Suhas Pathankar; o último propôs ainda uma variante do algoritmo, chamada SIMPLER (SIMPLE Revised). Os outros algoritmos mencionados são variações destes, e podem ser encontrados em diversos livros de referência da Dinâmica dos Fluidos Computacional, como Versteeg e Malalasekera (1995) e Patankar (1980).

5. A convergência do modelo tem de ser garantida por outros aspetos, como tamanho do passo de tempo e densidade de malha de pontos. Esta convergência terá de ser garantida dentro do algoritmo, verificando-se a não ocorrência de resultados fisicamente impossíveis (através de sub-rotinas dentro do algoritmo), e os parâmetros numéricos terão de ser ajustados até que haja estabilidade.

6. Como a velocidade de escoamento não é muito alta (não se trata de um problema onde velocidades sónicas estejam envolvidas), podem ser desprezados os efeitos de dissipação viscosa, como demonstrado por Kakaç e Yener (1995).

7. Por fim, por se considerar que a variação de temperatura é pequena, são desprezadas variações nas propriedades físicas do fluido, como calor específico, condutividade térmica e viscosidade.

Existem portanto, problemas de Transferência de Calor e de Mecânica dos Fluidos envolvidos na modelação do fenómeno. Em razão da natureza do problema, em que se conhece a velocidade, e em que se supõem variações baixas do caudal de ar ao longo da galeria, estabelece-se um gradiente de velocidades em r, e se despreza variações de velocidade ao longo da galeria em z. Assumindo também propriedades físicas constantes, devido à baixa variação de temperatura, considera-se que os Fenómenos de Transferência de Calor e de Mecânica dos Fluidos estão completamente desacoplados. Há um perfil radial de velocidades, mas o campo de velocidades é suposto constante. Também, a velocidade é unidirecional neste caso, tendo direção z e sentido positivo.

Do ponto de vista numérico, a velocidade é tratada como grandeza escalar, e não vetorial, e o modelo é construído para acomodar um escoamento unidirecional na direção positiva de z. Do ponto de vista prático, isto causa problemas quando há inversão na direção do caudal e flutuações acentuadas da velocidade de escoamento, que se refletem em erros de estimação. Caracterizar (medindo) a velocidade no interior de uma galeria em termos de um campo vetorial, entretanto, seria uma tarefa dificílima e pouco viável para fins de modelação das trocas de calor, especialmente quando há escoamento turbulento, situação em que a velocidade é tri-dimensional e rotacional.

4.6.1 Região interna do maciço rochoso

Nesta região, serão desconsiderados quaisquer escoamentos de fluidos através de fraturas e poros no interior da rocha. Para efeitos de descrição do fenómeno de troca de calor, será considerado que o maciço rochoso é um sólido de propriedades físicas definidas e uniformes. As trocas de calor se dão por condução e a equação que as descreve é a 4.12.

4.6.2 Região interna da galeria

Nesta região, as trocas de calor ocorrem apenas entre partículas de fluido. Se o fluido estivesse em repouso, o fenómeno seria de condução. No entanto, no cenário em questão o fluido possui uma velocidade u na direção z, de modo que a equação e energia passa a incorporar o movimento do fluido à troca de calor por condução, e o fenómeno pode ser descrito matematicamente pela equação 4.22 no caso laminar ou 4.32 no caso turbulento.

4.6.3 Interface rocha-fluido

Nesta região, onde o fluido está em contacto com as paredes do sólido, ocorre o fenómeno de troca de calor por convecção, que pode ser descrito através da equação 4.13. Na realidade, a convecção é assimilada por toda a secção de fluido, sendo as trocas convectivas de calor condicionadas pela interface. Também deve se considerar o movimento do fluido no balanço de energia. É necessário, então, analisar separadamente os fenómenos envolvidos nas porções de rocha e fluido, que dividem em duas partes a região da interface sólido-fluido, conforme a Figura 4.9.

Rocha

Partindo do pressuposto que na região interior à rocha não há escoamento, a equação de condução no maciço rochoso se combina com a equação de troca de calor por convecção na região de transição entre rocha e fluido. Associando as equações 4.12 e 4.13, o balanço energético que define a troca de calor na região rochosa em contacto com o fluido é dada por:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\alpha r \frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\alpha \frac{\partial T}{\partial z}\right) - hA\left(T_r - T_f\right) \tag{4.35}$$

O sinal da parcela da equação que diz respeito à troca de calor por convecção foi arbitrariamente definido como negativo porque se supõe que o fluido que percorre a galeria está a uma temperatura inicial inferior à temperatura do maciço rochoso, de modo que a troca de calor por convecção retira calor da rocha.

Fluido

Analogamente para a interface fluida situada na Região III, somam-se os efeitos de condução com os de convecção, e a equação do balanço energético se dá pela combinação das equações 4.13 e 4.22 ou 4.32, dependendo do regime de escoamento[2], resultando em 4.36.

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\alpha r \frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\alpha \frac{\partial T}{\partial z}\right) + hA(T_r - T_f) - \frac{\partial T}{\partial t} = \begin{cases} 2u_m\left(1 - \frac{r^2}{r_0^2}\right)\frac{\partial T}{\partial z} & , Re < 2300 \\ \left(\left[\frac{1}{\kappa}\ln\left(\frac{r_0 - r}{k_m}\right) + 8.5\right]\left(\frac{\tau_w}{\rho}\right)^{1/2}\right)\frac{\partial T}{\partial z} & , Re > 4000 \end{cases} \tag{4.36}$$

Nota-se que o termo que descreve o mecanismo de troca de calor por convecção possui sinal positivo, considerando que o fluido está inicialmente a uma temperatura menor do que a rocha e é aquecido devido ao seu fluxo sobre a superfície sólida, recebendo calor por convecção.

Assim, definem-se as equações diferenciais do balanço de energia transiente, para cada região do domínio geométrico do problema,que terão de ser resolvidas (discretizadas) para que possam compor o modelo numérico.

4.7 Analogias e adaptações entre ductos circulares e galerias subterrâneas

As maiores dificuldades em construir um modelo de troca de calor para uma galeria subterrânea vem do fato de, historicamente, este tipo de ambiente ter sido pouco caracterizado na mecânica dos fluidos. Na fluidodinâmica, a abordagem ideal para a solução de problemas está na maior parte das vezes na interface entre análise matemática e experimentação, de modo que algumas ferramentas e relações empíricas construídas para ductos de diâmetros e comprimentos comerciais não encontram correspondência para escalas maiores. Houve, historicamente, pouca experimentação da mecânica dos fluidos e da transferência de calor na mineração subterrânea se comparada à vasta literatura publicada a respeito do tema nas áreas das engenharias mecânica, química e civil.

Este, inclusive, é um dos aspetos que motiva a parte experimental deste projeto de investigação, que pode expandir a base científica (empírica) para problemas de fluidodinâmica e termodinâmica na mineração. Por estas razões, a parte analítica da modelação se vale de formulações teóricas quando possível, e de adaptações de equações empíricas (como a equação de Pethukov, por exemplo) quando necessário, que poderão introduzir erros e desvios dos resultados esperados. Além disso, a tentativa de aproximar parâmetros de natureza empírica, como o *coeficiente de convecção*, por equações de solução fechada, leva a erros; idealmente, cada situação prática requer sua própria equação empírica para a convecção.

Há também dificuldade em estimar um padrão de rugosidade para uma galeria, em especial para maiores extensões, pois é comum encontrar variações abruptas de áreas de secção, desvios, curvas e desníveis, o que distancia uma galeria subterrânea de um ducto comercial, cujo próprio processo de fabrico e características do material impõem uma maior regularidade à rugosidade. Prosser e K. G. Wallace (1999) e Montecinos e K. Wallace (2010) publicaram trabalhos visando estimar fatores de fricção e rugosidades médias em galerias de mineração, mas estes valores são pouco adaptáveis a situações particulares, pois baseiam-se em características qualitativas (muito ou pouco desvio, alto ou baixo desnível, por exemplo) que são subjetivas e dificilmente resultam em correspondências numéricas adequadas.

Outro problema da modelação é a questão do formato da área de secção. Galerias subterrâneas não são, na vasta maioria dos casos, cilíndricas, já que a geometria da secção está condicionada à estabilidade e

[2] Foram considerados os intervalos para escoamento laminar (Re < 2300) e turbulento (Re > 4000), negligenciando-se o intervalo de instabilidade devido à transição de regimes de escoamento.

integridade estrutural da abertura e ao método de escavação. Embora se utilize relações para converter perfis não circulares para formatos circulares equivalentes, incorpora-se distorções: uma galeria quadrada de 2 m $\times$2 m tem área de 4 m^2 e perímetro de 8 m, o que leva a um diâmetro hidráulico de 4 m, de modo que sua correspondência cilíndrica possui 12.57 m^2 de área de secção e 12.57 m de perímetro. Assim, a conversão de formatos leva a perda de informações importantes para o problema, em especial para o estudo da transferência de calor, pois altera-se a área de contacto da interface sólido-fluido.

Além destes fatores, é preciso também considerar que os maciços rochosos possuem estrutura geológica intrincada, pelo que uma galeria pode atravessar diferentes litologias, que podem apresentar variações consideráveis em termos de propriedades térmicas. Por fim, a simetria suposta para o problema não leva em conta os efeitos da gravidade no escoamento do ar, o que certamente resulta em diferenças entre temperaturas e velocidades de deslocamento do fluido em porções mais altas da galeria e porções mais baixas.

Todas estas adaptações são necessárias para que seja viável o desenvolvimento de uma modelação matemática destes fenómenos complexos. É fundamental estabelecer arbitrariamente uma ordem de importância para os processos termodinâmicos que se deseja caracterizar, e incorporar simplificações, desprezando efeitos que impactam pouco as transferências de calor. Por isto, é fundamental validar o modelo, o que permite avaliar se de fato as simplificações adotadas são aceitáveis.

5 Solução Numérica da Equação de Balanço de Energia

5.1 A Tarefa

Para caracterizar os fenómenos de transferência de calor em galerias subterrâneas, partiu-se das soluções analíticas das equações de troca de calor e conservação de movimento. Dentre as ferramentas disponíveis para a solução de problemas de engenharia, estão os métodos analíticos e os métodos numéricos, de natureza teórica, e os métodos experimentais, de natureza empírica (Maliska, 2004). A complexidade do problema limita, em grande medida, a aplicação de métodos analíticos, usualmente utilizados para domínios geométricos e condições de contorno mais simplificadas, sendo necessário recorrer aos métodos numéricos.

Para Patankar (1980), um método numérico funciona como um experimento de laboratório no qual certos aparelhos de medição permitem-nos conhecer a distribuição de uma quantidade medida dentro de um domínio de investigação. No caso deste projeto de investigação, conhecer a temperatura no interior da galeria não carrega em si nenhum significado físico; deseja-se conhecer a temperatura como uma distribuição no espaço e no tempo.

Além disto, como mencionado no capítulo anterior, o domínio do problema requer uma divisão arbitrária de pequenas sub-regiões que delimitem a ocorrência de diferentes mecanismos de transferência de calor. A própria natureza desta tarefa exige a aplicação de métodos numéricos que envolvam a criação de uma malha de pontos finitos sobre o domínio do problema e que forneçam um algoritmo para a solução do conjunto de equações. Estes métodos são detalhados nas secções seguintes.

5.2 Métodos Numéricos aplicados em Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD)

O desenvolvimento vertiginoso de computadores, que gera uma crescente disponibilidade computacional, tem impulsionado o desenvolvimento de algoritmos para a solução de diversos problemas, e consequentemente, causa um crescimento no número de utilizadores e pesquisadores da simulação numérica (Maliska, 2004). Dentre as diversas áreas da **CAE**, ou **Computer Aided Engineering**, está a **CFD**, ou **Computational Fluid Dynamics**, área que estuda o comportamento do escoamento de fluidos através da utilização de computadores

A CFD engloba uma série de tecnologias incluindo matemática, ciência da computação, engenharia, e física, que se unem para desenvolver métodos para o modelar o escoamento de fluidos (Shaw, 1992). Também está relacionada aos fenómenos de transferência de calor associados ao escoamento de fluidos, pois são frequentemente co-dependentes: O aquecimento e arrefecimento é uma função também do escoamento do fluido (pois a velocidade de escoamento impacta as trocas de calor), assim como o escoamento do fluido é uma função da temperatura (pois a variação de temperatura altera propriedades reológicas do fluido).

Entre as áreas de aplicação da CFD, estão: hidrologia e oceanografia, aerodinâmica, arrefecimento de máquinas e circuitos, processos químicos, modelação de ambientes internos e externos (ventilação), engenharia do ambiente, meteorologia, e biomedicina (fluxo sanguíneo) (Versteeg e Malalasekera, 1995).

Segundo Versteeg e Malalasekera (1995), os algoritmos dos métodos CFD são constituídos por três elementos principais: um **pré-processador**, um **solucionador**, e um **pós-processador**. O **pré-processador** é a parte do algoritmo que aceita valores de entrada para o problema (neste caso, as propriedades físicas da rocha e do fluido, geometria da galeria, caudal de ar, entre outros), define uma geometria, gera uma malha de pontos, e seleciona as condições de contorno adequadas. O **solucionador** executa cálculos preliminares através de funções simples para determinar outras variáveis relevantes, faz a **discretização** e outras manipulações matemáticas da equação que rege o fenómeno, e soluciona as equações algébricas. Por fim, o **pós-processador** exibe os resultados desejados através de gráficos, diagramas, vetores, e outros recursos visuais pertinentes à exibição da solução do problema.

A **discretização** é uma etapa fundamental para a solução numérica das equações, pois é o processo que permite assumir hipóteses sobre a distribuição de uma variável (no caso a temperatura), no espaço e no tempo, e **transformar a equação diferencial em uma equação numérica equivalente**. O termo discretização evoca dois significados diferentes na modelação numérica: pode ser compreendido como a divisão do domínio em sub-regiões menores para melhor definir o comportamento da variável (discretização do espaço, do domínio, ou da variável, conforme Patankar (1980), ou pode se referir especificamente à transformação de uma equação diferencial em uma equação numérica análoga através da substituição de informações contínuas em valores discretos na equação (discretização numérica, segundo Shaw (1992). Estas interpretações são pontos de vista diferentes de um mesmo processo: para obter uma equação discretizada é necessário discretizar o domínio geométrico e temporal através de procedimentos sistemáticos.

Existem, na CFD, três métodos numéricos mais usuais que cumprem os requisitos mencionados. São eles o **FDM** ou **Finite Difference Method**, o **FEM** ou **Finite Element Method**, e o **FVM** ou **Finite Volume Method**[1].

5.2.1 Métodos Numéricos aplicados à CFD

A CFD pode ser aplicada a situações muito distintas, de modo que cada problema possui um enquadramento mais favorável à aplicação de um único método entre os três métodos citados. Para estabelecer a estratégia de solução ideal é necessário compreender quais são os mecanismos envolvidos em cada método e qual se adequa melhor à modelação da transferência de calor em galerias subterrâneas.

Embora os métodos se baseiem em estratégias e manipulações matemáticas diferentes, existem pontos comuns a todos: FDM, FVM e FEM produzem equações para valores da variável em um número finito de pontos, requerem um conjunto de condições iniciais e de condições de contorno para iniciar a solução do problema, e podem produzir fórmulas discretizadas no tempo de forma explícita ou implícita (esta última, demandando a solução de um sistema de equações a cada passo de tempo) (Shaw, 1992).

Criação de uma malha de pontos

Uma etapa fundamental para os três métodos é a discretização do domínio através da criação de uma malha de pontos. Existem essencialmente dois tipos de malhas: as estruturadas e as não-estruturadas. As malhas estruturadas são formadas por polígonos de quatro lados (no caso bidimensional), e podem ser regulares (caso todos os polígonos da malha tenham o mesmo tamanho) ou irregulares. Neste caso, é possível indexar as variáveis sistematicamente de modo a identifica-las e endereça-las pelos seus índices ij, já que os pontos seguem uma ordenação lógica e o espaço computacional torna-se linear.

Esta possibilidade de atribuir valores ou extrair valores de variáveis através de seu endereço, correspondente à sua posição na malha, permite ganhos computacionais importantes. Mais, abrem a possibilidade de tratar variáveis escalares como matrizes (que são, na realidade, variáveis do tipo `array`) em que um elemento ij corresponde ao ponto da malha ij, o que possibilita aplicar operações automáticas que simplificam o processo numérico.

As malhas não estruturadas podem ter pontos com as mais diversas disposições espaciais, e geralmente incorporam formatos geométricos mistos, de modo que não é possível indexar as variáveis pela suas posições. A vantagem deste tipo de malha é adaptar-se bem a domínios de geometria mais complexa.

No caso particular deste projeto de investigação, optou-se por trabalhar com malhas estruturadas regulares, pela facilidade de geração da malha e principalmente pelas simplificações e ganhos computacionais expressivos que se dão como consequência desta escolha. A Figura 5.1 mostra a criação de uma grade sobre um ducto de secção circular, em que os encontros entre as linhas da grade constituem os pontos da malha.

[1] Optou-se por manter os nomes dos Métodos Numéricos e as respetivas abreviações em língua inglesa, exceto em títulos de capítulos e secções.

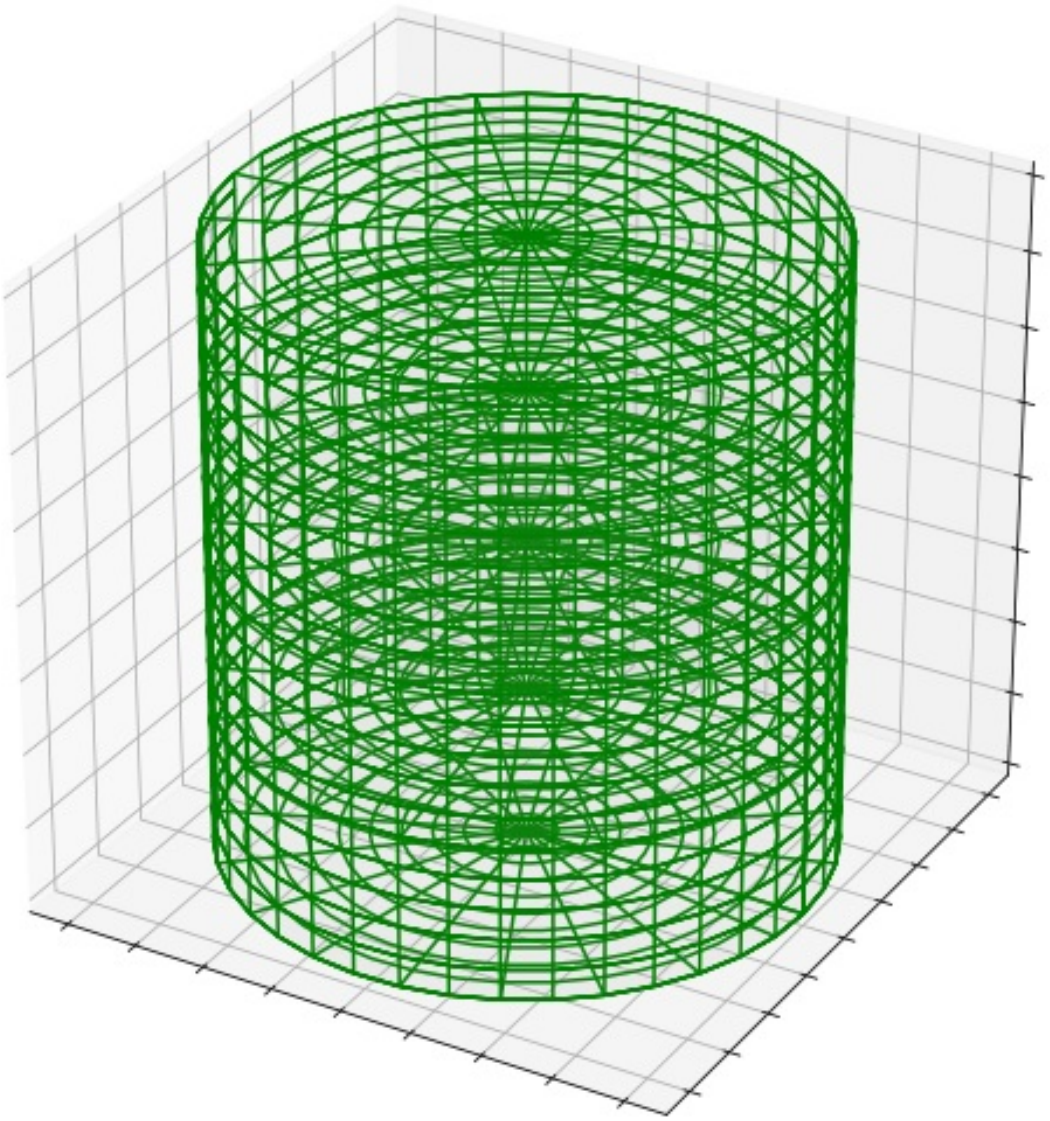


Figura 5.1: Definição de uma malha estruturada regular sobre um ducto de seção circular.

Com a malha regular, fixa-se as posições dos pontos do domínio, o que possibilita aplicar os métodos numéricos para obter a discretização numérica da equação diferencial.

O Método Diferença Finita (FDM)

Historicamente, o FDM foi sempre empregado na área da mecânica dos fluidos, enquanto o FEM é mais utilizado na solução de problemas de elasticidade na área estrutural, motivo pelo qual as aplicações do FDM se desenvolveram no sentido de acomodar equações altamente não-lineares (uma vez que envolvem as Equações de Navier-Stokes) em detrimento de resolver problemas de geometria mais complexa (Maliska, 2004).

Este método se baseia no uso da **Série de Taylor** para construir um conjunto de equações que descrevem as derivadas das variáveis como diferenças entre valores da variável em diversos pontos no espaço e no tempo (Shaw, 1992). Supondo que se deseje calcular a primeira derivada de uma função escalar $\phi(x)$ em um ponto x_0, desenvolve-se a Série de Taylor e aproxima-se a primeira derivada conforme a equação 5.1, por Blazek (2015).

$$\Phi(x_0 + \Delta x) = \Phi(x_0) + \Delta x \left.\frac{\partial \Phi}{\partial x}\right|_{x_0} + \Delta x^2 \left.\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2}\right|_{x_0} + \ldots$$
$$\left.\frac{\partial \Phi}{\partial x}\right|_{x_0} = \frac{\Phi(x_0 + \Delta x) - \Phi(x_0)}{\Delta x} + \vartheta(\Delta x) \tag{5.1}$$

Onde $\vartheta(\Delta x)$ é o erro de truncatura. A equação 5.1 pode também ser aplicada para obter aproximações de derivadas de ordem superior. A figura 5.2 ilustra o processo numérico envolvido no FDM e demonstra como é feita a aproximação da derivada.

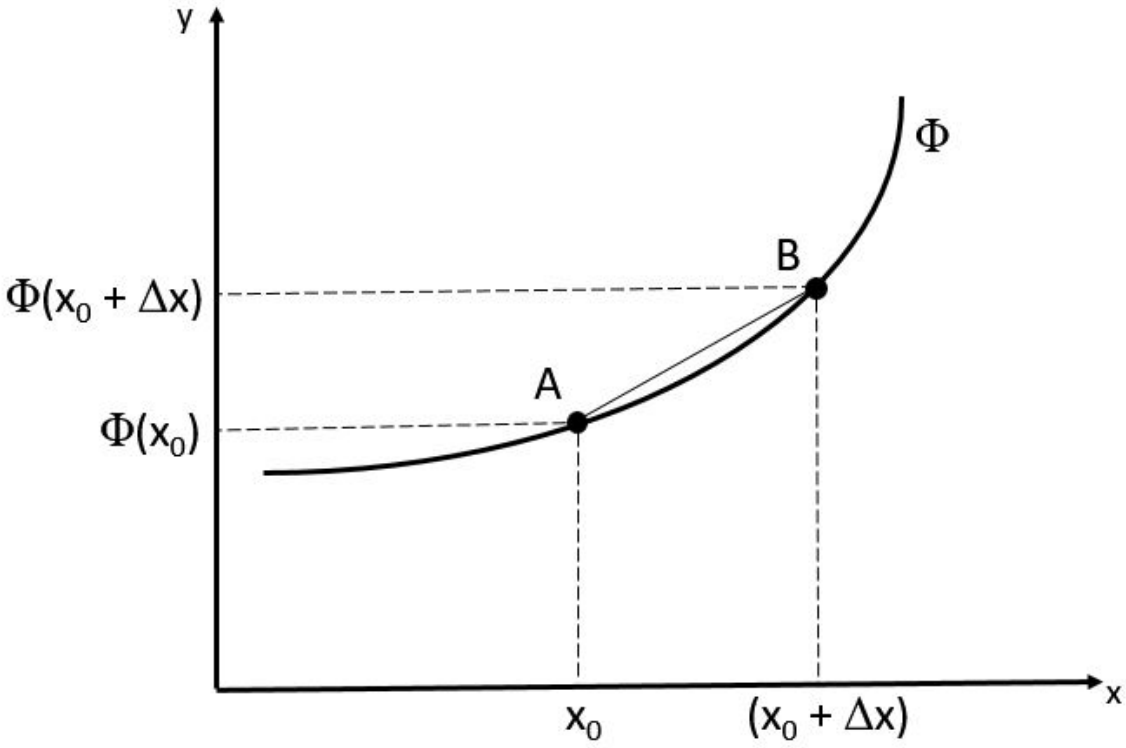


Figura 5.2: Aproximação do declive em x_0 pela equação 5.1.

Esta aproximação é chamada de diferença finita progressiva, pois parte de uma variação positiva de x. Poderia ainda se utilizar um ponto anterior a A em uma aproximação por diferença finita regressiva, ou apenas o valor da função nos pontos consecutivo e anterior a A, em uma aproximação por diferença finita central.

O Método dos Elementos Finitos (FEM)

Neste método, o domínio é subdividido em um número finito de sub-domínios, também chamados de elementos, que comportam pequenas variações das variáveis dependentes. Esta representação por partes é utilizada para descrever o comportamento global da variável (Shaw, 1992). O FEM se baseia em três aspetos básicos: 1) geometrias complexas podem ser subdivididas em subdomínios mais simples; 2) sobre cada elemento finito, as funções de aproximação podem ser representadas por uma combinação linear de polinómios algébricos; 3) as relações algébricas entre os coeficientes indeterminados são obtidos sobre cada elemento, de modo que uma integral com pesos é usualmente utilizada para satisfazer a equação original (Reddy, 1993). A solução completa se dá pela junção das soluções elemento a elemento.

Para a aplicação do FEM, é necessário definir um conjunto de funções de forma que representam a variação da solução em cada elemento, e transformar a equação diferencial em uma forma equivalente de integral (Blazek, 2015). Uma determinada função de forma, válida para um elemento, tem valor zero fora do elemento sobre o qual se aplica. Sob este ponto de vista, o **modelo** utiliza esta abordagem para delimitar regiões em

que ocorrem certos fenómenos de troca de calor, como se discutiu no capítulo anterior; cada uma das quatro regiões é, na prática, um elemento distinto do modelo.

Uma generalização da aplicação do FEM é proposta por Zienkiewicz (2013): para uma determinada função w, deseja-se satisfazer um conjunto de equações diferenciais dado por P, em um domínio Q, com condições de contorno definidas por R, como em 5.2.

$$P(w) = \begin{bmatrix} P_1(w) \\ P_2(w) \\ P_3(w) \\ \vdots \end{bmatrix} = 0 \qquad R(w) = \begin{bmatrix} R_1(w) \\ R_2(w) \\ R_3(w) \\ \vdots \end{bmatrix} = 0 \tag{5.2}$$

O processo busca a aproximação da solução conforme a equação 5.3.

$$w \approx \hat{w} = \sum_{i=1} S_i \widetilde{w}_i = S\widetilde{w} \tag{5.3}$$

Onde $\widetilde{w}_i$ são parâmetros desconhecidos da função e S_i são funções de forma que dependem das variáveis independentes (como a posição). Ainda, para obter os parâmetros desconhecidos, supondo que cada elemento integra um domínio Λ, tem fronteira Ψ, e que T_j e t_j são operadores e funções conhecidos, escrevem-se as equações em 5.4:

$$\begin{aligned} &\int_\Lambda T_j(\hat{w})d\Lambda + \int_\Psi t_j(\hat{w})d\Psi = 0 \\ \text{com} \quad &\int_\Lambda T_j d\Lambda + \int_\Psi t_j d\Psi = \sum_{k=1} \left(\int_{\Lambda_k} T_j d\Lambda + \int_{\Psi_k} t_j d\Psi \right) = 0 \end{aligned} \tag{5.4}$$

Os métodos para obter a aproximação das integrais são o Método dos Resíduos Ponderados (ou de Galerkin) e o Método Variacional.

Supondo que as equações diferenciais são lineares, escreve-se as matrizes em 5.2 como:

$$\begin{aligned} P(w) &\equiv Aw + a = 0 \\ R(w) &\equiv Bw + b = 0 \end{aligned} \tag{5.5}$$

A aproximação das integrais em 5.4 geram um sistema de equações lineares da forma

$$K\widetilde{w} + f = 0$$

com

$$\begin{aligned} K_{ij} &= \sum_{k=1} K_{ij}^k \\ f_i &= \sum_{k=1} f_i^k \end{aligned} \tag{5.6}$$

O FEM e o FDM trabalham com pontos da malha e não com volumes de controle, e por isso não são conservativos em nível discreto (Maliska, 2004). Este método é particularmente atrativo para problemas que lidam com geometrias mais complexas, e em alguns casos, pode ser considerado matematicamente equivalente ao FVM, porém com esforço numérico significativamente maior (Blazek, 2015).

O Método do Volume Finito (FVM)

Em contraste com os dois métodos anteriores, o FVM realiza um balanço de conservação de propriedades para cada volume de controle de modo a obter a equação aproximada (Maliska, 2004). Assim como o FDM, o FVM produz equações numéricas em pontos da malha com base nos pontos vizinhos (Shaw, 1992).

Com a criação da malha de pontos, estabelece-se que cada ponto possui pontos vizinhos ao norte, sul, leste e oeste, denotados por N, S, E e W, com os quais compartilha fronteiras chamadas de n, s, e e w, respetivamente, sem que haja sobreposição. A partir desta estratégia, é possível utilizar as propriedades dos pontos vizinhos para calcular as propriedades do volume de controle e delimitar regiões para discretizar as equações diferenciais no espaço. A figura 5.3 mostra uma célula de controle centrada no ponto P.

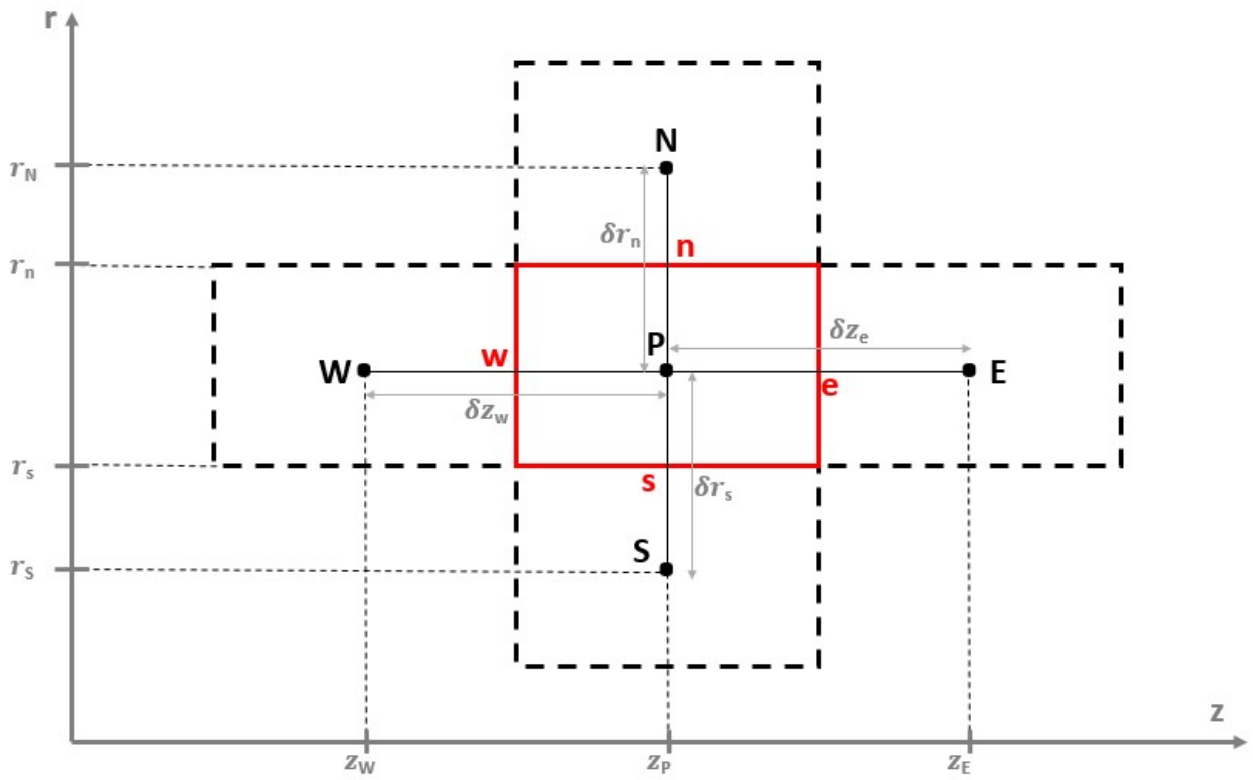


Figura 5.3: Definição de uma célula de controle e suas células vizinhas.

Com esta formulação, a solução do conjunto de equações diferenciais implica que há uma conservação de quantidades (como massa, movimento, e energia) e que esta é exata para um conjunto de volumes de controle (e portanto, para todo o domínio). (Patankar, 1980).

Pela aplicação intuitiva do FVM, devido ao seu processo numérico simplificado se comparado aos outros dois métodos descritos anteriormente, e também por ser o método mais utilizado e com quantidade abundante de informações e formulações na literatura, este foi o método escolhido para resolver as equações de balanço de energia de modo a determinar a variação de temperatura no interior de galerias subterrâneas.

Grande parte da estratégia de solução da equação do balanço de energia via FVM foi baseada em Patankar (1980), Madiseh et al. (2012) e Versteeg e Malalasekera (1995), que aplicaram este método a situações análogas ao caso estudado neste projeto de investigação.

5.3 Aplicação do Método do Volume Finito

5.4 Definições Geométricas

Com base na abordagem proposta por Madiseh et al. (2012), imaginou-se a galeria como um corpo cilíndrico, com secção circular de diâmetro D_1 e comprimento L_1, envolto por um cilindro de rocha concêntrico com secção circular de diâmetro D_2 e comprimento L_2, como mostra a Figura 5.4. Para resolver as equações de troca de calor no interior da galeria, foi utilizado o método do Volume Finito. Para aplica-lo, foi definida uma malha de pontos regular nas direções r e z.

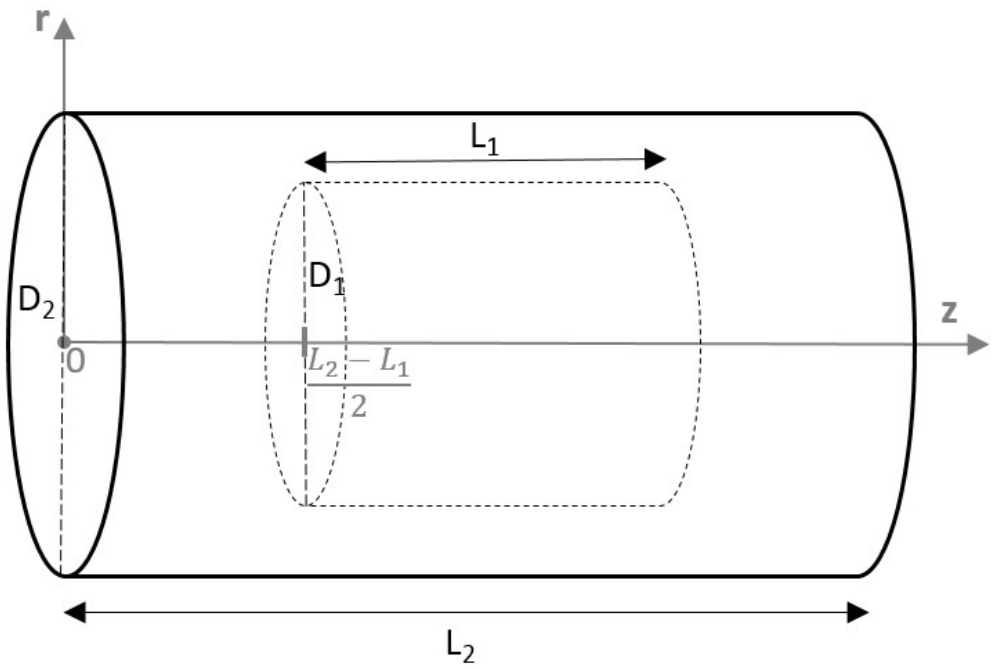


Figura 5.4: Referencial e posição dos elementos envolvidos no problema.

Como se adotou um sistema de coordenadas cilíndricas para as equações diferenciais das trocas de calor, desprezou-se a distribuição de temperaturas ao longo da direção angular, supondo-se temperaturas constantes nesta direção. Esta redução de dimensão do problema tridimensional, que se torna assim bidimensional, é feita levando em conta que, em uma galeria exatamente cilíndrica, para quaisquer pontos com mesmas coordenadas r e z e coordenadas angulares diferentes, se espera que tenham temperaturas iguais, por se manterem às mesmas distâncias da parede da galeria e de seu centro. O domínio espacial da galeria torna-se uma *fatia* de espessura $\delta\varphi$ dos cilindros concêntricos, representada no plano $r\,z$, conforme a Figura 5.7.

Com uma malha criada em $r\,z$, cada ponto corresponde ao centro de uma célula de controle. Cada célula de controle relaciona-se com suas células vizinhas ao norte, sul, este e oeste, sendo que as paredes compartilhadas por dois pontos distintos são as interfaces onde se dão as trocas de calor. Como as paredes das células são compartilhadas com os pontos vizinhos, os fluxos de calor que atravessam estas interfaces devem ser iguais. A Figura 5.3 mostra uma célula de controle em vermelho, sobre a qual se pretende calcular a variação de temperatura com o tempo. Suas células vizinhas, em linhas tracejadas, são os elementos permutadores de calor que provocam a alteração da temperatura da célula central. Assim, é possível integrar as equações dos balanços de energia para o volume de controle da célula.

Antes de adentrar a solução da equação diferencial, retoma-se a discussão do capítulo anterior a respeito da conservação da quantidade de movimento e de massa. Por Maliska (2004), no caso do escoamento unidimensional incompressível em um ducto de secção constante, escreve-se a equação do movimento discretizada pelo Método do Volume Finito, segundo a Figura 5.3 como:

$$\dot{m}\,(u_e - u_w) = A\,(P_W - P_E) + TV \qquad \text{com} \qquad \left.\begin{array}{l} u_e = \frac{1}{2}\,(u_E + u_P) \\ u_w = \frac{1}{2}\,(u_W + u_P) \end{array}\right\} \qquad u_e - u_w = 0 \qquad (5.7)$$

Onde A é uma constante relacionada à geometria e TV são os termos viscosos. Para esta situação, a pressão equilibra-se com os termos viscosos, de modo que se desacopla da variação da quantidade de movimento. Em um escoamento não viscoso, o gradiente de pressão torna-se zero.

5.5 Solução da Equação de Balanço de Energia

Com um volume de controle definido, é possível resolver a equação 4.36 do balanço de energia transiente para uma célula de controle, como a destacada na Figura 5.3. Como a equação 4.36 incorpora todos os termos presentes nas outras equações de balanços de energia por definir uma região em que ocorrem múltiplos

fenómenos de transferência de calor e de movimento do fluido, optou-se por resolver apenas esta equação e, posteriormente, aplicando as condições de contorno, anular seus termos conforme necessário.

Primeiramente, resolve-se a equação em relação ao espaço, multiplicando-se 4.36 por r e integrando-se sobre o volume de controle

$$\begin{aligned}
&\int_s^n \int_w^e r\left(\frac{\partial T}{\partial t} + 2u_m\left(1-\frac{r^2}{r_0^2}\right)\frac{\partial T}{\partial z}\right) \mathrm{d}z\,\mathrm{d}r \\
&\qquad = \int_s^n \int_w^e \left(\frac{\partial}{\partial r}\left(\alpha r \frac{\partial T}{\partial r}\right) + r\frac{\partial}{\partial z}\left(\alpha\frac{\partial T}{\partial z}\right)\right) \mathrm{d}z\,\mathrm{d}r \\
&\qquad + \int_s^n \int_w^e rhA(T_r - T_f)\ \mathrm{d}z\,\mathrm{d}r \\
&\int_s^n \left(r\left[\frac{\partial T}{\partial t}z\right]_w^e + r\left[2u_m\left(1-\frac{r^2}{r_0^2}\right)T\right]_w^e\right)\ \mathrm{d}r \\
&\qquad = \int_s^n \left(\left[\frac{\partial}{\partial r}\left(\alpha r\frac{\partial T}{\partial r}\right)z\right]_w^e + \left[r\left(\alpha\frac{\partial T}{\partial z}\right)\right]_w^e\right)\ \mathrm{d}r \\
&\qquad + \int_s^n \left[rhA(T_r - T_f)z\right]_w^e\ \mathrm{d}r \\
&\int_s^n \left(\frac{\partial T}{\partial t}r\Delta z + 2u_m\left(r-\frac{r^3}{r_0^2}\right)(T_e - T_w)\right)\ \mathrm{d}r \\
&\qquad = \int_s^n \left(\frac{\partial}{\partial r}\left(\alpha r\frac{\partial T}{\partial r}\right)\Delta z + r\left[\left(\alpha\frac{\partial T}{\partial z}\right)_e - \left(\alpha\frac{\partial T}{\partial z}\right)_w\right]\right)\ \mathrm{d}r \\
&\qquad + \int_s^n rhA(T_r - T_f)\Delta z\ \mathrm{d}r \\
&\left(\left[\frac{\partial T}{\partial t}\Delta z\right]\left[\frac{r^2}{2}\right]_s^n\right) + \left(\left[2u_m(T_e - T_w)\right]\left[\frac{r^2}{2} - \frac{r^4}{4r_0^2}\right]_s^n\right) \\
&\qquad = \Delta z\left[\alpha r\frac{\partial}{\partial r}\right]_s^n + \left(\left[\left(\alpha\frac{\partial T}{\partial z}\right)_e - \left(\alpha\frac{\partial T}{\partial z}\right)_w\right]\left[\frac{r^2}{2}\right]_s^n\right) \\
&\qquad + \left(hA(T_r - T_f)\Delta z\left[\frac{r^2}{2}\right]_s^n\right) \\
&\frac{\partial T}{\partial t}\Delta z + 2u_m(T_e - T_w)\left(1 - \frac{{r_s}^2 + {r_n}^2}{2r_0^2}\right) \\
&\qquad = \Delta z\left(\frac{2}{{r_n}^2 - {r_s}^2}\right)\left(\left(\alpha r\frac{\partial}{\partial r}\right)_n - \left(\alpha r\frac{\partial}{\partial r}\right)_s\right) \\
&\qquad + \left(\alpha\frac{\partial T}{\partial z}\right)_e - \left(\alpha\frac{\partial T}{\partial z}\right)_w + hA(T_r - T_f)\Delta z
\end{aligned} \tag{5.8}$$

Para prosseguir, é preciso inferir uma distribuição de temperatura nas direções r e z, para determinar as taxas de variação da temperatura nestas direções e avaliar os termos $\left(\alpha r\frac{\partial}{\partial r}\right)_n$, $\left(\alpha r\frac{\partial}{\partial r}\right)_s$, $\left(\alpha\frac{\partial T}{\partial z}\right)_e$, e $\left(\alpha\frac{\partial T}{\partial z}\right)_w$. Como sugerido por Patankar (1980), uma abordagem possível é considerar uma distribuição linear de temperatura ponto a ponto. Neste caso, as funções da temperatura para cada direção e para cada trecho seriam:

$$T(z) = \begin{cases} z\frac{T_E - T_P}{\delta z_e} & z_P \le z \le z_P \\ z\frac{T_P - T_W}{\delta z_w} & z_W \le z \le z_P \end{cases}$$

$$T(r) = \begin{cases} r\frac{T_N - T_P}{\delta r_n} & r_P \le r \le r_N \\ r\frac{T_P - T_S}{\delta r_s} & r_S \le r \le r_P \end{cases}$$

E assim, as taxas de variação de temperatura em cada direção tornam-se

$$\text{Em } r: \quad \left(\alpha r \frac{\partial}{\partial r}\right)_n = \alpha_n r_n \frac{T_N - T_P}{\delta r_n} \quad \text{e} \quad \left(\alpha r \frac{\partial}{\partial r}\right)_s = \alpha_s r_s \frac{T_P - T_S}{\delta r_s}$$

$$\text{Em } z: \quad \left(\alpha \frac{\partial T}{\partial z}\right)_e = \alpha_e \frac{T_E - T_P}{\delta z_e} \quad \text{e} \quad \left(\alpha \frac{\partial T}{\partial z}\right)_w = \alpha_w \frac{T_P - T_W}{\delta z_w}$$

Substituindo estes termos na equação 5.8, isolando a derivada parcial da temperatura em relação ao tempo, e integrando-se em relação ao tempo para um intervalo Δt, obtém-se:

$$\begin{aligned}\int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial T}{\partial t}\,\mathrm{d}t = &\int_t^{t+\Delta t} \left(\frac{2}{{r_n}^2 - {r_s}^2}\right)\left(\alpha_n r_n \frac{(T_N - T_P)}{\delta r_n} - \alpha_s r_s \frac{(T_P - T_S)}{\delta r_s}\right)\mathrm{d}t \\ &+ \int_t^{t+\Delta t} \left(\alpha_e \frac{(T_E - T_P)}{\Delta z \delta z_e} - \alpha_w \frac{(T_P - T_W)}{\Delta z \delta z_w} + hA(T_r - T_f)\right)\mathrm{d}t \\ &- \int_t^{t+\Delta t} \frac{2u_m(T_e - T_w)}{\Delta z}\left(1 - \frac{{r_s}^2 + {r_n}^2}{2r_0^2}\right)\mathrm{d}t\end{aligned} \tag{5.9}$$

Para resolver a integral 5.9, é necessário adotar um esquema de discretização para o passo de tempo Δt.

5.5.1 Esquemas de discretização no tempo

A discretização, que é parte fundamental da solução numérica de equações diferenciais, divide-se em dois domínios bastante distintos: o do espaço e o do tempo. Mostrou-se a discretização espacial do domínio através da criação de uma malha de pontos de forma a dividi-lo em sub-regiões menores, chamadas volume de controle. Outra etapa necessária à solução da equação diferencial é a discretização no tempo.

Adotar um determinado esquema de discretização para o tempo implica assumir um **comportamento para a temperatura durante um passo de tempo**. A equação 5.10 mostra uma generalização para a discretização no tempo da temperatura de um determinado ponto P, onde θ é um ponderador, e T_P e T_P^*são, respetivamente a temperatura do ponto antes e após o passo de tempo Δt.

$$\int_t^{t+\Delta t} T_P\,\mathrm{d}t = \theta T_P^* + (1-\theta)\,T_P \tag{5.10}$$

Essencialmente, o ponderador θ expressa o quanto a temperatura anterior do ponto prevalece sobre o passo de tempo. Se $\theta = 1$, no instante $t = t$ a temperatura muda repentinamente de T_P para T_P^*, sendo que o novo valor da temperatura predomina sobre o intervalo de tempo Δt. Por outro lado, se $\theta = 0$, é o valor antigo da temperatura, T_P, que é predominante sobre o intervalo de tempo Δt. Existem ainda valores para θ entre 0 e 1 que oferecem uma combinação entre as duas hipóteses. O valor da integral no tempo pode assumir valores segundo a tabela 5.1.

Esquema	θ	$\int_t^{t+\Delta t} T_P \mathrm{dt}$
Explícito	0	$T_P \Delta t$
Crank-Nicolson	$\frac{1}{2}$	$\frac{\Delta t}{2}\left(T_P^* + T_P\right)$
Totalmente Implícito	1	$T_P^* \Delta t$

Tabela 5.1: Esquemas de Discretização no tempo.

Esquema Totalmente Implícito

A discretização totalmente implícita, em que $\theta = 1$, aplicada à equação 5.9, resulta na temperatura T_P^* expressa em função da nova temperatura T_N^*, T_S^*, T_E^* e T_W^* dos pontos vizinhos. A nova temperatura de um ponto da malha após o passo de tempo torna-se dependente da nova temperatura dos outros pontos da malha. Nesta formulação, chega-se a uma equação discretizada em relação ao tempo em que após um certo intervalo de tempo Δt, não se conhece de imediato a temperatura de nenhum ponto da malha.

Isto significa que a solução da equação diferencial para cada ponto da malha se torna um sistema linear, que deve ser resolvido a cada passo de tempo, o que requer um significativo custo computacional. Apesar de incorporar este procedimento adicional para a solução completa da equação diferencial, este método é largamente utilizado e recomendado na solução de problemas transientes devido à sua robustez e estabilidade incondicional para passos de tempo de qualquer tamanho (Versteeg e Malalasekera, 1995).

Esquema Crank-Nicolson

Quando $\theta = \frac{1}{2}$, a nova temperatura do ponto P depende de uma média entre as temperaturas nova e antiga dos pontos vizinhos. Considera-se que a temperatura inicial sofre uma variação linear durante o passo de tempo Δt até tornar-se T^*. Neste caso tem-se a temperatura em dois níveis de tempo diferentes, mas com temperaturas conhecidas para $t = t$.

Assim como o Esquema Totalmente Implícito, o Esquema Crank-Nicolson requer a solução de um sistema linear de equações, mas sua estabilidade não é irrestrita.

Esquema Explícito

No esquema explícito, considera-se $\theta = 0$, de modo que o novo valor da temperatura de um ponto da malha depende apenas dos valores antigos (conhecidos) dos seus pontos vizinhos. Isto significa que a solução da equação diferencial para cada ponto é uma equação discretizada com apenas uma incógnita: a nova temperatura daquele ponto.

A vantagem do esquema explícito é de não ser necessário lidar com um sistema de equações, o que facilita o desenvolvimento do algoritmo do modelo. Por outro lado, este esquema de discretização é o que oferece menor estabilidade dentre os três. O passo de tempo passa a ser um parâmetro restritivo quanto à convergência e deve ser escolhido cuidadosamente.

Alguns autores como Versteeg e Malalasekera (1995) e Patankar (1980) oferecem fórmulas para o cálculo do passo de tempo máximo para a convergência frente a diferentes esquemas de discretização. Entretanto, a equação diferencial desenvolvida especificamente para este modelo não está totalmente caracterizada na literatura, e é de suas particularidades que depende a limitação do passo de tempo.

Este esquema, embora frágil em relação ao tamanho do passo de tempo, oferece uma simplificação considerável para o processo numérico, e foi escolhido para a discretização temporal da equação 5.9. Por uma questão de estabilidade numérica, há o inconveniente de se ter de trabalhar com intervalos de tempo curtos, mas com a vantagem de a discretização explícita não oferecer dificuldades adicionais (resolver um sistema linear a cada passo de tempo) que exigiriam adaptações no equacionamento do problema. Aplica-se então a discretização explícita à equação 5.9, obtendo-se como solução a equação discretizada 5.11.

$$\begin{aligned} T_P^* - T_P = \Delta t \left\{ \left(\frac{2}{{r_n}^2 - {r_s}^2} \right) \left(\alpha_n r_n \frac{(T_N - T_P)}{\delta r_n} - \alpha_s r_s \frac{(T_P - T_S)}{\delta r_s} \right) \right\} \\ + \Delta t \left\{ \alpha_e \frac{(T_E - T_P)}{\Delta z \, \delta z_e} - \alpha_w \frac{(T_P - T_W)}{\Delta z \, \delta z_w} + hA(T_r - T_f) - \frac{2u_m(T_e - T_w)}{\Delta z} \left(1 - \frac{{r_s}^2 + {r_n}^2}{2r_0^2} \right) \right\} \end{aligned}$$

$$T_P^* = T_P + a_1 (T_N - T_P) + a_2 (T_P - T_S) + a_3 (T_E - T_P) + a_4 (T_P - T_W) + a_5 (T_r - T_f) + a_6 (T_e - T_w) \tag{5.11}$$

A equação 5.11 corresponde à discretização explícita da equação de transferência de calor por condução e convecção em regime transiente para um fluido em regime laminar, em que os termos de coeficientes $a_1 - a_6$ representam interações com os volumes de controle vizinhos:

- a_1 - condução de calor entre o volume de controle e seu vizinho à Norte.
- a_2 - condução de calor entre o volume de controle e seu vizinho à Sul.
- a_3 - condução de calor entre o volume de controle e seu vizinho à Este.
- a_4 - condução de calor entre o volume de controle e seu vizinho à Oeste.
- a_5 - Convecção de calor entre sólido e fluido na interface.
- a_6 - Transporte de calor devido ao movimento do fluido.

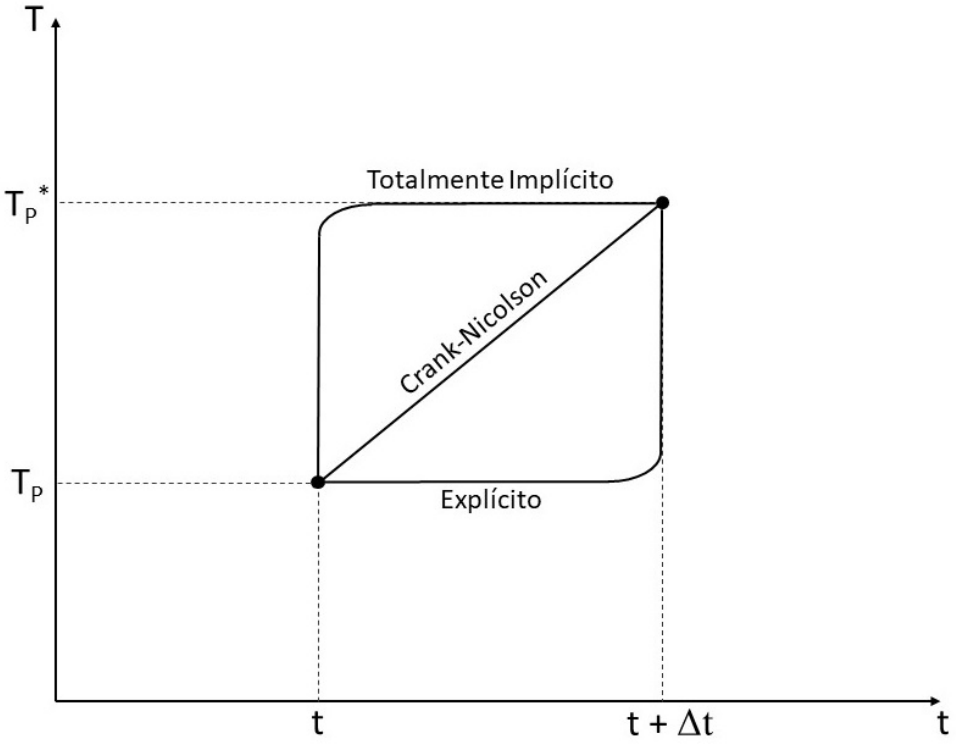


Figura 5.5: Variação de temperatura durante o passo de tempo. Adaptado de Patankar (1980).

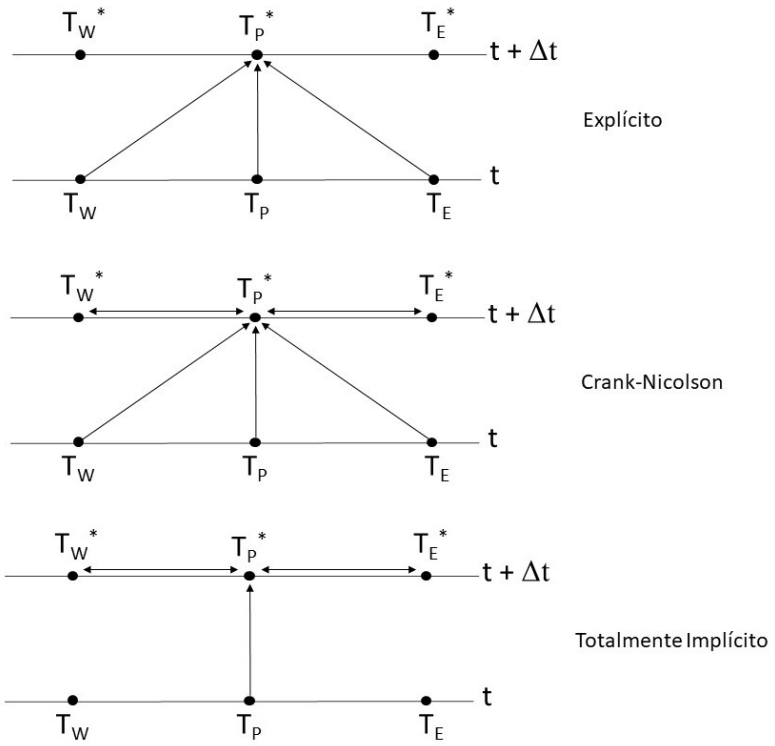


Figura 5.6: Conexões espacial e temporal do ponto P. Adaptado de Maliska (2004).

Ainda, deve-se examinar o papel do calor trocado por convecção nesta equação: este termo é independente do gradiente de temperatura em ambas as direções, e deve entrar no cálculo como acréscimo e decréscimo de temperatura nas células de controle em que há troca de calor por convecção.

Uma análise dimensional permite concluir que da forma como se apresenta na equação 5.11, o termo convectivo retorna a **energia trocada por convecção**. Para converter esta energia trocada em acréscimo/decréscimo de temperatura no volume de controle, divide-se este termo por $\rho C_p \Delta r \Delta z$. Este cálculo corresponde a determinar a variação de temperatura dentro de um corpo de volume $\Delta r \Delta z$ e com propriedades físicas ρ e C_p em função da energia trocada na forma de calor. Salienta-se que neste problema, que é bidimensional, a área de contacto entre rocha e fluido é uma área unitária, correspondente a Δz, e o volume da célula de controle é também unitário, sendo na realidade a área da célula, dada por $\Delta r \Delta z$.

Assumindo que a malha é regular em r e z, de modo que $\delta z_w = \delta z_e = \Delta z$ e $\delta r_n = \delta r_s = \Delta r$, os coeficientes de a_1 a a_6 valem:

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
$-\frac{\Delta t}{\Delta r}\left(\frac{2\alpha_s r_n}{{r_n}^2-{r_s}^2}\right)$	$\frac{\Delta t}{\Delta r}\left(\frac{2\alpha_n r_n}{{r_n}^2-{r_s}^2}\right)$	$\frac{\alpha_e \Delta t}{\Delta z^2}$	$-\frac{\alpha_w \Delta t}{\Delta z^2}$	$\frac{hA\Delta t}{\rho C_p \Delta r \Delta z}$	$-\frac{\Delta t}{\Delta z} 2u_m \left(1-\frac{{r_s}^2+{r_n}^2}{2r_0^2}\right)$

Tabela 5.2: Coeficientes da equação 5.11

Para células de controle fora dos limites da galeria, $a_6 = 0$, e para pontos fora da interface rocha-fluido, $a_5 = 0$.

O termo da velocidade, quando incluído no balanço de energia e integrado sobre o volume de controle resultando em a_6, assimila a **variação de velocidade ao longo da altura de um volume de controle**. Para volumes de controle suficientemente pequenos[1], é equivalente ao valor da velocidade em um ponto calculada através das funções descritas no capítulo anterior. Isto significa que, para situações específicas, a velocidade pode ser tratada como constante e a_6 assume o valor de 4.21 (caso laminar) ou 4.31 (caso turbulento).

Utilizando o mesmo procedimento de cálculo realizado para a equação 5.9, define-se a equação discretizada para um fluido em regime turbulento por 5.11, mas com a_6 dado por:

$$
\begin{aligned}
a_6 &= -\frac{\Delta \mathrm{t}}{\Delta \mathrm{z}} \left(\frac{\tau_w}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} (b_1 - b_2 + 8.5) \\
&\text{onde} \\
b_1 &= \left(\frac{2}{{r_n}^2 - {r_s}^2}\right)\left(\frac{r_n - r_0}{4\kappa}\right)\left(2\,(r_n + r_0)\ln\left(\frac{r_0 - r_n}{k_m}\right) - r_n - 3r_0\right) \\
b_2 &= \left(\frac{2}{{r_n}^2 - {r_s}^2}\right)\left(\frac{r_s - r_0}{4\kappa}\right)\left(2\,(r_s + r_0)\ln\left(\frac{r_0 - r_s}{k_m}\right) - r_s - 3r_0\right)
\end{aligned}
\tag{5.12}
$$

Da 5.12, nota-se a vantagem de restringir a altura da célula de controle e utilizar valores constantes para a velocidade de acordo com as equações 4.21 e 4.31.

5.5.2 Cálculo da difusividade témica α_x local

Para obter os valores locais de α_x, isto é, os valores da difusividade térmica nas fronteiras de um volume de controle (denotados por letras minúsculas sobrescritas às variáveis), cujo centro é um determinado ponto P, utiliza-se o método da média harmónica de Patankar (1980) partindo dos valores de condutividade térmica k do ponto analisado e de seus pontos vizinhos (denotados por letras maiúsculas sobrescritas às variáveis). Este procedimento é aplicado pois, ainda que a variação de temperatura entre os pontos possa ser tratada como linear, foi demonstrado por Patankar (1980) que não é recomendável utilizar este mesmo tipo de distribuição para a condutividade térmica. Os valores da difusividade térmica na fronteira x entre os volumes de controle centrados em P e X podem ser obtidos por:

[1] Determinados através de simulações e testes do modelo.

$$\left.\begin{array}{l} k_x = \frac{2k_P\, k_X}{k_P + k_X} \\ \alpha_x = \frac{k_x}{\rho_P\, c_P} \end{array}\right\} \quad \alpha_x = \frac{2k_P\, k_X}{\rho_P\, c_P\, (k_P + k_X)} \tag{5.13}$$

5.6 Propriedades termofísicas como função da temperatura e pressão

Se supôs, como ponto de partida para o equacionamento do **modelo**, que a variação de pressão é desprezável, desacoplada da velocidade na equação de conservação de movimento, e que o escoamento é incompressível. Retoma-se, nesta secção, esta discussão, utilizando agora valores reais como forma de justificar as simplificações adotadas.

Imagina-se a seguinte situação: um troço de galeria com escoamento de água ou de ar a $1\,\mathrm{m\,s^{-1}}$, com 500 m de comprimento e 4 m de diâmetro, em que o ar ou a água entram a 20 °C e saem a 22 °C. A tabela 5.3 contém valores para as propriedades físicas do ar e da água de acordo com as temperaturas de entrada e de saída.

Fluido	T $(^\circ C)$	ρ $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	C_p $\left(\frac{kJ}{kg\,K}\right)$	μ $\left(\frac{kg}{m\,.\,s} \times 10^5\right)$	ν $\left(\frac{m^2}{s} \times 10^5\right)$	k $\left(\frac{W}{m\,K}\right)$
ar	20	1.2047	1.0061	1.8205	1.5111	0.0256
	22	1.1965	1.0062	1.8301	1.5295	0.0257
água	20	997.78	4.0764	97.720	0.0979	0.6047
	22	997.33	4.0748	93.130	0.0934	0.6078

Tabela 5.3: Propriedades reológicas e termofísicas do ar e da água[1].

Observa-se que de facto a variação das propriedades físicas, considerando fluidos a temperaturas de entrada e saída com diferença de 2 °C, é desprezável. A variação é ainda mais subtil se considerarmos que se dá ao longo de 500 m de galeria, estando a temperatura sujeita a um gradiente.

Utilizando este mesmo exemplo, pode-se estudar a variação de pressão ao longo da galeria por meio da equação de Darcy–Weisbach (4.19) e calculando o fator de atrito de Darcy através da rugosidade média iterando-se a equação 4.27. Para o escoamento de ar a $1\,\mathrm{m\,s^{-1}}$, uma malha de pontos com $\Delta z = 2m$ e $\Delta r = 0.2m$ para a discretização do domínio, e considerando uma rugosidade média de $k_m = 0.3m$, encontra-se uma variação total de aproximadamente 6.31 Pa no trecho todo de 500 m, ou de 0.025 Pa entre pontos consecutivos da malha, valores pouco significativos se comparados à pressão atmosférica.

Com este exemplo, reforçam-se as razões apresentadas no capítulo anterior para não se utilizar a equação da conservação de movimento em simultâneo com o balanço de energia na modelação numérica do fenómeno: as variações das propriedades físicas do fluido, e consequentemente do movimento do fluido, em função da variação de temperatura, são de facto desprezáveis.

5.7 Condições iniciais e de contorno

Seguindo o procedimento utilizado por Madiseh et al. (2012), definiu-se uma geometria para o problema com base na simetria da galeria em relação ao eixo z, como mostra a Figura 5.7. A vantagem de levar em conta a simetria do problema é a de não ter que efetuar os cálculos para todo o domínio, e sim para metade do domínio, o que resulta em um menor número de pontos e um menor custo computacional.

Conforme a Figura 5.7, assume-se que:

1. a temperatura na fronteira isotérmica mantém-se a T_g para todo o intervalo de tempo;
2. não há troca de calor para $r = 0$, isto é, há uma fronteira adiabática sobre o eixo de simetria do problema;
3. há um escoamento de velocidade u na direção z apenas no interior da galeria;

[1] Valores da Tabela 5.3 consultados em http://www.mhtl.uwaterloo.ca/old/onlinetools/airprop/airprop.html

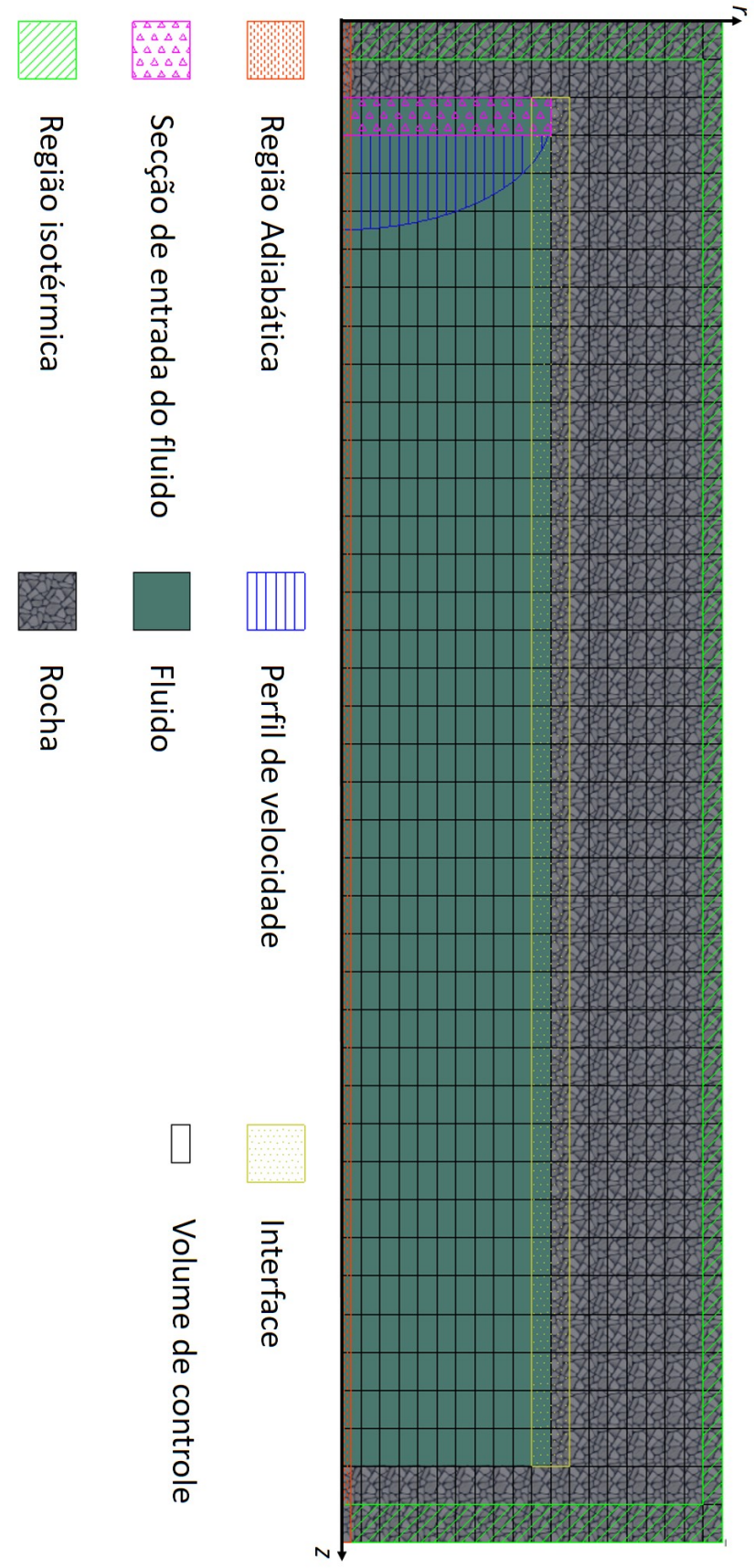


Figura 5.7: Domínio e condições de contorno.

4. no instante $t = 0$, todos os pontos do domínio estão em equilíbrio térmico a T_g, exceto os pontos situados sobre a secção de entrada da galeria, que estão a T_{in} para todo o intervalo de tempo;

5. não há escoamento fora da galeria;

Assim, a depender do regime de escoamento e das condições de contorno, podem ser impostas restrições matemáticas ao cálculo de temperatura e delimitar as regiões onde ocorrem trocas de calor por diferentes mecanismos:

1. Se o ponto se situa dentro da galeria, mas não na fronteira rochosa, $a_5 = 0$;

2. Se o ponto se situa dentro do maciço rochoso, mas não na fronteira com a galeria, ocorre apenas condução de calor, então $a_5 = a_6 = 0$;

3. Se o ponto se situa dentro do maciço rochoso e na fronteira com a galeria, ocorre convecção forçada com o fluido, que retira calor da rocha, então a_5 recebe sinal negativo. Como não há escoamento no interior do maciço, $a_6 = 0$;

4. Se o ponto se situa dentro da galeria e na fronteira com o maciço rochoso, ocorre convecção forçada com a rocha e há escoamento do fluido, então todos os coeficientes são não-nulos;

5. Se a fronteira sul do volume de controle está sobre a fronteira adiabática, $a_2 = 0$;

6. Se o ponto da malha está na secção de entrada da galeria, $T_P^* = T_{\text{in}}$ para qualquer instante;

7. Se o ponto está sobre a fronteira isotérmica, $T_P^* = T_g$ para qualquer instante;

Com as condições geométricas e de contorno definidas, é possível posicionar convenientemente os pontos da malha, possibilitando o cálculo dos fluxos de calor de modo a respeitar as regiões de descontinuidade. A Figura 5.7 mostra a discretização espacial do domínio em volumes de controle sobre regiões-chave para a solução das equações de calor.

A algoritmia do modelo e as outras estratégias utilizadas para aplicar o FVM, otimizar os cálculos e reduzir o tempo de execução do algoritmo são discutidos nas secções seguintes.

5.8 Algoritmo do Modelo

O algoritmo foi escrito em `Python`, utilizando o ambiente científico e *open-source* `Spyder`. As principais bibliotecas utilizadas foram `numpy` e `matplotlib`. Os parâmetros de entrada do algoritmo são:

1. **Propriedades térmicas de rocha e ar**: densidade, calor específico, condutividade térmica e temperatura inicial;

2. **Escoamento de ar**: viscosidade dinâmica, velocidade média e número de Prandtl;

3. **Geometria**: diâmetros do cilindro externo (envoltório de rocha) e da galeria, comprimento do cilindro externo e da galeria, inclinação da galeria e rugosidade média;

4. **Fontes de calor**: vetores contendo posição e dissipação de calor de máquinas e/ou pessoas;

5. **Parâmetros numéricos**: número de pontos nas direções r e z, dimensões dos volumes de controle, e passo inicial de tempo, auto-ajustado para garantir a convergência do algoritmo;

Todas as varáveis criadas para os parâmetros de entrada são do tipo `float` e são introduzidas no próprio corpo do código. Esta opção foi feita para que os valores de input não tivessem de ser introduzidos manualmente através de interface gráfica a cada nova simulação.

O funcionamento do algoritmo será detalhado com base na modelação das trocas de calor entre rocha e ar, porém o fluido escolhido para a análise poderia ser qualquer outro, desde que newtoniano, incompressível e com propriedades físicas caracterizadas.

Os parâmetros físicos do ar recebem os valores correspondentes às suas propriedades termofísicas para a temperatura inicial e não são atualizados ao longo da execução do algoritmo, quando a temperatura do ar

muda; isto porque o acréscimo de temperatura é pequeno e provoca variações desprezáis das propriedades termodinâmicas do fluido.

Para comprovar numericamente o baixo impacto das variações das propriedades físicas do ar ao longo do percurso, testou-se aplicar a correção destes parâmetros para cada ponto da malha a cada iteração em função dos novos valores de temperatura, verificando-se que o único impacto relevante para o **modelo** foi um aumento considerável no tempo de execução do algoritmo. O conteúdo de humidade no ar, para temperaturas próximas dos 20 °C, também provoca variações desprezáis nas propriedades termofísicas do ar e pode ser ignorado.

5.8.1 Pré-processamento

Sendo `ngpr` e `ngpz` as variáveis que definem o número de pontos da malha nas respetivas direções, os valores de Δz e Δr definem as distâncias entre pontos da malha em cada direção com base nos parâmetros geométricos D_1,D_2,L_1 e L_2. Foram criadas duas matrizes[1] iniciais, chamadas `x`, `y` : a matriz `x` é um vetor de tamanho `[1, ngpz]` que armazena as coordenadas na direção z de cada coluna de pontos da malha; a matriz `y` é um vetor de tamanho `[ngpr, 1]` que armazena as coordenadas na direção r de cada linhas de pontos da malha.

A lógica de indexação de variáveis é fundamental para o desenvolvimento do algoritmo, pois permite armazenar, em uma única variável, informações particulares de cada ponto da malha, garantindo facilidade e agilidade para acessar informações dos pontos através de seus índices.

Matrizes das fontes pontuais de calor e correções

Inicialmente, são criados vetores E_m e E_p, de tamanhos $[n_m, 6]$ e $[n_p, 2]$, correspondentes à presença de máquinas e pessoas, respetivamente. A variável n_m tem valor inteiro correspondente à quantidade de posições ocupadas por máquinas, e n_p tem valor correspondente a quantidade posições ocupadas por pessoas, de modo que se três pessoas ocupam uma mesma posição, $n_p = 1$. $Em[:, 0]$ e $Ep[:, 0]$ recebem a quantidade de máquinas ou pessoas naquela mesma posição, e $Em[:, 1]$ e $Em[:, 1]$ recebem a coordenada z do ponto onde estão localizadas. Os valores seguintes de E_m são preenchidos pelos parâmetros da equação 4.34, dependendo do tipo do equipamento e suas especificações.

Na sequência, $Em[:, 1]$ e $Ep[:, 1]$ são atribuídos ao ponto j da malha, cuja coordenada está mais próxima da posição da fonte de calor. Se supõe que as máquinas e pessoas são entes pontuais que ocupam dois volumes de controle cada, um imediatamente acima do eixo z e outro imediatamente abaixo do eixo z, estando, portanto, no centro da galeria e divididos em duas células de controle. Desta maneira, cada uma das células de controle dissipa metade do total de calor emitido pela fonte pontual, e o volume de controle localizado abaixo do eixo z não fará parte dos cálculos devido a simetria adotada. Todas as pessoas e máquinas estão, portanto, associadas a uma posição de índice $i = 0$. Observa-se que em decorrência desta estratégia de posicionamento podem ser produzidas distorções pontuais de temperatura nas regiões muito próximas aos equipamentos, relacionadas ao fato de que se associa uma grande dissipação de energia térmica a um pequeno volume; estas distorções se diluem, entretanto, nos demais pontos da malha e não causam problemas ao processo numérico.

São criadas duas matrizes, MM e MP, de tamanho $[ngpr, ngpz]$, que armazenam o calor dissipado por pessoas e máquinas. Com as propriedades do fluido, neste caso específico o ar, e sabendo o volume da célula de controle, converte-se o calor dissipado para um valor de acréscimo de temperatura em função do tempo. Assim, obtém-se, por exemplo, que um ponto ij da malha tem um acréscimo de temperatura de x °C a cada segundo devido a presença de fontes externas de calor. Estas matrizes são somadas diretamente à matriz T de temperatura do balanço de energia após cada iteração, após serem multiplicadas pelo passo de tempo.

Compressão adiabática do ar e inclinação da galeria

A temperatura inicial do ar pode ser corrigida pela equação relacionada à compressão adiabática do ar, em função da profundidade da galeria, caso se deseje trabalhar com a temperatura do ar em superfície ao invés da temperatura do ar na entrada no troço de galeria.

É criada também uma matriz $Mincl$, que utiliza a equação de compressão adiabática do ar (4.33) para contabilizar um possível acréscimo/decréscimo de temperatura do ar devido a diferença de profundidade da galeria ao longo de sua extensão. O valor do ângulo de inclinação é convertido para diferença de profundidade em função da coordenada z de cada ponto e do seno do ângulo de inclinação da galeria, de modo que $Mincl$

[1] Os termos **vetor** e **matriz** referem-se, sempre, a variáveis `array` mono e bidimensionais indexadas em ij, e não aos entes matemáticos homónimos.

diz respeito ao acréscimo de temperatura por segundo devido a diferença de profundidade dos pontos, tendo valor zero na secção de entrada da galeria e valor máximo na secção de saída. Assim como MP e MM, $Mincl$ é acrescida diretamente à matriz T de temperatura após cada iteração.

Coeficientes da equação do balanço de energia

Uma função define, com base no número de Reynolds, se o regime de escoamento é laminar ou turbulento: se o regime for turbulento, uma variável binária recebe 1, e se for laminar, recebe 0. Também, é criada uma função para obter fator de fricção de Darcy a partir da rugosidade média, utilizando o método da bissecção para resolver a equação 4.27. Com isto, é possível calcular o fator de fricção τ_w e a velocidade de fricção v^*, posteriormente utilizados para calcular a distribuição de velocidades e o número de Nusselt.

É criada então uma matriz T_{bin}, com tamanho $[ngpr, ngpz]$. Cada ponto desta matriz corresponde um ponto da malha de pontos, cujas coordenadas em r e z estão associadas a valores de $x[0, j]$ e $y[i, 0]$. Tendo em conta os parâmetros geométricos iniciais, a matriz T_{bin} recebe valores binários: se o ponto da malha está dentro da galeria (fluido), recebe 0; se está fora (rocha), recebe 1. Esta matriz permite, de maneira muito simplificada, criar matrizes de propriedades físicas, associando a cada ponto as propriedades do ar ou da rocha, em função destes valores binários indexados.

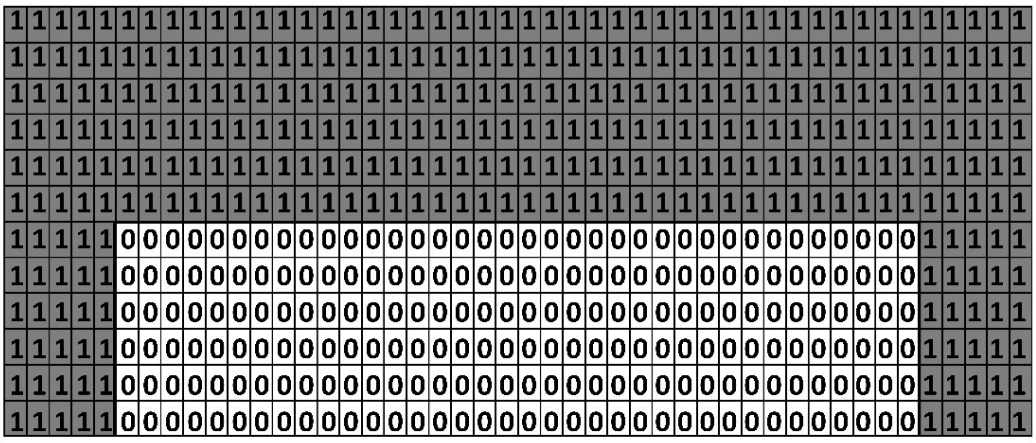


Figura 5.8: Matriz binária T_{bin}.

Observa-se na Figura 5.8 que os pontos de valor binário 0 e que estão localizados na fronteira com o teto da galeria correspondem ao centro de um volume de controle cujos limites a norte têm coordenadas que coincidem exatamente com a parede da galeria e respeitam o valor de $D_1/2$. Com estes pontos-limite do teto da galeria conhecidos, cria-se uma sub-matriz de T_{bin}, chamada $M_{interface}$, na qual os pontos da malha recebem 1 se são pontos do interior da galeria cujos limites norte estão exatamente sobre os limites do teto da galeria, ou se são pontos de rocha cujos limite sul do volume de controle estão exatamente sobre os limites do teto da galeria. A $M_{interface}$ é, portanto, a matriz que define os pontos da malha que constituem a superfície através da qual se dão as trocas de calor por convecção. Uma variável i_{max} recebe o índice da linha que corresponde aos pontos interiores da galeria que estão em contacto com rocha, e duas varáveis j_{min} e j_{max} recebem os índices associados aos primeiros e últimos pontos situados dentro da galeria.

A matriz $M_{interface}$ por sua vez, suporta a criação de uma matriz inicial M_{a_5}, dos valores dos coeficientes a_5 da equação do balanço de energia, segundo a Tabela 5.3. Esta matriz armazena o coeficiente de convecção h apenas nos pontos que trocam calor por convecção. O valor inicial de h é calculado através das equações 4.27 - 4.26, e se supõe inicialmente que deve ser recalculado a cada iteração após um determinado passo de tempo. O coeficiente h é o mesmo para o ar e para a rocha (com sinais trocados) e se baseia nos cálculos iniciais dos Números de Reynolds e de Nusselt.

De forma análoga, é criada uma matriz $M_{moldura}$, cujo objetivo é impedir que os valores de temperatura dos pontos situados sobre a fronteira isotérmica se modifiquem. A matriz $M_{moldura}$ é uma matriz binária que recebe 1 para todos os pontos, exceto os que estão sobre a fronteira adiabática.

Cria-se também uma matriz de velocidades M_{vel}, cujos valores dependem da posição do ponto interior à galeria, de sua distância à parede, do valor médio u_m da velocidade, e dos demais parâmetros referentes

às equações 4.21 ou 4.31, a depender do regime de escoamento. Com M_{vel}, cria-se a matriz de coeficientes M_{a_6} dos coeficientes a_6 da equação do balanço de energia 5.11, com valores calculados conforme a Tabela 5.2 (caso laminar) ou Equação 5.12 (caso turbulento).

É criada uma matriz M_k, que associa, à cada ponto da malha, o valor da condutividade térmica correspondente ao fluido ou à rocha, com base em T_{bin}. Cria-se também a matriz de temperatura T, que recebe em cada célula ij o valor da temperatura do ar, se o ponto é fluido e sua posição j coincide com a secção de entrada da galeria, ou o valor da temperatura da rocha, caso contrário. São criadas duas matrizes $T_{espelho}$ e $T_{inicial}$, que são cópias da matriz T e têm função de preservar valores anteriores do estado de temperatura, permitindo que o algoritmo "retroceda no tempo" caso necessário.

Com a matriz M_k percorrida ponto a ponto, e com a equação 5.13 do método da média harmónica de Patankar (1980), é possível criar matrizes M_{a_n} para os outros coeficientes a_n da Tabela de coeficientes 5.3. Nesta parte também se inclui a condição de que os pontos de índice $i = 0$ (centro da galeria) não trocam calor com suas células vizinhas a Sul.

Com os cálculos preliminares concluídos e com a criação de todas as variáveis necessárias ao processo numérico, encerra-se a etapa de pré-processamento. Acrescenta-se que o algoritmo passou por diversas versões de desenvolvimento até atingir uma versão otimizada, de modo que a etapa de pré-processamento foi desenvolvida em função de melhorias dos processos de cálculo.

5.8.2 Solução

O intervalo de tempo total considerado para os cálculos depende essencialmente dos objetivos da simulação: para simular um possível esgotamento do potencial geotérmico da rocha, trabalha-se com valores com ordem de grandeza de anos; para simular uma possível estabilização do estado de temperatura no interior da galeria, pode se utilizar algum critério de parada que compare a distribuição de temperatura no início de dois passos de tempo consecutivos: a depender da variação, pode-se supor que o sistema atingiu certo grau de estabilidade, e escusa-se prosseguir com a execução do algoritmo. Para simular condições de transição (em que a temperatura de entrada ou o caudal do ar se alteram, por exemplo), poder-se-ia utilizar o valor mínimo da velocidade de escoamento, de modo que o intervalo de tempo seria correspondente ao tempo mínimo que o fluido leva para percorrer a galeria por completo pelas primeiras n vezes, garantindo que o sistema incorporou as mudanças causadas pela variação dos parâmetros de entrada. Por fim, quando há valores de temperatura associados ao tempo, executa-se o algoritmo durante o intervalo desejado.

Passo de tempo e convergência

Considerando as recomendações de Patankar (1980) e Versteeg e Malalasekera (1995) quanto aos métodos de discretização no tempo para os passos de tempo em uma discretização explícita, é possível que emerjam resultados fisicamente não-realistas devido a instabilidade do método, restrito à passos de tempo curtos. A questão central passa a ser a quantificação do passo de tempo suficientemente curto que cause a convergência do método.

Embora existam fórmulas para delimitar valores do passo de tempo em função do método de discretização adotado, estes cálculos resultam em valores que obrigatoriamente garantem a convergência, mas que não necessariamente são os maiores passos de tempo possíveis que garantem a convergência. Por esta razão, adotou-se uma estratégia diferente para garantir a convergência do método: atribui-se um valor elevado para o passo de tempo inicial, e procede-se ao cálculo da equação discretizada do balanço de energia, verificando se valores fisicamente impossíveis ou incoerentes emergem.

Um resultado fisicamente impossível, por exemplo, é um fluido a uma temperatura menor que a temperatura da rocha resfriar-se ao longo do tempo. Se os cálculos divergem, é possível também que eventualmente se obtenham valores do tipo `NaN` (*not a number*) para a temperatura. É criada uma sub-rotina dentro do algoritmo principal que testa os valores calculados e identifica "sintomas" de divergência. Pela execução de sucessivas simulações e testes do algoritmo, concluiu-se que após certo número de iterações o algoritmo atinge uma estabilidade numérica.

Caso se verifique algum absurdo físico, ajusta-se o passo de tempo para um novo valor ligeiramente menor, e retorna-se a matriz de temperaturas T ao seu valor inicial armazenado em $T_{inicial}$.

Salvaguarda periódica de variáveis

Como descrito por Madiseh et al. (2012), para intervalos de tempo muito grandes, é possível que o algoritmo demore horas, ou até dias, para executar todos os cálculos. Desta maneira, faz sentido criar pontos automáticos de salvaguarda que permitam retomar os cálculos a partir do ponto onde pararam, caso a execução do algoritmo seja interrompida acidentalmente. Este problema é ainda mais acentuado para computadores com baixas capacidades de processamento, que podem apresentar falhas e desligar-se antes do término dos cálculos.

Para contornar este problema, faz-se um emphbackup periódico da temperatura e do tempo decorrido, que são armazenadas em formato `.py`. Assim, é possível executar novamente o algoritmo a partir do ponto de parada invocando estas varáveis no corpo do código, conforme necessário.

Solução do balanço de energia e lógica matricial de cálculos

Para resolver a equação do balanço de energia sem que seja necessário aplicar a equação do balanço de energia ponto a ponto, utiliza-se o procedimento de **vetorização**, que elimina laços utilizados para percorrer os $i \times j$ elementos da matriz e aplica os cálculos diretamente a todo o `array` (Langtangen, 2011). Algoritmos que adotam a vetorização são geralmente mais rápidos, mas utilizam mais memória (Kiusalaas, 2010) a depender da quantidade de elementos contidos na `array`.

Esta lógica depende da vetorização de variáveis na etapa de pré-processamento para armazenar constantes, propriedades físicas, velocidades, e outros parâmetros associados a cada elemento da malha, de forma sistemática e indexada, garantindo que as múltiplas matrizes armazenam valores associados sempre a um mesmo ponto ij da malha em sua posição ij correspondente.

A maior dificuldade deste procedimento é estabelecer a temperatura dos pontos vizinhos a cada passo de tempo, pois são valores transitórios. Também há a dificuldade de associar a temperatura T_{ij} de cada ponto aos seus vizinhos Norte $T_{(i+1)j}$, Sul $T_{(i-1)j}$, Este $T_{i(j-1)}$ e Oeste $T_{i(j+1)}$, sem ter de se percorrer a matriz T elemento a elemento.

Para resolver este problema e criar matrizes das temperaturas vizinhas para todos os pontos da malha de uma só vez, construiu-se matrizes vizinhas para cada uma das direções deslocando-se a matriz T em uma unidade de posição na direção desejada. Para criar uma matriz da temperatura dos vizinhos Este MTE de todos os pontos, por exemplo, basta deslocar a matriz T para uma posição $j+1$. Para a direção Oeste, desloca-se T para uma posição $j-1$, para Norte, desloca-se para $i+1$, e para Sul, para $i-1$, como mostra a Figura 5.9. Desta forma, compatibiliza-se os índices das matrizes e as posições dos pontos: o ponto T_{ij} tem vizinhos norte MTN_{ij}, sul MTS_{ij}, leste MTE_{ij}, e oeste MTW_{ij}.

Disto, surge a dificuldade em lidar com os pontos que estão situados na fronteira isotérmica: se o ponto já é o último à Norte, não há um vizinho Norte; como então pode-se deslocar toda a matriz T uma unidade para cima? A resposta para esta questão baseia-se no **Método do Espelho** definido por Çengel e Ghajar (2012): o valor da temperatura do vizinho Norte (que não existe) de um volume de controle na fronteira isotérmica Norte, é igual ao valor de temperatura do seu vizinho à Sul. Esta estratégia permite que, na equação do balanço de energia, as variações de temperatura se anulem e os pontos da fronteira isotérmica permaneçam a uma temperatura constante, como é suposto. Mais, estes valores de temperatura já permaneceriam inalterados devido a matriz $M_{moldura}$, que garante que os valores da primeira e última linha, e da primeira e última coluna permaneçam inalterados. A existência da fronteira isotérmica é a razão pela qual o envoltório cilíndrico rochoso de comprimento L_2 e diâmetro D_2 não pode ter estes dois parâmetros demasiadamente próximos de L_1 e D_1, pois enviesariam os cálculos condicionando a interface a uma temperatura constante da rocha.

O que o algoritmo auxiliar para a criação das matrizes vizinhas faz, na prática, é "fatiar" a matriz original T, desloca-la na direção desejada, e "empilhar" as linhas ou colunas em falta de acordo com as condições de contorno.

Com esta etapa concluída, avalia-se a equação do balanço de energia, e adiciona-se os efeitos da presença de fontes pontuais de calor e de inclinação da galeria. Em alguns casos, realiza-se um certo número inicial de iterações para condicionar o estado de temperatura no interior da galeria antes de adicionar os efeitos das fontes pontuais de calor, para que se garanta a estabilidade numérica do algoritmo.

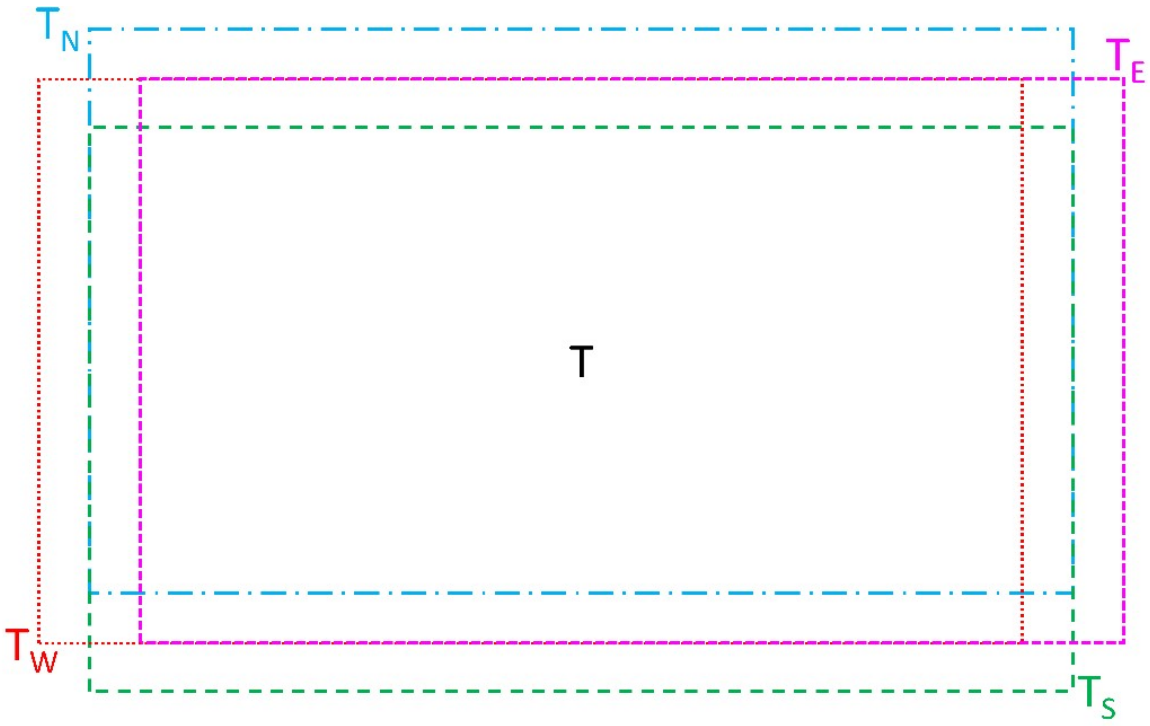


Figura 5.9: Matrizes MTN, MTS, MTE e MTW.

Listagem (5.1) de Algoritmo do modelo.py

```
# Inclusão de bibliotecas
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.patches as patches

# Inicialização de variáveis
# Parâmetros geométricos da galeria
D1 = 4
D2 = 8
L1 = 2000
L2 = 2100
profundidade = 1000
inclinacao = 10
ngpz = int(np.round((L2 / 5)))
ngpr = int(np.round(D2 / 0.25))

# Criação de vetores e matrizes/definição das outras varáveis
# ...

# Variáveis de input
# Propriedades termofísicas da rocha
densrock = 1500
Cprock = 1260
krock = 3.1
# Propriedades termofísicas do ar
uar = 1
krough = 0.3
densar = 1.1774
```

Listagem (5.1) de Algoritmo do modelo.py (cont.)

```
viscar = 15.69 * (10 ** -6)
miar = 1.8462 * (10 ** -5)
Cpar = 1005.7
kar = 0.02624
alfaar = 0.22160 * (10 ** -4)
Pr = 0.708
# Temperaturas iniciais#
Tg = 31
Tin = 15

# Pessoas
posicoescompessoas = 3
Ep = np.zeros((posicoescompessoas, 2))
# Posicao 1
Ep[0, :] = [2, 200]
# Posicao 2
Ep[1, :] = [1, 500]
# Posicao 3
Ep[2, :] = [3, 700]

# Maquinas
posicoescommaquinas = 2
Em = np.zeros((posicoescommaquinas, 6))
# Posicao 1
Em[0, :] = [2, 100, 800, 0.7, 1, 0.4]
# Posicao 2
Em[1, :] = [1, 500, 18800, 0.7, 1, 0.4]


# Cálculos preliminares
zmaxgaleria = 0.5 * (L1 + L2)
zmingaleria = 0.5 * (L2 - L1)
rmaxgaleria = 0.5 * D1
alfarock = krock / (densrock * Cprock)
npontos = ngpr * ngpz
r2 = 0.5 * D2
r1 = 0.5 * D1
DELTAz = L2 / ngpz
DELTAr = (D2 * 0.5) / ngpr
aux = np.int((zmaxgaleria - zmingaleria) / DELTAz)
DATAAR = np.zeros((aux, 2))

# Correção de Tin (autocompressão)
Tin = Tin + (profundidade / (427 * Cpar))

# Cálculos iniciais do ar (escoamento)
Re = (uar * D1) / viscar
if Re > 2300:
    turbulento = 1
else:
    turbulento = 0

# Fator de atrito com base na rugosidade (método da bissecção)
extremomaior = 10 / 100
extremomenor = 0.8 / 100
meio = (extremomaior + extremomenor) / 2

funcextrmenor = (
```

Listagem (5.1) de Algoritmo do modelo.py (cont.)

```
    (Re * (extremomenor ** (1 / 2)))
    / (1 + (0.1 * (krough / D1) * Re * (extremomenor ** (1 / 2))))
) - (10 ** (((extremomenor ** (-1 / 2)) + 0.8) / 2))
funcextrmaior = (
    (Re * (extremomaior ** (1 / 2)))
    / (1 + (0.1 * (krough / D1) * Re * (extremomaior ** (1 / 2))))
) - (10 ** (((extremomaior ** (-1 / 2)) + 0.8) / 2))
funcmeio = (
    (Re * (meio ** (1 / 2))) / (1 + (0.1 * (krough / D1) * Re * (meio ** (1 / 2))))
) - (10 ** (((meio ** (-1 / 2)) + 0.8) / 2))
calculate = 1

while calculate == 1:
    if ((funcextrmaior > 0) and (funcmeio > 0)) or (
        (funcextrmaior < 0) and (funcmeio < 0)
    ):
        extremomaior = meio
    if ((funcextrmenor > 0) and (funcmeio > 0)) or (
        (funcextrmenor < 0) and (funcmeio < 0)
    ):
        extremomenor = meio
    meio = (extremomaior + extremomenor) / 2
    funcextrmenor = (
        (Re * (extremomenor ** (1 / 2)))
        / (1 + (0.1 * (krough / D1) * Re * (extremomenor ** (1 / 2))))
    ) - (10 ** (((extremomenor ** (-1 / 2)) + 0.8) / 2))
    funcextrmaior = (
        (Re * (extremomaior ** (1 / 2)))
        / (1 + (0.1 * (krough / D1) * Re * (extremomaior ** (1 / 2))))
    ) - (10 ** (((extremomaior ** (-1 / 2)) + 0.8) / 2))
    funcmeio = (
        (Re * (meio ** (1 / 2))) / (1 + (0.1 * (krough / D1) * Re * (meio ** (1 / 2))))
    ) - (10 ** (((meio ** (-1 / 2)) + 0.8) / 2))
    if (funcmeio > -0.001) and (funcmeio < 0.001):
        calculate = 0
        DFF = meio

# Cálculo de Cf
Cf = DFF / 4
# Cálculo de tauw
tauw = (Cf * (densar) * (uar ** 2)) / 2
# Cálculo de v*
vasterisco = (tauw / densar) ** (1 / 2)
# Correspondência entre f e DFF
friciso = DFF


# Função matriz T, condições de contorno e condições iniciais
nr = 0
nz = 0
# Vetores de posição
while nz < ngpz:
    x[0, nz] = (DELTAz) * (nz + 1)
    nz = nz + 1
while nr < ngpr:
    y[nr, 0] = (DELTAr / 2) + ((DELTAr) * (nr))
    nr = nr + 1

```

Listagem (5.1) de Algoritmo do modelo.py (cont.)

```
145 # Matriz pessoas
146 while n_p < posicoescompessoas:
147     Mp[0, int(round((Ep[n_p, 1]) / DELTAz))] = 0.5 * (
148         ((Ep[n_p, 0]) * 117) / (densar * DELTAr * DELTAz * Cpar)
149     )
150     n_p = n_p + 1
151 # Matriz máquinas
152 while nm < posicoescommaquinas:
153     Mm[0, int(round((Em[nm, 1]) / DELTAz))] = (
154         0.5
155         * ((Em[nm, 0]) * (Em[nm, 2]) * (Em[nm, 3]) * (Em[nm, 4]) * (Em[nm, 5]))
156         / (densar * DELTAr * DELTAz * Cpar)
157     )
158     nm = nm + 1
159
160 nr = 0
161 nz = 0
162 # Matriz binária
163 while nr < ngpr:
164     while nz < ngpz:
165         r = y[nr, 0]
166         z = x[0, nz]
167         i = nr
168         j = nz
169         if r <= rmaxgaleria and z >= zmingaleria and z <= zmaxgaleria:
170             Tbin[i, j] = 0
171         else:
172             Tbin[i, j] = 1
173         nz = nz + 1
174     nr = nr + 1
175     if nz >= ngpz:
176         nz = 0
177
178 # Matrizes do coeficiente de convecção, velocidade, e condutividade térmica
179 nr = 0
180 nz = 0
181 while nr < ngpr:
182     while nz < ngpz:
183         i = nr
184         j = nz
185         r = y[i, 0]
186         z = x[0, j]
187         rn = r + (DELTAr / 2)
188         rs = r - (DELTAr / 2)
189         if Tbin[i, j] == 0 and Tbin[i + 1, j] == 1:
190             if turbulento == 1:
191                 Minterface[i, j] = 1
192                 Minterface[i + 1, j] = -1
193                 # Eq. Petukhov
194                 fric = friciso * ((Tin / Tg) ** 0.1)
195                 X = 1.07 + (12.7 * ((Pr ** (2 / 3)) - 1) * ((fric / 8) ** (1 / 2)))
196                 Nuiso = ((Re * Pr) / X) * (fric / 8)
197                 Nu = Nuiso * ((Tin / Tg) ** 0.5)
198                 Ma6[i, j] = ((Nu * kar) / D1) * DELTAz
199                 Ma6[i + 1, j] = -((Nu * kar) / D1) * DELTAz
200             else:
201                 # Eq. Hausen
202                 Nu = 3.66
```

Listagem (5.1) de Algoritmo do modelo.py (cont.)

```
                Ma6[i, j] = ((Nu * kar) / D1) * DELTAz
                Ma6[i + 1, j] = -((Nu * kar) / D1) * DELTAz
        # Condições dos pontos do interior da galeria
        if Tbin[i, j] == 0:
            Mk[i, j] = kar
            if turbulento == 0:
                Mvel[i, j] = 2 * uar * (1 - ((r ** 2) / (rmaxgaleria ** 2)))
                Mvelintegrada[i, j] = Mvel[i, j]
            if turbulento == 1:
                Mvel[i, j] = (
                    ((1 / 0.41) * (np.log((rmaxgaleria - r) / krough))) + 8.5
                ) * vasterisco
                Mvelintegrada[i, j] = Mvel[i, j]
            if z != zmingaleria:
                T[i, j] = Tg
            if z == zmingaleria:
                T[i, j] = Tin
                Mexclui[i, j] = 0
                jmin = j
            if z == zmaxgaleria:
                jmax = j
            if (r + DELTAr / 2) <= rmaxgaleria:
                imax = i
        else:
            T[i, j] = Tg
            Mk[i, j] = krock
        nz = nz + 1
    nr = nr + 1
    if nz >= ngpz:
        nz = 0

nz = 0
nr = 0
# Demais matrizes dos coeficientes da equação discretizada
while nr < ngpr:
    while nz < ngpz:
        i = nr
        j = nz
        r = y[i, 0]
        z = x[0, j]
        rn = r + (DELTAr / 2)
        rs = r - (DELTAr / 2)
        Mrn[i, j] = rn
        Mrs[i, j] = rs
        if j == 0:
            kW = Mk[i, j]
            kE = Mk[i, j + 1]
        if j == ngpz - 1:
            kW = Mk[i, j - 1]
            kE = Mk[i, j]
        if (j != 0) and (j != ngpz - 1):
            kW = Mk[i, j - 1]
            kE = Mk[i, j + 1]
        if i == 0:
            kS = Mk[i, j]
            kN = Mk[i + 1, j]
        if i == ngpr - 1:
            kS = Mk[i - 1, j]
```

Listagem (5.1) de Algoritmo do modelo.py (cont.)

```
261             kN = Mk[i, j]
262         if (i != 0) and (i != ngpr - 1):
263             kS = Mk[i - 1, j]
264             kN = Mk[i + 1, j]
265         kP = Mk[i, j]
266         ke = (2 * kP * kE) / (kP + kE)
267         kw = (2 * kP * kW) / (kP + kW)
268         kn = (2 * kP * kN) / (kP + kN)
269         ks = (2 * kP * kS) / (kP + kS)
270         if Tbin[i, j] == 0:
271             alfae = ke / (densar * Cpar)
272             alfaw = kw / (densar * Cpar)
273             alfas = ks / (densar * Cpar)
274             alfan = kn / (densar * Cpar)
275         if Tbin[i, j] == 1:
276             alfae = ke / (densrock * Cprock)
277             alfaw = kw / (densrock * Cprock)
278             alfas = ks / (densrock * Cprock)
279             alfan = kn / (densrock * Cprock)
280         Ma1[i, j] = (1 / DELTAz) * (alfae / DELTAz)
281         Ma2[i, j] = -(1 / DELTAz) * (alfaw / DELTAz)
282         Ma3[i, j] = (1 / DELTAr) * (alfan) * ((2 * rn) / ((rn ** 2) - (rs ** 2)))
283         Ma4[i, j] = -(1 / DELTAr) * (alfas) * ((2 * rs) / ((rn ** 2) - (rs ** 2)))
284         Ma5[i, j] = -(1 / DELTAz) * Mvelintegrada[i, j]
285         nz = nz + 1
286     nr = nr + 1
287     if nz >= ngpz:
288         nz = 0
289 # Ganho de temperatura com a inclinação da galeria
290 i = 0
291 j = 0
292 while i < ngpr:
293     while j < ngpz:
294         if Tbin[i, j] == 0:
295             Mincl[i, j] = (
296                 (x[0, j] - x[0, jmin])
297                 * np.sin((inclinacao * np.pi) / 180)
298                 * (1 / 427)
299                 * (Mvel[i, j])
300             ) / (DELTAz * Cpar)
301         j = j + 1
302     i = i + 1
303     if j >= ngpz:
304         j = 0
305
306
307 # Cálculo de T
308 Tinicial = T
309 iter_ = 0
310 tgaleria = (L1 / np.min(Mvel[0 : imax + 1, jmin:jmax])) * 2
311 # Passo inicial de tempo (arbitrário)
312 stepflow = 10
313 tflow = 0
314 # Cálculo iterativo (Solução do Balanço de Energia)
315 while tflow < tgaleria:
316     # Matrizes deslocadas e de interface rocha/ar
317     tn1 = T[1:ngpr, :]
318     tn2 = T[ngpr - 1, :]
```

Listagem (5.1) de Algoritmo do modelo.py (cont.)

```
319     Mtn = np.vstack((tn1, tn2))
320     ts1 = T[1, :]
321     ts2 = T[0 : ngpr - 1, :]
322     Mts = np.vstack((ts1, ts2))
323     tw1 = T[:, [1]]
324     tw2 = T[:, 0 : ngpz - 1]
325     Mtw = np.hstack((tw1, tw2))
326     te1 = T[:, 1:ngpz]
327     te2 = T[:, [ngpz - 1]]
328     Mte = np.hstack((te1, te2))
329     Tinterface = T[imax + 1, 0:ngpz] - T[imax, 0:ngpz]
330     Minterfacenum = np.vstack(
331         (
332             Minterfacenum[0:imax, :],
333             Tinterface,
334             Tinterface,
335             Minterfacenum[imax + 2 : ngpr, :],
336         )
337     )
338
339     # Espero o algoritmo se estabilizar antes de incluir fontes de calor
340     if tflow <= (testabiliza * 0.5):
341         Tespelho = stepflow * (
342             (Ma1 * (Mte - T))
343             + (Ma2 * (T - Mtw))
344             + (Ma3 * (Mtn - T))
345             + (Ma4 * (T - Mts))
346             + (Ma5 * (T - Mtw))
347             + (Ma6 * (Minterfacenum))
348             + Mincl
349         )
350     else:
351         Tespelho = stepflow * (
352             (Ma1 * (Mte - T))
353             + (Ma2 * (T - Mtw))
354             + (Ma3 * (Mtn - T))
355             + (Ma4 * (T - Mts))
356             + (Ma5 * (T - Mtw))
357             + (Ma6 * (Minterfacenum))
358             + Mincl
359             + Mm
360             + Mp
361         )
362     # Excluo a atualização da temepratura nas fronteiras isotérmicas e adiabáticas
363     T = T + (Mexclui * Tespelho)
364
365     # Teste e imposição da convergência
366     if iter_ < 10000:
367         if np.min(T) < Tin - 0.1:
368             Tespelho = np.zeros((ngpr, ngpz))
369             T = Tinicial
370             tflow = tempociclo
371             stepflow = stepflow / 1.05
372             iter_ = 0
373             recalcula = recalcula + 1
374
375     # Plota o gráfico a cada 15000 iterações
376     if iter_ != 0:
```

Listagem (5.1) de Algoritmo do modelo.py (cont.)

```
377         if np.floor(iter_ / 15000) == (iter_ / 15000):
378             fig = plt.figure(figsize=(8, 2))
379             left, bottom, width, height = 0.1, 0.1, 0.8, 0.8
380             ax = fig.add_axes([left, bottom, width, height])
381             X, Y = np.meshgrid(x, y)
382             Z = T
383             levels = np.arange(Tin, Tg + 1, 0.01)
384             levels = np.append(levels, 200)
385             cp = plt.contourf(X, Y, Z, levels, cmap="jet")
386             cbar = plt.colorbar(cp, ticks=[15, 20, 25, 30])
387             cbar.set_label("T (\N{DEGREE SIGN}C)")
388             cbar.ax.set_yticklabels(["15", "20", "25", "30"])
389             plt.clim(Tin, Tg)
390             ax.add_patch(
391                 patches.Rectangle(
392                     xy=(zmingaleria, 0),
393                     width=L1,
394                     height=(D1 / 2),
395                     linewidth=1,
396                     color="black",
397                     fill=False,
398                 )
399             )
400             ax.set_title("Temperature")
401             ax.set_xlabel("z (m)")
402             ax.set_ylabel("r (m)")
403             plt.show()
404             primeirograf = 1
405             fig.savefig(
406                 "testeum_%s.jpg" % iter_, format="jpg", dpi=1200, bbox_inches="tight"
407             )
408 
409     tflow = tflow + stepflow
410     iter_ = iter_ + 1
411 
412 # Temperatura média do ar em função da secção
413 i = 0
414 j = jmin
415 DATAAR = np.zeros((1, 2))
416 while j <= jmax:
417     if np.floor((x[0, j] - 50) / 50) == ((x[0, j] - 50) / 50):
418         DATAAR = np.vstack((DATAAR, [np.mean(T[0:imax, j]), x[0, j]]))
419     j = j + 1
```

Como se observa no código do **Algoritmo do Modelo**, as variáveis são convertidas em matrizes, e as operações matemáticas se dão entre as variáveis matriciais, simultaneamente para todos os elementos da malha de pontos. Neste caso, uma multiplicação entre duas variáveis `array` corresponde a uma multiplicação entre elementos de mesmo índice, e não a uma multiplicação matricial no sentido matemático; o resultado portanto é uma matriz do mesmo tamanho das duas outras, que contém os valores numéricos resultantes da multiplicação dos elementos das matrizes iniciais. Essa operação é conhecida em matemática computacional como *"asterisk" multiplication*, e é muito útil para acelerar programas (Langtangen, 2011).

5.8.3 Pós-processamento

Com os valores de temperatura calculados após um certo intervalo de tempo, é preciso armazenar e exibir os resultados. É possível incluir trechos de código para salvar periodicamente gráficos do tipo `countourf`, que são os que melhor ilustram o estado de temperatura no interior da galeria, a partir da matriz de temperatura T e dos vetores x e y. É possível também criar animações através do empilhamento das imagens dos gráficos

ao longo do tempo, que foi crucial para desenvolvimento do algoritmo pois permitiu identificar inconsistências do modelo.

Pode-se também traçar o gráfico do estado de temperatura ao fim dos cálculos, mostrando somente o estado final de temperatura. Para os gráficos, utiliza-se a biblioteca `matplotlib`, em especial as sub-bibliotecas `pyplot` e `patches`.

Ao fim dos cálculos, cria-se uma matriz $DATA[n, 2]$ que armazena a cada linha valores médios de temperatura dos pontos interiores à galeria ao longo de uma secção vertical e a coordenada z_i da posição correspondente. A matriz $DATA$ pode ser salva em formato `.py` ou `.txt` e exportada para outros programas para que seja feito o tratamento dos dados de saída do **modelo**.

5.8.4 Fluxograma do algoritmo

A forma como os principais blocos do algoritmo se relacionam é expresso pelo fluxograma mostrado na Figura 5.11.

5.8.5 Depuração

Uma das vantagens de programar em `Python` é que esta é uma linguagem interpretada em que o código pode ser testado e depurado rapidamente, permitindo que o usuário foque nos princípios do algoritmo ao invés do código em si (Kiusalaas, 2010).

O desenvolvimento do algoritmo do modelo se deu de forma gradual e iterativa. Foram encontradas dificuldades devido à natureza complexa do problema e foram criadas múltiplas versões do código partindo de diferentes estratégias, até que se chegasse a uma versão mais eficiente, robusta, e económica em relação ao tempo de execução do algoritmo.

As principais dificuldades encontradas estão associadas à própria compreensão do fenómeno físico e ao funcionamento conjunto de todas as partes do algoritmo. A estrutura do código e a sequência de execução das etapas foram desenvolvidos iterativamente, pois as simplificações e adaptações incorporadas causam impactos na ordem dos comandos. Houve grande dificuldade em distinguir erros matemáticos dos erros físicos e conceituais, sendo que a identificação da origem de resultados fisicamente incoerentes foi o que consumiu mais tempo nesta etapa de desenvolvimento.

Ficou evidente durante a depuração do algoritmo que é relativamente simples desenvolver um código executável e funcional, mas que pode resultar em um algoritmo incorreto e em um modelo irrealista, de modo que é vital questionar os resultados, utilizar mecanismos para identificar falhas, como animações e gráficos do processo numérico, e confrontar os resultados com dados publicados e experimentais.

Descobriu-se que o parâmetro mais restritivo para a convergência do modelo é de fato o passo de tempo, como já havia sido antecipado. Neste caso, conclui-se que a estratégia ótima para lidar com o passo de tempo é criar um algoritmo auxiliar para forçar a convergência, modificando o passo de tempo inicial se necessário e reinicializando as variáveis do problema.

5.8.6 Problemas numéricos e geométricos no cálculo das trocas de calor por convecção

Uma das principais mais-valias do modelo proposto, e que lhe confere um caráter inovador, é a tentativa de modelar as trocas de calor em um escoamento turbulento de ar em uma mina subterrânea através de um método predominantemente analítico e por meio de um modelo transiente de troca de calor.

A inclusão da parcela da troca de calor por convecção no balanço de energia segue a abordagem analítica utilizada para os demais mecanismos de troca de calor, e se baseia na Lei de Resfriamento de Newton, como já referido. Há, entretanto, uma limitação importante de utilizar esta fórmula: ela é válida para a **temperatura média do fluido**, em que a troca de calor ocorre entre o fluido como um todo e a interface sólida como um todo. Como o domínio geométrico foi discretizado em volumes de controle, a interpretação da formulação de Newton está condicionada a sua adaptação ao domínio do problema.

Ao invés de utilizar todos os pontos interiores à galeria, pode-se trabalhar com secções ou colunas de fluido, de comprimento δz, compostas por todas as células "empilhadas" naquela secção vertical. Isto resolve parcialmente o problema, ainda sem extrapolar os limites da solução analítica, para a direção z.

É em relação à direção radial, entretanto, que está a maior limitação da adaptação numérico-analítica do modelo: se os volumes de controle estão divididos em células empilhadas, e a condição de contorno é de que apenas o volume de controle de fluido situado na interface rocha-ar troca calor por convecção, como lidar

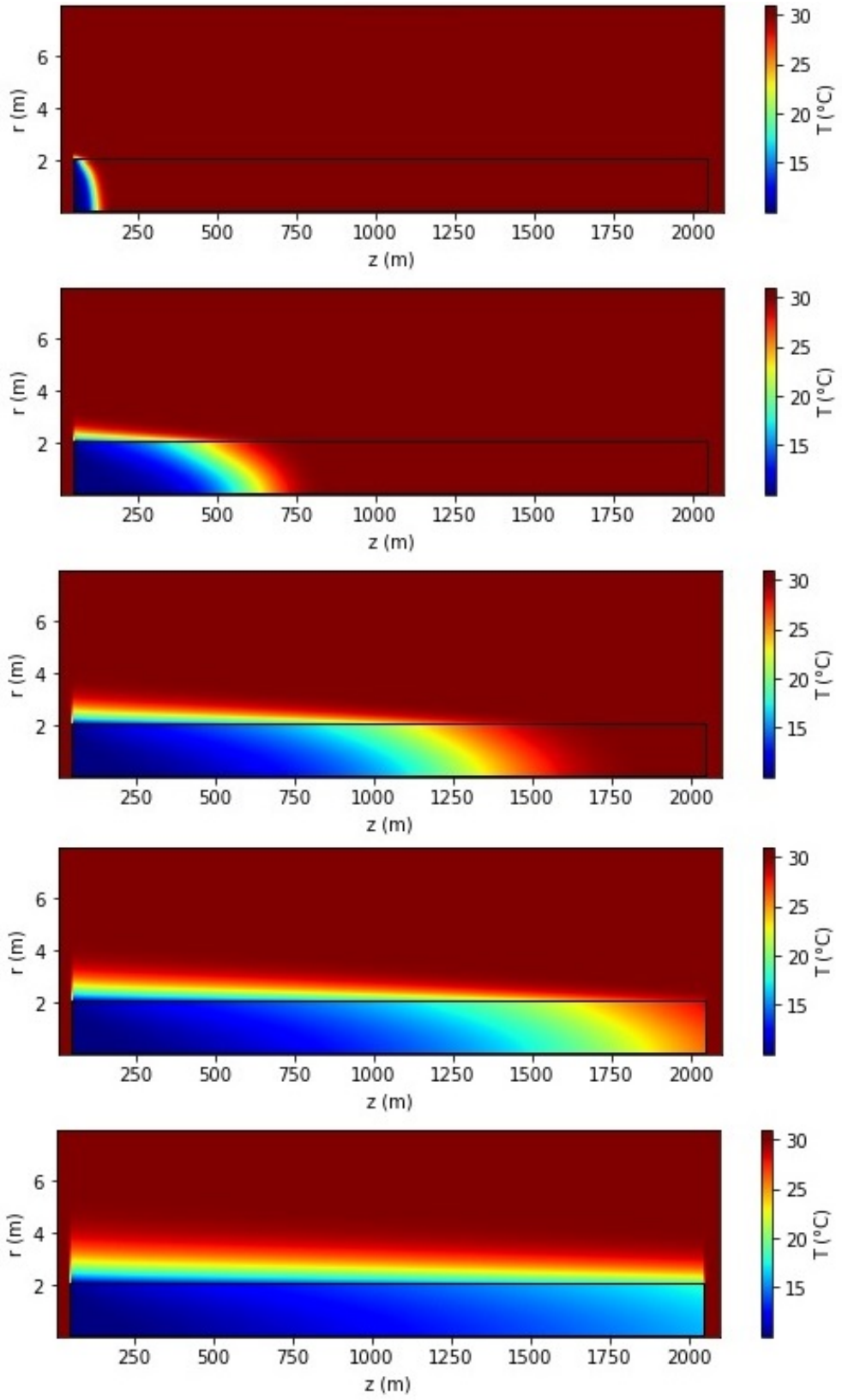


Figura 5.10: Exemplo de gráficos da evolução do estado de temperatura demonstrando o processo numérico.

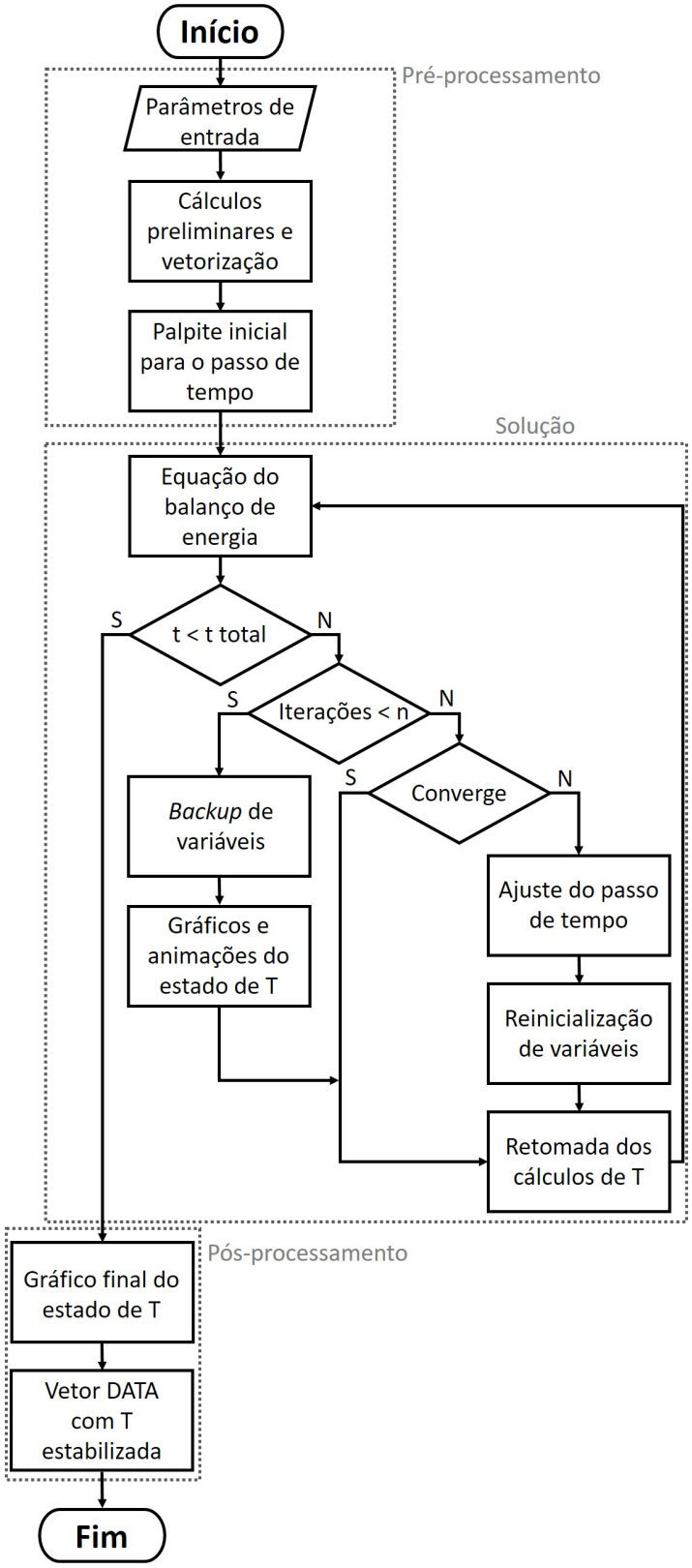


Figura 5.11: Fluxograma do algoritmo.

com a necessidade de utilizar a temperatura média da coluna de fluido? Como lidar com o acréscimo ou decréscimo de calor no volume de controle fluido da interface, sendo que esta variação de energia deveria ser contabilizada para toda a secção vertical?

A solução para este problema está na mistura do fluido. Como o principal objeto de estudo é o ar de ventilação, a abordagem numérica apoia-se na natureza turbulenta do escoamento para lidar com o problema da convecção. A distribuição de velocidades e a modelação do escoamento turbulento é feita por um método simplificado, partindo de uma abordagem em que se estima um comportamento médio para o escoamento turbulento, traduzido por um perfil de velocidades em função da distância do ponto para as parede do ducto, isto é, um comportamento macroscópico na direção preferencial de escoamento.

A formulação da convecção e a modelação da turbulência incorporadas ao modelo lidam com a convecção sob o ponto de vista da troca de calor, mas não com a convecção sob o ponto de vista da mistura das partículas de ar, pois utilizam o comportamento médio da polpa de fluido. A conservação de movimento é considerada para a direção de escoamento, mas não se inclui um modelo mais detalhado da mistura de ar e do surgimento de turbilhões e redemoinhos no fluido, fruto da ocorrência de flutuações aleatórias e em todas as direções da velocidade de escoamento, condicionada, entre outros fatores, pela energia cinética (quanto mais velocidade, mais energia e mais desordem), e pelo tamanho e duração no tempo dos turbilhões, que podem ser estimados por modelos como os do tipo $k - \epsilon$.

Há duas razões para não se ter integrado um modelo deste tipo ao modelo das trocas de calor: a alta complexidade envolvida, que implicaria construir um modelo somente para o movimento do fluido, ainda mais intrincado do que o modelo que foi desenvolvido para a troca de calor; e o fato de que o objeto de estudo ser a troca de calor em si, em que se aceitou uma modelação mais modesta do movimento turbulento do ar, admitindo que seu comportamento médio seja suficiente para incorporar as trocas de calor em função do movimento do fluido.

Se a mistura do fluido devido ao movimento turbulento existe no escoamento de ar em uma galeria, mas não foi analiticamente incorporada ao modelo, ainda há a possibilidade de incorpora-la numericamente e empiricamente. Afinal, a grande vantagem da abordagem computacional é se valer de cálculos que seriam muito dispendiosos (e inviáveis) se feitos manualmente, mas também é agregar componentes numéricas ao equacionamento estritamente matemático e analítico.

O domínio do problema, no mundo real, não é uma malha de retângulos de ar e de rocha, não há fronteiras adiabáticas e isotérmicas, e não existe "passo de tempo", mas se não se aceitarem estas interpretações, as equações diferenciais tornam-se insolúveis e não se pode determinar uma distribuição aproximada de temperaturas em uma galeria. A questão se resume a criar simplificações aceitáveis que tornam as equações diferenciais solucionáveis.

Para isto, é preciso criar os modelos e testa-los de forma crítica para identificar suas limitações. Um modelo que não aproxima bem a realidade, mas é "bem intencionado" (fisicamente coerente, matematicamente correto, numericamente robusto), é em última análise, um modelo válido, que na pior das hipóteses define um procedimento sistemático de solução a não ser seguido em investigações futuras. Há valor científico no erro e até no absurdo, desde que se compreenda os porquês das limitações encontradas.

Esta discussão se dá a propósito de esclarecer que o modelo tem certos componentes, procedimentos e interpretações já testados em outros modelos e que já tiveram sua eficiência demonstrada, enquanto outras abordagens são **experimentações novas**. A eficiência destas escolhas será analisada confrontando os resultados do modelo com valores reais.

Uma das novas abordagens do modelo é a utilização da rugosidade das paredes da galeria, e a incorporação da turbulência e da convecção para estimar a evolução termodinâmica do ar de ventilação (ou de outros fluidos) em uma galeria subterrânea, sobre uma base que até então não havia sido testada para a convecção e para a turbulência, base que pode ser entendida como a conceção da galeria como um cilindro gigante rochoso de parede muito espessa, em que a distribuição de temperatura é uniforme na direção angular, o escoamento se dá na direção longitudinal z, e o domínio geométrico se discretiza pelo Método dos Volumes Finitos, empregando-se o balanço de energia que inclui os mecanismos de troca de calor e a conservação de movimento. A base é descrita por Patankar (1980); uma solução numérica possível para a base é descrita por Madiseh et al. (2012), mas utilizando apenas velocidades muito baixas em escoamentos laminares com números de Reynolds baixos.

Outras características importantes, como a incompressibilidade tanto do fluido quanto do escoamento, não são novidade na construção deste tipo de modelo. A novidade do modelo, do ponto de vista analítico, é a inclusão da modelação do comportamento médio da turbulência e da inclusão da convecção como mecanismo predominante de troca de calor, dado que o foco são os escoamentos turbulentos de ar, "violentos" e principais causadores das variações de temperatura. A novidade do modelo, do ponto de vista numérico, é que a troca

de calor por convecção e a mistura do ar são estimadas numericamente, da seguinte maneira:

1. é utilizada a temperatura, a cada iteração, do volume de controle de ar situado na interface, e não a média da temperatura dos volumes de controle de uma coluna de secção vertical situada sobre uma determinada coordenada z;
2. o acréscimo/decréscimo de temperatura, por outro lado, é aplicado de forma distribuída e uniforme por todas as células de controle da coluna;
3. o coeficiente de convecção pode ser recalculado a cada iteração (para lidar com o fato da temperatura do ducto não ser constante e isotérmica), ou pode ser considerado constante, a depender da adequação do modelo a situações reais;
4. a altura do volume de controle torna-se um parâmetro importante para aproximar a distribuição de temperatura ao longo da secção vertical. O calor trocado por convecção é acrescido à todos os pontos da coluna de ar, o que equivale a dizer que o ar que estava em contacto com a rocha se misturou com o ar que estava entre a parede da galeria e o centro da galeria;
5. antes de introduzir os valores reais, o modelo será submetido a uma etapa de condicionamento em que será simulado por certo intervalo de tempo o escoamento de ar a uma velocidade arbitrária: a razão disto é lidar com o fato de que a ventilação não foi iniciada no instante em que a temperatura foi medida, e de que é a responsável pela criação de um gradiente de temperatura na rocha por longos períodos antes de que a recolha de dados fosse feita. Não há, portanto, uma única temperatura inicial para todo o maciço, mas sim um gradiente de temperatura criado numericamente através de simulações preliminares a partir de um estado uniforme inicial de temperatura e de uma velocidade de escoamento do ar arbitrários;

Desta forma, a mistura de ar, ou seja, seu movimento convectivo e turbulento, é controlado numericamente pela altura do volume de controle, e impondo que toda a coluna de ar assimile as trocas de calor por convecção. O argumento para considerar uma mistura quase homogénea dos pontos de ar vem da própria experimentação prática: o gradiente vertical de temperatura foi medido na situação real em que será aplicado o modelo, e é muito baixo, não ultrapassando os 0.2 °C entre o ponto mais próximo do teto da galeria (mas ainda situado sobre o domínio do ar) e o centro da galeria. Com a abordagem numérica proposta, obtém-se gradientes de temperatura da mesma ordem.

Assim, inclui-se numericamente a mistura de ar devido à flutuação aleatória da velocidade na turbulência sem quantificar diretamente estas grandezas, e valendo-se de observações e dados experimentais.

Sem este procedimento para induzir a mistura do ar da coluna de comprimento δz, surgem problemas de natureza numérica: como a convecção se dá a uma taxa superior à condução, o calor trocado na interface nunca é sentido pelas células inferiores (imediatamente abaixo), e faz com que a célula de ar na interface rocha-ar atinja rapidamente um equilíbrio das trocas de calor com a rocha, acumulando todo o calor trocado por convecção e atuando como uma espécie de reservatório adiabático. Isto impede que o calor seja distribuído para os pontos de ar mais ao centro da galeria, que ficam com uma temperatura praticamente igual à temperatura de entrada por todo percurso, e o gradiente vertical de temperatura que se observa é elevado, da ordem de mais de 1.0 °C. Este não é um comportamento realista do fenómeno, o que mais uma vez induz a uma adaptação numérica do modelo.

O passo de tempo garante que, após um intervalo de tempo Δt, todos os pontos de ar foram homogeneizados e sentiram a influência do calor trocado por convecção na interface. Resultados preliminares da aplicação do modelo demonstram que esta abordagem resolve de fato a limitação numérica encontrada devido à simplificação do modelo de turbulência utilizado. O modelo é estável em relação ao passo de tempo, mas pode ter resultados que variam na ordem das décimas de graus Celsius em função da altura da célula de controle, de modo que este parâmetro é arbitrariamente definido para o melhor ajuste do modelo aos dados experimentais.

5.8.7 Simulações preliminares e comparações com outros modelos

A execução de simulações para cenários hipotéticos diversos é parte importante do processo iterativo de desenvolvimento do algoritmo do modelo, pois permite:

1. verificar a robustez do algoritmo frente a parâmetros extremos, como velocidades mais altas de escoamento e maiores diferenças de temperatura entre rocha e fluido;

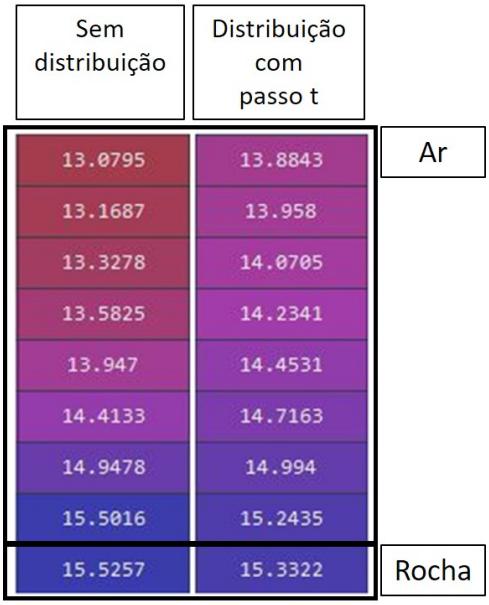


Figura 5.12: Gradientes de temperatura do ar sem considerar a mistura de ar, e considerando a distribuição do calor trocado por convecção.

2. compreender a sensibilidade do algoritmo em função de variações dos parâmetros de entrada, como caudal de ar, propriedades físicas da rocha, rugosidade, área de secção da galeria, entre outros, como mostram os gráficos das Figuras 5.13 a 5.16; em todos a temperatura de entrada do ar foi de 15.0 °C e a temperatura inicial da rocha foi de 20.0 °C;

3. avaliar a performance do algoritmo, tanto em tempo de execução quanto em termos de resultados obtidos, quando submetido a malhas de pontos mais ou menos densas e com os mesmos parâmetros de entrada, como mostra a Figura 5.27;

4. identificar o surgimento de resultados impossíveis ou pouco-realistas do ponto de vista físico, como nas simulações A - D das Figuras 5.17 a 5.20;

5. utilizar dados disponíveis na literatura para pré-validar o modelo e compará-lo com outros modelos publicados, como na Figura 5.25;

6. estudar formas de otimizar o algoritmo.

Simulação 1 - Evolução de temperatura em uma galeria vazia ventilada

Assumindo uma galeria vazia, em $t = 0$ rocha e ar estão em equilíbrio térmico a 20.0 °C quando ar exterior passa a ser introduzido a uma velocidade média de $u_m = 1.0\,\mathrm{m\,s^{-1}}$ a 15.0 °C. As propriedades físicas adotadas para a rocha são $\rho_r = 2500\,\mathrm{kg\,m^{-3}}$, $c_r = 600\,\mathrm{J\,kg^{-1}\,°C^{-1}}$ e $k_r = 3.0\,\mathrm{W\,°C^{-1}}$, com rugosidade média de k_m =0.2 m.

A Figura 5.21 mostra a evolução de temperatura a partir do instante inicial até que se verifique uma situação de equilíbrio em que ar e rocha se mantêm a uma temperatura aproximadamente constante. A temperatura média de saída estimada para o ar é de 16.1 degreeCelsius, com um aumento de temperatura de 1.1 degreeCelsius em relação a temperatura de entrada do ar, após percorrer uma extensão de galeria de 2000 m.

Esta simulação demonstra uma possível aplicação do modelo para o estudo de viabilidade de projetos de otimização da ventilação através do ajuste ótimo do caudal ou de técnicas de VOD, de pré-condicionamento do ar através da recirculação, além da possibilidade de recuperação de calor do ar de saída.

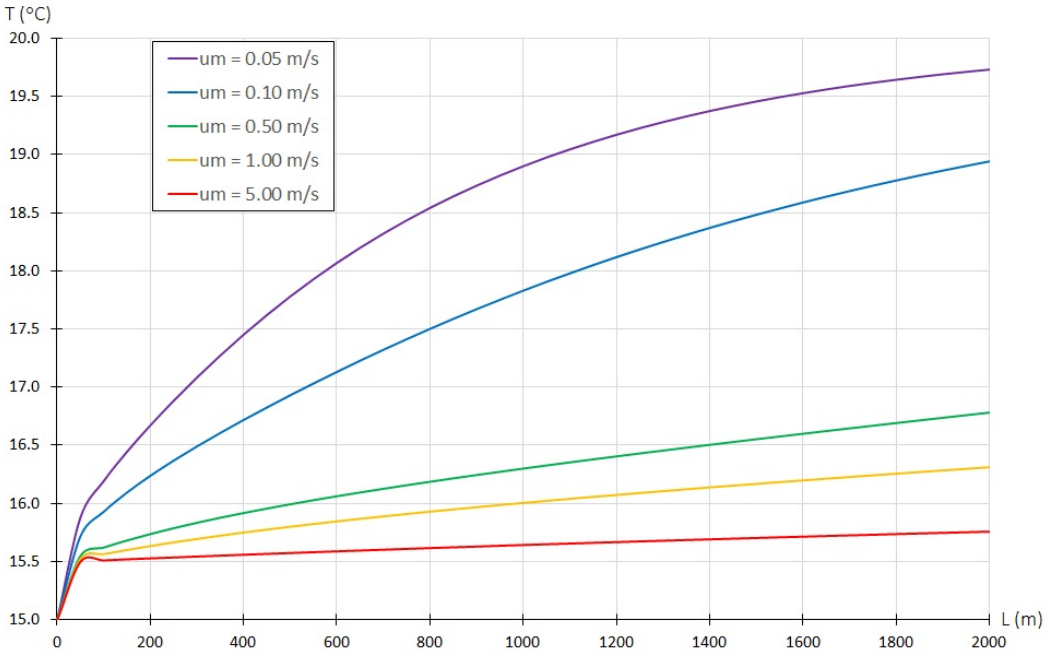


Figura 5.13: Impacto da variação da velocidade média de escoamento na distribuição de temperatura da galeria.

- O único parâmetro alterado entre as 5 simulações foi a velocidade média de escoamento do ar;
- Os valores utilizados para a velocidade média baseiam-se em valores aproximados para ventilação natural e para ventilação forçada em minas subterrâneas;
- Os resultados encontrados são coerentes com o esperado, pois quanto mais o velocidade de escoamento, maior as taxas de troca de calor por convecção, mas também é maior o volume de ar, *diluindo* o acréscimo de temperatura na mistura de ar;
- Nestas simulações evidencia-se o balanço entre conservação de movimento (quanto maior velocidade menos acréscimo de temperatura) e troca de calor por convecção (quando maior a velocidade, maior o Número de Nusselt);

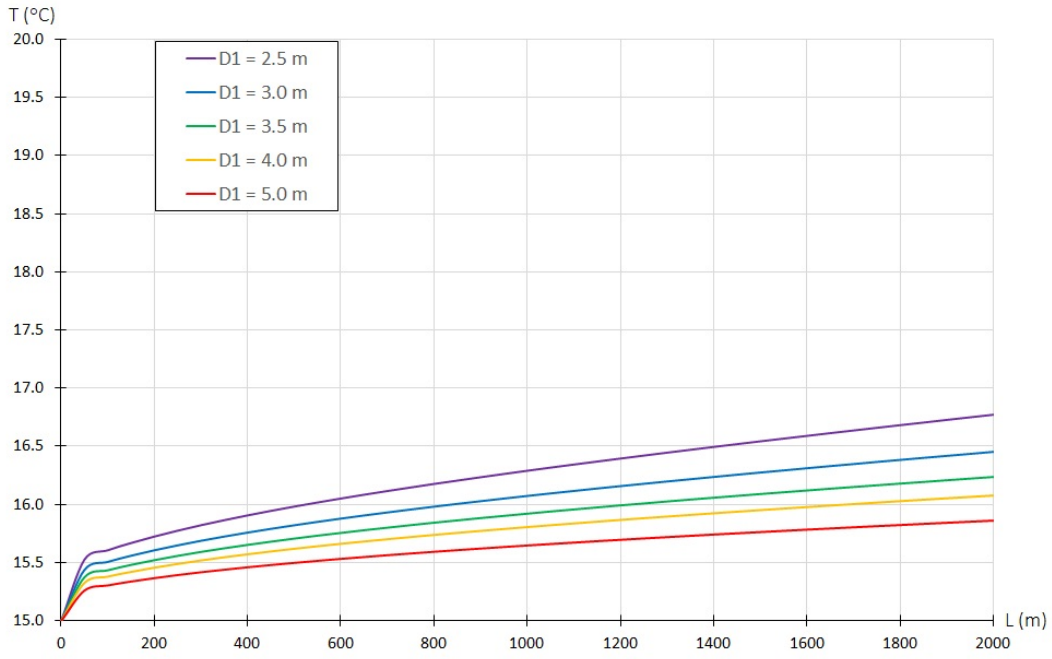


Figura 5.14: Impacto da variação do diâmetro da galeria na distribuição de temperatura da galeria.

- O único parâmetro alterado entre as 5 simulações foi o diâmetro D_1 da galeria;
- Os resultados encontrados são coerentes com o esperado, pois, para uma mesma velocidade média, maior o volume de ar quanto maior o diâmetro da galeria, em que se evidencia novamente a *diluição* do ganho de temperatura para quantidades maiores de ar;
- O diâmetro também condiciona o Número de Reynolds e de Nusselt: quanto maior o diâmetro, maior será a turbulência do escoamento, aumentando assim as trocas de calor por convecção;

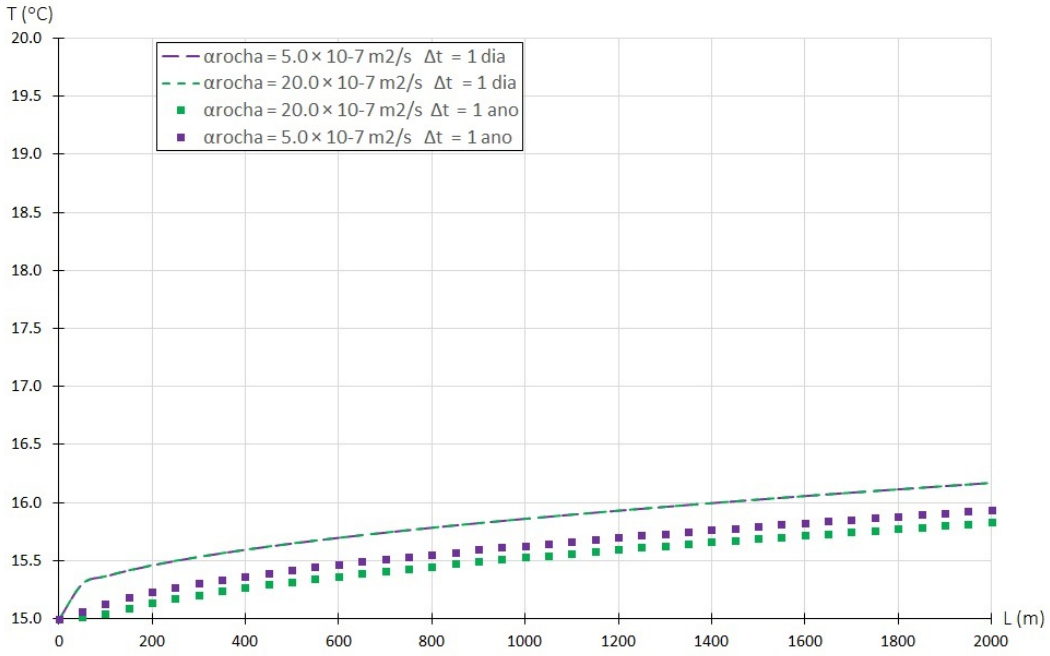


Figura 5.15: Impacto da variação da difusibilidade térmica da rocha na distribuição de temperatura da galeria.

- Utilizou-se dois valores distintos para a difusividade térmica α, e também executou-se as simulações para diferentes intervalos de tempo;
- utilizou-se intervalo de valores típico para rochas, estando $\alpha = 5 \times 10^{-7}\, m^2/s$ próxima a valores encontrados para o calcário e $\alpha = 20 \times 10^{-7}\, m^2/s$ próxima de valores comuns para o granito (conforme Holman (2001));
- O que os resultados demonstram é que o efeito de uma maior capacidade do sólido em transmitir calor, e também sua maior tendência a arrefecer-se ou aquecer-se frente a uma mesma temperatura de fluido, se amplifica com o passar do tempo;
- Para intervalos curtos, os resultados são muito próximos, mas ao longo do tempo a capacidade de reter e ceder calor do maciço rochoso se torna relevante, já que reflete-se no esgotamento do conteúdo energético do maciço rochoso, condicionado por suas propriedades termofísicas;
- O material com maior capacidade de difusão de calor esgota seu conteúdo energético mais rapidamente, o que se implica que a rocha se arrefece mais rapidamente sob influência do ar, e cede cada vez menos calor ao fluido, que consequentemente reduz suas taxas de acréscimo de temperatura ao longo do tempo;
- Conclui-se que determinar este parâmetro de forma cuidadosa, através de ensaios, é vital para a qualidade do modelo sob o ponto de vista **transiente**, mas pouco importante para aplicações instantâneas ou em intervalos de tempo curtos;

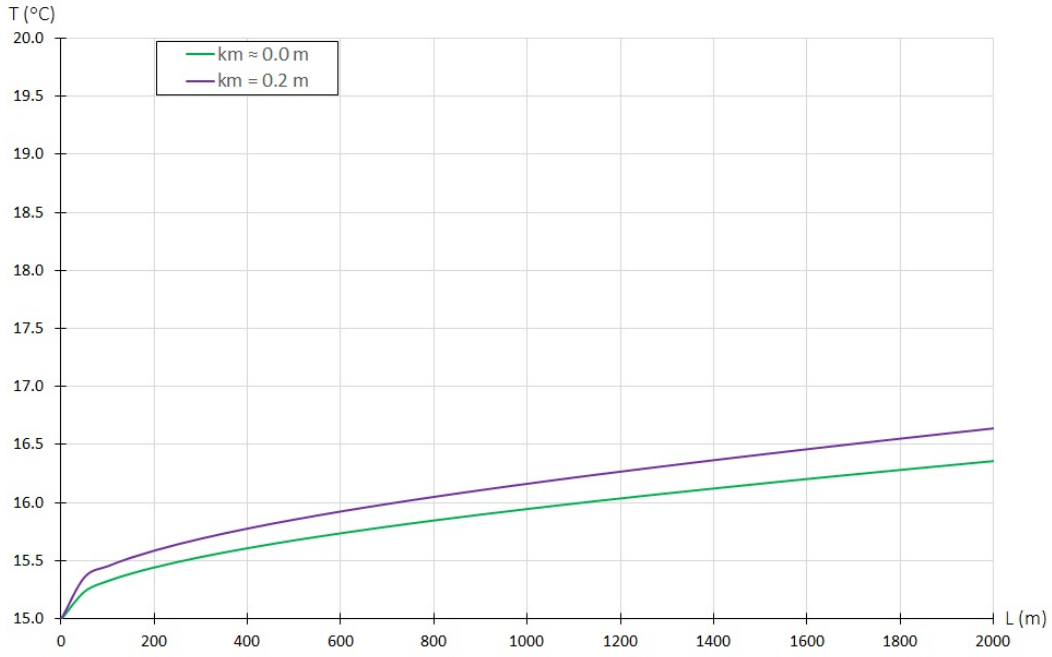


Figura 5.16: Impacto da variação rugosidade das paredes da galeria na distribuição de temperatura da galeria.

- O único parâmetro alterado entre as 5 simulações foi a rugosidade média k_m das paredes da galeria;
- utilizou-se intervalo de valores entre ductos liso ($k_m \approx 0$) e valores típicos para galerias de mineração ($k_m = 0.2m$), segundo Montecinos e K. Wallace (2010));
- Verifica-se que a rugosidade induz trocas de calor mais acentuadas e um maior ganho de temperatura em relação ao ducto liso, principalmente por dois motivos: a rugosidade aumenta a área da interface através das quais se dão as trocas de calor por convecção; e a rugosidade aumenta a fricção entre fluido e sólido, o que provoca um aumento do Número de Nusselt;

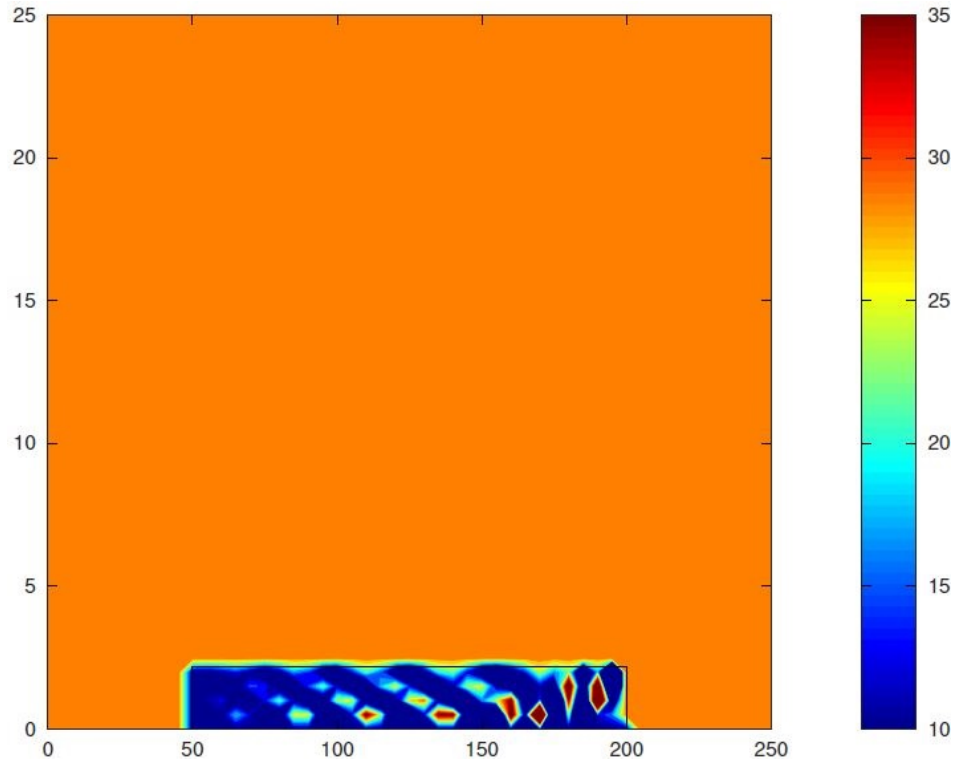


Figura 5.17: Simulação A - $r\,vs\,z$ (em metros) e temperatura (em Celsius) para uma galeria, com processo numérico divergindo.

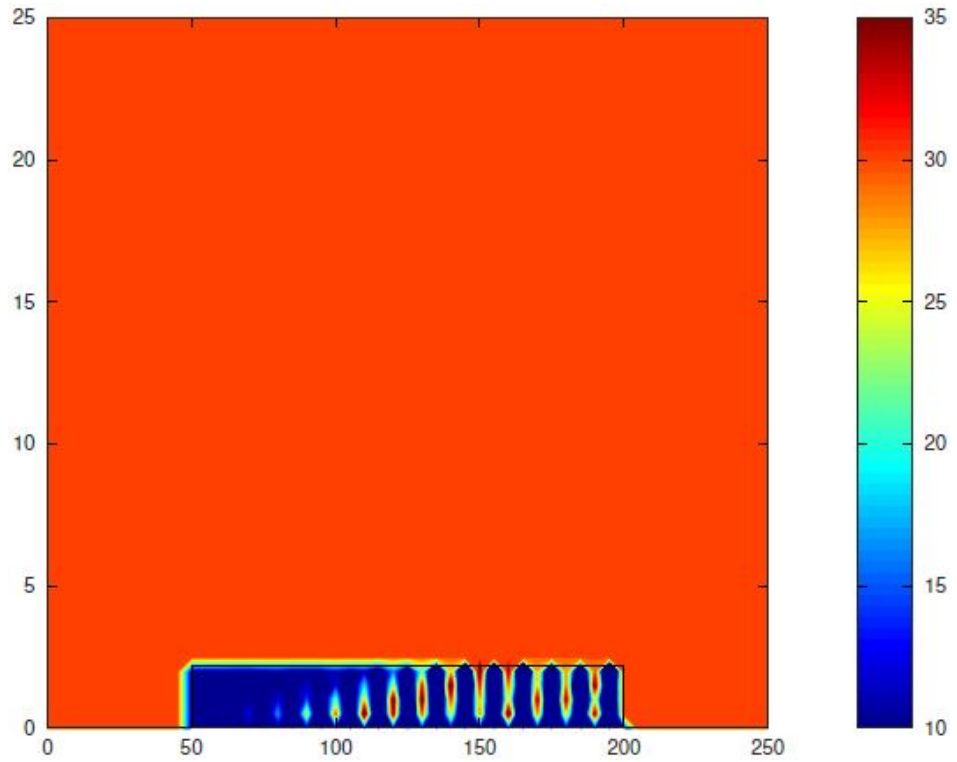


Figura 5.18: Simulação B - $r\,vs\,z$ (em metros) e temperatura (em Celsius) para uma galeria, com processo numérico divergindo.

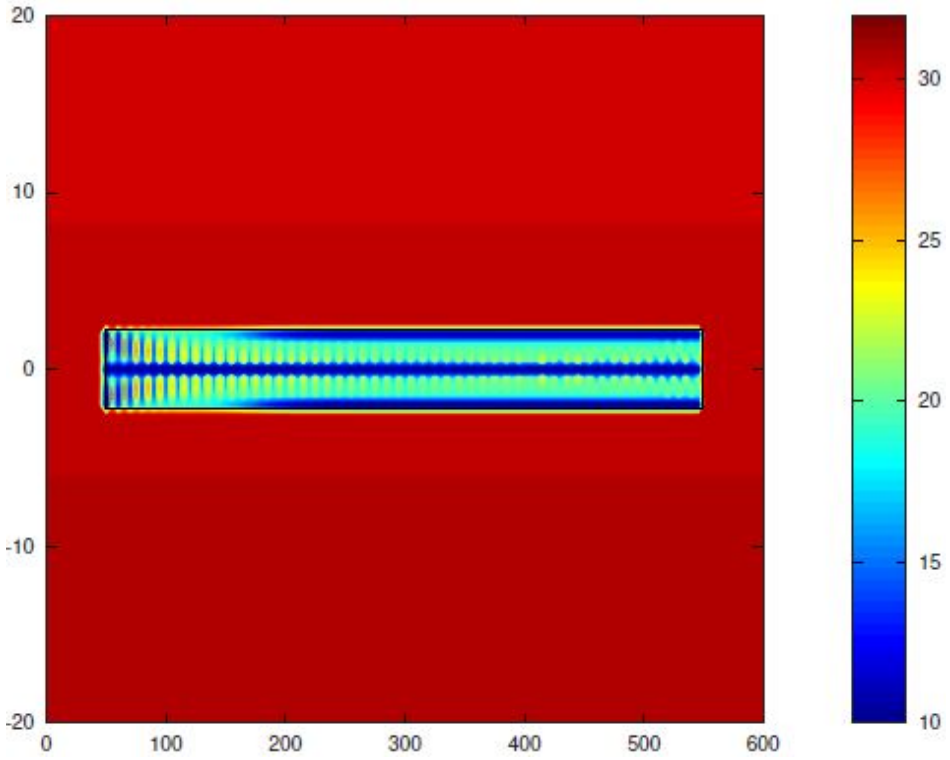


Figura 5.19: Simulação C - $r\,vs\,z$ (em metros) e temperatura (em Celsius) para uma galeria, com processo numérico divergindo.

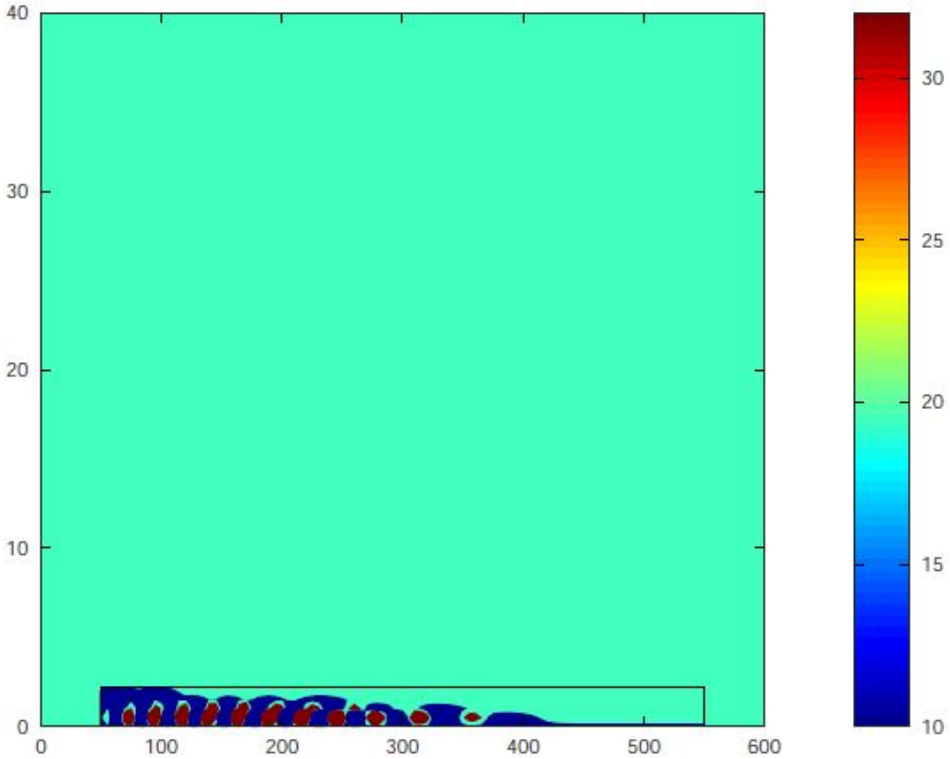


Figura 5.20: Simulação D - $r\,vs\,z$ (em metros) e temperatura (em Celsius) para uma galeria, com processo numérico divergindo.

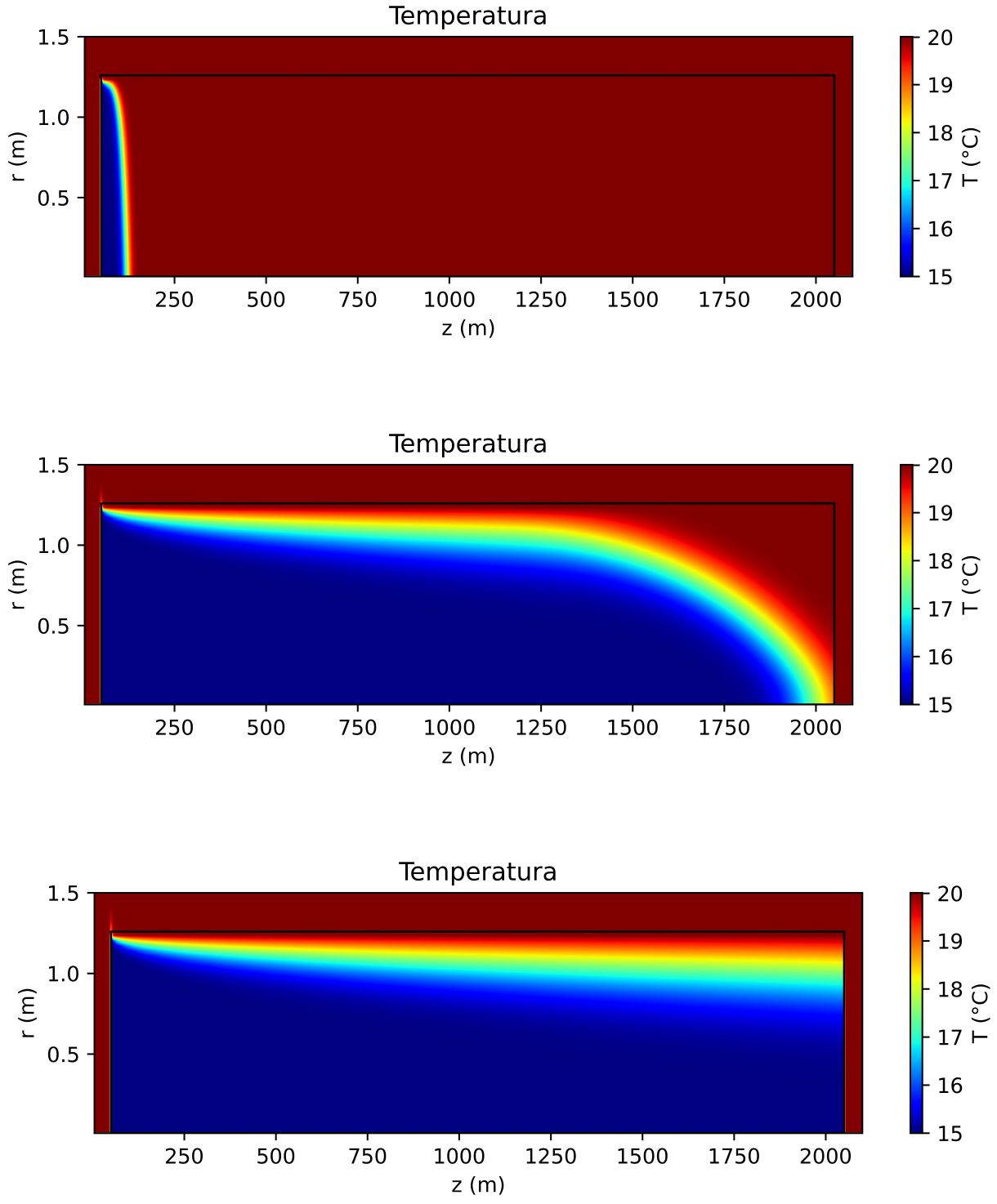


Figura 5.21: Simulação 1: Evolução de temperatura em uma galeria ventilada a partir do equilíbrio.

Simulação 2 - Estado de temperatura em uma galeria ventilada e com fontes de calor

Para esta simulação, as condições de escoamento e as propriedades físicas da rocha e do ar são as mesmas da **Simulação 1**, mas agora considera-se a presença de máquinas e de pessoas no interior da galeria. Duas pessoas estão em $z = 200m$, uma em $z = 500m$ e três em $z = 700m$; em $z = 100m$ estão duas perfuratrizes YT28 rock com potência de $0.8kW$ e uma carregadeira P-30 de potência $18.8kW$ está posicionada em $z = 500m$. Para todos os equipamentos mecânicos se supõe $\phi_1 = 0.7$, $\phi_2 = 1$ e $\phi_3 = 0.4$.

A Figura 5.22 mostra o estado de temperatura estabilizado para esta situação. Como as fontes de calor se encontram distantes do ponto de saída do ar de exaustão, o calor gerado é dissipado e se mistura com o ar de ventilação ao longo da extensão da galeria, verificando-se um pico de temperatura nas proximidades de onde se encontram as fontes de calor e uma estabilização da temperatura nas proximidades da saída devido a mistura com o ar mais frio.

Entre $z = 500m$ e $z = 750m$, a temperatura atinge valores superiores a 30.0 °C, o que indica a necessidade de aumentar o caudal de ar para dissipar com mais rapidez o calor gerado pelas máquinas e promover condições de conforto térmico mais adequadas para os trabalhadores. A temperatura média do ar na saída da galeria é de aproximadamente 16.3 °C, o que indica um aumento de 1.3 °C na temperatura do ar durante seu percurso através da galeria, em contraste com um aumento de 1.1 degreeCelsius nas condições da **Simulação 1**. O modelo prevê um aumento na temperatura média de saída em 0.2 °C devido somente às fontes de calor no interior da galeria.

A Figura 5.23 mostra o mesmo cenário mas com metade do caudal de ar, com velocidade média $u_m = 0.5m/s$. A temperatura de saída estimada é de 16.8 °C, o que demonstra a sensibilidade do controle da velocidade de ventilação para dissipação de calor em galerias com equipamentos mecânicos.

Poderia se imaginar diversos cenários para uma série de equipamentos mecânicos utilizados em subterrâneo em que a temperatura resultante da dissipação de calor poderia ser prejudicial ao bem estar dos trabalhadores. Estudar e compreender os fluxos de calor em uma galeria significa, além de compreender a fenomenologia, antever situações nocivas à saúde dos trabalhadores e evitar sua exposição a condições insalubres. Este caso demonstra, portanto, uma importante potencial aplicação prática do modelo: a de previsão de situações de risco através de metodologias não-invasivas, isto é, sem a necessidade de medição direta da temperatura. O modelo proposto é, além de uma ferramenta de estudo dos fluxos de calor e do planeamento da recuperação de calor, uma ferramenta de prevenção e avaliação de risco no que diz respeito à temperatura em subterrâneo.

Simulação 3 - Sistema Geotérmico em uma mina de carvão

Nesta simulação, buscou-se incorporar ao modelo condições próximas às encontradas no sistema geotérmico da mina de carvão de Springhill Nova Scotia no Canadá, em que água é injetada a uma taxa de $4\,\mathrm{L\,s^{-1}}$ em uma galeria com área de secção de aproximadamente $10.0\,\mathrm{m^2}$. Assumiram-se para a rocha propriedades físicas compatíveis com o carvão, em que $\rho_r = 2500kg/m^3$, $C_p = 1100J/kg°C$, $k = 2.27W/°C$, com temperatura do maciço a 21.0 °C e extensão de galeria de 5000 m, de acordo com publicações e estudos de caso sobre este sistema geotérmico ((Madiseh et al., 2012), (Rodríguez e Díaz, 2009), (Jessop et al., 1995), (Kynoch, 2010), (Banks et al., 2004), (Colombo et al., 2021) e outros). Neste caso a rugosidade foi desprezada e $Nu = 1$, compatível com fluxo de água laminar com Número de Reynolds da ordem de 10^2. A Figura 5.24 mostra o perfil de temperatura estabilizada para a situação descrita, e a Figura 5.25 mostra um gráfico da temperatura em função da distância percorrida pela água para o modelo proposto e para outros dois modelos publicados sobre este mesmo sistema geotérmico.

A principal divergência em relação aos resultados encontrados nos outros modelos se deve provavelmente ao carácter transiente do **modelo** e aos esquemas de discretização utilizados. Neste caso, o efeito da convecção é atenuado por $Nu = 1$, já que supõe um escoamento muito lento. A maior divergência em relação ao modelo de Madiseh et al. (2012) está na discretização e algoritmia.

As diferenças em relação aos resultados de Rodríguez e Díaz (2009) podem ter origem na abordagem estática e semi-empírica utilizada em seu modelo: trata-se a temperatura da rocha como constante, o que causaria uma sobrestimação da temperatura da água, pois uma vez que não há a contabilização das trocas de calor na outra direção (da rocha), não se inclui o efeito temporal de arrefecimento do maciço rochoso. Isto explica porque a curva de temperatura de Rodríguez e Díaz (2009) está acima da curva dos outros dois modelos. Está análise demonstra a importância do tratamento transiente da evolução de temperatura.

A **Simulação 3** demonstra também uma possível aplicação do modelo na previsão da performance, do tempo de vida, e do esgotamento de sistemas geotérmicos, pois estima a temperatura de saída da água (seu conteúdo de calor) e a diminuição da temperatura média do maciço rochoso com o passar dos anos (em

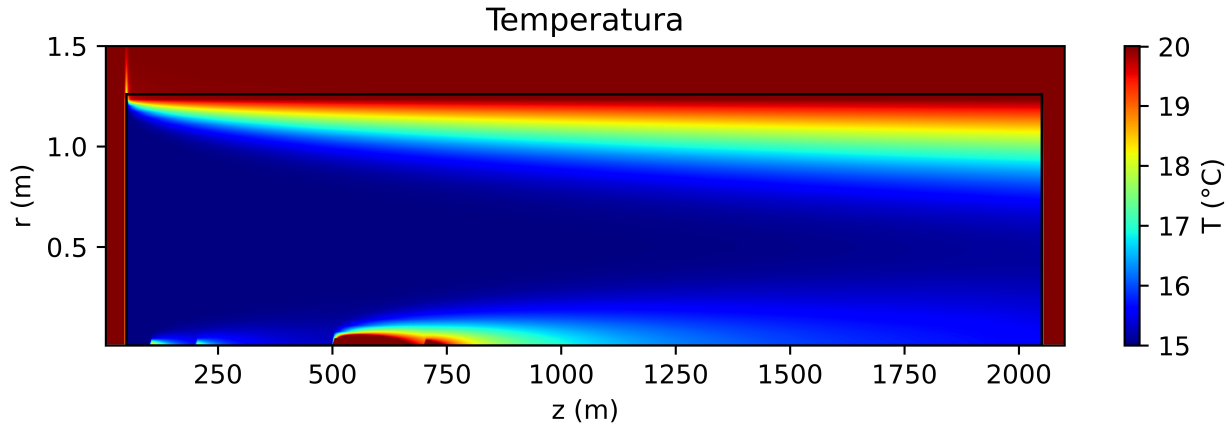


Figura 5.22: Simulação 2.1: Estado de temperatura estabilizado para uma galeria com pessoas e equipamentos mecânicos.

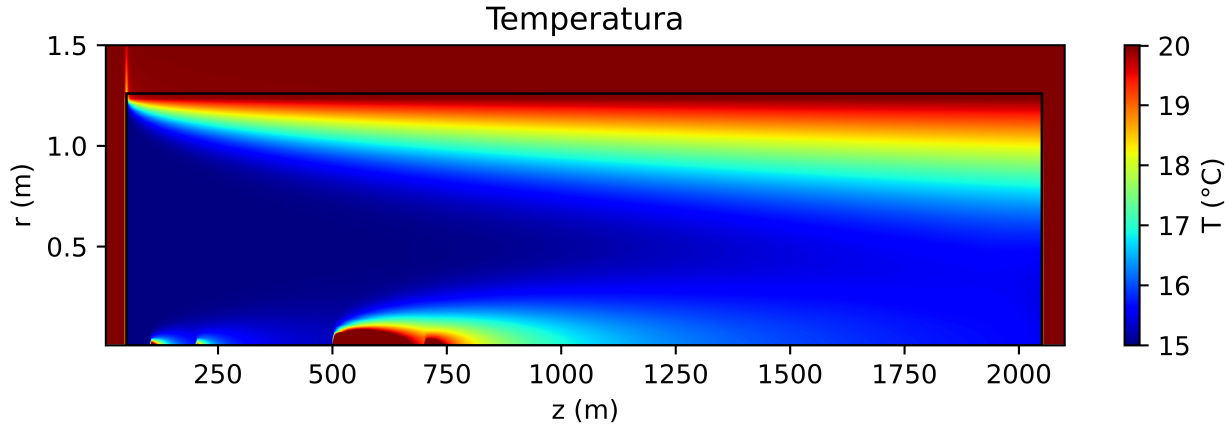


Figura 5.23: Simulação 2.2: Estado de temperatura estabilizado para uma galeria com pessoas e equipamentos mecânicos, a um caudal reduzido.

função da taxa de extração de água), assim como o modelo proposto por Madiseh et al. (2012). Pode ser aplicado em estudos de viabilidade e fomentar o desenvolvimento de projetos desta natureza.

Tempo de execução e passo de tempo

Em função do esquema de discretização escolhido para o tempo, há uma limitação para o passo de tempo máximo que garante a convergência do algoritmo. O passo máximo é condicionado em maior parte por duas variáveis, Δz e u. Foram feitos diversos testes e simulações variando estes dois parâmetros para compreender o seu impacto na estabilidade do algoritmo. Os resultados são mostrados no gráfico da Figura 5.26, em que o passo máximo é limitado por uma superfície gerada através dos pontos resultantes das simulações.

Nota-se que, quanto maior a dimensão do volume de controle em z, maior é a estabilidade do algoritmo e maior é o passo de tempo que se pode utilizar, comportamento inverso ao da velocidade: quanto maior a turbulência do escoamento, menor o passo de tempo máximo. Com isto, entende-se que é desejável trabalhar com malhas mais espaçadas na direção z sempre que possível.

O parâmetro Δz afeta outros comportamentos do modelo numérico, e não pode ser maximizado de forma irrestrita. Seu valor, definido arbitrariamente, depende, dentre outros fatores, do tamanho do domínio geométrico do problema que se deseja modelar. Não convém, por exemplo, utilizar volumes de controle muito grandes para domínios muito pequenos, pois um número baixo de pontos poderia enviesar os cálculos.

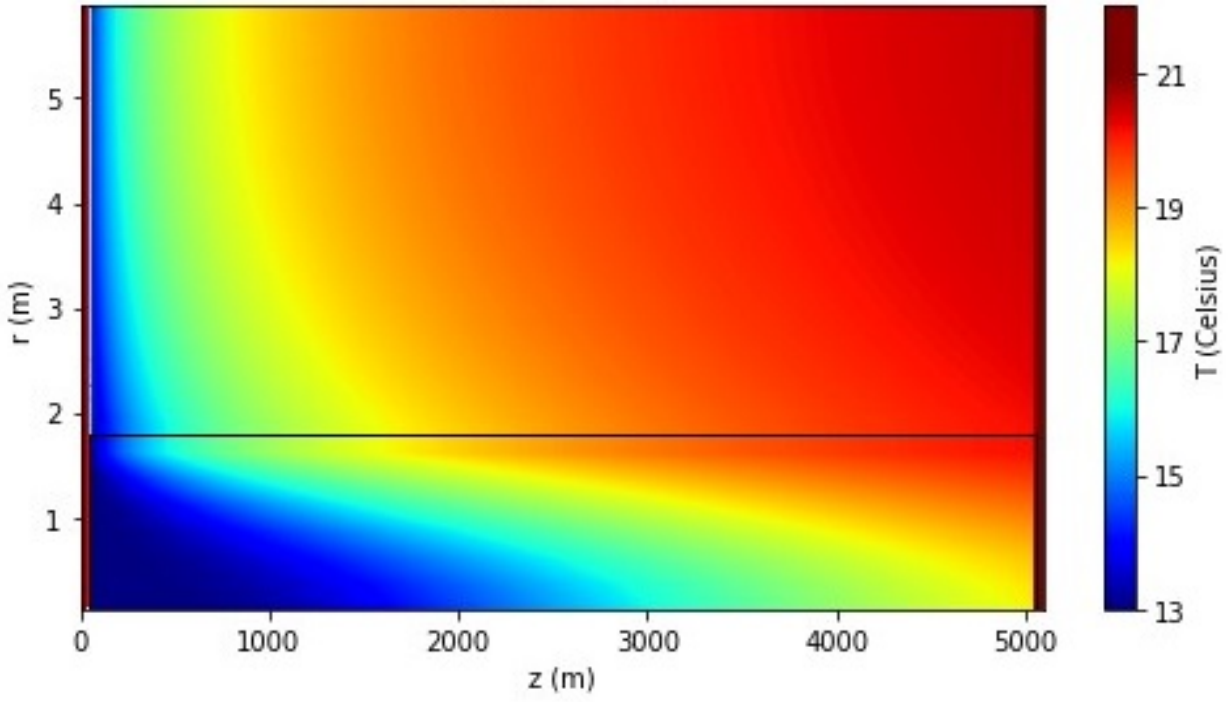


Figura 5.24: Perfil de temperatura para o sistema geotérmico de Springhill - Nova Scotia.

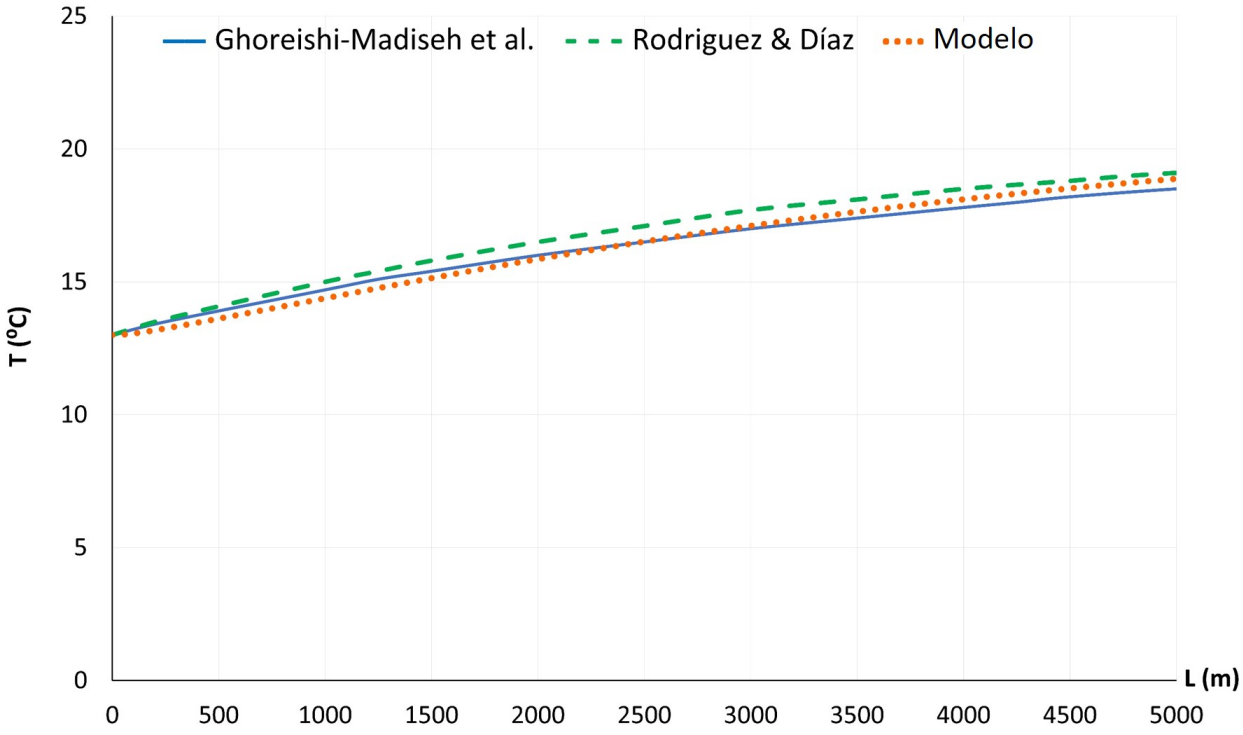


Figura 5.25: Temperatura média da água em função da distância percorrida.

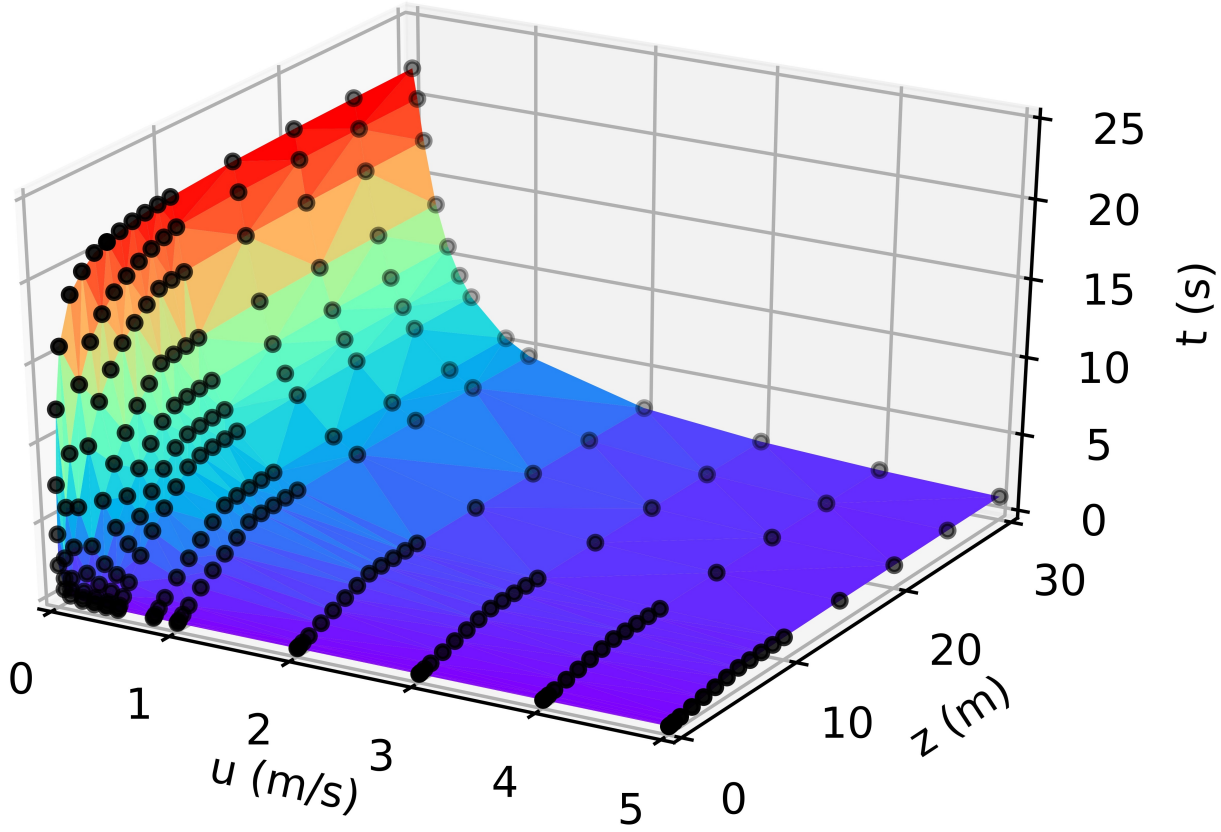


Figura 5.26: Plano que delimita o passo máximo de convergência em função de u e z.

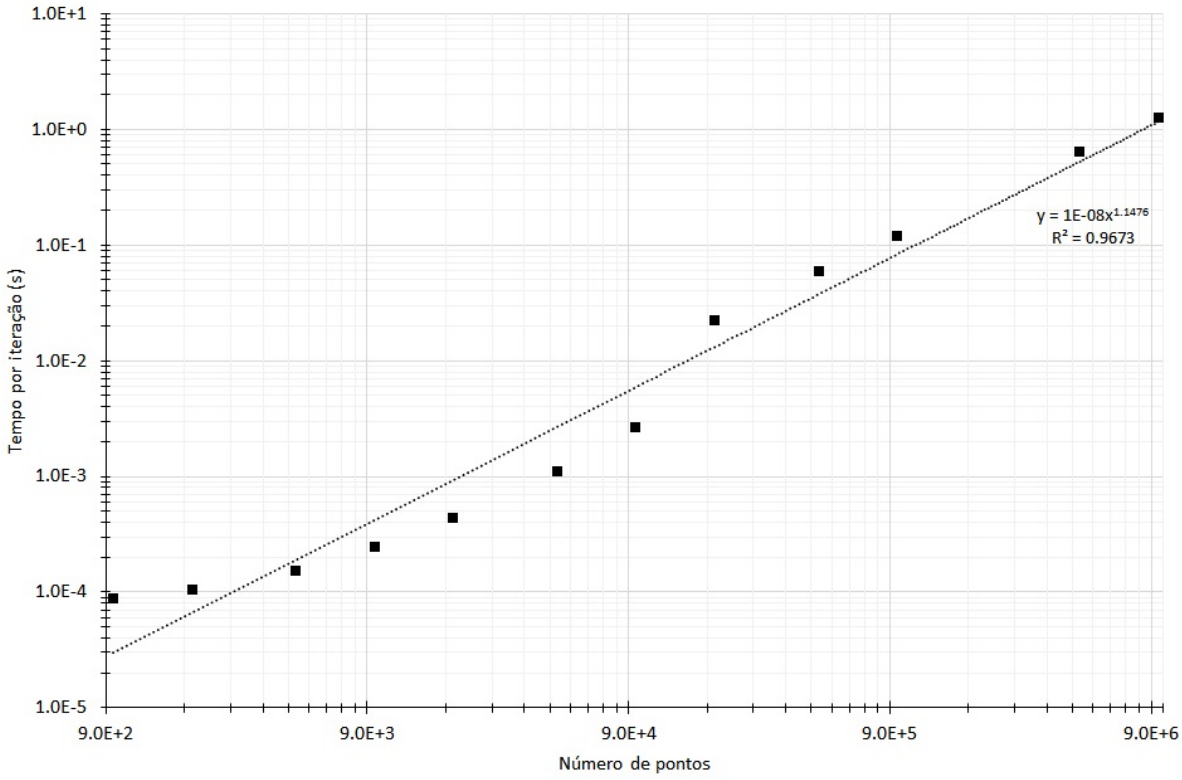


Figura 5.27: Tempo de execução por iteração em função do tamanho dos `arrays`.

A velocidade, por outro lado, é um dado de entrada inerente ao escoamento do fluido, e não se pode modifica-la para otimizar a convergência: vale, sempre, o que é medido no interior da galeria modelada.

A heurística do modelo envolve a multiplicação (tratada por *asterisk multiplication*) de variáveis `array`, o que permite uma redução considerável do tempo de processamento do algoritmo, mas que têm em seu número de elementos uma importante limitação. Operações entre entes matriciais tornam-se dispendiosas quanto maiores suas dimensões. O gráfico da Figura 5.27 mostra o aumento do tempo despendido para cada iteração, na execução do algoritmo, em função do número de pontos da malha.

É necessário observar que mesmo as malhas mais densas, com maior número de pontos e menor passo de tempo, não são grande obstáculo aos computadores domésticos convencionais, e o modelo é robusto o suficiente para simular anos de estado de temperatura dentro de poucos minutos. Ainda assim, vale mencionar que não é boa prática utilizar malhas com muito mais do que 10000 pontos. Passos de tempo superiores a 1 segundo são suficientes para executar simulações completas dentro de alguns segundos.

5.9 Sobre a necessidade de validação do modelo teórico através de dados experimentais

Os resultados preliminares demonstram o potencial de aplicação do modelo, sua robustez e coerência com valores esperados para a variação de temperatura, e até resultados equivalentes aos de outros modelos para um sistema geotérmico real. No entanto, o modelo contempla diversas possibilidades e cenários que precisam ser confrontados com situações reais, sobre os quais há pouca ou nenhuma informação confiável, completa ou suficiente em publicações científicas. Um objetivo importante do projeto de investigação é compreender se o modelo pode ser uma boa ferramenta de aproximação da realidade mesmo com todas as limitações de uma modelação teórica dos complexos fenómenos de transferência de calor em uma mina subterrânea.

Este assunto é bastante subestimado na mineração, não porque não seja estudado de todo, mas por que **não é estudado o suficiente**. A modelação dos fenómenos termodinâmicos em minas subterrâneas pode fomentar o desenvolvimento de projetos de recuperação de calor e ter impactos concretos na indústria.

O tema da eficiência térmica e energética, de grande relevância na atualidade, precisa, antes de qualquer coisa, ser pensado. Novas perspetivas sobre velhos problemas levam, eventualmente, a quebras de paradigma. Este trabalho se soma ao de outros investigadores da área para tentar compreender como nós, mineiros, podemos fazer **melhor uso das condições-ambiente em subterrâneo**.

Uma mina subterrânea não é, evidentemente, comparável a uma rede de encanamentos. É preciso refletir se o conhecimento consolidado, desenvolvido para lidar com questões das indústrias química e mecânica, é adequado aos problemas da mineração, dada a diferença de escala, geometria, e complexidade. O que se entendeu, no curso deste projeto de investigação, é que este questionamento é frequentemente colocado em prática, através de modelações, mas que pouquíssimas vezes é respondido com validação, examinando o modelo com critérios objetivos, **mostrando de forma clara os dados utilizados**, e **demonstrando e compreendendo suas limitações**.

Entende-se que este é um dos valores deste trabalho: o de obter dados abundantes e a eles submeter o modelo. Neste sentido, a validação é parte vital do trabalho, tão importante quanto a própria construção do modelo. Visa responder às perguntas: o modelo aproxima bem a realidade (como se mede isso)? Quando ele falha (é possível melhora-lo, neste caso)?

O modelo desenvolvido neste trabalho não tem a pretensão de ser uma versão final da solução do problema. Na realidade, torna-se, através da validação, um ponto de partida para trabalhos futuros de investigação. A validação deve ser construída de modo que seja possível melhorar o modelo.

Mais especificamente, nesta etapa deseja-se submete-lo a condições de entrada diversas para verificar se os seus resultados são comparáveis aos dados reais, e assim compreender:

1. Se o modelo funciona melhor ou pior para determinado tipo de situação;
2. O quanto o modelo erra e qual a natureza destes erros;
3. Quais são os parâmetros críticos que causam distorções;
4. Se é possível corrigir os erros através da modelação de parâmetros empíricos e de ajuste;
5. Qual é a melhor aproximação teórica para o coeficiente de convecção, qual é a melhor aproximação empírica do coeficiente de convecção, e qual é a melhor abordagem numérica para a turbulência e convecção;

6. Se as simplificações feitas são uma fonte considerável de erros de estimação;
7. Se é possível utilizar dados reais para construir um novo modelo semi-empírico mais robusto;
8. Quais são os caminhos futuros de investigação;
9. Quais os erros de percurso a não repetir!

Além disto, a utilização de dados experimentais é importante para a própria construção do modelo, pois permite identificar resultados pouco realistas, sob um ponto de vista qualitativo, o que pode por sua vez orientar modificações do algoritmo. Pode-se dividir a validação em dois momentos: um primeiro momento, que seria observar os dados e tentar verificar a coerência do modelo simulando uma ou outra condições similares às obtidas experimentalmente, para se ter uma ideia geral de comportamento; e um segundo momento, em que se prepara o algoritmo para receber os dados experimentais, com base na forma como foram adquiridos e armazenados, e também para devolver os valores de saída em formato que possa ser tratado a posteriori.

A etapa inicial é o que permite identificar falhas no modelo, como o problema numérico da convecção, e o segundo é o que permite aferir a eficiência do modelo, calcular erros, e interpretar os resultados numéricos frente aos dados reais. Para fazer a validação propriamente dita, é necessário garantir que o modelo é de fato funcional e coerente com a realidade, ainda que possa ser impreciso ou ineficaz.

Um modelo que não é submetido à validação é pouco fiável, pois não há parâmetro de comparação ou referencial real, e torna-se difícil elaborar conclusões sobre o seu funcionamento. Quando não existem dados experimentais, qualquer resultado do modelo é aceitável, o que tem pouco valor do ponto de vista científico.

É nos dados, inclusive, que está também uma das mais importantes contribuições deste projeto de investigação: mesmo em publicações científicas, é muito raro encontrar dados de temperatura utilizáveis, por serem usualmente escassos e incompletos. Embora o trabalho se desenvolva em torno do modelo, sua motivação é também compreender a evolução de temperatura no interior de galerias subterrâneas. A recolha de dados realizada para este projeto de investigação permitiu a criação de bancos de dados extensos de temperatura em minas subterrâneas, com informações sobre o caudal de ar, e com precisão raramente encontrada em trabalhos de investigação deste tema, com erros de medição de temperatura inferiores a 0.05 °C.

Com as campanhas de recolha de dados de temperatura, criam-se bancos de dados, que se encontram integralmente nos anexos deste texto, e em versão digital, aberta à toda a comunidade científica.

Esta recolha de dados está longe de ser acessória a este trabalho; é parte fundamental e necessária para a interpretação do modelo, é uma ferramenta de estudo da evolução de temperatura em galerias subterrâneas, é o resultado da criação de um sistema inédito de recolha de dados (automática e não-invasiva) e de monitorização ambiental em subterrâneo, e sobretudo, permite a partilha de conhecimento científico e de dados de difícil obtenção.

Além disto, os dados de temperatura recolhidos, por terem elevada precisão, permitiram estudar outros comportamentos da mina subterrânea, em que funcionaram *como vestígios de ADN*, que não se imaginava que poderiam ser traduzidos diretamente por fenómenos termodinâmicos. Muitos destes comportamentos haviam sido negligenciados em outros estudos justamente por não contarem com sensores de temperatura de alta sensibilidade, já que muitas vezes são detetáveis somente por meio de variações muito subtis. Por acidente, o projeto de investigação encontrou na temperatura uma ferramenta analítica do comportamento físico, geográfico, e até mesmo humano e operacional de uma galeria ou mina subterrâneas, algo que será apresentado em secções futuras do texto. Esta análise é também inédita neste tipo de investigação.

Antes de abordar a validação em si, é discutida no capítulo seguinte a metodologia de aquisição de dados, os desenvolvimentos tecnológicos (ainda que *low-tech*) obtidos como consequência das campanhas de amostragem e motivados pelo estudo da temperatura em subterrâneo, e os caminhos que levaram a estes resultados, por meio de uma revisão do estado-da-arte dos sistemas de monitorização ambiental em minas subterrâneas, de carácter experimental ou profissional. Para a recolha dos dados, buscou-se emular o que há de mais atual e promissor na monitorização ambiental, para além da mera aquisição de temperatura; tentou-se realizar não uma recolha de dados, mas a melhor recolha de dados que se poderia fazer.

6 Amostragem de temperatura em uma galeria subterrânea

Com a conclusão da etapa de modelação matemática dos fenómenos de transferência de calor em minas subterrâneas, iniciou-se o planeamento da recolha de dados de temperatura no interior de galerias subterrâneas, para assim criar um banco de dados que possibilitasse aferir a exatidão do modelo teórico. Além da recolha de temperatura, foi necessário também definir outros parâmetros de interesse e que compõem o modelo a serem medidos experimentalmente, de modo a caracterizar as variáveis de entrada necessárias aos cálculos.

Entendeu-se que seria conveniente criar um banco de dados que agregasse a maior quantidade de informações possível, e cujos dados tivessem variabilidade. Com um volume maior de dados, além de possibilitar uma validação mais completa do modelo teórico, no sentido de testa-lo frente a diferentes cenários e condições ambiente, também seria possível calcular parâmetros como o coeficiente de convecção a partir dos dados experimentais utilizando técnicas de regressão.

Outro princípio que pautou o desenvolvimento da parte experimental do projeto de investigação foi a aplicação de técnicas e metodologias condizentes com as práticas mais modernas da monitorização em tempo real de ambientes subterrâneos na mineração. Como ponto de partida, foi feita uma revisão bibliográfica para reunir as informações necessárias à criação de um sistema de amostragem e monitorização em tempo real da temperatura em subterrâneo.

6.1 Revisão do Estado-da-arte da monitorização ambiental na mineração subterrânea

O avanço das tecnologias de telemetria, o embaratecimento dos componentes eletrónicos, e o surgimento de plataformas de desenvolvimento *open-source*, como o **`Arduino`** , vêm impulsionando um crescimento expressivo de projetos de investigação, publicações científicas, e implementações WSN (*Wireless Sensor Networks*) em diversas áreas. As tecnologias de redes de sensores mudaram a visão dos cientistas que estudam as ciências da terra e do ambiente, pois permitiram recolher dados remotamente e avaliar enormes quantidades de dados, possibilitando novas abordagens, metodologias, e aplicação de soluções novas e avançadas para problemas científicos (Novas et al., 2017).

Este tipo de aplicação, sem fio e com aquisição de dados em tempo real, reúne características favoráveis ao seu emprego na mineração, especialmente em subterrâneo. A medição das condições ambientais no interior de galerias, se feita diretamente por um trabalhador mineiro, é invasiva e apresenta riscos. Mais, medições através de instrumentos analógicos dificultam uma recolha contínua de parâmetros que podem indicar condições de perigo e induzir a tomadas de decisão que evitem riscos. A mineração subterrânea envolve o trabalho em um ambiente hostil onde questões como a qualidade do ar, temperatura, humidade, gases nocivos, entre outros, são motivos de grande preocupação (Swain et al., 2018).

Neste sentido, inúmeras iniciativas para a monitorização não-invasiva e em tempo real das condições-ambiente de minas subterrâneas subterrânea têm sido desenvolvidas ao longo dos últimos anos. Investigações sobre o uso de sensores de fibra ótica na deteção da concentração de gases em minas subterrâneas são feitas desde a década de 1980 (Dubaniewicz et al., 1991). Com o advento da tecnologia sem fio, sistemas de recolha de dados a fio estão se tornando obsoletos e sendo substituídos por sistemas análogos e de alta velocidade utilizando comunicação sem fio (Swain et al., 2018).

Grande parte dos projetos envolvendo redes de sensores sem fio e monitorização em tempo real na mineração tem como foco a deteção de incêndios. Edwards et al. (2000) realizou investigações em laboratório para analisar o desempenho de diferentes tipos de sensores para a prevenção de incêndios através da amostragem e deteção de POC (produtos da combustão), identificando dispositivos capazes de alertar de forma mais rápida a ocorrência de incêndios em minas subterrâneas de carvão. Tan et al. (2007) desenvolveu um sistema de segurança para minas subterrâneas, baseado na monitorização em tempo real da concentração de gases e com emissão de alertas de incêndio. Bhattacharjee et al. (2012) propôs um sistema de alerta e prevenção de

incêndios em minas subterrâneas de carvão com método de lavra por camaras e pilares, que além de identificar as regiões suscetíveis a incêndio, realiza o despejo automático de água sobre estas. Chehri e Saadane (2019) desenvolveram um sistema com seis nós de sensores e comunicação **Zigbee** para monitorizar temperatura em tempo real e à distância, possibilitando a emissão de alertas de incêndio contendo informações sobre a localização do foco e direção de propagação.

Alguns investigadores dedicaram-se a estudos comparativos entre tecnologias wireless visando aplicações deste tipo, e os resultados indicam que a comunicação **Zigbee** tem características promissoras em termos de consumo de energia e tempo de implementação, o que é crucial para as redes de sensores (Chehri e Saadane, 2019). As redes de sensores sem fio demandam soluções inovadoras para a definição da rota da informação, segurança da rede, localização, planeamento, localização, coleta dos dados, deteção de falhas, e integridade dos dados obtidos (Alsheikh et al., 2014).

Outros estudos foram publicados visando o aperfeiçoamento destes sistemas, permitindo o desenvolvimento de aplicações mais seguras e confiáveis das WSNs. Swain et al. (2018) criou um sistema de rede de sensores sem fio baseados em **Zigbee** para adquirir dados em tempo real a partir de sensores estrategicamente posicionados em uma mina subterrânea, e realizou um estudo de viabilidade a partir de testes in loco envolvendo a modelação de RSSI (*Received Signal Strenght Indicator*), ou a força do sinal da comunicação, como parâmetro chave para estimar a posição ótima dos nós. M. A. Moridi, Kawamura et al. (2014) realizaram um estudo de atenuação de sinal para uma WSN na mina subterrânea de zinco de Angas, na Austrália, destacando fatores que podem contribuir para uma redução da intensidade de sinal e destacando procedimentos para determinar distâncias adequadas entre nós da malha de sensores. M. A. Moridi, Sharifzadeh et al. (2018) propuseram uma metodologia de construção de uma rede de sensores com comunicação **Zigbee** mais eficiente e confiável, com base em um estudo feito em uma mina subterrânea na Austrália. Pan e X. Liu (2011) investigaram a aplicação de sistemas mistos de WI-FI e **Zigbee** para a transmissão de dados em galerias subterrâneas de carvão.

Outros projetos incluem a construção de sistemas de segurança, para além da monitorização em tempo real, que podem automatizar o processo de tomada de decisões frente a situações anómalas mitigando potenciais danos à operação e prevenindo acidentes. Jo e Khan (2017) desenvolveram um sistema IoTfootnoteInternet of Things, *open-source*, e baseado em emphbarebonesfootnotesistemas eletrónicos digitais minimalistas para monitorizar minas subterrâneas em tempo real, que reporta eventos atípicos, emite avisos rápidos e verifica a posição dos trabalhadores. Henriques e Malekian (2016) desenvolveram um protótipo de sistema de segurança para uma mina utilizando WSNs. O sistema proposto por Mohammad e A. Moridi (2015) alia monitorização em tempo real de temperatura, humidade e concentração de gases em galerias subterrâneas, a um sistema de informação geográfica (GIS) para automatizar a gestão de operações, como a ventilação, e para implementar sistemas de emergência que enviam mensagens e texto para os operários da mina. Li e Y. Liu (2009) criaram um sistema baseado em WSN chamado de *Structure-Aware Self-Adaptive* para a deteção de variações estruturais causadas por colapsos em minas subterrâneas. Jo e Khan (2018) desenvolveram um sistema para a monitorização em tempo real da qualidade do ar, baseado em WSNs, que classifica as condições de acordo com o índice MEI (*Mine Environment Index*), identifica os gases poluentes cose faz previsões utilizando um algoritmo de Inteligência Artificial a partir de Redes Neuronais. Henriques, Malekian e Bogatinoska (2017) criaram o design de um sistema de segurança em minas utilizando WSNs com a medição de parâmetros como temperatura, fluxo de ar, humidade, ruído, poeira, e concentração de gases, com transmissão **Zigbee** entre os nós da malha de sensores.

Há também projetos para monitorização em tempo real de ambientes subterrâneos fora da mineração, como um sistema de deteção da qualidade do ar em tempo real em redes de transporte metropolitano para controle de ventilação (Loy-Benitez et al., 2019), e um sistema de controle ambiental em uma rede de cavernas no norte da Espanha, que previne a perturbação do microclima dentro das cavernas pela presença de turistas, o que poderia danificar ou destruir as formações geológicas presentes (Novas et al., 2017).

Com a popularização das tecnologias sem fio não-invasivas e em tempo real para a monitorização de ambientes, é importante que a mineração subterrânea acompanhe estes desenvolvimentos e amplie o fluxo de informações de subterrâneo para superfície. É por isto que este projeto de investigação tem como princípio adotar, também para a parte experimental, metodologias modernas e condizentes com as melhores práticas existentes.

6.2 Planeamento experimental - quais os parâmetros a medir e como medi-los

A definição dos parâmetros a serem levantados na parte experimental baseou-se no modelo teórico, considerando as variáveis presentes nos cálculos. Além da temperatura, é necessário também levantar informações da geometria dos ambientes, caracterizar as propriedades termofísicas da rocha, e, principalmente, caracterizar o caudal de ar.

Outros parâmetros, como pressão e humidade, poderiam ser medidos através de estações meteorológicas, mas as condições encontradas nas campanhas de amostragem realizadas não justificam este levantamento. Como os troços de galeria em que seriam feitos os testes têm pouca extensão e baixa profundidade, não convém medir a pressão, e a humidade tem efeito desprezível para a faixa de temperatura medida.

Para a medição da velocidade do ar, foram utilizados anemómetros digitais modelo x e marca x, com precisão x. Em uma das campanhas de amostragem, verificou-se um escoamento de ar inferior ao valor mínimo detetável, utilizando uma estação meteorológica Vaisala WTX520.

O principal parâmetro a ser caraterizado é a temperatura em função da posição e do tempo. Como o próprio modelo lida com variações pequenas de temperatura (da ordem das décimas de grau Celsius) em alguns cenários, há necessidade de medir temperatura com a maior precisão possível. É indispensável também associar as medições de temperatura a marcas temporais, já que o modelo é transiente.

6.3 Tecnologias de monitorização subterrânea

A mineração subterrânea envolve operações de risco devido a condições do ambiente de trabalho, incluindo baixa luminosidade, espaços estreitos, queda de rochas, má ventilação, humidade, dificuldade de comunicação e complexidade estrutural do maciço rochoso (M. A. Moridi, Kawamura et al., 2014). É sabido que embora as falhas humanas sejam causas significativas de acidentes em mineração, podem frequentemente ser atribuídos às condições-ambiente (Henriques, Malekian e Bogatinoska, 2017). Na maioria dos casos, os acidentes em minas são exacerbados pela falta de informação relevante; entretanto, as dimensões, a topologia complexa e a natureza dinâmica das minas tornam a tarefa de monitorizar mais complicada (Chehri e Saadane, 2019), sendo extremamente difícil realiza-la sem colocar a vida de alguém em risco (Henriques, Malekian e Bogatinoska, 2017).

Henriques e Malekian (2016) destacam a influência das condições-ambiente intrínsecas à mineração em subterrâneo que podem apresentar perigos. A monitorização e aferição de parâmetros críticos para a segurança, dependia, em tempos passados, da medição em primeira mão por um operário mineiro, sem saber de antemão que tipo de situação seria encontrado em subterrâneo. Daí a importância de estabelecer uma metodologia de **monitorização não-invasiva**, que pode ser feita através de redes de sensores. Para diminuir os riscos associados a condições ambientais e caracterizar as condições-ambiente em tempo real, de forma remota, e sem expor trabalhadores a situações de risco, é preciso estabelecer um fluxo contínuo de informação da superfície para o subterrâneo e vice-versa (Chehri e Saadane, 2019).

Em resposta aos desafios impostos por estas condições desfavoráveis em subterrâneo, novas tecnologias como WSN (*Wireless Sensor Networks*), ou redes de sensores sem fio, vêm sendo desenvolvidas para aumentar a produtividade e a segurança da operação em minas subterrâneas e para reduzir custos operacionais (Mohammad e A. Moridi, 2015). Embora estas aplicações estejam se expandindo, provavelmente devido à aparição de novos equipamentos no mercado, sua aplicação concreta na mineração ainda é rara (Chehri e Saadane, 2019). A produção de minério em minas subterrâneas é um segmento da indústria que não desenvolveu as suas metodologias de automação tanto quanto as outras indústrias em geral (Thrybom et al., 2015). Para desenvolver um sistema de monitorização de ambientes subterrâneos em escala real, é preciso recolher dados em diversos lugares diferentes com alta densidade de amostragem, envolvendo um grande número de sensores, o que possibilitaria a caracterização detalhada das condições ambiente (Li e Y. Liu, 2009).

Estas redes funcionam através da leitura de algum parâmetro e da transmissão destes dados para um computador central ou terminal de processamento para tratamento a posteriori (Henriques e Malekian, 2016). Os nós de sensores, que são os pontos de amostragem que compõem a malha ou rede de sensores, são posicionados em diferentes locais e se comunicam entre si, sendo que a forma com que se dá a comunicação depende da topologia ou arquitetura da rede de sensores que é implementada, podendo ser feita através de fiação, ou sem fio, no caso das WSNs.

As redes de sensores sem fio apresentam inúmeras vantagens, incluindo a redução de fiação, a facilidade de implementação, e a possibilidade de caracterização de ambientes sem a exposição humana a situações

potencialmente perigosas (Henriques e Malekian, 2016). Os dispositivos que compõem as WSNs são de baixo custo e particularmente promissores em aplicações que envolvem sistemas complexos, como minas subterrâneas e instalações industriais (Chehri e Saadane, 2019).

Uma WSN subterrânea consiste de dezenas ou centenas de nós posicionados entre um recetor na superfície e outros nós situados em níveis subterrâneos (M. A. Moridi, Kawamura et al., 2014). É uma rede sem fio, auto-organizada, que comporta um grande número de sensores interconectados por sinais de rádio que interagem com a realidade (Chehri e Saadane, 2019). Neste tipo de rede, a comunicação entre os nós da malha de sensores pode ser feita através de diferentes tecnologias e protocolos de transmissão, como *bluetooth*, *Wi-Fi* e **Zigbee**. Os sensores podem medir condições pré definidas e determinadas como críticas a depender do caso de aplicação.

A composição, em termos de emphhardware, de um nó de uma rede de sensores, varia de acordo com a aplicação, mas geralmente é formado por módulos de sensores, um microcontrolador, e um transmissor emphwireless (Jo e Khan, 2018): os sensores interagem com o ambiente e recolhem informações sobre um determinado parâmetro; os microcontroladores controlam o funcionamento dos sensores e recebem os dados amostrados, podendo armazená-los e realizar interpretações preliminares dos valores medidos, e enviam pacotes de dados contendo estas informações para os transmissores ligados a si via comunicação serial; os transmissores recebem os pacotes de dados dos microcontroladores e os enviam para outros nós da malha de comunicações. Podem ainda haver nós que não façam a recolha de informações e atuem apenas como recetores e transmissores de dados (repetidores de sinal).

O ponto de chegada dos pacotes de dados, geralmente situado em superfície, pode ser composto por um radio-transmissor e um computador, que armazena os dados que chegam de todos os nós, eventualmente os enviando para a nuvem e/ou os exibindo com o auxílio de interfaces gráficas (GUIs) em salas de controle. Em certas ocasiões, este computador pode incluir algoritmos que automatizam o tratamento dos dados recebidos e disparam sistemas de alerta ou acionam sistemas de controle. Uma aplicação possível seria a utilização destes sistemas em conjunto com *Ventilation On Demand*.

A performance de uma WSN depende do tipo de ambiente, do posicionamento dos nós de sensores, do equipamento utilizado na transmissão e recepção, da cobertura e topologia da rede, da propagação das ondas de rádio, das taxas de transmissão de dados (parâmetros PHY), dos protocolos operacionais, e outros, que condicionam sua configuração, sendo indispensável avaliar as características do sistema em ambientes reais (Chehri e Saadane, 2019).

Em relação às outras tecnologias de comunicação sem fio, o protocolo **Zigbee** apresenta vantagens para aplicações em subterrâneo. Enquanto a comunicação *bluetooth* trabalha com distâncias curtas entre os nós da rede (o que poderia requerer um número maior de nós, causando congestionamento no tráfego de informações), e a comunicação via WI-FI tem alto consumo de energia e requer uma infraestrutura de pontos de acesso para os nós da malha, a comunicação via **Zigbee** apresenta melhores possibilidades em termos de distância entre nós da rede e consumo de energia, comporta um maior número de nós, possui baixa complexidade, não requer a instalação de pontos de acesso, e a sua manutenção é mais simples (M. A. Moridi, Kawamura et al., 2014). Redes **Zigbee** são também confiáveis e auto-ajustáveis (Deshpande e Madankar, 2015), pois corrigem automaticamente a rota da informação caso algum dispositivo da rede pare de funcionar ou um novo nó seja incluído.

Uma rede **Zigbee** é capaz de propagar a informação através dos nós que compõe a rede de sensores (*multi-hop networking*), criando uma rede integrada entre os dispositivos em subterrâneo e o ponto de centralização de dados em superfície (Mohammad e A. Moridi, 2015). De forma simplificada, a informação salta de um nó da malha para outro até que a informação chegue a uma unidade de coleta de dados. Cada nó de sensores atua como coletor de dados e propagador de informações para os outros sensores da rede (Li e Y. Liu, 2009).

Esta rede pode operar de forma cíclica, alternando períodos de **dormência**, em que os dispositivos permanecem desligados, e períodos **ativos** em que os sensores podem recolher medidas e transmitir informações através da rede. Isto é feito para reduzir o consumo de energia e aumentar a autonomia, o que é particularmente importante para dispositivos instalados em locais remotos (**unidades remotas**) e sem acesso a rede de eletricidade, em que convém minimizar a frequência de operações de manutenção e outras intervenções.

O nó que efetua a coleta de dados e se liga a um computador, também chamado de *gateway* ou *root*, e que será tratado por **unidade central**, depende de um suprimento contínuo de eletricidade, devido ao elevado consumo, e a não poder operar em modo de dormência.

Redes **Zigbee** podem ser implantadas de maneira eficiente se forem adequadamente caracterizados os parâmetros críticos que impactam os sinais de comunicação, como a restrição de espaços por paredes, chão, e teto nas galerias subterrâneas. Além disto, o arranjo dos sensores que compõem a rede e as distâncias máximas entre os nós são também fundamentais (M. A. Moridi, Sharifzadeh et al., 2018). A sua aplicação

pode ser limitada por fatores como a necessidade de posicionar dispositivos em linha de visão e a atenuação do sinal de rádio dentro das galerias, apesar de em certos casos, os espaços confinados das galerias subterrâneas poderem causar um aumento da força do sinal entre nós da rede de sensores e facilitar a propagação da informação (Mohammad e A. Moridi, 2015).

Um radio-transmissor **Zigbee** pode ser configurado de três formas diferentes: como **coordenador** (emphcoordinators), como **roteadores** (emphrouters), ou como **dispositivos finais** (emphend devices) (Deshpande e Madankar, 2015). **Dispositivos finais** estão usualmente acoplados a microcontroladores e sensores que recolhem informações do ambiente e se comunicam com os roteadores mais próximos; **roteadores** podem transmitir e receber dados, sendo responsáveis por gerir as rotas de informação; os **coordenadores** podem transmitir e receber sinais, centralizar a receção de toda a informação transmitida através da rede, e conectar-se a computadores (M. A. Moridi, Kawamura et al., 2014).

Por causa das vantagens oferecidas pela implantação de redes **Zigbee** em minas subterrâneas, optou-se por um protocolo de comunicação deste tipo para as unidades de medição utilizadas na parte experimental do projeto de investigação.

Os dispositivos desenvolvidos para a medição de temperatura no interior de galerias tiveram seu projeto baseado nos dispositivos descritos em publicações científicas mencionadas neste capítulo. A disponibilidade de plataformas de desenvolvimento *open-source* no mercado a preços acessíveis permitiu que se criasse uma aplicação customizada para a recolha de temperatura.

Destaca-se também a existência de uma plataforma *open-source* especificamente para a monitorização ambiental subterrânea em tempo real, criada por Jo e Khan (2017). Esta iniciativa, aliada a uma abundante quantidade de publicações científicas acerca do tema, influenciaram a decisão de se incorporar estas tecnologias ao projeto de investigação.

A necessidade de desenvolver dispositivos de baixo custo para a recolha de um grande volume de dados de temperatura, permitindo a validação do modelo, aliou-se ao interesse em reproduzir o que há de mais atual em termos de monitorização ambiental subterrânea. O assunto, embora seja muito extenso e envolva outras área do conhecimento, como a eletrónica digital e a computação física, é acessível e digno de um desenvolvimento mais detalhado dentro deste projeto de investigação, pois tem grande potencial de aplicação prática.

6.4 Desenvolvimento do sistema de amostragem de temperatura

Nesta secção, são detalhados os trabalhos de pesquisa e escolha do equipamento mais adequado à aplicação desejada, de prototipagem e montagem física das unidades de medição, e de programação e configuração dos dispositivos.

6.4.1 Escolha dos microcontroladores, transmissores e sensores

A decisão mais imediata, em termos de *hardware*, envolveu a escolha de um sensor de temperatura capaz de realizar leituras com alta precisão, pois a variação na temperatura estimada pelo modelo pode ser mínima dependendo do caso de aplicação. Sensores são o primeiro bloco da cadeia de medição, e são os responsáveis por fornecer um sinal no domínio elétrico que carregue informações sobre o parâmetro medido (Reverter, 2018).

A seleção dos sensores apropriados para monitorizar um ambiente mineiro é uma questão relativamente complicada e demanda a consideração de diversos fatores, como a faixa de medição, rigor e sensibilidade (Jo e Khan, 2018). Fez-se então um estudo dos tipos de sensores disponíveis no mercado, levando em consideração que: (i) a precisão deve ser a maior possível; (ii) a faixa de medição não precisa ser ampla, uma vez que se pretende medir valores de temperaturas do ar e rocha em condições de ambiente normal; (iii) o sensor deve resistir a condições possivelmente desfavoráveis em subterrâneo, como alta humidade; (iv) o sensor deve ser capaz de interagir com microcontroladores através de comandos simples; (v) o equipamento deve aquecer o mínimo possível devido à passagem de corrente, de modo a afetar o mínimo possível as leituras de temperatura.

Uma pesquisa inicial dos sensores de temperatura disponíveis no mercado levou a quatro categorias mais comuns, usualmente utilizadas em conjunto com micro-controladores , que são os termo-pares, os RTDs[1], os termístores, e os circuitos integrados baseados em semicondutores. Informações a respeito das características

[1] Resistance Temperature Detector

e aplicações dos diferentes tipos de sensores de temperatura são abundantes e podem ser facilmente obtidas em catálogos de produtos de fabricantes de eletrónicos.

Os termo-pares são os tipos mais comuns de sensores, devido ao seu baixo custo e à sua capacidade de efetuar medições numa ampla faixa de temperatura. O seu funcionamento é baseado no efeito *Seebeck*, em que a diferença de temperatura entre dois condutores de materiais diferentes é proporcional ao fluxo de corrente que passa pelo circuito (Rossouw, 2016). Podem ser empregados na medição de temperaturas muito altas e têm tempo de resposta curto para uma ampla faixa de temperatura, mas podem ser facilmente danificados e são sensíveis a oxidação (Soares, 2015). Outras desvantagens incluem precisão limitada, e a necessidade de conhecer a temperatura do ponto de junção entre os condutores (já que medem a diferença de temperatura entre os dois condutores, e não a temperatura absoluta), sendo que geralmente esta junção é mantida em uma temperatura controlada (Zhang e Hoshino, 2019). São muito utilizados em sensores de temperatura de mão (devido ao tempo de resposta rápido), e como instrumentos de medição em aquecedores de água e outros ambientes que envolvem altas temperaturas; para a medição de temperatura em geral, outros tipos de sensores são preferíveis porque têm maior precisão e são mais simples de aplicar (Montgomery e McDowall, 2008).

Os sensores de temperatura baseados em circuitos integrados, também chamados de diodos lineares, são compostos por diodos e transístores semicondutores, tipicamente vendidos em placas de circuitos integrados prontas para uso que produzem um sinal linear associando temperatura a resistência (Montgomery e McDowall, 2008). O fato deste tipo de sensor já ser comercializado em placas de circuito prontas para uso limita sua configuração e personalização para diferentes usos. São dispositivos que geralmente apresentam baixo custo, e suas aplicações mais comuns estão na medição de temperatura de computadores, automóveis, e produtos vestíveis[2]. A precisão deste tipo de dispositivo pode variar muito de acordo com o modelo e operam em faixas de temperatura mais restritas do que os outros tipos de sensores[3].

Os termístores são dispositivos que apresentam grande variação em sua resistência de acordo com variações de temperatura (Zhang e Hoshino, 2019). Têm como desvantagens o relacionamento não-linear entre temperatura e resistência, menor sensibilidade, e estão sujeitos ao aquecimento de sua resistência (Montgomery e McDowall, 2008), o que pode levar a leituras enviesadas de temperatura.

Os RTDs, assim como os termístores, baseiam se na variação de resistência causada pela variação de temperatura, porém possuem maior precisão e conservam uma relação linear entre temperatura e resistência, além de serem mais estáveis (Montgomery e McDowall, 2008). O material mais utilizado nos RTDs é a platina, pois tem rigôr máximo devido ao alto tempo de resposta do material e pode ser utilizada para faixas de temperatura mais amplas (Rossouw, 2016).

Os RTDs são usualmente mais caros do que os outros tipos de sensores. A sua resistência interna de referência é baixa, sendo da mesma ordem de grandeza da resistência do circuito utilizado para o ligar: esta resistência deve ser compensada para que sua influência seja eliminada na medição da temperatura (Montgomery e McDowall, 2008). Os RTDs são nomeados de acordo com sua resistência e o material que os constitui: um sensor Pt1000, por exemplo, têm resistência de 1000 Ω e é feito de platina. Quanto maior a resistência, maior a limitação à passagem de corrente, e o sensor fica menos condicionado ao auto-aquecimento, o que reduz a influência da resistência do circuito sobre a medição de temperatura [4]. Os RTDs têm grande precisão e alta estabilidade quando comparados aos outros tipos de sensores. Os **Pt1000** foram, portanto, os sensores escolhidos para a construção dos dispositivos de amostragem de temperatura.

A utilização de um sensor Pt1000 para realizar medições de temperatura é feita em conjunto com um amplificador de sinal, que lê as baixas medidas de resistência efetuadas pelo RTD e as converte para valores que podem ser lidos pelo controlador. A Adafruit oferece uma placa com um amplificador de sinal **MAX31865**[5] que é capaz de realizar esta função. Além do micro-chip MAX31865 que amplifica o sinal, esta placa oferece um circuito pronto para fazer a interface do sensor com um microcontrolador através de uma porta SPI[6]. O fabricante também disponibiliza uma biblioteca, que pode ser incluída na programação do microcontrolador, que converte diretamente o valor de resistência lido pelo sensor para valores de temperatura.

É possível também utilizar tabelas que relacionam empiricamente a resistência lida com a temperatura correspondente, e a **Equação de Callendar-Van Dusen** para uma maior precisão na conversão dos valores

[2] https://www.superbheater.com/info/rtd-thermocouple-thermistor-ic-sensor-advan-3016321.html
[3] https://www.omega.com/en-us/resources/integrated-circuit-sensors
[4] https://www.omega.com/en-us/resources/rtd-pt100-vs-pt1000
[5] Informações sobre o amplificador de sinal MAX31865 estão disponíveis nos websites dos fabricantes da placa (Adafruit) e do chip (Maxim) em:
https://learn.adafruit.com/adafruit-max31865-rtd-pt100-amplifier?view=all
https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX31865.pdf
[6] Serial Peripheral Interface

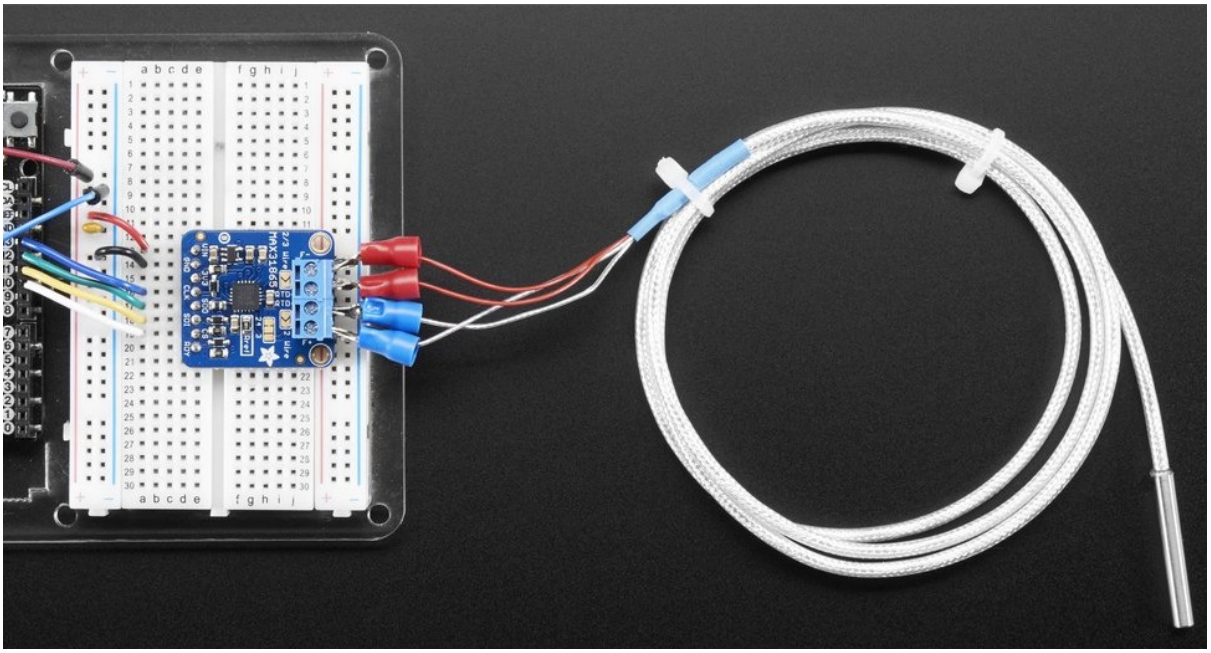


Figura 6.1: Sonda de temperatura Pt1000 conectada a uma placa MAX31865, fabricadas pela Adafruit. Imagem retirada de https://learn.adafruit.com/adafruit-max31865-rtd-pt100-amplifier?view=all

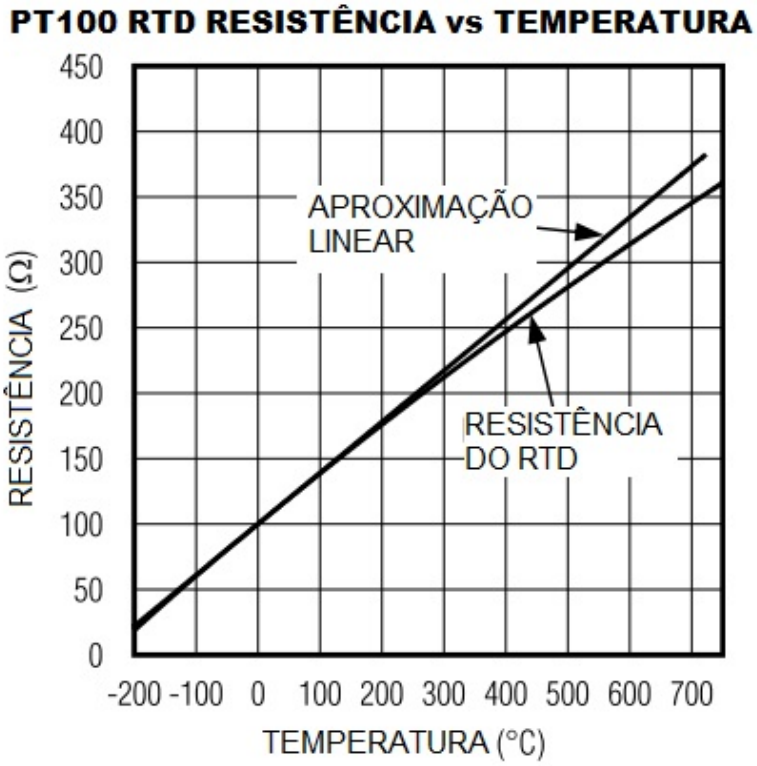


Figura 6.2: Gráfico da temperatura em função da resistência medida por um RTD. Retirada e traduzida de https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX31865.pdf

lidos pelo sensor, tendo em vista que a relação entre resistência e temperatura de um RTD não é totalmente linear para temperaturas muito altas, como mostra o Gráfico da Figura 6.2. No entanto, os valores de temperatura a serem medidos estão entre 0 grau Celsius e 50°C, que pela curva característica de um RTD, se situam em uma região aproximadamente linear. Foi considerado que para a aplicação proposta neste projeto de investigação, tendo em vista a faixa de valores de temperatura medidos, uma relação direta entre a resistência de referência e o valor lido pelo Pt1000 apresenta precisão máxima.

O controle dos sensores é feito através de um microcontrolador. Assim como humanos adquirem informações sobre o ambiente através dos seus sentidos e processam estas informações utilizando o cérebro, sistemas eletrónicos tentam emular o mesmo processo por meio de sensores e dispositivos digitais de processamento, como microcontroladores e microprocessadores (Reverter, 2018). Microcontroladores são computadores de chip único que incluem o mínimo de um microprocessador, memória, e um módulo *input-output*, podendo também incluir outros componentes e módulos como contadores, *timers*, circuitos de interrupção, módulos de comunicação serial, conversores analógico-digital, módulos de processamento de sinais digitais, e assim por diante (Ibrahim, 2019). Um microprocessador difere de um microcontrolador em diversos aspetos, sendo a principal diferença o fato de um microprocessador requerer diversos componentes externos para a sua operação, como memória ROM e RAM, enquanto um microcontrolador é um dispositivo único constituído de diversos chips de suporte interconectados e que operam juntos (Ibrahim, 2010).

A interface entre um sensor e um microcontrolador se dá da seguinte forma: primeiro, a informação lida pelo sensor é convertida para algum parâmetro elétrico e carregada através de um sinal; depois, este sinal é condicionado em um circuito, geralmente composto por amplificadores de sinal, que por sua vez transformam, filtram, amplificam, linearizam ou modulam este sinal; o sinal resultante é adquirido pelo microcontrolador, que armazena, processa, controla, comunica ou exibe o valor lido pelo sensor (Reverter, 2018). O microcontrolador pode também condicionar o acionamento do sensor e operar de forma cíclica, alternando períodos de operação e de dormência para reduzir o seu consumo de energia, o que é crucial especialmente em aplicações remotas onde o dispositivo depende do suprimento de energia de baterias.

A comunicação de um microcontrolador com um sensor pode ocorrer através de diferentes protocolos, como UART[7], I^2C[8], SPI, e outros. A comunicação UART contém duas linhas de comunicação, Rx (que recebe a informação) e Tx (que transmite a informação), suportando uma comunicação bi-direcional entre o dispositivo principal (*master*) e o dispositivo conectado (*slave*). A comunicação é assíncrona, de modo que a transmissão da informação é precedida pelo envio de um sinal de inicialização, e procedida por um sinal de finalização, que preparam o dispositivo para o recebimento da informação.

O protocolo I^2C pode ser utilizado na comunicação de sensores e controladores utilizando comunicação síncrona e bi-direcional através de apenas dois fios, aos quais podem ser conectados diversos dispositivos diferentes, já que utiliza um sistema que permite distingui-los: a informação transmitida contém o endereço do dispositivo que a transmite no primeiro *byte* e suporta a partilha do sistema de transmissão de dados. Uma das linhas de transmissão é a SCL (*Serial Clock Line*), que sincroniza a transmissão de dados, e a outra linha é a SDA (*Serial Data line Acceptance port*), que é a linha que transmite os bits de dados. Há uma hierarquia entre os dispositivos interconectados, de modo que o controlador (*Master*) controla a transmissão e a recepção da informação, avisando o dispositivo controlado (*Slave*) do início e do término do envio/receção dos dados.

A comunicação SPI é similar a comunicação I^2C, porém permite a transmissão e receção simultânea de dados, além de ser tipicamente mais rápida, sendo usada principalmente em dispositivos onde a velocidade de transmissão de dados é importante, como em cartões SD e *displays*. Dispositivos diferentes podem ser conectados a mesma porta SPI, a exceção de uma linha, a CS (*Chip Select line*), que é controlada pelo *Master* e permite selecionar qual é o dispositivo que fará a transmissão de dados. As outras três linhas de transmissão são MOSI (*Master Data Output, Slave Data Input*), MISO (*Master Data Input, Slave Data Output*) e SCLK (que sincroniza a transmissão a partir do Master)[9].

Existem diversos microcontroladores e dispositivos no mercado capazes de interagir com sensores e de armazenar e processar as informações adquiridas. Dentre estes, optou-se pela utilização de um *barebones*[10]

[7] Universal Asynchronous Reception and Transmission
[8] Inter-integrated-circuit
[9] Infomações sobre os protocolos de comunicação retiradas de:
https://www.seeedstudio.com/blog/2019/09/25/uart-vs-i2c-vs-spi-communication-protocols-and-uses/
[10] *Barebones* é um termo utilizado para designar um dispositivo que contém o mínimo necessário para seu funcionamento. Ao passo que o `Arduino` é uma placa de desenvolvimento completa, com diversas funcionalidades e circuitos que suportam a operação de um microcontrolador nela contido, um *barebones* baseado em `Arduino` é uma placa-clone, quase idêntica, mas da qual se retira tudo que é acessório, e mantém-se apenas o mínimo para o funcionamento do processador. Ao longo do texto, chama-se de *barebones*, microcontrolador ou `Arduino` o mesmo tipo de dispositivo, utilizado para controlar sensores:

baseado em **Arduino** no desenvolvimento das unidades de amostragem de temperatura. Um **Arduino** é um controlador *open-source*, de baixo custo e baixo consumo de energia, que pode ser utilizado sem haver uma interface com um computador devido a sua capacidade de armazenar programas, facilmente implementados através de um ambiente de desenvolvimento (IDE) (Jo e Khan, 2018). É utilizado em milhares de projetos e aplicações diferentes, é de fácil utilização para iniciantes e flexível para usuários mais experientes, funciona em diferentes sistemas operacionais, e é frequentemente utilizado para construir instrumentos científicos de baixo custo, para provar princípios químicos e físicos, e para iniciar estudantes em programação e robótica [11]. Destaca-se também que estes controladores são ideais para a construção de protótipos pelo seu design simples, que permite ligações provisórias através de pinos encaixáveis.

Por ser uma plataforma popular de desenvolvimento, há uma quantidade abundante de informações disponíveis sobre projetos realizados em **Arduino** , que muitas vezes são disponibilizados na íntegra e na forma de tutoriais. Além da plataforma **Arduino** ser amigável para iniciantes, existe uma comunidade de usuários que interage em fóruns e propõe discussões sobre estratégias de montagem e programação, esclarece dúvidas, e disponibiliza diversos outros conteúdos que auxiliam o desenvolvimento de novas aplicações. Por estas razões, foi escolhido para a parte experimental do projeto, tanto em sua versão original (nos primeiro protótipos) quanto em sua versão minimalista (*barebones*, nos dispositivos definitivos).

A Figura 6.3 mostra um desenho esquemático de uma placa **Arduino UNO REV3**, que é o modelo mais popular, o que foi utilizado na maior parte do desenvolvimento das unidades de amostragem de temperatura, e no qual se baseou a confeção da placa-clone *barebones*.

Este modelo possui diversas portas para a comunicação com dispositivos externos, como sensores, sendo elas: uma porta I^2C, composta pelos pinos D18 e D19, uma porta SPI entre os pinos D10-D13, uma porta UART nos pinos D0 e D1, 8 portas digitais D2-D9 e 6 entradas analógicas A0-A6. A placa também conta com uma porta para a entrada de alimentação (Vin), duas portas de saída de alimentação (3V3 e 5V, sendo a última a voltagem de operação) e três portas terra (GND). Todas estas portas e pinos presentes na placa **Arduino** , conectáveis através de barras de pinos (nas laterais da placa, como mostra a Figura 6.3) são ligados diretamente aos terminais do microcontrolador ATmega328p[12]; são, portanto, componentes **do chip microcontrolador** presente na placa.

Para além destes terminais que interagem diretamente com o microcontrolador, há ainda uma série de circuitos auxiliares e de outros componentes, que embora não sejam vitais para a operação do dispositivo **Arduino** , são úteis para facilitar a operação de uma placa como esta. Dentre estes componentes, pode-se destacar: LEDs utilizados para indicar características associadas ao funcionamento do microcontrolador, reguladores de tensão utilizados para lidar com alimentações superiores à requerida pelo microcontrolador (4.5V), porta USB utilizada para facilitar a programação do dispositivo, uma entrada para alimentação através de fonte DC, capacitores para retificar a corrente de alimentação e filtrar oscilações, osciladores e condensadores para realizar a contagem de tempo, e resistores e botão para controlar funcionalidade *reset* do ATmega328p. Grande parte destes componentes poderiam ser removidos em placas *barebones* sem comprometer o funcionamento do microcontrolador, como demonstra a Figura 6.23.

Um microcontrolador ATmega328p por si só não é um **Arduino** . Para sê-lo, no mínimo tem de ter sido programado com um *bootloader* **Arduino** , sistema que permite sua interface com ambientes de programação **Arduino** IDE. Se estiver conectado apenas ao indispensável em termos de hardware, pode ser considerado um **Arduino** *barebones*. Um dispositivo **Arduino** usualmente refere-se à uma placa de desenvolvimento completa, como mostrada na Figura 6.3, mas que não deixa de ser, em última análise, um suporte físico para o microcontrolador ATmega328p. É por esta razão que muitas vezes estes termos são utilizados como sinónimos: é muito difícil definir o que é um **Arduino** , e onde ele começa e onde termina, já que está não somente no entorno do *chip* mas também em seu interior. De modo geral, entende-se por:

- placa **Arduino** como o dispositivo completo de fabricação **Arduino** ;
- **Arduino** *barebones* ou somente *barebones* como sendo o microcontrolador equipado do circuito mínimo para seu funcionamento, e baseado em **Arduino** ;

barebones refere-se à placa utilizada no dispositivo definitivo do projeto, e os outros termos referem-se aos microcontroladores em sentido mais amplo.

[11] https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction

[12] É o cérebro de uma placa de desenvolvimento **Arduino** . É um *chip* programável e responsável por efetivamente controlar outros dispositivos externos; todo o restante da placa trabalha para dar suporte a si. Muitas vezes, trata-se por microcontrolador o conjunto da placa de desenvolvimento com estes *chips*, como em "o **Arduino** é um microcontrolador"; não é completamente correto mas é frequentemente utilizado.

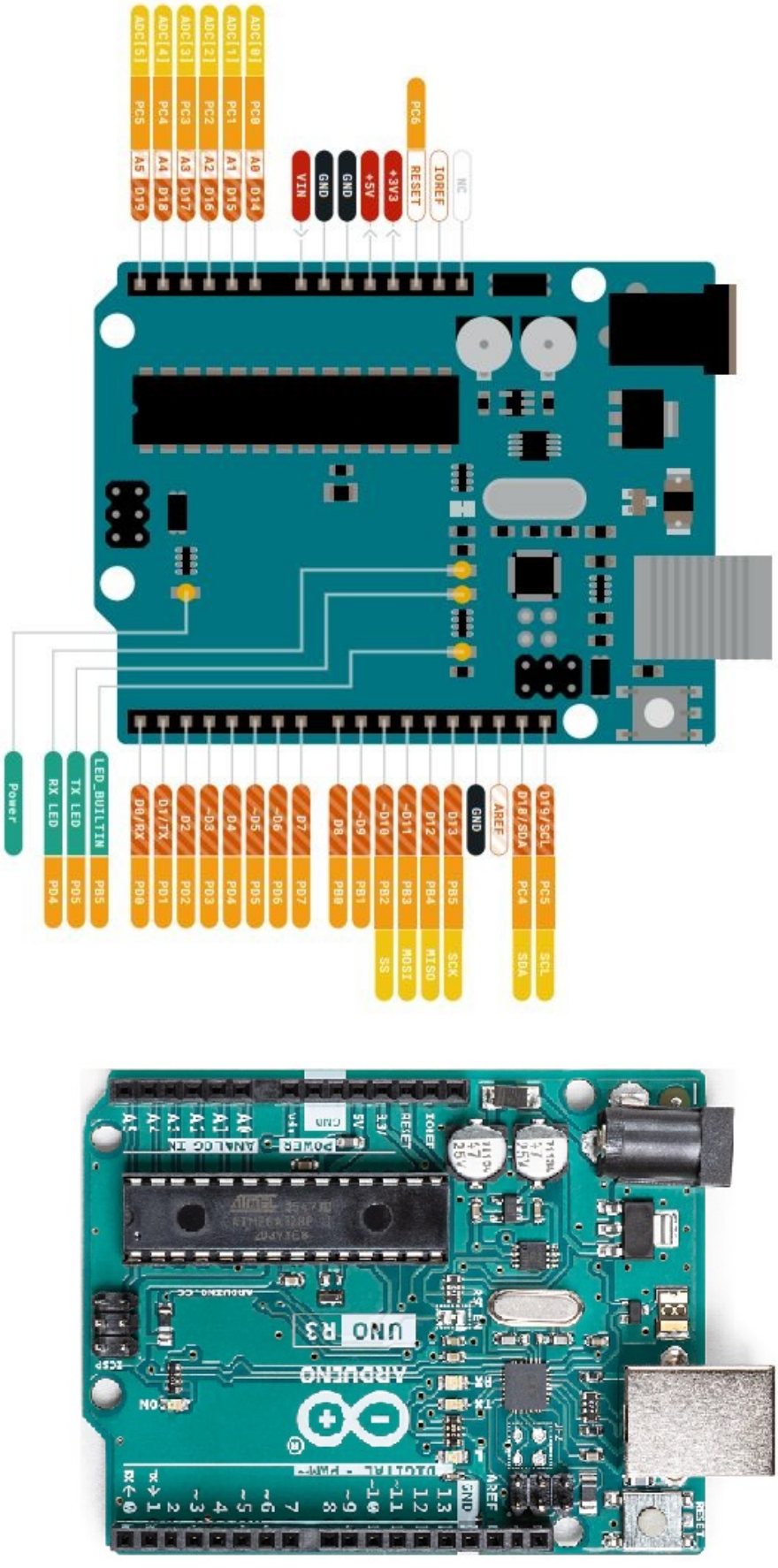


Figura 6.3: Placa Arduino UNO REV3. Imagens retiradas de https://content.arduino.cc/assets/Pinout-UNOrev3_latest.pdf e https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3

- microcontrolador como sendo o *chip* em si, ou como sendo o dispositivo de controle como um todo, a depender do contexto;
- placa de desenvolvimento como qualquer placa de desenvolvimento completa, fornecida por qualquer fabricante, pronta para ser conectada a um computador e de utilização imediata desde o momento em que é retirada da embalagem.

Outros modelos de dispositivos `Arduino` podem variar em número de entradas analógicas e digitais, modelo do microcontrolador, e outras funcionalidades como módulos IoT (no caso do NANO 33 IoT), comunicação *Bluetooth* (como o NANO 33 BLE), sensores embutidos (NANO 33 BLE SENSE), porém a placa mostrada na Figura 6.3 contém as entradas e saídas básicas que estão presentes em todos os modelos. Embora existam placas de microcontroladores capazes de realizar comunicações sem fio, esta funcionalidade é limitada a comunicação direta entre dois dispositivos, ou entre um microcontrolador e um *smartphone* ou computador; para uma rede de sensores sem fio, como a que se pretende implementar, é necessário utilizar um outro dispositivo para as comunicações wireless que fazem a transmissão das informações, que se dedique exclusivamente a esta função. Uma programação para converter um microcontrolador em um dispositivo que comunique com múltiplos outros seria complexa e inviável do ponto de vista prático. Além disso, ainda que as placas `Arduino` possuam modelos com funcionalidades *wireless*, estes não operam por meio de um protocolo **Zigbee**, que era desejado para emular uma rede de sensores padrão em uma mina subterrânea.

Por esta razão, optou-se pela utilização de um módulo de rádio **Digi Xbee 3** (Figura 6.4) para estabelecer e coordenar a comunicação entre os sensores da rede. Foi escolhido este modelo e este fabricante pela capacidade e alcance do sinal, que pode atingir distâncias de até 1200 m em linha de visão. Outro ponto importante para a escolha deste fabricante foi a existência de um software, o XCTU, que permite configurar de forma muito simples cada rádio transmissor, sem precisar programa-los. Por fim, estes dispositivos são capazes de se detetarem uns aos outros e formar redes de sensores de forma automática.

Os rádios **XBee**® 3 ligam-se aos microcontroladores através da porta UART, enviando os dados amostrados pelos sensores e processados pelos controladores por ondas de rádio, até que cheguem a uma unidade central. Todas as unidades de amostragem utilizam controlador do tipo `Arduino` *barebones*, exceto a unidade central, que utiliza um `Raspberry Pi` . A diferença principal entre estes é que o `Raspberry Pi` é um computador completo montado em uma placa única, que opera através de um sistema operacional baseado em Linux, e pode executar todas as funções de um computador comum (guardadas as limitações gráficas e de processamento deste dispositivo), enquanto o *barebones* é capaz apenas de executar programas mais básicos.

É desejável contar com um dispositivo mais robusto na unidade central porque assim se simplifica a receção, e armazenagem, e envio de dados para a nuvem, sendo que todas estas funções são executadas através de programas escritos em `Python`, outra vantagem de trabalhar com `Raspberry Pi` . Além disto, pode ser configurado e utilizado através da interface gráfica do sistema operacional Raspbian, e permite que sejam conectados teclado, rato, e ecrã, como em um computador convencional. A Figura 6.5 mostra uma placa `Raspberry Pi Zero W`, utilizada na unidade central.

Assim como o *barebones*, o `Raspberry Pi` também pode ser utilizado como controlador e interagir com o mundo externo, dispondo de pinos que podem ser conectados a sensores e outros dispositivos. Na unidade central, o `Raspberry Pi` se conecta ao Xbee 3 via porta UART, através da qual recebe as leituras de todas as unidades de amostragem de temperatura da rede de sensores que chegam ao rádio da unidade central por ondas de rádio. Estes dados são salvos na memória interna do dispositivo e são periodicamente enviados à nuvem.

Os detalhes envolvidos na prototipagem e montagem definitiva das unidades de amostragem de temperatura e da unidade central são tratados nas secções seguintes. O trabalho desenvolveu-se a partir da montagem de um protótipo mais modesto, sem funcionalidades de transmissão de dados em tempo real, que evoluiu até a montagem de um sistema de monitorização sem fio. Cada fase de desenvolvimento envolve um pequeno salto de sofisticação do sistema a partir do conhecimento e da experiência prática acumulados de protótipos e versões anteriores.

6.4.2 Prototipagem de unidades de amostragem de temperatura - Protótipo zero

O ponto de partida para a construção das unidades de amostragem de temperatura foi a montagem física e programação de um microcontrolador `Arduino` ligado a um único sensor de temperatura Pt1000 através de um módulo MAX31865.

A esta montagem inicial, adicionou-se um módulo RTC (*Real Time Clock*), que é um circuito eletrónico que regista a passagem do tempo de forma independente do microcontrolador. A função deste componente

Figura 6.4: Digi Xbee 3 **Zigbee** Mesh Kit. Imagem retirada de https://www.digi.com/products/models/xk3-z8s-wzm

Figura 6.5: **Raspberry Pi Zero W**. Imagem retirada de https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-zero-w/

é marcar o horário exato das medições de temperatura e programar alarmes para realizar estas medições em intervalos definidos.

Foi incluído um módulo de cartão MicroSD para gravar os valores de temperatura colhidos. Estes componentes constituíram o protótipo correspondente a versão mais simples de uma unidade de medição de temperatura: é, em essência, um termómetro registador com intervalos de medição programáveis.

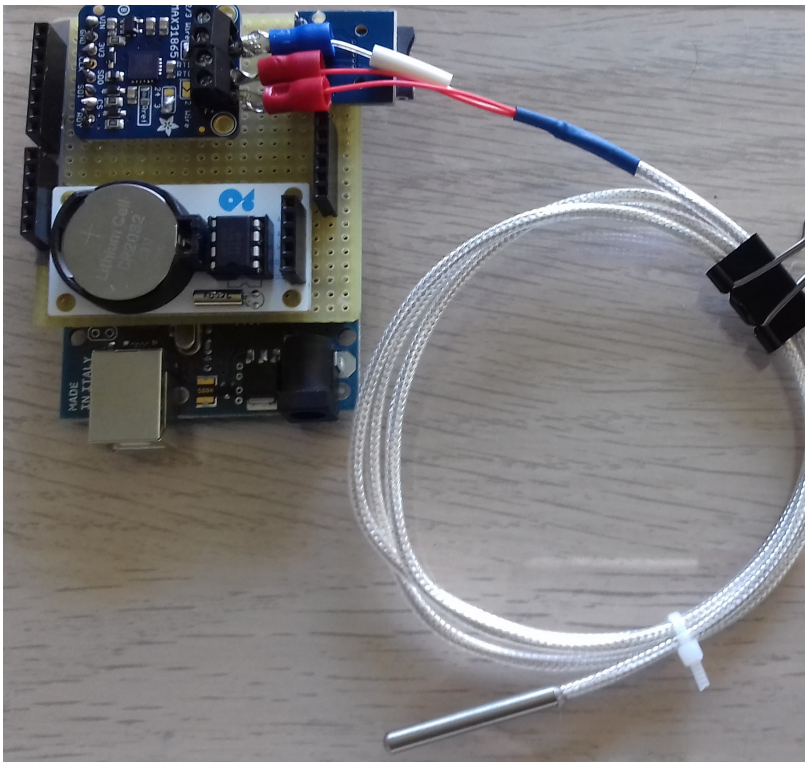


Figura 6.6: Protótipo inicial.

Via de regra, no desenvolvimento de dispositivos como estes, quanto mais partes e módulos separados se utiliza, mais complexa se torna a programação do controlador e mais frágil e crítica se torna a montagem física das partes. Identificar falhas é um processo dispendioso e inconveniente, pois obriga a examinar tanto a lógica de programação quanto a montagem.

Listagem (6.1) de `Prototipo0.ino`

```
//############################DEFINIÇÕES INICIAIS##############################
//-----------------------------inclusão de bibliotecas----------------------
#include <virtuabotixRTC.h>

#include <Adafruit_MAX31865.h>

#include <SPI.h>

#include <SD.h>
//--------------------------------------------------------------------------

File myFile;

//-------------------- Configuração RTC (CLK, DAT, RESET)--------------------
//Wiring CLK -> 6 , DAT -> 7, Reset -> 9
virtuabotixRTC myRTC(6, 7, 9);
//--------------------------------------------------------------------------

```

Listagem (6.1) de Prototipo0.ino (cont.)

```
//-------------- Configuração MAX31865: (CS, DI, DO, CLK)--------------------
Adafruit_MAX31865 thermo = Adafruit_MAX31865(5, 4, 3, 2);
// Valor do resistor de referência (4300.0 para PT1000)
#define RREF 4300.0
#define RNOMINAL 1000.0
//---------------------------------------------------------------------------
//######################FIM DAS DEFINIÇÕES INICIAIS############################

//########################CORPO PRINCIPAL DO CÓDIGO############################
//-----------------------------------setup-------------------------------------
void setup() {
  //abertura da comunicação serial
  Serial.begin(9600);
  //programação do horário no RTC
  myRTC.setDS1302Time(5, 26, 13, 3, 20, 5, 2020);
  //iniciar o sensor de temepratura e o amplificador de sinal MAX31865
  thermo.begin(MAX31865_3WIRE);

  //------inicializar o cartão microSD------
  while (!Serial) {
    ;
  }
  Serial.print("Inicializando o cartao SD");
  if (!SD.begin(10)) {
    Serial.println("A inicializacao falhou");
    while (1);
  }
  Serial.println("cartao inicializado");
  myFile = SD.open("T_log.txt", FILE_WRITE);
  //----------------------------------------
}
//---------------------------------------------------------------------------

//-----------------------------------loop--------------------------------------
void loop() {
  //leitura do horário do RTC
  myRTC.updateTime();
  //leitura da temperatura de minuto em minuto
  if (myRTC.seconds == 10) {
    //sensor mede a temepratura
    uint16_t rtd = thermo.readRTD();
    float ratio = rtd;
    ratio /= 32768;
    //mostra no terminal
    Serial.print("Ratio = ");
    Serial.println(ratio, 8);
    Serial.print("Resistencia = ");
    Serial.println(RREF * ratio, 8);
    Serial.print("Temperatura = ");
    Serial.println(thermo.temperature(RNOMINAL, RREF));
    Serial.print("Date/Time = ");
    Serial.print(myRTC.dayofmonth);
    Serial.print("/");
    Serial.print(myRTC.month);
    Serial.print("/");
    Serial.print(myRTC.year);
    Serial.print(" ");
    Serial.print(myRTC.hours);
```

Listagem (6.1) de `Prototipo0.ino` (cont.)

```
77      Serial.print(":");
78      Serial.print(myRTC.minutes);
79      Serial.print(":");
80      Serial.println(myRTC.seconds);
81      //salva no cartão SD
82      myFile.print(thermo.temperature(RNOMINAL, RREF));
83      myFile.print("       ");
84      myFile.print(myRTC.dayofmonth);
85      myFile.print("/");
86      myFile.print(myRTC.month);
87      myFile.print("/");
88      myFile.print(myRTC.year);
89      myFile.print(" ");
90      myFile.print(myRTC.hours);
91      myFile.print(":");
92      myFile.print(myRTC.minutes);
93      myFile.print(":");
94      myFile.println(myRTC.seconds);
95      myFile.sync();
96      delay(1000);
97      Serial.println();
98    }
99  }
100 //-------------------------------------------------------------------------
101 //#####################FIM DO CORPO PRINCIPAL DO CÓDIGO#######################
```

A base da montagem foi uma placa de prototipagem perfurada, que facilitou a soldagem dos componentes em uma espécie de circuito encaixável (também chamada de *shield*) sobre a placa **`Arduino UNO`** . O protótipo possuía estrutura ainda muito rudimentar para a função desejada, e passou por diferentes níveis de desenvolvimento por não atender ao que se desejava em termos de autonomia (ainda estava condicionado a alimentação via cabo USB), de transmissão de dados (apenas registava medidas em cartão MicroSD e não permitia visualizar medições em tempo real), de montagem física (usava apenas cabos para prototipagem e não ligações elétricas definitivas), e de robustez (não possuíam um invólucro que protegesse o circuito de condições-ambiente desfavoráveis). Esta base é considerada um **Protótipo 0**, em que algumas partes físicas e da lógica de programação foram reaproveitadas no desenvolvimento dos protótipos subsequentes.

6.4.3 Protótipo 1 - Transmissão de dados para a nuvem

Na sequência da elaboração do protótipo zero, deu-se uma busca por maneiras de enviar as leituras de temperatura em tempo real para a nuvem, de modo que fossem acessíveis remotamente assim que a leitura de temperatura fosse feita. O dispositivo mais simples dentre os microcontroladores **`Arduino`** capaz de se conectar à internet é o **`Arduino Nano 33 IoT`**, e foi escolhido para a construção do primeiro protótipo de unidade de amostragem com transmissão de dados em tempo real. Este dispositivo também conta com um RTC interno, o que dispensa a utilização de um módulo externo para marcar o tempo.

Este protótipo também foi o primeiro em que se utilizou *sleep mode* (modo de dormência) e alimentação por meio de baterias. O *sleep mode* permite colocar o microcontrolador em um modo de operação de baixo consumo nos períodos em que não está efetuando medições de temperatura, em um regime de operação cíclica: ora ligado medindo temperatura, salvando os dados no cartão de memória, e os enviando para a nuvem, ora emphdormindo, com baixo consumo de corrente elétrica, em que fica a espera de um sinal para voltar a ”acordar”. O funcionamento em *sleep mode* também envolve um salto de complexidade no desenvolvimento e foi crucial para atingir maior tempo de autonomia na versão final do protótipo.

A parte mais difícil do desenvolvimento desta unidade foi a programação do microcontrolador. A conexão a uma rede *Wi-Fi* e a manipulação de dados a serem enviados ou extraídos de servidores é complexa e delicada quando feita através de um microcontrolador devido à sua funcionalidade limitada: o controlador tem restrições em termos de programação e processamento e não possui uma interface gráfica que permita executar configurações básicas de acesso à Internet, o que obriga o desenvolvedor a programar todas as etapas

de conexão e envio de dados previamente em linguagem `C`, que também é pouco adequada a estas tarefas. Foi neste protótipo que se percebeu a necessidade de utilizar um **`Raspberry Pi`** na unidade central.

A programação implementada para o **Protótipo 1** permite:

1. obter um horário através de um servidor *NTP*[13] e registá-lo no RTC interno do microcontrolador;
2. criar um arquivo `.txt` no cartão MicroSD com as leituras de temperatura para cada dia de medição;
3. utilizar o *sleep mode* do **`Arduino`** , e despertá-lo com um sinal periódico temporizado através de seu RTC interno;
4. medir temperatura quando está emphacordado e registá-la no cartão *MicroSD*;
5. ler o cartão *MicroSD* uma vez por dia, armazenar os dados lidos em variáveis, e enviá-los para a nuvem através do servidor **Ubidots**[14];

Listagem (6.2) de `Prototipo1.ino`

```
//############################DEFINIÇÕES INICIAIS##############################
//-----------------------------inclusão de bibliotecas----------------------
#include <BlockDriver.h>

#include <FreeStack.h>

#include <MinimumSerial.h>

#include <SdFat.h>

#include <SdFatConfig.h>

#include <sdios.h>

#include <SysCall.h>

#include <ArduinoLowPower.h>

#include <NTPClient.h>

#include <RTCZero.h>

#include <SPI.h>

#include <WiFiNINA.h>

#include <WiFiUdp.h>

#include <Adafruit_MAX31865.h>
 //--------------------------------------------------------------------------

SdFat SD;
RTCZero rtc;
WiFiUDP Udp;
NTPClient timeClient(Udp);
```

[13] O *Network Time Protocol* é um protocolo que possibilita a sincronização de relógios de computadores com a hora oficial. A partir de uma requisição de um dispositivo *cliente* para um determinado servidor NTP, ocorre um processo de sincronização através do protocolo NTP. Desta forma, garante-se que dois dispositivos diferentes conectados à Internet e situados em uma mesma localização geográfica registem sempre o mesmo horário, com grande exatidão.

[14] O Ubidots é uma plataforma que permite o desenvolvimento rápido e seguro de aplicações de IoT (*Internet of Things*), facilitando a conexão e envio de dados entre dispositivos com acesso à Internet e um servidor na nuvem. Este serviço é ideal para a utilização conjunta com dispositivos **`Arduino`** , que, em suas versões com acesso à Internet, possuem bibliotecas e comandos voltados à este servidor em específico. A partir do Ubidots é possível visualizar dados recolhidos por dispositivos eletrónicos através de sensores, ou controlar remotamente um microcontrolador.

Listagem (6.2) de Prototipo1.ino (cont.)

```
36 File myFile;
37
38 //-------------- Configuração MAX31865: (CS, DI, DO, CLK)--------------------
39 Adafruit_MAX31865 thermo = Adafruit_MAX31865(2, 3, 4, 5);
40 // Valor do resistor de referência (4300.0 para PT1000)
41 #define RREF 4300.0
42 #define RNOMINAL 1000.0
43 //---------------------------------------------------------------------------
44
45 //definição da string com o endereço do servidor
46 String userAgent_token_device = "token do servidor Ubidots";
47 String endline = "|end";
48 //criação de variáveis para armazenar os dados enviados ao servidor
49 float temp_buff, day_buff, month_buff, hours_buff, minutes_buff, seconds_buff;
50 String buffer;
51 //definicao do número de caracteres do nome dos ficheiros salvos no cartão MicroSD
52 char filename[] = "00000000.txt";
53 //entrada do dia, mês, e ano
54 int day_ = 3, month_ = 8, year_ = 20;
55 //definição do número/código do nó da malha que está sendo programado
56 int node_number = 1;
57 //pré-definição do status de acordado\dormindo do dispositivo
58 bool awake = false;
59 //criação da variável que recebe os dados de temperatura do sensor
60 float temp = 0.0;
61 //criação das variáveis que recebem dados de horário do servidor NTP
62 int seconds_, int hours_, int minutes_;
63 //configuração da conexão à itnernet
64 char ssid[] = "nome da rede wi-fi";
65 char pass[] = "password da rede wi-fi";
66 int status = WL_IDLE_STATUS;
67 //######################FIM DAS DEFINIÇÕES INICIAIS############################
68
69 //########################CORPO PRINCIPAL DO CÓDIGO############################
70 //----------------------------------setup-------------------------------------
71 void setup() {
72   //conexão ao servidor
73   Udp.begin(80);
74   //abertura da comunicação serial
75   Serial.begin(9600);
76   //utilizar o led do Arduino como indicador
77   pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
78   //iniciar o sensor de temepratura e o amplificador de sinal MAX31865
79   thermo.begin(MAX31865_3WIRE);
80   //----------------------abrir a conexão wi-fi----------------------
81   if (WiFi.status() == WL_NO_MODULE) {
82     Serial.println("Communication with WiFi module failed!");
83     while (true);
84   }
85   String fv = WiFi.firmwareVersion();
86   if (fv < "1.0.0") {
87     Serial.println("Please upgrade the firmware");
88   }
89   while (status != WL_CONNECTED) {
90     Serial.print("Attempting to connect to WPA SSID: ");
91     Serial.println(ssid);
92     status = WiFi.begin(ssid, pass);
93     delay(10000);
```

Listagem (6.2) de Prototipo1.ino (cont.)

```
94    }
95    //se a conexão for bem-sucedida
96    Serial.print("Voce esta conectado");
97    //-------------------------------------------------------------------
98    //--------------obter o horário e configurar o alarme---------------
99    timeClient.begin();
100   timeClient.update();
101   timeClient.setUpdateInterval(86400000);
102   Serial.println(timeClient.getFormattedTime());
103   seconds_ = round(timeClient.getSeconds());
104   minutes_ = timeClient.getMinutes();
105   hours_ = timeClient.getHours() + 1;
106   //programar o horário do RTC
107   rtc.begin();
108   rtc.setTime(hours_, minutes_, seconds_);
109   rtc.setDate(day_, month_, year_);
110   //definir o horário do alarme
111   rtc.setAlarmTime(0, 0, 10);
112   //ativar o alarme quando os segundos forem iguais
113   rtc.enableAlarm(rtc.MATCH_SS);
114   //executar a função "wakeup" quando o alarme for ativado
115   rtc.attachInterrupt(wakeup);
116   //correção da biblioteca RTCZERO
117   GCLK -> CLKCTRL.reg = uint16_t(
118     GCLK_CLKCTRL_CLKEN |
119     GCLK_CLKCTRL_GEN_GCLK2 |
120     GCLK_CLKCTRL_ID(GCLK_CLKCTRL_ID_EIC_Val)
121   );
122   while (GCLK -> STATUS.bit.SYNCBUSY) {}
123   //-------------------------------------------------------------------
124   //------------------inicializar o cartão microSD--------------------
125   while (!Serial) {
126     ;
127   }
128   Serial.print("Inicializando o cartao SD");
129   if (!SD.begin(10)) {
130     Serial.println("A inicializacao falhou");
131     while (1);
132   }
133   Serial.println("cartao inicializado");
134   getFilename(filename);
135   myFile = SD.open(filename, FILE_WRITE);
136   //-------------------------------------------------------------------
137 }
138 //---------------------------------------------------------------------------
139
140 //-------------------------executado quando acorda--------------------------
141 void loop() {
142   if (awake) {
143     digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
144     delay(500);
145     digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
146     delay(500);
147     mainfunction();
148     awake = false;
149     digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
150     delay(100);
151     digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
```

Listagem (6.2) de `Prototipo1.ino` (cont.)

```
152     delay(100);
153     gotosleep();
154   }
155 }
156 //---------------------------------------------------------------------------
157 //####################FIM DO CORPO PRINCIPAL DO CÓDIGO#######################
158
159 //#####################DECLARAÇÃO DEFUNÇÕES AUXILIARES#######################
160 //------------função para nomear o ficheiro de acordo com a data-------------
161 void getFilename(char * filename) {
162   filename[0] = 'N';
163   filename[1] = node_number + '0';
164   filename[2] = '_';
165   filename[3] = day_ / 10 + '0';
166   filename[4] = day_ % 10 + '0';
167   filename[5] = '_';
168   filename[6] = month_ / 10 + '0';
169   filename[7] = month_ % 10 + '0';
170   filename[8] = '.';
171   filename[9] = 't';
172   filename[10] = 'x';
173   filename[11] = 't';
174   return;
175 }
176 //---------------------------------------------------------------------------
177
178 //-----------------------------função wakeup-------------------------------
179 void wakeup() {
180   //pisca o led para sinalizar que o Arduino acordou
181   digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
182   delay(500);
183   digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
184   delay(500);
185   awake = true;
186 }
187 //---------------------------------------------------------------------------
188
189 //---------------função que colcoa o dispositivo em stand-by---------------
190 void gotosleep() {
191   //pisca o led 2 vezes para sinalizar que vai dormir
192   digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
193   delay(500);
194   digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
195   delay(500);
196   digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
197   delay(500);
198   digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
199   delay(500);
200   //entra em stand-by
201   rtc.standbyMode();
202 }
203 //---------------------------------------------------------------------------
204
205 //-----------------------------leitura da temperatura----------------------
206 void sensors() {
207   //sensor mede a temepratura
208   uint16_t rtd = thermo.readRTD();
209   Serial.print("RTD value: ");
```

Listagem (6.2) de Prototipo1.ino (cont.)

```
210   Serial.println(rtd);
211   float ratio = rtd;
212   ratio /= 32768;
213   temp = thermo.temperature(RNOMINAL, RREF);
214   //RTC informa o horário
215   hours_ = rtc.getHours();
216   minutes_ = rtc.getMinutes();
217   seconds_ = rtc.getSeconds();
218   day_ = rtc.getDay();
219   month_ = rtc.getMonth();
220   year_ = rtc.getYear();
221 }
222 //--------------------------------------------------------------------------
223
224 //---------------função para escrever dados no cartão microSD----------------
225 void write_data() {
226   if (hours_ == 0 && minutes_ == 0) {
227     getFilename(filename);
228     myFile = SD.open(filename, FILE_WRITE);
229   }
230   myFile.print("temp = ");
231   myFile.println(temp);
232   myFile.print("day = ");
233   myFile.println(day_);
234   myFile.print("mon = ");
235   myFile.println(month_);
236   myFile.print("hou = ");
237   myFile.println(hours_);
238   myFile.print("min = ");
239   myFile.println(minutes_);
240   myFile.print("sec = ");
241   myFile.println(seconds_);
242   myFile.sync();
243 }
244 //--------------------------------------------------------------------------
245
246 //------------------função para enviar os dados para a nuvem-----------------
247 void send_data() {
248   //conectar ao wi-fi
249   if (WiFi.status() == WL_NO_MODULE) {
250     Serial.println("A comunciacao falhou");
251     while (true);
252   }
253   while (status != WL_CONNECTED) {
254     Serial.print("Tentando conectar");
255     Serial.println(ssid);
256     status = WiFi.begin(ssid, pass);
257     delay(1000);
258   }
259   Serial.print("conexao estabelecida");
260   //ler os dados do cartao SD e enviar para a nuvem
261   parse_SDcard();
262   digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
263   delay(1000);
264   digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
265   delay(1000);
266 }
267 //--------------------------------------------------------------------------
```

Listagem (6.2) de Prototipo1.ino (cont.)

```
268
269 //------------------sub-rotina para retirar os dados do cartao---------------
270 void parse_SDcard() {
271   char buffer[40];
272   byte index = 0;
273   myFile = SD.open(filename, FILE_READ);
274   while (myFile.available()) {
275     char c = myFile.read();
276     if (c == '\n' || c == '\r') {
277       parseAndSave(buffer);
278       index = 0;
279       buffer[index] = '\0';
280     } else {
281       buffer[index++] = c;
282       buffer[index] = '\0';
283     }
284   }
285 }
286 //------------------------------------------------------------------------------
287
288 //--------------------sub-rotina para salvar os dados lidos-------------------
289 //--------------------do cartão e enviá-los para a nuvem   -------------------
290 void parseAndSave(char * buff) {
291   char * name = strtok(buff, " =");
292   if (name) {
293     char * junk = strtok(NULL, " ");
294     if (junk) {
295       char * valu = strtok(NULL, " ");
296       if (valu) {
297         float val = atof(valu);
298         //envia a temperatura
299         if (strcmp(name, "temp") == 0) {
300           temp_buff = val;
301           String dev_1 = "t:";
302           String temperature_val = dev_1 + temp_buff;
303           String temperature_read = userAgent_token_device + temperature_val;
304           String temperature_val_send = temperature_read + endline;
305           Udp.beginPacket("things.ubidots.com", 9012);
306           Udp.print(temperature_val_send);
307           Udp.endPacket();
308         }
309         //envia o dia da medição
310         else if (strcmp(name, "day") == 0) {
311           day_buff = val;
312           String dev_2 = "day:";
313           String day_val = dev_2 + day_buff;
314           String day_read = userAgent_token_device + day_val;
315           String day_val_send = day_read + endline;
316           Udp.beginPacket("things.ubidots.com", 9012);
317           Udp.print(day_val_send);
318           Udp.endPacket();
319         }
320         //envia o mês da medição
321         else if (strcmp(name, "mon") == 0) {
322           month_buff = val;
323           String dev_3 = "month:";
324           String month_val = dev_3 + month_buff;
325           String month_read = userAgent_token_device + month_val;
```

Listagem (6.2) de Prototipo1.ino (cont.)

```
326           String month_val_send = month_read + endline;
327           Udp.beginPacket("things.ubidots.com", 9012);
328           Udp.print(month_val_send);
329           Udp.endPacket();
330         }
331         //envia a hora da medição
332         else if (strcmp(name, "hou") == 0) {
333           hours_buff = val;
334           String dev_4 = "hour:";
335           String hours_val = dev_4 + hours_buff;
336           String hours_read = userAgent_token_device + hours_val;
337           String hours_val_send = hours_read + endline;
338           Udp.beginPacket("things.ubidots.com", 9012);
339           Udp.print(hours_val_send);
340           Udp.endPacket();
341         }
342         //envia o minuto da medição
343         else if (strcmp(name, "min") == 0) {
344           minutes_buff = val;
345           String dev_5 = "minutes:";
346           String minutes_val = dev_5 + minutes_buff;
347           String minutes_read = userAgent_token_device + minutes_val;
348           String minutes_val_send = minutes_read + endline;
349           Udp.beginPacket("things.ubidots.com", 9012);
350           Udp.print(minutes_val_send);
351           Udp.endPacket();
352         }
353         //envia o segundo da medição
354         else if (strcmp(name, "sec") == 0) {
355           seconds_buff = val;
356           String dev_6 = "seconds:";
357           String seconds_val = dev_6 + seconds_buff;
358           String seconds_read = userAgent_token_device + seconds_val;
359           String seconds_val_send = seconds_read + endline;
360           Udp.beginPacket("things.ubidots.com", 9012);
361           Udp.print(seconds_val_send);
362           Udp.endPacket();
363         }
364       }
365     }
366   }
367 }
368 //--------------------------------------------------------------------------
369
370 //----------------------função que coordena as demais----------------------
371 void mainfunction() {
372   digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
373   delay(100);
374   digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
375   delay(100);
376   sensors();
377   delay(200);
378   write_data();
379   delay(200);
380   if (hours_ == 23 && minutes_ == 59) {
381     send_data();
382     delay(200);
383   }
```

Listagem (6.2) de `Prototipo1.ino` (cont.)

```
384 }
385 //------------------------------------------------------------------------
386 //##################FIM DA DECLARAÇÃO DE FUNÇÕES AUXILIARES####################
```

O trecho de código mostrado demonstra que os dispositivos **`Arduino`** , ainda que possuam funcionalidades IoT, não são os controladores ideais para lidar com o envio de dados para a nuvem. A lógica se torna complexa e delicada, em especial para as funções que lidam com a conexão à Internet e aos servidores **Ubidots** e **NTP**.

Quanto à montagem física, foi feita a primeira impressão de circuitos em placa pré-sensibilizada por meio de procedimento descrito em secção à parte. Os componentes utilizados foram os mesmos do **Protótipo 0**, exceto pelo microcontrolador (o **`Arduino Uno`** foi substituído por um **`Arduino Nano 33 IoT`**) e pelo RTC (que foi removido porque o microcontrolador já possuía relógio interno). Antes da montagem definitiva, utilizou-se cabos tipo *jumper* e placas de prototipagem para montar versões provisórias do circuito, até que se tivesse certeza das ligações definitivas entre placas de circuitos, sensores, e microcontrolador.

Com a programação e montagem física definidas, deu-se início ao processo de desenho e projeto da placa de circuito impresso. Para isto, foi utilizado o software de CAD *Autodesk EAGLE*, que conta com bibliotecas de componentes eletrónicos e permite desenhar os circuitos através de um ponto de vista esquemático das ligações e de um ponto de vista de *design* e distribuição espacial dos componentes. A Figura 6.7 mostra o projeto do **Protótipo 1** feito em *Autodesk EAGLE*.

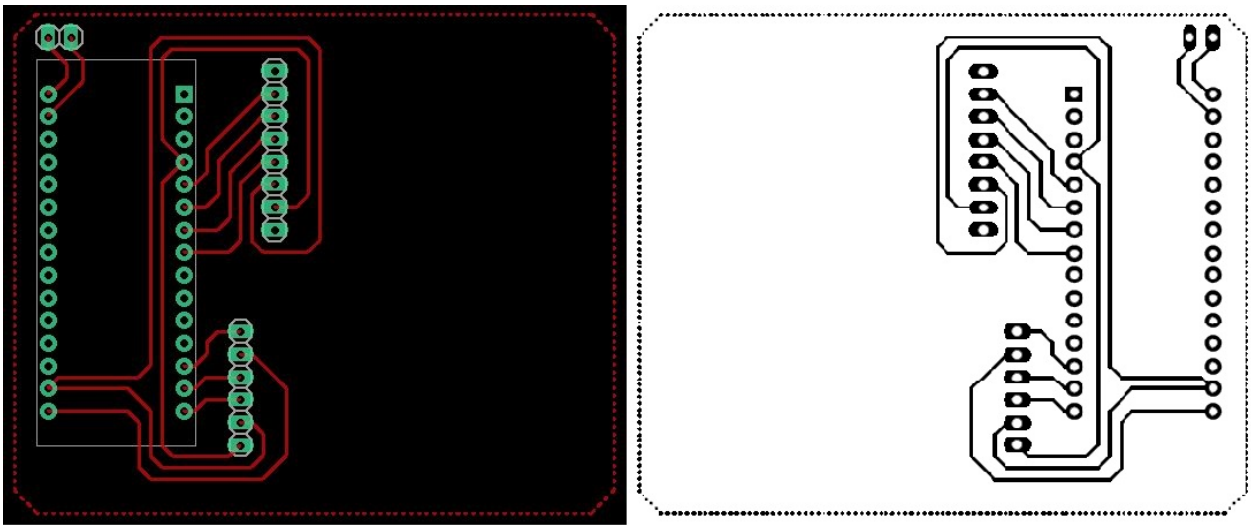


Figura 6.7: Projeto *Autodesk EAGLE* do **Protótipo 1**: à esquerda, o projeto do circuito, e à direita a versão espelhada para impressão.

Com o desenho do circuito finalizado, espelha-se o desenho para a impressão. Este espelhamento é feito porque o desenho impresso fica em contacto com a parte inferior da placa, mas projeto foi feito pensando-se na vista superior da placa. Com o circuito impresso e gravado em uma placa de fenolite pré-sensibilizada, deu-se a montagem e soldagem dos componentes eletrónicos, finalizando-se a confeção do **Protótipo 1**, conforme a Figura 6.8.

Quanto ao funcionamento do **Protótipo 1**, algumas limitações foram percebidas, dentre as quais:

1. O servidor Ubidots, compatível com dispositivos **`Arduino`** , possui limitação quanto à quantidade de caracteres enviados diariamente para a nuvem. Em uma situação real, onde se deseja transmitir grandes volumes de dados a partir de diversas unidades de amostragem, fica claro que esta solução não é satisfatória;

2. O **`Arduino Nano 33 IoT`** não comunica bem com outros **`Arduino`** , em especial se há mais de um, não sendo ideal para estabelecer e formar uma rede de sensores. Para tal, existem outros dispositivos que comunicam por meio de protocolos específicos e transmitem dados sem fio de forma mais simplificada e mais adequada aos objetivos deste projeto de investigação;

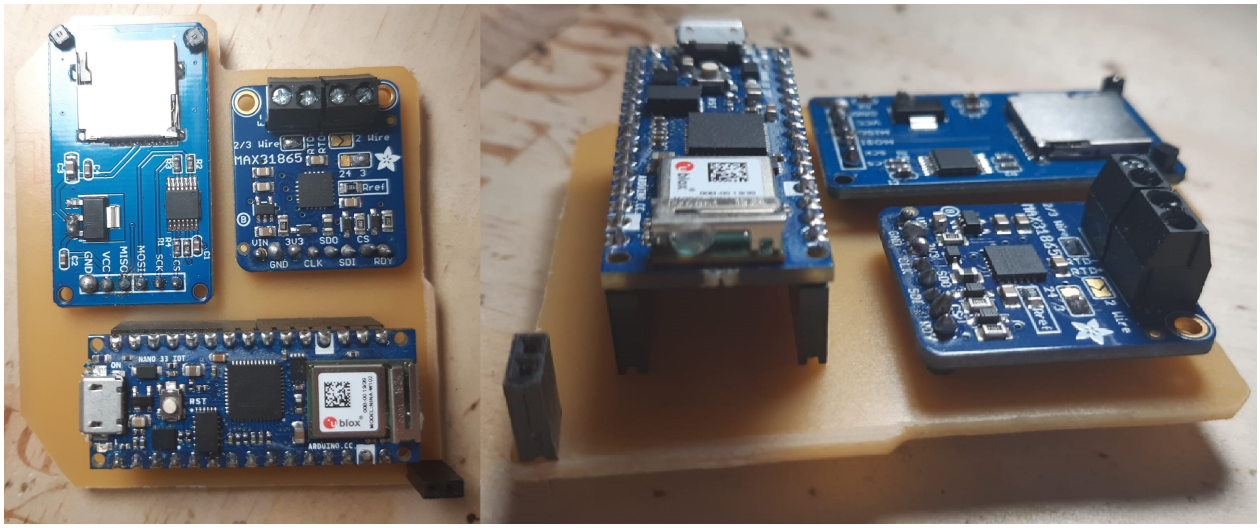


Figura 6.8: Montagem final do **Protótipo 1**.

3. Não se pode garantir um bom funcionamento do dispositivo caso a autenticação da rede *Wi-Fi* falhe, o que só poderá ser percebido no horário programado para a transmissão de dados para a nuvem. Neste caso, o problema só pode ser corrigido reprogramando o microcontrolador diretamente, o que envolve retirar o dispositivo do seu local de recolha de dados;

4. A receção do sinal *Wi-Fi* é bastante limitada quanto ao alcance, o que é grave, tendo em vista que o objetivo final é colocar o dispositivo no interior de uma galeria subterrânea onde muito provavelmente a intensidade do sinal será baixa;

5. A alimentação do dispositivo deve ser feita por baterias excedendo a tensão mínima de alimentação, preferencialmente com carga em paralelo, para que o dispositivo tenha autonomia desejada. Este dimensionamento da carga é complicado porque baterias em paralelo tendem a sofrer um desbalanceamento, já que a carga das baterias mais próximas à entrada do circuito de alimentação se esgota mais rapidamente do que as cargas das outras baterias. Podem também sofrer sobreaquecimentos;

Concluiu-se que esta versão do protótipo não atendia aos objetivos desejados quanto à funcionalidade de uma unidade de amostragem, em particular no que diz respeito à comunicação e transmissão de dados em tempo real. Deu-se início então ao desenvolvimento do segundo protótipo e à busca por dispositivos mais favoráveis à transmissão de dados via protocolos de comunicação sem fio.

6.4.4 Processo *DIY* de impressão de circuitos

O processo de impressão de circuitos de forma emphcaseira consiste basicamente em gravar o desenho do circuito em uma placa de cobre e expô-la a um material corrosivo que reaja com a superfície de cobre, mas preserve o cobre que está protegido pela tinta da impressão.

Foram utilizados dois processos diferentes na gravação dos circuitos: um com placas pré-sensibilizadas e outro com placas de cobre sem sensibilizantes. Os procedimentos divergem apenas na transferência do desenho do circuito para a placa.

Placa de cobre pré-sensibilizada neste processo, a superfície de cobre da placa é recoberta por uma camada de tinta fotossensível. Coloca-se o desenho do circuito, impresso em acetato, em contacto com a placa: se a emulsão fotossensível utilizada for de sensibilização positiva, o desenho tem de ser impresso em positivo (isto é, da forma como se deseja que as linhas fiquem gravadas sobre a placa, como na Figura 6.9 - A), pois a luz UV irá secar a tinta nas partes do acetato em que a luz passar. Se a emulsão for sensibilizada negativamente, o circuito deve ser impresso em negativo (como na Figura 6.9 - B), pois a luz UV que passar pelo acetato irá soltar a tinta fotossensível da placa nestas regiões. As etapas deste processo são as seguintes:

1. Impressão do desenho em acetato e exposição à luz UV (Figura 6.9 - C). O tempo de exposição varia em função da lâmpada utilizada e do tipo de placa pré-sensibilizada, mas dificilmente se encontram informações precisas sobre esta etapa, seja em fóruns ou em manuais dos fabricantes das placas, sendo necessário realizar testes para estabelecer os tempos ideais de exposição;
2. Revelação do desenho utilizando reagentes para a impressão de circuitos, lixívia ou soda cáustica (Figura 6.10). Em um cenário ideal, utiliza-se um "positivador" em pó, vendido em conjunto com a placa pré-sensibilizada, diluído em água, para remover a emulsão fotossensível da placa nas regiões em que o cobre deve ser removido. Porém, este reagente não é encontrado com facilidade e por muitas vezes foi necessário utilizar alternativas como a lixívia e a soda cáustica, que muitas vezes comprometem a revelação do circuito;
3. Lavagem da placa para remover restos de reagente e emulsão, secagem, e preparação para a gravação do circuito. Esta é uma etapa crítica, pois requer uma inspeção cuidadosa do desenho sobre a placa, de preferência com o auxílio de uma lupa: se alguma parte do desenho apresentar falhas, deve-se utilizar um marcador permanente para cobrir as regiões falhadas. Se este cuidado não é tomado, pode-se realizar a etapa seguinte sem se dar conta de que o circuito apresenta falhas no desenho (como cortes ou interrupções nas linhas), o que pode levar a problemas no funcionamento dos circuitos. Estes problemas de facto ocorreram na impressão de alguns circuitos dos protótipos, como mostra a Figura 6.13;
4. Imersão da placa pré-sensibilizada em percloreto de ferro ($FeCl_3$) para remover o cobre nas regiões não recobertas pelo desenho do circuito (Figura 6.12). O percloreto de ferro reage com o cobre e o remove da placa, deixando os caminhos de cobre apenas sobre as partes cobertas por tinta. Nesta etapa, é importante verificar de tempos em tempos se impressão desejada já foi obtida, pois se o tempo necessário para remover o cobre das regiões expostas for excedido, o percloreto de ferro eventualmente corrói também a tinta que protege as regiões que devem permanecer intactas;

Placa de cobre não-sensibilizada neste processo, não se utiliza a gravação com luz UV em placas emulsionadas. Foi aplicado para os casos em que houve problemas ao longo das etapas descritas para o processo anterior e se perdeu a camada de emulsão fotossensível que recobria a placa de cobre. Existem diversas formas de transferir o desenho do circuito para uma placa de cobre, como a utilização de papel fotográfico ou papel específico para a impressão de circuitos. É possível também utilizar o próprio acetato e ferro de passar roupa a temperaturas mais baixas, com uma folha de papel entre estes. O desenho se solta do acetato após um tempo e adere à superfície de cobre (Figura 6.11). É importante que a impressão seja feita à laser, seja qual for o meio escolhido para transferir o desenho. O resto do procedimento é igual ao do primeiro processo;

A impressão *caseira* de circuitos mostrou-se um processo fundamental para o desenvolvimento de protótipos, em particular para a confeção de um número maior de unidades de amostragem. Embora envolva experimentação quanto ao tempo de exposição da luz, concentração de reagentes, e requeira prática nas etapas envolvidas na gravação, a impressão de circuitos tem vantagens importantes sobre a utilização de placas perfuradas e de prototipagem, pois permitem:

1. Poupar tempo e fabricar placas padronizadas;
2. Utilizar *designs* de circuitos com economia de espaço, e variar a posição de componentes e distribuição das ligações entre eles, pois há grande facilidade em manipular os desenhos desenvolvidos em *Autodesk EAGLE*;
3. Criar circuitos mais robustos e confiáveis em termos de soldas e ligações, sem que haja o risco de que algum fio se solte e comprometa o funcionamento da unidade de amostragem;
4. Fabricar placas customizadas do tipo *barbones* ou clones de placas `Arduino` , o que permite montar, do zero, um microcontrolador completo;

6.4.5 Protótipo 2 - Rede de sensores com protocolo DigiMesh

A partir dos testes do **Protótipo 1**, concluiu-se que um microcontrolador com função IoT é insuficiente para atender aos requisitos de transmissão de dados em tempo real e de comunicação e coordenação entre as unidades de amostragem. Quando foi realizada a revisão do estado-da-arte da monitorização ambiental

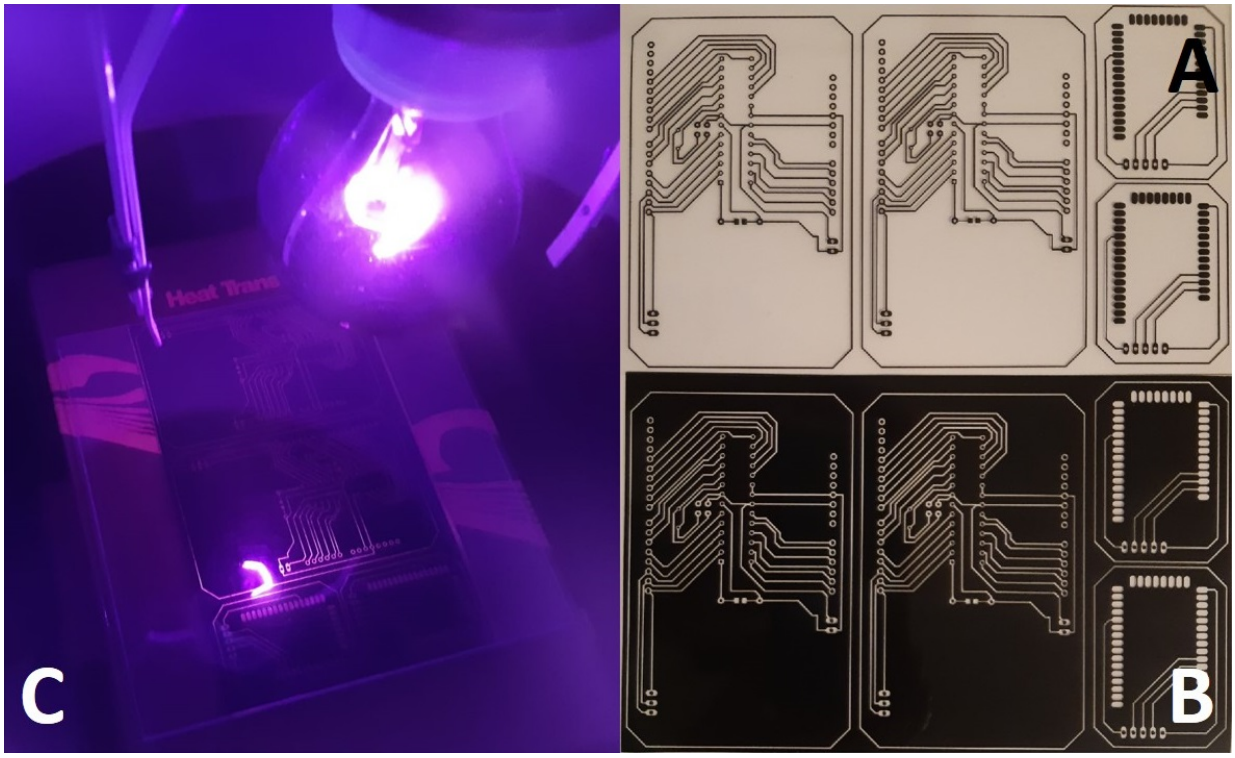


Figura 6.9: Impressões positiva (A) e negativa (B) do circuito em acetato, e gravação utilizando luz UV (C) em placa pré-sensibilizada.

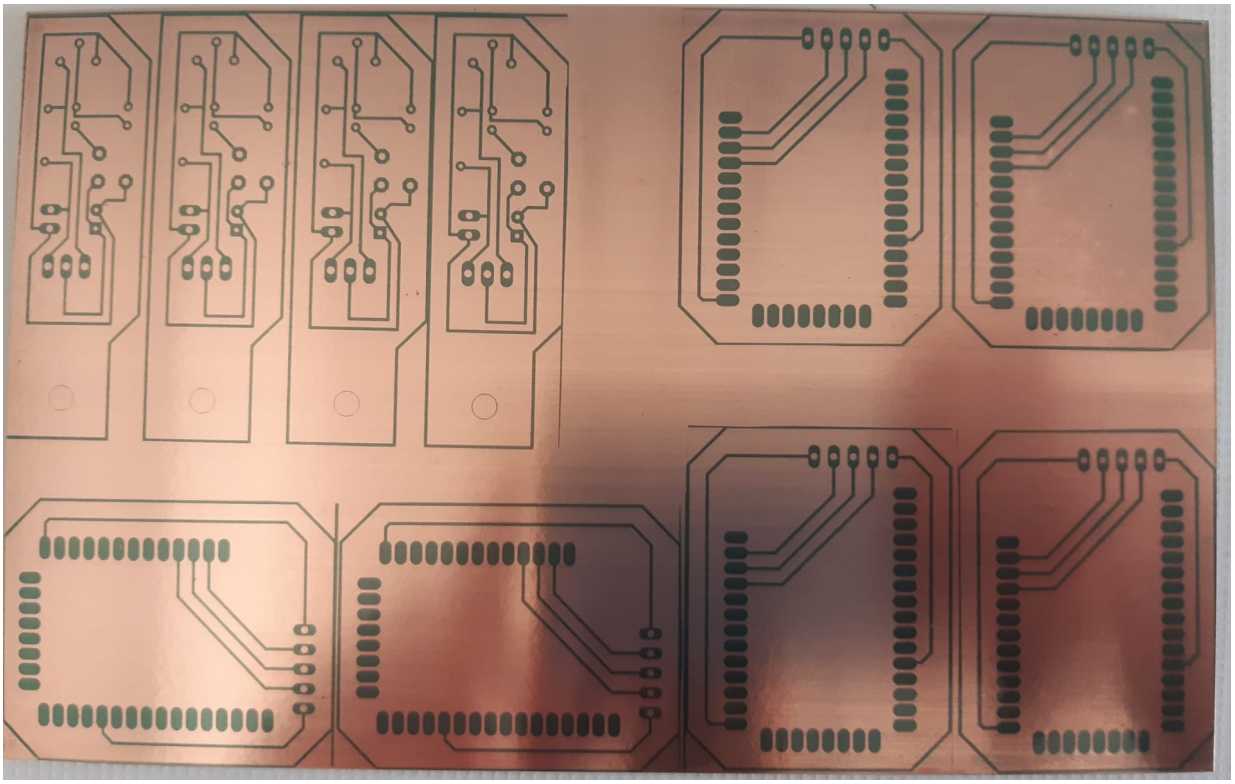


Figura 6.10: Placa revelada utilizando positivador, após exposição de placa pré-sensibilizada à luz UV.

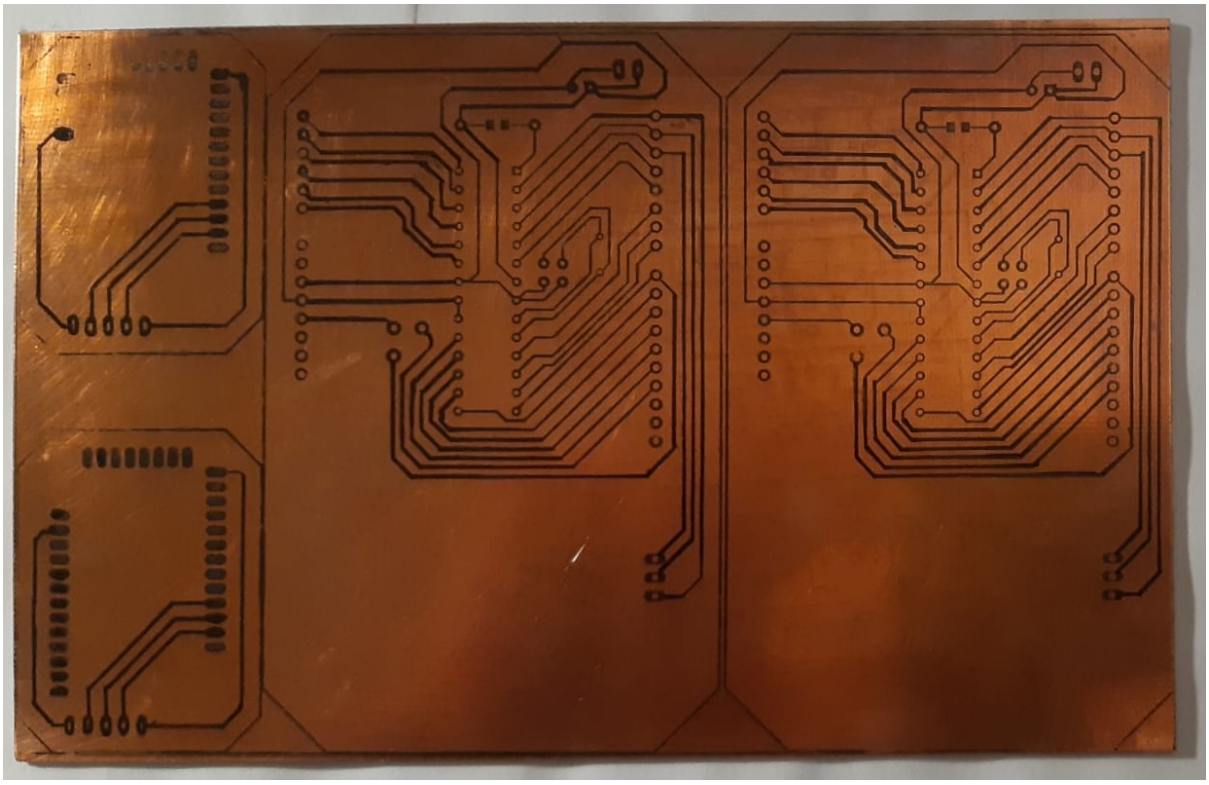


Figura 6.11: Gravação do desenho do circuito utilizando ferro de passar roupa e acetato, diretamente sobre placa de cobre. Nota-se que algumas partes do desenho ficaram comprometidas e outras foram reforçadas com marcador permanente.

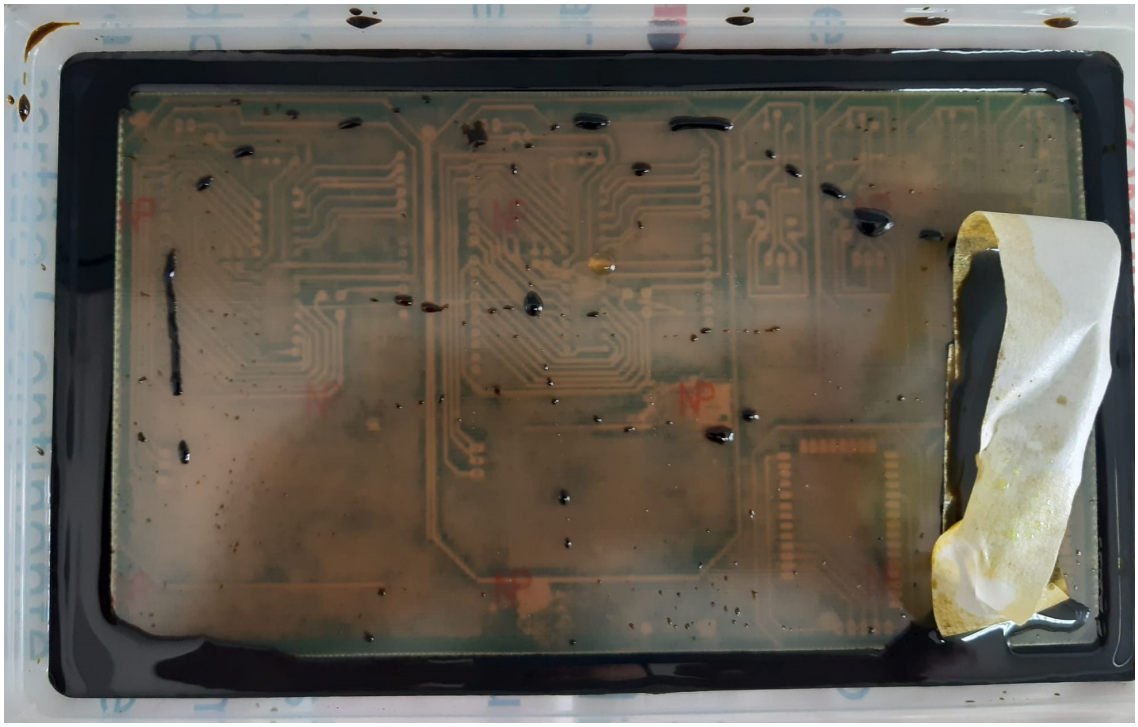


Figura 6.12: Imersão da placa gravada com o desenho do circuito em percloreto de ferro.

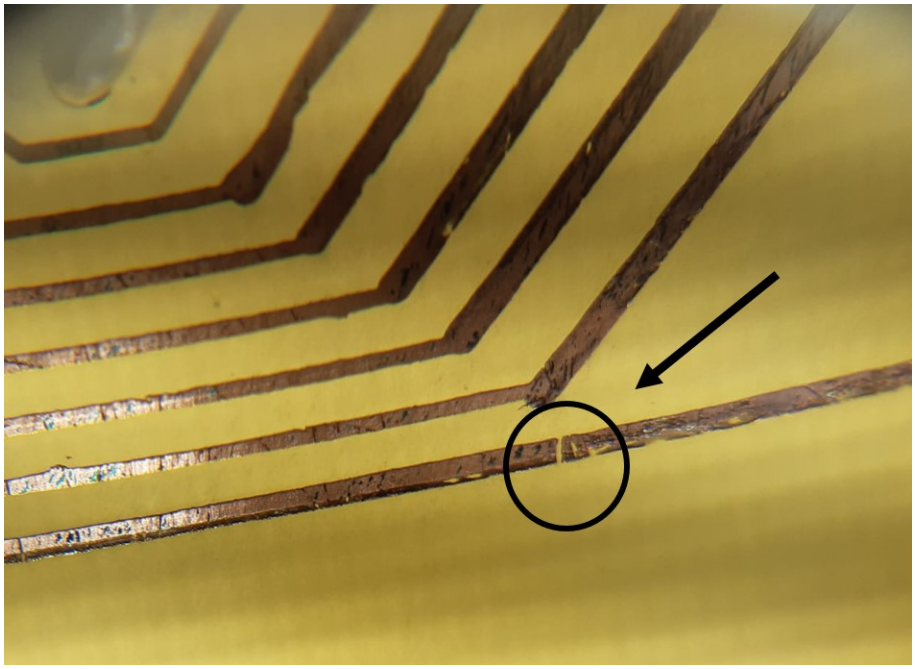


Figura 6.13: Defeito resultante do processo de impressão de um circuito.

subterrânea, encontrou-se uma série de publicações referindo um mesmo tipo de tecnologia de transmissão de dados sem fio, a comunicação **Zigbee**.

Como já foi discutido, esta tecnologia é favorável ao desenvolvimento de sistemas como o pretendido, pois permite formar, instantânea e automaticamente, uma rede de sensores sem fio com protocolo de comunicação simples e eficiente. Dentre os radio transmissores que utilizam este tipo de protocolo, os mais comuns e amplamente utilizados são os **Digi Xbee**.

O protocolo **Zigbee** é empregado em aplicações profissionais e também por desenvolvedores emphamadores em projetos caseiros ou *DIY*, havendo uma grande variedade de produtos que vão de *kits* de desenvolvimento mais simples e de configuração intuitiva até produtos profissionais com maior grau de sofisticação de configuração e aplicação.

Este projeto de investigação, tendo como objeto de estudo a temperatura em ambientes subterrâneos, e não a automação e controle de dispositivos de monitorização ambiental, é desenvolvido através de uma abordagem mais ingénua e experimental da eletrónica digital e não ambicionou a criação de dispositivos profissionais.

Em outras palavras, utilizou-se soluções prontas quando possível e aprofundou-se na eletrónica digital quando absolutamente necessário (o que de fato ocorreu ao longo de todo processo) para obter os instrumentos *low-tech* capazes de recolher os dados para a validação mas com potencial de aplicação em situações reais.

Na busca por projetos com este mesmo caráter experimental, descobriu-se que os rádios **Digi Xbee3** são vendidos em *kits* para a criação rápida de redes de sensores sem fio, auto-organizáveis, e configuráveis por meio de *software* com interface gráfica chamado *XCTU*, distribuído gratuitamente pelo fabricante. O Digi Xbee3 zigbee Mesh Kit é um *kit* de baixo custo e fácil programação, mas com possibilidade de configurações bastante amplas.

O **Digi Xbee3 Zigbee Mesh Kit** (Figura 6.4), utilizado no desenvolvimento do **Protótipo 2**, contém 3 rádios **Xbee 3** e 3 **grove boards**, uma espécie de *breakout board* ou placa de desenvolvimento com entrada *micro USB* para configuração via *XCTU*. A placa de desenvolvimento possui ainda botões de acionamento para sincronização dos dispositivos, LEDs que indicam receção e envio de informações, status de operação (modo *dormente* ou *acordado*), e intensidade do sinal, e circuitos de retificação de tensão.

Rádios Xbee 3 e protocolo Digimesh

Em uma rede de sensores com rádios **Xbee 3**, há um grande número de configurações possíveis em termos de arquitetura da rede e de modos de operação dos dispositivos. A arquitetura de uma rede de sensores corresponde ao modo como a rede se organiza e comunica entre nós; em uma rede **multi-hop**, a informação *salta* de um nó (cada unidade com rádio transmissor que compõe a rede) para o outro, em direção a um

dispositivo central que coordena o funcionamento da rede, chamado de **coordenador**. Uma rede pode ter mais de um **coordenador** para organizar a transmissão de dados, e os outros nós funcionam como **roteadores** - que além de transmitir os seus próprios dados também recebem e propagam os dados vindos de outros nós - ou como **dispositivos finais** (*end-devices*) que apenas propagam as informações da própria unidade em que se encontram fisicamente.

Coordenadores se comunicam com **roteadores** e **dispositivos finais**, tendo uma hierarquia sobre estes; **roteadores** recebem instruções do **coordenador** e podem receber dados dos **dispositivos finais** e de outros **roteadores**, que são "empurrados" em direção ao **coordenador**; **dispositivos finais** podem receber instruções de **coordenadores** ou **roteadores**, pois são os dispositivos de nível mais baixo na hierarquia de uma rede de sensores, mas não podem propagar ou empurrar adiante informações provenientes de outro dispositivo. Qualquer rádio pode ser programado para uma das três funções descritas, e o critério de decisão é sua posição e papel na rede de sensores.

Figura 6.14: Possíveis papéis desempenhados por um rádio **Xbee 3** na rede de sensores.

O alcance dos rádios **Xbee3**, quando colocados em linha de visão, é de até $1.2km$[15], mas isto pode variar em função do ambiente em que estão colocados: espera-se que, dentro de uma galeria, tenham menor alcance do que em uma área externa. Existem três arquiteturas possíveis para uma rede de sensores com rádios **Xbee 3**: os protocolos **Digimesh**, **Zigbee** e **802.15.4**, cada um com certas particularidades em termos de posicionamento dos nós, funcionamento cíclico, coordenação, e operação em *sleep-mode*.

zigbee apenas **dispositivos finais** podem entrar em *sleep mode* e só pode haver um **coordenador**. É bastante utilizada em aplicações de automação residencial e comercial, e para gestão inteligente do consumo de energia (como em termostatos, lâmpadas, e outros), pois é ideal para a transmissão de comandos à nível de controle, como ligar, desligar, ou operar dentro de um certo intervalo. Como

[15]Informações completas sobre estes dispositivos podem ser encontradas em: https://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/PDFs/90002277.pdf

coordenador e **roteadores** não entram em *sleep-mode*, devem ser alimentados preferencialmente através da rede elétrica, pois não atuam como dispositivos *low-power*, esgotando rapidamente a carga de pilhas e baterias se assim forem ligados. Em uma galeria, os nós da rede seriam ligados em linha, e todos, à exceção do coordenador devem operar a baterias, para que as unidades sejam móveis, de fácil instalação, substituição, e reposicionamento. Devido a estas limitações, este protocolo não é o mais adequado para a aplicação a ser desenvolvida.

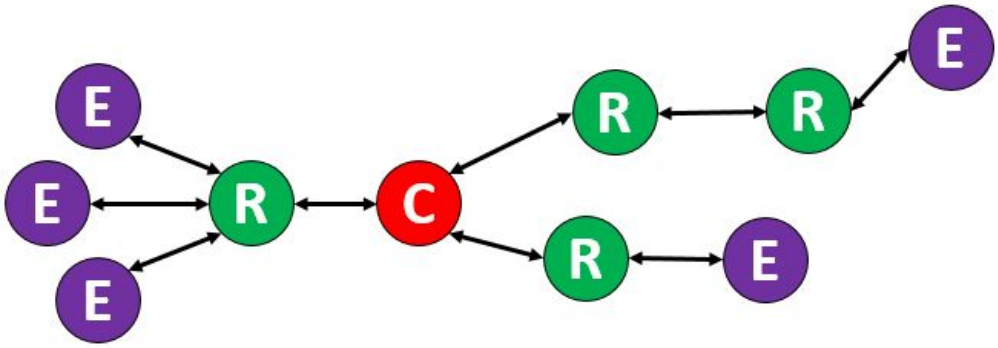


Figura 6.15: Topologia de uma rede **zigbee**.

802.15.4 uma aplicação típica para este protocolo são redes dos tipos *point-to-multipoint*, em que um nó central se conecta com diversos outros nós diretamente (topologia em estrela), ou *peer-to-peer*, que que cada dispositivo tem função dupla de servidor e cliente, podendo receber e transmitir dados através da rede. Os dispositivos configurados para este tipo de protocolo não requerem um **coordenador** e podem operar em *sleep mode*[16]. Embora este tipo de rede satisfaça os requisitos de operação cíclica dos dispositivos, a distribuição espacial dos nós e o fluxo de transmissão de pacotes de dados também não atendem aos objetivos desejados.

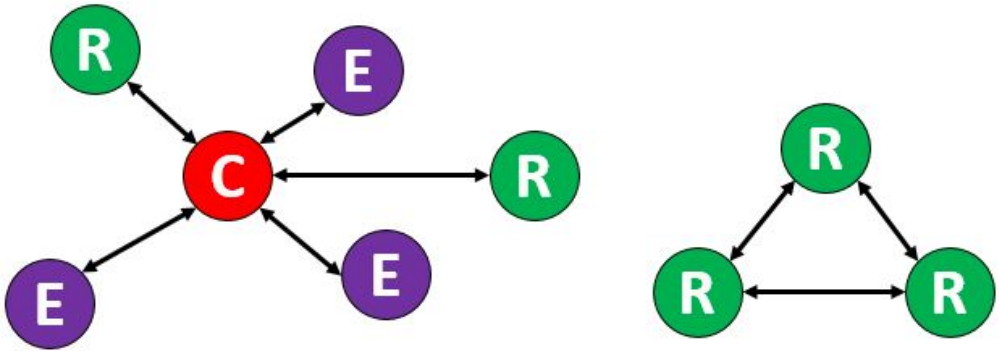


Figura 6.16: Topologia de uma rede **802.15.4**.

Digimesh este é um protocolo de fácil desenvolvimento, pois cria automaticamente uma rede para nós em uma mesma banda de transmissão, define o melhor caminho entre os nós da malha para chegar ao nó de destino, é autonomamente corrigida quando um nó muda de lugar ou para de funcionar (como na Figura 6.17), permite modos cíclicos de dormência, e se baseia em *multi-hoping*, de modo que os dados saltam entre os nós da rede até chegar ao coordenador [17]. Para uma galeria, este protocolo é ideal tanto em questão de operação cíclica e inteligência na formação e reorganização da rede, quanto em topologia, pois favorece a transmissão de informações através da rede de sensores quando os dispositivos estão ligados em linha. Este foi o protocolo de comunicação escolhido para o desenvolvimento das unidades de amostragem, que compõem uma rede de sensores auto-organizável e auto-curável.

Existem ainda aspetos técnicos dos protocolos de comunicação em termos de frequências e bandas de transmissão, velocidade de transmissão de dados, e camadas (*APL*, *APS*, *NWK*, *MAC* e *PHY*).

[16] Informações disponíveis em https://www.mouser.com/pdfdocs/digi-wp_zigbee.pdf
[17] Informações disponíveis em https://www.digi.com/resources/documentation/Digidocs/90002277/#Concepts/c_mesh_networking.htm?TocPath=Networking%257CDigiMesh%2520networking%257C_____0

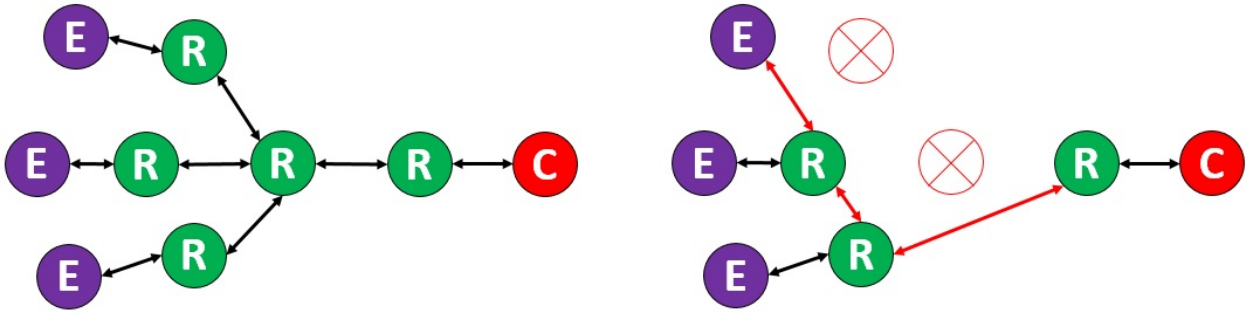


Figura 6.17: Topologia de uma rede **Digimesh**.

O protocolo de comunicação utilizado deve ser o mesmo para todos os nós de uma mesma rede, e é a base de todas as outras funcionalidades que um rádio pode desempenhar. A escolha do protocolo de comunicação envolve a definição e atualização de *firmware* do rádio através do *Software XCTU*.

Existem diversos tipos de *sleep-mode* (Figura 6.18). Dentre eles, somente os modos [4], [5], [7] e [8] permitem suspender completamente o funcionamento do dispositivo. É desejável que os nós da rede efetuem medições periódicas de temperatura, funcionem ciclicamente para poupar bateria, e que as medições sejam simultâneas para todos os pontos da malha, o que indica uma preferência pelo funcionamento síncrono. A Figura 6.19 mostra os parâmetros críticos para a configuração do modo de dormência síncrono em dispositivos **coordenadores**, e **roteadores** (de configuração equivalente aos **dispositivos finais**) utilizando protocolo **Digimesh**.

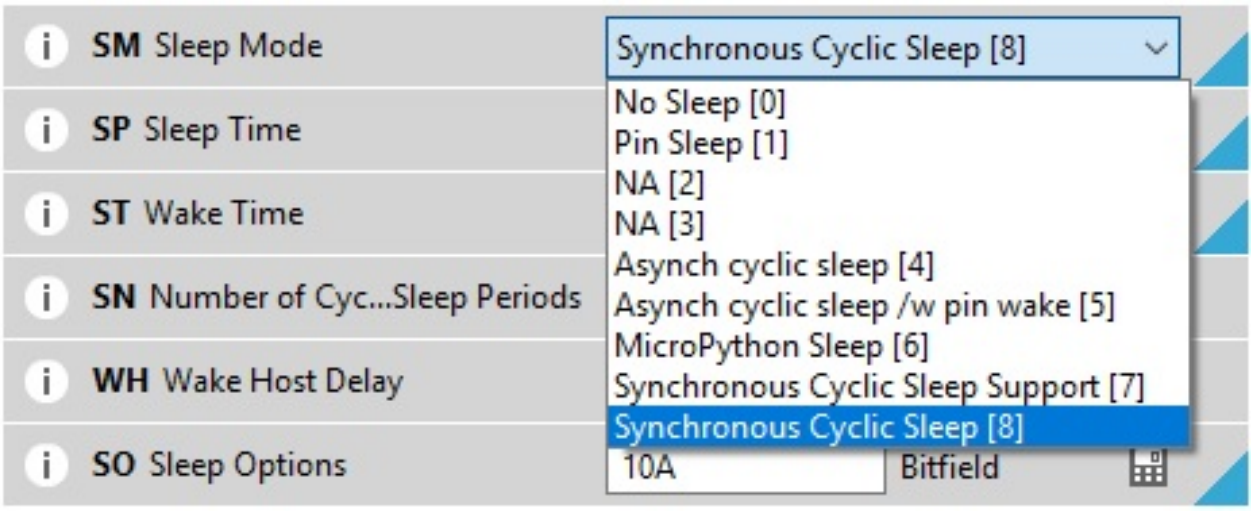


Figura 6.18: Modos de dormência para rádios **Xbee 3** configurados através do *software XCTU*.

Os parâmetros da Figura 6.19 são fundamentais para que não haja atraso no envio das informações, perda de sincronia dos rádios e falhas de comunicação entre dispositivos. Quando em períodos de dormência, os rádios consomem menos bateria, mas a corrente elétrica medida para o circuito do rádio ainda é de cerca de $2mA$, pois mantém em funcionamento alguns componentes do circuito da placa de desenvolvimento, como conversores de tensão, LEDs, e circuitos de conversão *USART-USB*, e do próprio rádio, como seu *RTC* interno e as funcionalidades mínimas para a deteção de um sinal de rádio vindo do coordenador da rede.

O parâmetro **SM** define o tipo de *sleep-mode*: **coordenadores** da rede podem ser também coordenadores dos ciclos de operação dos rádios, recebendo $\mathbf{SM} = \mathbf{7}$; os outros dispositivos, sujeitos aos comandos do coordenador dos ciclos de operação devem receber $\mathbf{SM} = \mathbf{8}$. Os parâmetros **SP** e **SN** definem o tempo em que o dispositivo permanece em dormência e o número de vezes que o tempo programado para **SP** deve se repetir até que o dispositivo acorde (o dispositivo fica em *sleep-mode* por $\mathbf{SP} \times \mathbf{SN}$ segundos). **ST** é o tempo em que o dispositivo fica acordado, e **SO** é um parâmetro crítico para o funcionamento da rede que envolve a atribuição de funções específicas a depender do tipo de dispositivo: para o **coordenador**, $\mathbf{SO} = \mathbf{9}$ implica que este dispositivo aja sempre como o coordenador dos ciclos de dormência e não acorde os dispositivos

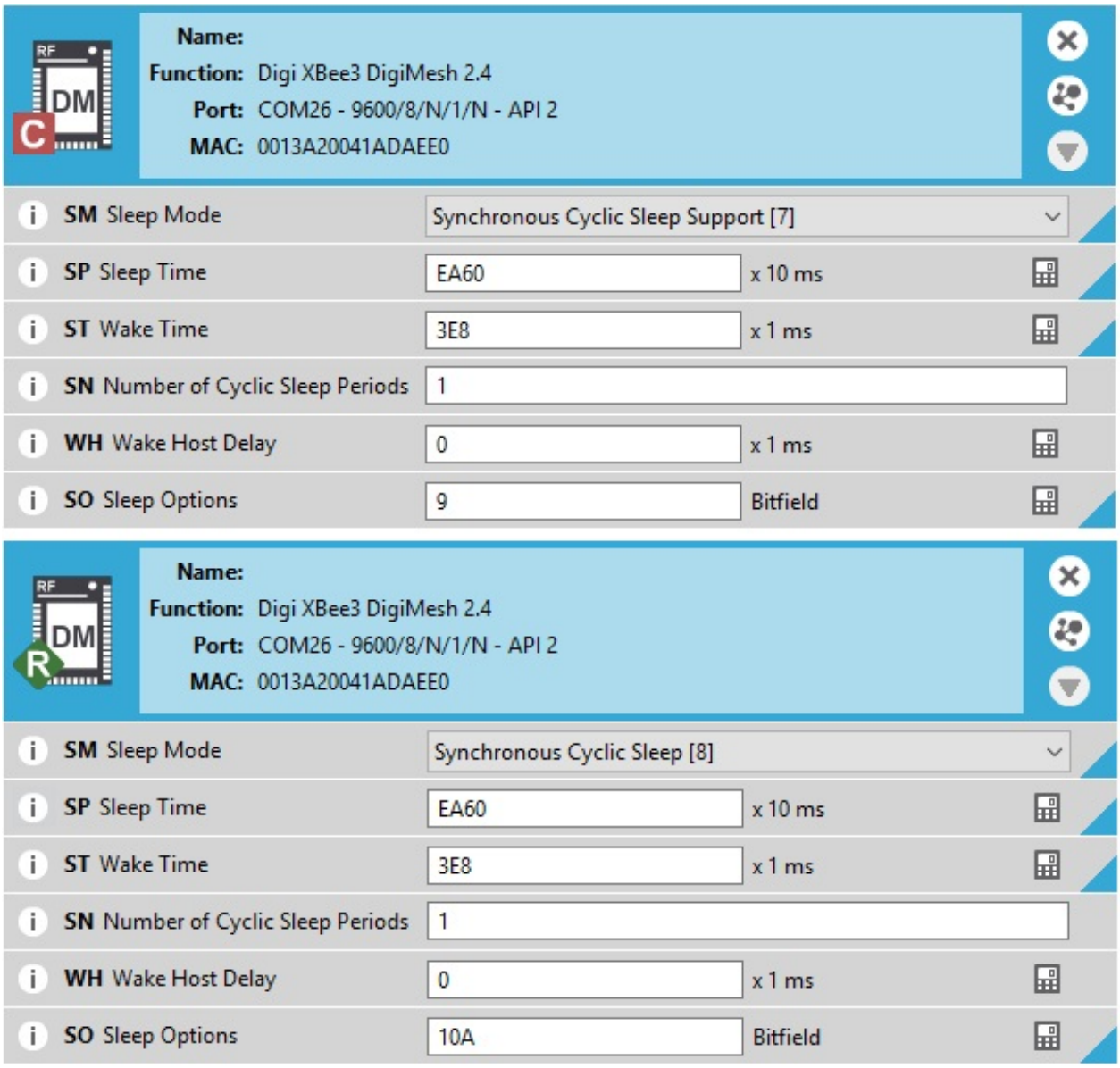


Figura 6.19: Configuração do modo de dormência síncrono através do *software XCTU*.

fora dos ciclos especificados para enviar mensagens em atraso, caso haja perda temporária de comunicação, impedindo que os nós da rede enviem pacotes de dados em momentos diferentes; para os **roteadores** e **dispositivos finais**, **SO = 10A** implica que nunca ajam como coordenador dos ciclos de operação ou enviem pacotes de dados em atraso, e que permaneçam acordados durante todo o tempo estipulado por **ST**, o que é fundamental para que tenham tempo de receber e enviar os dados recolhidos pelo microcontrolador.

Estes parâmetros são essenciais para o funcionamento adequado da rede de sensores de forma confiável e síncrona, tendo se verificado problemas decorrentes da atribuição incorreta de valores para **SO**, corrigidos e ajustados para os valores indicados na Figura 6.19 após diversos testes. Como o próprio rádio sincroniza o funcionamento da rede, pode ser um substituto do *RTC* utilizado nos protótipos anteriores para acordar o microcontrolador quando for o momento de efetuar as medições de temperatura. A lógica de funcionamento da rede de sensores passa a ser a seguinte:

1. rádios e microcontroladores ficam em *sleep-mode* até que o **coordenador** envie uma mensagem, propagada através de toda a rede, para que os rádios acordem;
2. os rádios de cada unidade de amostragem, por sua vez, acordam e enviam sinal para que os respetivos microcontroladores acordem;

3. os microcontroladores controlam os sensores para medirem temperatura, registam as leituras em cartão MicroSD, e enviam os dados para os rádios via porta *USART*, em pacotes contendo as medições e o endereço do dispositivo de chegada, neste caso o **coordenador da rede**;

4. os rádios transmitem automaticamente para o **coordenador da rede**, via protocolo Digimesh, os dados que chegam por suas portas-série;

5. os pacotes de dados saltam através dos nós da rede até chegarem ao **coordenador**;

6. o rádio **coordenador** deve estar ligado a um microcontrolador através de uma porta-série. O microcontrolador tem a função de interpretar os dados e transmiti-los para a nuvem;

Existem dois tipos de unidades: as **unidades remotas**, compostas por um rádio **Xbee 3** operando como **roteador** ou **dispositivo final**, e por um microcontrolador ligado a um conjunto de sensores que medem temperatura, sendo estes dispositivos os **transmissores** de dados; e a **unidade central**, composta por um rádio **Xbee 3** operando como **coordenador** e um microcontrolador que centraliza, armazena, interpreta, e transmite para a nuvem os pacotes de dados recebidos, sendo este dispositivo o **recetor** de dados. A rede de sensores é composta por um número variável de **unidades remotas transmissoras** e apenas uma **unidade central recetora**, que possuem lógicas, programações, e configurações diferentes.

Os rádio transmissores das **unidades remotas** são configurados preferencialmente como **roteadores**, devido à possibilidade de operarem como repetidores de sinal e propagadores da informação, o que não é possível se programados como **dispositivos finais**. O rádio transmissor da **unidade central** é configurado como **coordenador**, e tem como função acordar e coordenar os demais nós da rede e receber pacotes de dados.

O funcionamento das unidades de amostragem está condicionado a uma operação complementar entre rádio e microcontrolador. A configuração dos rádios é, em si, simples, ainda que dependente do ajuste correto de uma grande quantidade de parâmetros, pois é feita através de uma interface gráfica intuitiva com quantidade limitada de opções de configuração. Os microcontroladores, por outro lado, recebem mais uma camada de complexidade, pois passam agora a controlar também a criação, formatação, e envio de pacotes de dados para os rádio transmissores através de comunicação serial, além de terem de ser capazes de reconhecer um sinal enviado pelo rádio para interromper o *sleep-mode* no instante em que o **coordenador** estipula que sejam feitas as medições de temperatura.

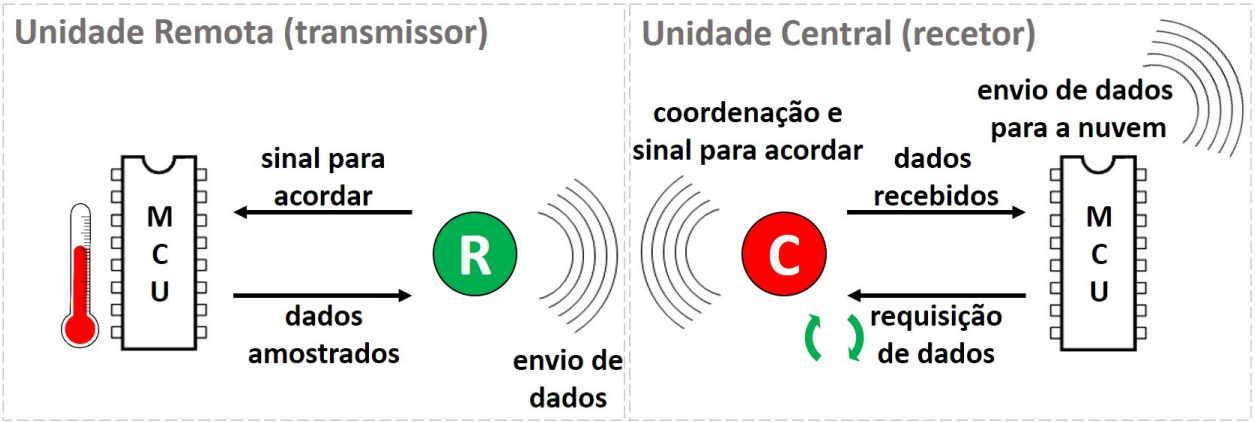


Figura 6.20: Interação entre microcontroladores e rádios para **Unidades Remotas (transmissor)** e para **Unidade Central (recetor)**.

Microcontroladores dos transmissores e recetores

Para as **unidade remotas**, manteve-se a utilização de `Arduino` , mas utilizou-se um `Raspberry Pi` na **unidade central**, devido às vantagens que estes apresentam em termos de versatilidade e capacidade de processamento.

Uma outra vantagem importante da substituição do `Arduino` pelo `Raspberry Pi` é a utilização de programação `Python` para *escutar* a saída do rádio **coordenador** da rede. Este algoritmo foi desenvolvido

em conjunto com outro que faz o envio periódico de dados para um servidor *Google Drive*, o que também é uma vantagem em relação ao envio de dados para a nuvem via **Arduino** : não há limitação de caracteres enviados e nem restrição quanto ao servidor utilizado, existem bibliotecas **Python** mais adequadas à conexão direta aos servidores, e é possível produzir um código mais robusto e confiável para lidar com o envio.

Mais especificamente, no **Arduino** é impossível enviar ficheiros `.csv` ou `.txt` de uma só vez, que não são aceites pelo servidor *Ubidots*, de modo que é preciso implementar uma sub-rotina de leitura do ficheiro `.txt` dos dados armazenados no cartão MicroSD. Esta função faz uma leitura das últimas n entradas do ficheiro, as armazena em variáveis, e as envia, uma a uma, para o servidor, como mostra o código desenvolvido para o **Protótipo 1**.

Este artifício de envio de dados para a nuvem a partir da leitura de dados gravados no cartão *MicroSD* foi utilizado pois não convém enviar leituras de temperatura para a nuvem a medida em que são feitas pelos sensores, já que esta tarefa é dispendiosa do ponto de vista do processamento e implicaria em reservar maiores intervalos de tempo para o funcionamento do dispositivo *acordado*, aumentando substancialmente o consumo de baterias. Também se excederia o limite de dados aceito pelo servidor.

Percebe-se que, de fato, a aplicação de um microcontrolador comum para lidar com o envio de dados para a nuvem é bastante limitada. O **Raspberry Pi** , por outro lado, lida de forma bastante simples com este envio, como mostra o seguinte trecho de código, contendo parte da função que faz o envio periódico de dados para o servidor *Google Drive*:

Listagem (6.1) de `sendtodriveTese.py`

```
import os
from pydrive.auth import GoogleAuth
from pydrive.drive import GoogleDrive


a = 0
gauth = GoogleAuth()
get_refresh_token = True

# tento utilizar as credenciais já salvas para autenticar
gauth.LoadCredentialsFile("/home/pi/Desktop/Projects/mycredentialpi.txt")

# verifico as credenciais; se não funcionarem, autentico pelo navegador
if gauth.credentials is None:
    gauth.GetFlow()
    gauth.flow.params.update({"access_type": "offline"})
    gauth.flow.params.update({"approval_prompt": "force"})
    gauth.LocalWebserverAuth()
    a = 1
elif gauth.access_token_expired:
    gauth.LocalWebserverAuth()
    a = 1
else:
    gauth.Authorize()

# salvo as credenciais atualizadas
gauth.SaveCredentialsFile("/home/pi/Desktop/Projects/mycredentialpi.txt")

# acedo ao Drive
drive = GoogleDrive(gauth)

# se for utilizado o navegador, fecho as guias abertas depois
if a == 1:
    os.system("pkill chromium")

# envio os ficheiros para o Google Drive
file = drive.CreateFile()
file.SetContentFile("/home/pi/Desktop/Projects/tt.txt")
```

Listagem (6.1) de sendtodriveTese.py (cont.)

```
39 file.Upload()
40 file1 = drive.CreateFile()
41 file1.SetContentFile("/home/pi/Desktop/Projects/tn1.txt")
42 file1.Upload()
```

Este algoritmo verifica a existência de credenciais válidas para acessar ao servidor, as atualiza caso tenham expirado, ou força a autenticação através do navegador (que guarda os dados de acesso ao servidor), fechando as guias abertas após a conclusão da autenticação. Uma vez obtida a autorização do servidor, é feito o envio dos ficheiros. Esta função é chamada periodicamente dentro do algoritmo que ”escuta” a porta série do rádio transmissor, executado em plano de fundo a partir do instante em que o **Raspberry Pi** é ligado.

Outra vantagem importante do **Raspberry Pi** é a possibilidade de conexão a um servidor *VNC*[18], que permite acessar remotamente o dispositivo e extrair os ficheiros contendo as medições de temperatura sempre que desejado, necessitando apenas de ponto de acesso à Internet próximo à **unidade central**.

A configuração do acesso remoto à **unidade central** é fundamental também para manipular e reparar o dispositivo a distância, o que é uma vantagem porque evita a deslocação até o local de testes e dispensa-se a utilização de ecrã, rato, e teclado. Também é possível utilizar esta conexão remota para manipular o radio transmissor, realizar diagnósticos da rede de sensores através do **coordenador**, e alterar parâmetros de todos os rádios que integram a rede, como os tempos de ciclo de dormência e de funcionamento. O serviço padrão de acesso remoto do **Raspberry Pi** via *Real VNC* permite ainda aceder à **unidade central** por meio de dispositivos móveis, como *smartphones*.

Por fim, a execução automática do programa **Python** quando o dispositivo é ligado previne a parada do funcionamento da **unidade central** caso ocorram interrupções ou oscilações no fornecimento de energia elétrica. Por utilizar sistema operativo **linux**, o **Raspberry Pi** favorece o desenvolvimento de uma aplicação mais completa e confiável do ponto de vista da programação.

Quanto à ligação física, a **unidade central** tem estrutura bastante simplificada, pois utiliza apenas a porta *USART* do **Raspberry Pi** e do módulo de rádio **Xbee 3**, que se comunicam utilizando os pinos *Rx* e *Tx*. Para a alimentação, utilizam-se os pinos *3.3V* e *GND* do **Raspberry Pi** para fornecer uma alimentação direta e estável para o rádio, fazendo um *bypass* no circuito de retificação de tensão do **Xbee 3**. O **Raspberry Pi** é alimentado pela a rede elétrica através de uma entrada *USB*.

Rapsberry	Xbee3
3.3V	Vin
GND	GND
RXD	Dout
TXD	Din

Tabela 6.1: Ligações entre **Raspberry Pi** e Xbee 3 na **unidade central**.

Foi escolhido o modelo **Raspberry Pi Zero W** devido ao seu baixo custo e por oferecer as funcionalidades mínimas necessárias ao sistema de amostragem. Como as duas placas possuem pinos, foram utilizados cabos tipo *jumper* para conectar os dispositivos da **unidade central**. O código que permite ”escutar” continuamente a saída *Rx/Tx* do rádio é mostrado a seguir.

Listagem (6.2) de Recetor.py

```
1 import RPi.GPIO as GPIO
2 import serial
3 import time
4 import urllib
5 from xbee import XBee
```

[18] *Virtual Network Computing* é uma plataforma de partilha de ecrã que permite controlar remotamente um computador através de outro. Um dispositivo conectado a um *servidor* VNC permite que outro dispositivo conectado a um *visualizador* VNC visualize seu ecrã e o controle por meio de rato e teclado.

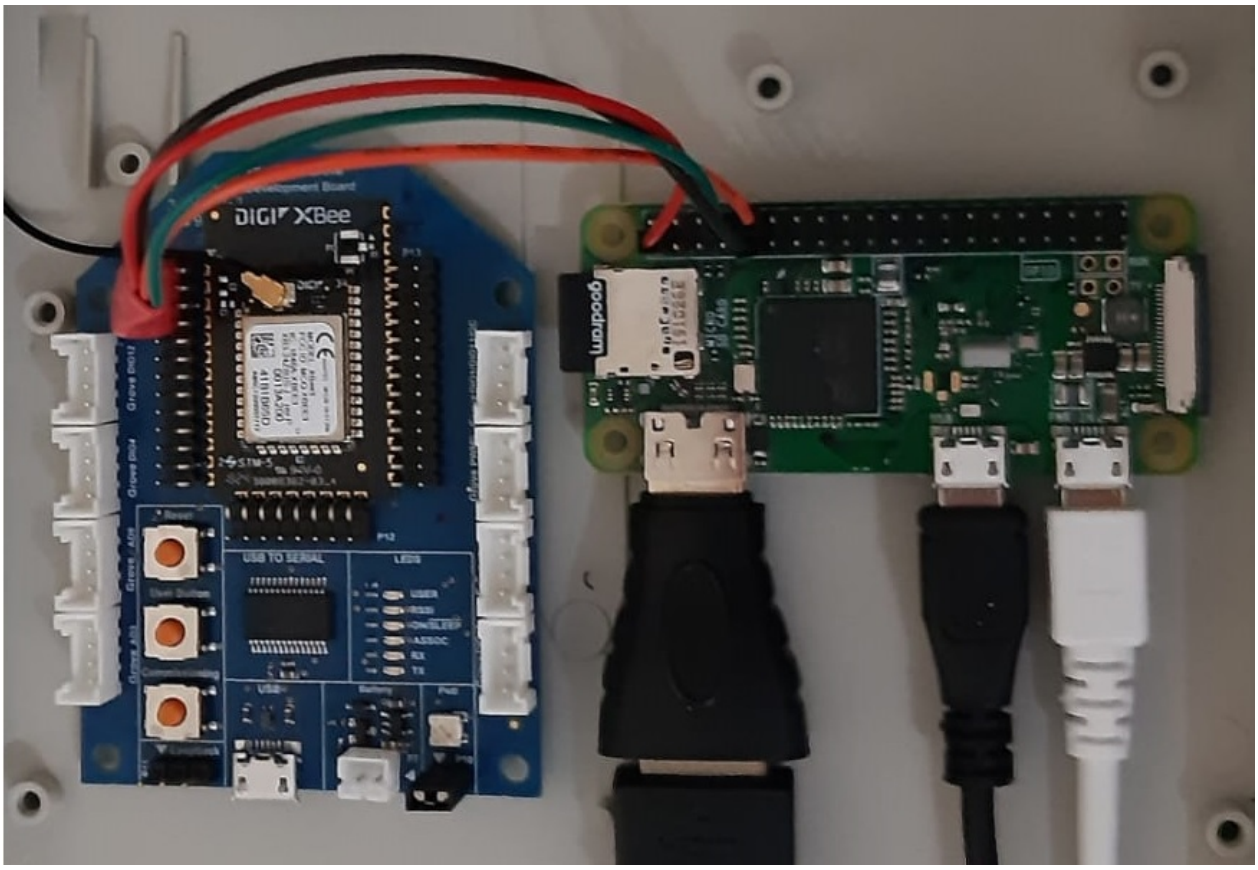


Figura 6.21: Ligações físicas entre Xbee3 e `Raspberry Pi` para o **recetor/unidade central**.

Listagem (6.2) de Recetor.py (cont.)

```
6  import struct
7  import datetime
8
9
10 SERIAL_PORT = "/dev/ttyS0"
11 BAUD_RATE = 9600
12
13 GPIO.setmode(GPIO.BCM)
14 GPIO.setwarnings(False)
15
16 node = 0
17 temp = 0.0
18 node_float = 0.0
19
20
21 def receive_data(data):
22     print("Received data: {}".format(data))
23     data["rf_data"].decode("utf-16")
24     # imprimo opcionalmente os pacotes que chegam
25     # print("Packet: {}".format(data))
26     # print("Data: {}".format(data['rf_data']))
27
28     # quebro o pacote de dados recebido em partes
29     print(struct.unpack("2f", data["rf_data"]))
30     b = struct.unpack("2f", data["rf_data"])
31     temp = b[0]
32     node_float = b[1]
33     node = int(node_float)
34     epochtime = time.time()
35
36     # utilizo o codigo do sensor para nomear o ficheiro de destino
37     if node != 0:
38         filename = "/home/pi/Desktop/Projects/tn%i.txt" % node
39         with open(filename, mode="a") as file:
40             file.write("%i;%f;%f;\n" % (node, temp, epochtime))
41         filename2 = "/home/pi/Desktop/Projects/tt.txt"
42         with open(filename2, mode="a") as file:
43             file.write("%i;%f;%f;\n" % (node, temp, epochtime))
44
45
46 ser = serial.Serial(SERIAL_PORT, baudrate=BAUD_RATE)
47 xbee = XBee(ser, callback=receive_data, escaped=True)
48
49 # Uma vez a cada hora, verifico se há conexão a internet
50 # Se houver, envio os ficheiros ao o Drive
51 while True:
52     now2 = datetime.datetime.now()
53     if now2.minute == 22 and now2.second < 1:
54         try:
55             urllib.request.urlopen("http://216.58.192.142", timeout=10)
56             exec(open("/home/pi/Desktop/Projects/send_to_drive_v2.py").read())
57             print("file sent")
58         except urllib.error.URLError:
59             print("no connection")
60     try:
61         time.sleep(0.001)
62     except Keyboardinterrupt:
63         break
```

Listagem (6.2) de Recetor.py (cont.)

```
64
65 GPIO.cleanup()
66 xbee.halt()
67 ser.close()
```

Este algoritmo requer que os pacotes de dados enviados pelas **unidades remotas** possuam uma estrutura definida, contendo um código de identificação do sensor que realizou as medidas (um número único que identifica cada sensor de temperatura de cada nó da rede), e a medida de temperatura com dez casas decimais. A **unidade central** "carimba" os dados recebidos com o tempo, consultado pelo `Raspberry Pi` quando um pacote de dados é recebido, e armazena cada medida em dois ficheiros diferentes: `tt.txt`, que contém medições de temperatura de todos os sensores da rede, e `tn.txt`, que é o ficheiro separado das medições feitas por cada sonda de temperatura, em que **n** é o número de identificação da sonda. A estrutura do ficheiro obedece à ordem **(n;temperatura;horário)** para facilitar o tratamento dos dados.

Uma vez a cada hora, enviam-se os ficheiros associados a cada sensor e o ficheiro com medidas de todos os sensores para o servidor *Google Drive*. Os ficheiros ficam também acessíveis via *Real VNC* porque são salvos no cartão de memória do `Raspberry Pi` . É fundamental garantir acesso à Internet estável e confiável para que os dados possam ser extraídos continuamente da **unidade central**.

O desenvolvimento das **unidades remotas** foi bastante mais complicado do que o desenvolvimento da **unidade central**. Foram utilizados `Arduino UNO` e `Arduino Mega` disponíveis no laboratório de eletrónica do Departamento de Engenharia de Minas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para a montagem das **unidades remotas** do **Protótipo 2**, além do `Arduino Nano 33 IoT` utilizado no **Protótipo 1**. Os sensores de temperatura e o módulo de cartão MicroSD foram montados sobre *shields* próprias para `Arduino UNO` e `Arduino Mega`, como mostra a Figura 6.22, e sobre placa perfurada para a única unidade montada utilizando `Arduino Nano 33 IoT`.

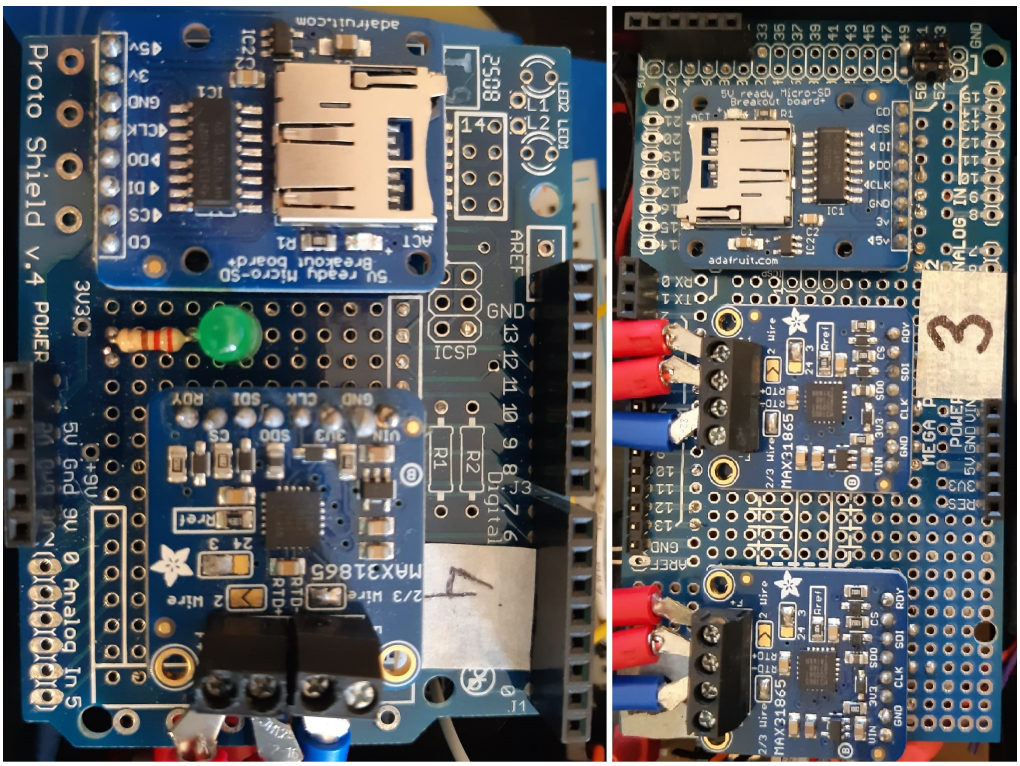


Figura 6.22: *Shields* de sensores para `Arduino UNO` (a esquerda) e `Arduino Mega` (a direita).

No **Protótipo 2**, foi utilizado um sensor de temperatura para cada **unidade remota** montada com `Arduino UNO`, e duas sondas de temperatura para as **unidades remotas** montadas com `Arduino Nano 33 IoT` ou `Arduino Mega`, com finalidade de medir, para um mesmo ponto, temperaturas do ar e da rocha. A

montagem definitiva sobre as *shields* se deu após testes com placas de prototipagem e com base nas ligações feitas para o **Protótipo 1**, adequando-as para as novas funcionalidades dos protótipos e para a utilização de comunicação via rádio.

O algoritmo desenvolvido para as unidades remotas montadas em **Arduino UNO** é mostrado na sequência do texto, e a Tabela 6.2 mostra as ligações físicas entre componentes eletrónicos das **unidades remotas**.

Listagem (6.3) de Transmissor.ino

```
//############################DEFINIÇÕES INICIAIS##############################
//-----------------------------inclusão de bibliotecas----------------------
#include <Adafruit_MAX31865.h>

#include <XBee.h>

#include <BlockDriver.h>

#include <MinimumSerial.h>

#include <SdFat.h>

#include <SdFatConfig.h>

#include <sdios.h>

#include <SysCall.h>

#include <SPI.h>

#include <avr/sleep.h>

#include <avr/power.h>
 //--------------------------------------------------------------------------

File myFile;
SdFat SD;
XBee xbee = XBee();

//---------------Configuração MAX31865: (CS, DI, DO, CLK)--------------------
Adafruit_MAX31865 thermo = Adafruit_MAX31865(2, 3, 4, 5);
// Valor do resistor de referência (4300.0 para PT1000)
#define RREF 4300.0
#define RNOMINAL 1000.0
//--------------------------------------------------------------------------
//---------------------------declaração de variáveis-----------------------
int pin2 = 2;
int node_number = 1;
float temp = 0;
int led = 8;
//--------------------------------------------------------------------------
//-----------------------definições de envio de dados----------------------
//definição do pacote de dados a ser enviado
uint8_t payload[8] = {
  0,
  0,
  0,
  0,
  0,
  0,
  0,
  0
```

Listagem (6.3) de Transmissor.ino (cont.)

```
};
//endereço do xbee receptor
XBeeAddress64 addr64 = XBeeAddress64(AxAAAAAAAA, AxAAAAAAAA);
ZBTxRequest zbTx = ZBTxRequest(addr64, payload, sizeof(payload));
ZBTxStatusResponse txStatus = ZBTxStatusResponse();
//converter float em um string
union u_tag {
  uint8_t b[4];
  float fval;
}
u;
//-----------------------------------------------------------------------------
//######################FIM DAS DEFINIÇÕES INICIAIS############################

//########################CORPO PRINCIPAL DO CÓDIGO############################
//----------------------------------setup--------------------------------------
void setup() {
  //abertura da comunicação serial
  Serial.begin(9600);
  //pino utilizado para acordar o Arduino
  pinMode(pin2, INPUT_PULLUP);
  //abertura da comunicação SPI
  SPI.begin();
  //iniciar o sensor de temepratura e o amplificador de sinal MAX31865
  thermo.begin(MAX31865_3WIRE);
  //iniciar a comunicação com o rádio
  xbee.setSerial(Serial);
  //utilizar o led como indicador
  pinMode(led, OUTPUT);
  //desativar ADC (conversão analógio-digital)
  ADCSRA = 0;
  //------inicializar o cartão microSD------
  if (!SD.begin(10)) {
    //Serial.println("initialization failed!");
    while (1);
  }
  //criar um ficheiro para guardar os dados
  myFile = SD.open("tn3", FILE_WRITE);
}
//-----------------------------------------------------------------------------

//-------------------------executado quando acorda----------------------------
void loop() {
  //pisca o led quando acorda
  digitalWrite(led, HIGH);
  delay(100);
  digitalWrite(led, LOW);
  //sensor mede a temepratura
  uint16_t rtd = thermo.readRTD();
  float ratio = rtd;
  ratio /= 32768;
  temp = thermo.temperature(RNOMINAL, RREF);
  //salva no cartão SD
  myFile.print("node = ");
  myFile.print(node_number);
  myFile.print("temp = ");
  myFile.print(temp);
  myFile.print("measure = ");
```

Listagem (6.3) de `Transmissor.ino` (cont.)

```
111   myFile.println(measure);
112   myFile.sync();
113   //crio o pacote de dados com a temepratura
114   u.fval = temp;
115   for (int i = 0; i < 4; i++) {
116     payload[i] = u.b[i];
117   }
118   //cria o pacote de dados com o número do sensor
119   u.fval = node_number;
120   for (int j = 0; j < 4; j++) {
121     payload[j + 4] = u.b[j];
122   }
123   //envia para o receptor via rádio Xbee3 da unidade remota
124   xbee.send(zbTx);
125   //entra em sleep mode
126   delay(100);
127   enterSleep();
128 }
129 //-------------------------------------------------------------------------
130 //####################FIM DO CORPO PRINCIPAL DO CÓDIGO#######################
131
132 //#####################DECLARAÇÃO DEFUNÇÕES AUXILIARES#######################
133 //---------------função vazia para ser chamada quando acorda----------------
134 void pin2Interrupt(void) {
135   //volta do sleep mode
136 }
137 //-------------------------------------------------------------------------
138 //------------------função para entrar em sleep mode-----------------------
139 void enterSleep(void) {
140   //utilizo um sinal alto do rádio para acordar o Arduino no pino 2
141   attachInterrupt(0, pin2Interrupt, RISING);
142   delay(150);
143   //Arduino entra em sleep mode
144   set_sleep_mode(SLEEP_MODE_PWR_DOWN);
145   sleep_enable();
146   sleep_mode();
147   //quando acorda, continua a partir daqui
148   sleep_disable();
149 }
150 //-------------------------------------------------------------------------
151 //#################FIM DA DECLARAÇÃO DE FUNÇÕES AUXILIARES###################
```

Pinos	MAX31865	MicroSD	Xbee3	Alimentação
CS	D6	D10	-	-
SCK/CLK	D3	D13	-	-
MOSI/SDI	D5	D11	-	-
MISO/SDO	D4	D12	-	-
VCC	3.3V	3.3V	3.3V	Vin
GND	GND	GND	GND	GND
Rx	-	-	Dout	-
Tx	-	-	Din	-

Tabela 6.2: Ligações entre componentes do circuito e **`Arduino Uno`**.

A rede de sensores montada a partir do **Protótipo 2** contou com 8 **unidades remotas**, dentre as quais

três possuíam duas sondas de temperatura (destas três, duas foram montadas com **Arduino Mega** e uma com **Arduino Nano 33 IoT**), e cinco possuíam apenas uma sonda de temperatura (todas montadas com **Arduino Uno**). As **unidades remotas** têm mesmo número de amplificadores de sinal **MAX31865** e de sondas de temperatura, e um **módulo microSD** e um rádio **Xbee3** cada.

A alimentação das **unidades remotas** foi desenvolvida para favorecer a instalação das unidades de forma independente da rede elétrica, contando com dois circuitos em paralelo de 8 baterias AA ligadas em série, o que equivale a duas fontes de $12V$ ligadas em paralelo. Apesar dos requisitos de alimentação dos controladores e dos rádios serem de $3.3V$ a $5V$, foram utilizadas tensões maiores para garantir uma maior carga e prolongar a autonomia dos circuitos. Utilizou-se os circuitos de regularização de tensão das placas **Arduino** para reduzir a tensão de alimentação dos circuitos de baterias para $3.3V$ e $5V$, utilizando os pinos destas placas para alimentar as placas de sensores e rádios de acordo com os requisitos de cada circuito e conforme a Tabela 6.2.

Mesmo com uma maior carga de alimentação e com funcionamento cíclico com *sleep-mode* dos controladores e rádios, a autonomia das unidades remotas foi de apenas 5 dias para os **Arduino UNO** e **Arduino Mega**, e de 20 dias para o **Arduino Nano 33 Iot**, períodos aquém do desejado para a coleta de dados para a validação do modelo teórico. Esta baixa autonomia se deve a alguns aspetos construtivos das unidades remotas e também a algumas características inerentes às placas **Arduino** e **XBee®** 3:

1. As placas **Arduino** possuem circuitos auxiliares que consomem boa parte da bateria do circuito, como o circuito de conversão da porta *USART* para *USB*, *LEDs* e outros indicadores, e reguladores de tensão;
2. As placas **XBee®** 3 possuem também circuitos de retificação de tensão que consomem bateria, além de *LEDs*, conversores *USB*, potenciómetros, resistores, e outros;
3. Os sensores e outros módulos consomem bateria continuamente, mesmo que o controlador esteja em *sleep-mode*;
4. O **Arduino** possui diferentes modos de dormência, que não desligam por completo os componentes do processador, como os *clocks* internos, e os pinos digitais e analógicos;
5. O **XBee®** 3, assim como os **Arduino** , utiliza pré-definições para os modos de dormência, e não desliga automaticamente os pinos que não estão sendo utilizados;
6. Os reguladores de tensão consomem mais carga do que os próprios circuitos;

Para melhorar o desempenho das **unidades remotas**, foi necessário realizar um estudo sobre o consumo de corrente frente à diferentes configurações dos dispositivos, sob o ponto de vista das ligações entre componentes do circuito, tensão de alimentação, programação, e remoção de circuitos auxiliares presentes nas placas. A gestão do consumo de corrente do circuito foi a parte mais difícil, longa, e delicada do desenvolvimento dos protótipos, e o que mais aproxima a parte experimental do projeto de investigação de uma aplicação profissional de monitorização ambiental em minas subterrâneas.

Eliminar consumos espúrios de corrente dos circuitos possibilitou sair do domínio dos Miliampère para o domínio dos **Microampère**, criando circuitos *low-power* com autonomia superior a 6 meses.

6.4.6 Estudo da autonomia de unidades remotas de medição

Circuitos *barebones*

Com base em informações disponíveis em fóruns de discussão sobre a programação de microcontroladores, em especial na página do desenvolvedor **Nick Gammon**[19], que faz uma análise detalhada do consumo de corrente em placas **Arduino Uno**, chegou-se a conclusão de que utilizar a placa **Arduino Uno** comprada diretamente do fabricante não atenderia às necessidades quanto à autonomia do circuito. Seguindo a sugestão do desenvolvedor, deu-se início à construção de circuitos *barebones*, isto é, circuitos simplificados, com o mínimo necessário para o funcionamento do microcontrolador, dispensando os componentes que causam um maior consumo de corrente no circuito.

Assim como o **Arduino** , o rádio **XBee®** 3 conta com uma montagem em uma placa de desenvolvimento com componentes e circuitos que consomem corrente de forma intensiva. Foi projetado também um circuito *barebones* para o rádio, dispensando a placa de desenvolvimento fornecida pelo fabricante. Este processo será detalhado na secção seguinte.

[19]Disponível em https://www.gammon.com.au/power

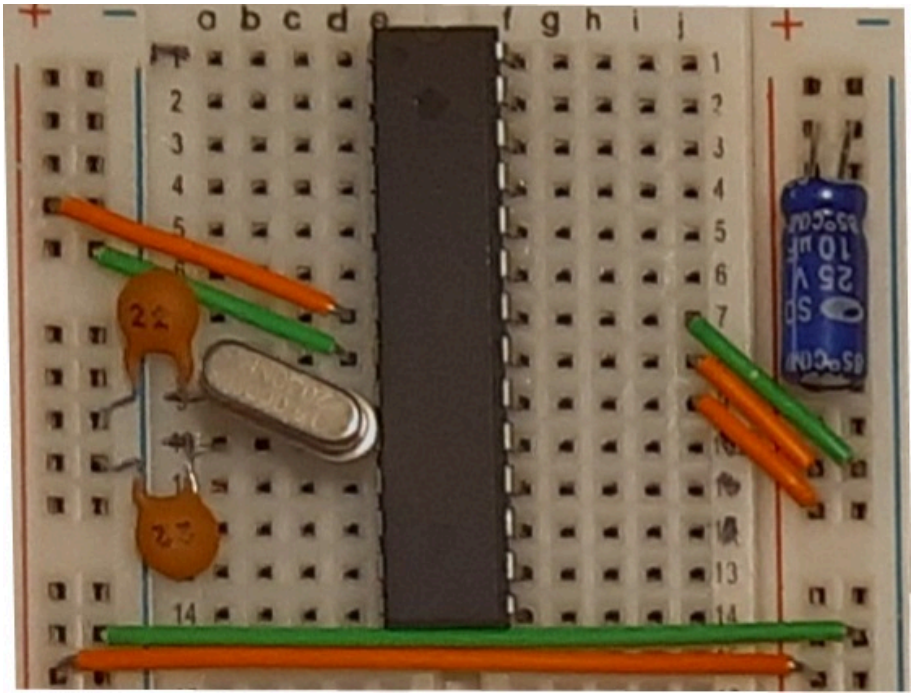


Figura 6.23: Montagem *barebones* de um **Arduino Uno** sobre placa de prototipagem.

Circuito de sensores

As *shields* contendo sensores, amplificadores, e módulo de cartão MicroSD consomem corrente de forma permanente, ainda que os sensores não sejam ativados pelo controlador, e mesmo que o processador esteja em *sleep-mode*. Assim, buscou-se maneiras de interromper a alimentação dos circuitos de sensores quando o microcontrolador tem seu funcionamento suspenso. Uma das formas de fazê-lo é utilizar *MOSFETS*, em uma espécie de chave liga-desliga eletrónica, que, através de um dos pinos do controlador, abre e fecha o circuito dos sensores, como mostra a Figura 6.24. Este circuito é bastante comum quando se utiliza um microcontrolador para controlar o funcionamento de outros circuitos de maior tensão, como motores elétricos, por exemplo, alimentados por cargas separadas da alimentação do microcontrolador.

Circuitos de alimentação

Para evitar a necessidade de utilizar reguladores de tensão, desenvolveu-se os circuitos de alimentação para oferecerem diretamente uma diferença de potencial aceitável para o controlador e para o rádio. Apesar da tensão nominal mínima exigida para um **Arduino Uno** ser de $5V$, o processador só requer $4.5V$, e a alimentação pode ser feita com três pilhas AA em série; do mesmo modo, o rádio demanda $3.3V$ para sua alimentação, mas opera com tensões a partir de $3V$, o que se obtém com duas pilhas AA em série. Com a experiência adquirida através da prática e do desenvolvimento destes circuitos, percebeu-se de fato que é mais vantajoso fornecer a alimentação mínima para um circuito, retirando os reguladores de tensão dos circuitos, do que aumentar a carga de alimentação (o que supostamente também aumentaria a autonomia), mas ter que utilizar reguladores de tensão; estes se mostraram os maiores "ladrões" de corrente de todo o circuito.

Programação e *sleep modes*

Testou-se diversas versões do código dos controladores das **unidades remotas**, utilizando diferentes configurações de dormência recomendadas por **Nick Gammon** (Tabela 6.3). Ainda, para o microcontrolador, foi feita a desativação manual de certas funcionalidades do processador Atmega328p para reduzir ainda mais o consumo.

A configuração dos rádios **XBee**® 3 foi modificada para a desativação manual de pinos inutilizados, que devem ser ajustados para *output-low*, e de resistores internos *pull-up* e *pull-down* (Figura 6.25), reduzindo significativamente a corrente consumida.

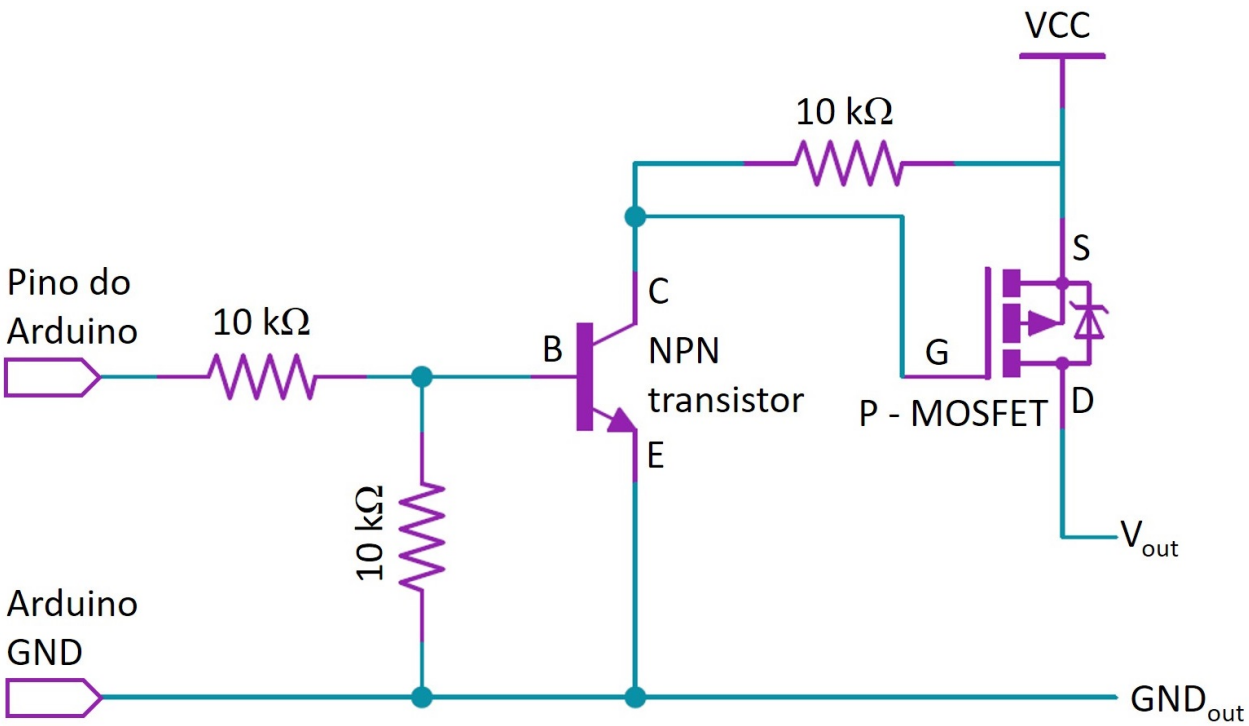


Figura 6.24: Circuito típico *high-side switching* com MOSFETS.

Sleep mode	Consumo
SLEEP_MODE_IDLE	15.0 mA
SLEEP_MODE_ADC	6.50 mA
SLEEP_MODE_PWR_SAVE	1.62 mA
SLEEP_MODE_EXT_STANDBY	1.62 mA
SLEEP_MODE_STANDBY	0.84 mA
SLEEP_MODE_PWR_DOWN	0.36 mA

Tabela 6.3: *Sleep-modes* para **`Arduino Uno`** e respetivos consumos.

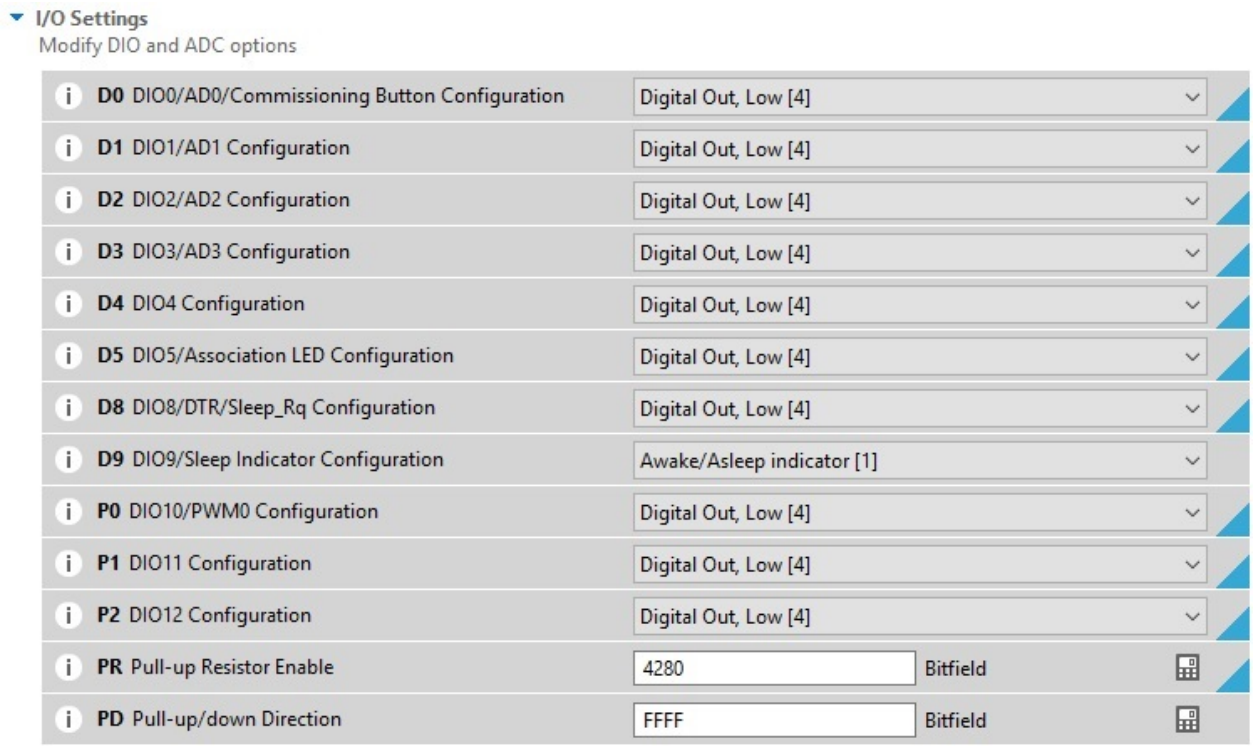


Figura 6.25: Configuração dos pinos não utilizados do rádio **Xbee 3** através do *software XCTU*.

Em relação ao rádio **XBee**® 3, apenas três pinos não foram desativados: o **Dout**, que comunica com o `Arduino` permitindo o envio de dados pelo microcontrolador, o **Din**, que recebe os pacotes de dados, e o **DIO9**, que fica ligado quando o rádio da **unidade remota** recebe um sinal do **coordenador** da rede para acordar e é utilizado para interromper a dormência do microcontrolador. Com esta configuração, e utilizando um circuito *barebones* para o **Xbee 3** no lugar da *grove board*, o consumo de corrente do rádio durante períodos de dormência se reduz a menos de **1μA**.

O microcontrolador, além da utilização de uma placa contendo apenas os componentes indispensáveis e um circuito liga-desliga para os sensores e módulos, desliga a as comunicações **Serial** e **SPI**, desativa outras funcionalidades do processador, como a conversão analógico-digital, define as direções mais adequadas (entre `INPUT` e `OUTPUT`) para os pinos digitais, desativa os resistores internos *pull-up* e *pull-down*, e utiliza o `SLEEP_MODE_PWR_DOWN`, que é o mais econômico dentre os *sleep modes*. Este procedimento leva a um consumo de corrente do microcontrolador, durante períodos de dormência, de aproximadamente **250μA**. A Tabela 6.4 mostra o consumo do rádio e do microcontrolador das **unidades remotas** antes (**Protótipo 2**) e depois (**Protótipo 3**) dos ajustes do consumo de corrente, em períodos de funcionamento pleno e de dormência.

Versão	Operação	Microcontrolador	Xbee3
Protótipo 2	sleep mode ligado	5mA 15mA	1mA 10mA
Protótipo 3	sleep mode ligado	250μA <10mA	<1μA <5mA

Tabela 6.4: Consumo de corrente para **unidades remotas** nas versões do **Protótipo 2** e do **Protótipo 3**.

O consumo durante o funcionamento dos circuitos, quando os microcontroladores estão acordados, não se reduz de forma tão pronunciada quanto o faz durante os períodos de dormência. Por esta razão, foram adotados ciclos de funcionamento para as **unidades remotas** com longos períodos em *sleep-mode* e intervalos curtos de funcionamento pleno, garantindo um prolongamento da carga das pilhas. A secção seguinte mostra em detalhes o desenvolvimento do **Protótipo 3** e a montagem dos circuitos **low-power**.

6.4.7 Protótipo 3 - Confeção de placas *barebones* de baixo consumo

Em relação ao microcontrolador, o que se buscou no desenvolvimento deste protótipo foi uma montagem definitiva para o circuito da Figura 6.23, em que as ligações de cada pino do processador Atmega328p tivessem a mesma posição da placa **`Arduino Uno`**, já que as *shields* de sensores disponíveis eram em maioria compatíveis e encaixáveis sobre este tipo de placa. O trabalho em relação ao projeto da placa **`Arduino`** *barebones* foi o de ligar os pinos do processador às barras de pinos equivalentes a um **`Arduino Uno`**, e posicionar os componentes de modo a permitir o encaixe das *shields*.

Para o rádio **XBee**® 3, pretendeu-se criar uma placa *barebones* para acomodar apenas o rádio, sem os demais componentes da *grove board*, com saídas para alimentação, para os pinos conectáveis aos pinos digitais correspondentes à comunicação serial e ao pino de interrupção do **`Arduino`** *barebones*, e com pinos que permitissem a ligação rápida de *jumpers* para a reconfiguração do rádio utilizando a *grove board*. Foi desenvolvida também uma placa para o circuito liga-desliga da *shield* de sensores, usando MOSFETs, transistores, e resistores, de acordo com o circuito da Figura 6.24.

A divisão do projeto em três placas diferentes se deu pela necessidade de ter circuitos impressos no topo da placa e também na parte de baixo, em duas camadas de circuitos. Isto seria impossível de ser feito em placa única, já que a placa pré-sensibilizada utilizada possuía apenas uma das superfícies revestida por cobre.

As Figuras 6.26 e 6.27 mostram os projetos para os três circuitos mencionados, desenvolvidos em *Autodesk Eagle*, e a Figura 6.28 mostra a montagem final da placa *barebones low-power* composta pelas três placas desenvolvidas para cada circuito.

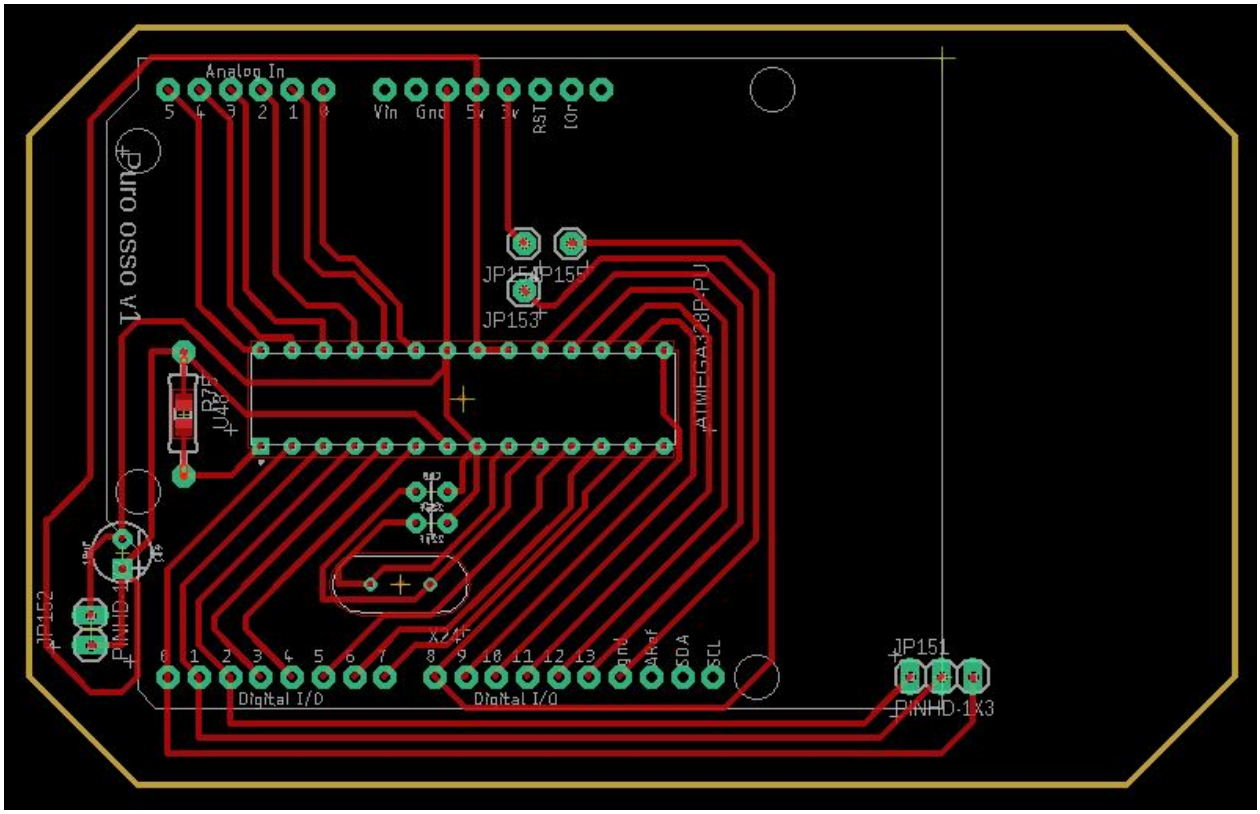


Figura 6.26: Projeto em *Autodesk Eagle* para a placa **`Arduino`** *barebones*.

Por fim, foi necessário adaptar as outras três *shields* - uma para **`Arduino Nano 33 IoT`** e outras duas para **`Arduino Mega`** - para a placa *barebones low-power*. Também foram feitas alterações em todas as *shields* de sensores para comportarem dois sensores de temperatura por **unidade remota** e para receberem alimentação através do circuito liga-desliga.

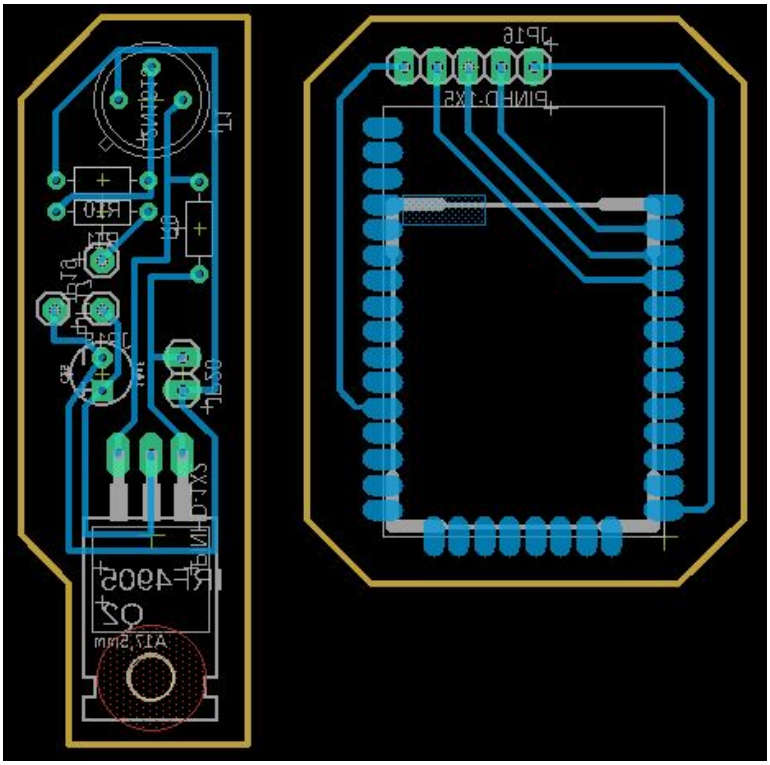


Figura 6.27: Projeto em *Autodesk Eagle* para as placas liga-desliga (esquerda) e *Xbee barebones* (direita).

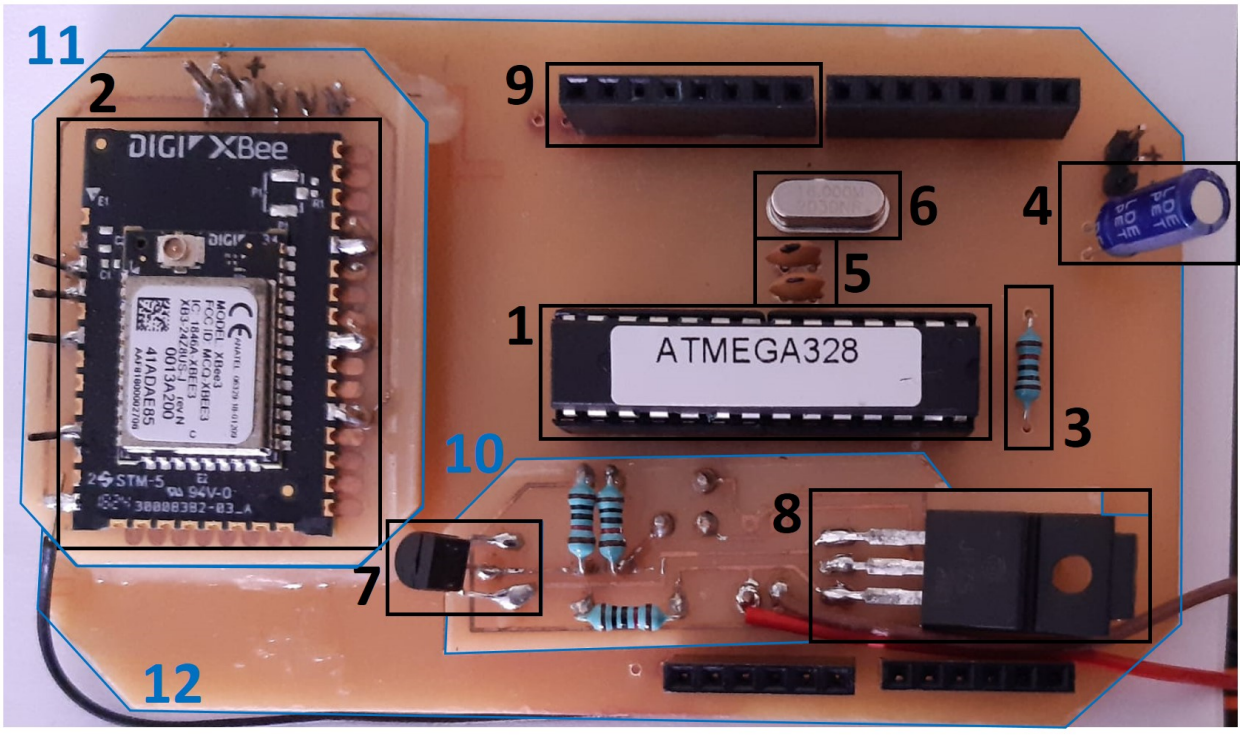


Figura 6.28: Montagem final da placa *barebones low-power*.

6.4.8 Montagem final das unidades de medição

Com o circuito *low-power* pronto, deram-se as montagens dos circuitos de alimentação e das **unidades remotas** em caixas de madeira para proteger os circuitos das condições-ambiente das galerias subterrâneas, como mostra a Figura 6.29. Foram utilizadas caixas de MDF de baixo custo para a montagem das **unidades remotas**, que quando instaladas nas galerias de teste, foram vedadas utilizando sacos plásticos, protegendo-as da humidade ambiente.

Cada **unidade remota** conta com os seguintes componentes, numerados conforme a Figura 6.28:

1. Um processador Atmega328p **(1)**;
2. Duas sondas de temperatura Pt1000 e dois módulos amplificadores de sinal MAX31865;
3. Um *datalogger* (módulo de cartão MicroSD);
4. Dois circuitos de alimentação, com duas caixas de baterias AA,uma para duas baterias AA em série e outra para 3 baterias AA em série;
5. Um rádio **XBee**® 3 **(2)** com antena;
6. Quatro resistores de 10kΩ **(3)**, um capacitor de 10μF **(4)**, dois condensadores de 22pF **(5)**, um oscilador de 16MHz **(6)**, um transístor do tipo NPN **(7)**, e um P-MOSFET **(8)**;
7. Três placas impressas *barebones* compondo um circuito *barebones low-power*:
   a) Um circuito liga-desliga para as *shields* **(10)**;
   b) Uma placa **XBee**® 3 *barebones* para o rádio **XBee**® 3 **(11)**;
   c) uma placa `Arduino` *barebones* para o microcontrolador **(12)**;
8. pinos e soquetes (9) diversos para encaixar os componentes e as *shields*;
9. *jumpers* e cabos unifilares e multifilares para ligar os circuitos de alimentação e outros componentes;

A Tabela 6.5 mostra uma estimativa de custos para os componentes utilizados e para cada **unidade remota**. A Tabela 6.6 traz uma estimativa de custo para a **unidade central**.

Para a realização das **Campanhas de amostragem**, dispunha-se de 5 **unidades remotas** e 1 **unidade central**. O processo de instalação e teste das unidades, entretanto, demonstrou alguns pontos de fragilidade dos circuitos, sob o ponto de vista construtivo, e alguns defeitos foram observados no decorrer da recolha de dados. Dentre eles, destacam-se:

1. Mau-contacto das caixas de pilhas: alguns modelos utilizados para o suporte das pilhas, com interruptor, apresentaram defeitos e prejudicaram a instalação de algumas unidades de amostragem. Quando possível, foram substituídas por outros suportes de pilhas;
2. Problemas na gravação dos circuitos, como na Figura 6.13, e na solda de pinos e componentes, como na Figura 6.30;
3. Problemas de vedação das caixas, causando oxidação de componentes e ligações dos circuitos, como na Figura 6.31;
4. Mau-contacto/desprendimento de ligações das sondas de temperatura devido à manipulação de seus fios durante a instalação das unidades de amostragem;
5. Rompimento de fios e ligações quando as placas não estavam devidamente presas à caixa de madeira;

Figura 6.29: Montagem final das **unidades remotas**.

Componente	Preço unitário/ ajustado para uma unidade remota	Quantidade	Custo total
Atmega328p	€2,24	1	€2,24
Xbee3	€20,16	1	€20,16
Resistor 10kΩ	€0,09	4	€0,36
Capacitor 10 μF	€0,21	1	€0,21
Condensador 22pF	€0,23	2	€0,46
Oscilador 16MHz	€0,20	1	€0,20
Transistor NPN	€0,28	1	€0,28
P-MOSFET	€1,50	1	€1,50
Kit soquetes barebones	€1,30	1	€1,30
Soquete processador	€0,32	1	€0,32
Caixa 2 x AA	€1,30	1	€1,30
Caixa 3 x AA	€1,95	1	€1,95
Pilha AA	€0,32	5	€1,60
Módulo MAX31865	€12,96	2	€25,92
Sonda Pt1000	€12,96	2	€25,92
Módulo *MicroSD*	€6,50	1	€6,50
Cartão *MicroSD* 32gb	€6,07	1	€6,07
Placas pré-sensibilizadas	€7,10	1	€7,10
Produtos para a impressão do circuito	€1,10	-	€1,10
Cabos e *jumpers*	€1,00	-	€1,00
Cola, solda e outros materiais	€1,00	-	€1,00
Caixa de madeira	€1,50	1	€1,50
Total	-	-	€107,99

Tabela 6.5: Custo de produção de uma **unidade remota**.

Componente	Preço unitário	Quantidade	Custo total
`Raspberry Pi Zero WH`	€18,70	1	€18,70
Fonte de alimentação	€8,75	1	€8,75
Xbee3	€20,16	1	€20,16
Cartão MicroSD 32gb	€6,07	1	€6,07
Cabos e *jumpers*	€1,00	-	€1,00
Caixa de madeira	€1,50	1	€1,50
Total	-	-	€54,68

Tabela 6.6: Custo de produção de uma **unidade central**.

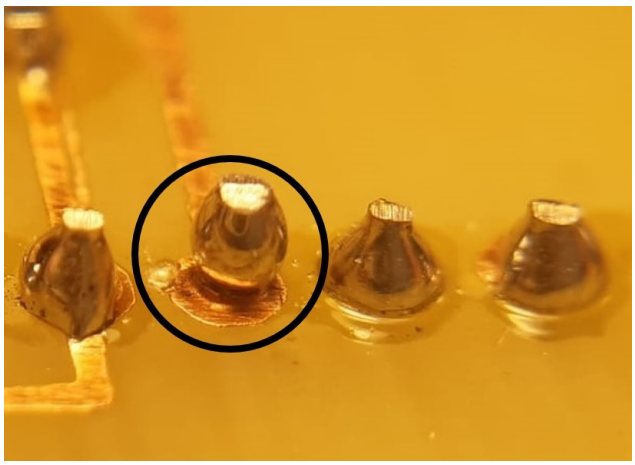


Figura 6.30: Problema na solda de um pino da placa *barebones*.

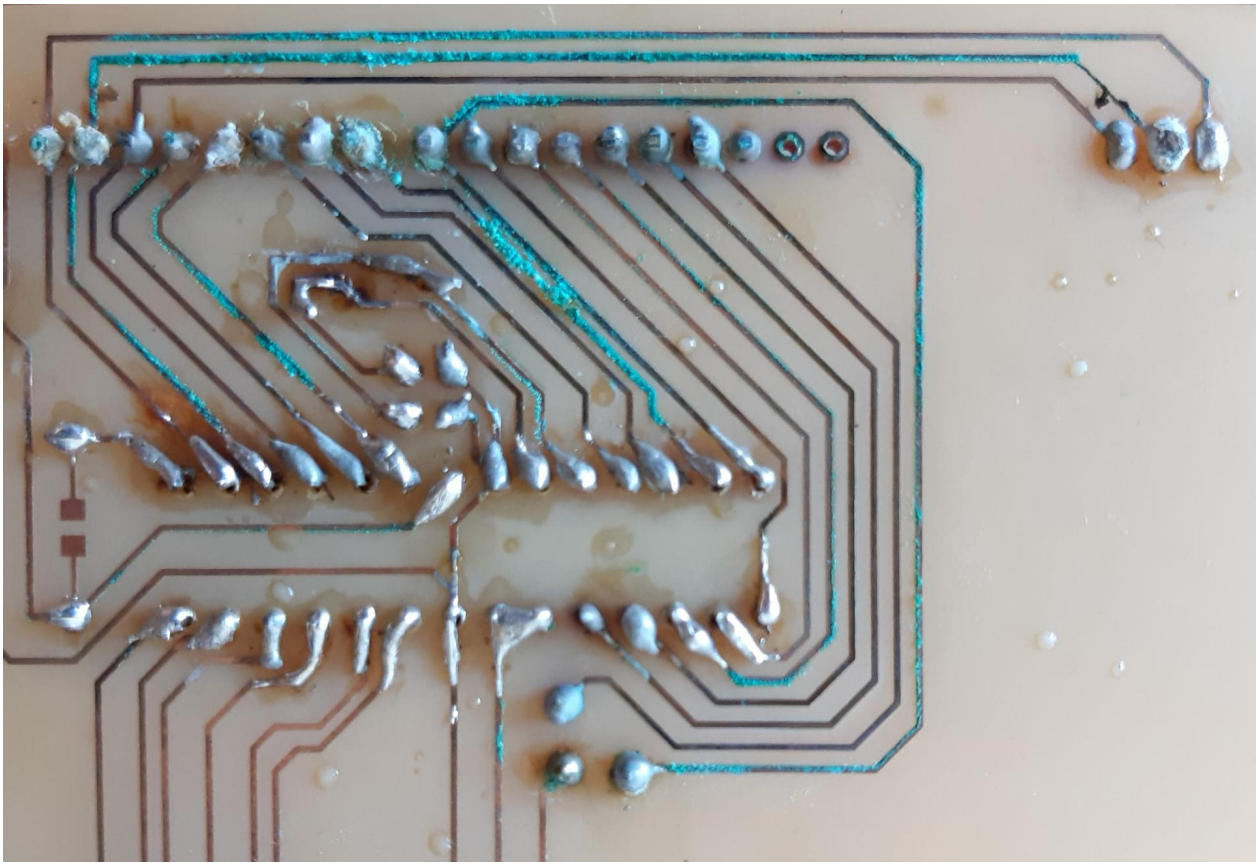


Figura 6.31: Oxidação das ligações do circuito devido à humidade.

6.4.9 Equipamentos utilizados nas campanhas de amostragem

A primeira campanha de amostragem realizada foi a das **Caves da Murganheira**, em que se utilizaram os equipamentos montados em caixas de madeira, como descrito na secção anterior. Como a extensão da galeria era pequena, foi possível ocupa-la com as unidades remotas em linha de visão de modo a estabelecer comunicação wireless. Foi instalado, no exterior da galeria, um roteador *Wi-Fi* para suprir conexão de Internet à **Unidade Central**, também instalada fora da galeria.

A segunda campanha de amostragem foi realizada nas **Minas da Panasqueira**. Como as galerias eram extensas, não havia possibilidade de instalar um sistema de amostragem sem fio como foi feito na **Campanha das Caves da Murganheira**, pois isso dependeria de um número elevado de nós de sensores para cobrir toda a extensão da rede de galerias entre sua entrada e o ponto de instalação das unidades. Como também haviam sido detetados alguns problemas durante a **Campanha das Caves da Murganheira**, substituiu-se as caixas de madeira por caixas-estanque, e foi feita uma montagem dos circuitos sobre base de acrílico parafusada no interior da caixa.

Algumas alterações foram feitas no circuitos, devido à impossibilidade de utilizar comunicação sem fio, tendo sido desenvolvido um novo protótipo:

1. Os rádios **XBee**® 3, que enviavam sinal aos microcontroladores interrompendo o *sleep-mode*, e o circuito liga-desliga com MOSFETS, foram substituídos por um único componente, um *timer* TPL5110 Adafruit[20]. O TPL5110 controla a ativação dos outros circuitos através da ativação e interrupção da alimentação: a cada 4 minutos, liga o microcontrolador e espera até que receba um sinal indicando que a recolha de temperatura já foi realizada, interrompendo novamente a alimentação do circuito. As consequências disto são:
    a) Não é necessário utilizar circuitos *barebones* nem *sleep-mode*, pois o consumo fica condicionado ao TPL5110, que é o único componente alimentado constantemente pelas baterias, mas que opera com corrente de apenas 20 µA.

[20]Ficha técnica e informações em https://learn.adafruit.com/adafruit-tpl5110-power-timer-breakout

b) Não é mais possível realizar medições síncronas, mas os intervalos de medições foram ajustados, com base nos dados de temperatura recolhidos na **Campanha das Caves da Murganheira**, para garantir que as séries de temperatura de cada unidade fossem comparáveis: do ponto de vista da temperatura no interior de uma galeria, é muito improvável haver mudanças bruscas de temperatura em um intervalo de apenas 4 minutos; como esta é a diferença de tempo máxima em que se registam medições consecutivas de duas unidades diferentes, considera-se que um instante $t = 0s$ e outro instante $t = 240s$ são comparáveis.

c) Não é possível acompanhar a recolha de dados em tempo real, e as unidades atuam somente como *datalogger*.

2. Foi adicionado um RTC DS1307 Adafruit[21] para carimbar as medições de temperatura com o horário real das medições. Uma vez que não há mais **unidade central**, o horário das medições deve ser controlado em cada **unidade remota**;

3. Utilizou-se placas `Arduino UNO` e `Arduino Mega` originais;

Este novo equipamento foi designado por **Protótipo 4 - *Datalogger***, e é mostrado nas Figuras 6.32 e 6.33. Sua utilização, em detrimento do sistema de monitorização em tempo real, se deve exclusivamente à limitação do número de **unidades remotas** disponível e à extensão da rede de galerias do local de testes. Quando possível, é preferível a utilização do sistema de monitorização em tempo real, pela possibilidade de acesso instantâneo e remoto aos dados de temperatura, e por todas as questões de segurança envolvidas na realização de monitorização não-invasiva. O sistema de monitorização em tempo real seria aplicável à **Campanha das Minas da Panasqueira**, mas sua utilização não foi viável no contexto do projeto de investigação.

Os resultados do processo de desenvolvimento dos equipamentos de recolha de temperatura foram significativos, pois levaram à criação de um **sistema de monitorização não-invasivo, sem fio, em tempo real e *low-power*** adequado à ambientes subterrâneos, que pode ser adaptado para a recolha de **qualquer parâmetro ambiental** relevante para a segurança operacional, como a concentração de gases, deteção de incêndios, colapso de estruturas, entre outros.

O **Protótipo 4** constitui, se não um sistema de monitorização completo, um **equipamento científico de alta precisão e baixo custo para a recolha de temperatura**. Conforme se discutiu ao longo deste trabalho, a recolha de dados é um ponto importantíssimo para a validação dos modelos de troca de calor, etapa que é raramente cumprida adequadamente e em sua totalidade. Este equipamento permitiu a recolha de dados abundantes de temperatura, associados a uma posição no espaço e a um instante no tempo, que integram um banco de dados com mais de 100 mil medições de temperatura, algo que é, até onde se apurou durante a revisão do estado-da-arte, inédito para a modelação de temperatura em galerias subterrâneas.

Por uma questão de conveniência, quando forem referidos os equipamentos do sistema de monitorização em tempo real utilizados na **Campanha de Amostragem das Caves da Murganheira**, serão tratados por **sistema de monitorização** quando se apontar o sistema como um todo, e por **unidades remotas** ou **unidade central**, seguidas por um código de referência, quando for feita menção à cada ponto de recolha de temperatura de forma individual. Cada um dos equipamentos desenvolvidos conforme o **Protótipo 4** será tratado por ***datalogger***, seguido de um código de referência.

O processo de instalação de equipamentos e recolha de dados é tratado do capítulo seguinte, em que também são descritos os locais de testes, as características do conjunto de dados brutos e seu pré-tratamento, e a validação propriamente dita do modelo.

[21] Descrição do produto em https://www.adafruit.com/product/3296

Figura 6.32: **Datalogger** utilizado na **Campanha das Minas da Panasqueira**.

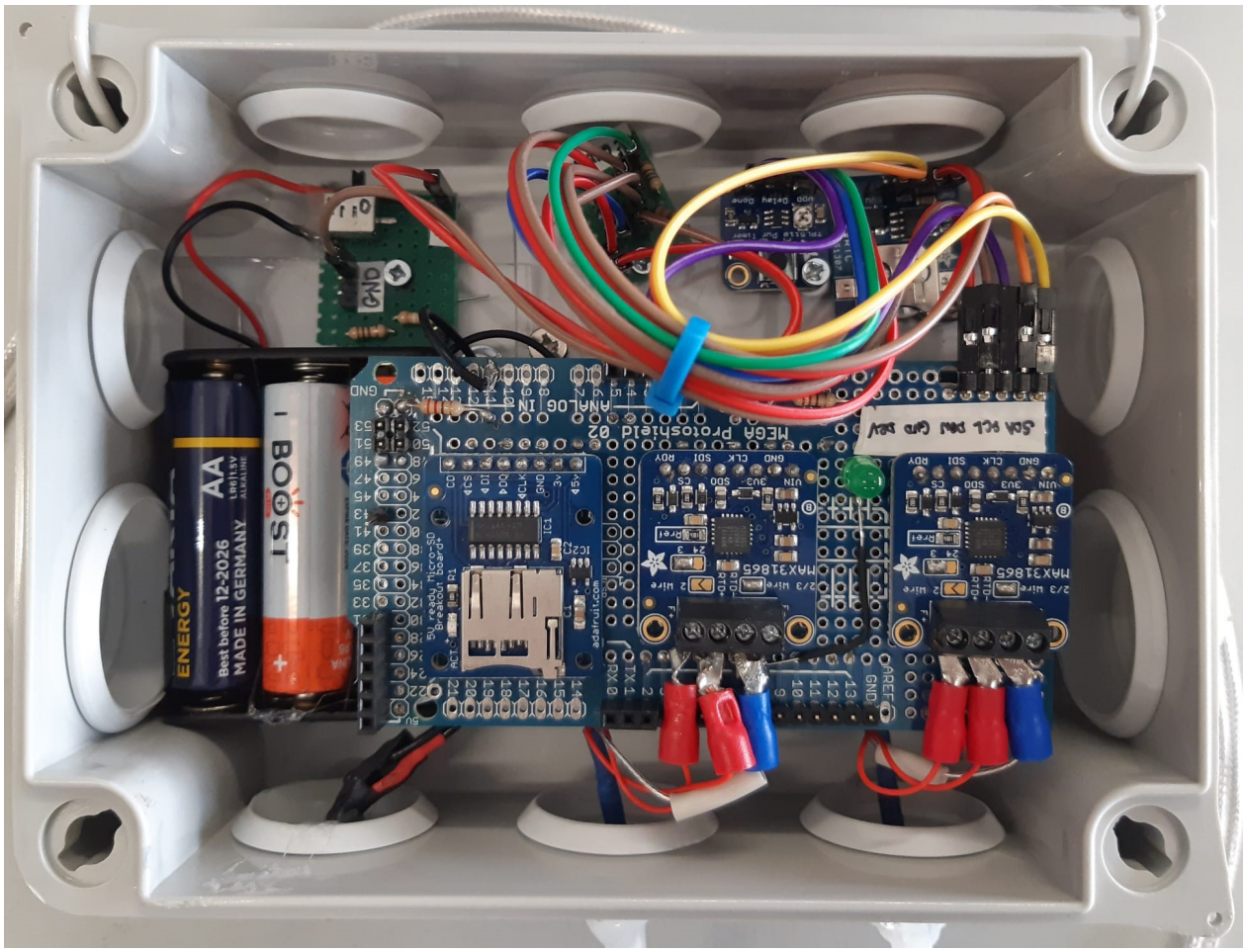


Figura 6.33: Detalhe do circuito do **datalogger**.

7 Recolha de dados experimentais e Validação do Modelo

7.1 Recolha de temperatura

A coleta de dados experimentais para a validação do modelo foi feita em dois locais de testes diferentes, nas **Caves da Murganheira** e nas **Minas da Panasqueira**. Os dois locais escolhidos para a realização dos testes definitivos têm características únicas que os tornam interessantes para o estudo dos efeitos da rocha como permutador de calor ou que favorecem a instalação de unidades de medição de temperatura.

Antes da instalação definitiva das unidades de medição, foram feitos testes preliminares em um corredor subterrâneo de um prédio da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para simular as condições de teste reais e verificar a necessidade de ajustes.

7.1.1 Testes preliminares num corredor subterrâneo

Durante toda a etapa de desenvolvimento das unidades de medição de temperatura, descrita no capítulo anterior, foram realizadas etapas de testes em um corredor subterrâneo para impor aos equipamentos condições próximas das situações reais, principalmente quanto à sua operação em um espaço confinado. Este processo iterativo de testes e ajustes orientou os trabalhos de confeção das unidades de amostragem, pois evidenciou uma série de situações e problemas imprevistos.

As modificações realizadas nos circuitos para ajustar os protótipos às condições reais de amostragem já foram discutidas, mas ainda se faz necessário elucidar as razões concretas que levaram a estas modificações.

Primeiro Teste

Este teste inicial foi realizado para o **sistema de monitorização** durante 20 dias, e foi limitado pela duração das baterias das unidades remotas. Neste ponto do projeto de investigação, as **unidades remotas** ainda estavam montadas em caixas provisórias, e não se havia feito qualquer desenvolvimento (pelo menos a nível físico de montagem) quanto à redução do consumo de corrente: ainda eram utilizadas as placas originais `Arduino Uno` e a placa disponível em um kit de desenvolvimento do radio-transmissor. A placa `Arduino` já estava operando em *sleep-mode*, assim como o rádio **XBee**® 3; entretanto, a alimentação do circuito era de 12V e feita unicamente através do `Arduino Uno`, que retificava a tensão para 5 V para alimentar o processador *ATmega328p* e para 3.3 V para alimentar o **XBee**® 3.

As baterias do circuito duraram cerca de 5 dias operando em *sleep-mode*, e concluiu-se que seria necessário utilizar outras técnicas (a nível físico) além da programação para otimizar o consumo de energia, o que levou à confeção das placas-clone. Outro problema encontrado foi a perda de sincronia dos rádio-transmissores, que após certo período passaram a enviar informações em horários diferentes; isto deu indícios de que havia algum erro na configuração dos dispositivos **XBee**® 3, que se descobriu estar relacionado com a hierarquia entre as unidades de amostragem (apenas um deve coordenar a operação dos demais) e à configuração de um parâmetro que impede que os roteadores e dispositivos finais enviem dados em atraso.

Ainda, pôde-se perceber a importância do estudo da atenuação do sinal de rádio, uma vez que as unidades tiveram de ser movidas até que atingissem um posicionamento que favorecesse a transmissão dos dados. Em relação a **unidade central**, verificou-se a necessidade de configurar um acesso remoto ao dispositivo e de executar o código *Python* de recolha de dados em um plano de fundo e de forma automática quando da inicialização do dispositivo, isto porque ocorreram interrupções de energia durante este período e foi necessário reinicializar manualmente os dispositivos. Ficou evidente também que o acesso remoto era a melhor estratégia para a recolha de dados em tempo real, além do envio automático de dados para a nuvem.

Estas foram lições importantes que possibilitaram adquirir experiência na montagem de uma rede de sensores sem fio, sem as quais a instalação das unidades de amostragem em uma situação real poderia ter sido comprometida.

Figura 7.1: Unidade de medição de temperatura instalada no corredor subterrâneo.

Segundo Teste

O segundo teste realizado no corredor subterrâneo foi feito já com a versão definitiva das unidades de amostragem (Figura 6.29) para verificar a duração da bateria e a transmissão de dados. Neste teste as unidades de amostragem funcionaram ininterruptamente por mais de dois meses, sem a reposição das baterias, contando com duas sondas de temperatura cada. Verificou-se uma perda periódica da comunicação de algumas **unidades remotas** com a **unidade central**, restauradas após certo número de ciclos de medição.

Outros problemas foram identificados, em especial os relacionados ao mal-contacto entre as partes do circuito e à gravação defeituosa de alguns dos circuitos impressos. Também, se notou que as alimentações do controlador e do rádio, agora independentes, não estavam conectadas a um mesmo fio-terra, e isto provocava comportamentos inesperados, já que não estavam ligados ao mesmo potencial elétrico. Foi testada também a utilização de um das sondas de temperatura de cada unidade para medir a temperatura de um sólido, como mostra a figura 7.2.

Estes problemas foram corrigidos e a unidades de amostragem apresentaram comportamento satisfatório no restante do período de testes, demonstrando que estavam prontas para serem submetidas aos ambientes de coleta de dados.

7.1.2 Campanha de amostragem das Caves da Murganheira

Descrição do local

O primeiro local de testes escolhido foi uma rede de galerias escavadas em rocha granítica, nas **Caves da Murganheira**. Este importante produtor de vinho espumante, situado na região do Távora-Varosa, Norte de Portugal, utiliza a inércia térmica da rocha para garantir temperatura estável entre 11.0 °C e 15.0 °C durante todo o ano, para o envelhecimento de mais de 5 milhões de garrafas de vinho. A climatização natural é um fator crítico para a garantir a qualidade do vinho produzido, e demonstra um caso concreto em que o potencial bioclimático de uma estrutura subterrânea atua de forma favorável às necessidades humanas. Nenhuma climatização artificial é necessária, o que reduz de forma significativa possíveis custos de energia envolvidos neste processo.

Figura 7.2: **Unidade remota** medindo a temperatura do ar e do betão no corredor subterrâneo.

Destaca-se também a humidade natural do ambiente como parâmetro importante para a qualidade do vinho produzido, pois impede a entrada de oxigénio nas garrafas. A galeria está situada sob uma encosta onde é feito o plantio de uva, possui cobertura rochosa de espessura variável, e tem extensão total de aproximadamente de 200 m.

Como a inércia térmica da cobertura rochosa está condicionada à sua espessura, que isola o interior da galeria das condições atmosféricas, espera-se que certas regiões da galeria estejam mais expostas à influência atmosférica do que outras. Assim, a instalação do **sistema de monitorização** é favorável a uma melhor caracterização do potencial térmico da galeria e permite uma tomada de decisões para a regularização das condições climáticas caso seja necessário. Como não há ventilação forçada, suspeita-se que o potencial térmico da rocha poderia ser expandido para a climatização da fábrica, situada em espaço fechado nas imediações dos acessos da galeria.

Geometria das galerias

Foi feito um levantamento da distribuição espacial das galerias utilizando bússola e fita métrica. Com isto, desenhou-se um mapa das galerias utilizando *Autocad*, conforme a Figura 7.7. Neste mapa, a galeria é divida em troços numerados de **T1** a **T6** e pontos de **1** a **57**, que são utilizados como referência para informações importantes para a caracterização do local de testes:

1. As duas entradas da galeria estão situadas nos pontos **1** (**Entrada 1**) e **42** (**Entrada 2**);
   a) A **Entrada 1** é mostrada na Figura 7.6. Fica aberta durante horário de visitas e fechada no resto do tempo.
   b) A **Entrada 2** fica permanentemente fechada por porta plástica, que não é estanque, e apesar de limitar o fluxo de ar, não o impede.
2. Os troços **T6** e **T7** são exteriores à galeria e interiores à adega, exceto pelo ponto **48**, que está situado sobre o portão da fábrica que dá acesso à estrada (Figura 7.35). Para referência, a foto da Figura 7.6 foi tirada do ponto **47** em direção ao ponto **1**; a escada de metal está próxima ao ponto **46**;
3. Em **T2**, o ponto **16** está situado sobre uma parede, e os pontos entre si e o ponto **15** compõem um ”fundo de saco”, como mostra a Figura 7.8; O mesmo ocorre para os pontos **33 -39** em **T4**, como mostra a Figura 7.9

Figura 7.3: Galeria escavada em granito azul, nas **Caves da Murganheira**.

4. O escoamento de ar que se dá ao longo da galeria não pode ser medido quantitativamente, pois possui velocidade muito baixa e é indetetável por anemómetros e estações meteorológicas. Sabe-se que existe devido a distribuição de temperatura no interior da galeria, e que ocorre preferencialmente ao longo do trajeto entre as **Entradas 1 e 2**, e menos ao longo dos troços de fundo de saco;

Quanto à área de secção da rede de galerias, varia em função do troço. Foi estimada através de fotografias utilizando objetos de altura conhecida, e seus valores são expressos na Tabela 7.1.

Figura 7.4: Terreno sobre as galerias das **Caves da Murganheira**.

Figura 7.5: Vista da adega a partir das vinhas das **Caves da Murganheira**.

Figura 7.6: Acesso à galeria (ao fundo) por dentro da adega, onde se situam as cubas refrigeradas artificialmente.

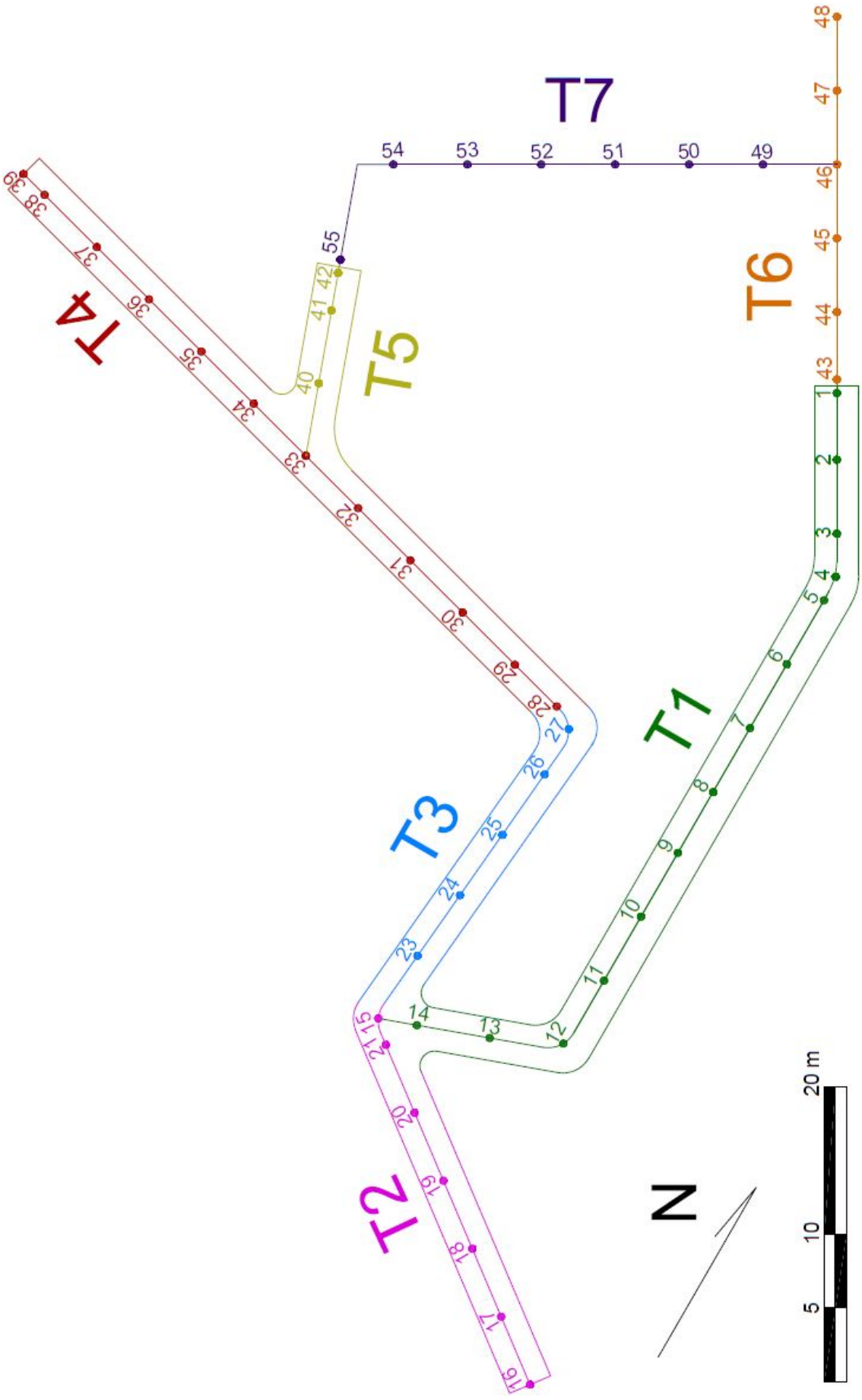


Figura 7.7: Pontos de amostragem do levantamento completo de temperatura.

Figura 7.8: Foto do fundo-de-saco **T2**, tirada a partir do ponto **15** em direção ao ponto **16**.

Figura 7.9: Foto do fundo-de-saco **T4** (esquerda) e **Entrada 2 T6** (direita), tirada a partir do ponto **33**.

Pontos	Altura (m)	Largura (m)
1 - 5	2.8	2.8
5 - 27	4.0	5.0
27 - 35	4.0	4.0
35 - 39	2.2	1.6
41 - 42	2.2	1.6

Tabela 7.1: Dimensões aproximadas da secção transversal da rede de galerias das **Caves da Murganheira**.

Geologia e propriedades termofísicas da rocha

As **Caves da Murganheira** estão localizadas sobre a unidade geológica **g1_b - Granitos biotíticos com plagioclase cálcica**. Amaral, Correia et al. (2013) e Amaral e Rebola (2014) publicaram estudos das propriedades térmicas de Granitos biotíticos com plagioclase cálcica do Norte de Portugal. Considerou-se que a rocha das galerias está muito próximas geologicamente às rochas caracterizadas nestas publicações. O granito "Castro d'Aire", em particular, provém de região situada a cerca de 30 km de distância das **Caves da Murganheira**, e suas propriedades termofísicas foram consideradas equivalentes às do granito encontrado no local dos testes.

Densidade $\rho\ \left(\frac{kg}{m^3}\right)$	Calor específico $C_p\ \left(\frac{J}{kg\,K}\right)$	Condutividade térmica $k\ \left(\frac{W}{m\,K}\right)$	Difusividade térmica $\alpha\ \left(\frac{W}{m\,K} \times 10^6\right)$
2620	862	2.98	1.32

Tabela 7.2: Propriedades termofísicas da rocha das **Caves da Murganheira**.

Caracterização de temperatura em detalhe

Realizou-se uma campanha de medição de temperatura em detalhe para a galeria e para a adega, com pontos de amostragem definidos conforme a Figura 7.7. Para o interior da galeria, mediu-se-se a temperatura de cada ponto a alturas de $0.5m$ e $2.5m$ a partir do piso, e para a **superfície da rocha no teto da galeria**. Para a adega, mediu-se a temperatura entre as fileiras de tanques, entre as duas entradas da galeria, e fora da fábrica para caracterizar o valor da temperatura ambiente externa. Esta recolha foi feita durante o verão, no mês de setembro.

Todas as medições foram feitas em um intervalo inferior a 30 minutos, que é considerado um intervalo suficientemente curto para que não se observem mudanças significativas no estado e na distribuição de temperatura dos pontos amostrados.

A temperatura medida para os pontos é mostrada através de gráficos de haste desenhados em um plano Sul-Norte *versus* Este-Oeste, com a cota representando os valores de temperatura. A **temperatura da rocha** é mostrada em magenta, a **temperatura do ar a** $2.5m$ de altura a partir do piso da galeria é mostrada em verde, e a **temperatura a** $0.5m$ é mostrada em azul. Foi escolhida, para cada troço, uma das direções (Sul-Norte ou Este-Oeste) para representar a distribuição de temperatura dos pontos, e a Figura 7.16 foi incluída para mostrar uma vista geral do levantamento de temperatura de todos os troços da galeria.

Nota-se, no **Trecho 1**, uma maior variação de temperatura em um mesmo ponto, a depender da altura em que foi recolhida a temperatura, o que quer dizer que há, ao longo de uma mesma secção da galeria, maior variação de temperatura em função da altura: quanto mais próximo da rocha, mais quente. O gráfico da Figura 7.11 mostra uma clara tendência de arrefecimento do ar de entrada da galeria ao longo de **T1** (a secção de entrada da galeria está mais a direita no gráfico), e também uma clara tendência de arrefecimento da temperatura da rocha, que tem valor máximo no **ponto 1**.

Em **T2** (7.12), só foi possível recolher temperatura de rocha do **ponto 16**. Nota-se que para troço, há grande proximidade entre temperaturas de rocha e do ar a $2.5m$ e $0.5m$, o que indica que, nesta região, ar e rocha se aproximam do equilíbrio térmico. Dada a distribuição espacial deste troço de galeria em relação aos demais segmentos, é de se imaginar que nesta região o escoamento de ar seja quase nulo; imagina-se, na verdade, que o pouco escoamento natural de ar se dá em direção ao trecho **T5**, onde está a outra abertura da galeria. Nota-se também uma significativa redução da temperatura superficial da **rocha** no **ponto 16**,

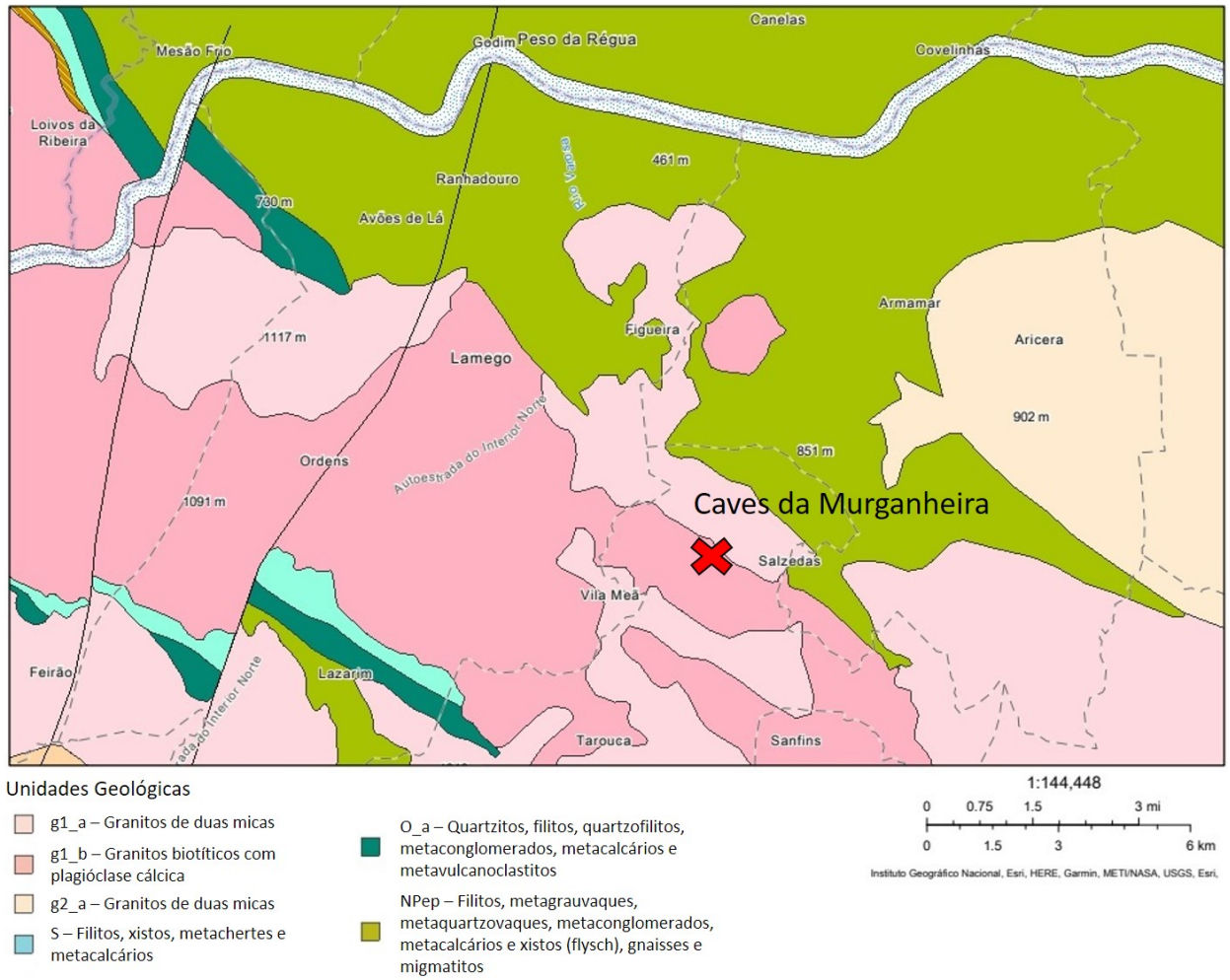


Figura 7.10: Localização das **Caves da Murganheira** em relação à Carta Geológica de Portugal.

se comparado ao **ponto 1**, o que indica que a rocha é mais fria próxima ao fundo de saco; pelos gráficos de 7.13 e 7.14, conclui-se que a temperatura da rocha é mais fria quanto mais próximo ao ponto **16**.

Ainda por 7.13 e 7.14, nota-se apenas um aumento subtil de temperatura da rocha e do ar, ao contrário de **T1**, e as três séries de dados estão muito próximas, indicando uma tendência de equilíbrio térmico entre rocha e ar. É de se imaginar, portanto, que o escoamento preferencial de ar se dá do **ponto 1** ao ponto **42**.

Verifica-se no gráfico da Figura 7.15 que **T5** segue uma tendência de aumento da temperatura de rocha em direção à saída da galeria, mas há equilíbrio térmico entre rocha e ar, o que pode ser entendido de duas formas:

1. ar e rocha estão em equilíbrio térmico porque o ar viaja ao longo da galeria e neste percurso troca calor com a rocha, percorrendo uma distância suficiente para que chegue ao ponto de saída da galeria a uma temperatura próxima a da rocha;

2. o espaço de saída do ar é mesmo muito pequeno - dado que a porta de plástico bloqueia quase toda a secção da galeria - de modo que o ar acumula-se nesta região de **T5** por mais tempo do que no restante da galeria onde ocorre o fluxo preferencial do ar (dos pontos **1** a **15**, **23** a **33**, e **40** a **42**).

Mais, verifica-se através desta amostragem em detalhes da temperatura, um comportamento esperado para movimentos naturais de convecção do ar: o ar mais frio ocupa as partes mais baixas da galeria, à exceção do ponto **14**, onde as temperaturas do ar a diferentes alturas estão muito próximas entre si. Em geral, a rocha está mais quente quanto mais próxima das secções de entrada da galeria, em especial na secção de entrada do **ponto 1** onde a temperatura da rocha é máxima.

Há, portanto, uma clara influência da posição do ponto na distribuição de temperatura. Observando o

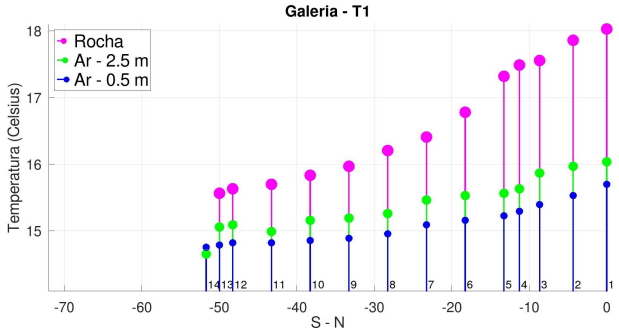


Figura 7.11: **Trecho 1** da galeria.

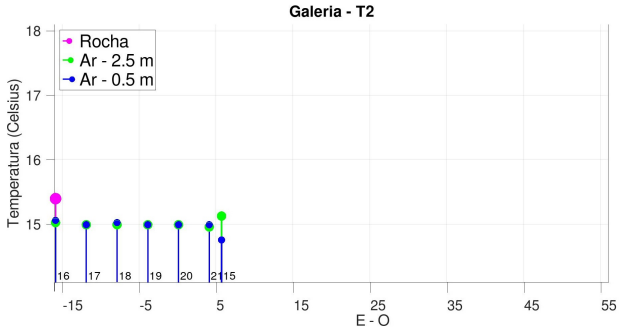


Figura 7.12: **Trecho 2** da galeria.

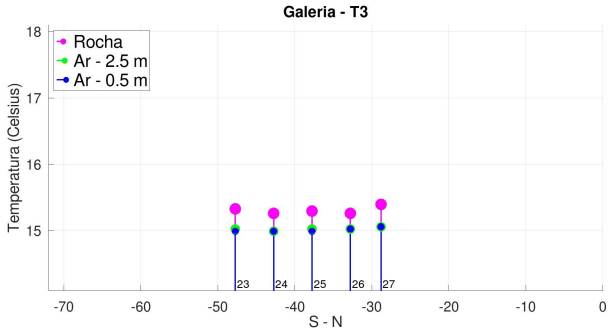


Figura 7.13: **Trecho 3** da galeria.

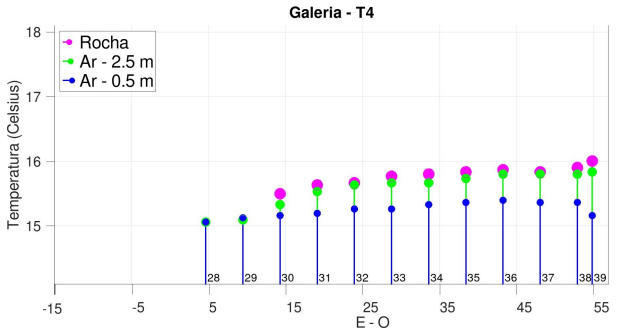


Figura 7.14: **Trecho 4** da galeria.

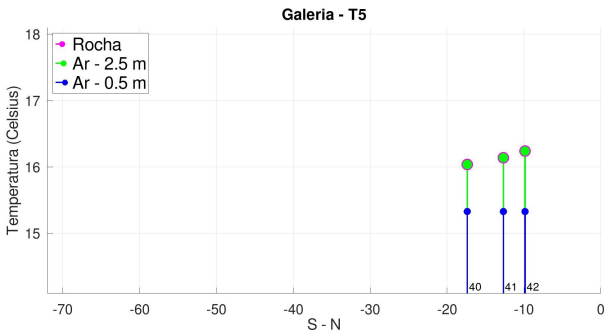


Figura 7.15: **Trecho 5** da galeria.

gráfico da Figura 7.16, podemos imaginar um plano definido por dois vetores, $\overrightarrow{p16p1}$ e $\overrightarrow{p16p39}$, que aproxima o gradiente de temperatura da rocha de todos os pontos amostrados, exibido na Figura 7.17. Esta clara correlação entre temperatura e posição indica que deve haver também uma influência da topografia sobre as temperaturas, o que justificaria uma variação da inércia térmica da rocha: é provável que a maior cobertura rochosa esteja sobre o **ponto 16**, e as menores coberturas sobre os pontos **1**, **39** e **42**.

Quanto à distribuição de temperaturas na adega, observa-se uma diminuição de temperatura do ar no trecho **T6** (Figura 7.18) entre o **ponto 48**, medido já fora da adega próximo ao portão lateral das **Caves da Murganheira**, e o **ponto 43**, medido na secção de entrada da galeria correspondente ao trecho **T1**, mas por fora. Há, neste trecho, uma leve tendência de decréscimo de temperatura, o que indica que as cubas de inox refrigeradas arrefecem o ar externo.

Para o trecho **T7** (Figura 7.19), há uma leve tendência de aumento de temperatura em direção ao **ponto 55**, que é o mais próximo da saída da galeria associada ao trecho **T5**. A maior diferença de temperatura entre pontos da adega se dá entre os pontos **48** e **43**, de cerca de 0.3 °C.

Uma análise crítica para este estudo se dá pela observação das temperaturas da rocha na secção de entrada da galeria, por dentro, no **ponto 1**, de aproximadamente 18.00 °C, e por fora, no (**ponto 43**),de aproximadamente 15.90 °C. A diferença entre as temperaturas de rocha e ar nestes pontos indica que a temperatura da rocha é, muito provavelmente, influenciada por outros fenómenos que não a troca de calor com o ar, particularmente a condução de calor através da rocha a partir do calor atmosférico.

Olhando para a temperatura do **ar a** 2.5 m do **ponto 1** na secção de entrada, mas por dentro da galeria, de 16.00 °C, nota-se que é possível que nos primeiros metros do troço **T1** a rocha cause um aquecimento do ar de entrada, efeito que se inverte ao longo do escoamento do ar por outros trechos de galeria.

Caracterização termográfica de temperatura da rocha

O levantamento de temperatura em detalhe, feito com sondas Pt1000, foi realizado antes do início do outono. Posteriormente, no mês de março do ano seguinte, antes do início da primavera, foi feito um perfil de temperatura da superfície de rocha em alguns pontos da galeria. Foi utilizada uma câmara termográfica FLIR ThermaCAM E300 para registar a temperatura superficial da rocha na parede ou teto da galeria, ao longo dos troços **T1** - **T7**, e das cubas refrigeradas em alguns pontos da adega. As termografias são mostradas na Figuras 7.21 - 7.34.

Nota-se que em relação ao valor em si de temperatura, as termografias apontam resultados contrários aos obtidos no levantamento de temperatura em detalhe. Isto se justifica pela mudança de estações. Entretanto, o efeito da inércia térmica da rocha é similar em ambas as situações: há maior variação da temperatura quanto mais próximo dos acessos e do fundo de saco da galeria no ponto **39**. Durante o verão, as temperaturas são mais quentes na secção de entrada do troço **T1** (ponto **1**), no ponto **39**, e no ponto **41** próximo ao acesso **A2**, conforme o gradiente da Figura 7.17; no inverno, as temperaturas são mais frias exatamente nestes mesmos pontos, como mostram as termografias 7.23 do ponto **2**, 7.31 do ponto **39**, 7.30 do ponto **33** (próximo do acesso **A2**), e 7.32 do ponto **41**. Na caracterização termográfica, porém, mede-se temperatura somente da rocha.

A temperatura do ar da galeria está condicionada à temperatura de entrada do ar e à temperatura da rocha ao longo da galeria. A temperatura da rocha, por sua vez, tende a ser mais estável em regiões em que a cobertura da galeria é mais espessa, o que aumenta a inércia térmica da rocha. A temperatura em si, para esta análise, é menos importante do que a amplitude de sua variação em diferentes épocas do ano. Neste sentido, as termografias corroboram os resultados do levantamento de temperatura em detalhe, e indicam que o gradiente de temperatura da Figura 7.17 provavelmente corresponde ao perfil topográfico sobre a galeria, pois aponta para regiões de maior e menor estabilidade térmica.

O que se conclui neste primeiro momento, é que se faz necessário o estudo da topografia para determinar a elevação do terreno, e consequentemente a espessura da cobertura rochosa ao longo dos troços de galeria, considerando desprezível o desnível no interior da galeria. Para realizar esta tarefa, é preciso georreferenciar a galeria a partir de um ponto e de direções conhecidas, e definir uma região de interesse para a medição da elevação do terreno que está sobre a galeria.

Até o momento, a caracterização de temperatura em detalhe e a caracterização termográfica permitem inferir certos comportamentos termodinâmicos desta estrutura subterrânea:

1. Há forte influência do sistema de arrefecimento das cubas na distribuição de temperaturas do ar dentro e fora da galeria, pois nota-se a ocorrência de pré-condicionamento do ar que adentra a rede de galerias.

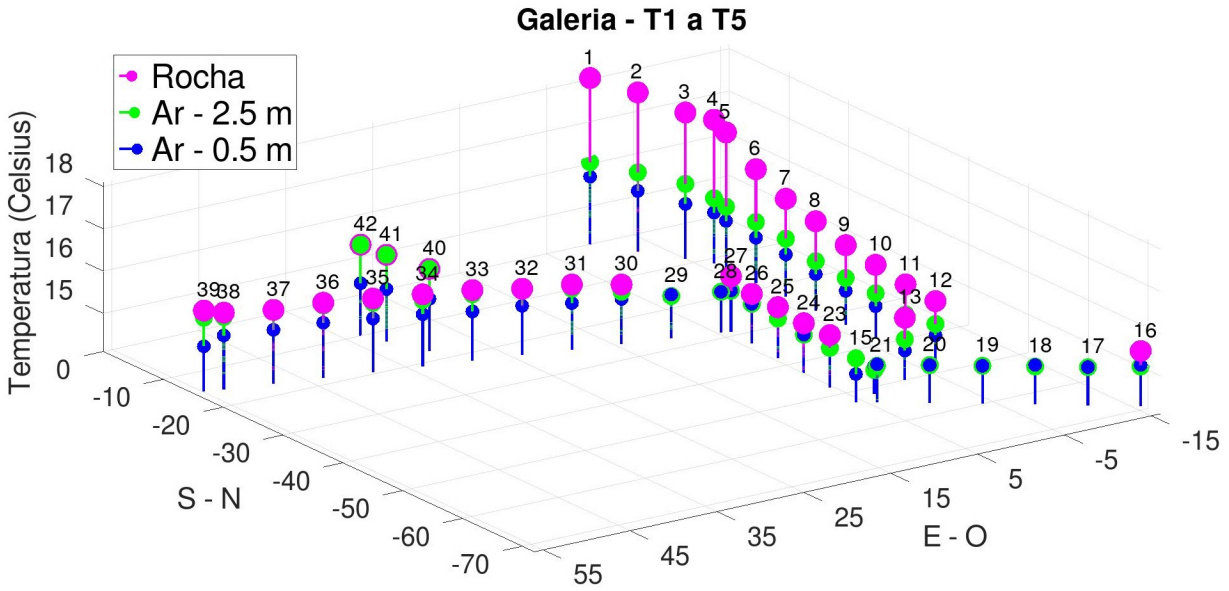


Figura 7.16: Vista geral do levantamento de temperatura da galeria.

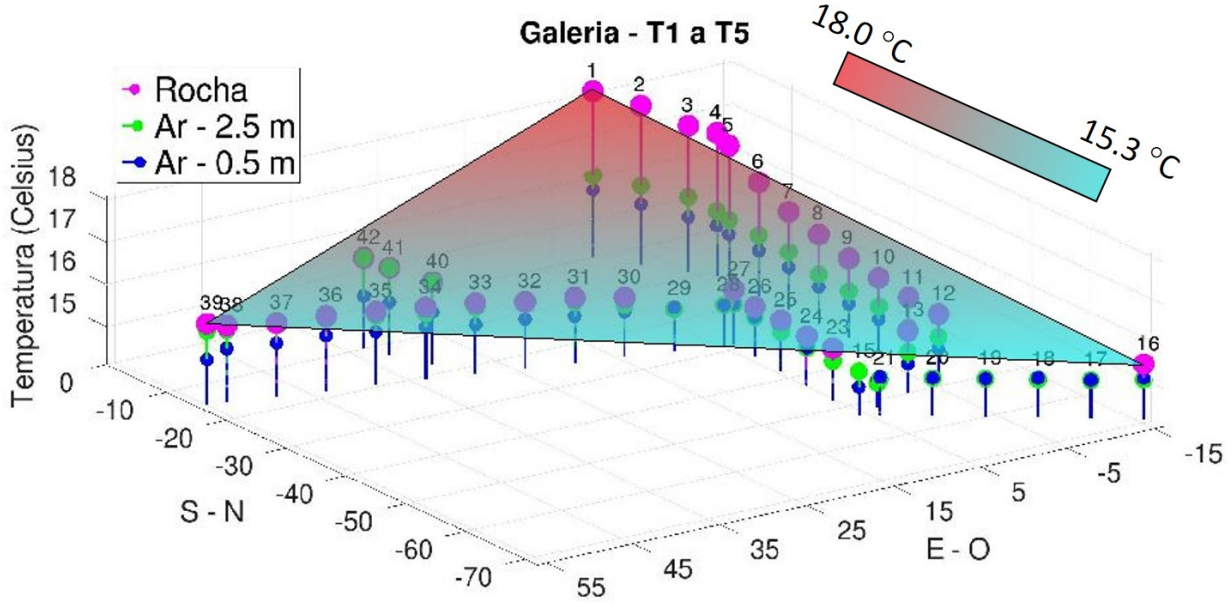


Figura 7.17: Plano que aproxima o gradiente de temperatura da rocha na galeria, em função da posição dos pontos.

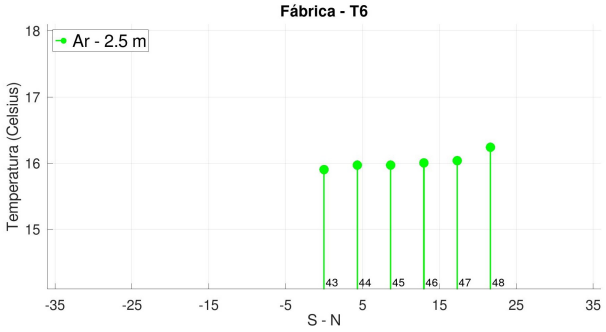


Figura 7.18: **Trecho 6** da adega.

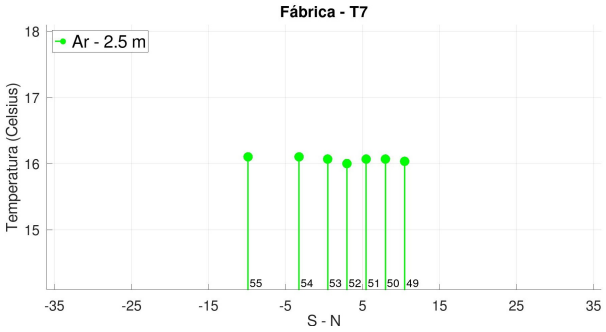


Figura 7.19: **Trecho 7** da adega.

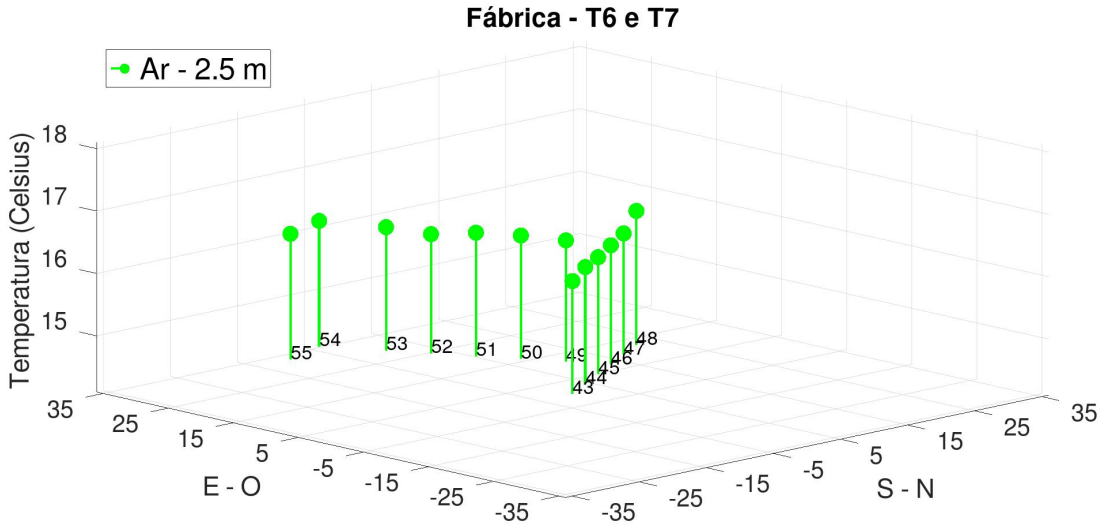


Figura 7.20: Vista geral do levantamento de temperatura da adega.

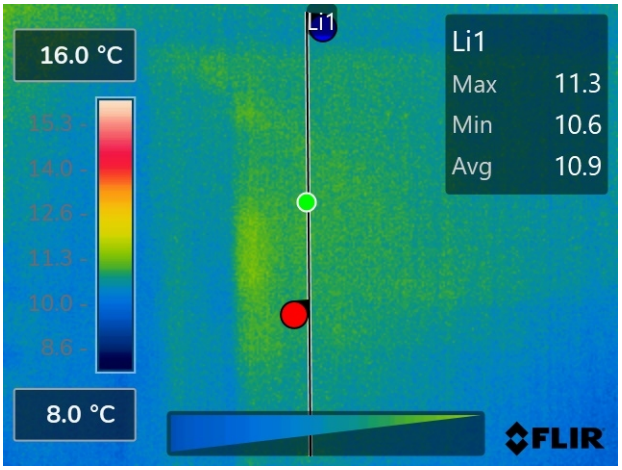


Figura 7.21: Termografia do Acesso **A1** da galeria, visto a partir da adega.

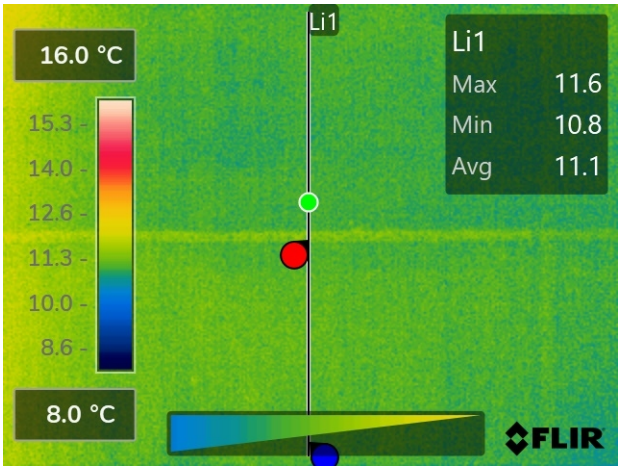


Figura 7.22: Termografia do Acesso **A2** da galeria, visto a partir da adega.

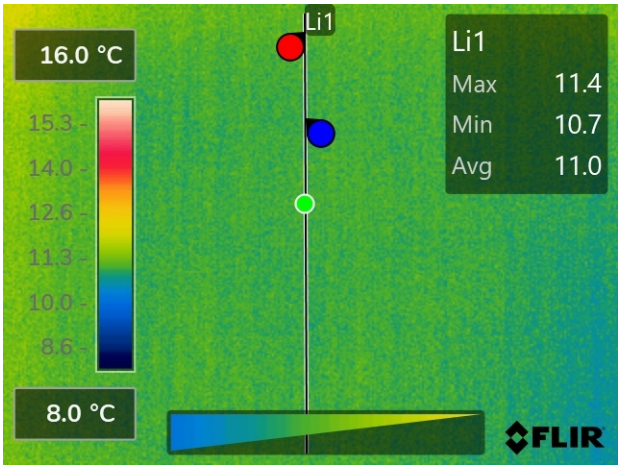


Figura 7.23: Termografia da parede da galeria no ponto **2** de **T1**.

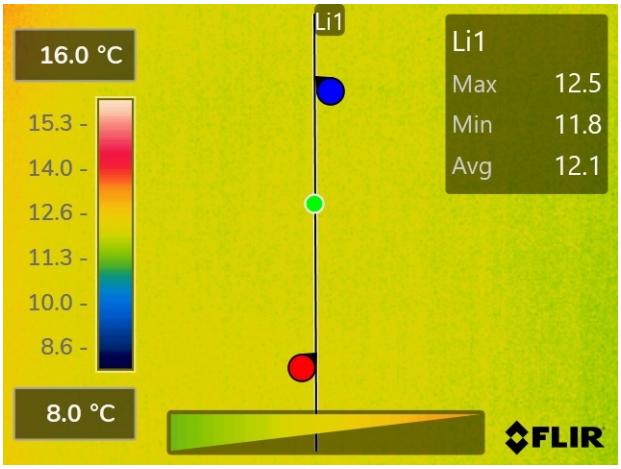


Figura 7.24: Termografia da parede da galeria no ponto **12** de **T1**.

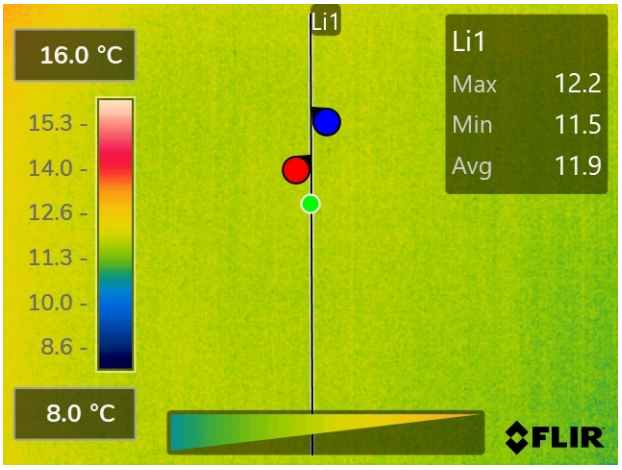


Figura 7.25: Termografia da parede da galeria no ponto **16** de **T2**.

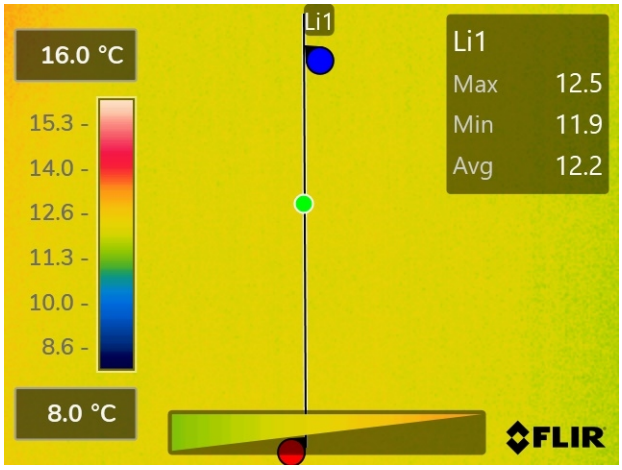


Figura 7.26: Termografia do teto da galeria no ponto **15** de **T2**.

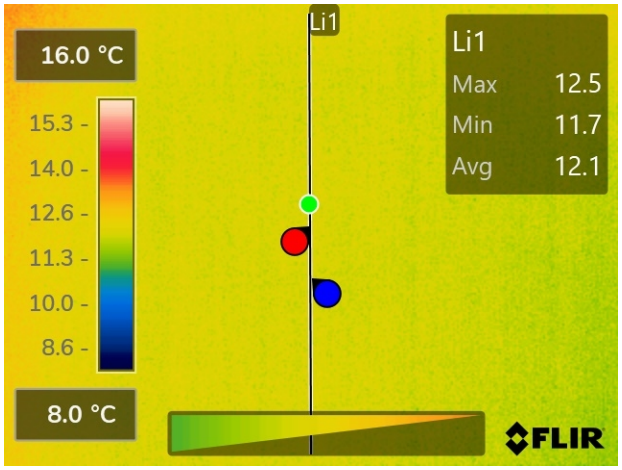


Figura 7.27: Termografia da parede na curva entre os pontos **14** de **T1** e **23** de **T3**.

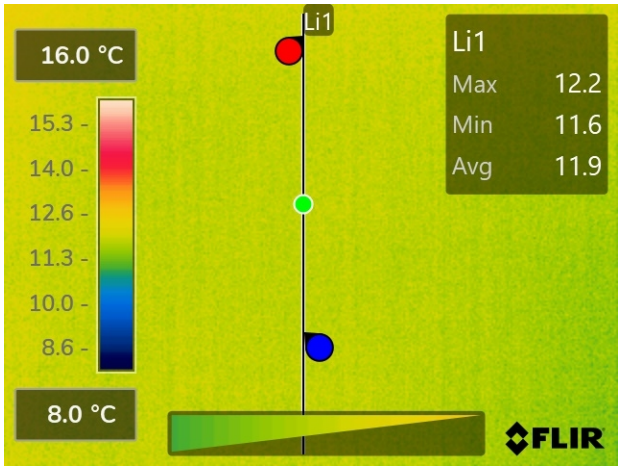


Figura 7.28: Termografia do teto da galeria no ponto **25** de **T3**.

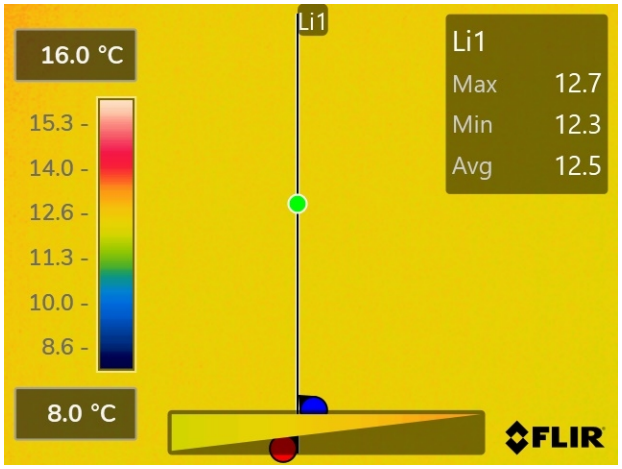


Figura 7.29: Termografia do teto da galeria no ponto **31** de **T4**.

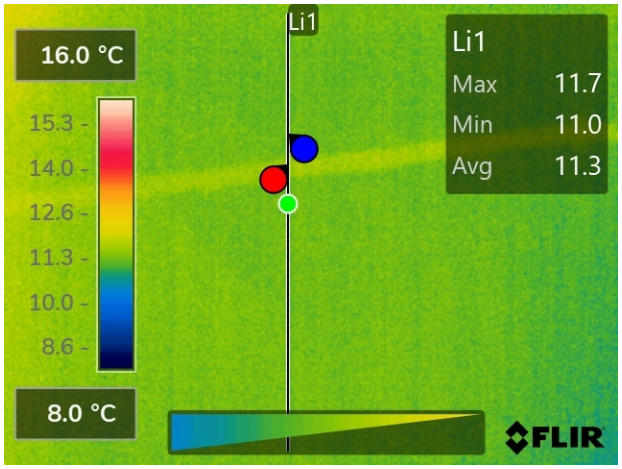


Figura 7.30: Termografia do teto da galeria no ponto **33** de **T4**.

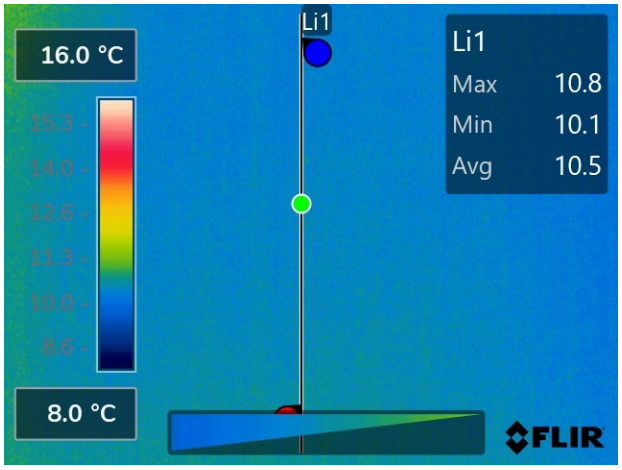


Figura 7.31: Termografia da parede da galeria no ponto **39** de **T4**.

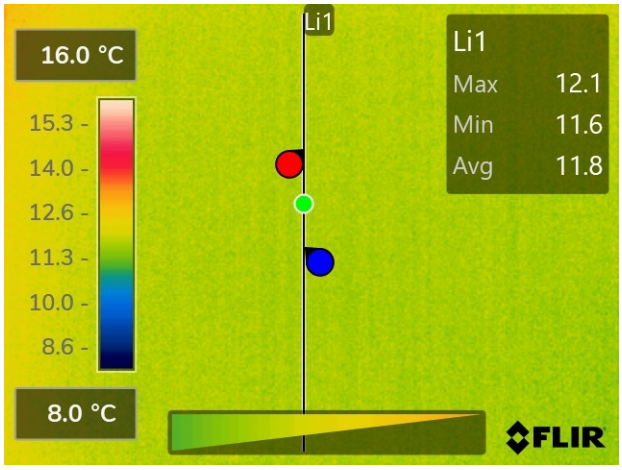


Figura 7.32: Termografia do teto da galeria no ponto **41** de **T5**.

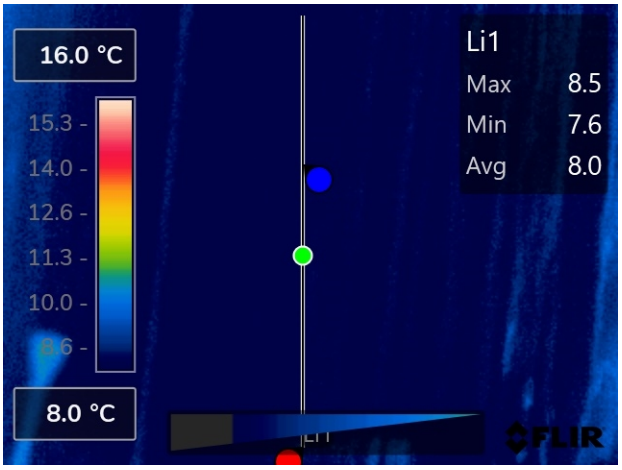


Figura 7.33: Termografia de uma cuba de inox, no ponto **53** de **T7**, na adega.

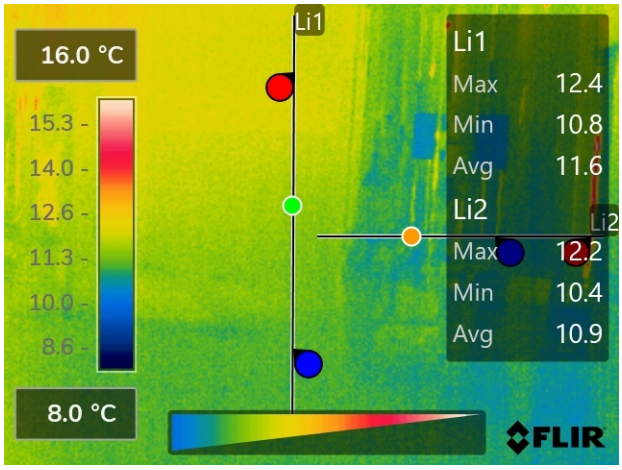


Figura 7.34: Termografia das cubas de inox (Li2) entre os pontos **46** e o acesso **A1** (Li2) .

2. A diferença entre temperaturas do ar em função da altura, para uma mesma secção, indica movimento natural de convecção do ar (ar frio que desce e ar quente que sobe), o que demonstra que há deslocação de ar dentro da galeria, ainda que indetetável por instrumentos convencionais. Este comportamento só é detetável por causa da alta precisão das sondas Pt1000.

3. É possível distinguir regiões de menor e maior escoamento do ar através da diferença de temperatura, em um mesmo ponto, entre **ar a** $0.5m$, **ar a** $2.5m$, e **rocha**: quanto mais próximas estão as temperaturas dos três pontos, para uma mesma secção, menor o escoamento de ar.

4. Há pouca influência do ar que sai da galeria na distribuição de temperaturas da adega, pois se fosse este o caso, haveria variação mais significativa na temperatura amostrada nos troços T6 e T7, conforme as Figuras 7.20 - 7.18, em especial nas proximidades do acessos **A1** e **A2**.

5. A distribuição de temperaturas da rocha é menos afetada pela temperatura do ar, e mais influenciada por fatores geográficos e topográficos. Há maior estabilidade em pontos mais próximos do ponto **16**, e menor estabilidade próximo aos acessos ao ponto **39**. Percebe-se, examinando as termografias, um gradiente de temperatura em direção ao ponto **16**, assim como ocorre para a caracterização de temperatura em detalhe.

6. O comportamento da rocha modifica-se em função da estação, atuando como reservatório de energia térmica: no verão, está mais fria e arrefece o ar mais quente que entra na galeria; no inverno, está mais quente e aquece o ar frio que entra na galeria. A rocha acaba por armazenar o calor trocado com o ar externo por longos períodos de tempo, e no verão, por exemplo, ainda possui um perfil de temperaturas que resulta do calor que trocou com o ar atmosférico durante o inverno: é como se a rocha possuísse uma distribuição de temperatura sempre 6 meses desfasada em relação à estação vigente. Isto faz com que seja capaz de atenuar a temperatura do ar de entrada e reduzir a amplitude das variações sazonais de temperatura do ar no interior da galeria.

Deu-se então o levantamento topográfico do terreno sobre a galeria, sabendo-se que é formado predominantemente por rocha granítica, e imaginando-se que possui variações significativas de elevação, a ponto de influenciar de modo desigual o potencial térmico da rocha em diferentes pontos ao longo da galeria.

Georreferenciamento e levantamento topográfico

Nas **Caves da Murganheira**, há provavelmente uma forte influência das condições atmosféricas sobre a temperatura no interior da galeria, pois impõem à rocha um regime sazonal de troca de calor, que é sentido no interior da galeria com certa defasagem. Como se demonstrou, a condução de calor através do maciço rochoso é um dos principais mecanismos que influenciam o estado de temperatura no interior da galeria.

Para caracterizar a cobertura rochosa ao longo da galeria, é necessário, em um primeiro momento, situar a galeria em relação ao terreno. Com isto, obtém-se as coordenadas georreferenciadas de cada um dos pontos da Figura 7.7 e pode-se aproximar a posição, em coordenadas, dos pontos interiores à galeria.

Como a planta da Figura 7.7 foi traçada com base nas direções do troços, medidas com bússola, e nas distâncias entre pontos, medidas com fita métrica, é possível utilizar a coordenada relativa de um dos pontos medidos, juntamente à sua coordenada geográfica real e à escala do desenho, para posicionar a galeria sob o terreno. Realiza-se, portanto, uma transformação do sistema de coordenadas dos pontos da galeria (arbitrariamente atribuídas quando foi feito o desenho do mapa) para coordenadas geográficas reais.

O **ponto 48**, medido sobre o portão da fábrica, pôde ser identificado em imagens de satélite através do *Google Earth* e *Google Maps*. Este ponto foi localizado no *Google Street View*, conforme a Figura 7.35, e depois identificado na imagem de satélite, no **Google Earth**, utilizando como referência o telhado da adega, conforme a Figura 7.36.

Figura 7.35: Portão das **Caves da Murganheira** (ponto **48**) visto a partir do *Google Street View*.

Figura 7.36: Portão das **Caves da Murganheira** (ponto **48**) visto a partir do *Google Earth*.

Transporta-se a planta da galeria para o mapa do terreno, utilizando-se o software *QGIS*, conforme a Figura 7.37. Este procedimento permitiu identificar marcos no terreno facilmente reconhecíveis (fileiras das vinhas, vias e estradas de terra, edifícios, entre outros), associados a posições interiores à galeria, delimitando uma área de interesse para o levantamento topográfico. Foi utilizado um iPhone 13 Pro para realizar a caracterização do terreno nesta região, e os pontos registados e associados a medidas de longitude, latitude, e elevação, foram importados para *QGIS*, como mostra a Figura 7.37.

Como os pontos recolhidos e importados para *QGIS*, foi possível construir uma superfície "triangularizada" com a elevação aproximada do terreno, como mostra o mapa da Figura 7.38. Por fim, foram exportados os pontos da superfície "triangularizada" cujas coordenadas Norte e Este correspondessem às linhas do desenho da galeria (Figura 7.39). Os pontos resultantes desta operação permitem conhecer a elevação do terreno sobre os troços **T1** - **T5** da galeria, como mostram as Figuras 7.40 - 7.43.

Os resultados obtidos com o mapeamento da elevação do terreno sobre a galeria das **Caves da Murganheira** está de acordo com o que se imaginava a partir das termografias e da caracterização de temperatura em detalhe: de facto, os acessos **A1** e **A2**, e o ponto **39**, correspondente ao fundo de saco do troço **T4**, são recobertos por uma camada de rocha de espessura bastante inferior ao restante da galeria, e estão sujeitos a maiores oscilações de temperatura consoantes à temperatura do ar externo, pois se situam sob regiões de inércia térmica menor. Pode-se dizer que as zonas menos profundas da galeria sentem de forma mais acentuada e imediata as temperaturas externas, em relação às regiões mais profundas sobre as quais a rocha atenua de forma mais pronunciada as variações de temperatura da estação vigente.

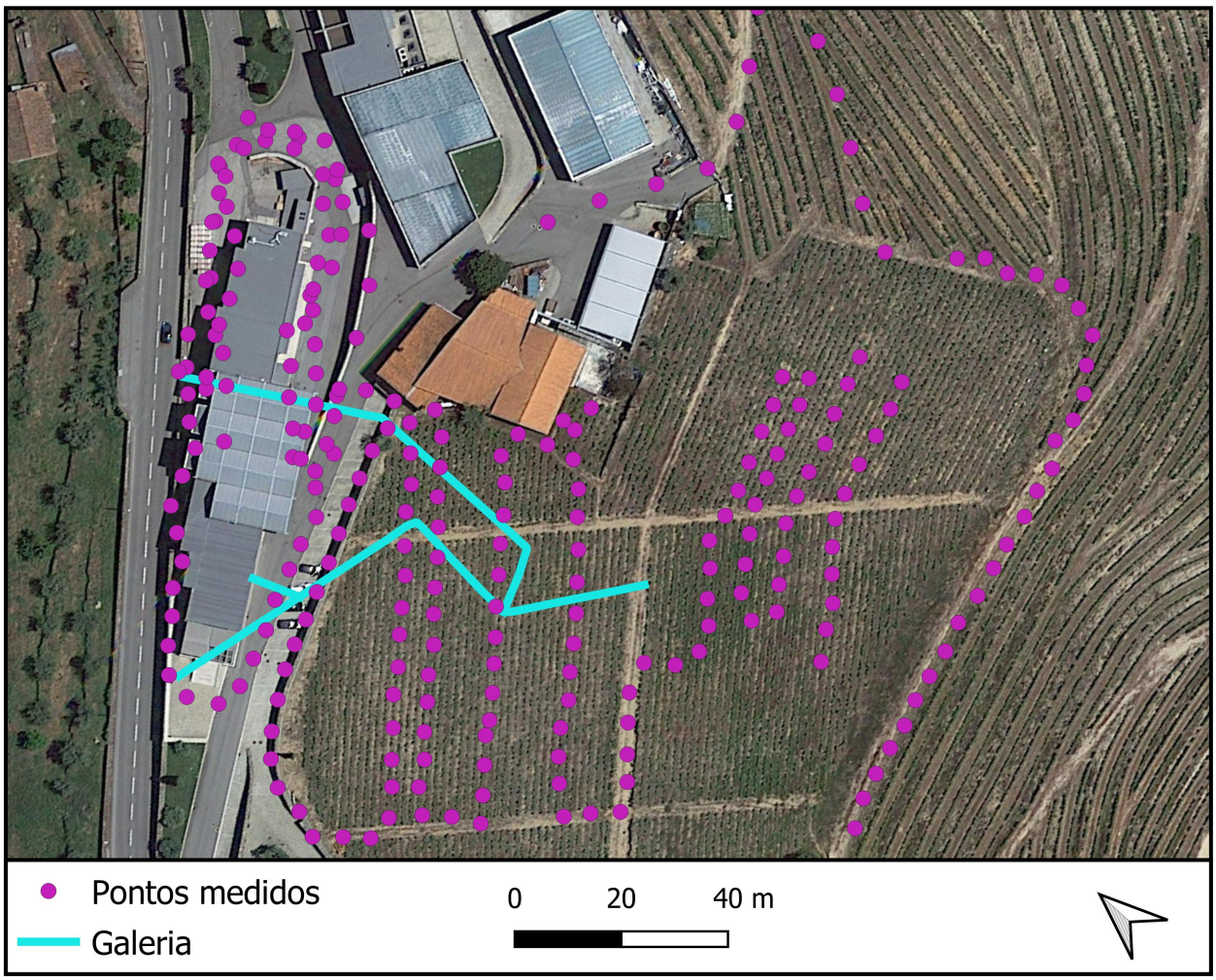


Figura 7.37: Georreferenciamento do mapa da galeria a partir da posição do ponto **48**, e posição dos pontos recolhidos na caracterização do terreno.

Com o perfil topográfico, é possível estimar a condução de calor através da rocha de acordo com a temperatura do ar externo, e estimar a influência deste efeito comparativamente à entrada de ar pelo acesso **A1**. O **modelo** deverá incorporar estratégias de elementos finitos para definir fronteiras entre regiões de ar e rocha, posicionadas com base nos perfis topográficos. Em relação ao que foi discutido em capítulos anteriores em termos de estratégia de modelação, haverá uma nova região por cima da rocha, com ”ar parado”, que receberá dados de estações meteorológicas de regiões próximas às **Caves da Murganheira**, e uma região também preenchida por ar que representará a adega. Com isto, pretende-se:

1. Visualizar (através de uma estimação) a distribuição sazonal de temperaturas no maciço rochoso.
2. Utilizar dados reais de temperatura de entrada da galeria para estimar, através do modelo, o ganho/-perda de calor do ar em um ponto mais adiante.
3. Tentar aproximar uma faixa de variação anual de temperatura ao longo de um trecho da galeria, comprovando se:
   a) A rocha é de facto um reservatório térmico capaz de atenuar as temperaturas externas a ponto de promover condições ideais para o envelhecimento de vinho.
   b) O modelo é capaz de refletir efeitos sazonais de distribuição de temperaturas em rocha e ar. Este é um teste interessante para o modelo, pois não foi concebido inicialmente para estimar períodos tão longos de forma contínua, e coloca a prova seu carácter transiente; também o submete a estresse quanto à condução de calor ao longo de um corpo sólido, e testa a validade de sua abordagem

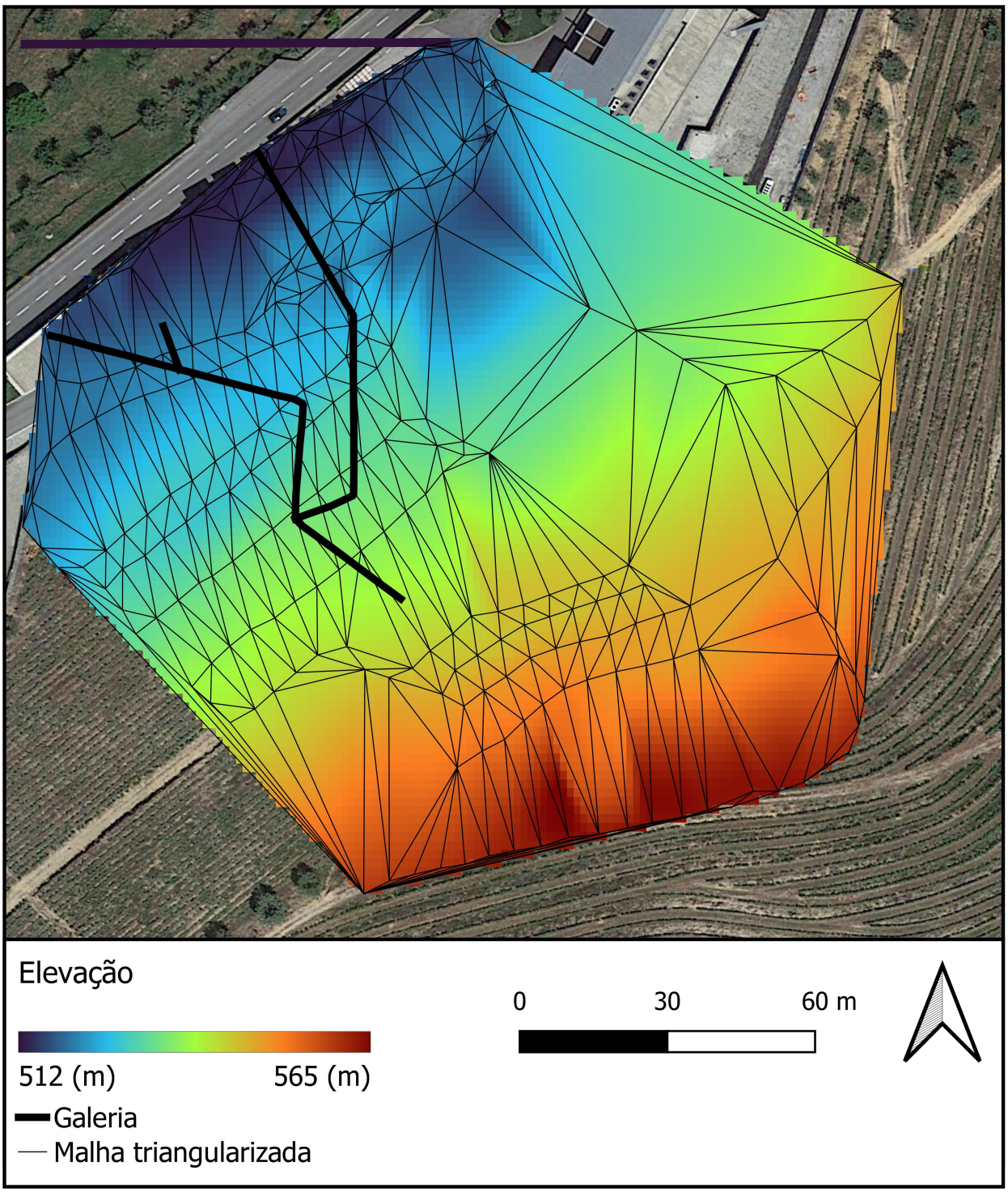


Figura 7.38: Mapa da superfície do terreno sobre as galerias das caves da Murganheira.

geométrica que pressupõe a simetria da galeria (obviamente, o terreno abaixo do piso da galeria não corresponde ao terreno acima do teto).

Para isto, foi feita a recolha de temperatura no interior da galeria em quatro pontos distintos, além da recolha da temperatura no acesso **A1** pelo lado de fora da galeria, ao longo de um mês, o que se convencionou nomear por **Primeira Campanha de Amostragem das Caves da Murganheira**.

Depois, definiu-se um troço de galeria para uma recolha mais longa, que durou cerca de 8 meses, chamada

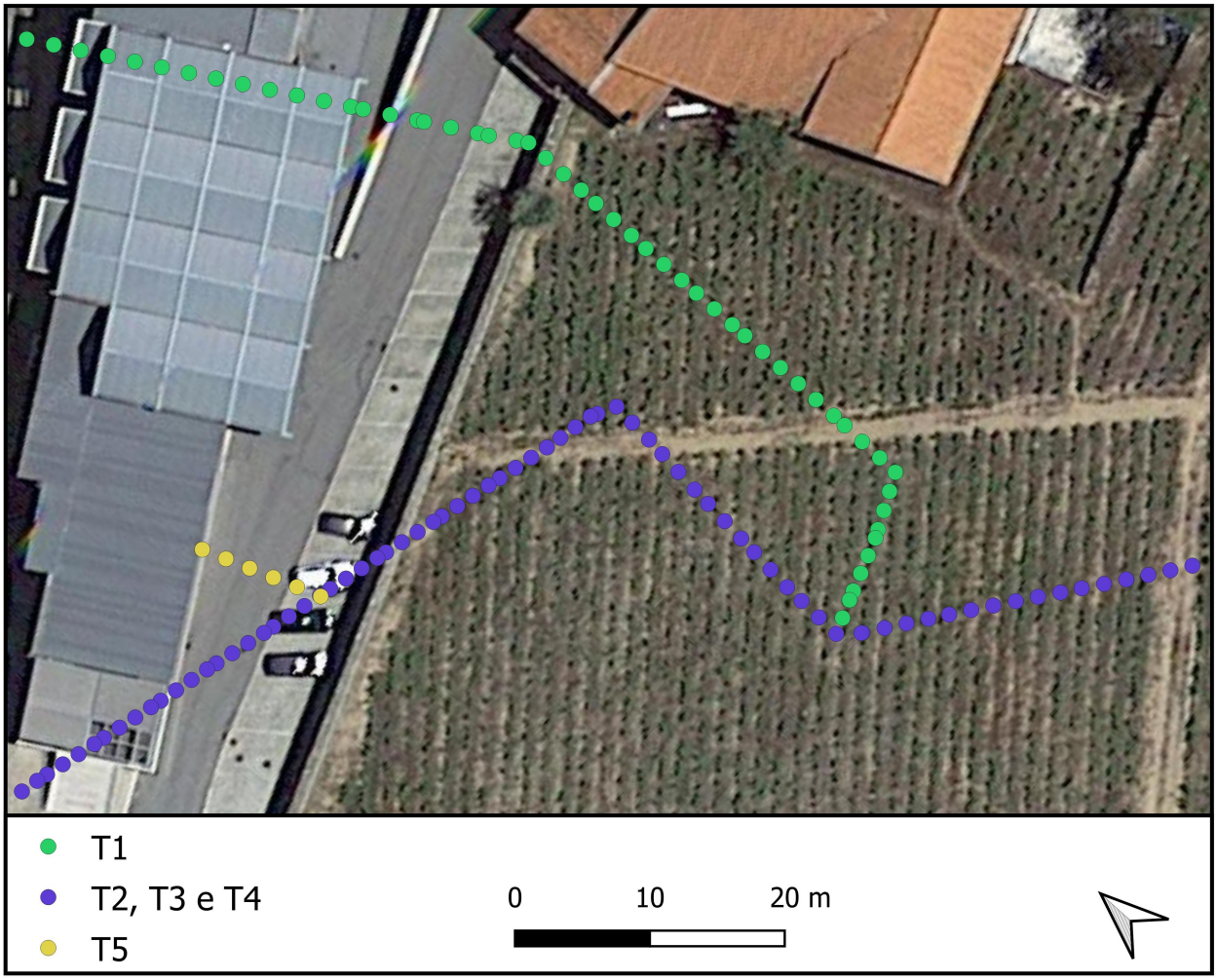


Figura 7.39: Pontos da superfície do terreno sobre a galeria.

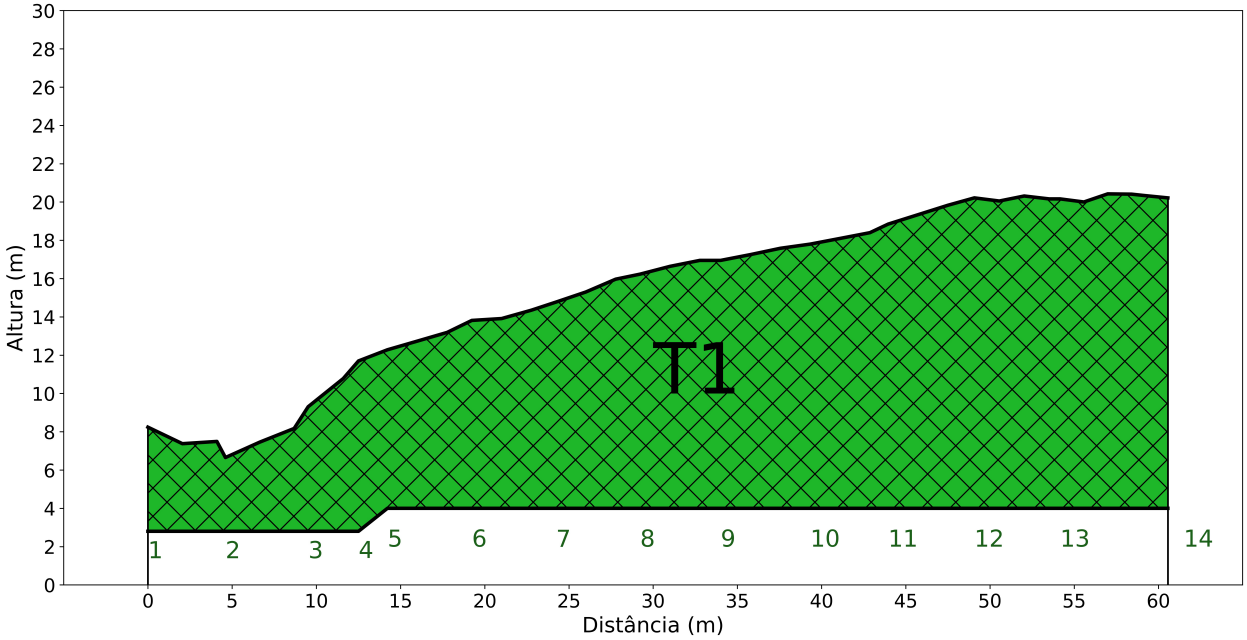


Figura 7.40: Perfil da camada de rocha sobre o trecho **T1**.

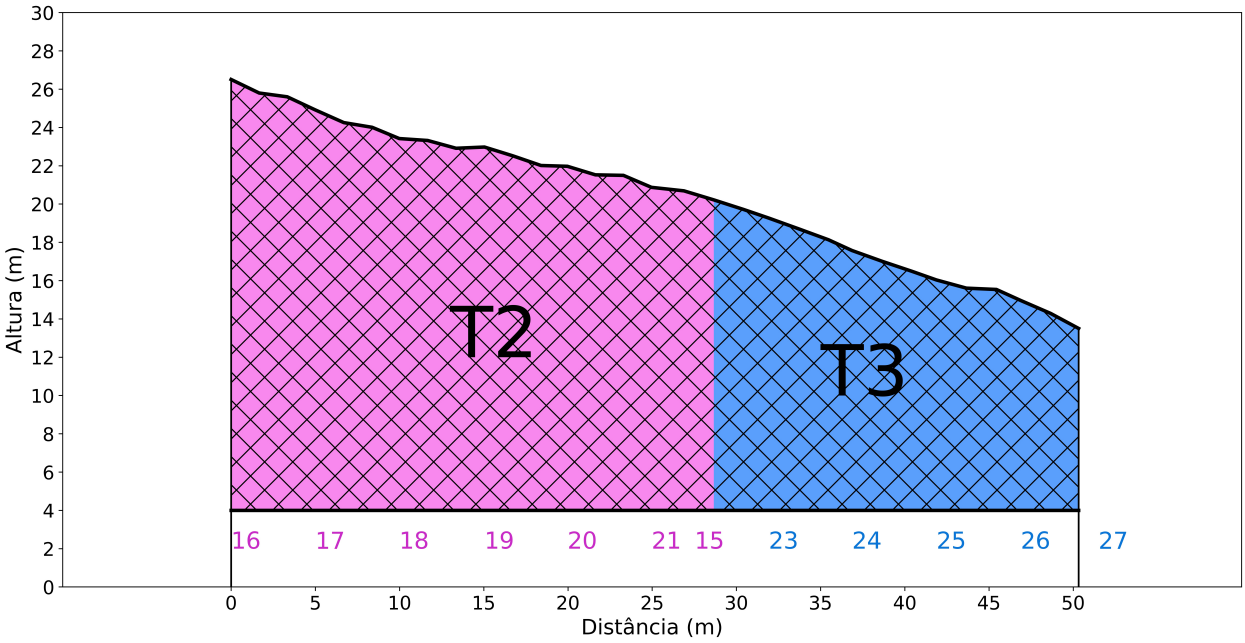


Figura 7.41: Perfil da camada de rocha sobre os trechos **T2** e **T3**.

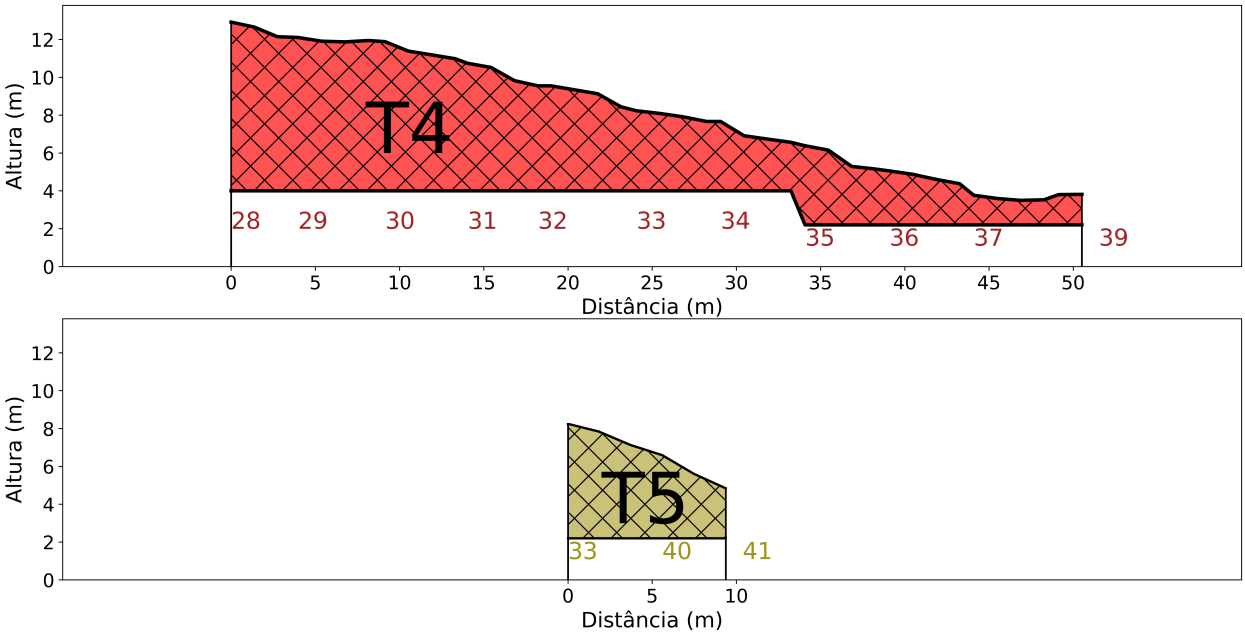


Figura 7.42: Perfil da camada de rocha sobre os trechos **T4** e **T5**.

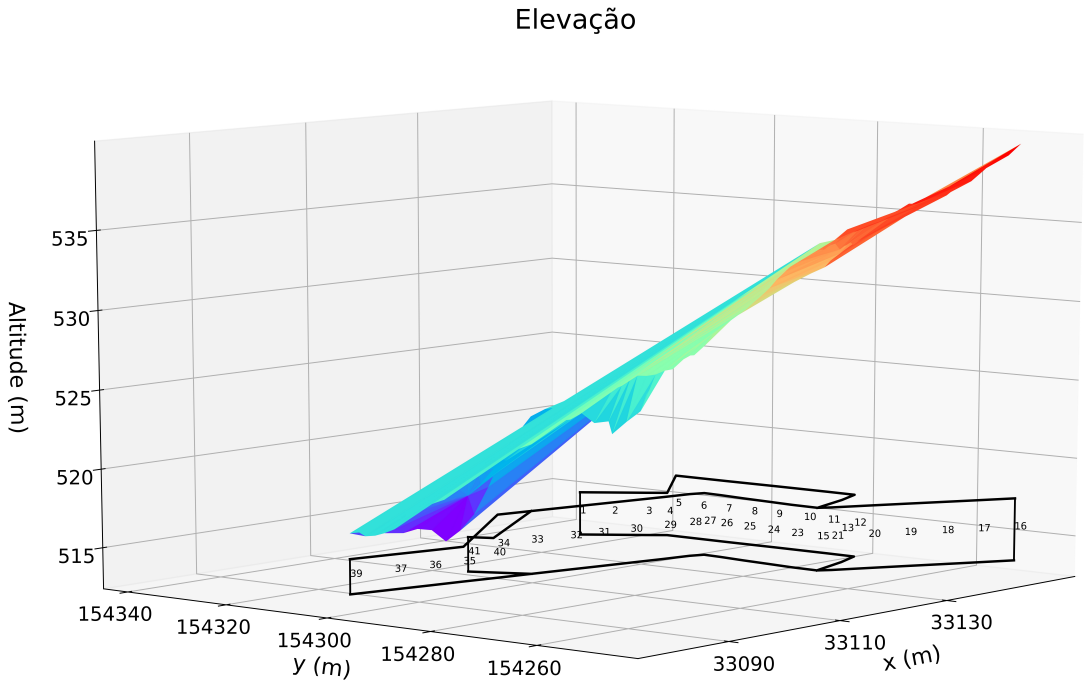


Figura 7.43: Perfil da camada de rocha sobre a galeria das **Caves da Murganheira**.

de **Segunda Campanha de Amostragem das Caves da Murganheira**, com dois pontos de medição no interior da galeria, e um ponto no acesso **A1**. A **Primeira Campanha de Amostragem** tem carácter mais qualitativo e aponta para um estudo em escala de tempo menor, permitindo identificar ciclos diários e semanais de comportamento térmico da galeria.

A **Primeira Campanha de Amostragem**, entretanto, é pouco interessante para a modelação numérica, pois dada a extensão limitada da galeria, as oscilações de temperatura em intervalos de tempo menores são baixas demais, em geral inferiores a 0.5 °C. A **Segunda Campanha de Amostragem das Caves da Murganheira** é a que de facto será utilizada na validação do modelo, e o interesse desta recolha é o carácter sazonal e bio-climático da galeria subterrânea frente a oscilações anuais mais substanciais de temperatura.

Instalação do Sistema de Monitorização

Para a recolha de dados de temperatura para a validação do modelo, procedeu-se à instalação do **sistema de monitorização** nas Caves da Murganheira, em que os diferentes dispositivos da rede de sensores foram posicionados de acordo com a Figura 7.44. Em relação ao mapa da Figura 7.7, tem-se:

1. **unidade central** e **unidade remota n11** instaladas na entrada da galeria, por fora, no ponto **43**.

2. **repetidores de sinal** instalados nos pontos **15** (**r1**), **28** (**r2**) e **33** (**r3**).

3. **unidades remotas** instaladas nos pontos **3** (**n1/2**), **12** (**n9/10**), **25** (**n5**), e **32** (**n3/4**).

4. A **Primeira Campanha de Amostragem** foi feita durante o mês de julho, com os dispositivos instalados conforme mencionado.

5. A **Segunda Campanha de Amostragem** foi feita de outubro de 2021 a março de 2022, somente com as unidades **n11**, **n1/2** e **n9/10**, caracterizando o comportamento sazonal do troço **T1** entre os pontos **1** e **12**.

O posicionamento dos dispositivos foi uma tarefa bastante complicada em termos de força do sinal e comunicação entre **unidades remotas**. As mudanças abruptas de direção entre os troços de galeria e a grande quantidade de garrafas foram fatores que provocaram significativa atenuação. Como se dispunha de um número limitado de dispositivos, as **unidades remotas** foram instaladas em posições favoráveis à comunicação, e quando possível, em linha de visão umas com as outras. Foram também colocados **repetidores de sinal**, dispositivos compostos apenas por rádios-transmissores sem sensores e controladores, para ampliar o alcance de sinal da rede.

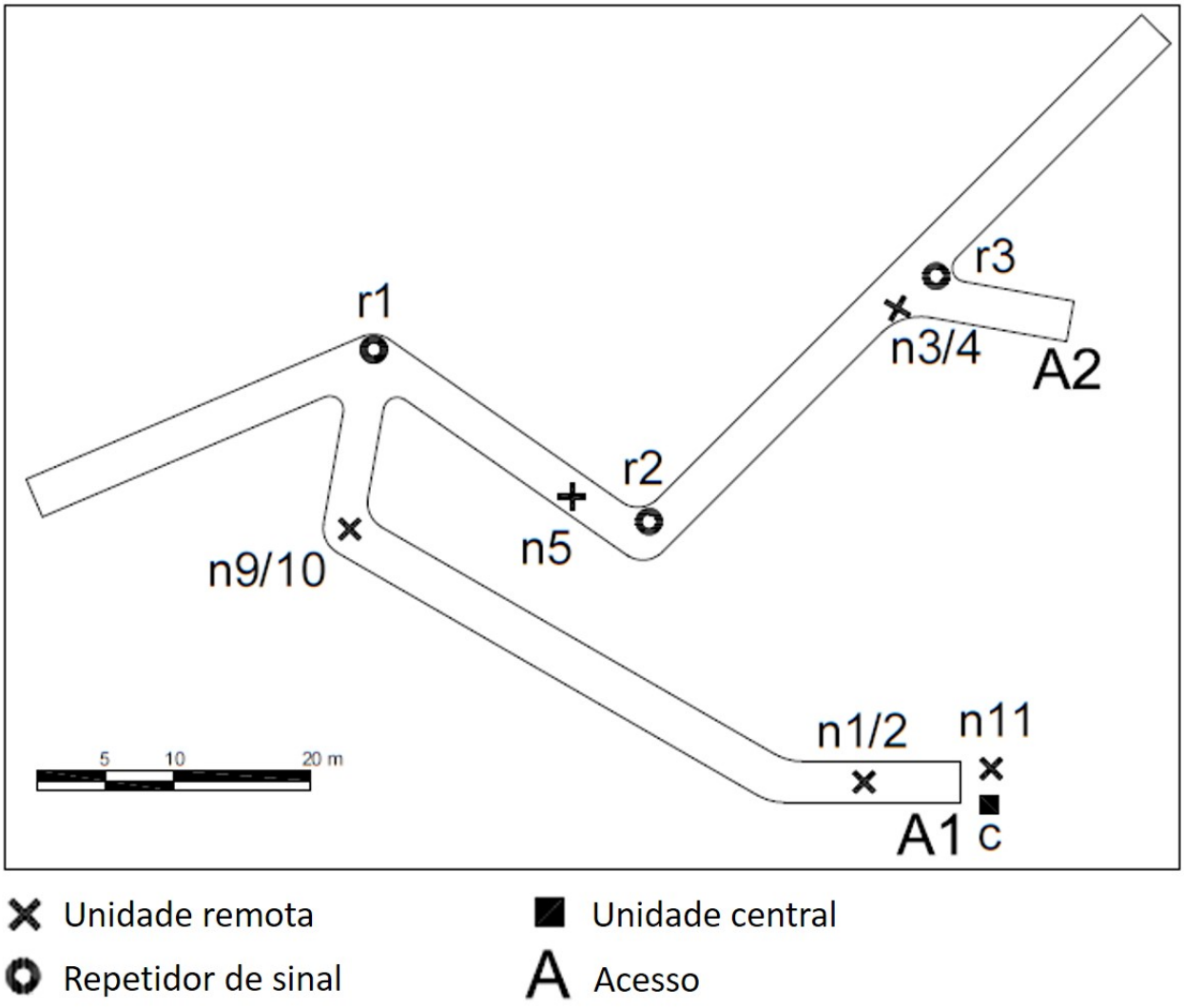


Figura 7.44: Posicionamento dos dispositivos do **Sistema de Monitorização**.

Algumas unidades de monitorização funcionaram por mais tempo do que outras, devido a avarias e outros problemas de perda de comunicação encontrados ao longo dos testes. Isto ocorreu, em grande medida, devido ao carácter experimental da montagem do sistema de monitorização, instalado pela primeira vez nesta campanha de amostragem. Destaca-se a dificuldade de implementação de um sistema de monitorização em uma situação real como parte fundamental ao desenvolvimento deste tipo de aplicação: os problemas e falhas encontrados são fontes valiosas de informação, aperfeiçoamento, e aprendizagem. É impossível prevê-las sem expor o sistema às ”pressões” de um ambiente subterrâneo húmido e confinado.

As correções de posicionamento dos dispositivos foram feitas ao longo de alguns dias de testes, até atingirem a disposição mostrada na Figura 7.44. Para as duas campanhas de amostragem, tem-se:

1. A **Primeira Campanha de Amostragem das Caves da Murganheira** conta com cerca de 36 dias de recolha de dados. Cada unidade remota realizou medidas em intervalos de 10 em 10 minutos. Para esta campanha, destaca-se:

Figura 7.45: Posicionamento de duas **unidades remotas**.

a) Funcionamento por cerca de 10 dias da **unidade remota n3/4**. A baixa variação de temperatura neste ponto da galeria não justificou um reparo e substituição dos dispositivos;

b) Funcionamento por cerca de 15 dias da **unidade remota n5**;

c) Funcionamento por períodos superiores a um mês de **n11**, **n1/2** e **n9/10**, unidades que produziram de facto os dados mais significativos para esta campanha de amostragem;

2. A **Segunda Campanha de Amostragem das Caves da Murganheira** conta com cerca de 6 meses de recolha de dados:

   a) Funcionamento por cerca de 9 meses de **n11**, **n1/2** e **n9/10**, com finalidade de detetar variações de temperatura no interior da galeria e da adega influenciadas pela sazonalidade da temperatura externa, nos pontos mais relevantes estabelecidos através das medições da campanha de amostragem anterior;

   b) Operação ininterrupta e sem substituição de baterias das unidades **n1/2** e **n9/10** por mais de 6 meses, comprovando a alta autonomia do sistema de monitorização;

Convencionou-se, nas campanhas de amostragem, utilizar **números ímpares para nomear os dispositivos de recolha de temperatura do ar**, e **números pares para os dispositivos de recolha de temperatura da rocha**. As **unidades remotas** **n3/4** e **n5** não foram reinstaladas nas Caves da Murganheira por períodos mais longos de tempo por duas razões importantes:

1. Os dados de temperatura recolhidos nestas posições não eram de fundamental importância para as análises: como se mostrará na secção de análise preliminar e pré-tratamento de dados, os valores recolhidos por **n5** estão limitados pelos valores de temperatura recolhidos por **n1/2** e **n9/10**, e a variação de temperatura em **n3/4** é mínima e pouco significativa;

2. Para efeitos de caracterização espacial de temperatura ao longo dos troços de galeria, considerou-se que 10 dias já eram suficientes, com recolha mínima de 1000 medições de temperatura;

3. foram reparados e adaptados na construção dos **dataloggers** utilizados nas **Campanhas de Amostragem das Minas da Panasqueira**. Como já se mencionou, havia um número limitado de dispositivos de recolha de temperatura, que tiveram de ser distribuídos em diferentes locais de testes, pois as campanhas de amostram foram parcialmente simultâneas.

Considerações gerais para as Campanhas de Amostragem das Caves da Murganheira

Para as **Caves da Murganheira**, destaca-se:

1. Galeria de fácil acesso, sendo possível manipular as unidades de amostragem sempre que necessário para retificar a instalação e substituir equipamentos defeituosos, além de facilitar o estudo da atenuação do sinal de rádio no interior da galeria e permitir uma otimização do **sistema de monitorização**.

2. Baixa circulação de ar, pois não há ventilação forçada e apenas uma das entradas da galeria fica totalmente aberta.

3. Estabilidade da temperatura no interior da galeria, que atua como permutador de calor natural para arrefecer/aquecer o ar externo e também como isolante térmico, garantindo condições mais estáveis para a maturação dos vinhos espumantes.

4. Facilidade de montagem física das unidades de amostragem, que podem ser colocadas sobre superfícies planas sem a necessidade de fixação ou de instalação de suportes.

5. Comprimento total da galeria relativamente pequeno, favorecendo a utilização de rádio-transmissores para o envio das leituras de temperatura instalados em linha de visão e utilizando uma arquitetura *multi-hop*, sem a necessidade de utilizar um número alto de nós e dispositivos.

6. Facilidade em instalar um coordenador da rede no exterior da galeria, com alimentação a partir da rede elétrica, em linha de visão com a primeira unidade remota e próximo a um ponto com acesso à Internet, possibilitando acesso remoto aos dados em tempo real.

7. Carácter experimental das medições - nestas campanhas de amostragem, testou-se tudo que era possível, da implementação de um sistema de monitorização a uma caracterização detalhada de temperatura e um levantamento minucioso do terreno. Isto foi possível devido à curta extensão do sistema subterrâneo e de condições favoráveis de acesso e segurança na galeria. Para além dos dados recolhidos para a validação, este local de testes serviu como um laboratório termodinâmico de estruturas subterrâneas.

7.1.3 Campanha de amostragem das Minas da Panasqueira

Descrição do local

O segundo local de testes escolhido foram as **Minas da Panasqueira**, devido a possibilidade de realizar recolha de temperatura em extensões maiores de galeria e com escoamento significativo de ar devido a ventilação natural e forçada, além de possibilitar a validação do modelo com dados provenientes de uma galeria real de mineração.

Geometria das galerias

Os troços de galeria escolhidos para a recolha de temperatura pertencem a uma antiga galeria de rolamento e extração, atualmente desativada. São aproximadamente retilíneos, sub-horizontais, e com área de secção aproximadamente constante por quase toda a extensão da região de testes, entre os pontos V2 e V6, conforme o mapa da Figura 7.47. A galeria possui secção retangular de aproximadamente 3 m de largura por 2 m de altura, escavada em rocha encaixante. Há um poço no ponto V3 em que ocorre injeção natural de ar, e quando os ventiladores estão ligados, há escoamento de ar com direção de V2 a V6. A saída para a lavaria, a aproximadamente 2 km de distância de V2 está permanentemente aberta. Outros acessos estão permanentemente fechados.

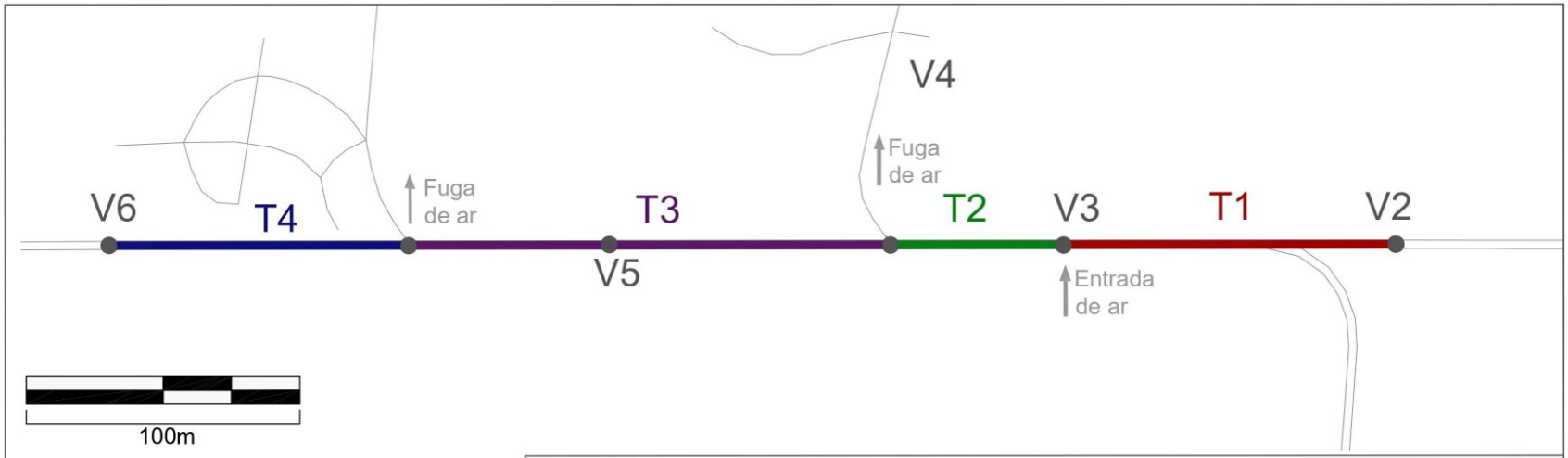
O facto de a galeria estar desativada é uma vantagem para a realização dos testes pois garante-se que a leituras de temperatura dos **dataloggers** não será perturbada por fatores externos.

Através de fotografias da galeria, um tanto prejudicadas pelas condições de baixa luminosidade, é possível estimar valores médios para a rugosidade das paredes. Utilizou-se imagens transportadas para escala real através da área de secção conhecida da galeria, em AutoCAD, para desenhar um perfil das irregularidades (Figuras 7.48 e 7.49); considerou-se irregular qualquer perfil que se desvie da área de secção suposta para a galeria.

Para cada uma das imagens, escolheu-se as superfícies com irregularidades mais aparentes para estimar a rugosidade média da secção. A partir das linhas de largura e altura, desenhou-se linhas perpendiculares de 0.1 em 0.1 m e mediu-se a distância entre o perfil retangular da galeria e o perfil irregular da galeria. Foi calculada para cada imagem a média destes valores.

Para a Figura 7.48, foi escolhida apenas uma superfície para a estimação da rugosidade, pois esta era mais facilmente distinguível, dadas as limitações de definição e qualidade da fotografia. Em relação à Figura

Figura 7.46: Trecho de galeria das Minas da Panasqueira.



Período	Ventiladores	Caudal e direção			
		T4	T3	T2	T1
Seg. - Sex. 5h00 - 13h00 17h00 - 22h00	1250rpm	0.23m/s ←	1.10m/s ←	1.30m/s ←	0.92m/s ←
Seg. - Sex. 13h00 - 17h00 22h00 - 5h00	750rpm	0.00m/s ←	0.70m/s ←	1.00m/s ←	0.60m/s ←
Sab.14h00 - Seg.7h00	0rpm	0.20m/s →	0.10m/s →	0.10m/s →	0.10m/s →

Figura 7.47: Mapa da rede de galerias onde foram recolhidos dados de temperatura nas **Campanhas das Minas da Panasqueira**, com informações de caudal.

Figura 7.48: Secção da galeria de testes das **Minas da Panasqueira**, com perfil de rugosidade traçado em AutoCAD.

Figura 7.49: Secção da galeria de testes das **Minas da Panasqueira**, com perfil de rugosidade traçado em AutoCAD.

7.49, foi possível utilizar duas superfícies para estimar a rugosidade. Para valores de entrada do modelo, foi utilizada a média das rugosidades estimadas para as duas imagens, de aproximadamente 0.17 m.

Geologia e propriedades termofísicas

Embora o depósito mineral das Minas da Panasqueira esteja inserido em um contexto geológico bastante intrincado, a galeria de testes foi escavada na rocha encaixante do depósito mineral composta essencialmente por Xisto-Grauváquico. As Minas se situam sobre o Complexo Xisto-Grauváquico-Grupo das Beiras.

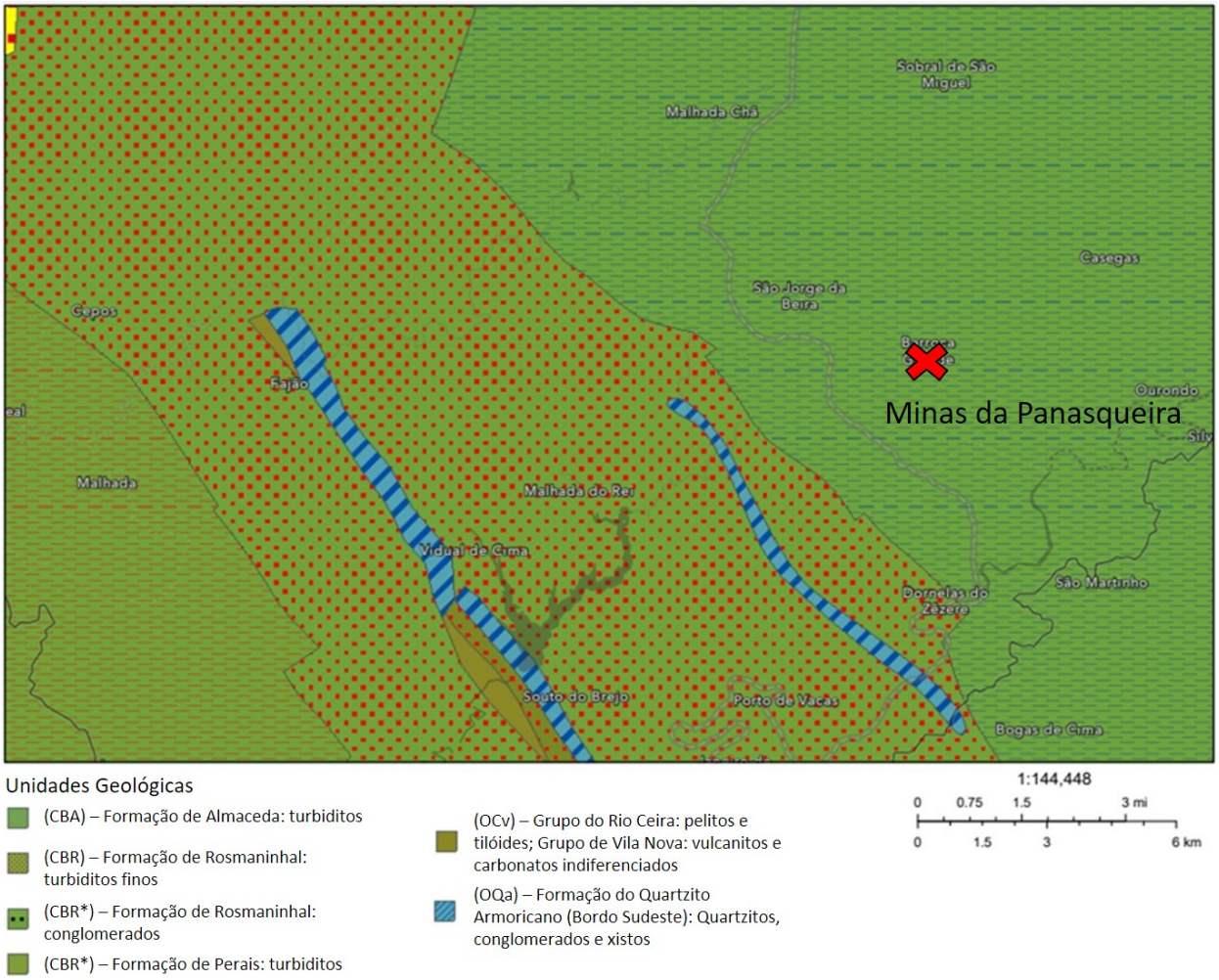


Figura 7.50: Localização das **Minas da Panasqueira** em relação à Carta Geológica de Portugal.

Foram recolhidas amostras da rocha encaixante para realizar ensaios das propriedades termofísicas da rocha que constitui a galeria de testes. Isto foi necessário pois, ao contrário do caso das Caves da Murganheira, não há caracterização conhecida das propriedades térmicas desta rocha.

Foram preparados provetes de aproximadamente $4.5 \times 4.5 \times 1.0\,cm$, com as duas superfícies maiores polidas, para realizar os ensaios de condutividade térmica e calor específico, como mostra a Figura 7.51.

Os ensaios foram realizados na Universidade de Coimbra, no Departamento de Engenharia Química, utilizando um equipamento de análise de constantes térmicas TPS 2500 S Hot Disk e um circulador de banho aquecido ThermoScientific. Os valores médios obtidos através de três ensaios com provetes diferentes são mostrados na Tabela 7.3.

Caracterização termográfica e do perfil de temperatura

Foi utilizada uma câmara termográfica FLIR ® ThermaCAM E300 para registar a temperatura da rocha da parede lateral da galeria nos pontos V2, V3, V5 e V6. Os termogramas foram tratados em software FLIR e

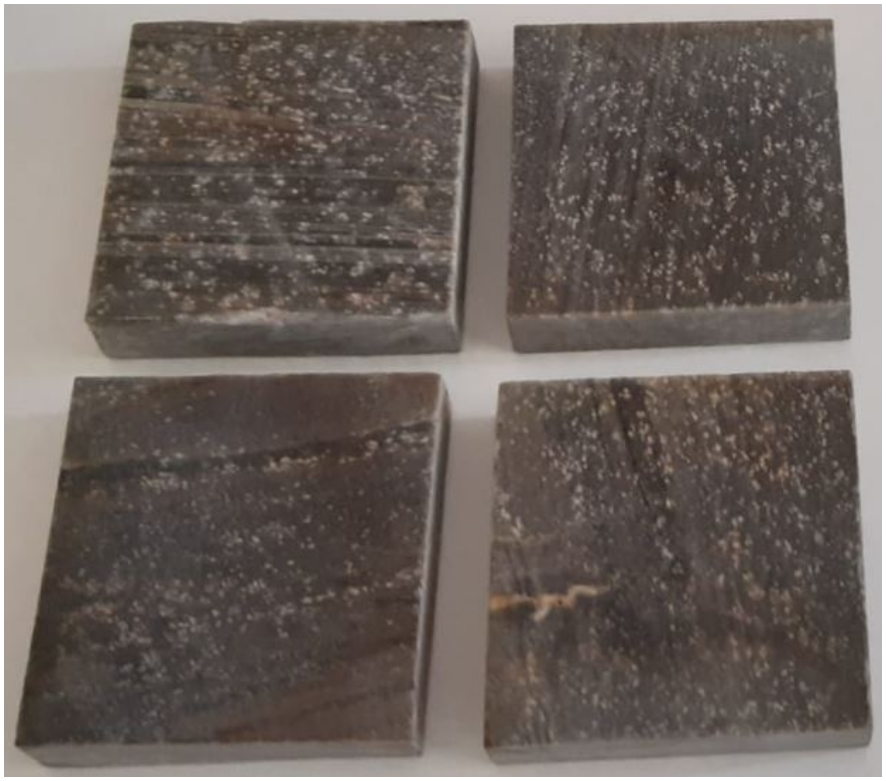


Figura 7.51: Provetes preparados para os ensaios de condutividade térmica.

Calor específico volumétrico $c\ \left(\frac{J}{m^3\,K} \times 10^{-6}\right)$	Condutividade térmica $k\ \left(\frac{W}{m\,K}\right)$	Difusividade térmica $\alpha\ \left(\frac{m^s}{s} \times 10^6\right)$
1.911	2.722	1.446

Tabela 7.3: Propriedades termofísicas da rocha das **Minas da Panasqueira**.

ajustados para uma mesma escala de temperatura (Figuras 7.52 - 7.55). Os valores máximo, mínimo e médio de temperatura são mostrados na Tabela 7.4.

Temperatura (°C)	Superfície medida			
	V2	V3	V5	V6
Máxima	11.7	12.4	13.1	14.6
Mínima	9.1	10.4	11.3	12.3
Média	10.2	11.2	12.0	13.2

Tabela 7.4: Temperaturas medidas através das termografias das Figuras 7.52 - 7.55.

O levantamento termográfico permite concluir que há um gradiente de temperatura entre V2 e V6, em que a temperatura superficial da rocha aumenta substancialmente em direção a este último. Este perfil preliminar de temperatura indica que possivelmente há um acréscimo de temperatura do ar partindo de V2 em direção a V6, que sofre aquecimento pela superfície da galeria quando o ar flui neste sentido.

Medição do caudal de ar

Dada a distribuição da rede de galerias do local de testes, foi preciso dividir a galeria principal, onde foram realizadas as medições de temperatura, em quatro troços, delimitados por pontos de entrada ou fuga de ar, conforme o mapa da Figura 7.47. Com esta divisão, garante-se que o caudal de ar medido em cada

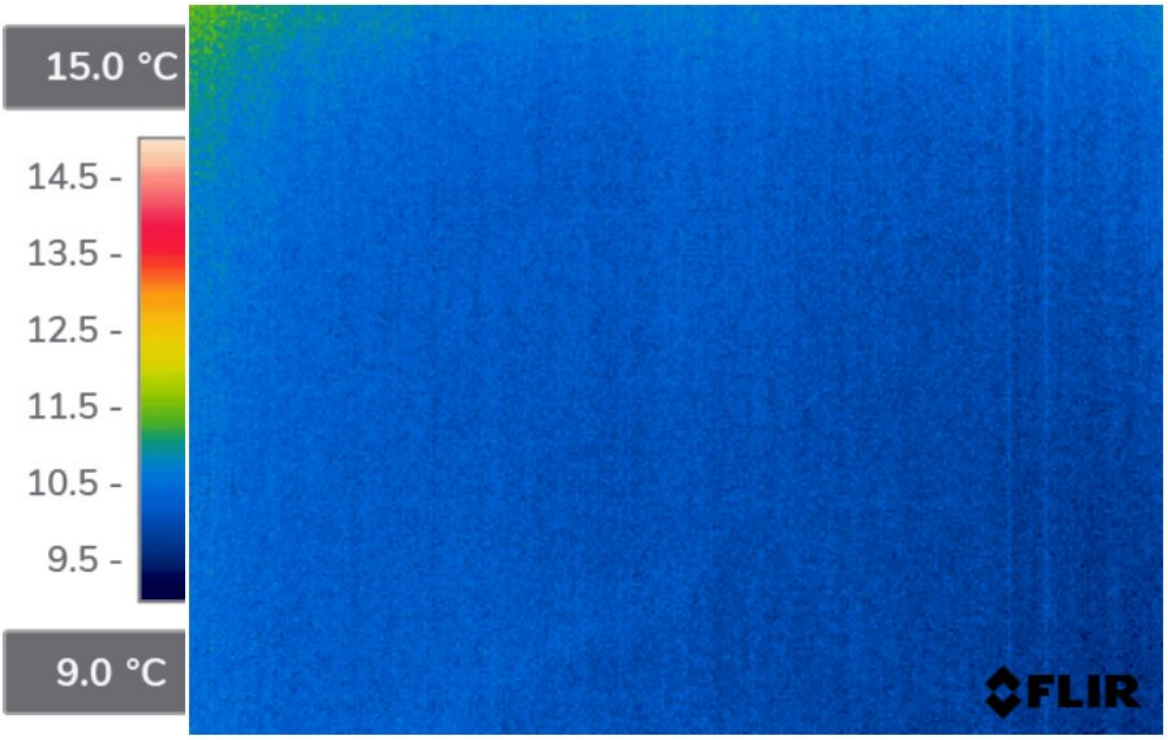


Figura 7.52: Termografia da superfície de rocha lateral à galeria no ponto V2.

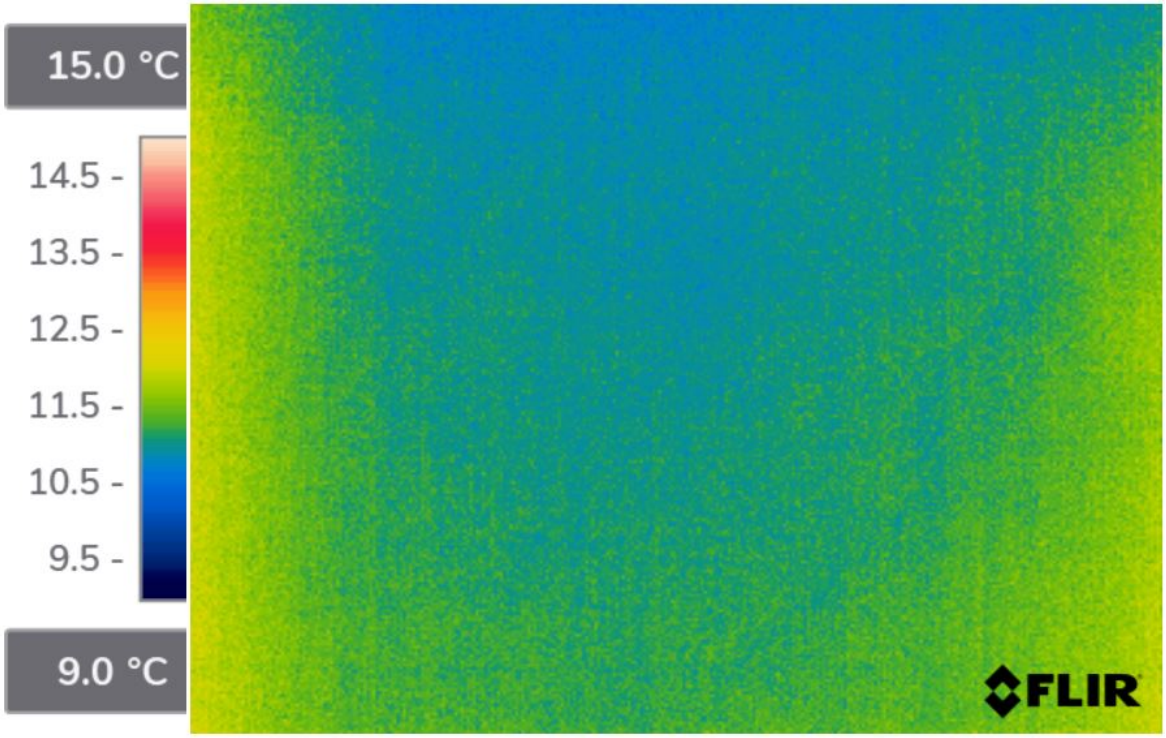


Figura 7.53: Termografia da superfície de rocha lateral à galeria no ponto V3.

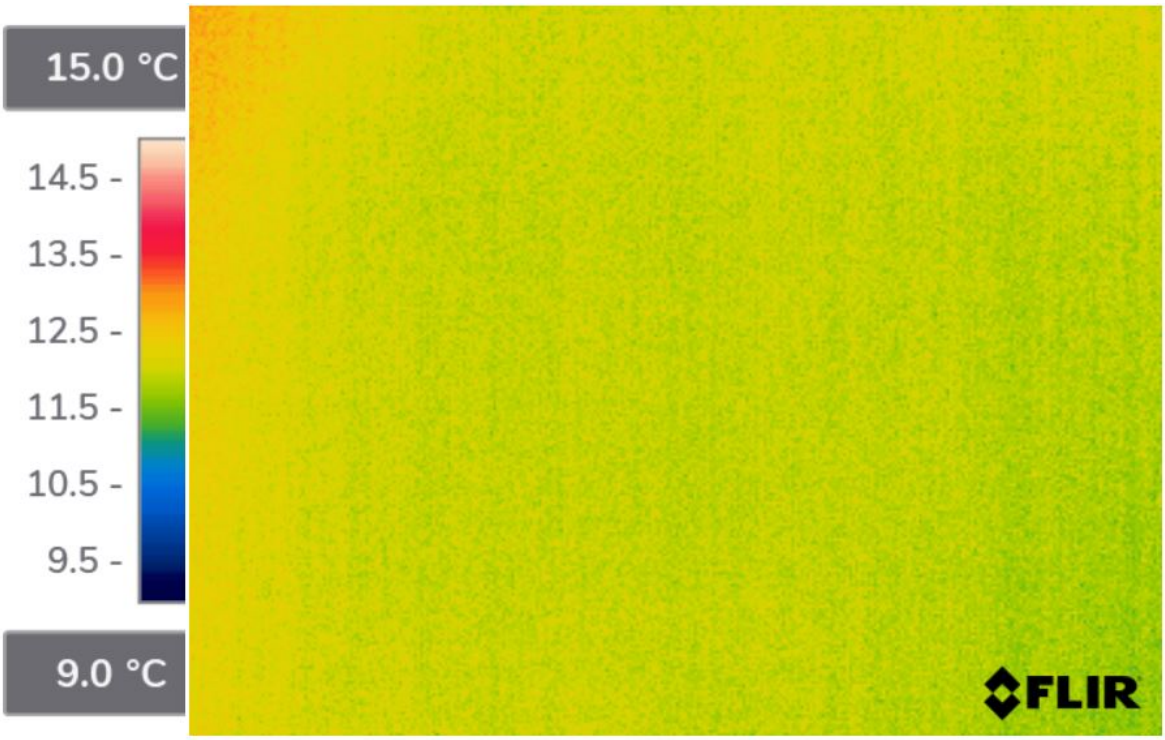


Figura 7.54: Termografia da superfície de rocha lateral à galeria no ponto V5.

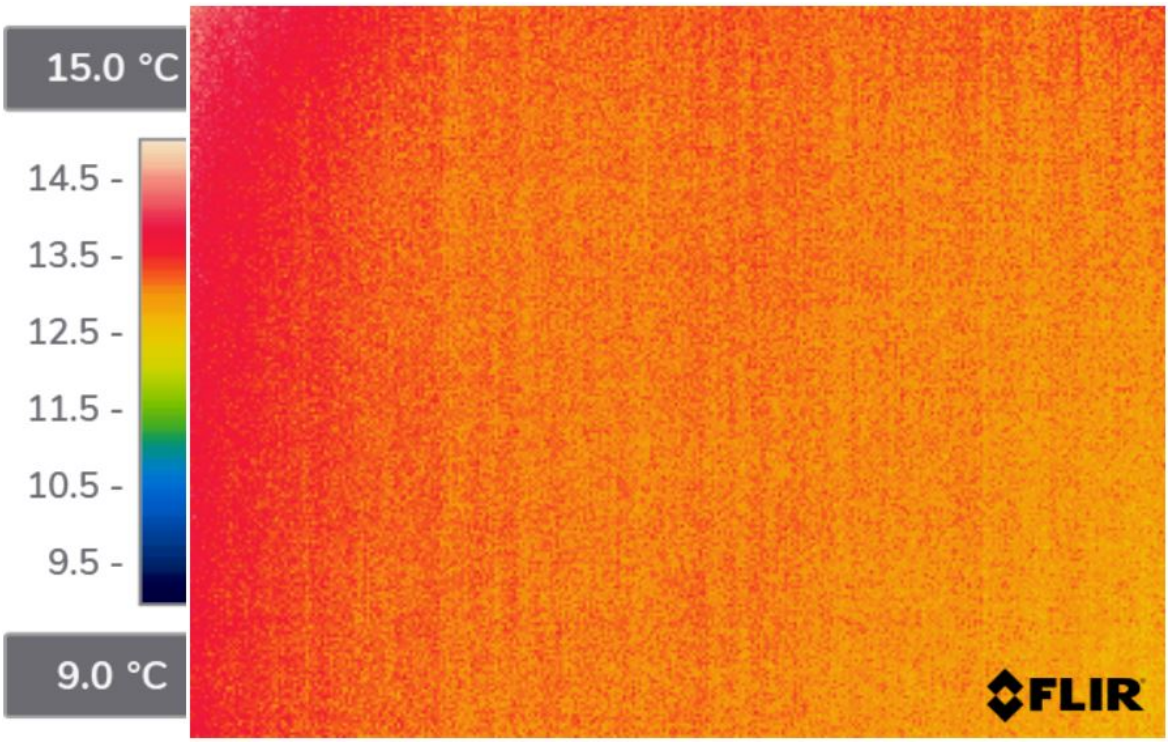


Figura 7.55: Termografia da superfície de rocha lateral à galeria no ponto V6.

troço é constante em toda sua extensão. Isto permite modelar a evolução de temperatura troço-a-troço, incorporando variações mássicas e de velocidade do ar, que impactam diretamente as trocas de calor.

O caudal de ar foi medido a partir do centro da galeria, onde sua velocidade do escoamento é suposta como máxima. O equipamento utilizado foi um VelociCalc ® Air Velocity Meter 9545-A[1], que mede temperatura em °C, humidade relativa, e velocidade do ar em $\mathrm{m\,s^{-1}}$. Todas as medições foram feitas em secções de galeria retangulares de aproximadamente $3 \times 2\,m$, e para dois regimes de operação distintos para os ventiladores, um a 750 RPM e outro a 1250 RPM. O caudal para os fins de semana, quando os ventiladores ficam desligados mas sabe-se que há ventilação natural[2], foi estimado, e não medido. A velocidade do ar para os troços de galeria frente à diferentes condições de operação dos ventiladores é expressa na tabela da Figura 7.47.

Instalação dos dataloggers

Foram instalados os **dataloggers** em dois pontos de medição diferentes na **Primeira Campanha de amostragem**, e em quatro pontos na **Segunda Campanha de amostragem**, conforme a Tabela 7.5.

Campanha	Ponto de instalação			
	V2	V3	V5	V6
Primeira	n3	-	-	n5
Segunda	n3/5	n1/2	n7	n5/6

Tabela 7.5: Ponto de instalação dos **dataloggers** em relação ao mapa da Figura 7.47.

Na **Primeira Campanha** recolheu-se temperatura por aproximadamente 5 dias para o **datalogger n3** e por cerca de um mês para o **datalogger n5**. Na **Segunda Campanha**, recolheu-se temperatura durante 48 dias para os **dataloggers n1/2** e **n5/6**, 22 dias para o **datalogger n3/4**, e 5 dias para o **datalogger n7**, que se avariou.

Considerações gerais para as Minas da Panasqueira

Para as **Minas da Panasqueira**, as características principais são:

1. Galeria extensa integrada na rede de galerias que leva a outros níveis da mina, ou seja, que compõe uma rede subterrânea.
2. Realização das medições em um troço de galeria suficientemente distante da superfície e da entrada de ar externo, com circulação significativa de ar e pouco sensível a variações da temperatura do ar exterior.
3. Condições transitórias de ventilação em função do dia da semana, horário, e turnos de operação da mina.
4. Na galeria escolhida para os testes, há pouca ou nenhuma circulação de pessoas e não há operação ou presença de equipamentos mecânicos.
5. Comprimento total da galeria desfavorável à instalação de uma rede de sensores sem fio, que exigiria um elevado número de dispositivos transmissores ou a utilização de rádio-transmissores mais robustos capazes de emitir sinais a maiores distâncias.
6. pouca inclinação ou variação de profundidade ao longo da galeria.

7.2 Dados brutos de temperatura

Os dados de temperatura recolhidos ao longo das quatro campanhas de amostragem compõem um extenso banco de dados de temperatura. Como há limitação de resolução dos sensores, os dados brutos necessitam passar por uma etapa de filtragem, de modo a eliminar variações espúrias de temperatura que não representam

[1] Manual disponível em https://tsi.com/getmedia/3baa2df5-2d7b-49ee-ada5-24f3a1c88c32/9545A-VelociCalc-1980564E-web?ext=.pdf.
[2] Conforme relatado por trabalhadores da mina.

variações concretas de temperatura dos ambientes. Busca-se eliminar valores com pouca repetibilidade, e gerar um novo banco de dados com valores de temperatura adequados à validação do modelo.

7.3 Filtragem e pré-processamento dos dados

A evolução e a variação da temperatura ao longo do tempo pode ser compreendida como um sinal, formados por componentes de: sinais de alta amplitude (tendência macroscópica de comportamento da temperatura, por exemplo as variações diária e sazonal); e baixa amplitude (ruído de precisão do sensor, facilmente identificável por ser uma oscilação positiva e negativa de valor aproximadamente constante, ou pequenas variações ocasionais).

A interpretação das variações dos valores numéricos das medidas de temperatura obtidas através do sensores está condicionada à resolução do sensor, à repetibilidade das medições, e ao erros de enviesamento:

1. Quanto à resolução, é necessário avaliar o quão diferentes duas temperaturas têm de ser para que o sensor detete uma variação;

2. Em relação à repetibilidade, imagina-se que duas temperaturas iguais devem obter duas medições idênticas. No caso, observam-se pequenos degraus nas curvas de temperatura (como na Figura 7.56), que indicam uma baixa repetibilidade e cuja variação esperada oscila positiva e negativamente em torno de 0.04 °C;

3. O erro de enviesamento indica a exatidão das medidas, e ocorre quando as leituras de temperatura são desviadas do valor real mesmo compensando-se as outras componentes de erro. Nas campanhas de amostragem, há pouco enviesamento: a maior parte dos desvios se explica por oscilações que decorrem das limitações de precisão dos sensores;

Em ambas as campanhas de amostragem, observou-se grande presença de ”ruído” nos dados brutos de temperatura, que refletem oscilações artificiais induzidas pelas limitações acima mencionadas.

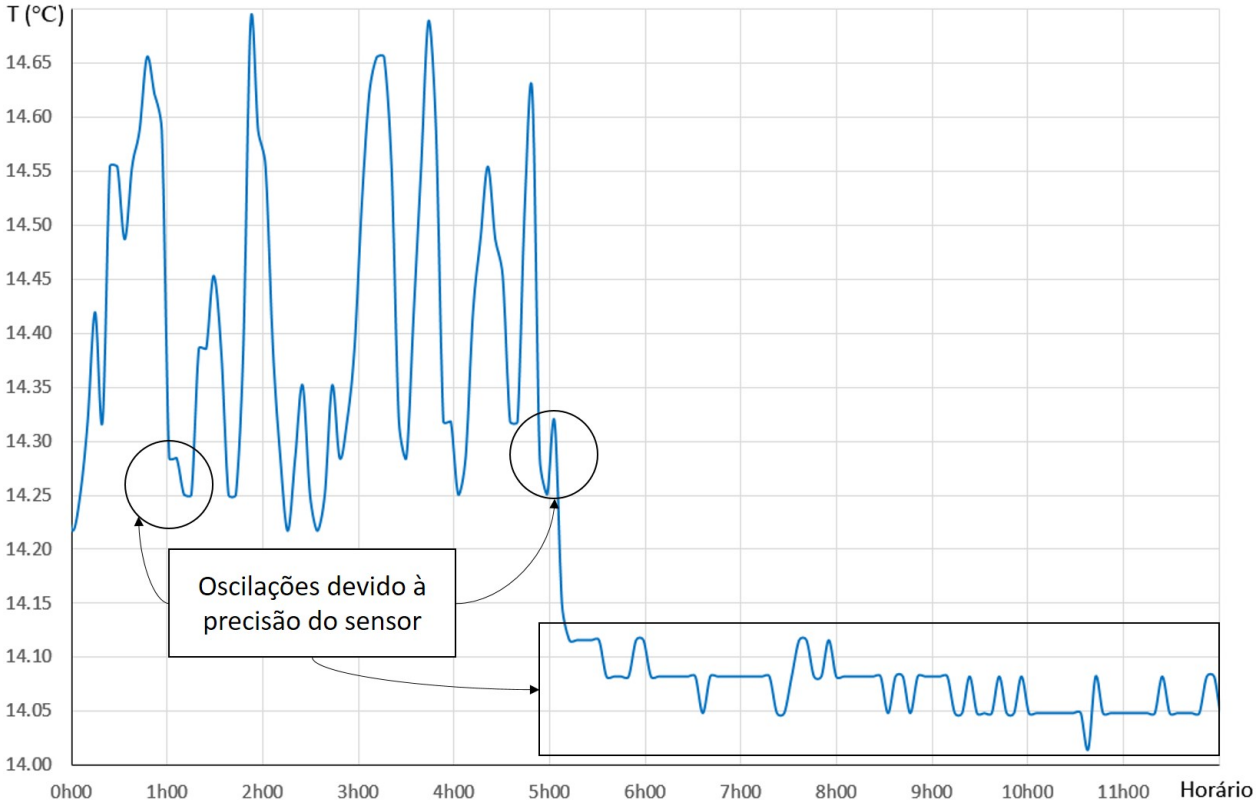


Figura 7.56: Série temporal dos dados de temperatura com ruídos da precisão do sensor.

A série temporal de temperatura pode ser compreendida por uma soma de sinais de diferentes frequências, em que os ruídos oriundos da limitação de precisão e originados por outras perturbações, que não as variações naturais esperadas da temperatura, podem ser identificados, isolados e eliminados. A Figura 7.57 mostra os dados brutos de temperatura no domínio do tempo e da frequência, respetivamente, para a série de temperatura de um dos **dataloggers** da Primeira Campanha de Amostragem das Minas da Panasqueira. Um modo de lidar com este problema é utilizar **Transformadas de Fourier** para identificar frequências críticas e criar filtros para as eliminar.

O processo de Transformação de Fourier, porém, introduz artificialmente um conjunto de frequências harmónicas, resultantes da discretização dos dados, que não ajudam a explicar o sinal contínuo. Estas são frequências ao longo do todo espectro que são distinguíveis com base em sua amplitude, mas que são difíceis de serem isoladas do restante das frequências. A Transformada de Fourier cria, portanto, frequências espúrias que não explicam o sinal e que são uma consequência da amostragem. O que se pretende filtrar são os sinais de baixa amplitude que são resultantes de:

1. Variações temporais de pequeno valor que são artifício do sensor;
2. Variações bruscas do valor de temperatura resultantes do processo de discretização temporal da recolha de dados;

7.3.1 A Transformada de Fourier como ferramenta de processamento de sinais

Sinal discreto no tempo

Um sinal pode ser qualquer sequência de números, com ou sem um significado particular associado; se a sequência é aleatória, o sinal pode ser entendido como um ruído (Thyagarajan, 2018). Sinais contém informações, e são abundantes em aplicações de ciências e engenharia (Sundararajan, s.d.), podendo expressar diferentes grandezas.

Os dados de temperatura obtidos nas campanhas de amostragem podem ser compreendidos como sinais discretos no tempo, pois são uma sequência de valores conhecidos para determinados instantes de tempo, resultantes da amostragem (discreta) de um fenómeno espacial e temporalmente contínuo, a "temperatura".

Estes sinais ou séries temporais podem conter interferências indesejadas ou ruídos.

Algoritmos FFT e IFFT

A ideia da **Transformada de Fourier** é representar o sinal de uma forma alternativa, mas equivalente, para obter vantagens no seu processamento, sendo uma representação de sinais amplamente utilizada (Sundararajan, s.d.). A transformada modifica o domínio temporal da série para o domínio das frequências. O que os sistemas de processamento de sinais exploram, em essência, é o fato de que estes podem ser decompostos numa soma de componentes periódicos simples, de frequência e amplitude constantes, mutas vezes legíveis em termos fenomenológicos, e que são facilmente manipulados por operações de filtragem. O que torna interessante o processo é a existência da Tranformada de Fourier Inversa, que permite reconstituir o sinal original ou depois de processado.

Uma Transformada de Fourier de um sinal discreto no tempo, ou **DFT**, é definida matematicamente (conforme Thyagarajan (2018)), para uma sequência de tamanho finito e com valores uniformemente distribuídos, por:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-i\frac{2\pi}{N}nk} \qquad 0 \leq k \leq N-1 \tag{7.1}$$

Sendo $x[n]$ uma sequência de tamanho N, e a **DFT** discreta, de período N, e de mesmo tamanho da sequência $x[n]$.

Do ponto de vista da aplicação prática da **Transformada de Fourier** na análise de sinais, existe um grande número de algoritmos para converter séries temporais para o domínio da frequência, como a `fft`, ou **Fast Fourier Transform**, amplamente utilizada por ser económico quanto ao número de operações matemáticas e mais eficiente em relação ao tempo, se comparado aos métodos analíticos para calcular a **DFT** (Thyagarajan, 2018).

A função `fft` aceita como argumentos um vetor de dados da sequência $x[n]$ e retorna um vetor de mesmo tamanho no domínio das frequências. Com a série expressa por frequências, utilizam-se as características do

sinal deste domínio para aplicar um filtro e eliminar as frequências ou amplitudes indesejadas. Depois da aplicação dos filtros, utiliza-se a `ifft`, ou **Inverse Fast Fourier Transform** para transformar novamente os dados para o domínio do tempo. Esta função aceita como argumento um vetor, que no caso representa os dados filtrados no domínio da frequência, e retorna um vetor dos dados filtrados no domínio do tempo.

Filtragem de dados brutos

A amplitude de uma dada frequência no espetro pode ser pensada como resultante do efeito aditivo dos componentes periódicos com essa frequência no sinal temporal original. Entende-se assim como uma indicação da relevância desses componentes de frequência. É comum por isso, na filtragem eliminar os componentes irrelevantes, isto é de baixa amplitude. Este é o caso típico do *ruído branco*[3].

O espetro pode por outro lado ser lido como os componentes periódicos que existem no sinal, e que permitem leituras fenomenológicas deste. Por exemplo, as componentes de alta frequência são muitas vezes associadas a variações bruscas, que são anormalidades no funcionamento de um processo de variação lenta, e podem por isso ser eliminadas.

Para filtrar as séries de dados e eliminar oscilações de baixa amplitude, utilizaram-se os recursos disponíveis na biblioteca `Numpy`, através da criação de um algoritmo padronizado para realizar esta operação para todas as séries de dados.

Após a conversão da série temporal para o domínio da frequência, como mostra a Figura 7.57, define-se arbitrariamente uma amplitude de corte. A amplitude do sinal no domínio da frequência é calculada através da **PSD**, ou **Power Spectrum Density**, que expressa a magnitude de cada coeficiente de Fourier multiplicando-se o vetor de números complexos por seu conjugado.

A amplitude máxima definida é utilizada para eliminar qualquer coeficiente com PSD inferior a este valor. A Figura 7.58 mostra esse processo, em que a amplitude máxima é limitada por uma linha horizontal, as componentes do sinal superiores a esta amplitude, que são mantidas, são mostradas em preto, e as amplitudes inferiores, que serão eliminadas, são mostradas em azul.

A frequência é calculada com base nos intervalos reais de medição das unidades de amostragem e data-loggers. Espera-se que os valores de corte para a amplitude variem em função do tamanho do sinal, da frequência de amostragem, e dos próprios valores de temperatura recolhidos, em termos de sua variabilidade. Desta forma, este processo é feito individualmente para cada série de dados, variando-se a amplitude de corte com base no sinal no domínio das frequências, e analisando-se o resultado final por meio da comparação entre os dados brutos e filtrados. Considera-se satisfatório o resultado da filtragem se os ruídos do sensor são eliminados sem comprometer os demais aspetos que integram o sinal da temperatura, ou seja, a filtragem não deve causar alterações significativas de magnitude do sinal fora de uma faixa de valores inferiores a 0.04 °C.

As Figuras 7.59 e 7.60 mostram, para dois intervalos de tempo em escala ampliada, o resultado da filtragem do sinal do **datalogger n5** da **Primeira Campanha das Minas da Panasqueira**, em que a linha preta mostra o sinal filtrado e a linha azul mostra o sinal bruto. Nota-se que os ruídos de precisão do sensor são satisfatoriamente removidos, ao passo que a variação macro de temperatura é quase integralmente mantida, a exceção de variações muito abruptas de temperatura, que são quase totalmente eliminadas.

Estes resultados estão de acordo com o previsto para a filtragem do sinal, já que era esperado que a eliminação de certas frequências introduzisse distorções à série de dados. No entanto, isto é considerado aceitável, pois:

1. As perdas de amplitude são mínimas para variações de temperatura persistentes por intervalos de tempo mais longos:
   a) dois primeiros picos, entre 220000 e 240000 segundos, do gráfico da Figura 7.59;
   b) intervalo completo da Figura 7.60
2. Eliminam as variações muito bruscas de temperatura, o que é positivo, pois reduz-se a chance de incorporar *outliers* à análise dos dados. Nota-se este efeito no terceiro pico, aos 250000 segundos, do gráfico da Figura 7.59);

[3] sobretudo quando a relação sinal-ruído é alta.

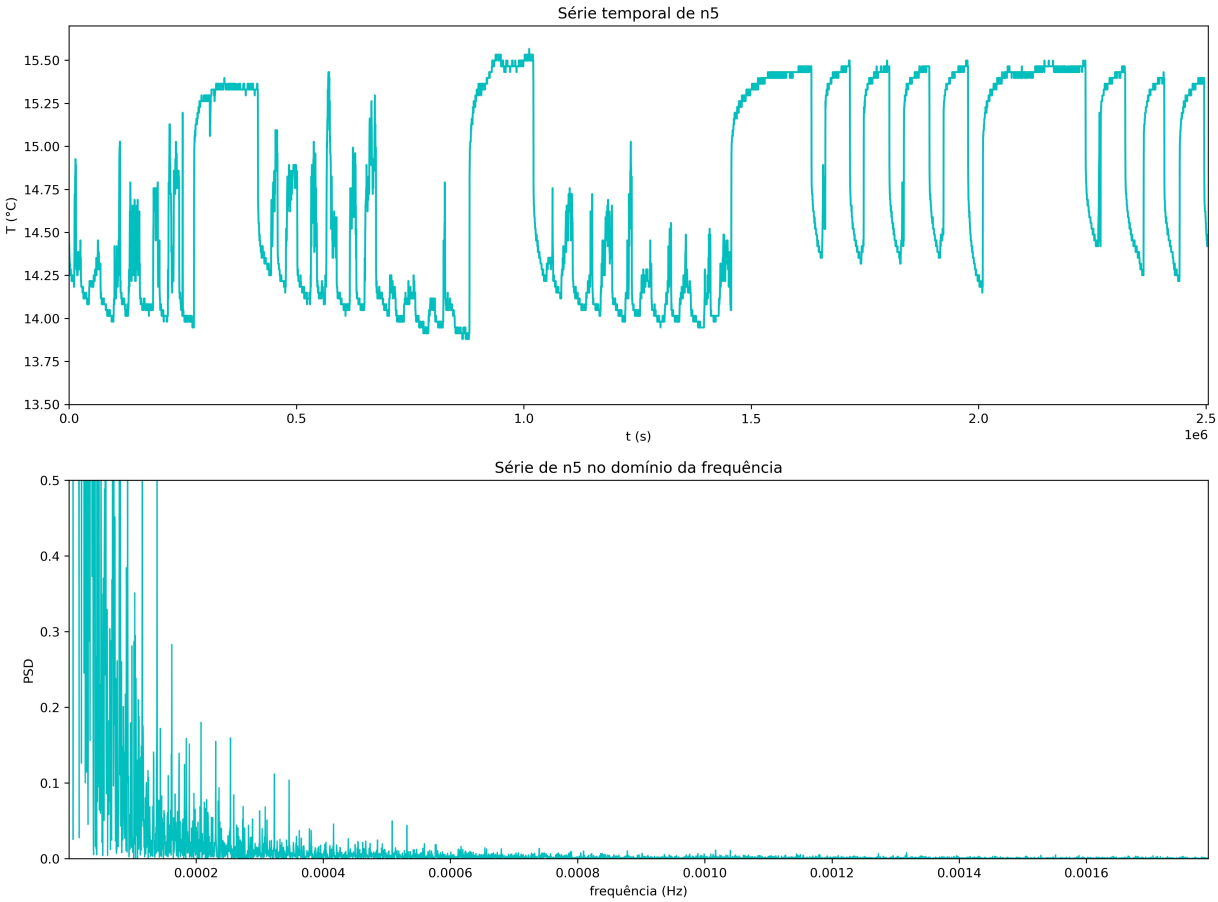


Figura 7.57: Série de temperatura de n5 nos domínios do tempo e da frequência.

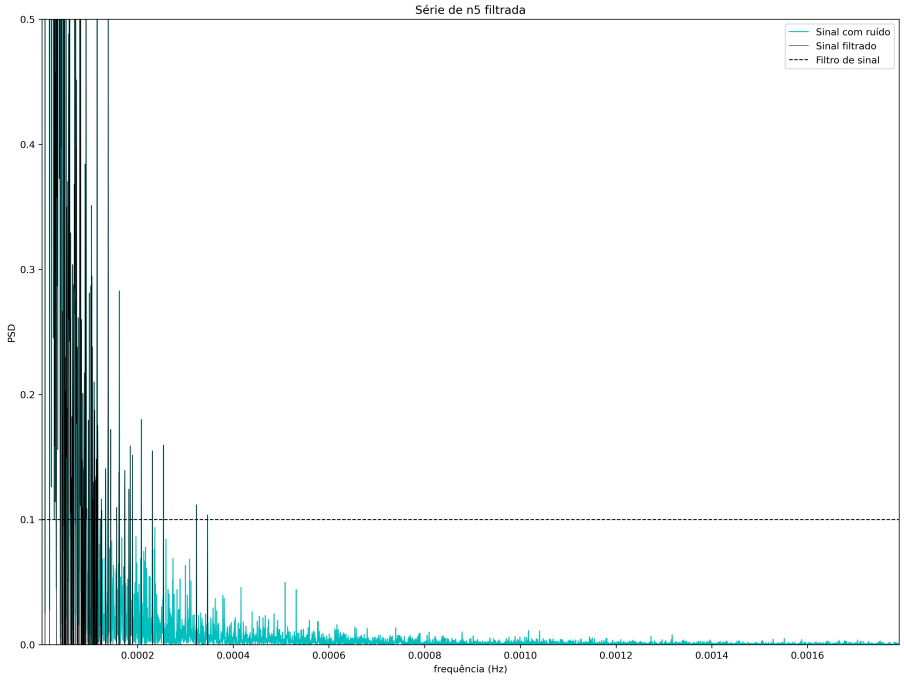


Figura 7.58: Filtro do sinal de n5 no domínio da frequência.

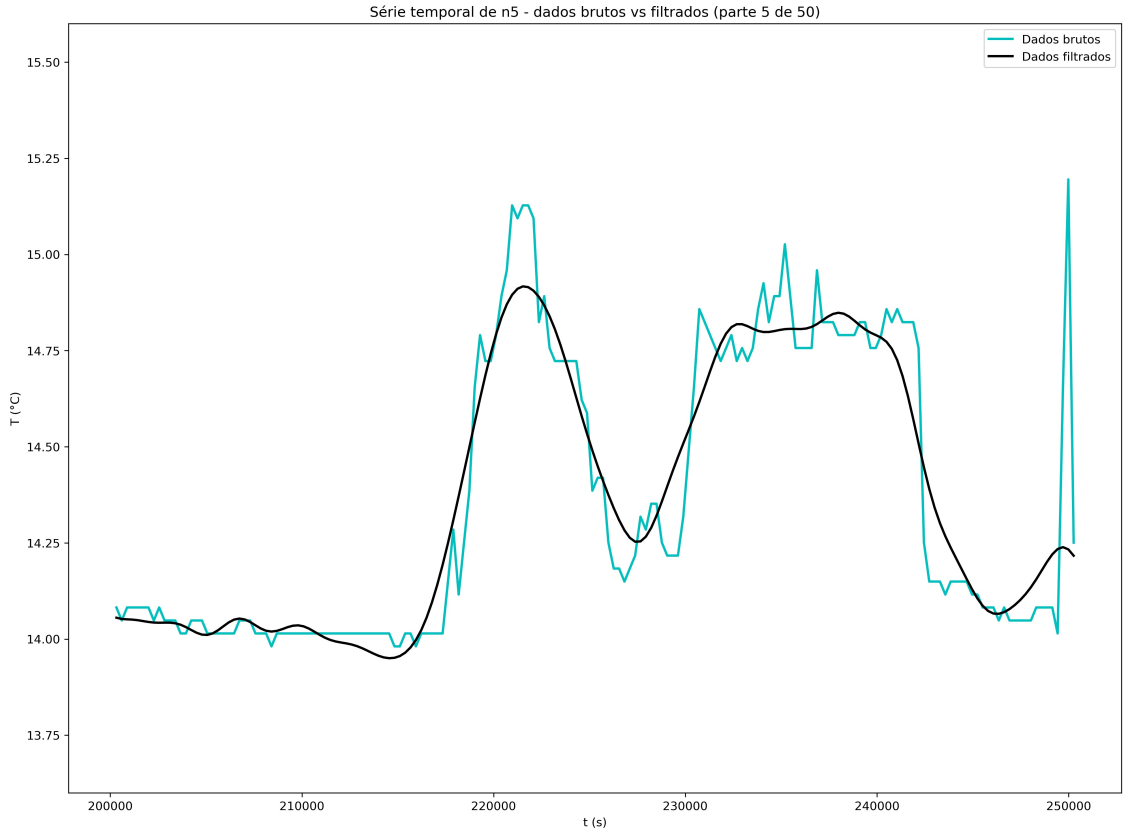


Figura 7.59: Séries n5 bruta e filtrada: parte 1 de 50 da série de dados.

Figura 7.60: Séries n5 bruta e filtrada: parte 10 de 50 da série de dados.

O trecho de código a seguir mostra o algoritmo utilizado para a filtragem de série de temperatura do **datalogger n5** da **Primeira Campanha das Minas da Panasqueira**. Este procedimento foi repetido para todas as outras séries de dados, variando-se a amplitude de corte. As imagens relacionadas a este processo são mostradas nas secções Apêndice A, Apêndice B, Apêndice C e Apêndice D.

Listagem (7.1) de Filtro n5.py

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import xlrd

# Defino o sensor da série que será fitlrada
sensor = 5
# Fixo uma escala para a temepratura nos gráficos
intervalomin = 13.6
intervalomax = 15.6

book = xlrd.open_workbook("xxx.xls")  # ficheiro excel contendo os dados brutos
sheet = book.sheet_by_name("fff")  # folha contendo os dados brutos
# Variável tipo lista que recebe os dados da folha do excel
arqraw = [
    [sheet.cell_value(r, c) for c in range(sheet.ncols)] for r in range(sheet.nrows)
]
# Variáveis auxiliares que são utilizadas para receber os dados
# Garanto que a variável dados será um array de floats
dados = np.ones((len(arqraw)))
dados2 = np.array(arqraw)
a = 0
while a < len(arqraw):
    dados[a] = dados2[a, 1]
    a = a + 1

# Atribuo os dados a uma variável que será utilziada na fft
f = dados
# dt contém o intervalo entre duas medições sucessivas
dt = 279
# array t contém os instantes de cada medição
t = np.arange(0, dt * len(f), dt)

# Aplico a FFT
n = len(f)
fhat = np.fft.fft(f, n)  # computa a fft
PSD = (
    fhat * np.conj(fhat) / n
)  # power spectrum density (magnitude de cada coeficiente de fourier)
freq = (1 / (dt * n)) * np.arange(n)  # eixo x de frequencias
L = np.arange(
    1, np.floor(n / 2), dtype="int"
)  # intervalo para a primeira metade dos dados

# Ploto um gráfico dos dados no domínio do tempo e outro no domínio da frequência
fig, axs = plt.subplots(2, 1)
plt.sca(axs[0])
plt.plot(t, f, color="c", LineWidth=1.5, label="Dados brutos (tempo)")
plt.xlim(t[0], t[-1])
plt.ylim(intervalomin - 0.1, intervalomax + 0.1)
plt.title("Série temporal de n%s" % sensor)
plt.ylabel("T (\N{DEGREE SIGN}C)")
plt.xlabel("t (s)")
plt.sca(axs[1])
plt.plot(freq[L], PSD[L], color="c", LineWidth=1.0, label="Dados brutos (frequência)")
```

Listagem (7.1) de Filtro n5.py (cont.)

```
plt.xlim(freq[L[0]], freq[L[-1]])
plt.ylim(0, 0.5)
plt.title("Série de n%s no domínio da frequência" % sensor)
plt.ylabel("PSD")
plt.xlabel("frequência (Hz)")
plt.show()
fig.savefig(
    "pana1_n%s_dominio.jpg" % sensor, format="jpg", dpi=300, bbox_inches="tight"
)


# Filtro - removo todos os sinais com amplitude menor do que o threshold
threshold = 0.1  # abaixo disso, verifico elemento a elemento e removo
indices = PSD > threshold  # acho as frequencias com PSD alto
PSDclean = PSD * indices  # zero os coeficientes de Fourier baixos
fhat = indices * fhat
ffilt = np.real(
    np.fft.ifft(fhat)
)  # aplico a inversa da transformada para o sinal filtrado

# Reta horizontal que indica a amplitude de corte
retadecorte = np.ones((len(L))) * threshold

# Gráfico das amplitudes mantidas e removidas
fig, ax = plt.subplots()
plt.plot(freq[L], PSD[L], color="c", LineWidth=1.0, label="Sinal com ruído")
plt.plot(freq[L], PSDclean[L], color="k", LineWidth=0.5, label="Sinal filtrado")
plt.plot(
    freq[L],
    retadecorte,
    color="black",
    LineWidth=1,
    linestyle="dashed",
    label="Filtro de sinal",
)
plt.xlim(freq[L[0]], freq[L[-1]])
plt.ylim(0, 0.5)
plt.title("Série de n%s filtrada" % sensor)
plt.ylabel("PSD")
plt.xlabel("frequência (Hz)")
plt.legend()
plt.show()
fig.savefig(
    "pana1_n%s_filtrofrequencia.jpg" % sensor,
    format="jpg",
    dpi=300,
    bbox_inches="tight",
)


# Divisão do intervalo total de tempo em 50 intervalos para ampliar a escala
m = 1
partes = 50
while m < partes + 1:
    if (m / 5) == np.floor(m / 5):
        fig, ax = plt.subplots()
        L = np.arange(
            np.round((n / partes) * (m - 1)), np.round((n / partes) * m), dtype="int"
```

Listagem (7.1) de Filtro n5.py (cont.)

```
        )
        plt.plot(t[L], f[L], color="c", LineWidth=2, label="Dados brutos")
        plt.plot(t[L], ffilt[L], color="k", LineWidth=2, label="Dados filtrados")
        plt.title(
            "Série temporal de n%s - dados brutos vs filtrados (parte %s de %s)"
            % (sensor, m, partes)
        )
        plt.ylim(intervalomin, intervalomax)
        plt.ylabel("T (\N{DEGREE SIGN}C)")
        plt.xlabel("t (s)")
        plt.legend()
        plt.plot(figsize=(16, 16))
        plt.show()
        fig.savefig(
            "pana1_n%s_pt%s.jpg" % (sensor, m),
            format="jpg",
            dpi=300,
            bbox_inches="tight",
        )
    m = m + 1

# Gráfico compelto das séries de dados bruta e filtrada
fig, ax = plt.subplots()
plt.plot(t, f, color="c", LineWidth=1.5, linestyle="dashed", label="Dados brutos")
plt.plot(t, ffilt, color="k", LineWidth=1, label="Dados filtrados")
plt.title("Série temporal de n%s - dados brutos vs filtrados (completa)" % sensor)
plt.ylim(intervalomin - 0.1, intervalomax + 0.1)
plt.xlim(t[0], t[n - 1])
plt.ylabel("T (\N{DEGREE SIGN}C)")
plt.xlabel("t (s)")
plt.legend()
plt.show()
fig.savefig(
    "pana1_n%s_completa.jpg" % sensor, format="jpg", dpi=300, bbox_inches="tight"
)
```

As séries completas dos dados brutos (em azul) e filtrados (em preto) do **datalogger n5** são mostradas na Figura 7.61. Nota-se a importância de dividir a série de dados em intervalos menores de tempo para ampliar a escala do gráfico no eixo x, o que permite de fato identificar o efeito da filtragem sobre o ruído do sensor: como a densidade de pontos é muito alta, a representação completa das séries acaba por ocultar informações importantes da filtragem.

7.4 Análise preliminar dos dados de temperatura

A utilização de sensores de alta resolução permitiu recolher dados de temperatura com precisão superior a 0.1 °C. Isto, somado aos longos períodos em que se deram as campanhas de amostragem, com intervalos de medição da ordem de minutos, possibilitou a criação de bancos de dados de temperatura com características bastante singulares.

Os dados recolhidos na **Primeira Campanha de Amostragem das Caves da Murganheira** têm como marca uma clara interação entre temperatura no interior da galeria com a temperatura da adega **n11** através da abertura e fechamento da porta da galeria, e entre temperatura da adega e temperatura do ar externo através da abertura da porta da adega. Nesta série de dados, valoriza-se a variação de temperatura em intervalos de tempo mais curtos, da ordem de dias e semanas, que permitem identificar os ciclos de funcionamento da adega e os períodos de abertura para trabalhos ou visitas no interior da galeria.

Na **Segunda Campanha de Amostragem das Caves da Murganheira**, percebe-se o comportamento sazonal da rocha como reservatório térmico, e a clara influência da inércia térmica na atenuação das variações

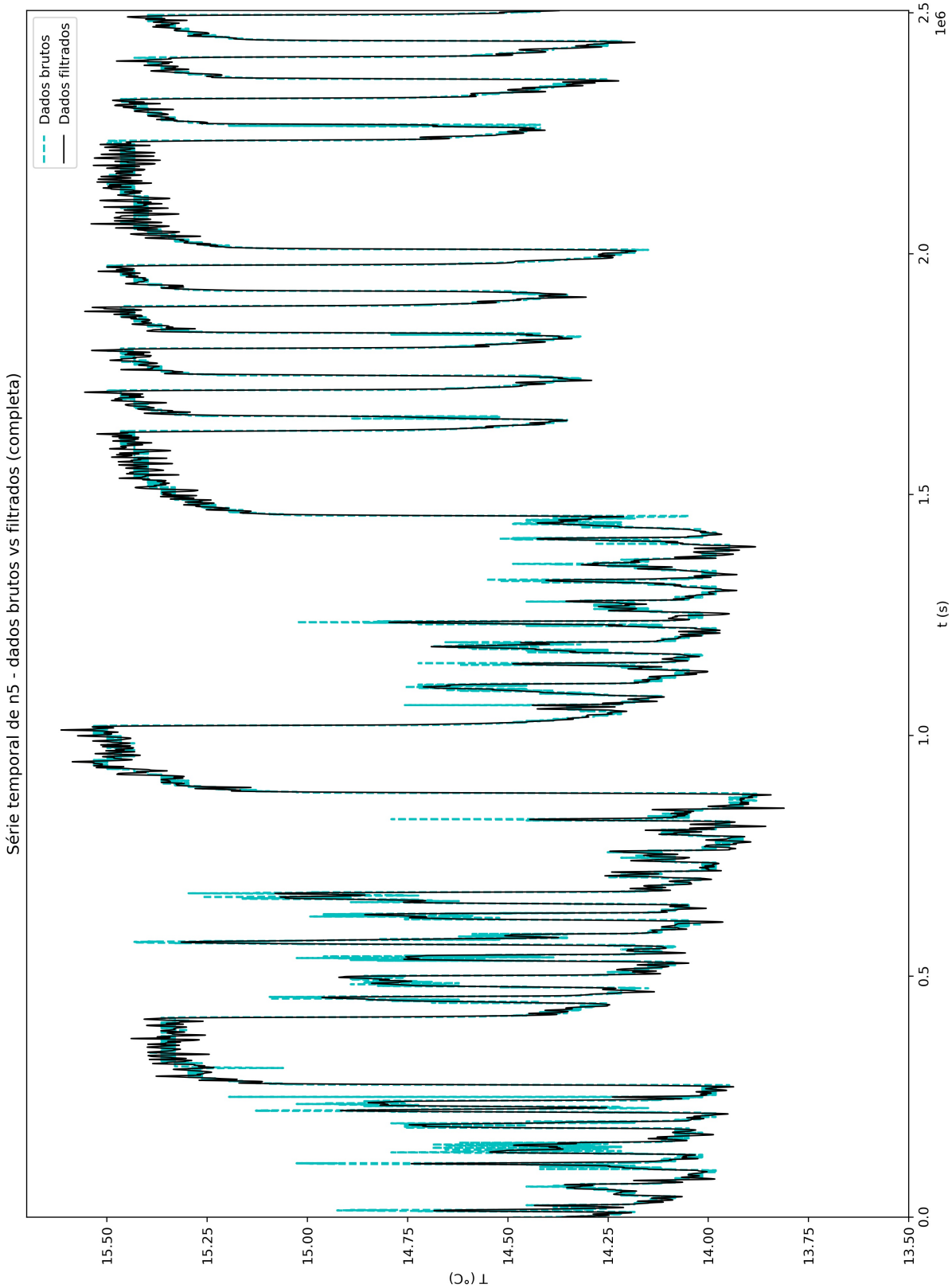


Figura 7.61: Séries temporais completas de n5.

de temperatura do ar, que, devido à presença da rocha, amortece as oscilações de temperatura verificadas na sonda **n11** impondo um comportamento mais próximo do que se vê para **n1** e **n9**.

Os dados das **Campanhas de Amostragem das Minas da Panasqueira** demonstram que há pouca correlação entre a temperatura no interior da galeria e variações horárias ou diárias da temperatura do ar atmosférico, mas evidenciam mudanças no regime de operação dos ventiladores da mina, e permitem conhecer outras características de seu funcionamento, como as claras mudanças de turnos de trabalho.

O que se notou é que a temperatura, se medida com precisão e frequência suficientemente altas, é uma grandeza que funciona como vestígio de ADN do que ocorre no interior de galerias subterrâneas: os fenómenos termodinâmicos deixam, na forma de temperatura, vestígios de sua ocorrência. Há também uma outra camada, *antrópica*, que permite observar o comportamento humano quantos aos horários e dias de trabalho, mudança de turnos, fechamento para feriados, e outros aspetos marcados pela interferência humana sobre o ambiente subterrâneo.

7.4.1 Caves da Murganheira - Primeira amostragem

Escolheu-se um período de 30 dias para analisar o comportamento das séries de temperatura das **Caves da Murganheira**, que foi dividido em dois gráficos, 7.62 e 7.63. A série foi dividida em duas partes para ampliar a escala do gráfico no eixo do tempo, e permitir visualizar marcas de escala de 12 em 12 horas; estas marcas foram adicionadas em horário próximo ao da abertura e do fechamento da galeria. Foi adicionada a série de temperaturas do ar atmosférico[4], em linha cinzenta fina, e com escala em eixo vertical secundário, para verificar a influência da temperatura externa sobre a temperatura interior à adega e à galeria.

Recorda-se que índices ímpares correspondem a temperatura do ar, e índices pares denotam temperatura de rocha. O mapa da Figura 7.44, contendo a posição das unidades remotas do sistema de monitorização, também é fundamental para a interpretação dos resultados.

Para uma primeira análise qualitativa dos valores das séries de temperatura do gráfico, algumas considerações são necessárias:

1. A abertura da adega ocorre de segunda a sexta-feira por volta de 7h00, mas há funcionamento ocasional em alguns finais-de-semana;
2. A abertura da galeria ocorre entre 8h00 e 9h00 de terça-feira a sábado. Quando não há visitas ou necessidade de movimentação de garrafas, é possível que a galeria seja mantida fechada para preservar as condições do ambiente interno;
3. Em dias úteis e de visita, o fecho da galeria ocorre por volta de 18h00, e só é reaberta por volta de 7h00 do dia seguinte, caso haja visitação ou intervenção programada. Permanece fechada do final da tarde de sábado até terça-feira de manhã;

Assim, é possível verificar certos comportamentos da temperatura em função dos fenómenos termodinâmicos que ocorrem no interior da galeria e da adega com base nas séries de temperatura:

1. **Unidade n11** - nota-se que esta série de temperaturas, recolhida por dispositivo localizado na parte externa da secção de entrada da galeria, nem sempre tem correlação aparente com a temperatura do ar externo. Por outro lado, há um comportamento periódico diário em boa parte do período.
   a) **n11** registou aumento de temperatura mais pronunciado em horários compatíveis com a abertura do portão exterior da adega, por volta de 6h00 em dias úteis. Aos finais-de-semana, a temperatura medida neste ponto apresentou maior estabilidade, provavelmente porque esse portão esteve fechado.
   b) Nem sempre há correlação aparente entre a temperatura de **n11** e a temperatura atmosférica. A temperatura neste ponto tem tendência de comportamento similar à do ar externo principalmente em períodos em que o portão da adega estava aberto. Exemplos disto são observados nos dias 24/07, 25/07, 27/07 e 28/07, pouco antes das 7h00.
   c) Em outros dias, pelas 7h00, a temperatura de **n11** não acompanha a temperatura do ar atmosférico. Muito provavelmente o portão da adega não foi aberto. Um indício que corrobora esta hipótese é que este comportamento independente também é visto aos finais-de-semana, onde se sabe que de facto a adega está fechada, como ocorre entre 7h00 e 19h00 do domingo dia 11/07/2021.

[4] Valores obtidos em https://meteostat.net/pt/place/pt/lamego a partir de dados recolhidos por estações meteorológicas próximas às **Caves da Murganheira**

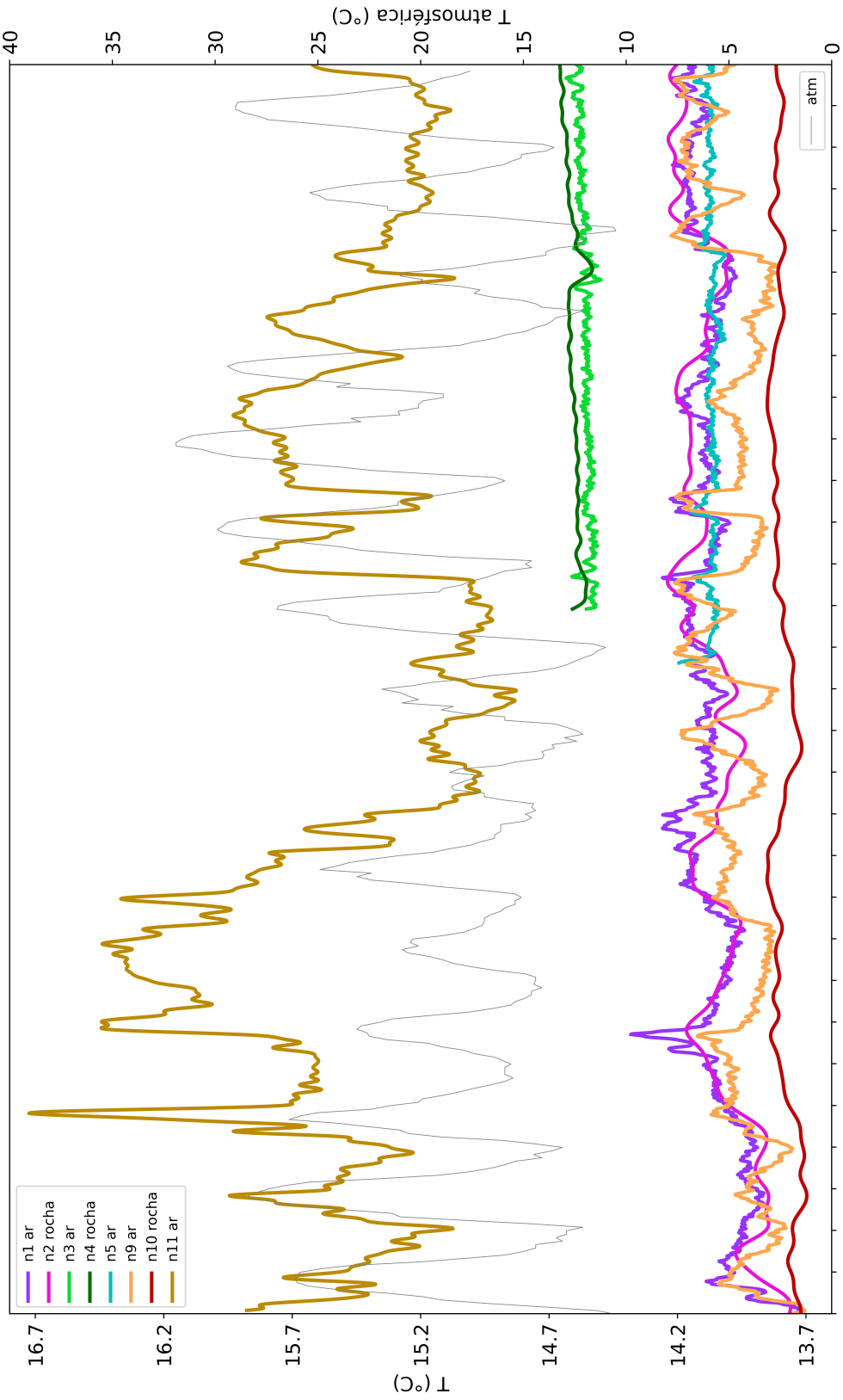


Figura 7.62: Séries temporais filtradas da **Primeira Campanha de Amostragem das Caves da Murganheira**: parte 1 de 2.

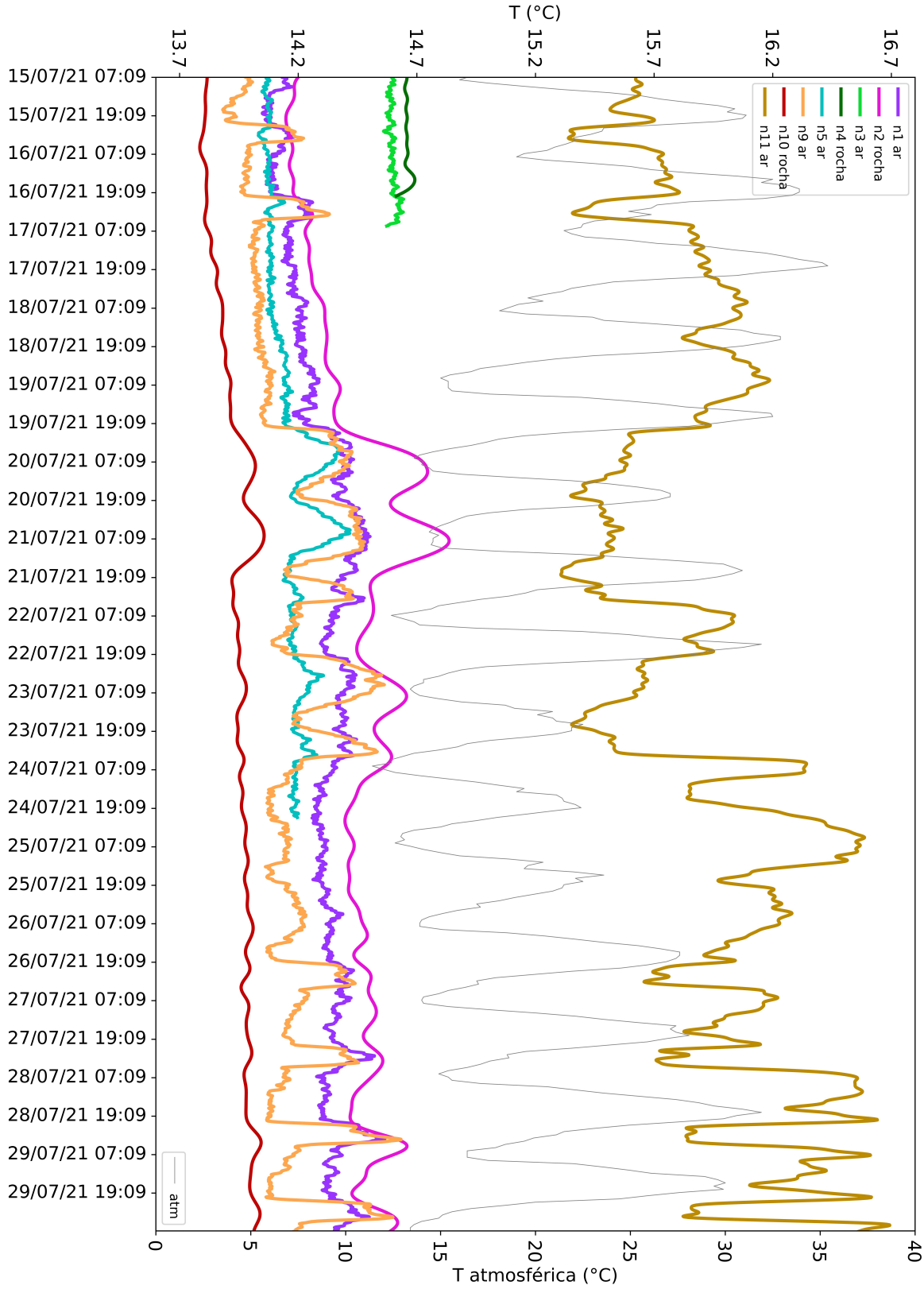


Figura 7.63: Séries temporais da **Primeira Campanha de Amostragem das Caves da Murganheira**: parte 2 de 2.

   d) Assim, a observação conjunta das séries de **n11** e do ar atmosférico permite descobrir **quando o portão da adega permaneceu aberto**.

   e) Como há uma diferença substancial dos valores de temperatura entre estas duas séries, nota-se um efeito claro de climatização no interior da fábrica, que não está recoberto por rocha, o que dá a ideia de que **as cubas refrigeradas são importantes condicionadores da temperatura no interior da adega**, e **pré-condicionam o ar que entra na galeria**.

2. **Unidade n1** - assim como ocorre entre **n11** e a temperatura do ar externo, **n1** e **n11** podem indicar quando a porta da galeria esteve aberta, períodos em que há maior correlação entre o comportamento destas séries de dados.

   a) Entre 19h00 do dia 03/07 e 7h00 do dia 05/07, ou entre 7h00 do dia 10/07 e 7h00 do dia 13/07, por exemplo, não há relação aparente entre o comportamento de **n1** e **n11**. Provavelmente, sábado dia 10/07 foi um dia sem visita, e segunda-feira dia 05/07 houve visita ou abertura da galeria para a retirada de garrafas.

   b) Entre 7h00 e 19h00 do dia 03/07, um sábado, há uma tendência de aumento de temperatura para todos os pontos de recolha. Certamente este foi um dia em que tanto adega quanto galeria permaneceram abertas durante este período.

   c) Provavelmente a porta da fábrica foi aberta também no domingo dia 04/07 e na segunda-feira dia 05/07, mas a porta da galeria ficou fechada a partir das 19h00 do sábado.

   d) Assim, a observação simultânea do comportamento das séries **n11** e **n1** permite inferir **quando a porta da galeria foi aberta**.

3. Séries **n2**, **n4**, **n10**, e a inércia térmica da rocha - supõe-se, pelas séries de temperatura relativas à rocha, que os pontos onde estão instaladas as unidades **n10** e **n4** possuem maior inércia térmica (sobretudo **n10**), pois há pouca oscilação diária ou semanal de temperatura. Em **n2**, há provavelmente menor inércia térmica, pois há maior prevalência de um comportamento de periodicidade diária.

4. Fluxo de ar - as séries de temperatura do ar, principalmente **n1** e **n9**, tendem a aproximar-se quando há maior circulação de ar, muito provavelmente quando a galeria fica com a porta aberta. Isto se verifica nos **vales ou picos mais acentuados das séries de temperatura dos pontos interiores à galeria**, quase sempre presentes em períodos entre 7h00 e 19h00. A não presença destas variações abruptas de temperatura, é mais um indicativo de que a porta da galeria esteve fechada.

5. A temperatura do ar é mais influenciada pela temperatura da adega quanto mais próximo o ponto amostrado está das entradas da galeria, como em **n1** e **n4**.

6. A rocha, em geral, mostra comportamento mais estável e "amortecido", não incorporando oscilações de temperatura mais abruptas. Por outro lado, apresenta maior variação quanto mais próxima das entradas da galeria, isto porque há condução de calor através da rocha nas secções de entrada, e não somente na direção radial, como ocorre dentro da galeria. Desta forma, **há um efeito de condução de calor nas paredes das secções de entrada da galeria em A1 e A2**.

7. Unidade **n3/4** - a distribuição de temperatura neste ponto, tanto de rocha quanto de ar, apresenta maior estabilidade e menor suscetibilidade à abertura e fechamento da galeria e da fábrica. Ainda assim, nota-se um comportamento acentuado de decrescimento de temperatura neste ponto entre as 7h00 e 19h00 do dia 12/07, em consonância com as demais série de temperatura no interior da galeria. É possível que a cortina plástica que bloqueia A2 tenha ficado aberta durante este período.

8. Séries **n1**, **n9**, **n5**, e **n3** - quando há maior circulação de ar, ao menos no período em que houve monitorização, **o ar arrefece** entre **n1** e **n9**, e **aquece** entre **n9** e **n4**, passando por **n5**. Este é mais um indício de que **a climatização é menos eficaz em locais mais próximos aos acessos**.

9. A geometria do maciço rochoso e a inércia térmica da rocha, sob o ponto de vista das séries de temperatura, estão totalmente de acordo com o levantamento da temperatura em detalhe. Olhando para os mapas das Figuras 7.7 e 7.44, **a espessura da rocha impacta diretamente a estabilidade e o valor absoluto da temperatura dos pontos**, mais estável e a menores temperaturas entre **12** e **28**.

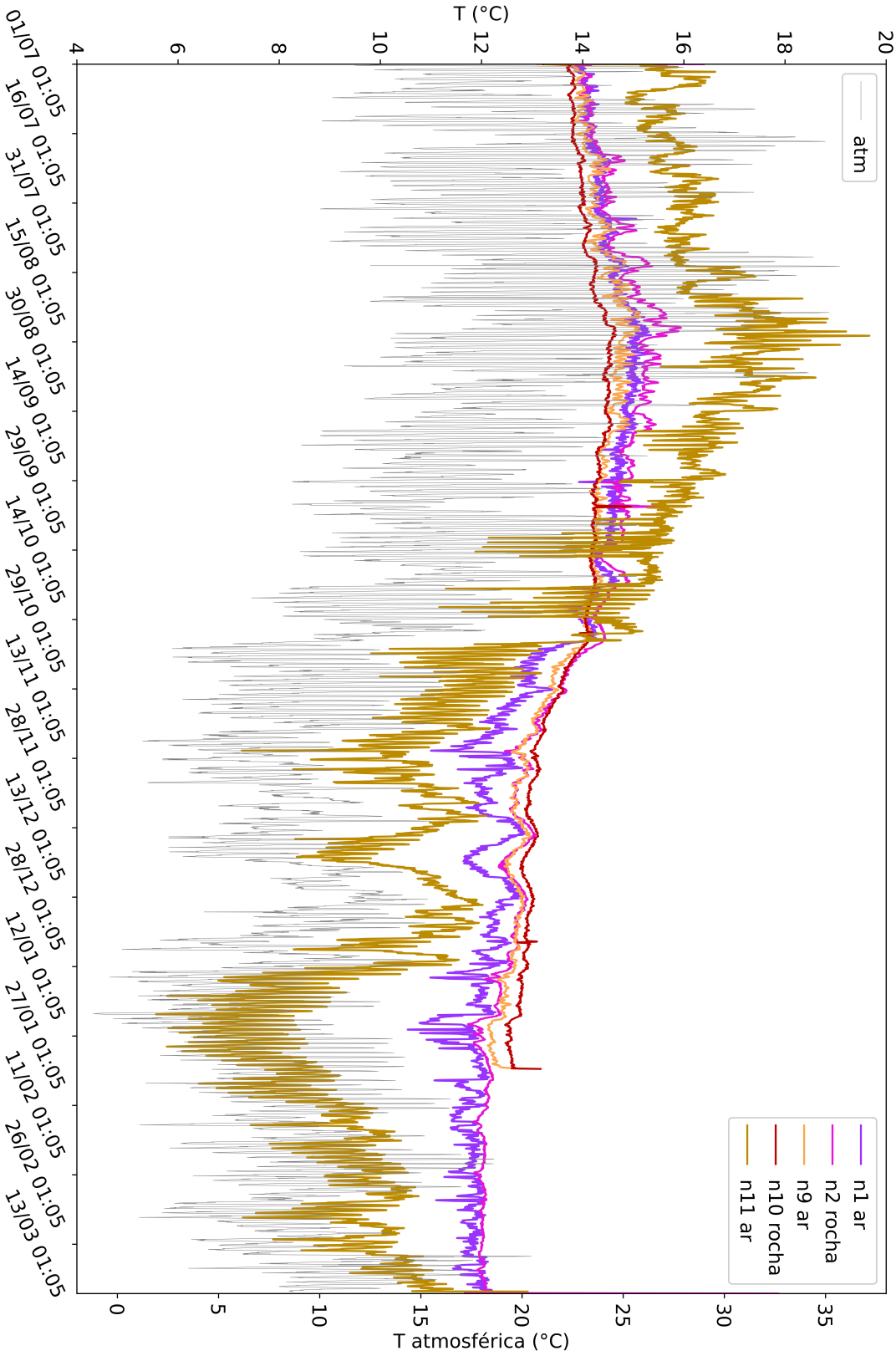


Figura 7.64: Séries temporais filtradas da **Segunda campanha de amostragem das Caves da Murganheira.**

7.4.2 Caves da Murganheira - Segunda amostragem

Para esta série de dados, o comportamento mais instantâneo é posto em segundo plano, e a temperatura passa a ser vista em escala temporal anual. Estes dados serão utilizados na validação do modelo, mas há também certos aspetos interessantes para uma análise preliminar qualitativa da estrutura bioclimática das **Caves da Murganheira**, em que se destaca:

1. Claro "achatamento" da série **n11** assim que o ar entra na galeria, sofrendo oscilações muito menos pronunciadas em **n1/2** e **n9/10**, mas que seguem uma tendência geral de comportamento segundo **n11**. Analogamente, há também uma atenuação na amplitude das variações de temperatura assim que o ar externo entra na adega, o que se reflete nas oscilações mais baixas vistas em **n11** do que na temperatura atmosférica do ar externo.

2. Uma inversão de comportamento no início de Novembro: a rocha, que antes arrefecia o ar dentro da galeria, agora o aquece. O valor relativo entre temperatura do maciço e do ar dentro da adega (**n11**) estabelece este balanço.

3. As séries **n9/10** sofrem as menores oscilações de temperatura em relação às demais séries. Fica comprovado que esta região da galeria, como se imaginava, possui maior inércia térmica em função da maior espessura de rocha que a recobre.

4. As séries de temperatura até o início de Novembro corroboram a caracterização de temperatura em detalhe: o ar fica mais frio quanto mais se percorre a galeria, em direção ao ponto **16**. As séries de temperatura após o início de Novembro corroboram a caracterização termográfica: a temperatura da rocha é mais quente quanto mais próximo se está do ponto **16**. A inversão entre as posições das séries **n2** e **n10** indica justamente este comportamento.

5. A inversão entre as posições de **n1/2** e **n9/10** demonstra a defasagem/inércia da transmissão de calor através da rocha: o calor "acumulado" durante o verão passa a ser transmitido para o ar justamente no início do inverno.

6. Muito provavelmente entre Abril e Maio de 2022 o comportamento do sistema sofrerá nova inversão, o que é indicado pelo aumento de temperatura das séries de dados ao final do mês de março, em que a série **n11** quase volta a cruzar as séries de temperatura do interior da galeria. Se enxergarmos as séries como sinal, especialmente **n11**, a periodicidade é de aproximadamente 6 meses. O comportamento do sistema é de facto cíclico, sazonal, e com periodicidade bem definida.

7. Se observarmos **n1** e **n2**, a temperatura do ar é sempre maior do que a da rocha, mesmo quando há inversão de comportamento do sistema. Se olharmos para **n9** e **n10**, a temperatura do ar é maior antes e menor após a inversão do regime de temperatura no início de Novembro. Isto demonstra que no ponto **12**, onde está a unidade **n9/10**, a temperatura da rocha é muito menos influenciada pela temperatura do ar do que em pontos mais próximos à entrada.

7.4.3 Minas da Panasqueira - Primeira e Segunda amostragens

Na primeira amostragem, reaproveitou-se duas unidades do sistema de monitorização instalado nas **Caves da Murganheira**, ainda sem adaptar devidamente os circuitos desenvolvidos para a aplicação neste novo cenário, com particularidades bastante diferentes do primeiro local de teses. Os **dataloggers** ainda não haviam sido montados e esta primeira recolha de dados foi feita como uma espécie de "amostragem de reconhecimento" das galerias de testes das **Minas da Panasqueira**.

Como os dispositivos instalados neste novo local de testes ainda não estavam totalmente adequados à situação, uma das unidades (n3) avariou-se após cerca de 5 dias, e por isto a série de temperaturas correspondente à esta unidade está incompleta no gráfico da Figura 7.65. A outra unidade (n5) funcionou por todo o período de testes. Ambas continham apenas uma sonda de temperatura para a medição da temperatura do ar.

Embora o mau funcionamento da unidade **n3** tenha comprometido parte do período de amostragem de uma das séries de dados, o período inicial que contou com a operação simultânea das duas unidades é suficiente para que se aproveitem os dados experimentais na validação do **modelo**. Além disto, a série de dados completa de **n5** é, por si só, interessante para o estudo dos fenómenos termodinâmicos que ocorrem no interior desta galeria.

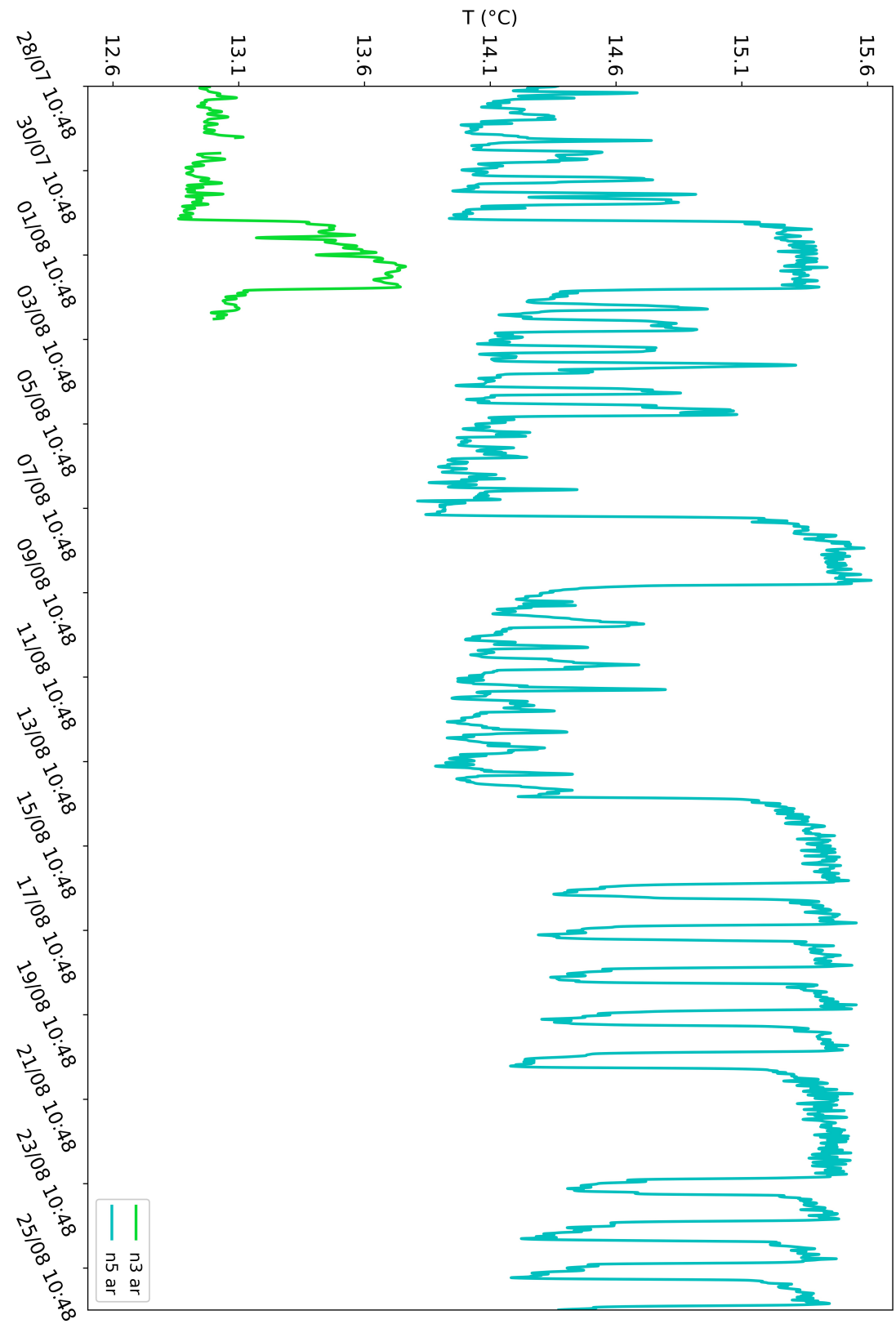


Figura 7.65: Séries temporais de temperatura da **Primeira Campanha de Amostragem das Minas da Panasqueira**.

Observando exclusivamente a série de dados de **n5**, notam-se alguns comportamentos curiosos. Primeiramente, é preciso atentar para a escala do gráfico: as maiores oscilações de temperatura registadas durante todo o período representam pouco mais de 1 °C. Talvez esta sequência de picos e vales, de aspeto periódico, se medidos com sondas de temperatura de precisão de 1 ou 2 °C, não aparentariam ser mais do que uma reta. Isto, do ponto de vista da segurança operacional e do conforto térmico, para esta faixa de temperaturas, seria tolerável. Por outro lado, não se teria a mesma perspetiva fenomenológica que uma sonda de alta precisão possibilita.

Além disto, torna-se evidente por estas séries de dados, e também pelas outras já apresentadas, que não faz sentido trabalhar com medições instantâneas de temperatura do ar; sempre há variação, seja em um intervalo horário, diário, semanal, ou mensal. A temperatura do ar é tão volátil quanto seu escoamento, o que não é propriamente inesperado já que os fenómenos de troca de calor e de movimento são acoplados. Durante a preparação e teste das unidades de amostragem, por exemplo, não foi incomum encontrar diferenças de temperatura superiores a 1 °C dentro de um mesmo ambiente.

Tendo estas considerações em vista, e olhando para a séries de dados da Figura 7.65, podemos colocar algumas questões:

1. O que causa variações abruptas de temperatura em intervalos tão curtos (±1 °C em menos de uma hora)?
2. Por que os patamares estão sempre em torno dos 15.4 °C? O que causa esta estabilidade após um aumento acentuado de temperatura?
3. Por que nos períodos de temperaturas mais baixas, as faixas de temperatura estão sempre por volta dos 14.0 °C?
4. Qual a causa da periodicidade das variações de temperatura? O que justifica os máximos perdurarem por um ou dois dias, e os períodos de temperatura mais baixa serem de quatro ou cinco dias?
5. Se o ar é tão sensível a variações de temperatura, por que o comportamento periódico da temperatura é tão estável? O que elimina a aleatoriedade?

Até o momento em que estes dados foram recolhidos não se tinha muitas informações sobre o funcionamento e operação da mina. Algumas questões mais simples sobre a evolução de temperatura, entretanto, são fáceis de se responder se tivermos em consideração que o local de testes é um ambiente confinado e bem isolado do exterior: o acesso mais próximo ao local de testes está a no mínimo 1 km de distância, e a galeria está a uma profundidade da ordem das dezenas de metros. Isto explica porque variações horárias de temperatura não são encontradas, já que são atenuadas quando o ar fresco entra na galeria. As variações de temperatura vistas nas séries de dados têm, portanto, pouca ou nenhuma influência das oscilações diárias de temperatura do ar atmosférico.

Como se observou nos dados recolhidos nas **Caves da Murganheira**, uma cobertura rochosa de alguns metros sobre uma galeria pode lhe conferir grande estabilidade térmica. No caso das **Minas da Panasqueira**, o sistema é ainda mais isolado da superfície e do ar atmosférico. Esta estabilidade das variações de temperatura entre 14.0 e 15.4 °C deve-se, portanto, ao potencial térmico da rocha: possivelmente, 15.4 °C é a temperatura máxima atingida pela superfície de rocha, e 14.0 °C é a temperatura mínima atingida pela rocha, no ponto onde está instalada a sonda **n5**. As porções mais profundas do maciço tem capacidade térmica de tal magnitude que, através de fenómenos de condução de calor, "puxam" a temperatura da rocha para um estado mais estável.

Os comportamento cíclico dos dados de temperatura são mais difíceis de se explicar. Não há associação lógica imediata que os permita decifrar. O que mais, em uma mina, também ocorre em ciclos?

Parte da resposta para esta questão está no gráfico da Figura 7.66, referente à **Segunda Campanha de Amostragem das Minas da Panasqueira**. Ao olhar para as séries de dados entre os dias 23/12 e 27/12, período de recesso Natalino, não restam dúvidas: a temperatura aumenta quando não há trabalho na mina. Esta é, de certa forma, uma camada "antrópica" da fenomenologia observada: os ciclos de temperatura estão condicionados aos ciclos de operação da mina, que por sua vez estão condicionados aos ciclos humanos de trabalho e descanso.

Com o fundo em cinzento marcando finais de semana e feriados, confirma-se esta correlação. De facto, o aumento da temperatura é causado pelo desligamento dos ventiladores. Por uma questão da distribuição espacial de acessos e poços de ventilação, desligar o ventilador causa, para este sistema de galerias, uma inversão de direção do caudal de ar: a galeria, que antes era de injeção de ar para os outros níveis da mina,

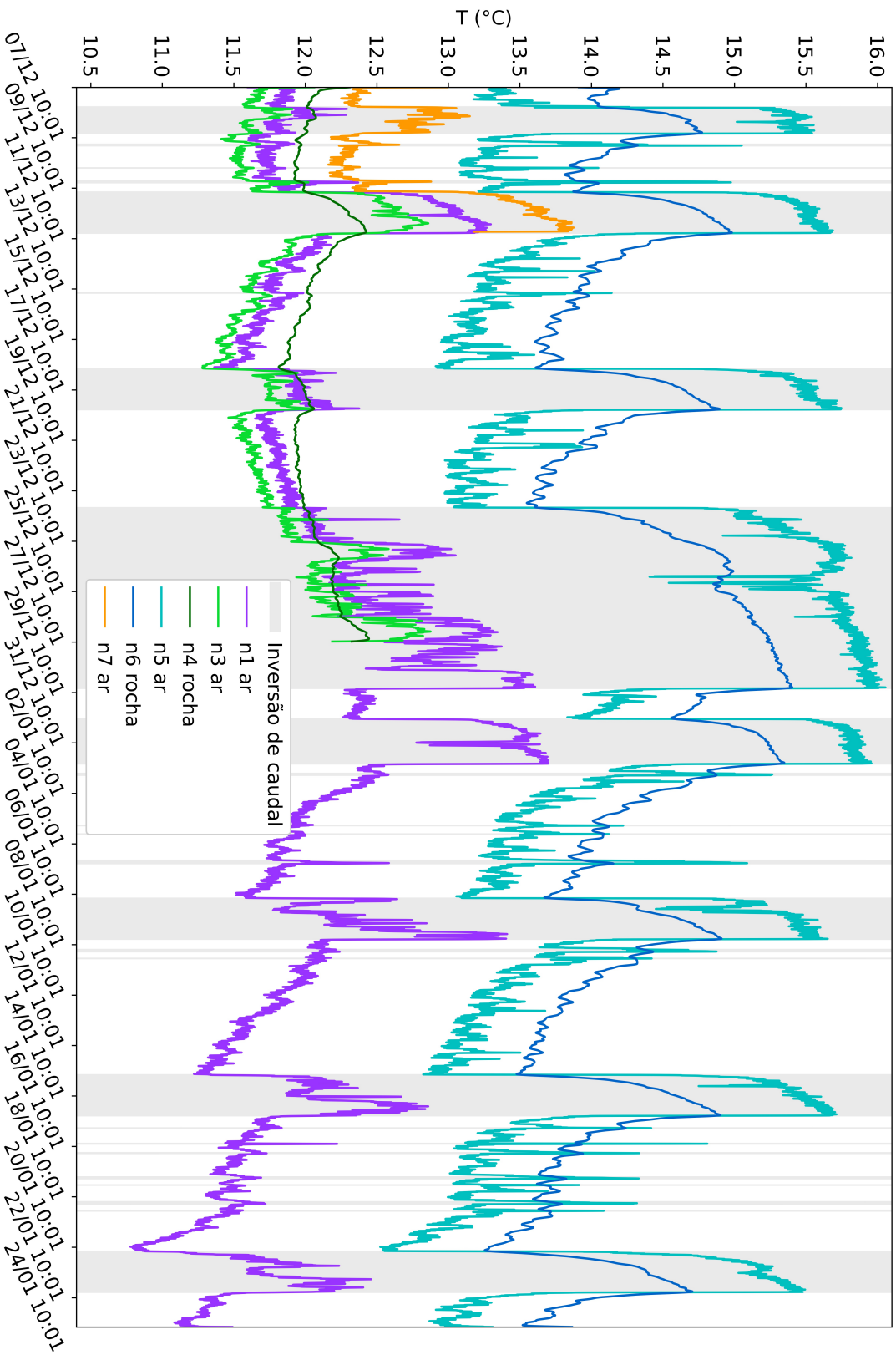


Figura 7.66: Séries temporais de temperatura da **Segunda Campanha de Amostragem das Minas da Panasqueira**.

em que se dão as operações de lavra, torna-se uma galeria de extração do ar que vem dos outros níveis mais profundos da mina. Este ar está a uma temperatura maior e passa a aquecer as paredes da galeria, que por sua vez o arrefecem; a rocha aquece durante este período, mas também impõe ao ar um efeito de arrefecimento, e o equilíbrio térmico para o ar se dá em torno dos 15.4 °C.

Durante os dias úteis, há oscilações de temperatura do ar em uma escala de tempo diária (ou em turnos), como mostra o gráfico da Figura 7.67. Isto ocorre também por uma alteração do caudal de ar: os ventiladores funcionam a 1250 RPM em períodos de trabalho mais intensos, isto é, pela manhã, quando são feitos os desmontes, e também entre o final da tarde e a noite; operam a 750 RPM entre o horário de almoço e o final da tarde, e durante a madrugada. Esta variação não causa a inversão de caudal, mas reduz significativamente o escoamento de ar quando os ventiladores não operam à capacidade máxima. Para estas duas faixas de operação, foram feitas medições da velocidade do ar ao longo da galeria de testes, com resultados conforme a Figura 7.47.

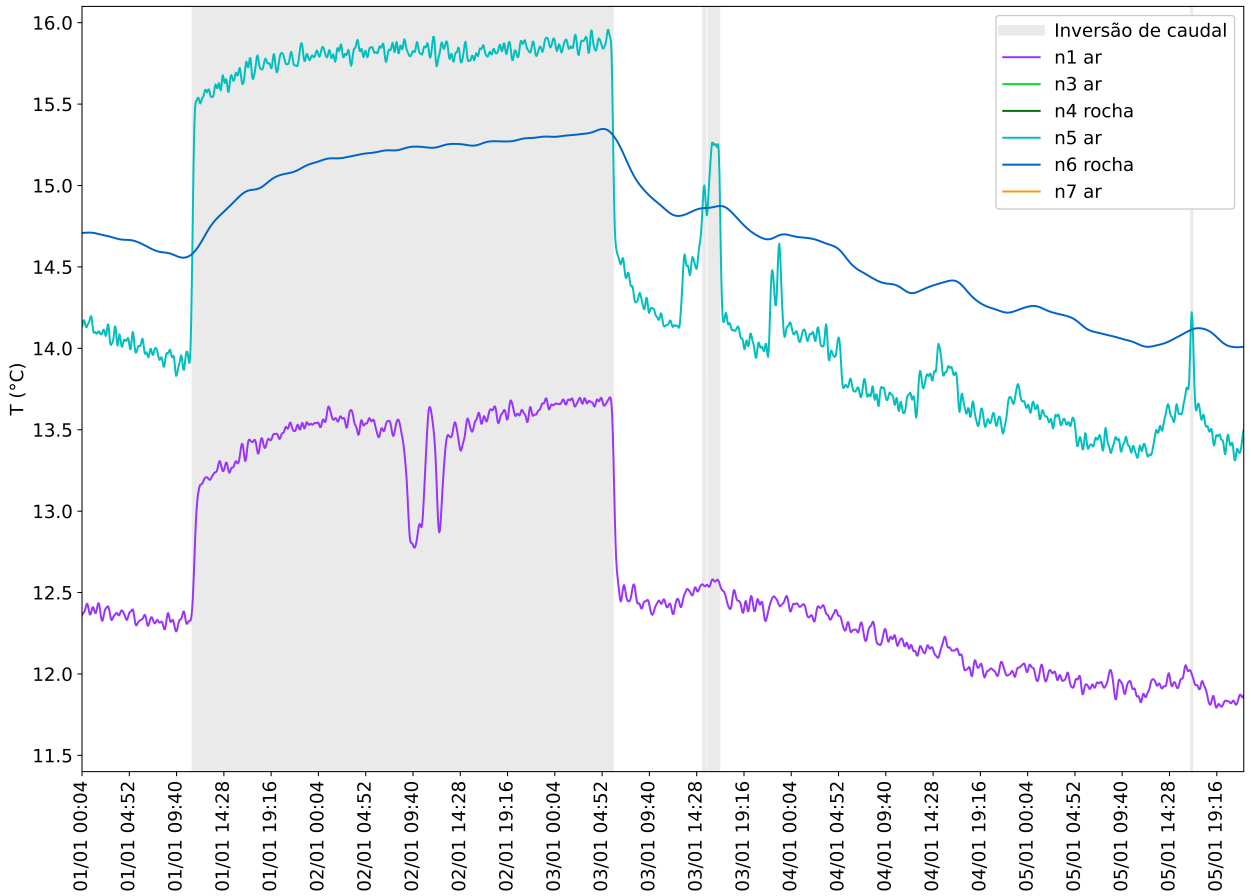


Figura 7.67: Séries temporais de temperatura da **Segunda Campanha de Amostragem das Minas da Panasqueira** - intervalo de 5 dias.

Do gráfico da Figura 7.67, observa-se:

1. Fim-de-semana:
   a) Desligamento dos ventiladores sábado dia 01/01 por volta do meio-dia, e religamento segunda-feira dia 03/01 por volta de 6h00.
   b) Inversão de comportamento entre ar e rocha (séries n5 e n6, respetivamente): durante a semana, o ar arrefece a rocha, e a rocha aquece o ar (n5 < n6); aos finais-de-semana, o ar aquece a rocha, e a rocha arrefece o ar (n6 < n5).
   c) Não há equilíbrio térmico a mesma temperatura, visto que há significativo escoamento de ar, e rocha e ar possuem propriedades termofísicas bastante distintas: o fluxo de energia é o mesmo em ambas as direções (ar↔rocha), mas é preciso mais energia para subir ou baixar a temperatura da rocha (maior inércia térmica).

2. Segunda-feira 03/01:
   a) Ventilação a 1250 RPM entre 6h00 e 13h00
   b) Redução da ventilação para 750 RPM entre 13h00 e 17h00, mais evidente pelo pico de temperatura de **n5**.
   c) Ventilação a 1250 RPM entre 17h00 e 22h00
   d) Redução da ventilação para 750 RPM entre 22h00 e 6h00 do dia seguinte.
3. Ciclos da ventilação iguais ao de segunda-feira para os outros dias da semana.
4. Regiões de comportamento anómalo, provavelmente devido a oscilações no funcionamento do ventilador durante as alterações de regime de operação (outras regiões com fundo cinzento fora dos finais de semana): na segunda-feira de tarde, por volta de 16h, aparentemente o ventilador se desligou por alguns minutos e houve pequena inversão de caudal, com temperatura do ar superando a da rocha. O mesmo se observa quarta-feira dia 05/01 também por volta das 16h, mas durante período mais breve.
5. Outras perturbações de temperatura, como a que se observa no domingo dia 02/01 por volta das 9h00, na série **n1** - esta anomalia não tem correspondência em **n5**, de modo que a causa, muito provavelmente, não são os ventiladores, mas sim a abertura/fechamento de alguma porta, o que altera a entrada ou retirada de ar (por ventilação natural) no poço de ventilação situado junto ao ponto de instalação de **n1**.
6. As variações de temperatura devido à alteração de operação dos ventiladores é sempre mais pronunciada em **n5**. Esta sonda está em um ponto da galeria que fica mais próximo aos níveis mais profundos da mina, e também onde há um menor caudal de ar quando os ventiladores estão ligados. Esta região é, portanto, mais sensível às modificações do regime de operação dos ventiladores.

Estes factos sobre os mecanismos de troca de calor e de escoamento de ar no interior da galeria de testes das **Minas da Panasqueira** foram originalmente levantados como hipóteses através da observação dos dados da **Primeira Campanha de Amostragem das Minas da Panasqueira**, e foram posteriormente confirmados por informações obtidas junto aos engenheiros da mina e por meio de medições e testes feitos na galeria.

A temperatura, que é medida indiretamente através da medição direta de outras grandezas, como resistência elétrica ou diferença de potencial (quando se utilizam instrumentos digitais) ou como variação volumétrica de mercúrio (quando medida por termómetros de mercúrio), é também uma medição direta para outros fenómenos. Quando medimos temperatura, estamos medindo na verdade resistência elétrica, que é, por sua vez, consequência da variação de diferença de potencial entre duas porções de um fio condutor; se caminharmos na outra direção, a temperatura mede caudal, velocidade do ar, trocas de calor, e até mesmo o comportamento humano, que é o que de facto determina o funcionamento dos ventiladores e os horários de início e término de cada turno de trabalho, e, por fim, as trocas de calor no interior da galeria.

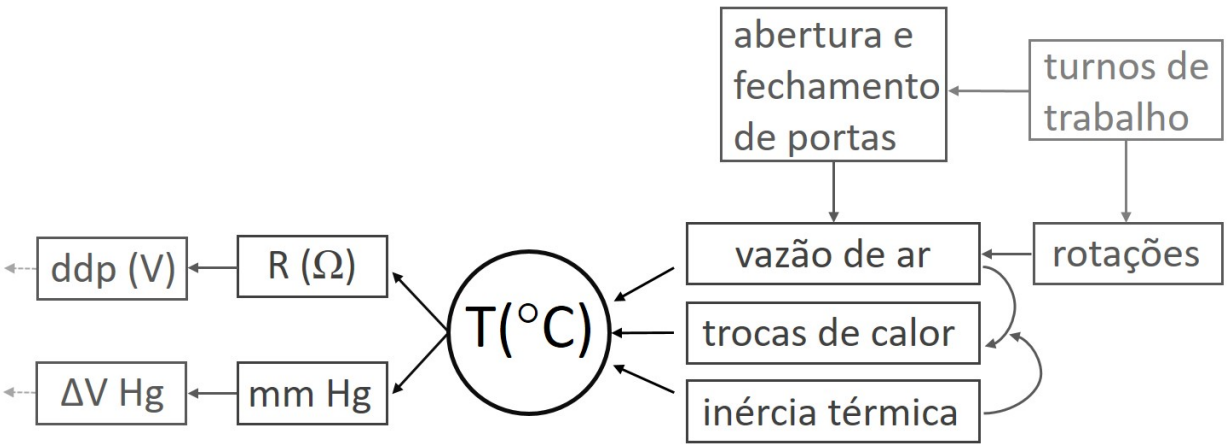


Figura 7.68: Medições diretas e indiretas de grandezas físicas e fenómenos termodinâmicos.

7.5 Modelação numérica - Minas da Panasqueira

A validação propriamente dita demanda uma adaptação do algoritmo do modelo para que esteja apto a incorporar os parâmetros recolhidos nas campanhas de amostragem. Mais especificamente, esta adaptação passa por:

1. utilização da biblioteca `xlrd` para ler folhas *Excel*.
2. criação de uma variável `array` para receber os dados do *Excel*.
3. criação de novas variáveis para receber diferentes parâmetros contidos nas folhas *Excel*, sendo estas:
   a) **Variável `T_in`** - vetor coluna que contém os dados de entrada de temperatura, recolhidos experimentalmente.
      i. Cada linha desta variável `array` corresponde à temperatura de entrada do ar.
      ii. Como a temperatura é uma medida discreta no tempo, utilizam-se dois valores consecutivos como extremos de um intervalo: se a temperatura era de 13 graus, e depois de 4 minutos subiu para 14, supõe-se que a distribuição de temperaturas dentro deste intervalo é linear; utiliza-se interpolação linear para recalcular a temperatura de entrada a cada passo de tempo, com base nos valores efetivamente medidos ao início e ao final de um dado intervalo de tempo.
      iii. A **temperatura de entrada** depende do que se considera como referencial espacial de "entrada". No **modelo**, **entrada** significa início do movimento: se o ar flui da esquerda para a direita, a temperatura do ponto extremo à esquerda é a temperatura de entrada (input), e a temperatura do ponto extremo à direita é a temperatura de saída (output). Analogamente, se o movimento do ar é da direita para a esquerda, a temperatura de entrada corresponde, agora, à temperatura do ponto mais à direita, enquanto a temperatura de saída passa a ser a do ponto mais à esquerda. Isto porque a lógica do **modelo** envolve calcular o acréscimo ou decréscimo de temperatura do fluido **após ter percorrido certa distância em uma galeria**, de modo que a **entrada** tem de ser o ponto de **origem de movimento**. Esta ideia se traduz melhor pelas Figuras 7.71 e 7.72.
      iv. O critério de atribuição das temperaturas recolhidas para a variável `T_in` fica definido. No caso das Minas da Panasqueira, quando há funcionamento dos ventiladores e o escoamento de ar tem sentido arbitrado como positivo na direção $\vec{z}$, `T_in` recebe, para aquele instante, a temperatura recolhida pelas sondas **n3** ou **n1** (esta última, somente para o período em que a sonda **n3** parou de trabalhar), pontos mais próximos à **origem do movimento**. Quando os ventiladores não trabalham e a direção do caudal se inverte, `T_in` passa a ser a temperatura recolhida por **n5**, pois há mudança no referencial de **origem do movimento**: o ar agora sai da mina, e passa antes por **n5** do que por **n3** ou **n1**. De forma resumida, se a trajetória do ar é **n3**→**n1**→**n5**, a origem é **n3** e `T_in` recebe **T n3**; se a trajetória é **n3**←**n1**←**n5**, a origem é **n5** e `T_in` recebe **T n5**.
      v. Este critério aplicado aos dados de entrada e de saída das Minas da Panasqueira (Segunda Campanha de Amostragem) é expresso pelos gráficos das Figuras 7.69 e 7.70, em que os períodos de desligamento dos ventiladores, e consequentemente de inversão de direção do caudal, são destacados em fundo cinzento.
   b) **Variável `caudal`** - vetor coluna que contém informações relativas ao caudal de ar em função da operação dos ventiladores e da velocidade do ar em cada troço.
      i. Três regimes de operação dos ventiladores: ventilação máxima, com ventiladores a 1250 rotações por minuto, ventilação a 750 rotações por minuto, e ventilação desligada (inversão de caudal).
      ii. Para cada regime, há variação de velocidade de escoamento do ar em cada um dos quatro troços, conforme a Figura 7.47. Como há entrada de ar pelo poço e fuga de ar pelos ramais de galerias conectados à galeria de testes, é necessário subdividir a matriz de velocidades para receber o valor correspondente à cada troço.
      iii. O caudal quando os ventiladores estão desligados não foi medido diretamente, e sim inferido com base nos valores de temperatura. Como são períodos em que a mina está fechada, não foi possível medir diretamente a velocidade do ar em cada troço.

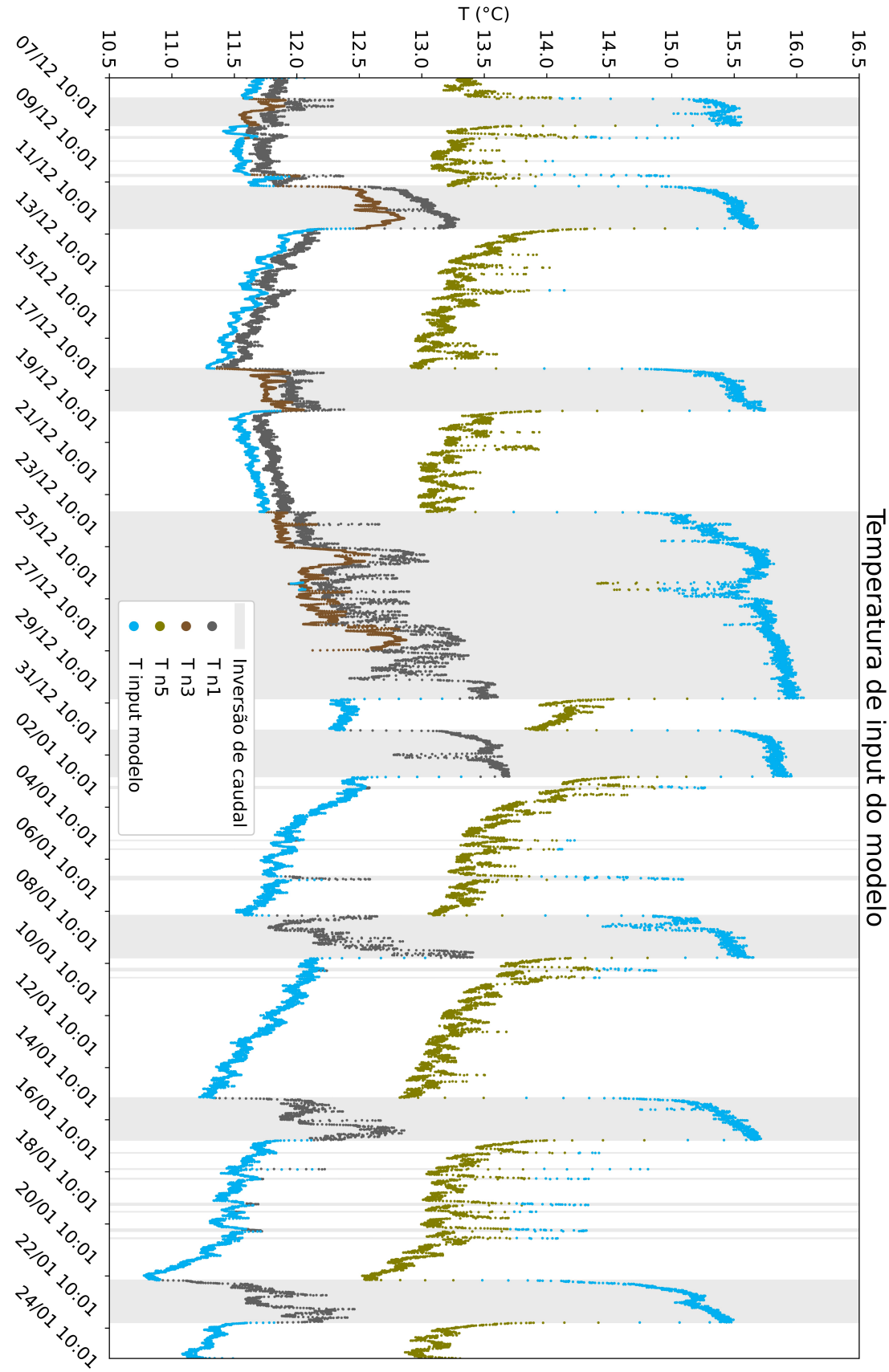


Figura 7.69: Dados experimentais - definição dos dados de input do modelo.

iv. As velocidades para cada troço, quando há operação dos ventiladores, foram medidas sempre ao centro da galeria (velocidade máxima), e em secções de área equivalente, sendo, portanto, coerentes troço-a-troço.

v. Como a velocidade muda de troço para troço, a convecção também o faz. A matriz que acomoda o valor do coeficiente de convecção é separada troço por troço e armazena os valores respetivos, em função do caudal.

4. O algoritmo realiza uma etapa de **pré-condicionamento da temperatura da rocha**.
   a) O algoritmo, inicialmente, atribui um valor uniforme ao maciço rochoso, o que certamente não reflete a realidade.
   b) Realiza-se então um pré-condicionamento da temperatura: o modelo simula 6 meses de escoamento de ar para induzir sobre o maciço rochoso um gradiente de temperaturas.
   c) Os valores das temperaturas iniciais da rocha e do ar são arbitrados com base nos dados recolhidos. Como também foram recolhidos valores de temperatura de rocha, utilizam-se valores próximos para a temperatura inicial, e se induz o gradiente com um escoamento de ar a uma temperatura também coerente com a dos dados experimentais.
   d) O pré-condicionamento é feito por tentativa e erro. Considera-se satisfatório quando o resultado desta etapa, isto é, temperatura modelada de rocha em certos pontos, é próxima aos dados reais de temperatura de rocha. Considera-se temperatura de rocha recolhida pelas sondas de temperatura também um parâmetro de *input* do modelo. Como não há apenas um valor de temperatura de rocha, e sim uma distribuição espacial-temporal, este parâmetro de entrada necessita ser incorporado ao modelo indiretamente, por tentativa e erro.

5. Dentro do laço do cálculo de temperatura, após o período de pré-condicionamento, é feita a leitura linha-a-linha dos vetores coluna `T_in` e `caudal`. O valor da **temperatura de saída estimada** através do modelo é registada linha-a-linha também em um vetor coluna, chamado `T_saida`, e pode ser comparada posteriormente à temperatura real de saída do ar, correspondente aos valores experimentalmente recolhidos (Figura 7.70). Novamente, o que é considerado "saída" para o **modelo** depende do referencial de origem do movimento: a temperatura de saída pode ser **n3**, **n1** ou **n5**, a depender da direção de escoamento do ar, conforme as Figuras 7.71 e 7.72.

Com o algoritmo adaptado, deu-se a criação uma folha `Excel` em formato `.xls` contendo os dados de entrada requeridos pelo modelo e procedeu-se à validação propriamente dita.

7.5.1 Validação propriamente dita do modelo - Minas da Panasqueira

Iniciou-se a validação do **modelo** pelos dados obtidos na **Segunda Campanha de Amostragem das Minas da Panasqueira**, por possuírem maior número de pontos amostrados de temperatura. Os dados da **Primeira Campanha de Amostragem das Minas da Panasqueira** foram utilizados em uma validação complementar posterior.

Segunda Campanha

Como já discutido, o algoritmo impõe, inicialmente, uma distribuição uniforme de temperatura ao maciço rochoso. Com isto, simula-se ventilação máxima ao longo de seis meses[1], com certa temperatura de entrada[2], antes de o **modelo** começar a ler o vetor `T_in` contendo os dados medidos de temperatura de entrada. A Figura 7.73 demonstra o gradiente de temperatura criado para o troço de galeria entre os pontos de instalação dos sensores **n3** e **n5**. Observa-se, por volta dos 400 m, que há uma clara modificação do gradiente de temperatura do maciço rochoso, como consequência da redução significativa de caudal no troço **T4** (Figura 7.47). Isto também ocorre, mas em menor medida, para os outros troços, dada a variação de caudal.

Com esta etapa cumprida, o algoritmo passa a ler, linha-a-linha, os valores de `T_in` e `caudal`. A Figura 7.74 mostra a evolução de temperatura na galeria simulada pelo modelo, em que ficam evidentes os impactos da mudança do regime de funcionamento dos ventiladores sobre a distribuição de temperaturas no interior

[1] Na prática, foram testados períodos de tempo entre um dia e seis meses para o pré condicionamento, e notou-se que há estabilidade a partir de aproximadamente um mês.

[2] Utilizou-se a temperatura predominante ao longo do intervalo de amostragem, de cerca de 14.2 °C para a rocha e 11.5 °C para o ar, e velocidades de escoamento do ar condizentes com um regime de operação de 1250 rotações por minuto dos ventiladores.

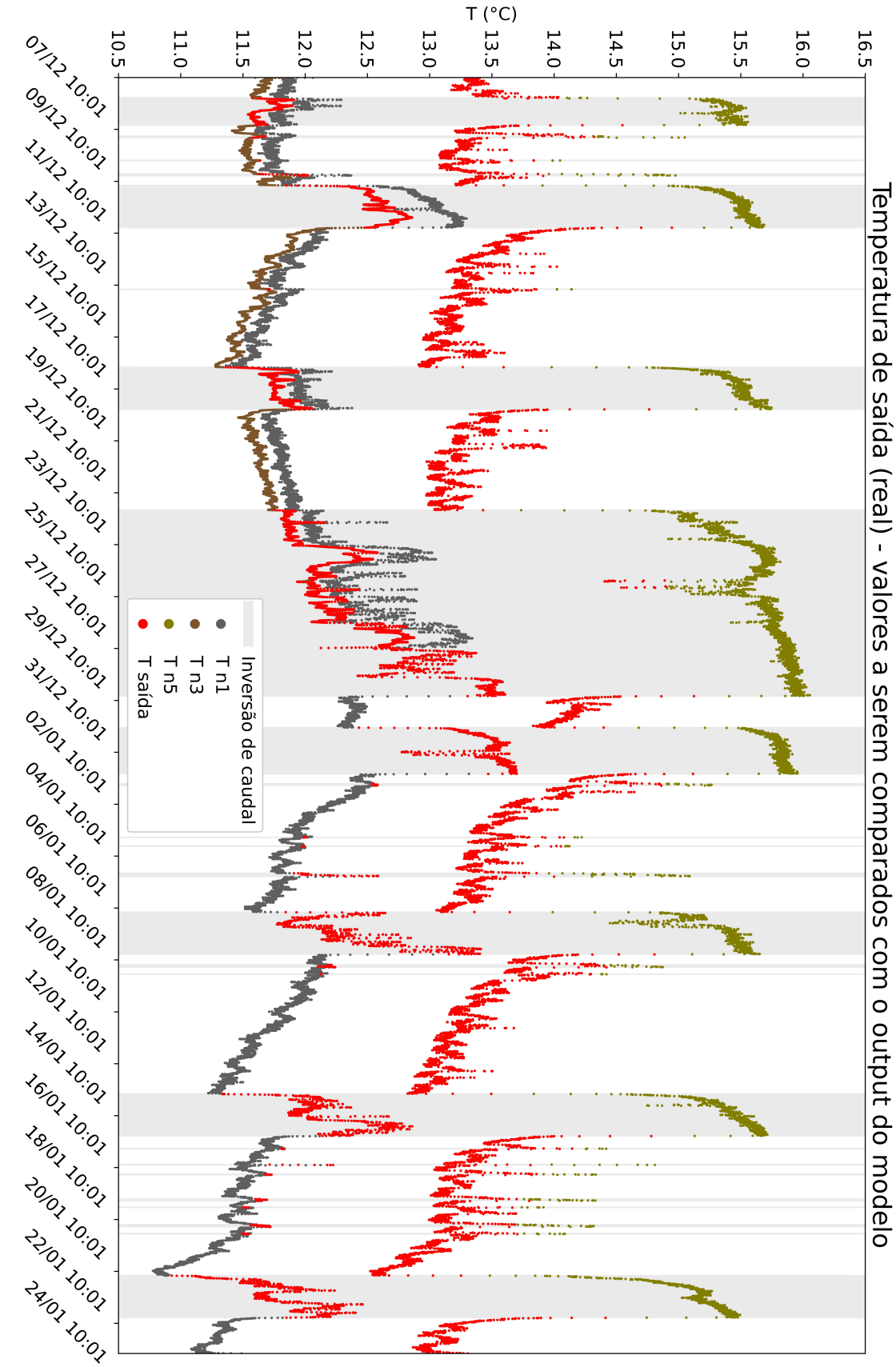


Figura 7.70: Dados experimentais - definição dos dados de temperatura que serão comparados aos valores estimados pelo modelo.

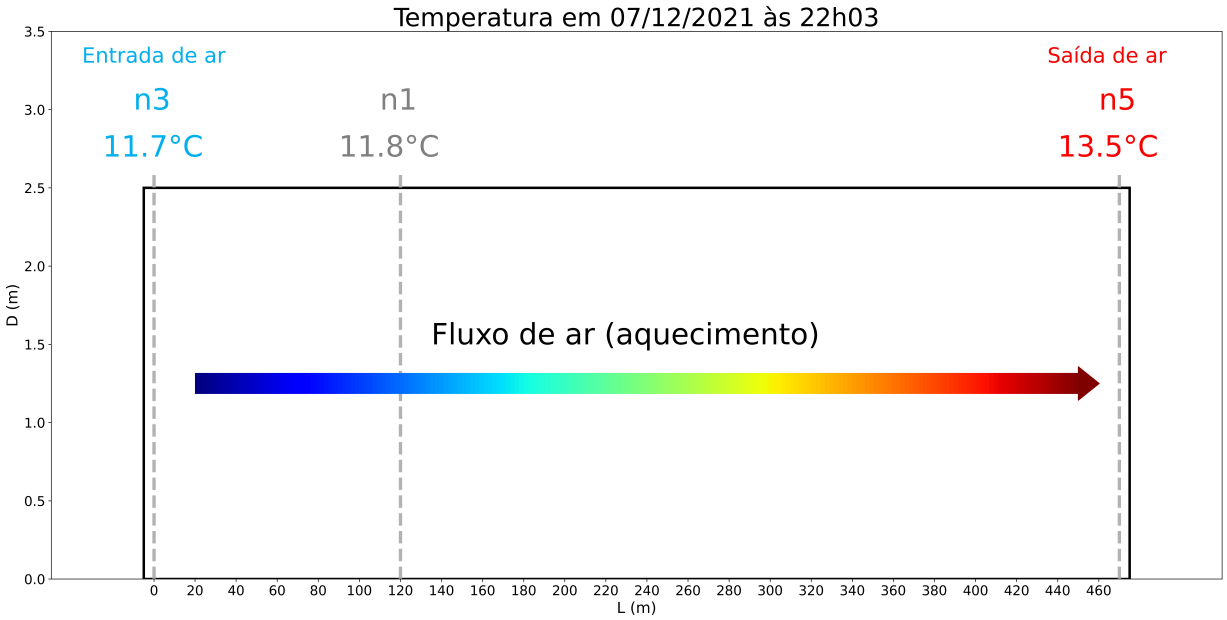


Figura 7.71: Critério de definição do input: caudal na direção positiva de $\vec{z}$, input no ponto de instalação de **n3** (origem do movimento do ar).

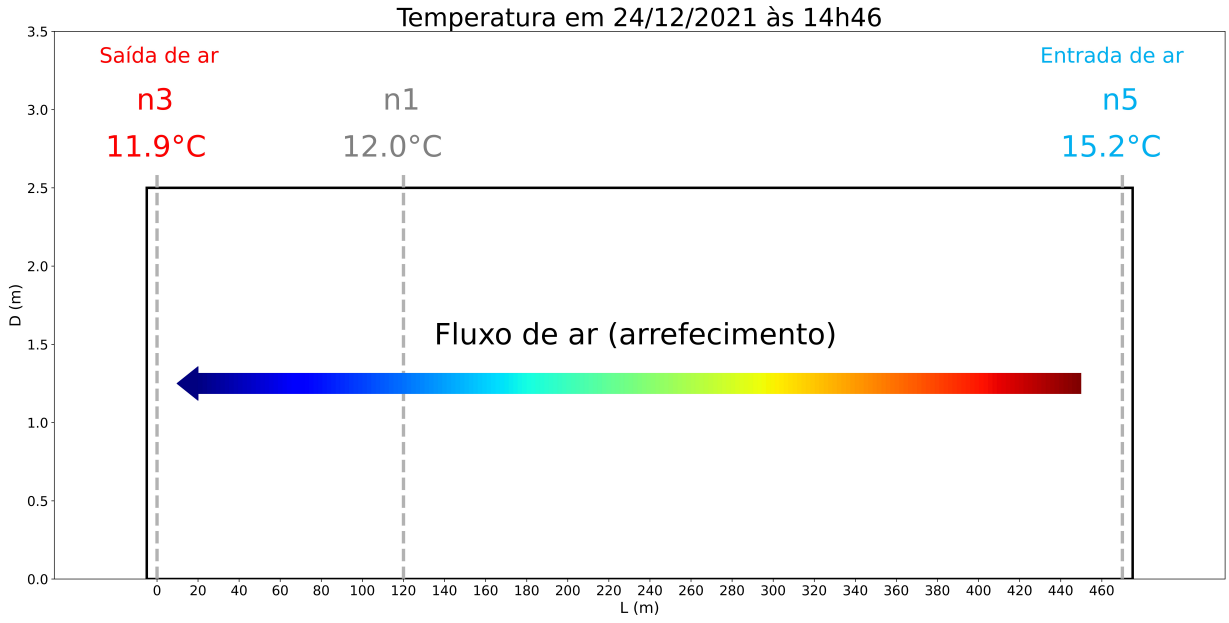


Figura 7.72: Critério de definição do input: caudal na direção negativa de $\vec{z}$, input no ponto de instalação de **n5** (origem do movimento do ar)

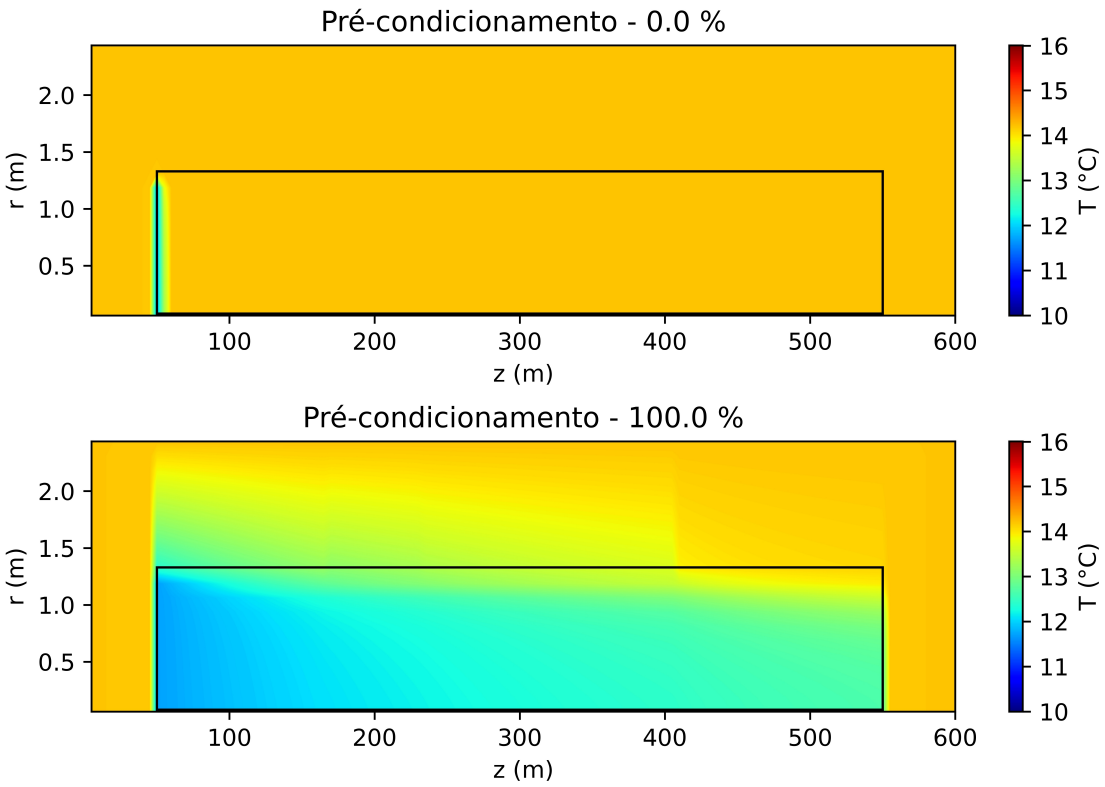


Figura 7.73: Processo numérico de pré-condicionamento do gradiente de temperatura da rocha.

da galeria. Nesta figura, a direção do fluxo de ar é indicada por seta e as respetivas posições das sondas de temperatura de ar são assinaladas. Além disto, a sonda cuja temperatura é utilizada como input a cada instante, correspondente ao ponto mais próximo ao referencial de origem do movimento do ar, é circulada. Caso a validação indique que o **modelo** de facto realizou uma estimação suficientemente adequada da variação de temperatura do ar de ventilação, estes gráficos e animações servem como ”raio-x” da distribuição de temperaturas no interior da galeria, e permitem visualizar a ocorrência, prevalência, e intensidade dos fenómenos termodinâmicos.

Os resultados obtidos através do modelo, em termos de temperaturas estimadas de saída armazenadas na variável `T_saida`, podem ser comparados aos valores reais de temperatura, medidos experimentalmente, pois correspondem aos mesmos instantes. As Figuras 7.75 - 7.81 mostram os resultados visuais da validação e os erros relativos de estimação em função do tempo. Entende-se que a validação pode ser dividida de acordo com diferentes perspetivas, sendo elas:

1. **Validação Fenomenológica** - leva em consideração o comportamento **macroscópico** dos valores estimados frente aos dados reais. Visa responder à pergunta: **o comportamento da temperatura de saída estimada pelo modelo ao longo do tempo obedece à uma mesma tendência geral de comportamento do que os dados reais**? Para responder a esta questão, comparam-se os valores estimados e reais quanto à **forma das curvas** ou posição do **conjunto de pontos de dispersão**. Pode ser vista nas Figuras 7.75 - 7.77.

2. **Validação Numérica** - leva em consideração os valores estimados frente aos valores reais. Visa responder às perguntas: **qual é a precisão das estimações do modelo e qual a origem dos desvios**? Envolve o cálculo do erro relativo, conforme a Figura 7.81, e outras análises estatísticas, que são tratadas no capítulo destinado à discussão de resultados. É, sobretudo, uma **ferramenta de análise da eficiência do modelo** como estimador do estado de temperatura em uma galeria e de compreensão de suas limitações. Também poderá guiar trabalhos futuros para a criação de uma nova versão do modelo, que supra as deficiências da primeira versão.

3. **Validação Gráfica** - tem como ponto de vista três parâmetros, analisados ”ponto-a-ponto”: o valor da **temperatura de entrada**, o valor da **temperatura estimada de saída**, e o valor da **temperatura**

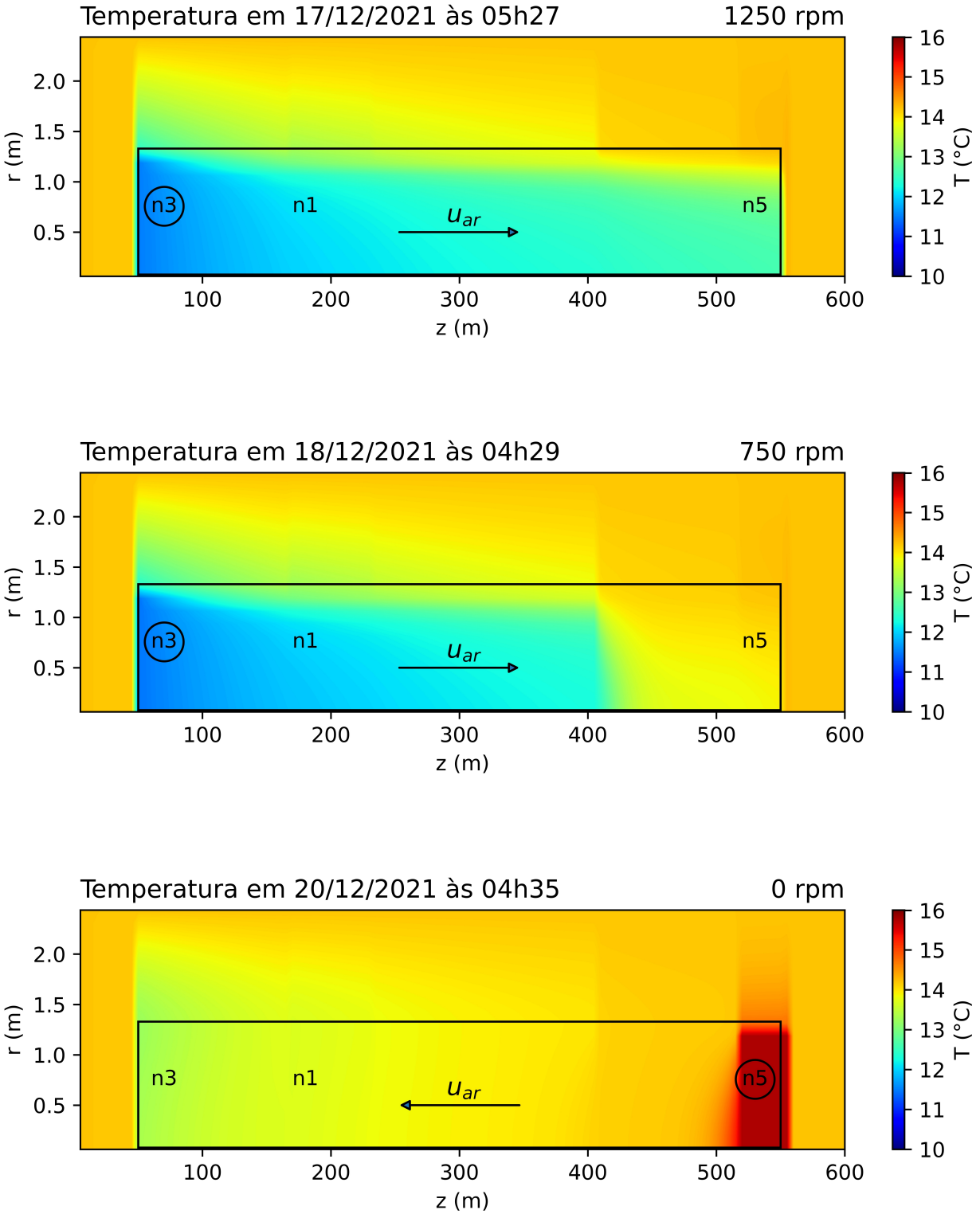


Figura 7.74: Evolução de temperatura para a **Segunda Campanha de Amostragem das Minas da Panasqueira**.

real de saída. É uma forma de observar a ação do modelo, que na situação ideal, deveria ”empurrar” ou ”puxar” a temperatura de entrada até que coincida exatamente com a temperatura real de saída; o ”empurrar” ou ”puxar” são determinados pelas estimações das trocas de calor e pela conservação de movimento. É diferente do erro relativo, porque a ideia passa a ser a **comparação visual** da distância entre as temperaturas de entrada e saída reais (intervalo em que o modelo pode posicionar a estimação ou uma **janela de valores possíveis de estimação**), e a distância entre as temperaturas de saída real e estimada (lacuna que, numa estimação ideal, não deveria existir). Pode ser vista nas Figuras 7.78-7.80. Quanto maior a distância entre temperatura de entrada e temperatura estimada de saída, e quanto menor a distância entre temperatura estimada de saída e temperatura real de saída, melhor foi a estimação feita pelo o modelo para aquele ponto.

Para este conjunto de dados da **Segunda Campanha de Amostragem das Minas da Panasqueira**, tendo em conta a **Validação Fenomenológica** (Figura 7.75), observa-se que para períodos em que os ventiladores estão em funcionamento (marcados por maiores valores de temperatura real), há uma maior fidelidade da estimação do modelo à tendência geral de comportamento da temperatura; o conjunto de pontos de dispersão da temperatura estimada é quase paralelo ao conjunto de pontos de dispersão da temperatura real. Onde há maior distância entre pontos reais e estimados são justamente os períodos de ventilação desligada, em que pouco se conhece sobre a distribuição de velocidades do ar ao longo da extensão da galeria, e que muito provavelmente o comportamento inferido para o ar deixou de assimilar algum fator relevante para as trocas de calor. Neste caso, o impacto da falta de caracterização adequada do caudal sobre a qualidade da estimação do modelo fica evidente.

As Figuras 7.76 - 7.77 mostram as mesmas séries de dados da Figura 7.75 mas com escala de tempo ampliada, em que se pode observar em maior detalhe o comportamento da série de temperaturas estimadas frente aos dados reais. Destaca-se a dificuldade de visualização pormenorizada dos dados através de recursos visuais que não animações e vídeos, que permitem o ”empilhamento” de *frames* representativos de todos os instantes de tempo medidos e estimados; as figuras estáticas são limitadoras da escala horizontal dos gráficos e podem afetar as análises fenomenológicas de estimação.

Como este ponto de vista é qualitativo, pode-se dizer que o modelo é, no mínimo, coerente com a realidade dos fenómenos de troca de calor que ocorrem nesta galeria. Incorpora de forma adequada as oscilações ”macro” de temperatura e assimila a tendência geral de variação de temperatura.

Para a **Validação Gráfica**, deseja-se uma ampliação ainda maior na escala temporal do gráfico, e é ainda mais importante a utilização de animações que permitam visualizar a estimação ponto-a-ponto. Os gráficos das Figuras 7.78 - 7.80 exemplificam intervalos de tempo suficientemente curtos que permitem esta visualização. Foram selecionadas três imagens com características singulares que incorporam perspetivas interessantes para a análise do modelo:

1. Figura 7.78 - quando o escoamento é no sentido positivo de $\vec{z}$, ou seja $T_entrada < T_real$, a estimação do modelo é melhor. Quanto maior a estabilidade da temperatura de entrada, melhor se torna a estimação ao longo do tempo: nota-se isto à direita do gráfico, em que as aproximações do modelo passam a quase tocar os valores reais de temperatura.

2. Figura 7.79 - quando há inversão de caudal ou descontinuidades na velocidade de escoamento do ar, marcadas pela troca de posição vertical entre os dados de entrada com os dados reais, pior é a estimação do modelo. À esquerda do gráfico, onde a temperatura é mais estável, a estimação é mais fiel aos dados reais. Também, mais à direita, a estabilização da temperatura causa uma crescente aproximação das estimações do modelo aos valores reais. Este comportamento aproxima-se do **Fenómeno de Gibbs** para as séries de Fourier em regiões de descontinuidade ou ”salto”, amortecidas após certo intervalo.

3. Figura 7.80 - quando o escoamento é no sentido negativo de $\vec{z}$, ou seja $T_real < T_entrada$, mas há estabilidade suficiente de temperatura e de velocidade do ar, as estimações do modelo tornam-se mais próximas da realidade (direita do gráfico).

A **Validação Gráfica** permite, portanto, enxergar o impacte das oscilações bruscas, sejam de temperatura ou de caudal, sobre a capacidade de estimação do modelo. Como se imagina que o funcionamento dos ventiladores não seja perfeitamente definido entre 1250, 750, ou zero rotações por minuto, e que haja significativo período de transição entre estes regimes, uma medição de velocidade de escoamento em cada troço em função do tempo, concomitantemente à medição de temperatura, certamente melhoraria o desempenho do modelo nestas áreas de transição. Como estas zonas de transição de caudal são relativamente pequenas frente ao

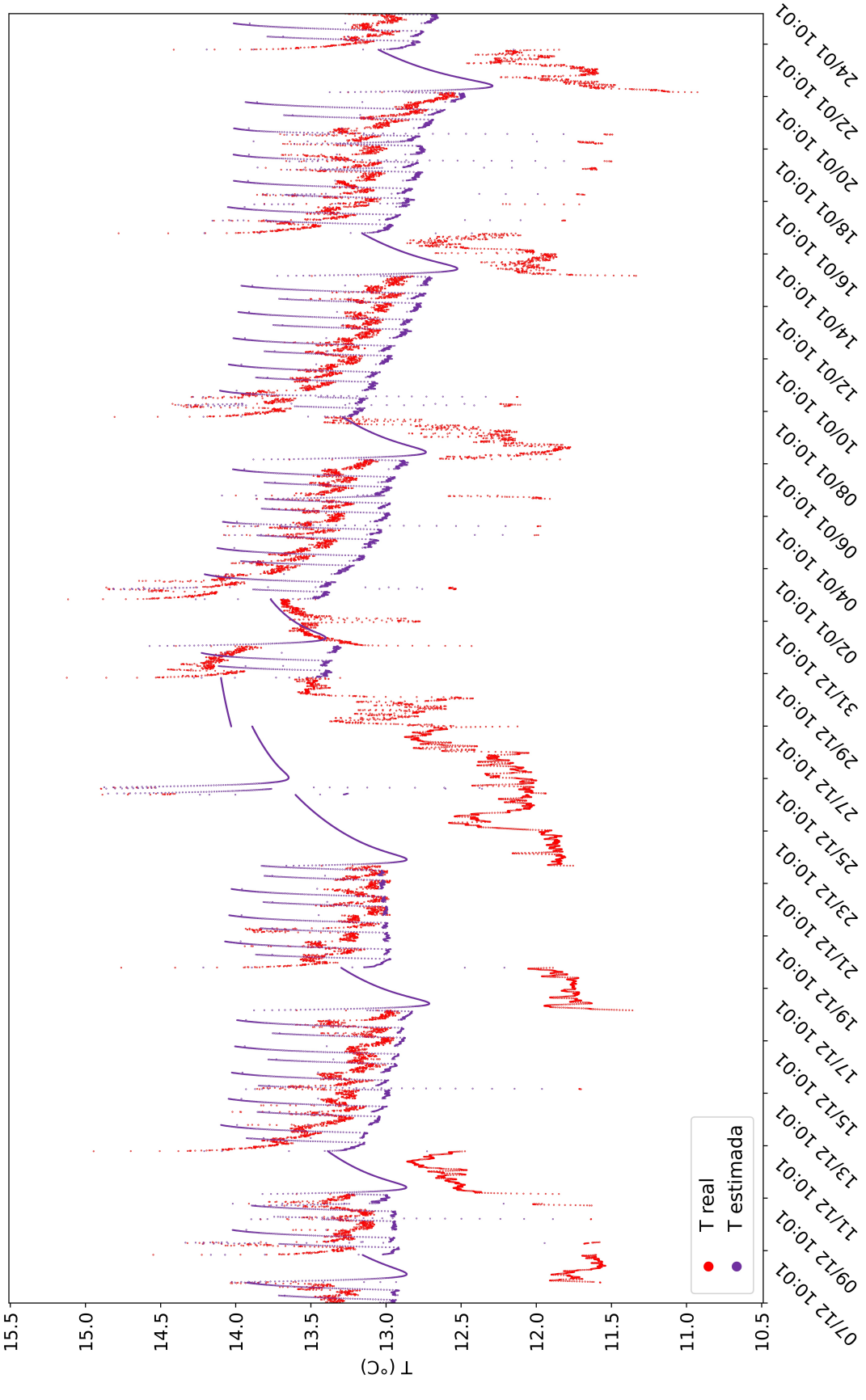


Figura 7.75: Validação Fenomenológica do modelo (**Segunda campanha das Minas da Panasqueira**) - temperatura estimada versus temperatura real.

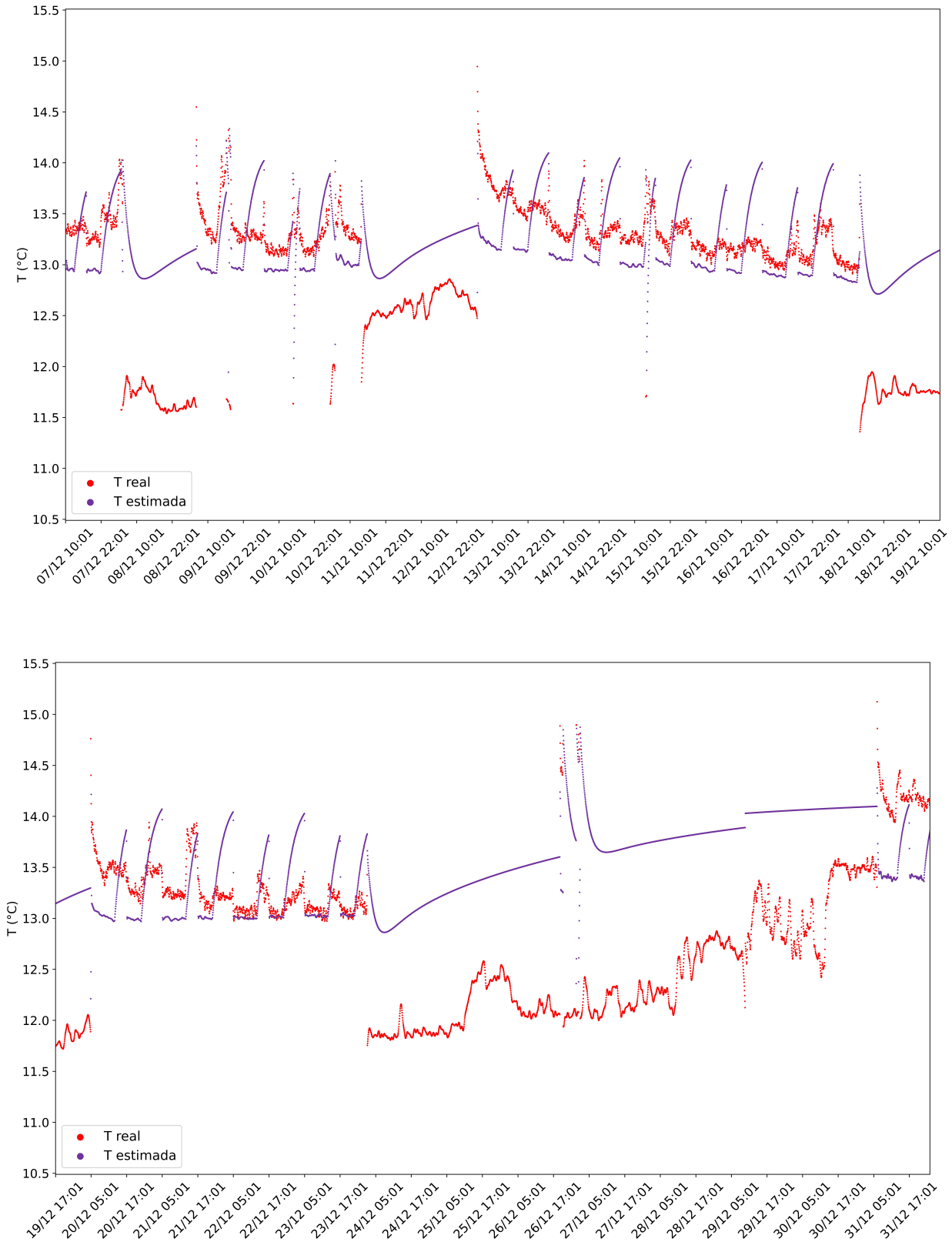


Figura 7.76: Validação Fenomenológica do modelo (**Segunda campanha das Minas da Panasqueira**) - temperatura estimada versus temperatura real - partes 1 e 2.

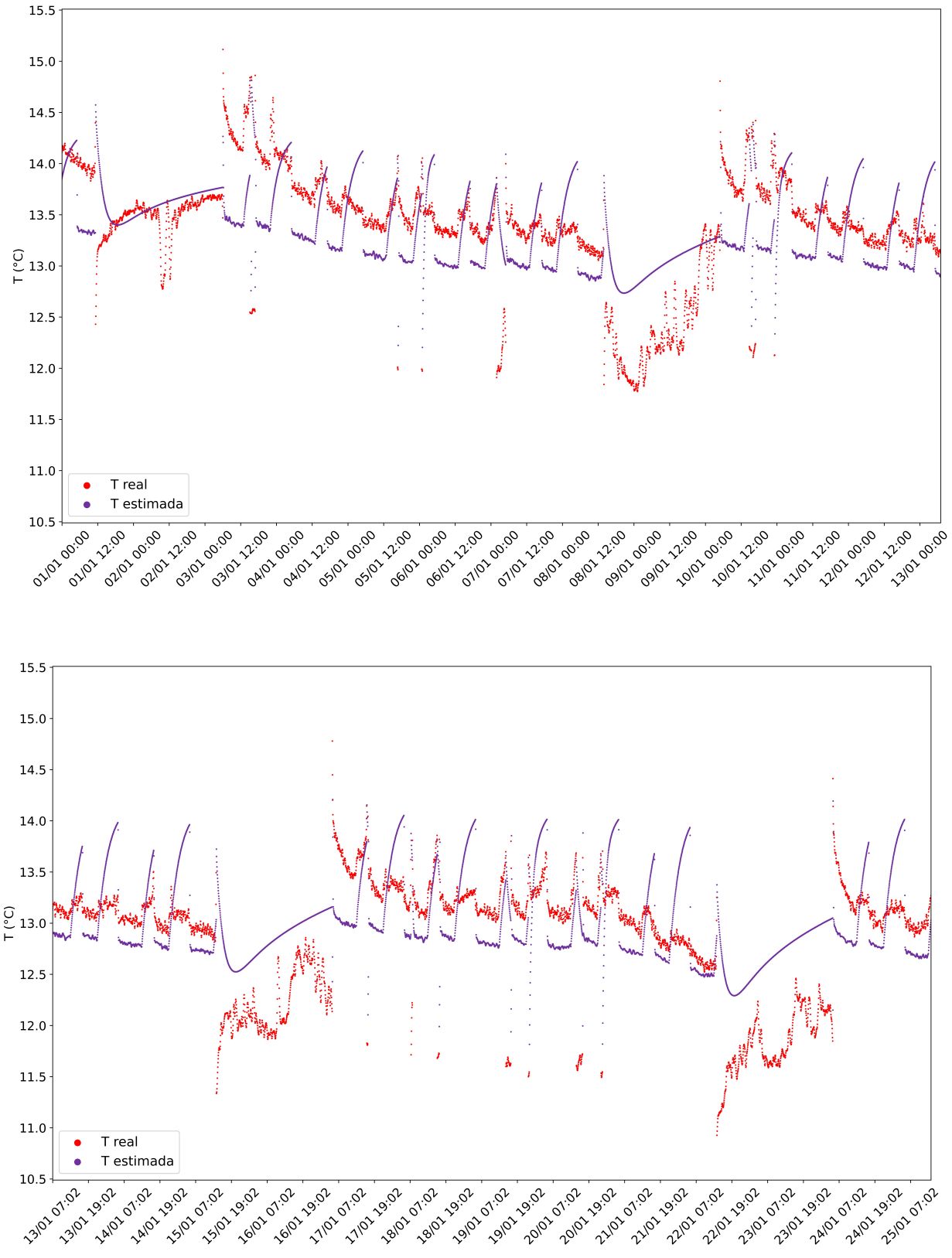


Figura 7.77: Validação Fenomenológica do modelo (**Segunda campanha das Minas da Panasqueira**) - temperatura estimada versus temperatura real - partes 3 e 4.

intervalo total de amostragem, o desconhecimento da velocidade instante-a-instante não é tão prejudicial ao funcionamento do modelo, que tendo período suficiente para tal, ajusta-se bem[5] às transições dos parâmetros ambientais.

As validações **Fenomenológica** e **Gráfica** para as **Minas da Panasqueira**, permitem concluir que o modelo é um bom estimador de acréscimo/decréscimo de temperaturas: apesar de não assimilar adequadamente as descontinuidades de temperatura e caudal, tem boas capacidades de estimação transiente de temperatura, aspeto que os modelos numéricos de troca de calor em galerias subterrâneas raramente incorporam.

Ainda há de se realizar um estudo dos resultados do ponto de vista numérico, que permita quantificar a eficiência do modelo e identificar a origem dos erros de estimação. Em um primeiro momento, a Figura 7.81 mostra os erros relativos de estimação em função do tempo sob uma perspetiva da **Validação Numérica**. Novamente nota-se que as descontinuidades se traduzem por picos de erros de estimação, e as maiores área sobre as curvas refletem períodos de ventilação desligada.

Primeira Campanha

Para a **Primeira Campanha de Amostragem das Minas da Panasqueira**, a análise é muito próxima à do conjunto de dados da **Segunda Campanha**. As principais mudanças são a escala de temperatura, já que a **Primeira Campanha** foi feita durante o verão, e o intervalo de tempo, que é de apenas cinco dias.

A **Validação Fenomenológica** (Figura 7.82) mostra uma coerência entre o comportamento macro da série real de temperaturas em relação à série de temperaturas estimadas, assim como ocorreu para a **Segunda Campanha**. Neste caso, não se incluiu figuras da **Validação Gráfica**, visto que o comportamento é similar ao da série de dados anterior, mas pode ser vista através da animação disponível na versão digital deste documento, associada à Figura 7.83.

Pela Figura 7.83, que mostra os erros relativos de estimação em função do tempo, nota-se que a ordem de precisão para este conjunto de dados é próxima ao que se verificou para o conjunto de dados anterior. A maior diferença está justamente nas descontinuidades, que ocorreram com menor frequência ao longo da **Primeira Campanha**, também por se tratar de um período menor de amostragens.

Vê-se também que a sazonalidade da distribuição de temperaturas é satisfatoriamente assimilada pelo modelo, que produz estimações equivalentes para estações mais frias ou mais quentes. Percebe-se também o efeito bioclimático da estrutura subterrânea, que impõe à temperatura de saída do ar um valor máximo de cerca de 15.0 °C, independentemente da estação. As temperaturas mínimas de saída, entretanto, são significativamente afetadas pela estação, oscilando entre 10.5 e 13.0 °C.

7.6 Outras estimações do coeficiente de convecção (h)

Até então, o modelo contou com o cálculo das trocas de calor por convecção por meio de uma estimação do **Número de Nusselt** através da **Equação de Petukhov** para o escoamento turbulento, por se julgar que esta incorporava mais adequadamente a rugosidade encontrada em galerias subterrâneas de mineração.

Para o escoamento laminar, o **modelo** utilizou inicialmente a **Equação de Hausen**; o escoamento laminar de ar, por outro lado, é bastante restrito nas galerias das Minas da Panasqueira, e só é considerado para o troço em que não se conseguiu medir o caudal de ar (Troço 4, segundo a Figura 7.47), porque a velocidade de escoamento era inferior ao valor mínimo detetável pelo instrumento de medição utilizado. Embora conste uma velocidade nula para o Troço 4 na tabela da Figura 7.47, o modelo considerou um valor arbitrário e não-nulo para o escoamento de ar nesta região, pois obviamente não existe algo como "ar parado", especialmente neste cenário[6].

A **Equação de Petukhov**, recomendada para ductos rugosos, inclui diretamente o **Fator de Fricção de Darcy** no cálculo de Nu: como se espera, levando em conta a **Analogia de Reynolds**, uma maior fricção corresponde a uma maior taxa em que ocorrem as trocas de calor por convecção. A fricção pode ser calculada através das equações 4.27 ou 4.28, que relacionam número de Reynolds, rugosidade média (adotada em função de valores típicos para galerias de mineração) e Fator de Fricção de Darcy. Por esta lógica, equações empíricas de estimação de Nu que considerem ductos lisos, subestimam as trocas de calor

[5] A discussão ainda é qualitativa. O que significa "bem" de um ponto de vista numérico ainda será discutido.

[6] Quando foram realizadas as medições de caudal, um engenheiro utilizou a fumaça do cigarro para demonstrar um comportamento aproximadamente laminar para o escoamento de ar nesta parte da galeria, com ventilador a 750 rpm. Comparativamente a outros troços de galeria, com caudal efetivamente medido e escoamento de facto turbulento, o "teste do cigarro" demonstrou uma maior turbulência do escoamento.

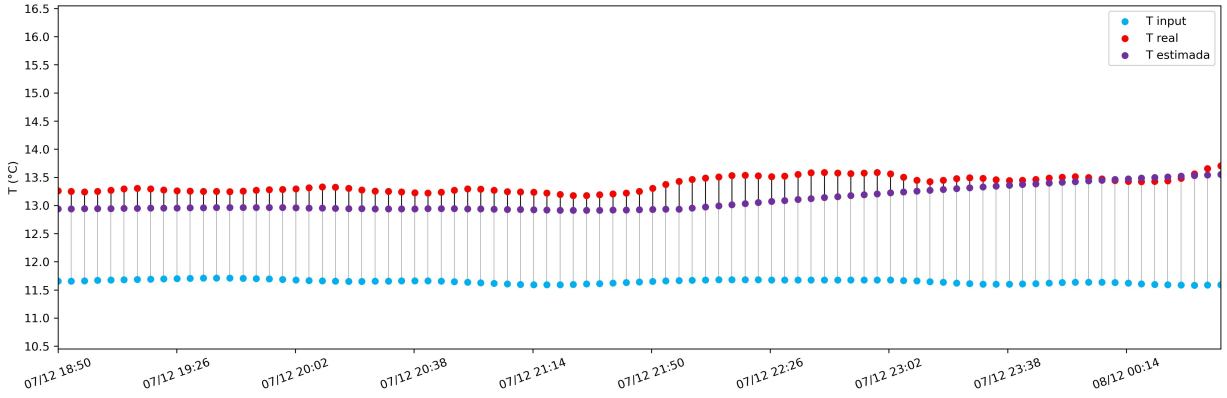


Figura 7.78: Validação Gráfica do modelo (**Segunda campanha das Minas da Panasqueira**) - melhores estimações do modelo à direita do gráfico.

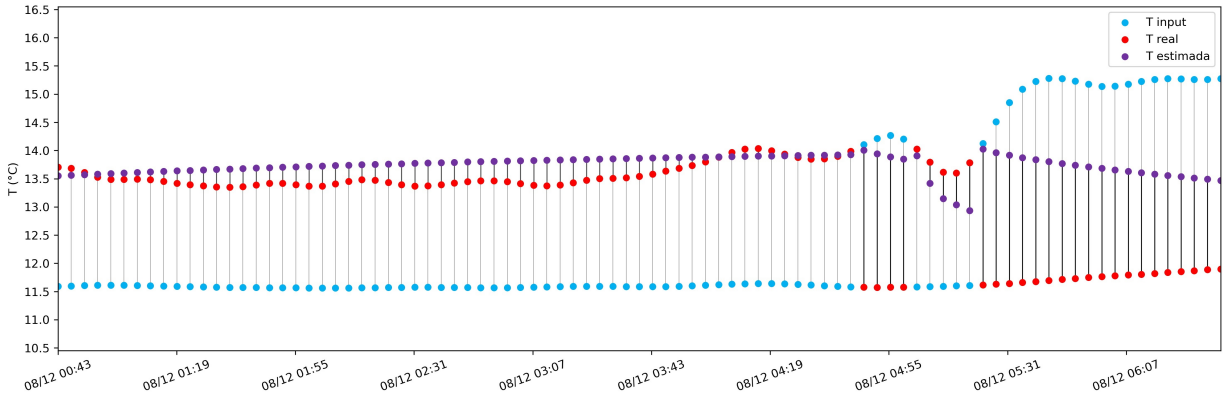


Figura 7.79: Validação Gráfica do modelo (**Segunda campanha das Minas da Panasqueira**) - inversões de caudal provocam descontinuidades no fluxo de ar e amplificam os erros do modelo.

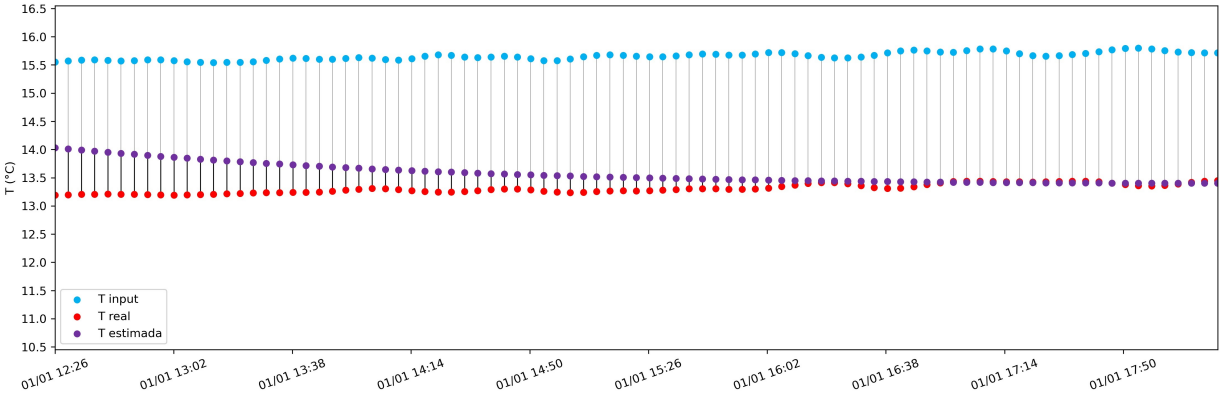


Figura 7.80: Validação Gráfica do modelo (**Segunda campanha das Minas da Panasqueira**) - melhora da estimação em função da estabilidade da temperatura de input.

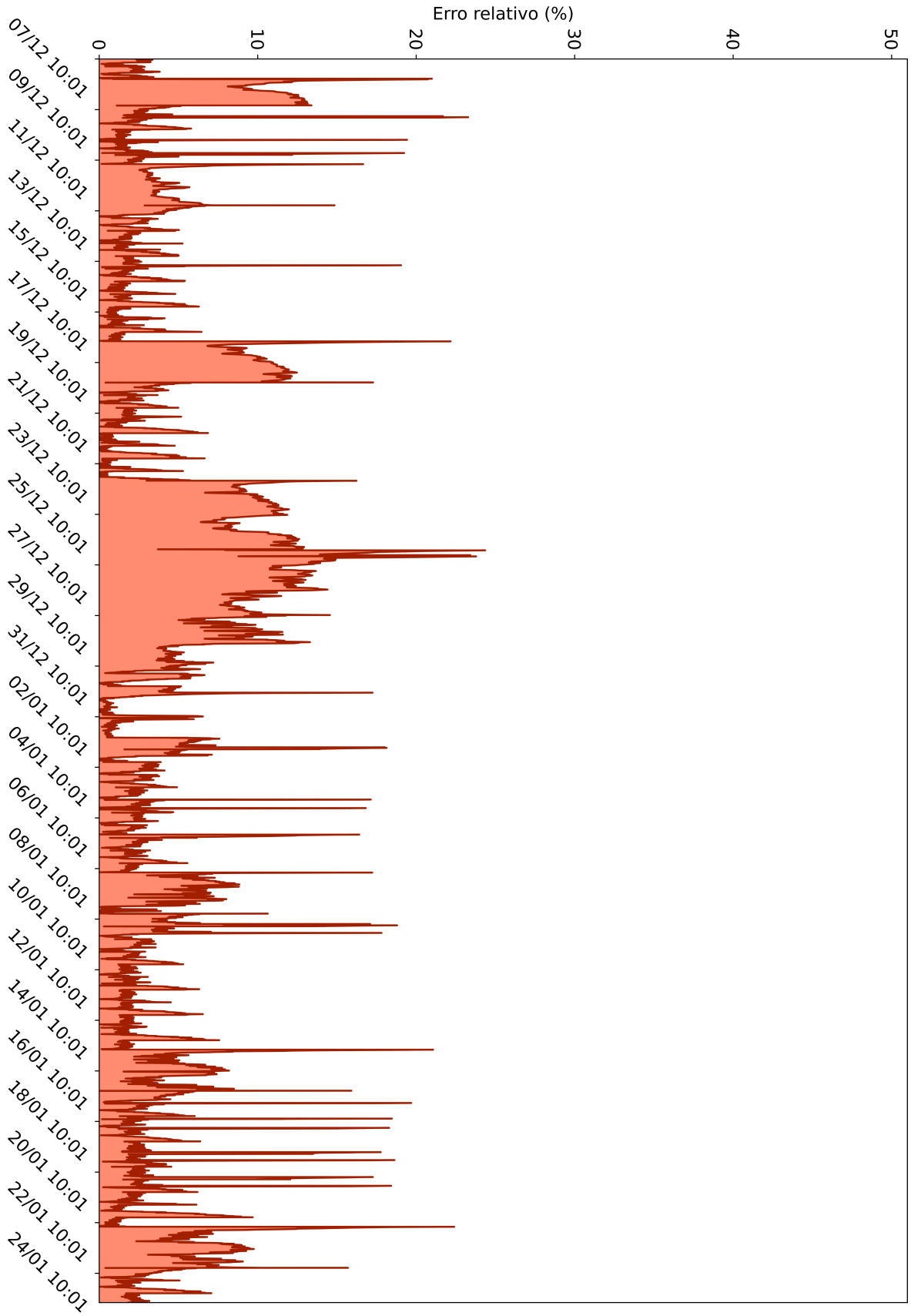


Figura 7.81: Validação Numérica do modelo (**Segunda campanha das Minas da Panasqueira**) - erro relativo.

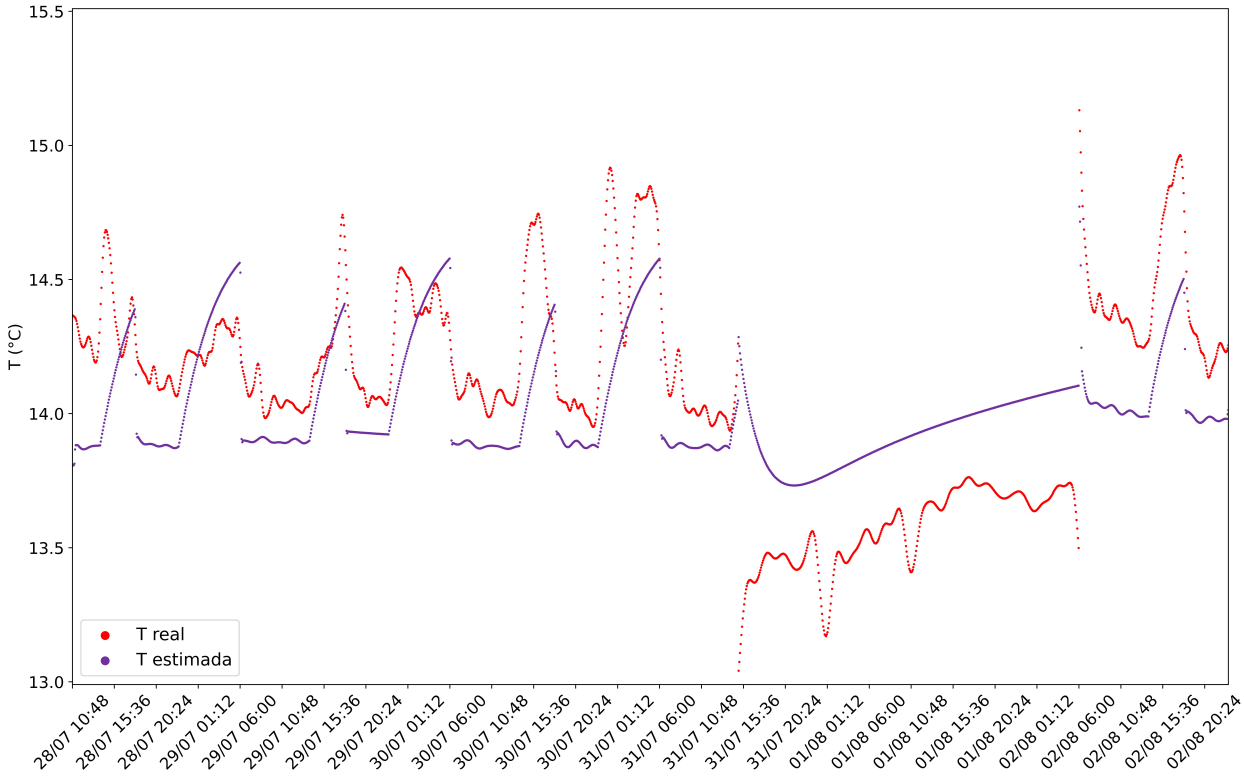


Figura 7.82: Validação do modelo (**Primeira Campanha de Amostragem das Minas da Panasqueira**) - temperatura estimada versus temperatura real.

por convecção, e possivelmente estimariam menores acréscimos/decréscimos de temperatura do ar através do **modelo**.

O **modelo**, no entanto, não está restrito à uma única metodologia de estimação da convecção. A Tabela 7.6 mostra outras formulações empíricas para o **Número de Nusselt**, retiradas de Holman (2001), Bayazitoglu e Ozisik (1988) e Forsberg (2021), que poderiam ser utilizadas em substituição à metodologia inicialmente adotada para o modelo.

As equações da Tabela 7.6 partem de uma suposição de temperatura constante das paredes do ducto ou de fluxo de calor constante. Estas situações não são totalmente verdadeiras para o caso real em que se aplica o **modelo**, mas são muito próximas da realidade: na validação, viu-se que a temperatura da parede da galeria tem baixa variação de temperatura, e para um caudal de ar estabilizado após certo tempo, o fluxo de calor entre fluido e rocha é também aproximadamente constante. Novamente, pela própria natureza do **modelo**, descontinuidades ou oscilações bruscas de temperatura induzem erros locais de estimação.

Com base nas equações existentes para a estimação da convecção expressas na Tabela 7.6, realizou-se uma nova validação para a **Primeira Campanha de Amostragem das Minas da Panasqueira**, com diversas metodologias paralelas de estimação da convecção. O resultado da **Validação Fenomenológica** é mostrado na Figura 7.84. Utilizou-se esta série de dados por ser mais compacta, já que a intenção é somente de comparar o efeito de alguns dos métodos de cálculo da convecção existentes na literatura sobre o **modelo**.

Como era de se esperar, as metodologias de estimação de convecção que produzem resultados melhores de estimação de temperatura pelo **modelo** são as que tratam a galeria como ducto rugoso, sendo elas a **Equação de Petukhov** e a **Equação de Gnielinski**. As imagens da galeria evidenciam que a rugosidade não pode ser negligenciada, e esta validação demonstra que há significativo prejuízo quando não se incorpora esta característica geométrica.

Os picos das séries de dados correspondem aos períodos em que os ventiladores operam a 750 rpm, em que há escoamento de ar aproximadamente laminar no Troço 4. Como foram utilizadas apenas duas equações diferentes para a estimação da convecção laminar, as séries de temperatura estimadas pelo **modelo** se aproximam nestas regiões e estão também próximas aos valores reais de temperatura. Quando prevalece um comportamento turbulento, por outro lado, as metodologias empíricas para ducto liso se afastam

Equação	Nu	Ducto	Regime	Condições
Dittus & Boelter	$0.023Re^{0.8}Pr^{n}$ $n = 0.4$ (aquecimento) $n = 0.3$ (resfriamento)	Liso	Turb.	$0.7 < Pr < 10^2$ $Re > 10000$ $\frac{L}{D} > 60$
Sieder & Tate	$0.027Re^{0.8}Pr^{\frac{1}{3}}\left(\frac{\mu_f}{\mu_s}\right)^{0.14}$ μ_f fluido μ_s sólido	Liso	Turb.	$0.7 < Pr < 10^4$ $Re > 10000$ $\frac{L}{D} > 60$
Gnielinski	$\frac{(f/8)(Re-1000)Pr}{1+12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3}-1)}\left[1+\left(\frac{D}{L}\right)^{2/3}\right]\left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{0.11}$ Pr à temperatura do fluido Pr_s à temperatura do sólido	Rugoso	Turb.	$0.6 < Pr < 10^5$ $2300 < Re < 10^6$
Hausen	$3.66 + \frac{0.0668\frac{D}{L}RePr}{1+0.04\left[\frac{D}{L}RePr\right]^{\frac{2}{3}}}$	Liso	Lam.	$\frac{RePr}{L/D} < 100$
Sieder & Tate	$1.86Re^{0.8}Pr^{\frac{1}{3}}\left(\frac{D}{L}\right)^{\frac{1}{3}}\left(\frac{\mu_f}{\mu_s}\right)^{0.14}$	Liso	Lam.	$RePr\frac{D}{L} > 10$
Experimental	$C\,Re^{m}Pr^{n}$			

Tabela 7.6: Metodologias para o cálculo do coeficiente de convecção através do número de Nusselt (Nu). Equações retiradas de Holman (2001), Bayazitoglu e Ozisik (1988) e Forsberg (2021).

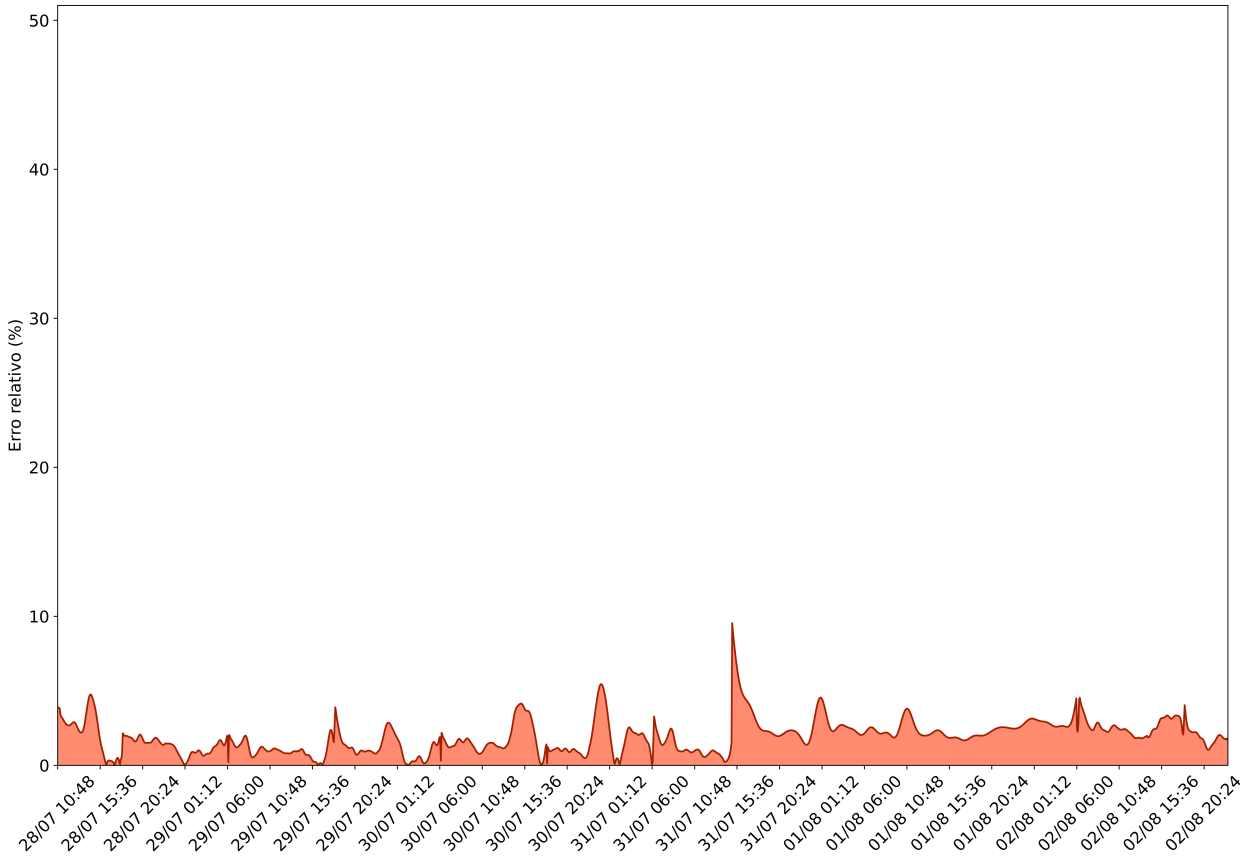


Figura 7.83: Validação do modelo (**Primeira Campanha de Amostragem das Minas da Panasqueira**) - erro relativo para a validação.

consideravelmente das metodologias empíricas para ducto rugoso e consequentemente, dos valores reais de temperatura.

A Figura 7.85 mostra os erros relativos de estimação para cada metodologia. Nota-se que os erros aproximam-se durante os regimes de operação a 750 rpm, e são menores para **Petukhov** e **Gnielinski** nos demais períodos, onde há maior turbulência. Isso demonstra que a não incorporação do atrito do ar com as paredes da galeria, por meio da utilização da rugosidade nas equações de **Nu**, causam maiores erros quanto maior for a turbulência, ou seja, quanto maior a energia relacionada ao movimento que seria dissipada na forma de calor através do atrito entre ar e rocha.

Por fim, percebe-se que a utilização da **Equação de Gnielinski** causaria uma pequena melhora na estimação da temperatura, ao menos para este conjunto de dados. Embora a rugosidade seja comprovadamente indispensável a uma melhor estimação das trocas de calor em galerias subterrâneas, são raros os modelos que a incorporam, e dificilmente este facto é mencionado em publicações da área.

7.7 Modelação de um Número de Nusselt Experimental

A última linha da Tabela 7.6 mostra uma formulação genérica para aproximar um **Número de Nusselt** a partir de dados experimentais. Esta equação serviu como base para um algoritmo `Python` de regressão multidimensional, aplicado sobre valores **otimizados** do cálculo de temperatura através do **modelo**, a partir dos dados da **Segunda Campanha de Amostragem das Minas da Panasqueira**.

Em um primeiro momento, foi desenvolvida uma sub-rotina de otimização do cálculo da temperatura dentro do algoritmo do modelo. O princípio desta sub-rotina é:

1. Antes de cada mudança de intervalo (antes de incrementar a linha de `T_in`), verificar se o valor de temperatura calculado para o intervalo de tempo atual possui erro relativo inferior à 1% em relação aos

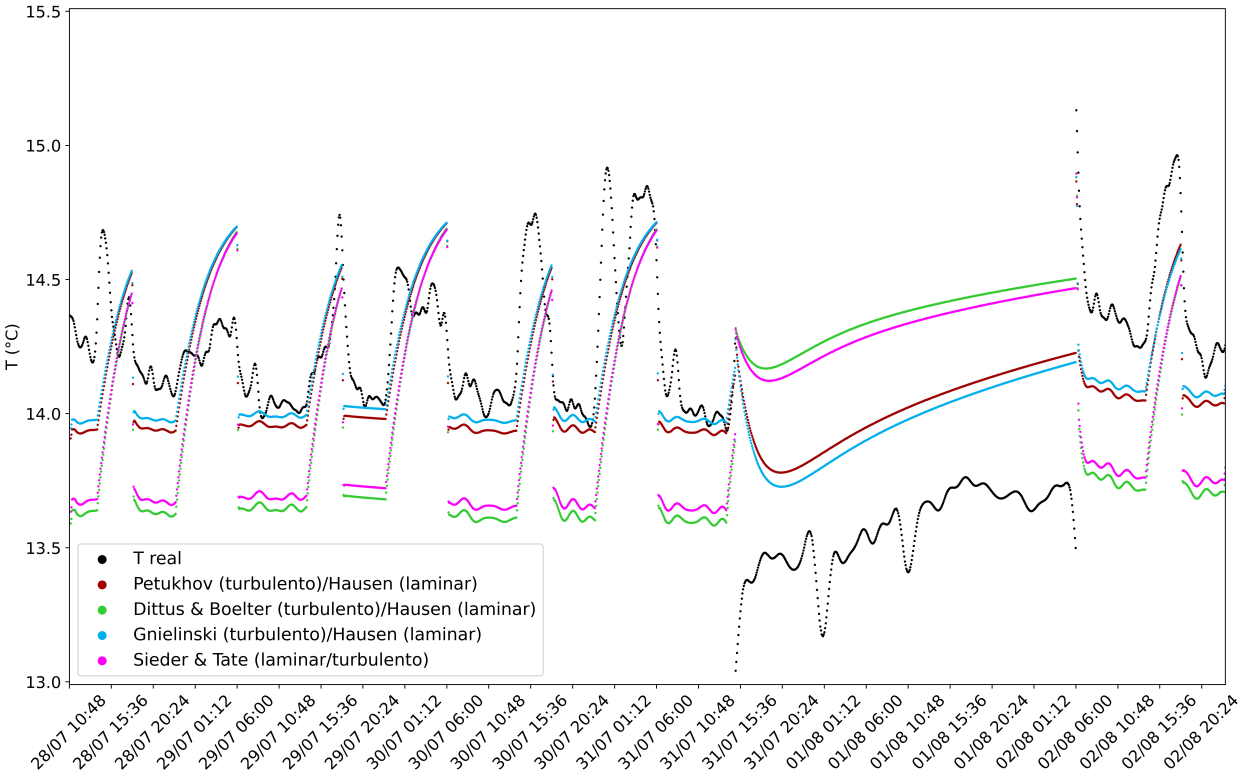


Figura 7.84: Validação do modelo (**Primeira Campanha de Amostragem das Minas da Panasqueira**) - outras estimações do coeficiente de convecção.

dados reais de temperatura, agora incluídos no modelo para aferir a qualidade da estimação de cada ponto.

a) Se o erro for inferior à 1%: considera-se um valor ótimo para a estimação de temperatura;

b) Se o erro for superior à 1%: retorna-se as variáveis para seu valor no início do intervalo de tempo, incrementa-se ou decrementa-se o valor numérico do coeficiente de convecção a depender se o erro é de sobrestimação ou subestimação, e recalcula-se a temperatura. Ao final do passo de tempo recalculado, testa-se novamente o erro relativo de estimação, e se necessário, repete-se o processo.

2. Se for excedido um número máximo de tentativas ou um valor máximo/mínimo para o coeficiente de convecção, e ainda assim não for possível estimar temperatura com erro inferior à 1%, interrompe-se a tentativa de otimização e considera-se que este ponto não pode ser otimizado apenas por uma melhoria no valor do coeficiente de convecção.

3. Se for possível otimizar o valor de temperatura calculado para o ponto, armazenam-se os valores numéricos do coeficiente de convecção válidos para cada troço da galeria, e também os respetivos Números de Reynolds.

Foram excluídos desta tentativa de otimização os pontos de temperatura em períodos com ventilação desligada, pois suas otimizações possivelmente enviesariam o cálculo de um **Nu** experimental, isto porque os erros cometidos nestes intervalos tem pouco a ver com a convecção, e mais relação com a suposição de condições de caudal que não são de facto conhecidas.

Com esta etapa realizada, desenha-se o gráfico da série de temperaturas reais versus pontos que foram otimizados através do algoritmo, como é mostrado na Figura 7.86. Percebe-se que apenas uma parte dos pontos pôde ser otimizada, o que é um forte indicativo de que, para boa parte da série de dados, o problema do modelo não é propriamente a aproximação do cálculo de convecção.

Para os pontos de temperatura estimados e otimizados através do modelo mostrados em 7.86, há valores do Número de Nusselt ótimo para cada um dos quatro troços de galeria. Estes valores compõem uma tabela junto com os respetivos números de Reynolds e de Prandtl (que na realidade não se altera, já que se considera

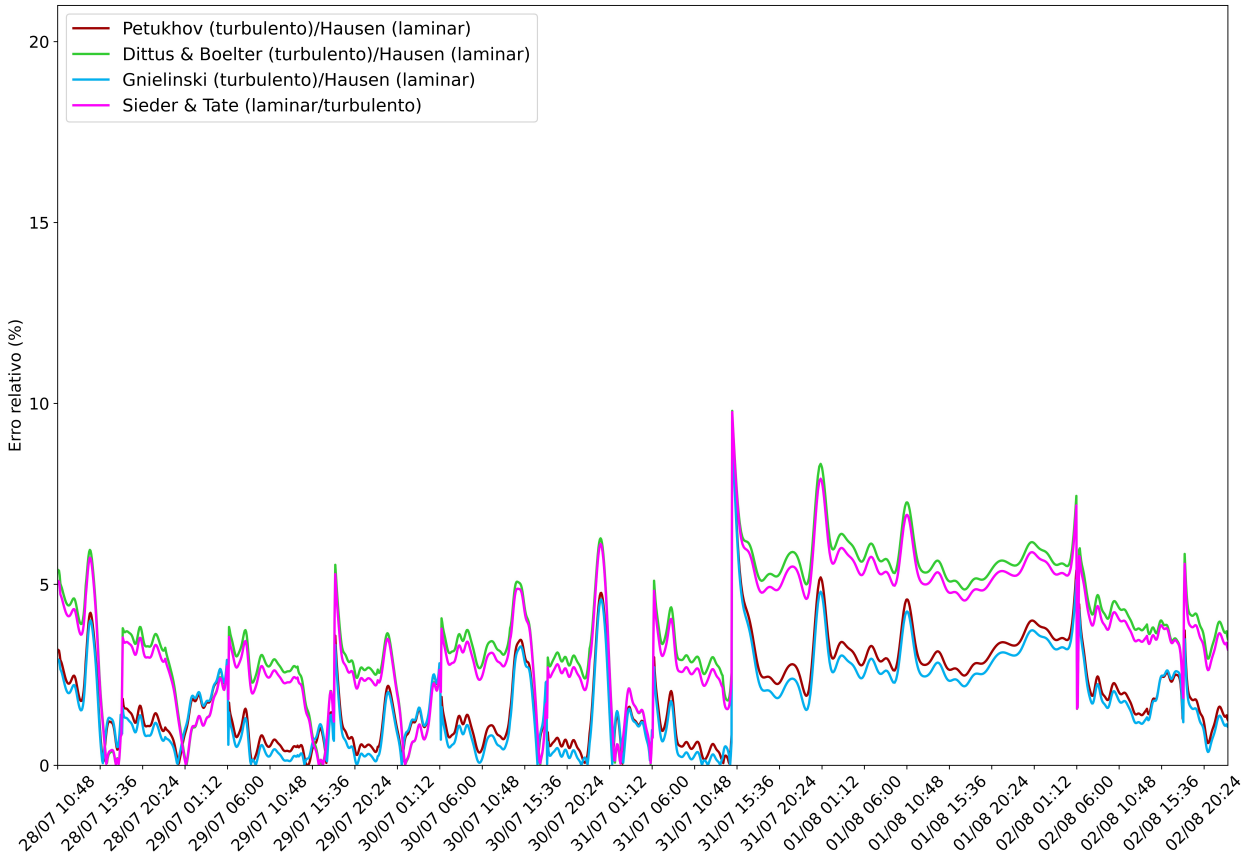


Figura 7.85: Validação do modelo (**Primeira campanha das Minas da Panasqueira**) - Erro relativo para outras estimações do coeficiente de convecção.

que a variação da temperatura do ar, neste caso, causa variação desprezível de suas propriedades reológicas), que é utilizada em um novo algoritmo de regressão multidimensional.

Este algoritmo impõe uma função de forma $Nu = 0.027\,Re^{m}Pr^{0.4}$ ao conjunto de dados resultantes da otimização, e com isto deseja-se modelar um valor experimental para o expoente **m** da equação. A função é, essencialmente, uma modificação da **Equação de Dittus & Boelter**, que permite uma adaptação do expoente do Número de Reynolds para acomodar características singulares da geometria do local de testes, como a rugosidade, implicitamente embutida ao valor de **m** nesta regressão. O trecho de código a seguir mostra o algoritmo de regressão desenvolvido para a estimação de **m**.

Listagem (7.2) de Regressão.py

```
import xlrd
import numpy as np
import scipy.optimize as optimize

# pré-inicialização de vairiáveis
arqraw = [[10, 20, 30], [10, 20, 30], [10, 20, 30]]
dados = np.array(arqraw)

# importo os dados como matrizes e vetores
book = xlrd.open_workbook("xxxxx.xls")
sheet = book.sheet_by_name("yyyyy")
arqraw = [
    [sheet.cell_value(r, c) for c in range(sheet.ncols)] for r in range(sheet.nrows)
]
dados = np.array(arqraw)
```

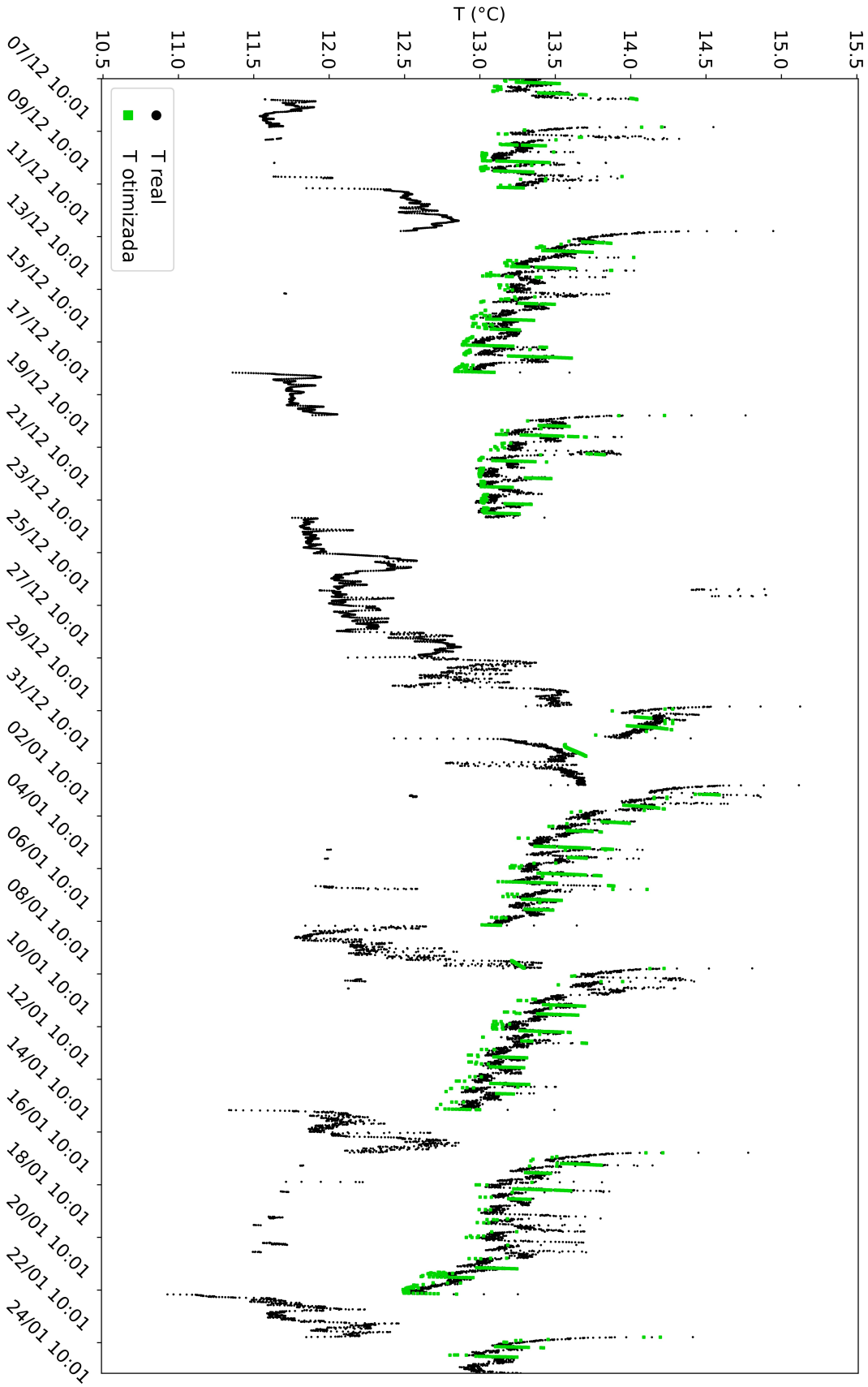


Figura 7.86: Pontos de temperatura otimizados através do algoritmo de otimização do modelo

Listagem (7.2) de Regressão.py (cont.)

```
16
17 Nu_val = np.ones((100))
18 Nu_val = dados[:, 0]
19 Re_val = np.ones((100))
20 Re_val = dados[:, 1]
21 Pr_val = np.ones((100))
22 Pr_val = dados[:, 2]
23
24 # matriz única com Nu, Re, e Pr
25 NuRePr_val = np.ones((len(Nu_val), 3))
26 NuRePr_val[:, 0] = Nu_val
27 NuRePr_val[:, 1] = Re_val
28 NuRePr_val[:, 2] = Pr_val
29
30
31 # função que impõe o formato desejado pro ajuste
32 def func(xym_val, m):
33     return (NuRePr_val[:, 1] ** m) * (NuRePr_val[:, 2] ** 0.4) * 0.027
34
35
36 # palpite inicial para o expoente m
37 guess = 0.8
38
39 # algoritmo de ajuste da curva
40 params, pcov = optimize.curve_fit(func, NuRePr_val[:, 1:], NuRePr_val[:, 0], guess)
41
42 # imprimo o valor de m
43 print(params)
```

Com o valor de **m** calculado, utiliza-se a equação experimental do Número de Nusselt, obtida em função da estimação otimizada da temperatura pelo **modelo**, em uma nova validação da **Segunda Campanha de Amostragem das Minas da Panasqueira**, agora calculando convecção através da equação experimental para todos os pontos de temperatura da série de dados. O resultado da validação com convecção calculada através do Número de Nusselt experimental, e a respetiva equação experimental obtida através da otimização e regressão, são mostrados na Figura 7.87.

Considerando a equação experimental do Número de Nusselt, e comparando-a à equação de **Dittus & Boelter**, percebe-se que o aumento do expoente de Número de Reynolds provavelmente se deve à incorporação, através dos dados experimentais, da rugosidade média da galeria.

Em relação à **Validação Fenomenológica**, o modelo continua a representar adequadamente as tendências de comportamento dos dados reais de temperatura. Do ponto de vista da **Validação Numérica**, a Figura 7.88 traz uma comparação entre os erros relativos cometidos na validação com cálculo de convecção a partir da **Equação de Petukhov**, e os erros relativos cometidos na validação com cálculo de convecção a partir da **Equação Experimental**: são muito próximos, com leve redução do erro para a validação utilizando a **Equação Experimental**.

O que se conclui é que o cálculo da convecção não é, isoladamente, a maior fonte de erros do **modelo**, pois a otimização não resultou em uma relação experimental para o Número de Nusselt que minimizasse de forma realmente significativa os erros de estimação do modelo para todo o domínio do tempo, embora tenha apresentado alguma melhoria.

7.8 Modelação numérica - Caves da Murganheira

A aplicação do **modelo** às galerias das **Caves da Murganheira** requer adaptações geométricas e uma redefinição dos limites dos diferentes domínios do problema, onde ocorrem diferentes mecanismos de troca de calor.

Para as **Caves da Murganheira**, há movimentação natural do ar a velocidades muito baixas no interior

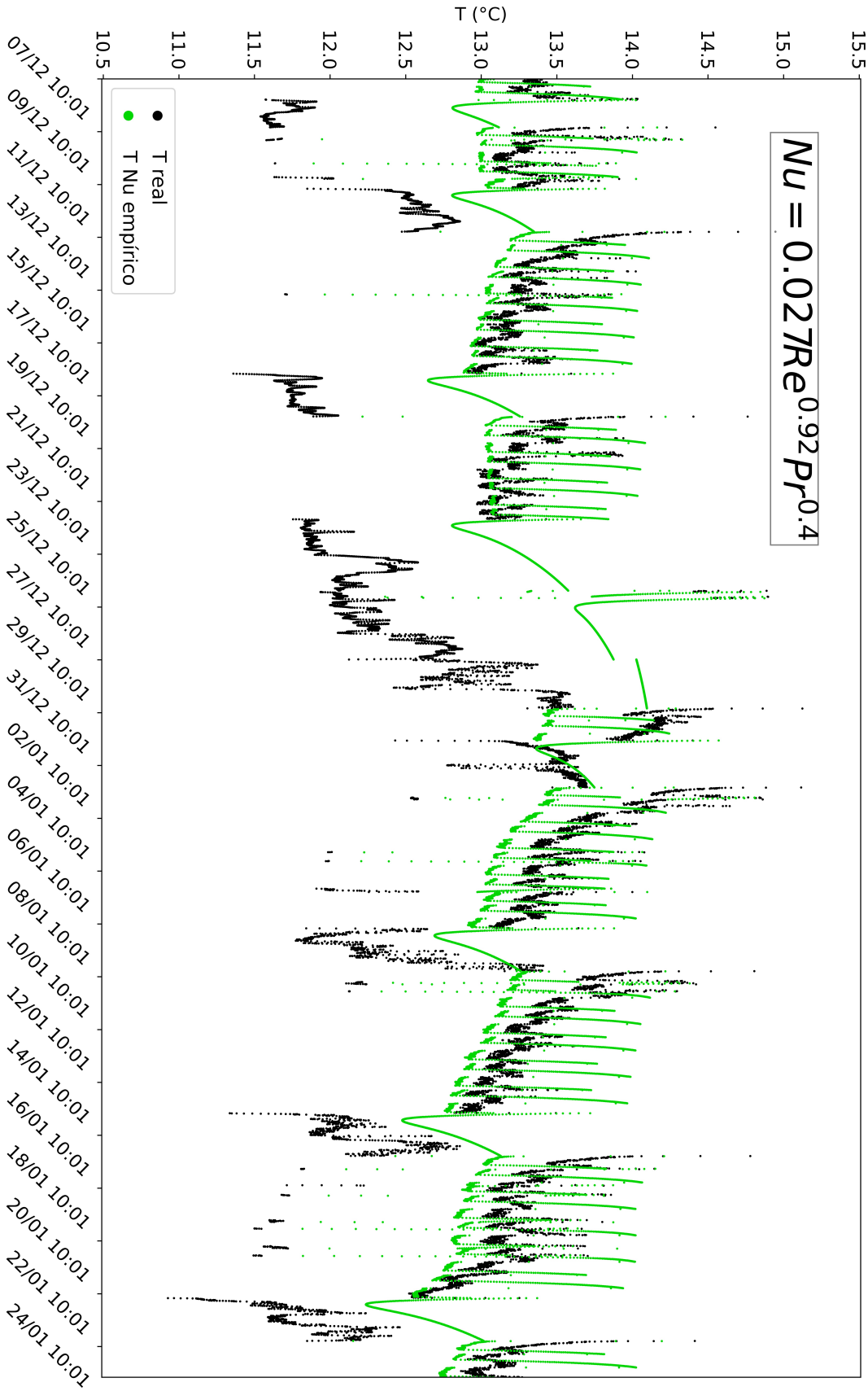


Figura 7.87: Validação do modelo através da equação experimental de **Nu** obtida por um algoritmo de regressão.

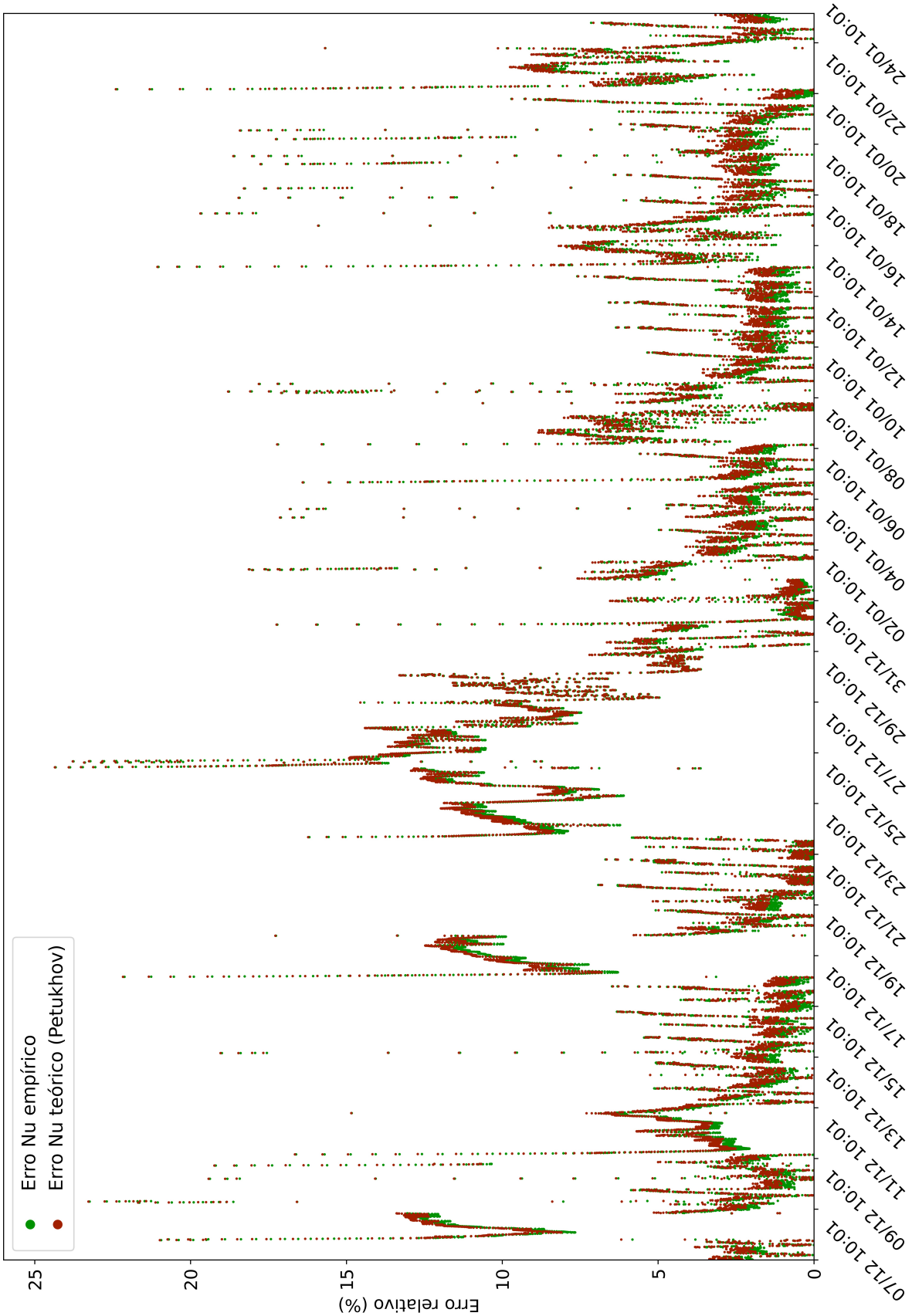


Figura 7.88: Comparação entre erros de estimação a partir do cálculo de **Nu** teórico (Petukhov) e do **Nu** experimental (otimizado).

da galeria, a ponto de serem indetetáveis por estações meteorológicas[7]. Há também considerável influência da temperatura do ar externo e de uma inércia térmica variável da cobertura rochosa ao longo da galeria, como se demonstrou em estudos prévios.

O ponto de vista da modelação numérica neste cenário é distinto do que originalmente foi concebido para o **modelo** e que se aproxima mais da situação das **Minas da Panasqueira**: galeria subterrânea com significativo fluxo de ar, isolada da superfície, com escoamento plenamente desenvolvido, e com extensão suficiente para que haja acréscimo ou decréscimo de temperatura do ar em função de trocas de calor com a rocha.

Esta aplicação da modelação numérica é oportuna pois se afasta do escopo original do **modelo** e coloca à prova sua versatilidade e adaptabilidade. O fenómeno predominante neste caso é a condução de calor através do maciço rochoso, que está limitado por três domínios: ar interior à galeria, ar exterior sobre às vinhas, e ar no interior da adega. De modo geral, o que realmente está sendo modelado para as galerias das **Caves da Murganheira** é a inércia térmica da rocha e sua capacidade sazonal de "armazenagem" e "libertação" de calor. Pretende-se verificar se o **modelo** também é aplicável a este tipo de estrutura subterrânea.

7.8.1 Validação propriamente dita do modelo - Caves da Murganheira

Nesta etapa da validação, foram utilizados os dados provenientes da **Segunda Campanha de Amostragem das Caves da Murganheira**, recolhidos no Troço 1 da galeria. Aqui, há pouco interesse em modelar variações diárias ou semanais de temperatura, prevalecendo o interesse em seu comportamento "macro" e sazonal: como se convencionou chamar na validação das **Minas da Panasqueira**, o que é de interesse maior para as **Caves da Murganheira** é a **Validação Fenomenológica**, em detrimento da **Validação Gráfica**, pois, para esta aplicação prática, a precisão do modelo é menos importante do que sua capacidade de reproduzir uma tendência geral de comportamento de temperatura.

Já se notou que a caracterização incompleta do ambiente é prejudicial ao **modelo** em termos de sua capacidade de reprodução da realidade. Para as **Caves da Murganheira**, foi feito um levantamento cuidadoso de suas características geométricas e, principalmente, do perfil topográfico sobre os troços de galeria. As propriedades termofísicas da rocha foram retiradas de uma publicação sobre a caracterização térmica de uma amostra de rocha proveniente da mesma unidade geológica.

Há, entretanto, duas dificuldades maiores para esta modelação, sendo elas:

1. Caracterização da velocidade - será assumido um caudal constante ao longo do Troço 1, com velocidade de escoamento baixa (suficiente para representar um escoamento laminar de ar) e os efeitos das trocas de calor por convecção serão equiparados às trocas de calor por condução, com $\mathbf{Nu} = 1$. Isto porque além da velocidade do ar ser de facto baixa, grande parte da galeria é preenchida por fileiras extensas de garrafas que bloqueiam o contacto direto do ar com a rocha, e que se limita praticamente às porções mais altas da parede e ao teto.

2. Simetria em relação ao centro da galeria - o modelo é construído supondo que o envoltório rochoso da galeria é como um cilindro concêntrico, e assim pode-se assumir o gradiente de temperatura na direção radial como constante e trabalhar apenas com uma "fatia" da galeria, no plano definido por $\vec{r}$ e $\vec{z}$, efetuando-se os cálculos somente para a metade superior (em relação a $\vec{r}$) da galeria, à partir de seu centro (fronteira isotérmica). Isto não é particularmente preocupante quando a galeria é bem isolada da superfície, ou seja, quando a espessura da rocha é "infinita" tanto do teto para cima quanto do chão para baixo; porém, na situação das **Caves da Murganheira**, a espessura da rocha é variável e bastante limitada em algumas regiões. É óbvio que se a Figura 7.90 for espelhada em relação ao eixo $\vec{z}$, não há um perfil topográfico simétrico abaixo do piso da galeria; aqui, a simetria do modelo torna-se um importante fator limitante, mas há ainda um ponto de vista que o torna aplicável:

    a) Troço 1 - pontos **1** a **5** (fotografia à esquerda na Figura 7.89): primeiros 10 ou 15 m de galeria, com geometria mais simétrica da galeria. Há menor espessura de rocha, o que aumenta o erro em se assumir que o envoltório rochoso é concêntrico e simétrico, mas há também uma maior influência do ar da adega (retângulo à esquerda na Figura 7.90) do que do ar externo sobre a vinha. Pode-se considerar, sem grandes prejuízos, que a adega impõe um condicionamento simétrico para as porções superior (acima do teto) e inferior (abaixo do piso) da rocha.

[7] Foi utilizada uma estação meteorológica Vaisalla WTX520, que mede velocidade do ar à partir de $0.1\,\mathrm{m\,s^{-1}}$, e o movimento do ar no interior da galeria não foi detetado.

b) Troço 1 - pontos **6** a **12** (fotografia à direita na Figura 7.89): maior inércia térmica nas regiões de maior espessura de rocha, de modo que quanto maior a espessura da rocha, menores os erros em se assumir uma simetria do envoltório rochoso, dada a estabilidade de temperaturas promovida pelo maciço.

c) Para toda a extensão do Troço 1: galeria é ocupada por significativa quantidade de garrafas, e a superfície do chão se limita a um pequeno corredor. A influência da temperatura do piso da galeria sobre o ar interior, frente à influência das paredes e teto da galeria, é muito limitada.

Como o diâmetro varia ao longo do Troço 1, foi adotado um valor médio para toda sua extensão, levando em consideração o comprimento dos sub-troços da galeria com diferentes áreas de secção. É esperado que os fatores mencionados causem erros no modelo, mas a ideia de realizar uma validação para um ambiente com características tão invulgares, como é o caso das galerias das **Caves da Murganheira**, é justamente a de "esticar o modelo" até o seu limite: como de facto não foi concebido para este tipo de ambiente, é interessante perceber como se comporta quando submetido à esta situação.

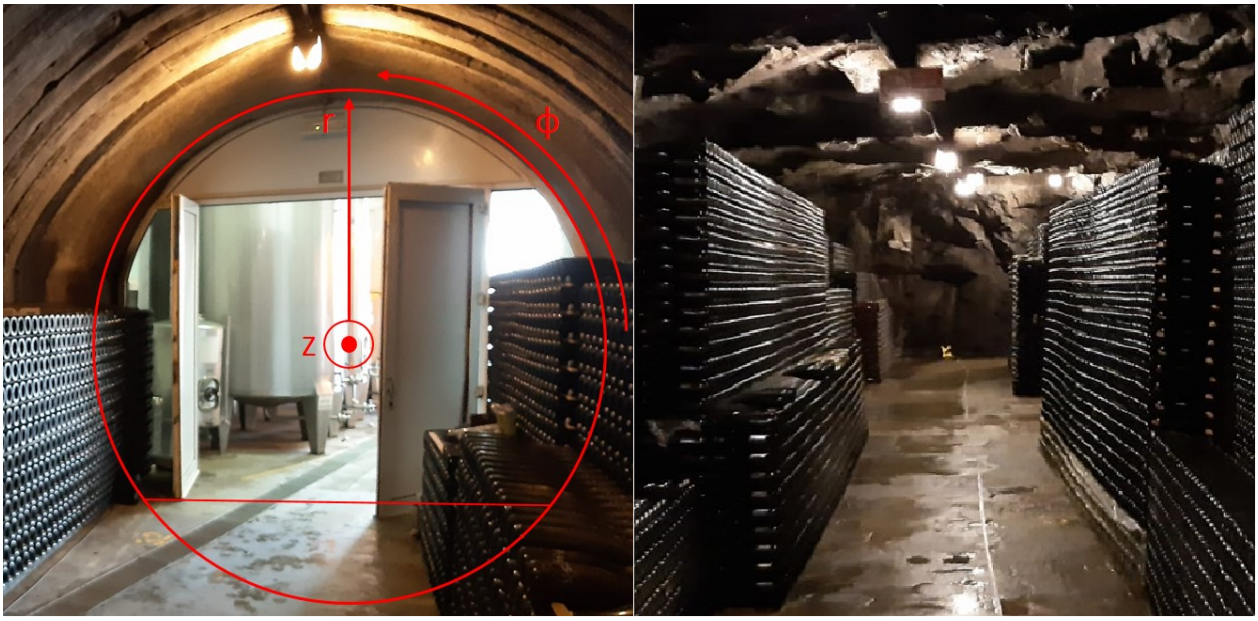


Figura 7.89: Geometria aproximadamente simétrica entre os pontos **1** e **5**, com menor espessura de rocha e maior influência da temperatura da adega, e geometria pouco simétrica, mas com maior inércia térmica, entre os pontos **6** e **12**.

Para esta simulação, foram considerados como parâmetros de entrada as temperaturas **n11** (temperatura do ar na adega), **n1** (temperatura do ar interior à galeria e próximo ao acesso **A1**), e a temperatura do ar atmosférico exterior, obtido através de estações meteorológicas próximas às **Caves da Murganheira**. As temperaturas de saída do modelo são as da superfície da galeria e do ar no ponto de instalação da unidade **n9/10**, comparáveis a estas séries de dados reais.

A animação anexa à Figura 7.90 mostra a evolução do estado de temperatura ao longo do tempo no interior da galeria, no maciço rochoso, e no interior da adega, bem como as interações e trocas de calor entre estes domínios. Destaca-se mais uma vez a importância deste recurso visual para a compreensão dos fenómenos termodinâmicos que ocorrem em cada parte envolvida no problema sob a ótica do modelo.

Pela Figura 7.90, percebe-se que de facto o calor acumulado na rocha ao longo do verão é transmitido para o interior da galeria durante o inverno. A inércia térmica da rocha causa este atraso na condução e transmissão de calor, o que provoca a exposição do ar interior à galeria a temperaturas de rocha mais amenas durante as estações mais frias. A evolução do estado de temperatura através do **modelo** é uma ferramenta analítica importante para analisar o comportamento do sistema, se comprovado que reproduz com certa fidelidade a distribuição de temperaturas no interior da galeria: se há reprodução adequada das variações sazonais de temperatura no interior da galeria, somente a partir das temperaturas de entrada inseridas no modelo e das características geométricas, é provável que o modelo também seja um bom estimador da distribuição de temperaturas em diferentes regiões do sistema.

A **Validação Fenomenológica** para as **Caves da Murganheira** pode ser vista nas Figuras 7.91 e 7.92. A temperatura de saída estimada pelo modelo para **n9** é a temperatura média do ar neste ponto, e a temperatura estimada pelo modelo para **n10** é uma média entre a temperatura da superfície da rocha e temperatura do ar; isto foi feito porque a sonda de temperatura não ficou no interior da parede de rocha neste ponto[8], e sim encostada sobre sua superfície, de modo que também estava sujeita à temperatura do ar da galeria. Observa-se, para a **Validação Fenomenológica**:

Série n9 (Figura 7.91) - o modelo não incorporou as variações de temperatura diárias ou semanais, de modo que os picos vistos na série de temperatura real de **n9**, em especial até o mês de novembro, não encontram correspondência na série de temperatura estimada pelo modelo. Durante o inverno, por outro lado, o modelo tende a superestimar a amplitude das variações diárias ou semanais de temperatura do ar. Quanto ao comportamento sazonal, ou seja, em relação à tendência geral de comportamento observada pela forma das séries de temperatura, o modelo simula uma distribuição de temperaturas bastante próxima à temperatura real; o comportamento das duas séries é praticamente idêntico, e conclui-se que o modelo se adapta bem à estimação de temperaturas a longo prazo, sendo capaz de simular com grande detalhe o comportamento termodinâmico do sistema do ponto de vista "macro".

Série n10 (Figura 7.92) - o modelo subestimou as variações de temperatura sazonais da superfície da rocha. Duas hipóteses são possíveis: o modelo subestimou a condução de calor ao longo da camada de rocha, ou o sensor de temperatura foi mais impactado pela temperatura do ar, cuja variação exerceu maior influência sobre as leituras de temperatura. A segunda hipótese é improvável, pois fosse este o caso, haveria picos de temperatura de maior amplitude em horizontes diários ou semanais (como ocorre para **n9**); a variação não incorporada pelo modelo é a amplitude de temperaturas em um período semestral, o que indica que o modelo pode mesmo ter subestimado a condução de calor no maciço. A posição relativa entre as séries dá indícios de que o modelo trabalhou com uma inércia térmica maior do que a que de facto existe, já que subestima a temperatura de rocha no verão e a sobrestima no inverno, ou seja, aumenta o "atraso" com o qual o calor é transmitido da superfície da vinha para o interior da galeria. Não obstante, a tendência geral de comportamento é preservada, e o modelo simula condições próximas às reais para a temperatura superficial da rocha, divergindo dos valores esperados em não mais do que 0.5 °C.

Quanto à **Validação Numérica**, os erros relativos de estimação cometidos para cada série de dados podem ser vistos nas Figuras 7.93 e 7.94, e são realmente maiores para a série de dados **n10**. Além de o **modelo** ter cometido erros maiores para a estimação de temperatura da rocha, estes erros também são mais regulares: a Figura 7.94 mostra certa constância nos erros relativos, o que indica um desvio sistemático do modelo, e possivelmente confirma a impressão inicial de que há uma sobrestimação da inércia térmica da rocha. Os erros de estimação para o ar, vistos em 7.93 são mais irregulares, e provavelmente estão associados à oscilações diárias de maior amplitude para a temperatura do ar de entrada (**n1**).

7.9 Validação numérica - tratamento estatístico dos resultados do modelo

A validação do modelo através de gráficos, que se tratou por **Validação Fenomenológica** e **Validação Gráfica**, cumpre um papel importante, porém incompleto, na análise de desempenho do modelo. Isto porque tem carácter quase exclusivamente qualitativo, e permite visualizações sob diferentes óticas das **séries completas** de temperatura em termos dos **valores reais observados**, **valores de entrada ou *input***, e **valores estimados**, o que não seria possível do ponto de vista quantitativo dado o elevado número de pontos de temperatura de cada série.

É difícil caracterizar os resultados do modelo através de um valor numérico representativo de toda a série de dados, do mesmo modo que é insuficiente fazê-lo através de recursos visuais e gráficos. Os pontos de vista **fenomenológico**, **gráfico**, e **numérico** são complementares e possibilitam uma análise mais abrangente dos resultados do **modelo**.

Nesta secção é feita a **Validação Numérica** para os resultados do **modelo** quando submetido a cada uma das três séries de dados para as quais foram feitas as validações, visando **quantificar** seu desempenho.

[8] Fruto da inexperiência na recolha deste tipo de dados, mas também da restrição de posicionamento da sonda na galeria. Não havia, para este ponto, fratura ou furo na rocha que a permitisse introduzir e isolar do ar da galeria

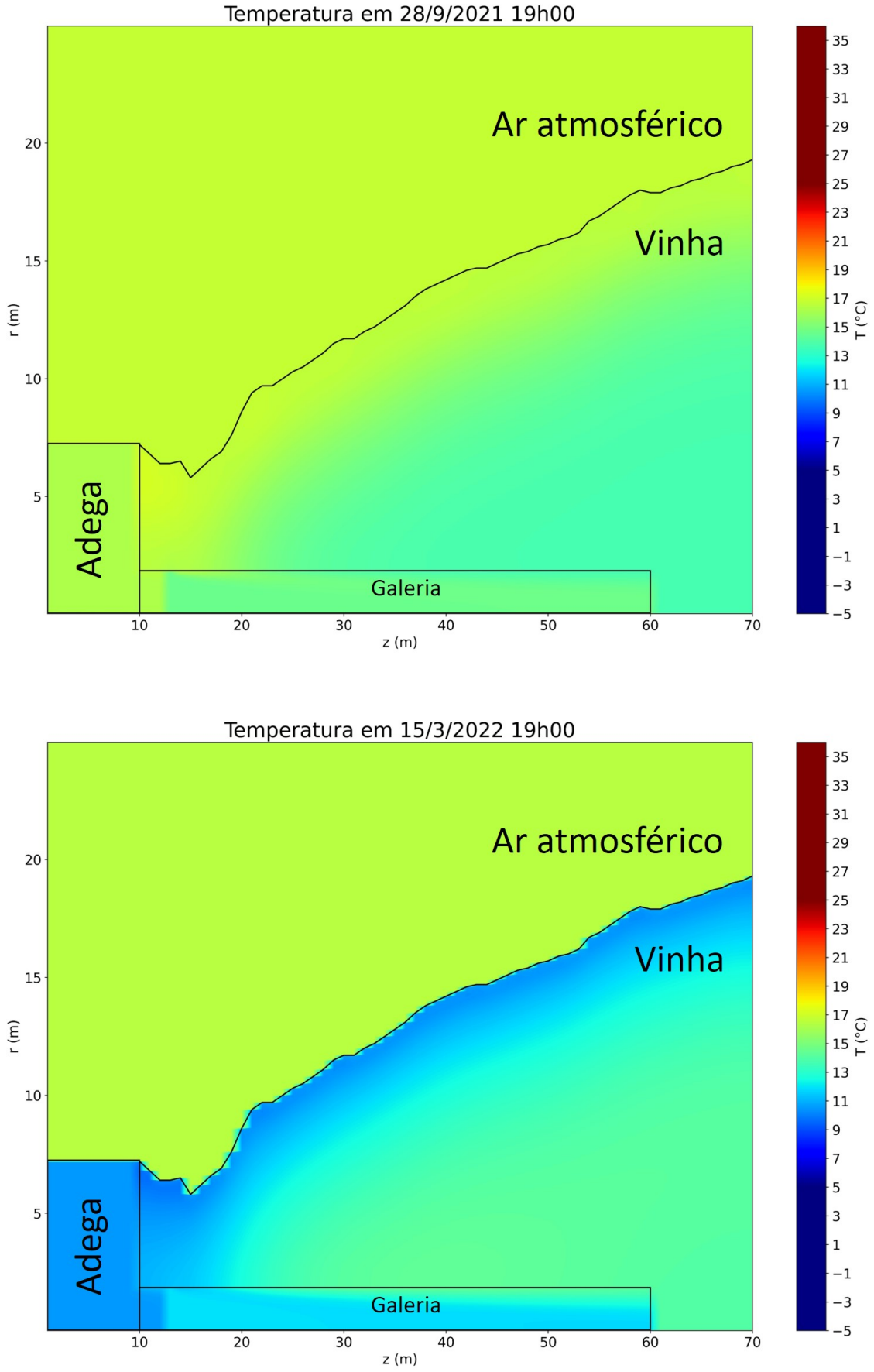


Figura 7.90: Evolução de temperatura no sistema das galeria das **Caves da Murganheira**.

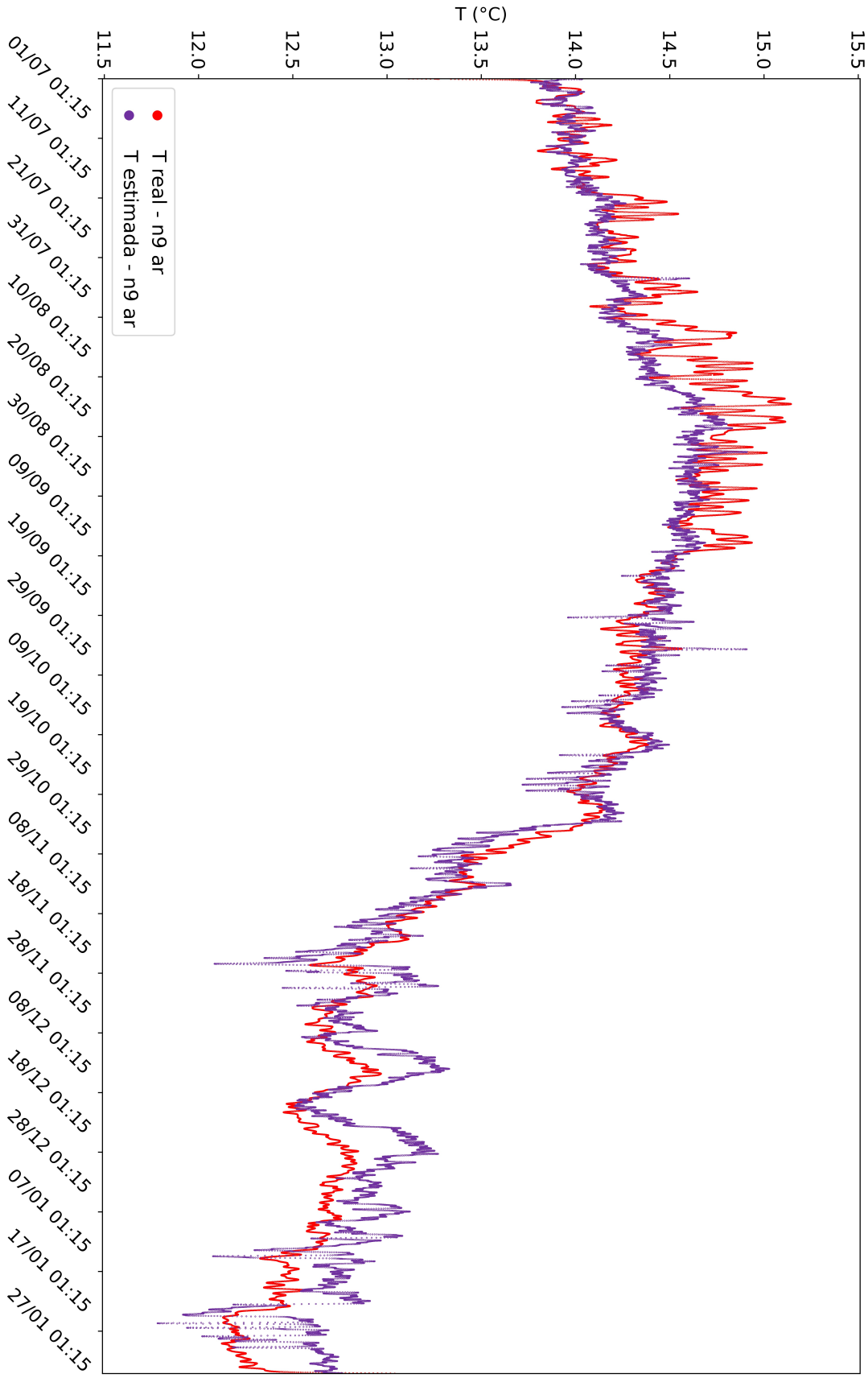


Figura 7.91: Validação do modelo para a **Segunda Campanha de Amostragem das Caves da Murganheira** - ar próximo ao ponto **12/n9**.

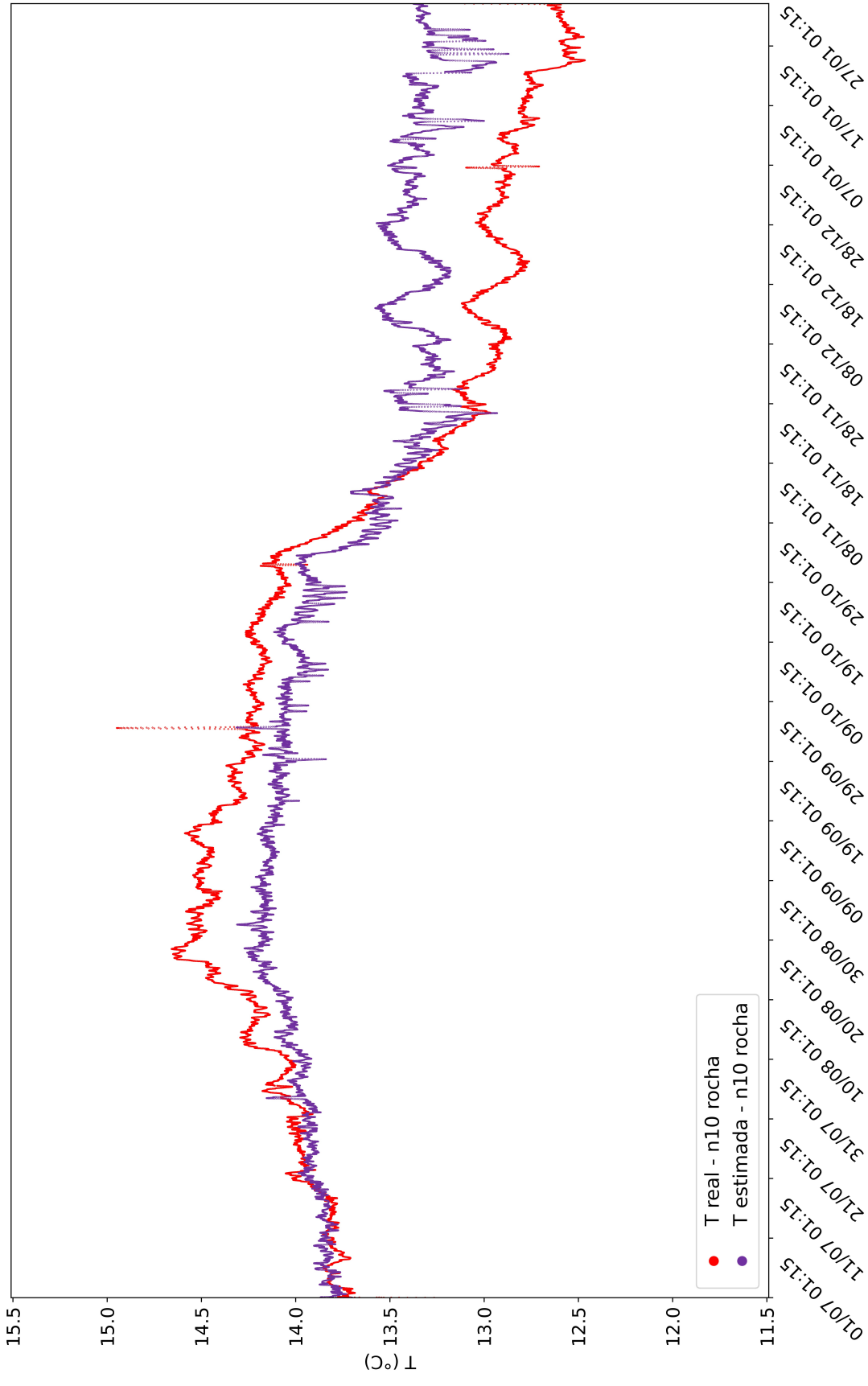


Figura 7.92: Validação do modelo para a **Segunda Campanha de Amostragem das Caves da Murganheira** - superfície de rocha no ponto **12/n10**

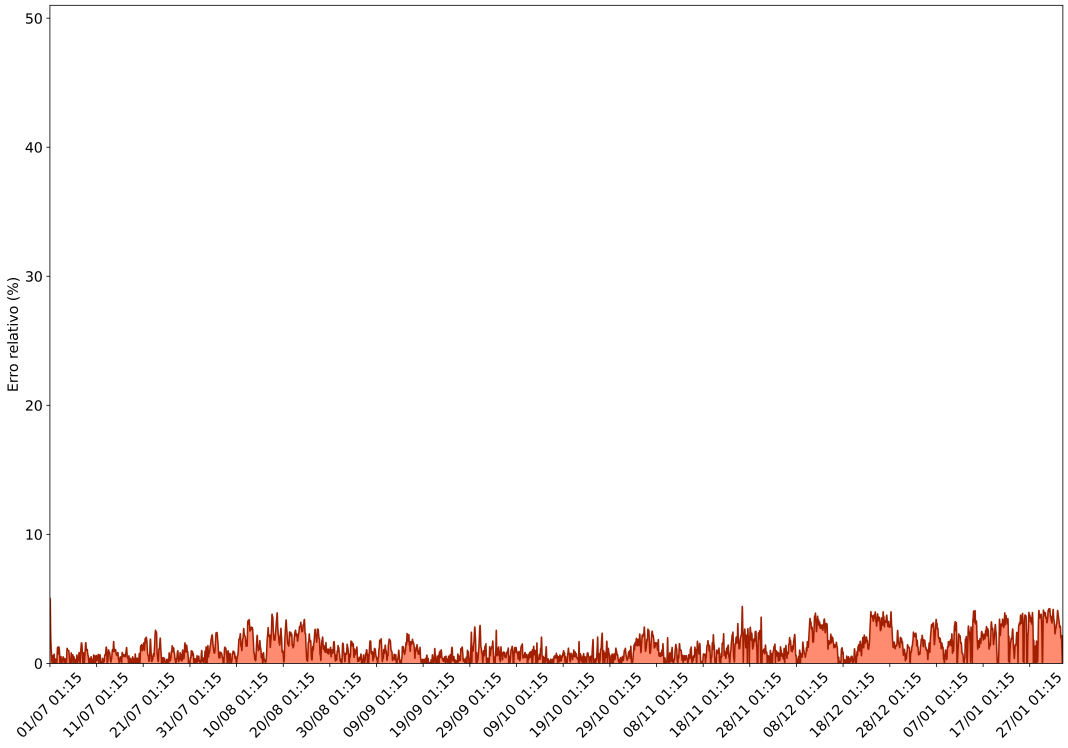


Figura 7.93: Erro relativo de estimação para a temperatura do ar próximo ao ponto **12/n9**

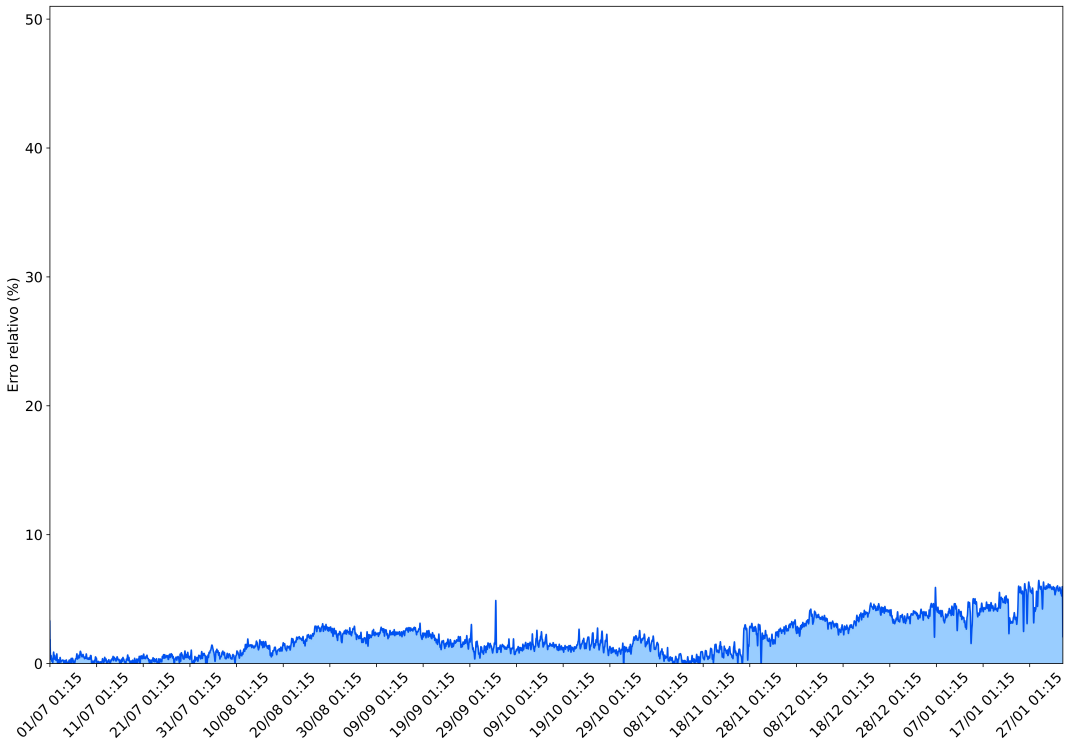


Figura 7.94: Erro relativo de estimação para a temperatura da superfície de rocha próximo ao ponto **12/n10**

7.9.1 Métodos e métricas de análise

Até o presente momento, o aspeto numérico da validação de modelos de estimação de variação de temperatura em galerias subterrâneas é subdesenvolvido e pouco abordado na literatura. A maior parte dos modelos publicados caracteriza erros através das metodologias estatísticas mais elementares, o que é, por si só, pouco significativo ou representativo do comportamento e eficiência de um modelo. Com isto, perde-se a oportunidade de avaliar quais são as abordagens teóricas de modelação pouco adequadas à prática, o que dificulta o avanço da modelação nesta área.

Em outras áreas das ciências do ambiente, por outro lado, há abundância de publicações que se destinam a definir as métricas ideais para avaliar o desempenho de modelos, mais completas do que os métodos estatísticos convencionais. Em particular, na **modelação hidrológica**, a definição de critérios unificados que permitam comparar diferentes modelos é de grande interesse e está presente em inúmeras publicações. A questão de **como quantificar modelos** acaba por ser tão frequente em publicações de hidrologia quanto a própria **quantificação e validação de modelos em si**; é curioso observar como alguns artigos, como o publicado por Legates e Mccabe (2013), têm por finalidade exclusiva debater critérios de desempenho e dialogar com publicações de outros autores.

O carácter temporal das séries de dados presente na modelação hidrológica, e a definição de critérios unificados ao longo de décadas, motivaram a tentativa de aplicar e adaptar algumas destas métricas à **Validação Numérica** do **modelo** desenvolvido neste projeto de investigação, às quais somam-se também as metodologias estatísticas mais comuns.

Medidas estatísticas convencionais

Os métodos mais comuns para avaliar o desempenho de modelos envolvem quantificar os **erros** ou **desvios** de estimação. Algumas destas metodologias aplicáveis à **Validação Numérica** do **modelo** são:

- **Erro Absoluto Médio (Mean Absolute Error)** - frequentemente utilizado para séries temporais, mede o erro de estimação para todos os valores da série a partir da média dos erros absolutos de estimação cometidos para cada ponto da série:

$$\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|E_i - O_i| \tag{7.2}$$

  Em que E_i é o valor estimado pelo modelo para o instante i, O_i o valor observado neste instante, e n é o número total de observações. Para o **modelo**, mede um erro médio de estimação em °C.

- **Erro Relativo Médio (Mean Relative Absolute Error)** - quantifica a média dos erros de estimação ponto-a-ponto relativamente ao valor observado em cada ponto. Para o **modelo**, expressa um percentagem de desvio médio do valor estimado de temperatura em relação ao valor correto da temperatura de saída.

$$\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{|E_i - O_i|}{O_i} \tag{7.3}$$

- **Soma dos Quadrados dos Erros (Sum of Squared Estimate of Errors)** - mede a discrepância entre os dados reais e os valores estimados pelo **modelo**. Menores valores de SSE indicariam um melhor ajuste do modelo, mas seu valor absoluto está condicionado ao número de pontos da série de dados, ou seja, é uma medida não-normalizada que não permite comparação direta entre conjuntos de dados em escalas diferentes.

$$\sum_{i=1}^{n}(E_i - O_i)^2 \tag{7.4}$$

- **Erro Quadrático Médio (Mean Squared Error)** - é a média do SSE, distribuindo-se o quadrado das diferenças por todos os pontos da série, e corresponde ao valor esperado para o quadrado do desvio entre valor real e estimado para cada ponto. Quantifica a variância do estimador e o enviesamento da estimação, agregando os erros cometidos para cada ponto em um único fator da capacidade de estimação do modelo. Se difere do erro médio absoluto pois atribui peso maior aos maiores erros de estimação, o que o faz ser mais sensível a *outliers*.

$$\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(E_i - O_i)^2 \tag{7.5}$$

- **Raiz do Erro Quadrático Médio (Root Mean Squared Error)** - é calculada sobre o MSE, fazendo com que para o **modelo**, o erro passe a ser novamente medido em °C, mas mantém a sensibilidade da MSE aos *outliers*.

$$\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(E_i - O_i)^2} \tag{7.6}$$

Coeficiente de Eficiência (Coefficient of Efficiency)

O **Coeficiente de Eficiência (CEF)** é uma métrica de performance de modelos matemáticos **amplamente utilizada em hidrologia**, mas **pouco conhecida por investigadores de outras áreas das ciências do ambiente** (Schaefli e Hoshin V. Gupta, 2007). De facto, uma das deficiências mais evidentes identificadas ao longo deste projeto de investigação, em relação às publicações científicas de modelos de trocas de calor em ambientes subterrâneos, é a ausência de uma métrica unificada ou padronizada que permita quantificar o desempenho de um determinado modelo. Na verdade, muito raramente são utilizadas mesmo as metodologias estatísticas mais elementares para discutir a aplicação de modelos a situações reais. A conclusão que se chegou na revisão do estado-da-arte, quando iniciou-se a conceção deste **modelo**, é de que todo o processo de validação, desde a metodologia de recolha de dados experimentais, é frágil e questionável na maior parte dos modelos publicados de estimação de temperatura ou troca de calor em galerias subterrâneas.

Este facto prejudica o desenvolvimento de novos modelos, pois não permite que se saiba quais abordagens teóricas realmente são úteis em situações práticas. Para sanar este problema, algumas metodologias analíticas de modelação hidrológica serão aplicadas e adaptadas para a situação à qual se destina o **modelo** proposto: o de estimar o acréscimo ou decréscimo de temperatura de um fluido que escoa no interior de uma galeria ao longo de seu percurso, e de inferir um estado ou distribuição de temperaturas no interior deste ambiente em função da posição de um ponto.

O **CEF** escrito na forma genérica da Equação 7.7 por Legates e McCabe (1999), é um parâmetro normalizado que permite comparar os desvios de estimação (numerador) com um *benchmark* ou **base de comparação** (denominador), no caso, a média dos valores observados.

$$CEF_j = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}|E_i - O_i|^j}{\sum_{i=1}^{n}|O_i - \bar{O}|^j} \tag{7.7}$$

Nesta equação, E_i é o valor estimado pelo modelo para o instante i, O_i o valor observado no instante i, e $\bar{O}$ o valor médio observado para todo o intervalo. O expoente j pode assumir o valor de **2**, sendo chamado de **Fator de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE)**, ou **1**, sendo chamado de **Fator de Eficiência de Legates-McCabe (LME)**. A principal diferença entre **NSE** e **LME**, é de que ao usar o valor absoluto da diferença ao invés do quadrado da diferença, o **Fator de Eficiência de Legates-McCabe (LME)** reduz o peso de *outliers* (Legates e Mccabe, 2013).

Ao calcular o valor relativo entre os desvios de estimação e o desvio entre valor observado e média das observações, estes coeficientes de eficiência permitem concluir **se o modelo é um melhor estimador da variável modelada do que a própria média dos valores observados para este parâmetro**. A aplicação da Equação 7.7 ao **modelo** proposto permitiria avaliar seu desempenho em função do valor obtido, sendo que:

- Se **NSE**/**LME** > 0, é melhor utilizar o modelo como estimador de temperatura do que o valor médio de temperatura durante o período de observação.
- Se **NSE**/**LME** $= 0$, o modelo não tem maior habilidade em prever os valores de temperatura observados do que a própria média dos valores, ou seja, não tem vantagem preditiva.
- Se **NSE**/**LME** < 0, o modelo é menos eficaz do que a média para prever variações nos valores observados. Neste intervalo de valores negativos, Legates e Mccabe (2013) destaca que embora esta medida seja vista como um "fator de inutilidade" do modelo, o que realmente aponta é que modelo é mais falho em explicar a variabilidade de valores observados do que sua média.
- O valor máximo possível é **1** e indica um modelo perfeito. Um valor de **NSE** igual a **0.75** implica que o modelo é capaz de explicar três quartos da variância dos valores observados, enquanto um valor de

Medida	Panasqueira 1	Panasqueira 2	Murganheira 2	
			n9 (ar)	n10 (rocha)
Média	14.07	12.99	13.70	13.70
Variância	0.15	0.44	0.74	0.41

Tabela 7.7: Média e variância dos valores observados (temperatura real de saída) para cada série de dados da validação.

LME igual a **0.75** significa que o modelo é capaz de explicar três quartos do valor absoluto da diferença entre observações e valores estimados, ou, em outras palavras, que o valor absoluto da diferença entre valores estimados e observados é apenas um quarto da diferença entre observações e sua média, de modo que **o modelo explica 75% das diferenças absolutas entre a média e o valor observado** (Legates e Mccabe, 2013).

- um valor igual a **0** significa que o modelo não é capaz de explicar variação alguma nos valores observados.

Contudo, apenas o valor numérico destes parâmetros é uma medida insuficiente de desempenho de um modelo, pois o contexto de aplicação e a natureza dos dados observados têm grande impacto sobre os valores calculados para o CEF: no caso de aplicação do **modelo** proposto, a temperatura tem baixíssima variabilidade, especialmente em horizontes de tempo menores e no caso dos dados recolhidos nas **Minas da Panasqueira**. Isto indica que a interpretação dos resultados obtidos para o **CEF** na análise de desempenho do **modelo** têm de ser feita cuidadosamente e caso a caso, mas também quer dizer que **a média dos valores observados** não é o melhor **benchmark** para este conjunto de dados experimentais.

Outros fatores importantes são **o período total de amostragem** e o **o intervalo entre medições**. A **alta repetibilidade dos dados**, o **baixo intervalo de tempo entre medições consecutivas** de temperatura, a **alta inércia térmica** no interior das galerias de teste, e o **curto período de amostragem** (ao menos para a **Panasqueira**), dão a entender que o **modelo** não se portará bem em relação ao **CEF**, o que não significa, de todo, que o modelo é ruim, mas que esta métrica não é totalmente adequada à natureza dos dados.

Em hidrologia, por exemplo, observações consecutivas podem ter intervalos de um dia ou um mês (como indica de Lima Ferreira et al. (2020)), divergindo em grande medida dos intervalos de medições da ordem de segundos adotados para as **Campanhas de amostragem**.

Sendo assim, propõe-se uma adaptação da **base de comparação** utilizada no cálculo do **CEF**: para o **modelo**, tem mais valor medir o "trabalho" realizado pelo modelo em transformar **temperatura de entrada** em temperatura de saída, já que o que faz efetivamente é calcular **acréscimo ou decréscimo de temperatura em função da distância percorrida por um fluido no interior de uma galeria de rocha**.

Coeficiente de Eficiência adaptado

A ideia de utilizar a **temperatura de entrada (input)** do modelo para avaliar seu desempenho em estimar acréscimo ou decréscimo de temperatura foi aplicada na **Validação Gráfica do modelo**, em que se observa, ponto-a-ponto, o quanto o **modelo** "empurra" a temperatura de entrada em direção à temperatura de saída.

Utilizar **temperatura de entrada (Tin)** como base de comparação no cálculo da eficiência do **modelo** permite avaliar, para o conjunto de dados, o mérito da estimação, pois coloca como **benchmark** a **janela de valores possíveis de estimação**, ou a **variação máxima entre temperatura estimada e temperatura de entrada**. Para exemplificar o efeito de utilizar a **temperatura de entrada** como base de comparação, pode-se imaginar duas situações:

1. Em dado instante, a temperatura de entrada era de 13.0 °C e a temperatura de saída era de 13.2 °C. Considera-se que para este ponto, o **modelo** estimou uma temperatura de saída de 13.1 °C. Do ponto de vista do **desvio** ou dos **erros relativo e absoluto**, esta teria sido uma estimação quase perfeita, já que o valor ideal seria apenas 0.1 °C maior do que o valor estimado. Por outro lado, a estimação do **modelo** foi apenas 0.1 °C (ou 50%) melhor do que se aproximássemos a temperatura de saída pela temperatura de entrada, o que quer dizer que a estimação feita pelo **modelo** não tem grande valor prático para este ponto.

2. Em outro instante, a temperatura de entrada era de 13.0 °C e a temperatura de saída era de 14.0 °C. Considera-se que para este ponto, o **modelo** estimou uma temperatura de saída de 13.8 °C. Esta teria sido, do ponto de vista do **desvio** ou dos **erros relativo e absoluto**, uma estimação pior do que a feita na situação 1. Por outro lado, aqui há efetivamente "trabalho" do modelo, já que a temperatura de entrada não era tão próxima à temperatura de saída. Nesta situação, a estimação feita pelo **modelo** foi 0.8 °C (ou 80%) melhor do que teria sido simplesmente utilizar a temperatura de entrada como estimador da temperatura de saída, e fica evidente o mérito da estimação feita para este ponto.

Uma adaptação da Equação 7.7 para incorporar este ponto de vista é expressa por 7.8, utilizando a **temperatura de entrada ponto-a-ponto como base de comparação** no lugar da média dos valores de temperatura observados. Julga-se que este critério é mais coerente com a situação à qual se destina o **modelo** do que a expressão original, pois permite **quantificar a transformação dos dados de entrada** ao serem inseridos no modelo e **medir o trabalho do modelo em estimar acréscimo e decréscimo de temperatura** a partir de um ponto de referência (temperatura de entrada).

$$\overset{*}{CEF}_j = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} |E_i - O_i|^j}{\sum_{i=1}^{n} |O_i - I_i|^j} \tag{7.8}$$

Na Equação 7.8, I_i é o valor da temperatura de entrada no instante i, e os demais parâmetros são os mesmos da Equação 7.7.

Índice de Persistência (Persistence Model Efficiency)

O **Índice de Persistência (PME)**, assim como o Coeficiente de Eficiência, é um indicador normalizado de performance de um modelo em relação a um determinado *benchmark* ou parâmetro de comparação. No caso do **PME**, mede-se a magnitude da variância residual em relação a variância que seria observada se fosse utilizado, como estimador de um ponto no passo de tempo futuro, o valor observado no passo de tempo anterior (Hoshin Vijai Gupta et al., 1999). Em outras palavras, é uma medida relativa do quão melhor é utilizar o modelo, do que assumir, em uma situação de mínima informação, que a melhor estimativa do valor futuro de uma variável é simplesmente o valor anterior observado para esta variável.

Na literatura de modelação hidrológica, a Equação 7.9 é descrita com $k = 1$, de modo que o valor passado de uma variável é adotado como sendo o último valor medido. No caso do **modelo**, faz pouco sentido utilizar como base de comparação o último valor lido de temperatura, pois a densidade de amostragem é alta, com intervalo medição de quatro minutos para as **Campanhas da Panasqueira** e de dez minutos para as **Campanhas da Murganheira**; é evidente que nesta situação, o valor imediatamente anterior de temperatura em um ponto sempre será um melhor estimador da temperatura deste ponto do que o modelo, pois a própria inércia térmica do ambiente subterrâneo confere uma alta persistência aos valores de temperatura e uma baixa variabilidade dos valores observados. É da natureza dos dados recolhidos ter uma alta persistência, o que sugere a necessidade de adaptar a ideia original deste índice, concebido para outro tipo de modelo.

Uma possibilidade é, ao invés de utilizar $k = 1$, variar este parâmetro criando uma espécie de **janela móvel temporal** com sobreposição. Define-se um intervalo de tempo, e calcula-se o valor de k correspondente; com isto, avalia-se se uma medida de temperatura feita há t horas é um melhor estimador do que o próprio modelo. **Variando o intervalo, pode-se descobrir a partir de quanto tempo o modelo representa melhor a variação de temperatura em uma galeria do que o último valor medido**, ou seja, **a partir de qual intervalo de tempo o modelo vence a persistência da temperatura no interior da galeria e torna-se um melhor estimador do que um valor amostrado**.

$$PME = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} \left(O_i - O_{(i-k)}\right)^2} \tag{7.9}$$

Seja o intervalo entre medições Δt, E_i o valor de temperatura estimado pelo modelo para o instante i, O_i o valor de temperatura observado no instante i, e $O_{(i-k)}$ o valor de temperatura observado $(i-k)\Delta t$ segundos antes do instante i, tem-se:

- Se PME > 0, é melhor utilizar o modelo como estimador de temperatura do que um valor de temperatura medido $(i-k)\Delta t$ segundos atrás.
- Se PME < 0, é melhor utilizar um valor de temperatura medido $(i-k)\Delta t$ segundos atrás como estimador de temperatura do que modelo.
- O valor máximo possível é **1**, e o intervalo $[0, 1]$ mede o "grau" do quanto o modelo é melhor estimador do que um valor conhecido no passado.
- O valor mínimo aceitável é **0**, em que é favorável a utilização do modelo em detrimento de valores observados no passado.
- O valor mínimo possível é $-\infty$, e o intervalo $]-\infty, 0[$ mede o "grau" do quanto o modelo é pior estimador do que um valor conhecido no passado.

7.9.2 Desempenho do modelo

Como demonstrou-se em capítulos anteriores, ao se detalhar os parâmetros de entrada envolvidos no **modelo**, muitas são as variáveis envolvidas na modelação da evolução de temperatura em uma galeria subterrânea. A prática das simulações e as validações **Fenomenológica** e **Gráfica** evidenciaram certos parâmetros críticos para o desempenho do modelo, nomeadamente a estimação de um coeficiente de convecção através do Número de Nusselt, que depende do caudal de ar, e a própria deslocação de ar, sob o ponto de vista da conservação de movimento.

Ficou claro, para o caso das **Minas da Panasqueira**, que o desempenho do **modelo** está condicionado ao regime de operação dos ventiladores. Também, há uma suspeita de que nos intervalos de transição de ventilação a estimação feita pelo **modelo** apresente maiores desvios. Estas observações indicam que a **Validação Numérica** deve ser aplicada para as **séries completas** da validação, mas também para os **dados classificados** em função do caudal, tendo sido definidas quatro categorias: 1) estimações quando os ventiladores estão **desligados**, 2) estimações feitas quando a operação dos ventiladores se dá a **750 rpm**, 3) estimações para ventilação máxima, com ventiladores a **1250 rpm**, e 4) estimações em períodos de **transição da operação dos ventiladores**, quando oscilam entre ligado, desligado, 750 rpm e 1250 rpm.

O objetivo desta classificação é observar se alguma dessas séries classificadas "contamina" as estimações do **modelo** e prejudica seu desempenho quando se observa a série **completa**.

Para o caso das **Caves da Murganheira**, os dados são classificáveis em **temperatura estimada para o ar**, e **temperatura estimada para a rocha** no mesmo ponto. É possível que o modelo se comporte de modo diferente para estas séries e é desejável compreender quais são suas limitações, pontos fortes e pontos fracos.

Na secção seguinte encontram-se tabelas construídas para cada validação, contendo as métricas de análise de desempenho estabelecidas para o **modelo**, aplicadas aos dados classificados.

Primeira Campanha de amostragem das Minas da Panasqueira

Para esta série de dados, observa-se, pela Tabela 7.8:

- **Número de Pontos** - pouca transição de regimes de ventilação, dado que há apenas um final-de-semana (com ventilação desligada) no período observado. Há maior predominância de pontos estimados para ventilação máxima.
- **Erros de estimação** - observando os erros absoluto médio, relativo médio e quadrático médio para cada classe, nota-se que são maiores quando os ventiladores estão desligados; observando-se os erros quadráticos, há ainda maior discrepância para os erros de estimação cometidos neste período, o que sugere maior quantidade de *outliers*. Os erros referentes aos períodos de transição de ventilação não são tão destoantes em relação ao restante da série quanto se imaginava. Por fim, em relação à série completa, não há uma pronunciada influência dos erros de estimação cometidos quando a ventilação está desligada, que apesar de serem maiores do que para as outras classes, não distorcem significativamente os erros de estimação computados para a série completa.
- **Coeficientes de eficiência** - os coeficientes de Nash-Sutcliffe e Legates-McCabe indicam menor eficiência do modelo para ventilação máxima, o que discorda frontalmente dos erros calculados para esta

classe, significativamente menores do que os erros calculados para as demais. Embora se tenha dividido a série em classes, no cálculo do CEF foi utilizada a média dos valores observados de todo o período. O que estes resultados sugerem é que, com uma maior prevalência de ventilação a 1250 rpm, os valores observados para esta classe estão mais próximos da média da série e têm menor variabilidade, o que de facto se observa nos gráficos da validação, sendo que a temperatura tem comportamento aproximadamente linear nestes períodos. Também fica evidente que a transição da ventilação afasta as estimações do valor médio das observações: este último, mais próximo do valor real de cada ponto desta classe do que as próprias estimações.

- **Coeficientes de eficiência adaptados** - nota-se que de facto o modelo é eficiente em transformar temperatura de entrada em temperatura de saída, base de comparação utilizada para estas métricas. Demonstram que se tomássemos pela temperatura de saída o próprio valor da temperatura de entrada, as estimações seriam significativamente piores do que as estimações feitas através do modelo, o que demonstra sua capacidade em estimar variação (acréscimo/decréscimo) de temperatura do ar ao percorrer certa distância em uma galeria.

- **Índice de persistência** - os resultados mostram que, mesmo para períodos mais curtos, as estimações feitas pelo modelo são mais adequadas para inferir a temperatura de saída do que os valores observados em períodos anteriores. Demonstra também que quanto maior o período de desconhecimento de temperatura, maior é a eficiência preditiva relativa do modelo.

Em geral, a **Validação Numérica** deste conjunto de dados manifesta que o **modelo** tem uma importante capacidade preditiva de temperatura, principalmente observando seu desempenho relativamente ao valores de temperatura de entrada. Os erros relativos são aceitáveis, assim como os erros quadráticos e absolutos médios. Prova-se que o CEF pode induzir a interpretações equivocadas da eficiência de um modelo quando há baixa variabilidade dos dados, sendo esta a única métrica que computou valores negativos para alguma classe de dados, o que não é por si só uma medida de ineficiência do modelo.

Segunda Campanha de amostragem das Minas da Panasqueira

Observa-se, da Tabela 7.9:

- **Número de Pontos** - amostragem consideravelmente maior do que para a série de dados anterior, com períodos de ventilação máxima praticamente iguais aos de ventilação desligada.

- **Erros de estimação** - são amplamente superiores quando a ventilação está desligada ou em transição; os erros quadráticos demonstram, para estas duas classes, significativa quantidade de *outliers* nos valores estimados. Nota-se que períodos de ventilação desligada e de transição pioram o desempenho geral do modelo, pois causam um aumento dos erros vistos na série de dados completa, relativamente aos períodos de menores erros de estimação (750 e 1250 rpm).

- **Coeficientes de eficiência** - os coeficientes de Nash-Sutcliffe e Legates-McCabe indicam menor eficiência do modelo para a ventilação desligada e em transição, o que concorda com os erros calculados. A ineficiência do modelo frente à capacidade estimativa da média de temperatura dos dados observados (série completa) para estes períodos é tão grande que enviesa a eficiência observada para a série completa dos valores estimados pelo modelo. Novamente, observa-se que a baixa variabilidade dos dados de temperatura tem papel importante nos valores calculados de eficiência, mas que por se tratar de um maior período de recolha de dados, a variabilidade é maior do que a observada para o conjunto de dados da **Primeira Campanha da Panasqueira**, como também mostra a Tabela 7.7).

- **Coeficientes de eficiência adaptados** - percebe-se que o modelo é eficaz em estimar variação de temperatura, relativamente a uma temperatura de entrada ou *input*. Porém, é pior estimador de temperatura quando a ventilação está desligada e em períodos de transição, pois explica menos as diferenças entre temperatura de entrada e de saída nestes períodos.

- **Índice de persistência** - mostra que, em geral, mais vale utilizar valores históricos de temperatura como estimadores se o intervalo máximo em que a temperatura é desconhecida for inferior a um dia. Caso a temperatura não seja medida por períodos superiores a um dia, é mais vantajoso utilizar o modelo como estimador da temperatura de saída do que os valores históricos.

Primeira Campanha de Amostragem das Minas da Panasqueira

Métrica	Conjunto de dados					Valores de referência			
	Completo	0 rpm	750 rpm	1250 rpm	Trans. vent.	Mín.	Máx.	Ótimo	Aceitável
Número de pontos	**1708**	503	493	711	30				
Erro absoluto médio (MAE)	**0.269**	0.354	0.242	0.225	0.160	0	∞	0	
Erro relativo médio (MRAE)	**0.019**	0.026	0.017	0.016	0.011	0	∞	0	
Soma dos quadr. dos erros (SSE)	**165.349**	70.969	47.867	44.392	1.154	0	∞	0	
Erro quadrático médio (MSE)	**0.097**	0.141	0.097	0.062	0.038	0	∞	0	
Raiz do erro quadr. médio (RMSE)	**0.311**	0.376	0.312	0.250	0.196	0	∞	0	
CEF - Nash-Sutcliffe (NSE)	**0.361**	0.470	0.521	-0.886	-1.741	$-\infty$	1	1	> 0
CEF - Legates-McCabe (LME)	**0.127**	0.285	0.372	-0.866	-0.779	$-\infty$	1	1	> 0
CEF adaptado (j = 2)	**0.954**	0.953	0.955	0.955	0.970	$-\infty$	1	1	> 0
CEF adaptado (j = 1)	**0.810**	0.795	0.832	0.807	0.855	$-\infty$	1	1	> 0
PME - intervalo de 1 dia	**0.713**					$-\infty$	1	1	> 0
PME - intervalo de 12h	**0.591**					$-\infty$	1	1	> 0
PME - intervalo de 6h	**0.382**					$-\infty$	1	1	> 0

Tabela 7.8: Desempenho do modelo na validação feita com os dados da **Primeira Campanha da Panasqueira**.

A **Validação Numérica** deste conjunto de dados exibe maior concordância entre erros e coeficientes de eficiência do que o conjunto de dados anterior. Demonstra a limitação do modelo em estimar temperatura quando há descontinuidades no escoamento de ar durante a transição da operação dos ventiladores, e que em geral, o modelo é um mau estimador de temperatura quando a ventilação está desligada. Recorda-se que todos os valores de caudal utilizados no modelo para os períodos de ventilação desligada foram inferidos, e não efetivamente medidos; o modelo é, então, um mau estimador de temperatura para estes períodos muito provavelmente devido ao desconhecimento das características do ambiente.

Uma maior coerência entre as métricas de análise deve-se, possivelmente, ao maior número de pontos observados na **Segunda Campanha da Panasqueira**. Por isto, este conjunto de dados oferece uma análise mais confiável do desempenho do modelo do que os dados da **Primeira Campanha**.

Segunda Campanha de amostragem das Caves da Murganheira

Para as **Caves da Murganheira**, não se considerou variação de caudal, e as séries foram classificadas em estimações de temperatura de ar e estimações de temperatura de rocha. Da Tabela 7.10, tem-se:

- **Número de Pontos** - amostragem consideravelmente maior do que as realizadas para as **Minas da Panasqueira**, sobretudo porque além do número de pontos ser maior, o intervalo entre medições também o é. Como estes dados são relativos à 8 meses de observações, em que estão presentes variações sazonais de temperatura bastante significativas, há maior variância (Tabela 7.7), ao menos para a temperatura do ar, que tem menor inércia térmica do que a rocha.
- **Erros de estimação** - são consideravelmente maiores para a estimação de temperatura da rocha; os erros quadráticos demonstram também uma maior presença *outliers* nesta classe.
- **Coeficientes de eficiência** - para este conjunto de dados, os coeficientes de Nash-Sutcliffe e Legates-McCabe são mais confiáveis como métricas de eficiência do modelo do que ocorre para os dados da **Panasqueira**, pois há maior variância. Supõe-se que a sazonalidade, que se reflete na variabilidade da temperatura, ajuda a demonstrar o mérito das estimações do modelo, pois aumentam a dispersão dos dados em relação à média. Assim, o modelo passa a explicar em maior medida os valores de temperatura de saída do que a média de temperatura das observações. Isto não necessariamente vai de encontro às validações anteriores, mas demonstra a sensibilidade destes coeficientes à variância dos dados.
- **Coeficientes de eficiência adaptados** - percebe-se que o modelo "trabalha menos" nas estimações feitas para as **Caves da Murganheira** do que o faz para a **Panasqueira**, já que a variação entre temperaturas de entrada e de saída é menor. Assim, para este caso, o modelo explica em menor grau o acréscimo e decréscimo de temperatura ao longo do percurso do ar, relativamente a própria temperatura de entrada do ar.
- **Índice de persistência** - mostra que, em geral, mais vale utilizar valores históricos de temperatura como estimadores se o intervalo máximo em que a temperatura é desconhecida for inferior a uma semana. Caso a temperatura não seja medida por períodos superiores a uma semana, é mais vantajoso utilizar o modelo como estimador da temperatura de saída do que os valores históricos. Estes resultados são interessantes pois demonstram, de certa forma, o efeito gradual da sazonalidade, que impacta a periodicidade da temperatura em um horizonte tão curto quanto uma semana.

Para as **Caves da Murganheira**, a **Validação Numérica** mostra que o modelo é um estimador de acréscimo de temperatura "menos importante" do que é para as **Minas da Panasqueira**, dado o seu menor potencial em transformar temperatura de entra em temperatura de saída. Por outro lado, sua eficiência é mais aparente em função da maior variância dos dados, o que não significa que é necessariamente menos eficiente para o caso da **Panasqueira**. Percebe-se, por fim, que é um melhor estimador de temperatura de ar do que de temperatura de rocha.

7.10 Considerações gerais para a validação do modelo

O conhecimento adquirido sobre o comportamento do **modelo**, viabilizado pelas **Validações Fenomenológica**, **Gráfica**, e **Numérica**, evidenciam a importância desta etapa. Não seria absurdo dizer que um mau

Segunda Campanha de Amostragem das Minas da Panasqueira

Métrica	Conjunto de dados					Valores de referência			
	Completo	0 rpm	750 rpm	1250 rpm	Trans. vent.	Mín.	Máx.	Ótimo	Aceitável
Número de pontos	**17668**	6726	4603	6339	180				
Erro absoluto médio (MAE)	**0.579**	0.966	0.360	0.328	0.687	0	∞	0	
Erro relativo médio (MRAE)	**0.046**	0.080	0.027	0.024	0.055	0	∞	0	
Soma dos quadr. dos erros (SSE)	**9903.372**	7996.907	976.129	924.288	175.680	0	∞	0	
Erro quadrático médio (MSE)	**0.561**	1.189	0.212	0.146	0.976	0	∞	0	
Raiz do erro quadr. médio (RMSE)	**0.749**	1.090	0.461	0.382	0.988	0	∞	0	
CEF - Nash-Sutcliffe (NSE)	**-0.258**	-0.611	0.319	0.374	-0.571	$-\infty$	1	1	> 0
CEF - Legates-McCabe (LME)	**-0.074**	-0.260	0.223	0.071	-0.120	$-\infty$	1	1	> 0
CEF adaptado (j = 2)	**0.899**	0.880	0.931	0.947	0.727	$-\infty$	1	1	> 0
CEF adaptado (j = 1)	**0.740**	0.689	0.793	0.801	0.625	$-\infty$	1	1	> 0
PME - intervalo de 1 dia	**0.119**					$-\infty$	1	1	> 0
PME - intervalo de 12h	**-0.472**					$-\infty$	1	1	> 0
PME - intervalo de 6h	**-1.214**					$-\infty$	1	1	> 0

Tabela 7.9: Desempenho do modelo na validação feita com os dados da **Segunda Campanha da Panasqueira**.

Segunda Campanha de Amostragem das Caves da Murganheira

Métrica	Conjunto de dados		Valores de referência			
	ar (n9)	rocha (n10)	Mín.	Máx.	Ótimo	Aceitável
Número de pontos	31218	31218				
Erro absoluto médio (MAE)	0.159	0.269	0	∞	0	
Erro relativo médio (MRAE)	0.012	0.020	0	∞	0	
Soma dos quadr. dos erros (SSE)	1291.775	3352.134	0	∞	0	
Erro quadrático médio (MSE)	0.041	0.107	0	∞	0	
Raiz do erro quadr. médio (RMSE)	0.203	0.328	0	∞	0	
CEF - Nash-Sutcliffe (NSE)	0.944	0.739	$-\infty$	1	1	> 0
CEF - Legates-McCabe (LME)	0.797	0.534	$-\infty$	1	1	> 0
CEF adaptado (j = 2)	0.775	0.721	$-\infty$	1	1	> 0
CEF adaptado (j = 1)	0.525	0.503	$-\infty$	1	1	> 0
PME - intervalo de 15 dias	0.638	-0.669	$-\infty$	1	1	> 0
PME - intervalo de 1 semana	0.133	-3.497	$-\infty$	1	1	> 0
PME - intervalo de 1 dia	-2.483	-32.290	$-\infty$	1	1	> 0

Tabela 7.10: Desempenho do modelo na validação feita com os dados da **Segunda Campanha da Murganheira**.

modelo, mas que se sabe ser mau e por que o é, tem maior valor científico do que um bom modelo, mas que não se sabe ser bom e nem porque. Um modelo ruim bem explicado serve de base para melhorias, mas um bom modelo mal explicado não serve sequer como base para repetição.

Esta discussão não tem como pretexto justificar falta de eficiência do **modelo**; ao contrário, demonstrou-se que este é de facto capaz de prever variação de temperatura em função das características de escoamento de um fluido e da distância percorrida no interior de galerias subterrâneas, e com razoável precisão. Mais, mostrou-se que o modelo efetivamente transforma os parâmetros de entrada, mais especificamente a temperatura de entrada, e explica em grande medida os fenómenos termodinâmicos envolvidos no acréscimo e decréscimo de temperatura.

O **modelo** se porta de forma adequada frente a dados transientes, isto é, frente a séries temporais de temperatura, o que é um aspeto raro em modelos similares e destinados à mesma finalidade. Por outro lado, o **modelo** não lida bem com inferências; é preciso conhecer e caracterizar de forma detalhada os ambientes para que se obtenham resultados satisfatórios. As descontinuidades ou oscilações bruscas de velocidade de escoamento também introduzem maiores desvios.

Mais importante do que o resultado em si, é o processo de validação. Com a experiência adquirida através do desenvolvimento deste projeto de investigação, é possível concluir que não há sistemática bem estabelecida na literatura para a validação de modelos de troca de calor em galerias subterrâneas, e urge desenvolvê-la. Este capítulo não apenas aplica uma validação ao modelo desenvolvido, mas propõe um procedimento sistemático para realizá-la, que deve ser questionado e aperfeiçoado por outros investigadores.

Este procedimento resume-se por:

1. Caracterizar os parâmetros geométricos, termofísicos, e ambientais do local de testes e dos entes envolvidos.

2. Medir, de preferência continuamente, a velocidade de escoamento em cada ponto de recolha de temperatura.

3. Medir, com máxima precisão, a temperatura em múltiplos pontos e ao longo do tempo, com intervalos definidos e regulares de amostragem, e pelo período mais extenso possível. Idealmente, recolher temperatura de ar e de rocha em cada ponto.

4. Compreender a série temporal de temperaturas como um sinal, que na vasta maioria dos casos observados neste projeto de investigação, tem comportamento periódico de frequência definida.

5. Filtrar os dados experimentais para eliminar *outliers* e ruídos de precisão dos sensores. Recomenda-se a utilização de algoritmos de *Fast Fourier Transform* e *Inverse Fast Fourier Transform*, com filtragem de dados baseada em critérios de magnitude dos coeficientes de Fourier e na frequência do sinal, como ferramentas simples e eficazes para este fim.

6. Compreender os dados experimentais filtrados antes de proceder à validação. A observação por si só permite descobrir comportamentos termodinâmicos interessantes e de grande valor para a construção do conhecimento sobre os ambientes subterrâneos.

7. Perceber a interação entre modelo teórico e dados experimentais. Como embutir os dados recolhidos no modelo desenvolvido exige adaptações algorítmicas e um bom conhecimento sobre o funcionamento do modelo desenvolvido. É uma etapa crítica para conectar os aspetos teóricos do modelo à realidade dos fenómenos de troca de calor.

8. Questionar, com base em observações práticas, aspetos teóricos incluídos no modelo. Nem sempre faz sentido incorporar certos comportamentos inicialmente supostos; excesso de detalhes é prejudicial à modelação, assim como a falta deles.

9. Comparar estimações com valores reais a partir de diferentes abordagens. É insuficiente analisar, de forma qualitativa, gráficos de séries de dados, assim como o é analisar apenas resultados numéricos. Cada ponto de vista tem sua vantagem analítica e merece um desenvolvimento cuidadoso. Neste projeto de investigação, dividiu-se esta ótica de análise em três pilares: **Validação Fenomenológica** (comportamento "macro" das estimações do modelo), **Validação Gráfica** (trabalho realizado pelo modelo ponto-a-ponto), e **Validação Numérica** (erros de estimação e eficiência do modelo em termos quantitativos).

10. Valer-se de conhecimentos de outras áreas das ciências do ambiente. Muitas ideias, aparentemente desconectadas, podem ser aproveitadas em contextos diferentes.

8 Conclusões e considerações finais

O projeto de investigação teve, ao longo de seu desenvolvimento, etapas bem definidas que envolveram trabalhos bastante diversificados, da matemática e física em suas partes mais conceptuais, até o desenvolvimento de competências em eletrónica digital e modelação numérica. Algumas destas partes nem sequer estavam originalmente previstas, mas foram tornando-se necessárias com o decurso da investigação.

Para além do desenvolvimento do próprio projeto de investigação, segui sempre duas premissas: aprender o máximo possível com o que estava fazendo, e desenvolver o trabalho mais completo possível. Assim, algumas etapas, como por exemplo a criação dos dispositivos de recolha de temperatura, foram exploradas muito para além do indispensável para o trabalho. O desenvolvimento da validação também demonstra esta tentativa de expandir o trabalho para lá dos limites do pragmático.

Os esforços se deram sempre no sentido de concretizar a expressão tão frequentemente utilizada nas ciências de "pensar fora da caixa". Olhando para trás, penso que de fato este é um trabalho de investigação fora da caixa: a orientação do trabalho e o seu desenvolvimento não sacrificaram imaginação em nome do pragmatismo; ambos caminharam juntos e creio que isto permitiu que colhêssemos resultados inesperados e originais. Destaco que a orientação do projeto e seu desenvolvimento estiveram, ao longo de todas as suas etapas, em perfeita sintonia. Atribuo, à orientação da investigação, imensa parte do sucesso que acredito que esta teve.

Pretendo, neste capítulo, recapitular o que foi feito de mais importante no trabalho e concluir com o que creio ser o mais importante para cada etapa, de um ponto de vista um pouco mais pessoal. Peço licença e desculpas pelo uso ocasional da primeira pessoa, mas concebi esta secção como um tipo de diálogo entre o estudante de doutoramento e o investigador que conclui o trabalho, e também entre o investigador e quem prestigia o trabalho com sua leitura e compreensão.

8.1 Enquadramento do projeto de investigação nos objetivos

O projeto de investigação tinha, em seu princípio, um enfoque mais prático e experimental. Quando ingressei no programa doutoral, desejava desenvolver algum tema prático da mineração conectada ao ambiente, visando expandir a relação simbiótica que existe entre ambas as áreas na direção de uma perspetiva mutualista, em ao menos alguma operação unitária ou pormenor da mineração.

O que fiz, então, foi buscar os artigos científicos mais recentes deste tema (felizmente uma das primeiras coisas que fiz no doutoramento foi aprender a utilizar um gestor bibliográfico) e estudar as possibilidades de investigação que mais me interessavam dentro dos sub-temas que encontrei. Desde o princípio me fascinou a possibilidade de aproveitamento geotérmico em simultaneo com uma operação mineira; alguns projetos interessantes, como o "CHPM2030 - Combined Heat, Power and Metal extraction from ultra-deep ore bodies" (E. Hartai, 2019) e "MEHR - Mine Exhaust Heat Recovery" (Kalantari e Ghoreishi-Madiseh, 2019), atraíram de imediato a minha atenção.

O que eu desejava era encontrar uma aplicação prática para a geotermia numa mina, o que eu ingenuamente não sabia que já existia há muitas décadas, e tampouco que era algo extremamente complicado de se colocar em prática. As aplicações mais imediatas e experimentais tinham como pré-requisito algo de que eu não dispunha: uma mina subterrânea para chamar de minha.

Após uma revisão do tema, concluí que abordar a co-geração de energia estava fora de cogitação: minas portuguesas não encontram temperaturas altas o suficiente para isto, e os recursos geotérmicos em Portugal e no restante do mundo ocorrem, em sua maioria, a temperaturas médias e baixas. O reaproveitamento do calor encontrado em subterrâneo em bombas de calor, por outro lado, não exige temperaturas tão altas e tem sido um tema bastante desenvolvido nos últimos tempos. Tentei, então, buscar possibilidades de investigar o aproveitamento de calor disponível em subterrâneo, e descobri que se a variação de temperatura fosse de ao menos 1 °C, o calor já era aproveitável de alguma forma.

Isto me despertou interesse, pois reflete o debate tão em voga nos dias atuais: o da eficiência energética. Se não podemos gerar energia com tanta facilidade, é possível ao menos não desperdiçar a que temos em mãos. O problema inicial mantinha-se: não tínhamos uma mina e tão pouco bombas de calor. Foi então

que em uma das unidades curriculares do doutoramento, de modelação numérica, o Professor José Soeiro de Carvalho sugeriu que não precisávamos de uma mina, mas somente de um computador: tínhamos a possibilidade de desenvolver um modelo de estimação de variação de temperatura em função do percurso de um fluido por galerias subterrâneas, e não precisávamos de uma solução completa para o aproveitamento de calor, sendo suficientemente interessante desenvolver uma ferramenta preditiva de suporte à recuperação de calor em minas (e outros ambientes) subterrâneas.

Desta conversa nasceu o projeto de investigação, que a partir deste ponto, andou com as próprias pernas. Percebemos que havia lacunas na modelação numérica de trocas de calor em galerias subterrâneas. Os modelos existentes eram em sua maioria empíricos: quisemos desenvolver um com mais embasamento teórico, de acordo com a *Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD)*[1] clássica. Os modelos tinham pouca aplicação prática e pouca preocupação com a parte experimental de recolha de dados: quisemos fazer uma validação mais ampla, mais transparente, e melhor [2]. Outros fatores, como pouca existência de modelos de trocas de calor com carácter transiente, representação pouco fiel de uma galeria de mineração nos modelos existentes [3], e pouca fiabilidade dos resultados publicados, motivaram o desenvolvimento do modelo.

Como o projeto tinha por princípio não desviar de temas mais complexos, mas de aproveitar todas as oportunidades de aprendizagem identificadas, nós, mineiros, iniciamos nossos estudos de Fluido-dinâmica e Termodinâmica para tentar criar um modelo mais adequado à mineração[4], tendo por base um olhar mineiro sobre ambientes mineiros.

Dito isso, olhando de forma crítica para o que se tratou por **motivações**, que envolve basicamente os possíveis impactos do reaproveitamento de calor disponível em minas subterrâneas, e tendo em vista o que foi feito no projeto de investigação, pode-se dizer que **não desenvolvemos um sistema direto e completo para a recuperação do calor**, mas **desenvolvemos uma ferramenta analítica para estudos de viabilidade de projetos de recuperação de calor: se os ambientes forem bem caracterizados, o modelo pode estimar acréscimo e decréscimo de temperatura no ar ou água que saem de uma mina, e pode indicar se há potencial de implantação de projetos para aproveitamento e recuperação de calor**. Isto é importante porque, como é óbvio, seria um absurdo uma empresa investir num sistema de recuperação de calor (através de bombas de calor, por exemplo), para só depois descobrir se o potencial para tal existe[5]; mais vale medir temperatura e modelar as trocas de calor de antemão. Como foi colocado no início do texto, queremos **estar aptos a identificar boas oportunidades para o aproveitamento geotérmico**; **o modelo desenvolvido de facto possibilita isto**.

Assim, creio que os objetivos e motivações deste projeto de investigação estão alinhados com o resultado final obtido. Os "**objetivos adquiridos**" foram uma espécie de *spin-offs* do projeto de investigação: são derivados das necessidades da investigação, mas têm importância individual no horizonte do trabalho. Os **objetivos** foram cumpridos, e outros tantos foram criados; este encerramento de investigação doutoral não é, de todo, o encerramento do projeto de investigação. As **motivações**, tendo-se ajustado expectativa inicial à realidade prática e às limitações do que cabe e do que é esperado para um projeto de investigação doutoral, foram também atendidas.

Como por vezes brinquei com o Professor Soeiro ao longo do trabalho, não criamos um carro completo e funcional, mas inventamos um parafuso bastante respeitável. O Professor Joaquim Góis, certa vez, completou esta analogia com uma frase que marcou minha perspetiva do que fizemos neste projeto: "é de parafuso em parafuso que se desenvolve a ciência."

8.2 Modelação Numérica a partir da teoria

Para esta parte do trabalho em particular, há menos restrição teórica formal do que se possa imaginar. Criar um modelo a partir de equações é um trabalho de curadoria: sempre há de se escolher o que incorporar e o que descartar. Não há, por exemplo, solução à **Equação de Navier-Stokes** sem suposições iniciais. Em CFD, há de se simplificar para se solucionar.

Este fato permite desenvolver modelos dos mais diversos para simular as trocas de calor em galerias subterrâneas, a partir de diferentes óticas, selecionando diferentes componentes físicos e matemáticos para

[1] Foi neste ponto que as coisas se complicaram, no bom sentido da palavra.
[2] Mais uma complicação: obter dados em abundância e de forma automática
[3] Jamais se considerando a rugosidade das paredes, desvios de galerias, variação de caudal, e a "violência" do escoamento de ar na ventilação.
[4] As outras áreas da engenharia dificilmente olham para este tipo de ambiente: a imensa maioria dos modelos publicados são desenvolvidos por engenheiros de minas.
[5] É surpreendente perceber que muitos estudos de caso e aplicações práticas são feitas exatamente desta forma.

enriquecer ou para simplificar a representação de fenómenos.

Um hábito que adquiri ao longo da investigação foi o de levar da biblioteca da FEUP um grande número de livros diferentes sobre um tema que pretendia explorar em determinada fase da investigação. A maioria destes livros não utilizei de forma muito aprofundada, mas alguns, como o de Shames (1991) intitulado "Mecânica dos Fluidos", mesmo que pouco utilizados para a parte matemática e física, trouxeram pontos de vista muitíssimo interessantes. De Shames (1991), adaptei uma sentença que acredito ser a mais importante para compreender o desenvolvimento do modelo em sua totalidade: "o estudo dos fluidos se dividiu, historicamente, em dois grupos de investigadores: os matemáticos, que observavam os fenómenos por um ponto de vista analítico e os hidráulicos, que se valiam de uma abordagem mais empírica. **Demonstrou-se, porém, que a mecânica dos fluidos é uma ciência desenvolvida por uma combinação de ambas as perspetivas, pois a matemática carece de informações experimentais e o empirismo carece de generalização teórica das observações**.

Tomei esta visão de Shames (1991) como regra de ouro para o projeto de investigação, principalmente em adequar teoria à realidade prática, e também em utilizar dados experimentais para confrontar o modelo teórico. Isto explica em grande medida algumas simplificações adotadas para o modelo, como tomar o ar como incompressível, descartar a perda de pressão no escoamento em troços curtos de galeria, descartar a variação das propriedades termofísicas para pequenas variações de temperatura abaixo dos 20 °C, supor trocas de calor constantes na parede da galeria, e outros, já mencionados no trabalho e que não são verdades absolutas do ponto de vista teórico, mas são bastante próximas da realidade prática de uma mina. Ao contrário, para o que foi acrescentado, partiu-se da mesma perspetiva: galerias não são ductos lisos, pelo que a rugosidade teve que ser considerada.

Para grande parte do que foi feito, penso que as escolhas foram felizes, por permitirem representar de forma adequada os fenómenos de trocas de calor em galerias subterrâneas, como mostrou o comportamento do modelo frente aos dados experimentais. Outros aspetos, porém, foram insuficientemente desenvolvidas, onde se destaca a modelação da turbulência do ponto de vista do campo de velocidades.

Como o modelo trata todo o sistema como uma "meia fatia de galeria", o movimento tridimensional do ar devido à ocorrência de redemoinhos foi negligenciado. Mesmo o movimento em duas dimensões foi simplificado, e tratou-se a velocidade do fluido em termos de seu perfil, como função da distância ao centro da galeria. Isto, embora funcione para escoamentos laminares, torna-se progressivamente pior quanto maior a energia cinética do fluido, e portanto, o modelo torna-se pior quanto mais turbulento é o movimento.

O mais adequado seria acoplar, ao modelo de trocas de calor, um **Modelo $k-\epsilon$** para embutir o efeito da variação de energia cinética sobre a aleatoriedade do movimento das partículas de ar e sua mistura.

A simplificação do equacionamento das trocas de calor por convecção envolve trabalhar com a coluna de ar de uma secção de galeria: foi aqui que se tentou compensar a mistura, supondo que toda a coluna de ar troca calor com a interface; este calor é igualmente distribuído entre os elementos da coluna[6]. Esta foi uma alternativa numérica para resolver um problema bastante complicado, que envolve a aleatoriedade (aproximada através de modelos mais completos) do movimento turbulento de um fluido. No modelo, a estratégia numérica tem o problema de supor uma distribuição uniforme de calor para toda a coluna de ar da secção, pois deveria ser proporcional à energia cinética: quanto mais energia, maior a mistura.

Como os resultados da validação demonstraram, esta não foi uma simplificação com impacto muito grave, tendo em vista que se trabalhou com velocidades de escoamento inferiores a $1.5\,\mathrm{m\,s^{-1}}$. Para velocidades sónicas, ou com turbulência a ordens de grandeza maiores, o modelo certamente faria um trabalho muito ruim de estimação. Novamente, a questão central é compreender qual é o contexto de aplicação do modelo. Minas não envolvem ventilação a velocidades muito altas, pois isto seria prejudicial às condições de bem-estar humano. Não fazia muito sentido, na elaboração do modelo, acoplar modelos mais complexos de turbulência (valem, por si só, outro projeto de investigação) visto que a aplicação desejada se restringia a menores velocidades de escoamento.

Por outro lado, esta certamente será uma característica a incorporar em versões futuras. Este texto refere as etapas de um projeto doutoral, mas de forma alguma encerra a investigação aqui iniciada.

Por fim, esta versão do **modelo** mostrou-se adequada às suas aplicações práticas, e suas limitações já eram bem definidas quando o modelo foi concebido.

[6] Com "igualmente distribuído", entende-se que a mistura do ar está sendo considerada

8.3 Sistema de monitorização e dataloggers

Esta parte do trabalho de investigação foi sem dúvidas um *spin-off*. Não se imaginava criar dispositivos de recolha de temperatura, mas esta necessidade foi introduzida pela natureza do trabalho. Era impossível obter um número elevado de estações meteorológicas ou de outros dispositivos eletrónicos prontos para a monitorização devido a uma limitação de recursos. Foi preciso criar dispositivos de alta precisão e de baixo-custo, utilizando ao máximo os materiais que a faculdade já tinha, como micro-controladores **`Arduino`** .

Diante desta necessidade, um novo universo de possibilidades se abriu: o da monitorização ambiental em subterrâneo. Este é um campo muito interessante e promissor que tentamos explorar no trabalho e agregar à investigação. A monitorização em tempo real permite aquisição de grande volume de dados de forma automática, que era precisamente o que necessitávamos para a parte experimental do trabalho. Seria um completo desperdício, entretanto, não aproveitar outros aspetos destes sistemas de monitorização, como seu potencial na identificação de perigos e prevenção de riscos de forma não invasiva e remota, o que é possível com a utilização de protocolos de comunicação sem-fio.

Esta foi seguramente a parte mais arriscada do trabalho. O sistema levou tempo a ser desenvolvido e aperfeiçoado, e ainda assim, não funcionou de forma ideal[7]. Felizmente, os dispositivos funcionaram suficientemente bem para recolher quantidades grandes de dados e atender ao que era necessário para o projeto de investigação.

A base do sistema desenvolvido é aplicável a muitos outros parâmetros ambientais relevantes à mineração sem que sejam feitos grandes ajustes: é essencialmente uma questão de substituir os sensores de temperatura ou adicionar outros. O que esta parte do trabalho permitiu descobrir é que este é um tipo de conhecimento que, embora distante de nós, mineiros, é acessível; isto é interessante pois profissionais da mineração têm uma visão privilegiada de suas próprias necessidades em termos de monitorização ambiental e segurança, e não estão condicionados ao desenvolvimento tecnológico por profissionais de outras áreas. Podemos ser mais propositivos em relação às tecnologias que usamos (ou usaríamos, se existissem e delas tivessemos conhecimento). Os dispositivos desenvolvidos não são de cariz profissional, mas os resultados com eles obtidos servem como convite ao improviso, à creatividade e à imaginação.

Além do desempenho dos dispositivos, o que poderia ser melhorado nesta etapa do trabalho é a monitorização contínua de caudal/velocidade do ar concomitantemente à monitorização de temperatura. Um sensor de alta precisão, com mesmas capacidades de um anemómetro, que fosse também capaz de medir direção de escoamento em três dimensões, auxiliaria a introdução de dados transientes de velocidade no modelo, e também permitiria a recolha de dados experimentais valiosos para a modelação numérica da turbulência: poderia ser criado, por exemplo, um banco de dados experimentais de velocidade que permitisse modelar a aleatoriedade das flutuações de velocidade do ar.

8.4 Algoritmo e funcionamento do modelo

O desenvolvimento de um algoritmo para resolver a equação discretizada do balanço transiente de energia foi provavelmente a parte mais desafiadora do projeto de investigação, por ser a que foi feita primeiro e por depender da escrita de raíz de um programa de computador. Criar o algoritmo envolveu o desenvolvimento de uma heurística, que se baseou em estratégias de soluções de modelos publicados e da literatura de CFD.

Somente a criação de um primeiro algoritmo levou cerca de três meses, sem contar as adaptações que se deram com o curso da investigação. A relação dos volumes de controle e suas posições nas proximidades das fronteiras do sistema foi a parte crítica para a solução do problema numérico. Devido a complexidade do problema, foi também muito difícil, por vezes, encontrar a origem dos erros que induziam à divergência do modelo: o surgimento de valores `NaN` (*not a number*), por exemplo, pode significar praticamente qualquer coisa, do erro semântico à má utilização de alguma equação ou má compreensão física de algum fenómeno.

Inicialmente desenvolvido em **`GNU Octave`**, o código foi adaptado para **`Python`**. O ambiente de programação **`Spyder`** foi uma ferramenta importante para a depuração do algoritmo pois conta com uma consola intuitiva e informativa, que permite acessar com facilidade os valores de variáveis durante a execução do algoritmo e visualizar gráficos. A criação de animações e de gráficos de temperatura foi fundamental para identificar erros.

[7] Este é mais um assunto que será desenvolvido mesmo após o término da investigação doutoral. Alguns ajustes e melhorias estão previstos para serem feitos em um futuro próximo. Deseja-se incluir investigadores de outras áreas, como da eletrónica, para dar suporte a um desenvolvimento mais profissional dos dispositivos

Em relação ao desempenho numérico do algoritmo, foram adotadas estratégias realmente eficientes para sua estrutura e funcionamento, nomeadamente as operações realizadas com `arrays` inteiros ao invés de utilizar operações ponto-a-ponto. Esta abordagem mostrou-se adequada, principalmente para quantidades moderadas de volumes de controle, da ordem das dezenas de milhares de pontos.

Utilizou-se um esquema de discretização no tempo que é mais restritivo quanto ao passo de tempo, mas menos complicado por não envolver a solução de sistemas com muitas variáveis a cada iteração. Dadas as capacidades dos computadores mais modernos, não se perde muito por reduzir o passo de tempo, principalmente se isto for compensado reduzindo-se o tempo gasto por iteração, o que certamente não é possível resolvendo-se sistemas com milhares de variáveis. O tempo total de execução do algoritmo para diversos cenários simulados faz com que seja adequado a praticamente qualquer problema de troca de calor em galerias subterrâneas. Também, maximiza-se o passo máximo através de uma sub-rotina de verificação de convergência, que só precisa ser executada uma vez para cada cenário simulado; isto permite aumentar a eficiência do algoritmo, que é executado com máxima velocidade para cada caso de aplicação do modelo.

Demonstrou-se que o algoritmo se adapta bem à introdução de novas variáveis. A maior dificuldade em introduzir os dados experimentais no modelo não foi a programação, e sim a compreensão de como isto deveria ser feito: foi preciso conhecer ainda mais a fundo as características do modelo e também estudar a natureza dos dados recolhidos. O que destravou efetivamente a adaptação do algoritmo à validação foi a subdivisão do domínio geométrico em uma sequência de troços, pelos quais o ar flui a diferentes caudais devido a fuga ou injeção de ar, e a perspetiva da **origem do movimento do ar**. Em termos de código, este processo consistiu mais de uma repetição de algumas estruturas do que a criação de novos comandos.

8.5 Validação e desempenho do modelo

A validação foi a etapa mais longa do projeto de investigação, pois envolveu todo o planeamento e desenvolvimento da recolha de dados e a introdução de dados experimentais no modelo. A caracterização dos ambientes de modo a obter todas as variáveis de *input* envolvidas nos cálculos do modelo foi também bastante trabalhosa.

Inicialmente, o planeamento da parte experimental foi feito para as Caves da Murganheira, que naquele momento era o único local de testes que já havia estabelecido colaboração com o projeto de investigação. Com as primeiras recolhas de temperatura, viu-se que o movimento de ar era insuficiente para avaliar as capacidades do modelo, e que o sistema era bastante diferente do de uma mina subterrânea, pois a galeria não estava totalmente isolada da superfície e da influência do ar exterior. Entretanto, os primeiros resultados experimentais permitiram a observação de fenómenos termodinâmicos inesperados e interessantes para o estudo do potencial bioclimático deste ambiente subterrâneo, e optou-se por continuar a recolha de dados.

Com a necessidade de obter dados de uma galeria de mineração, para contemplar de forma mais adequada os aspetos funcionais do modelo, foi feito um contacto com as Minas da Panasqueira, e os dispositivos do sistema de monitorização foram adaptados para o *dataloggers*. A recolha de dados nas Minas da Panasqueira se deu simultaneamente às recolhas das Caves da Murganheira.

Na realidade, os dados obtidos foram tão abundantes e interessantes que se tornaram um problema. Não sabíamos como introduzi-los no modelo e nem quais deveriam ser os conjuntos de dados a serem reservados para aferir os resultados de estimação. Notamos de imediato os comportamentos periódicos das séries de dados e as oscilações referentes à resolução do sensor, o que nos sugeriu que deveríamos interpretar as séries temporais como sinais, e filtrar os dados antes de utilizá-los no modelo.

A filtragem permitiu eliminar os ruídos de precisão dos sensores e atenuar variações acentuadas de temperatura em curtos períodos de tempo, reduzindo os *outliers* e os efeitos da descontinuidade sobre as séries de dados. Observou-se que a precisão dos sensores era ainda maior do que a antecipada pelo fabricante, não excedendo $\pm 0.04\,^{\circ}\mathrm{C}$, o que se concluiu pela alta repetibilidade dos dados. Também ficou evidente a importância da utilização de sondas de temperatura de alta precisão como ferramenta analítica do comportamento termodinâmico de uma estrutura subterrânea.

Quando finalmente se chegou a um método de utilização dos dados através do modelo e se pôde realizar as simulações para os dados recolhidos filtrados, os primeiros resultados foram visualizados graficamente e sugeriam um alta precisão do modelo. Foi necessário, então, aprendermos a enxergar estes resultados a partir de um ponto de vista baseado em critérios mais objetivos, que desenvolvemos após longas discussões sobre a natureza das estimações do modelo e dos próprios dados experimentais.

Como a revisão do estado-da-arte não foi de muita ajuda quanto à metodologia de avaliação do desempenho de modelos como o nosso, desenvolvemos nossa própria sistemática de avaliação, que dividimos em três

frentes: validação fenomenológica, para avaliar a reprodutibilidade do comportamento macroscópico ou da tendência geral de comportamento das variações de temperatura pelo modelo, validação gráfica, para enxergar a distância entre valores estimados e reais, e validação numérica, para quantificar a eficiência do modelo e qualidade das estimações.

Neste momento, percebemos algo que talvez seja uma das conclusões mais importantes deste trabalho: o valor do modelo não está em seu poder preditivo, mas no que se conhece sobre o seu comportamento de forma objetiva. Um bom modelo mal validado é virtualmente inútil, mas um mau modelo bem validado é uma fonte de conhecimento com grande valor. A validação, que é muito discutida em outras áreas das ciências do ambiente, ainda é pouco (e mal) desenvolvida na área em que se realizou este trabalho de investigação. Acredito que a definição de um procedimento padrão para a validação de modelos de troca de calor, realizada neste trabalho de forma embrionária, é uma necessidade urgente para esta área do conhecimento, e deve ser promovida, discutida e melhorada entre os investigadores deste campo.

Quanto ao desempenho em si do modelo, a validação numérica mostra que seu poder preditivo está longe do que se poderia pensar apenas olhando a posição relativa entre as séries de dados. O desempenho é adequado, mas não excelente. É melhor quanto mais detalhada é a caracterização do ambiente, e peca quando há oscilações bruscas de parâmetros ambientais como caudal e temperatura. As estimações não apresentam erros relativos muito altos, mas nem sempre afastam os valores estimados para temperatura dos valores de *input* de forma adequada. A capacidade de melhorar as estimativas ao longo de períodos de maior estabilidade de temperatura é uma virtude, e mostra a capacidade de estimação transiente do modelo.

O conjunto de informações compreendido pela formulação matemática da equação de balanço de energia que rege o modelo e pelos resultados da validação, pode certamente ser aproveitado em trabalhos futuros de investigação como ponto de partida ou parâmetro de comparação no desenvolvimento de novos modelos. Seria bastante interessante poder comparar os resultados obtidos nesta investigação, partindo das mesmas métricas de desempenho, com trabalhos passados e futuros de outros investigadores.

Em suma, o que se desejava, no início da investigação, era criar um modelo que desse suporte à projetos de recuperação de calor. Creio que o modelo atende a este objetivo, e é, no mínimo, um bom estimador preliminar de acréscimo/decréscimo de temperatura em galerias subterrâneas, sendo capaz de demonstrar a viabilidade deste tipo de projeto e, esperançosamente, de fomentar a recuperação de calor e um melhor aproveitamento energético na mineração subterrânea.

Neste texto não se ocultaram informações sobre os pormenores do modelo, do sistema de monitorização, ou da validação; pelo contrário, encontram-se quase na íntegra as soluções de equações, os códigos de cada algoritmo, desenhos esquemáticos de circuitos, tabelas de ligações entre componentes eletrónicos, e outras informações que nos foram de obtenção bastante custosa. Os dados experimentais podem também ser disponibilizados integralmente se solicitados. Compartilhar informações e conhecimento foi também um dos princípios deste projeto de investigação e desejamos que quem encontre este texto o ache útil e faça bom uso de tudo o que pudemos descobrir e construir ao longo de seu desenvolvimento.

8.6 Trabalhos futuros

Há diversas continuações possíveis para este projeto de investigação, algumas relacionadas com dificuldades e problemas identificados, e outras com oportunidades de investigação que não foram exploradas. Algumas delas são:

- Modelação da turbulência - desenvolver um modelo mais completo para o campo de velocidades do fluido, a ser acoplado ao modelo de troca de calor. Isto pode ser feito através de modelos teóricos ou de algoritmos de inteligência artificial, como as redes neuronais: com uma quantidade suficiente de dados recolhidos através de sensores digitais, similarmente ao que foi feito para a temperatura, estes algoritmos podem ser aplicados para modelar as flutuações aleatórias de velocidade devido aos fenómenos turbulentos.
- Monitorização em tempo real do caudal de ar - uma recolha mais completa deste parâmetro poderia melhorar a qualidade dos dados de *input* inseridos no modelo; com uma recolha contínua de dados referentes ao escoamento, é possível que o modelo produzisse melhores estimações. Viabilizaria também a utilização de algoritmos de inteligência artificial na modelação do movimento turbulento, como mencionado no item anterior.
- Utilização de inteligência artificial na modelação das trocas de calor - uma das ideias que se tinha após a recolha dos dados experimentais era a de criar um *modelo 2.0* a partir de redes neuronais aplicadas sobre

o banco de dados. Algumas bibliotecas e ferramentas `Python`, como `Keras` e `TensorFlow`, possibilitam uma criação simplificada deste tipo de modelo pois possuem algoritmos pré-programados de treinamento de modelo e deteção de padrões.

- Aperfeiçoamento do sistema de monitorização - um dos objetivos futuros deste projeto de investigação é o de transformar o protótipo desenvolvido para o sistema de monitorização em uma aplicação profissional. Para tal, é preciso criar um grupo de investigação multidisciplinar, com ao menos um estudante ou investigador de engenharia eletrotécnica. O novo sistema poderia ser aplicado à monitorização de outros parâmetros relacionados à segurança ocupacional em subterrâneo, como concentração de gases e poeiras. Poderia também ser feito o desenvolvimento de anemómetros digitais de alta precisão para detetar variações de caudal com maior sensibilidade do que é possível com sensores convencionais.

- Projeto piloto para a recuperação de calor - seria possível desenvolver um sistema de recuperação de calor, em escala de laboratório, à partir de bombas de calor, para simular situações de aproveitamento energético de calor do ar. Isto poderia fazer a conexão entre a teoria de modelos de estimação de trocas de calor e a aplicação prática de sistemas de recuperação de calor em minas subterrâneas.

- Simulações em laboratório - poderia ser criado um ambiente mineiro em escala de laboratório, induzindo situações diversas de estado de temperatura de rocha e ar. Isto permitira criar um extenso banco de dados experimentais, com maior variabilidade, para validar e aperfeiçoar o modelo, que também funciona para escalas menores (ductos da ordem de centímetros de diâmetro). Um modo de simular estes ambientes seria utilizar módulos encaixáveis de blocos de rochas perfurados.

- Métricas para a validação - um desenvolvimento futuro é o de propor a sistemática de validação desenvolvida em uma publicação da área, para iniciar um esforço de colaboração conjunta com outros investigadores na criação de um procedimento unificado para a validação de modelos como o que foi proposto. Este é um trabalho a longo prazo, pois depende do progresso que se dará a partir de discussões entre investigadores e do surgimento de novas ideias para avaliar de forma objetiva a eficiência dos modelos.

- Publicações - há, nesta tese, ao menos cinco publicações científicas viáveis. Alguns destes artigos já foram escritos ou publicados, e tenciona-se submeter os demais ao longo do ano em que se dará a defesa da tese. A apresentação do projeto de investigação em congressos da área também é pretendida; isto não foi feito até o momento pois desejava-se fazê-lo a partir de um trabalho mais amadurecido e completo, o que se considera ter atingido somente após o término da validação, que foi a última etapa do trabalho desenvolvida na investigação. Como este texto foi preparado concomitantemente ao desenvolvimento do projeto de investigação doutoral, e portanto concluído praticamente de forma simultânea à investigação doutoral, estas publicações e participações em congressos também se darão simultaneamente ou subsequentemente à defesa da tese e à conclusão do doutoramento.

8.7 Competências desenvolvidas

Quando decidi trabalhar com este tema, precisei buscar um conhecimento mais aprofundado de algumas ferramentas que conhecia apenas de forma muito superficial, principalmente relacionadas à matemática e programação. Por mais que eu já tivesse uma base de conhecimento, eu nunca havia aplicado de forma prática o que aprendi ao longo da graduação. O doutoramento foi, para mim, um enorme quebra-cabeças, em que tive de fabricar as peças que faltavam para formar uma imagem que eu e o Professor José Soeiro havíamos criado.

Este processo foi extremamente custoso do ponto de vista intelectual, mas como nosso princípio era, desde o começo da investigação, o de não desperdiçar nenhuma oportunidade de aprendizagem, resolvi enfrentar o desafio de desenvolver um tema tão complexo com bastante empenho e uma boa dose de teimosia.

Olhando para este processo de aprender para poder fazer, percebo que desenvolvi uma série de competências. Como, para mim, o doutoramento foi além de um processo de investigação e produção de conhecimento, uma fonte de desenvolvimento pessoal e profissional, gostaria de compartilhar nesta secção algumas coisas que aprendi.

Para escrever o algoritmo do modelo, aprendi a programar em `GNU Octave`, `MATLAB®`, e `Python`. Eu conhecia um pouco de programação em `C`, que aprendi na graduação, o que me ajudou muito a expandir minha capacidade de pensamento computacional. Também me ajudou na programação `Arduino` , baseada

em C. Agora, ao final do doutoramento, não me considero um exímio programador, mas penso que sei utilizar bem as capacidades científicas do **Python**. A criação de gráficos e animações em **Python** também foi uma competência que creio ser das mais úteis que adquiri.

Apesar de ter feito um curso técnico em mecatrónica e entender um pouco (bem pouco) de eletrónica, eu sequer havia visto um **Arduino** . Toda esta parte de eletrónica digital e de programação me foi apresentada pelo Professor José Soeiro, com quem aprendi quase tudo que fiz neste trabalho; algumas outras coisas, aprendemos juntos. Ter saído do absoluto desconhecimento e ter conseguido criar minha própria placa clone **Arduino** e nosso próprio sistema de monitorização é algo que me traz imensa satisfação.

A utilização de **Autodesk® AutoCAD®** é algo que considero que já sabia razoavelmente bem. Mas aprendi também a utilizar o **Autodesk® Eagle®** para fazer o *design* dos circuitos das placas-clone. Todo o processo de impressão de circuitos em placas pré-sensibilizadas foi bastante interessante e divertido. Aprendi a soldar, após algumas queimaduras leves e placas PCB perfuradas arruinadas[8].

Para a escrita do texto, resolvemos utilizar LaTeX, que eu também não sabia do que se tratava. Aprendi um pouco, mas sem o Professor Soeiro este texto não teria compilado. A utilização de repositórios GIT era algo que eu também não conhecia e foi extremamente útil no controle de versões da tese.

Uma das partes do trabalho que soube melhor, no sentido literal da expressão, foi a de ter uma experiência prática com os vinhos espumantes. Conhecer um pouco do processo de produção e ter a oportunidade de apreciar os vinhos *in loco* nas Caves da Murganheira é uma das recordações mais felizes que terei do doutoramento. Também expandiu meus horizontes em relação ao potencial de aproveitamento bioclimático de estruturas subterrâneas.

As visitas e trabalhos desenvolvidos nas Minas da Panasqueira foram muito enriquecedores. Eu ainda não havia visitado muitas minas subterrâneas e ter esta experiência prática foi extremamente importante para minha formação e compreensão destes ambientes. Poder conversar com profissionais da mineração foi também valiosíssimo para o projeto de investigação.

O desenvolvimento do modelo como um todo, além da experiência da modelação numérica, permitiu que eu melhorasse minhas capacidades de trabalho autónomo. Com o estudo intensivo e contínuo de matemática e física, aprendi a aprender. O doutoramento fez de mim um melhor estudante e me obrigou a ser mais paciente e obstinado.

Sou, portanto, muito grato ao processo que me trouxe até aqui e a todos que fizeram parte dele. Encerro o trabalho desejando que este seja apenas o início de minha jornada como investigador e que eu possa continuar aprendendo, com muita humildade e determinação. Desejo também um dia me tornar um Professor tão qualificado e capaz quanto os que tive em minha jornada, e que possa fazer por meus estudantes tudo o que fizeram por mim.

[8] Nenhum **Arduino** foi ferido durante este trabalho.

Bibliografia

Alsheikh, M. A., Lin, S., Niyato, D., & Tan, H. P. (2014). Machine learning in wireless sensor networks: Algorithms, strategies, and applications. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, *16*, 1996–2018. https://doi.org/10.1109/COMST.2014.2320099

Amaral, P., Correia, A., Lopes, L., Rebola, P., Pinho, A., & Lopes, J. C. (2013). On the use of thermal properties for characterizing dimension stones. *Key Engineering Materials*, *548*, 231–238. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.548.231

Amaral, P., & Rebola, P. (2014). Caracterização térmica de rochas ornamentais: granitos e calcários de Portugal Continental, 2–3.

Anderson, J. D. (1992). Governing Equations of Fluid Dynamics. *Computational Fluid Dynamics*, 15–51. https://doi.org/10.1007/978-3-662-11350-9_2

ARENA. (2018). *Hybrid power generation for Australian off-grid mines* (Ekistica, Ed.). Australian Renewable Energy Agency.

Atkins, P. (s.d.). *Four Laws That Drive the Universe* (Vol. 148).

Banks, D., Skarphagen, H., Wiltshire, R., & Jessop, C. (2004). Heat pumps as a tool for energy recovery from mining wastes. *Geological Society Special Publication*, *236*, 499–513. https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2004.236.01.27

Barbaresi, A., Torreggiani, D., Benni, S., & Tassinari, P. (2015). Indoor air temperature monitoring: A method lending support tomanagement and design tested on a wine-aging room. *Building and Environment*, *86*, 203–210. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.01.005

Bauer, E. R., & Kohler, J. L. (2009). Update on refuge alternatives: Research, recommendations and underground deployment. *Mining Engineering*, *61*, 51–57.

Bayazitoglu, Y., & Ozisik, M. N. (1988). *Elements of heat transfer*. McGraw Hill.

Belle, B. (2013). Real-time air velocity monitoring in mines - a quintessential design parameter for managing major mine health and safety hazards. *13th Coal Operators' Conference, University of Wollongong, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy & Mine Managers Association of Australia, 2013*, 184–198.

Bhattacharjee, S., Roy, P., Ghosh, S., Misra, S., & Obaidat, M. S. (2012). Wireless sensor network-based fire detection, alarming, monitoring and prevention system for Bord-and-Pillar coal mines. *Journal of Systems and Software*, *85*, 571–581. https://doi.org/10.1016/j.jss.2011.09.015

Blazek, J. (2015). Principles of Solution of the Governing Equations. *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*, 29–72. https://doi.org/10.1016/b978-0-08-099995-1.00003-8

Bodri, L., & Cermak, V. (2007). Background and History of the Problem. *Borehole Climatology*, 1–36. https://doi.org/10.1016/b978-008045320-0/50001-6

Boukhriss, M., Zhani, K., & Ghribi, R. (2013). Study of thermophysical properties of a solar desalination system using solar energy. *Desalination and Water Treatment*, *51*, 1290–1295. https://doi.org/10.1080/19443994.2012.714925

BP. (2018). *BP Statistical Review of World Energy*.

Carvalho, M. [M.], Romero, A., Shields, G., & Millar, D. L. (2014). Optimal synthesis of energy supply systems for remote open pit mines. *Applied Thermal Engineering*, *64*, 315–330. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.12.040

Carvalho, M. [Monica], & Millar, D. L. (2012). Concept development of optimal mine site energy supply. *Energies*, *5*, 4726–4745. https://doi.org/10.3390/en5114726

Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2012). *Transferência de Calor e Massa : uma abordagem prática* (4. ed.). AMGH editora.

Cermak, V., & Rybach, L. (1982). *Thermal conductivity and specific heat of minerals and rocks*. https://doi.org/10.1007/10201894_62

Chang, P., & Xu, G. (2019). *Proceedings of the 11th International Mine Ventilation Congress*. Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-1420-9

Chehri, A., & Saadane, R. (2019). Zigbee-based remote environmental monitoring for smart industrial mining. *ACM International Conference Proceeding Series*, 2–7. https://doi.org/10.1145/3368756.3369099

Chen, C.-J., & Jaw, S.-Y. (1998). *Fundamentals of Turbulence Modeling*. Taylor & Francis.

Colombo, V., Dinis, M. L., & de Carvalho, J. S. (2021). Numerical Model to Assess the State and Increase of Temperatures in Underground Mine Galleries: A Tool to Support Heat Recovery Projects. *International Journal of Terrestrial Heat Flow and Applications*, *4*, 110–118. https://doi.org/10.31214/ijthfa.v4i1.69

Costa, L. D. V. (2020). Mining. *73*, 555–560.

Danko, G. L. (2013). Subsurface flow and transport process model for time dependent mine ventilation simulations. *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology*, *122*, 134–144. https://doi.org/10.1179/147490013X13639459465691

de Lima Ferreira, P. M., da Paz, A. R., & Bravo, J. M. (2020). Objective functions used as performance metrics for hydrological models: state-of-the-art and critical analysis. *Rbrh*, *25*. https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190155

Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention and National Institute for Occupational Safety and Health. (2017). *Heat Stress: Overview*. https://www.cdc.gov/niosh/mining/UserFiles/works/pdfs/2017-123.pdf

Department of Industry and Resources and Government of Western Australia. (1997). *UNDERGROUND VENTILATION (METALLIFERROUS MINES)*. https://www.dmp.wa.gov.au/Documents/Safety/MSH_G_UGVentilation.pdf

Deshpande, P., & Madankar, M. S. (2015). Techniques improving throughput of wireless sensor network: A survey. *IEEE International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies, ICCPCT 2015*. https://doi.org/10.1109/ICCPCT.2015.7159430

Dicks, F. (2006). Ventilation on demand. *11th US/North American Mine Ventilation Symposium 2006*, *153*, 11–14. https://doi.org/10.1201/9781439833391.ch2

DiPietro, J. A. (2013). Keys to the Interpretation of Geological History. *Landscape Evolution in the United States*, 327–344. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-397799-1.00020-8

DOE. (2007). Mining Inustry Energy Bandwidth Study. *US Department of Energy*, 5, 21–24. http://energy.gov/sites/prod/files/2013/11/f4/mining_bandwidth.pdf

Donoghue, A. M. (2004). Occupational health hazards in mining: An overview. *Occupational Medicine*, *54*, 283–289. https://doi.org/10.1093/occmed/kqh072

Dubaniewicz, T., Chilton, J., & Dobroski, H. (1991). Fiber optics for atmospheric mine monitoring. *Conference Record of the 1991 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, *66*, 1243–1249. https://doi.org/10.1109/IAS.1991.178021

Edwards, J. C., Friel, G. F., Franks, R. A., Lazzara, C. P., & Opferman, J. J. (2000). Mine Fire Source Discrimination Using Fire Sensors and Neural Network Analysis National Institute for Occupational Safety and Health Pittsburgh , PA 15236 Abstract Fire experiments were conducted in the Safety Research Coal Mine (SRCM) at the National I.

Els, F. (2016). *The world's 10 coldest mines*. https://www.mining.com/the-worlds-10-coldest-mines/

Figueiredo, M. O., Silva, T. P., Batista, M. J., Leote, J., Ferreira, M. L., & Limpo, V. (2011). Uranium in surface soils: An easy-and-quick assay combining X-ray diffraction and X-ray fluorescence qualitative data. *Journal of Geochemical Exploration*, *109*, 134–138. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2010.09.004

Forsberg, C. H. (2021). *Forced convection*. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-802296-2.00006-8

Freire, A. P. S. (1990). Teoria de Camada Limite, 130.

Ghomshei, M. M. (2007). Geothermal energy from Con Mine for Heating the City of Yellowknife , NWT : A concept study. *Proceedings World Geothermal Congress 2015*, *2*, 1–18.

Ghoreishi-Madiseh, S. A., Sasmito, A. P., Hassani, F. P., & Amiri, L. (2015). Heat Transfer Analysis of Large Scale Seasonal Thermal Energy Storage for Underground Mine Ventilation. *Energy Procedia*, *75*, 2093–2098. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.324

Ghoreishi-Madiseh, S. A., Sasmito, A. P., Hassani, F. P., & Amiri, L. (2017). Performance evaluation of large scale rock-pit seasonal thermal energy storage for application in underground mine ventilation. *Applied Energy*, *185*, 1940–1947. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.062

Gilbrech, D. A. (1965). *Fluid Mechanics*.

Goldstein, B., Hiriart, G., Bertani, R., Bromley, C., Gutiérrez-Negrín, L., Huenges, E., Muraoka, H., Ragnarsson, A., Tester, J., & Zui, V. (2011). *Geothermal Energy* (C. von Stechow, O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen & S. Schlömer, Eds.; Cambridge,).

Greenwald, H. P., & McElroy, E. G. (1929). *Coal mine ventilation factors*.

Gudmundsson, J. S., Freeston, D. H., & Lienau, P. J. (1985). Lindal Diagram. *Transactions - Geothermal Resources Council*, *9*, 15–19.

Guerrero, I. C. [Ignacio Canas], & Ocana, S. M. (2005). Study of the thermal behaviour of traditional wine cellars: The case of the area of "Tierras Sorianas del Cid" (Spain). *Renewable Energy*, *30*, 43–55. https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.04.014

Gupta, H. V. [Hoshin Vijai], Sorooshian, S., & Yapo, P. O. (1999). Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, *4*, 135–143. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1999)4:2(135)

Hall, A. E., McHaina, D. M., & Hardcastle, S. (1990). Controlled recirculation in Canadian underground potash mines. *Mining Science and Technology*, *10*, 305–314. https://doi.org/10.1016/0167-9031(90)90504-L

Hartai, E. (2019). *Combined Heat , Power and Metal extraction from ultra-deep ore bodies - CHPM2030 3rd Periodic Report* (Delivereable D8.5). https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5c7086740&appId=PPGMS

Hartai, É., Németh, N., & Földessy, J. (2016). EGS-relevant review of metallogenesis.

Hartman, H. L., Mutmansky, J. M., Ramani, R. V., & Wang, Y. J. (1997). *Mine Ventilation and Air Conditioning* (3rd ed.). John Wiley & Sons.

Henriques, V., & Malekian, R. (2016). Mine Safety System Using Wireless Sensor Network. *IEEE Access*, *4*, 3511–3521. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2581844

Henriques, V., Malekian, R., & Bogatinoska, D. C. (2017). Mine safety system using wireless sensor networks. *2017 40th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics, MIPRO 2017 - Proceedings*, 515–520. https://doi.org/10.23919/MIPRO.2017.7973480

Holman, J. P. (2001). *Heat Transfer* (Nona edição). McGraw Hill.

Holmlund, K. (2015). Heat recovery solutions for mine ventilation systems Värmeåtervinningslösningar för.

Howes, M. J. (1998). *Ventilation and Cooling in Underground Mines* (Vol.3).

Hurter, S., & Schellschmidt, R. (2003). Atlas of geothermal resources in Europe. *Geothermics*, *32*, 779–787. https://doi.org/10.1016/S0375-6505(03)00070-1

Hytiris, N., Emmanuel, R., Aaen, B., Church, E. S., Campbell, D. S., Ninikas, K., & Robertson, A. (2014). Heat recovery from mineworkings: Opportunities in the glasgow area. *Environmental Geotechnics*, *4*, 395–401. https://doi.org/10.1680/envgeo.15.00007

Ibrahim, D. (2010). *Microcontroller Systems*. https://doi.org/10.1016/b978-1-85617-719-1.00005-1

Ibrahim, D. (2019). Introduction. *ARM-Based microcontroller projects using MBED*, 1–7. https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102969-5.00001-x

International Energy Agency. (s.d.). *CO2 Emissions Statistics*. https://www.iea.org/statistics/co2emissions/

International Energy Agency. (2017). *World Energy Outlook 2017*.

Janna, W. S. (2000). *Engineering heat transfer* (Second edi). CRC Press LLC.

Jessop, A. M., MacDonald, J. K., & Spence, H. (1995). Clean energy from abandoned mines at Springhill, Nova Scotia. *Energy Sources*, *17*, 93–106. https://doi.org/10.1080/00908319508946072

Jo, B. W., & Khan, R. M. A. (2017). An event reporting and early-warning safety system based on the internet of things for underground coal mines: A case study. *Applied Sciences (Switzerland)*, *7*. https://doi.org/10.3390/app7090925

Jo, B. W., & Khan, R. M. A. (2018). An internet of things system for underground mine air quality pollutant prediction based on azure machine learning. *Sensors (Switzerland)*, *18*. https://doi.org/10.3390/s18040930

Kähkönen, H., Lallukka, H., Linnainmaa, M., Aho, P., Mäkelä, E., Junttila, S., Oksa, P., & Nynäs, P. (2019). *Asbestos risk management guidelines for mines*.

Kakaç, S., & Yener, Y. (1995). *Convective Heat Transfer* (Segunda Ed). CRC Press.

Kalantari, H., & Ghoreishi-Madiseh, S. A. (2019). Study of mine exhaust heat recovery system with coupled heat exchangers. *Energy Procedia*, *158*, 3976–3981. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.844

Kays, W. M. (1980). *Convective HEAT and MASS transfer* (Segunda ed). McGraw Hill.

Kiusalaas, J. (2010). *Numerical Methods in Engineering with Python* (Second Edi). Cambridge University Press.

Kurnia, J. C., Sasmito, A. P., & Mujumdar, A. S. (2014). CFD simulation of methane dispersion and innovative methane management in underground mining faces. *Applied Mathematical Modelling*, *38*, 3467–3484. https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.11.067

Kushnir, R., Ullmann, A., & Dayan, A. (2012). Thermodynamic and hydrodynamic response of compressed air energy storage reservoirs: A review. *Reviews in Chemical Engineering*, *28*, 123–148. https://doi.org/10.1515/revce-2012-0006

Kynoch, B. (2010). Mining heat. *Canadian Mining Journal*, *131*, 20–23.

Langtangen, H. P. (2011). *A Primer on Scientific Programming with Python* (Vol. 6). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-18366-9

Legates, D. R., & McCabe, G. J. (1999). Evaluating the use of 'goodness-of-fit' measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, *35*, 233–241. https://doi.org/10.1029/1998WR900018

Legates, D. R., & Mccabe, G. J. (2013). A refined index of model performance: A rejoinder. *International Journal of Climatology*, *33*, 1053–1056. https://doi.org/10.1002/joc.3487

Li, M., & Liu, Y. (2009). Underground coal mine monitoring with wireless sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks*, *5*, 1–29. https://doi.org/10.1145/1498915.1498916

Loy-Benitez, J., Vilela, P., Li, Q., & Yoo, C. K. (2019). Sequential prediction of quantitative health risk assessment for the fine particulate matter in an underground facility using deep recurrent neural networks. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *169*, 316–324. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.11.024

Lund, J. W. (2012). Direct heat utilization of geothermal energy. *Comprehensive Renewable Energy*, *7*, 171–188. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-087872-0.00707-1

Madiseh, S. A. G., Ghomshei, M. M., Hassani, F. P., & Abbasy, F. (2012). Sustainable heat extraction from abandoned mine tunnels: A numerical model. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, *4*, 1–16. https://doi.org/10.1063/1.4712055

Mainiero, R. J., Harris, M. L., & Rowland, J. H. (2007). Dangers of Toxic Fumes from Blasting. *Proceedings of the Annual Conference on Explosives and Blasting Technique*, *33*, 73.

Maliska, C. R. (2004). *Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional* (Segunda ed). LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora.

Mazarrón, F. R., Cid-Falceto, J., & Cañas, I. (2012). An assessment of using ground thermal inertia as passive thermal technique in the wine industry around the world. *Applied Thermal Engineering*, *33-34*, 54–61. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.09.010

Mohamed, T. (2021). *Geothermal energy* (N. E. Bassam, Ed.; Second Edi). https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821605-7.00022-2.

Mohammad, A., & Moridi, A. (2015). Underground Spaces Communication and Monitoring Systems integrated ZigBee and GIS 2 . Background of ZigBee and GIS system integration.

Montecinos, C., & Wallace, K. (2010). Equivalent roughness for pressure drop calculations in mine ventilation. *13th US/North American Mine Ventilation Symposium*, 225–230. https://doi.org/10.1080/13501781003756675

Montgomery, R., & McDowall, R. (2008). Sensors and Auxiliary Devices. *Fundamentals of HVAC Control Systems*, 106–159. https://doi.org/10.1016/b978-0-08-055233-0.00004-2

Moridi, M. A., Kawamura, Y., Sharifzadeh, M., Chanda, E. K., & Jang, H. (2014). An investigation of underground monitoring and communication system based on radio waves attenuation using ZigBee. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *43*, 362–369. https://doi.org/10.1016/j.tust.2014.05.011

Moridi, M. A., Sharifzadeh, M., Kawamura, Y., & Jang, H. D. (2018). Development of wireless sensor networks for underground communication and monitoring systems (the cases of underground mine environments). *Tunnelling and Underground Space Technology*, *73*, 127–138. https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.12.015

Morkun, V., Savytskyi, O., & Ruban, S. (2015). The use of heat pumps technology in automated distributed system for utilization of low-temperature energy of mine water and ventilation air. *Metallurgical and Mining Industry*, *7*, 118–121.

Muffler, P., & Cataldi, R. (1977). Methods for regional assessment of geothermal resources. *Geothermics*, *7*, 53–89.

Munsen, B. R., Okiishi, T. H., Huebsch, W. W., & Rothmayer, A. P. (2013). *Fluid Mechanics* (7th edition). John Wiley & Sons.

Nam, K. J., Heo, S. K., Li, Q., Loy-Benitez, J., Kim, M. J., Park, D. S., & Yoo, C. K. (2020). A proactive energy-efficient optimal ventilation system using artificial intelligent techniques under outdoor air quality conditions. *Applied Energy*, *266*, 114893. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114893

Novas, N., Gázquez, J. A., MacLennan, J., García, R. M., Fernández-Ros, M., & Manzano-Agugliaro, F. (2017). A real-time underground environment monitoring system for sustainable tourism of caves. *Journal of Cleaner Production*, *142*, 2707–2721. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.005

Pan, T., & Liu, X. (2011). Hybrid wireless communication system using ZigBee and WiFi technology in the coalmine tunnels. *Proceedings - 3rd International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, ICMTMA 2011*, *2*, 340–343. https://doi.org/10.1109/ICMTMA.2011.372

Pardo, J. M. F., & Guerrero, I. C. [Ignacio Cañas]. (2006). Subterranean wine cellars of Central-Spain (Ribera de Duero): An underground built heritage to preserve. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *21*, 475–484. https://doi.org/10.1016/j.tust.2005.07.004

Patankar, S. V. (1980). *Numerical heat transfer and fluid flow*. Hemisphere Publishing Corporation.

Patsa, E., Zyl, D. V., Zarrouk, S. J., & Arianpoo, N. (2014). Geothermal Energy in Mining Developments : Synergies and Opportunities Throughout a Mine ' s Operational Life Cycle.

Pickrell, J. A. (2009). *Radiation and Health Effects*. https://doi.org/10.1016/B978-012374484-5.00028-6

Pope, S. B. (2000). *Turbulent Flows*. Cambridge University Press.

Preene, M., & Younger, P. L. (2014). Can you take the heat? – Geothermal energy in mining. *Mining Technology*, *123*, 107–118. https://doi.org/10.1179/1743286314Y.0000000058

Prno, J. (2013). An analysis of factors leading to the establishment of a social licence to operate in the mining industry. *Resources Policy*, *38*, 577–590. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2013.09.010

Prosser, B. S., & Wallace, K. G. (1999). Practical values of friction factors. *Proceedings of the 8th US Mine Ventilation Symposium*, 1–6.

Pursall, B. R. (1960). *Ventilation planning* (London). Clave-Hume Press.

Ranjith, P. G., Zhao, J., Ju, M., Silva, R. V. D., Rathnaweera, T. D., & Bandara, A. K. (2017). Opportunities and Challenges in Deep Mining: A Brief Review. *Engineering*, *3*, 546–551. https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.04.024

Reddy, J. N. (1993). *An Introduction to the Finite Element Method* (2nd edition). McGraw-Hill.

Reverter, F. (2018). *Interfacing sensors to microcontrollers: A direct approach* (Vol. 1). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102055-5.00002-4

Rieutord, M. (2015). *Fluid Dynamics*. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09351-2

Rodríguez, R., & Díaz, M. B. (2009). Analysis of the utilization of mine galleries as geothermal heat exchangers by means a semi-empirical prediction method. *Renewable Energy*, *34*, 1716–1725. https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.12.036

Roghanchi, P., Kocsis, K. C., Danko, G., & Powell, A. (2017). Underground climatic monitoring and modeling: Are we missing something? *Quality - Access to Success*, *18*, 133–139.

Rossouw, D. J. (2016). *Chapter 6 - Point Temperature Measurements*. Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809731-1/00006-X

Roteiro para a Neutralidade Carbónica. (2018).

Saenz, C. (2019). Building legitimacy and trust between a mining company and a community to earn social license to operate: A Peruvian case study. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, *26*, 296–306. https://doi.org/10.1002/csr.1679

Sahu, P., Panigrahi, D. C., & Mishra, D. P. (2015). Evaluation of effect of ventilation on radon concentration and occupational exposure to radon daughters in low ore grade underground uranium mine. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, *303*, 1933–1941. https://doi.org/10.1007/s10967-014-3687-8

Sas, J., Osvald, M., Ramalho, E., & Matos, J. (2018). Combined study of mineral deposits and deep geothermal for energy production or urban heating-comparison between the Portuguese (Neves-Corvo) and the Hungarian (Recsk) case studies. *Central European Geology*, *61*, 118–135. https://doi.org/10.1556/24.61.2018.07

Sbarba, H. (2012). Heat recovery systems in underground mine ventilation systems and novel mine cooling systems, 165.

Sbarba, H. D., Fytas, K., & Paraszczak, J. (2012). Economics of exhaust air heat recovery systems for mine ventilation. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, *26*, 185–198. https://doi.org/10.1080/17480930.2012.710085

Schaefli, B., & Gupta, H. V. [Hoshin V.]. (2007). Do Nash values have value? *Hydrological Processes*, *21*, 2075–2080. https://doi.org/10.1002/hyp.6825

Schobeiri, M. T. (2010). *Fluid Mechanics for Engineers*. https://doi.org/10.1007/978-3-642-11594-3

Shalimov, A. V. (2011). Numerical modeling of air flows in mines under emergency state ventilation. *Journal of Mining Science*, *47*, 807–813. https://doi.org/10.1134/s106273914706013x

Shames, I. H. (1991). *Mecânica dos fluidos* (E. Blucher, Ed.; Vol. 1: Pr).

Shaw, C. T. (1992). *Using computational fluid dynamics*. Prentice Hall.

Sierra, C. (1989). *Mine ventilation* (Vol. 237). Springer. https://doi.org/10.1201/9781003211327-15

Soares, C. (2015). *Controls, Instrumentation, and Diagnostics (CID): Notes on the proceedings of the panel session for ECMS as they relate to gas turbine component life extension, 1985 through 2003, C. Soares, chair and organizer.Personal operations case studies/notes: turb*. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-410461-7.00009-2

Song, H. (2018). *Engineering fluid mechanics*. https://doi.org/10.1007/9789811301735

Spurk, J. H., & Aksel, N. (2020). *Fluid Mechanics* (Third Edit). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30259-7

Starfield. (1969). Rapid Method of Calculating Temperature Increases Along Mine Airways. *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, *70*, 77–83.

Sundararajan, D. (s.d.). *Sundararajan, D. Fourier Analysis, A Signal Processing Approach. Singapore: Springer Singapore Pte, 2018, pp*.

Swain, A., Bepari, M., Patnaik, N., & Sahu, H. B. (2018). Zigbee based wireless data acquisition system for underground mines-A feasibility study. *Proceedings - 2018 IEEE 21st International Symposium on Real-Time Computing, ISORC 2018*, 152–155. https://doi.org/10.1109/ISORC.2018.00031

Sylvestre. (2001). *Heating and Ventilation Study of Inco's Creighton Mine*. McGill University.

Sylvestre, M. J. G. (1999). *Heat and Ventilation Study of Inco's Creighton Mine*.

Tan, W., Wang, Q., Huang, H., Guo, Y., & Zhang, G. (2007). Mine fire detection system based on wireless sensor network. *Proceedings of the 2007 International Conference on Information Acquisition, ICIA*, 148–151. https://doi.org/10.1109/ICIA.2007.4295715

Thakur, P. (2018). *Advanced mine ventilation: Respirable coal dust, combustible gas and mine fire control*. https://doi.org/10.1016/C2014-0-04167-6

The European Comission. (2011). *The roadmap for transforming the EU into a competitive , low-carbon economy by 2050*.

The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). (1988). *Carcinogenic Effects of Exposure to Diesel Exhaust*. https://www.cdc.gov/niosh/docs/88-116/

Thrybom, L., Neander, J., Hansen, E., & Landernäs, K. (2015). Future challenges of positioning in underground mines. *IFAC-PapersOnLine*, *28*, 222–226. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.08.135

Thyagarajan, K. S. (2018). *Introduction to digital signal processing using MATLAB with application to digital communications*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76029-2

Tinti, F., Barbaresi, A., Benni, S., Torreggiani, D., Bruno, R., & Tassinari, P. (2014). Experimental analysis of shallow underground temperature for the assessment of energy efficiency potential of underground wine cellars. *Energy and Buildings*, *80*, 451–460. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.06.002

Torres, V. F. N. [Vidal F Navarro], Gama, C. D. D., & Singh, R. N. (2008). Mathematical modeling of thermal state in underground mining. *Acta Geodynam. Geomater.*, *5*, 341–349.

Torres, V. F. N. [Vidal Félix Navarro], & da Gama, C. D. (2005). *Engenharia Ambiental Subterrânea e Aplicações* (R. C. Villas-Bôas, Ed.). CETEM/CYTED/CNPq.

U. S. Department of Labor and Mine Safety and Health Administration. (2012). *Heat Stress in Mining*. https://www.msha.gov/sites/default/files/Alerts%20and%20Hazards/Heat%20Stress.pdf

Ulery, J. P. (2008). Explosion hazards from methane emissions related to geologic features in coal mines. *NIOSH*, 18.

van Dyke, M., & White, F. M. (1982). *An Album of Fluid Motion*. https://doi.org/10.1115/1.3241909

Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (1995). *An introduction to computational fluid dynamics. The Finite Volume Method*. Prentice Hall.

Wang, W., Zhang, C., Yang, W., Xu, H., Li, S., Li, C., Ma, H., & Qi, G. (2019). In situ measurements and CFD numerical simulations of thermal environment in blind headings of underground mines. *Processes*, *7*, 1–21. https://doi.org/10.3390/pr7050313

White, F. M. (2006). *Viscous Fluid Flow* (Terceira E). McGraw Hill.

Widiatmojo, A., Sasaki, K., Widodo, N. P., Sugai, Y., Sinaga, J., & Yusuf, H. (2013). Numerical simulation to evaluate gas diffusion of turbulent flow in mine ventilation system. *International Journal of Mining Science and Technology*, *23*, 349–355. https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2013.05.004

Xiaoqing, S., Ming, J., & Peiwen, X. (2018). ANALYSIS of the THERMOPHYSICAL PROPERTIES and INFLUENCING FACTORS of VARIOUS ROCK TYPES from the GUIZHOU PROVINCE. *E3S Web of Conferences*, *53*. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185303059

Xu, G., Luxbacher, K. D., Ragab, S., Xu, J., & Ding, X. (2017). Computational fluid dynamics applied to mining engineering: a review. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, *31*, 251–275. https://doi.org/10.1080/17480930.2016.1138570

Zhang, J. X., & Hoshino, K. (2019). *Mechanical transducers: Cantilevers, acoustic wave sensors, and thermal sensors*. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-814862-4.00006-5

Zhu, S., Wu, S., Cheng, J., Li, S., & Li, M. (2015). An underground air-route temperature prediction model for ultra-deep coal mines. *Minerals*, *5*, 527–545. https://doi.org/10.3390/min5030508

Zienkiewicz, O. C. (2013). The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals. *The Finite Element Method: its Basis and Fundamentals*, iii. https://doi.org/10.1016/b978-1-85617-633-0.00020-4

Apêndice A - Filtragem das séries de temperatura da Primeira Campanha de Amostragem das Minas da Panasqueira

A1 Série n3

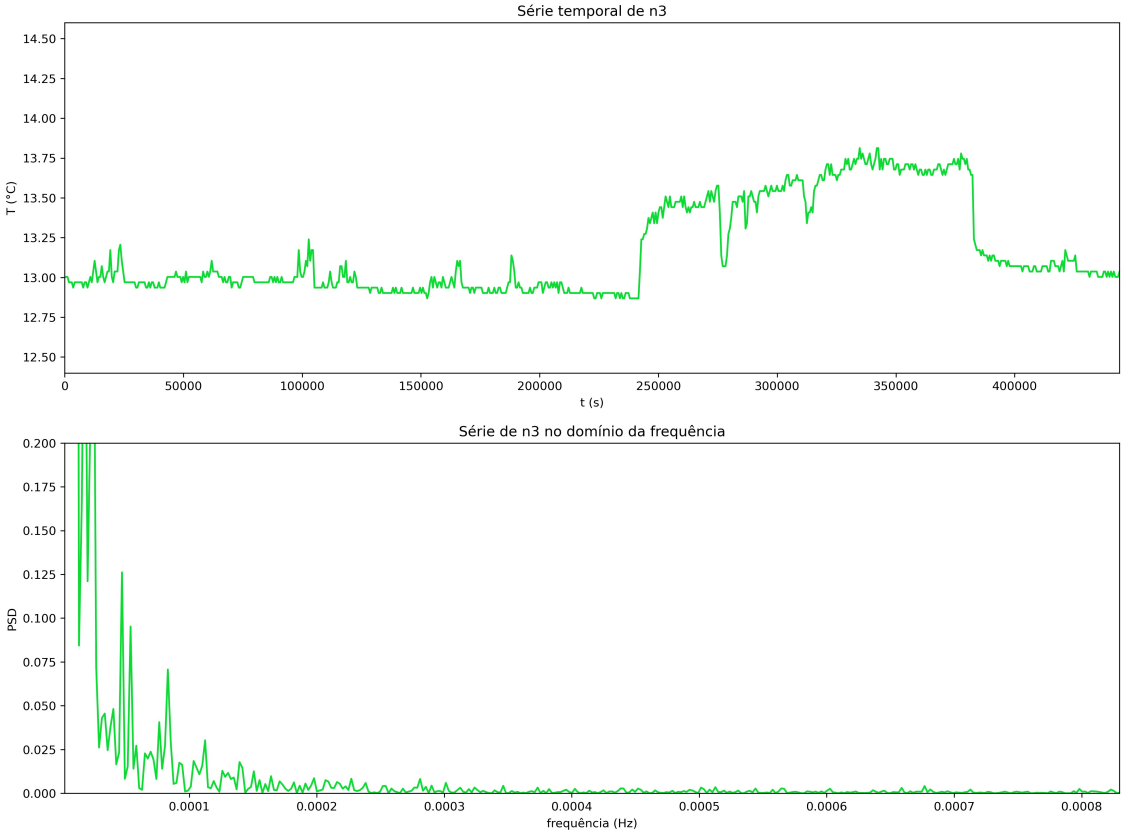


Figura A.1: Série de temperatura de n3 nos domínios do tempo e da frequência.

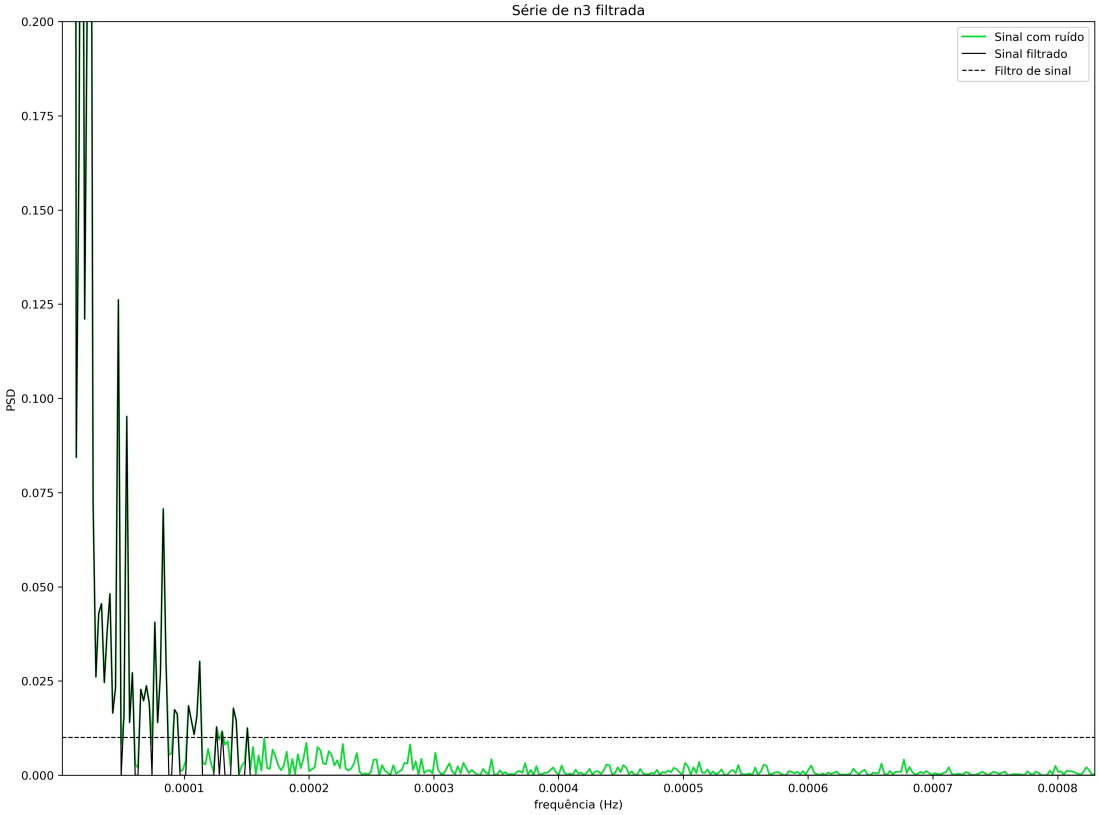
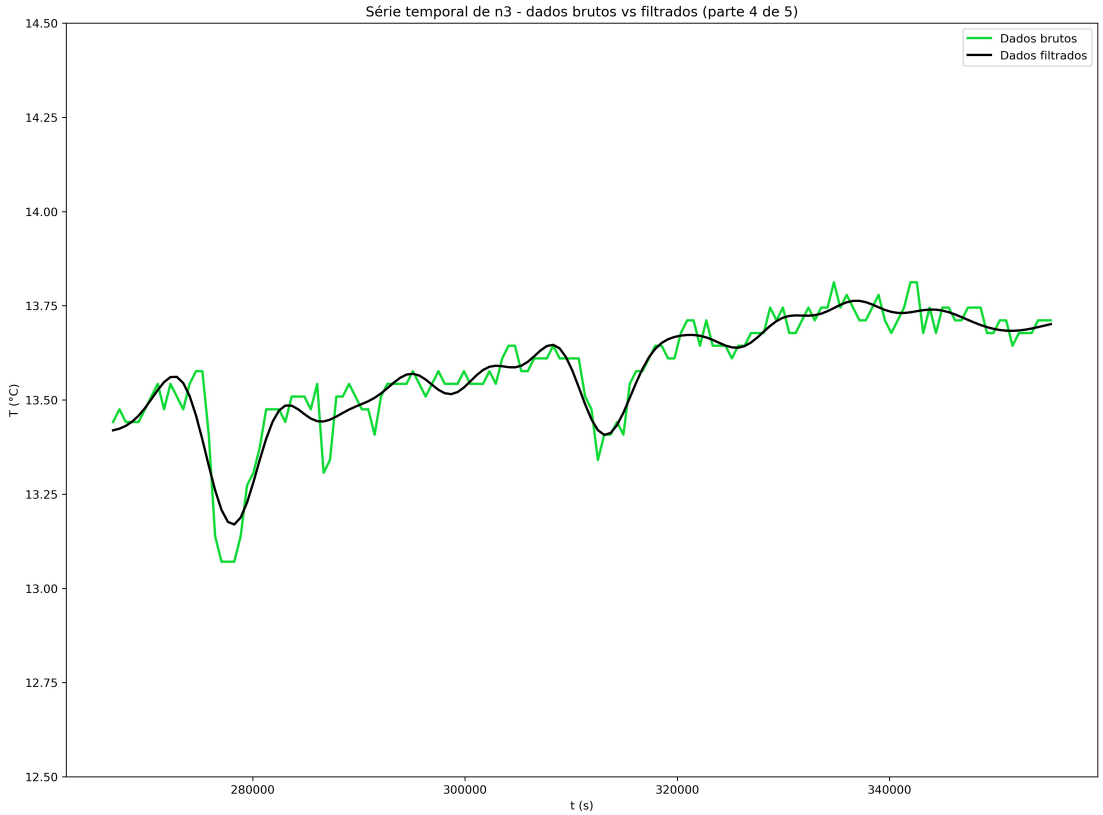


Figura A.2: Filtro do sinal no domínio da frequência.



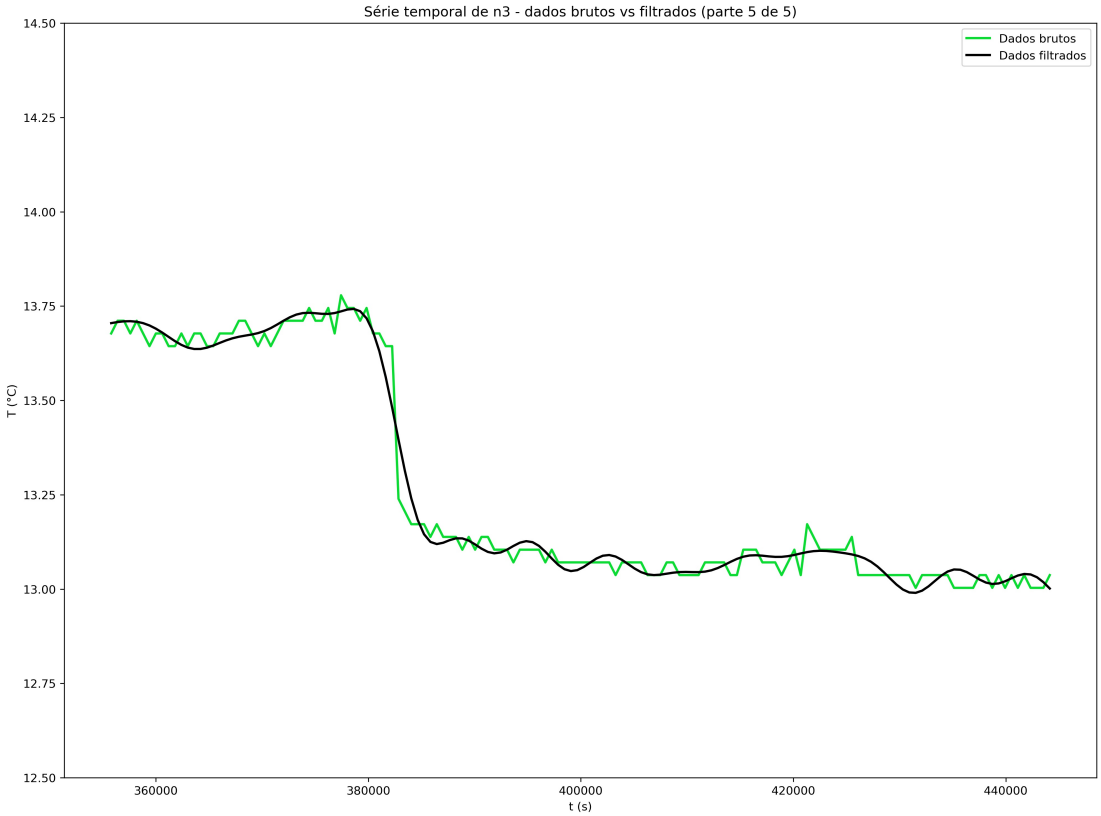


Figura A.3: Séries n3 bruta e filtrada.

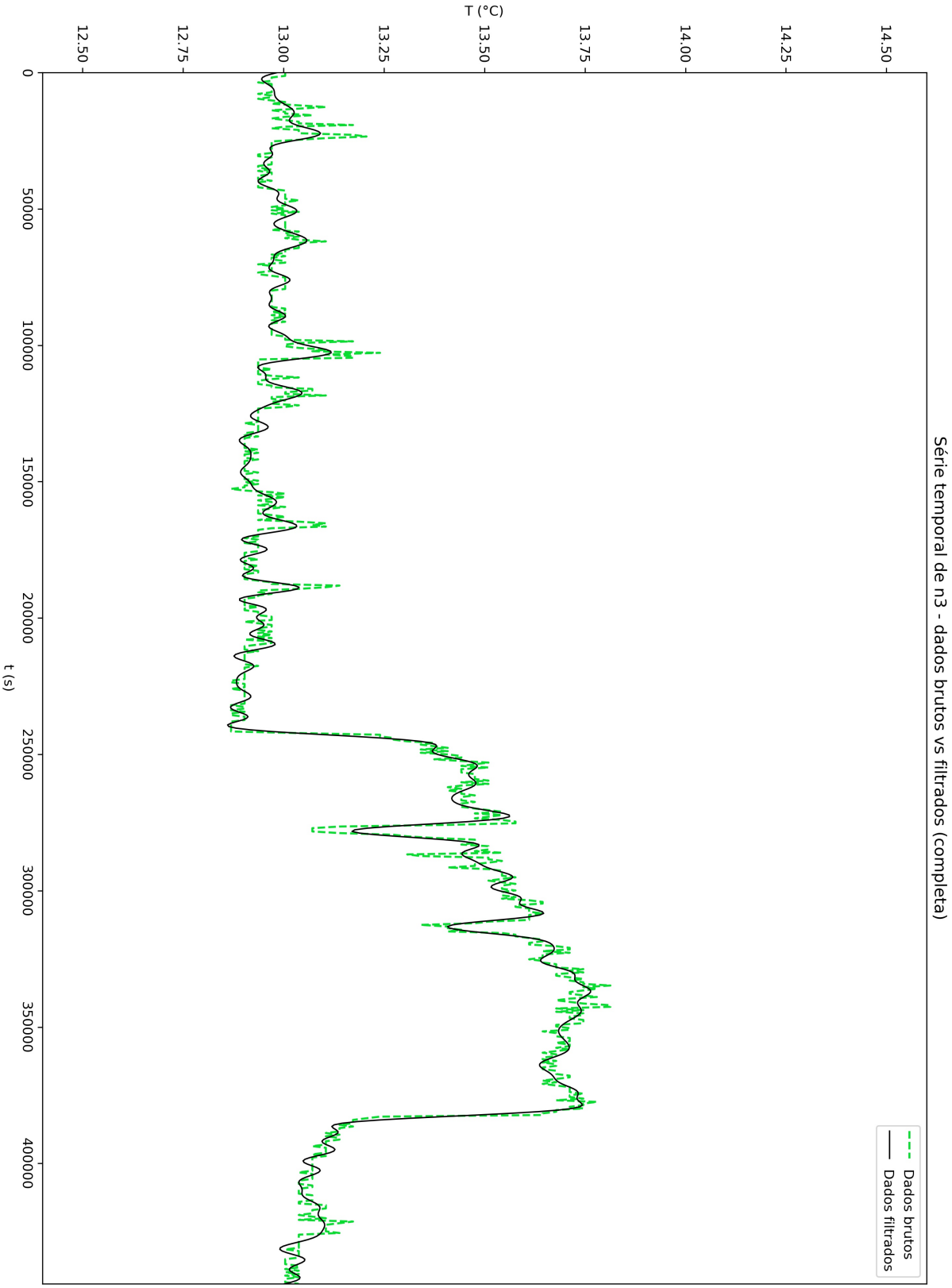


Figura A.4: Séries temporais completas de n3.

A2 Série n5

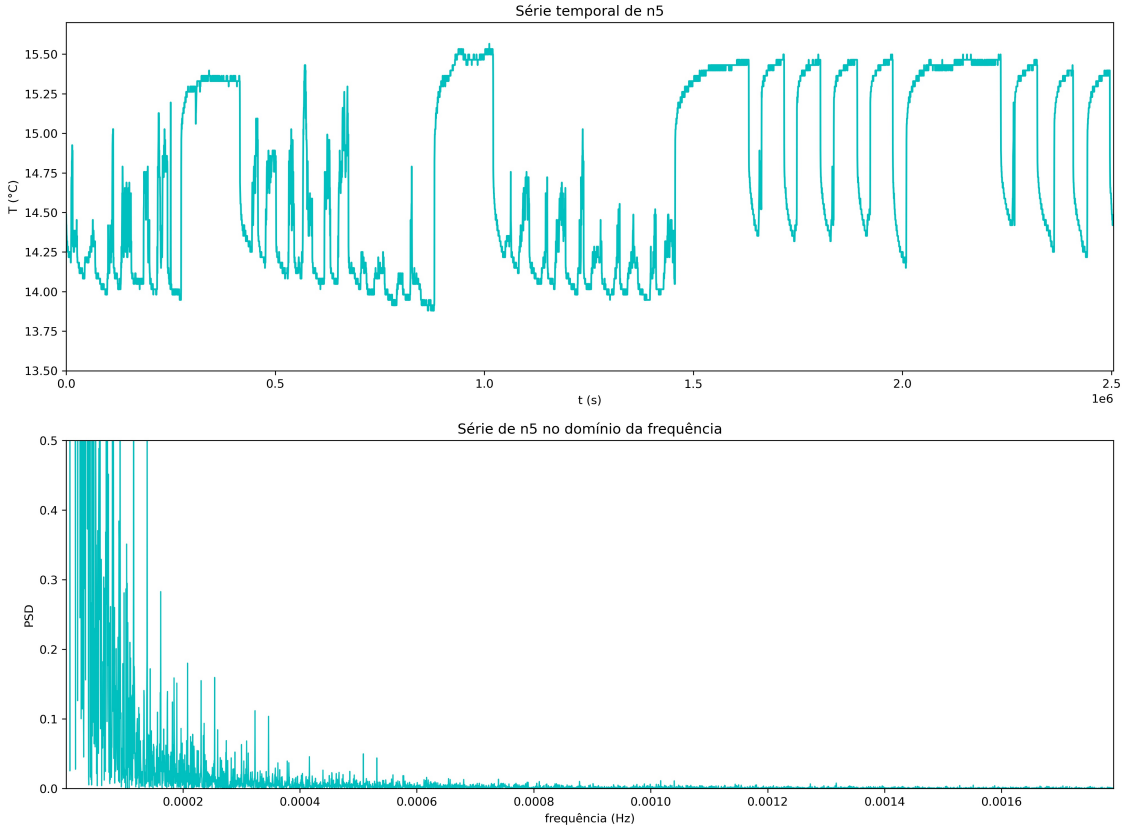


Figura A.5: Série de temperatura de n5 nos domínios do tempo e da frequência.

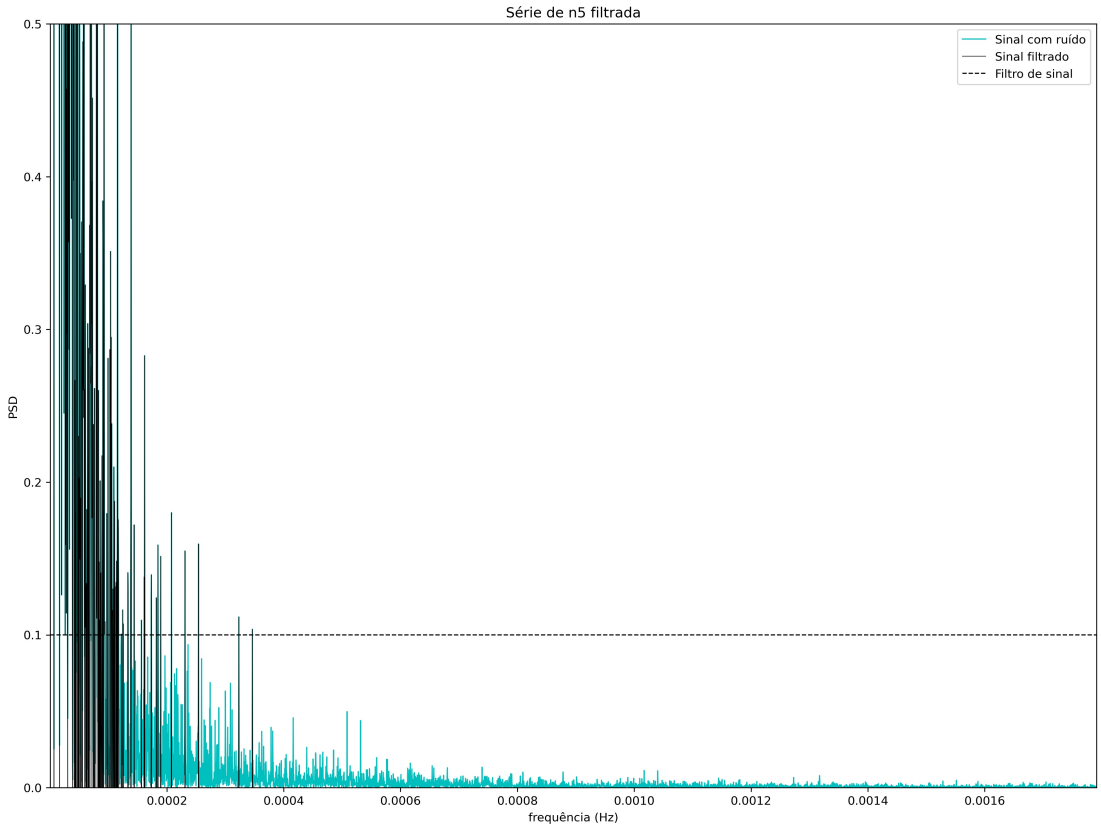


Figura A.6: Filtro do sinal no domínio da frequência.

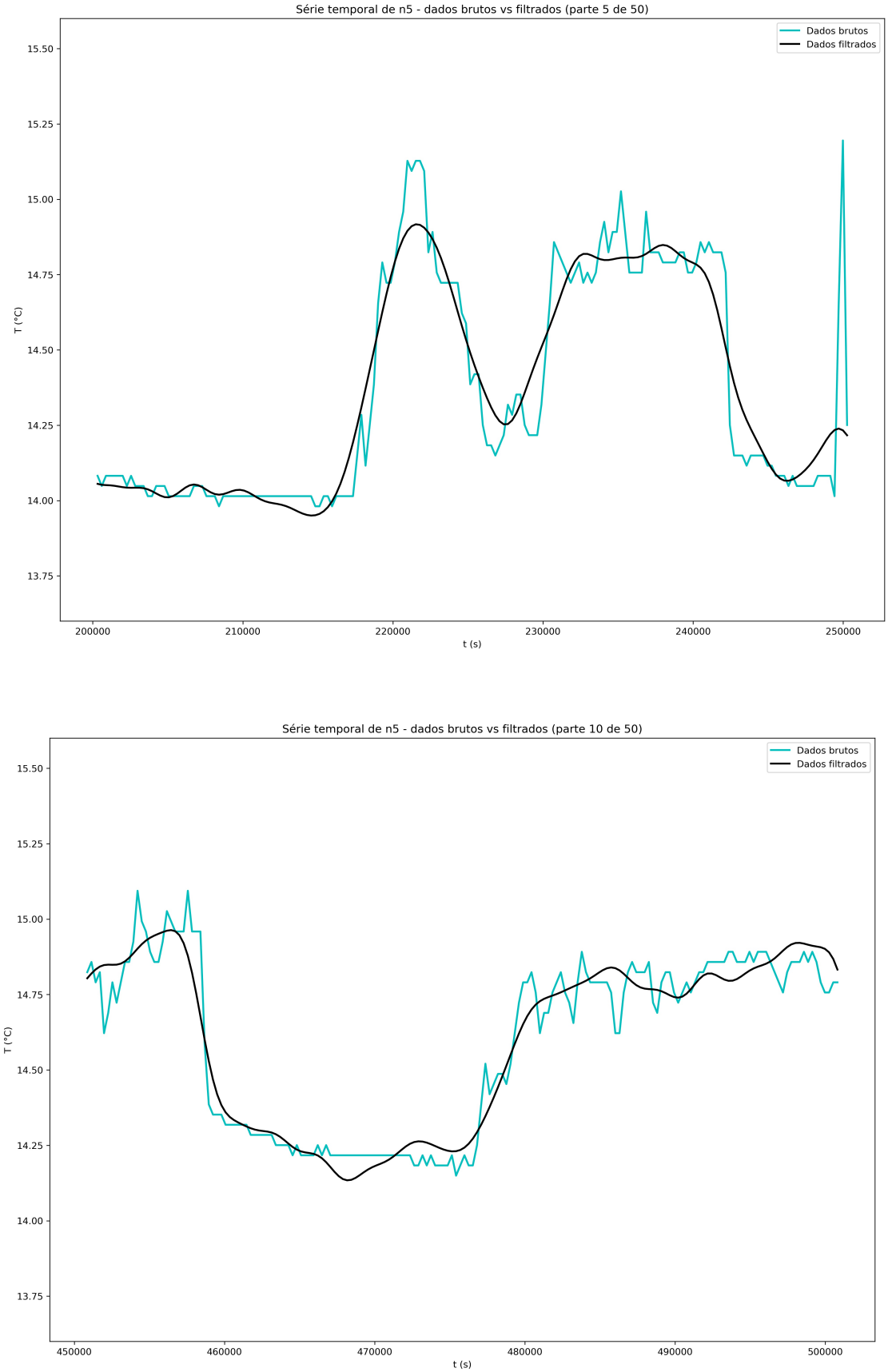


Figura A.7: Séries n5 bruta e filtrada.

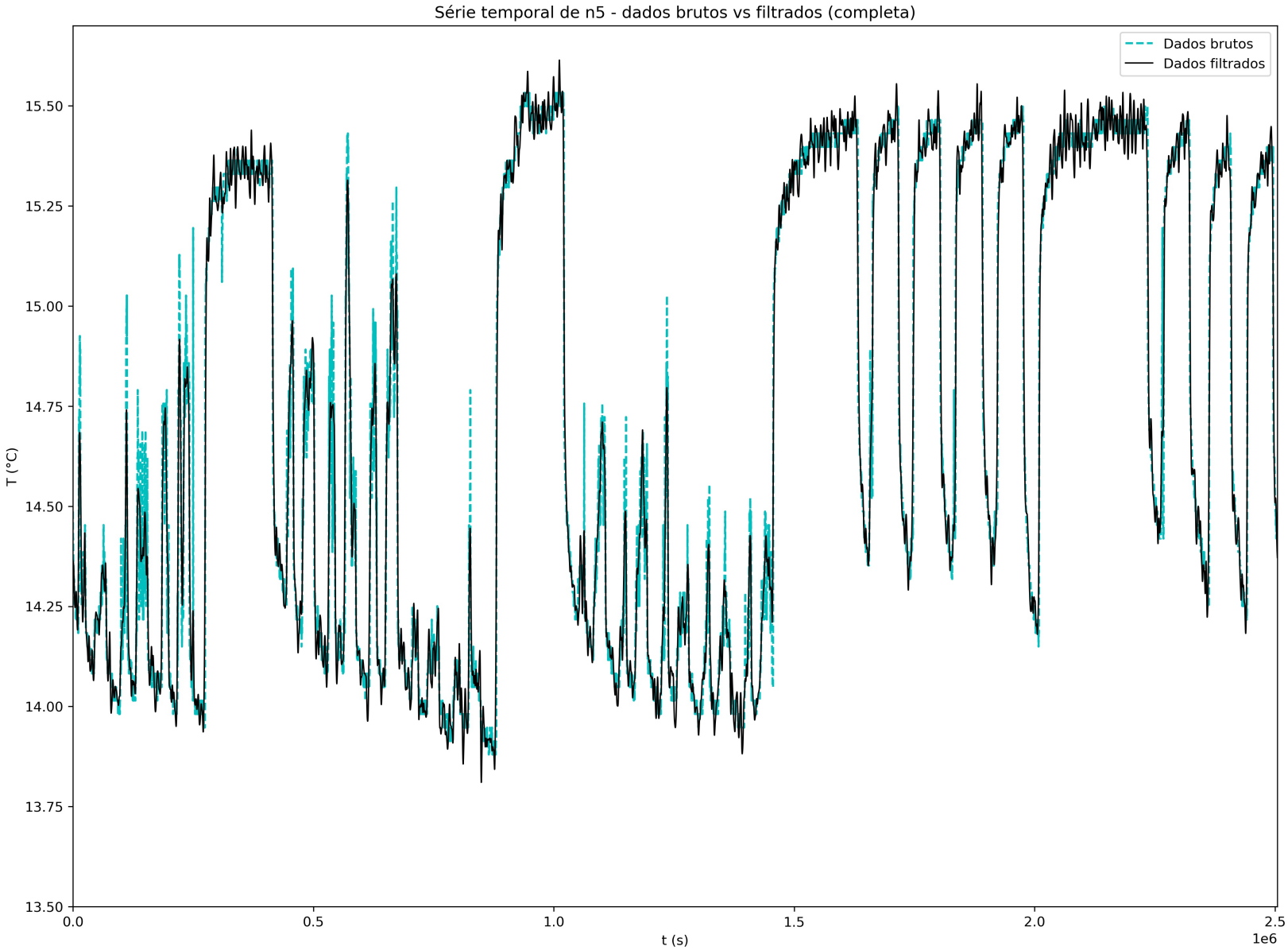


Figura A.8: Séries temporais completas de n5.

A3 Todas as séries filtradas

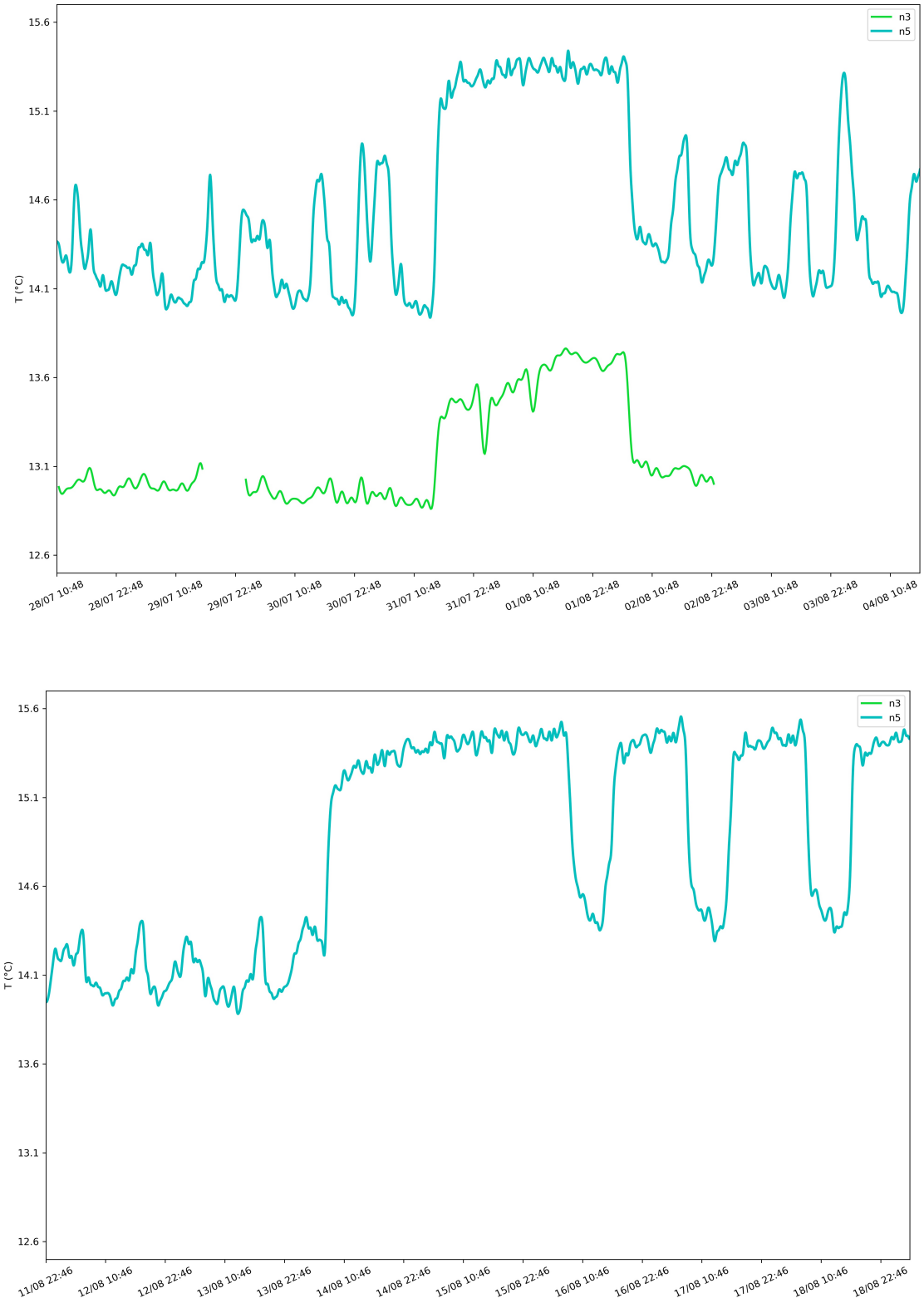


Figura A.9: Séries filtradas.

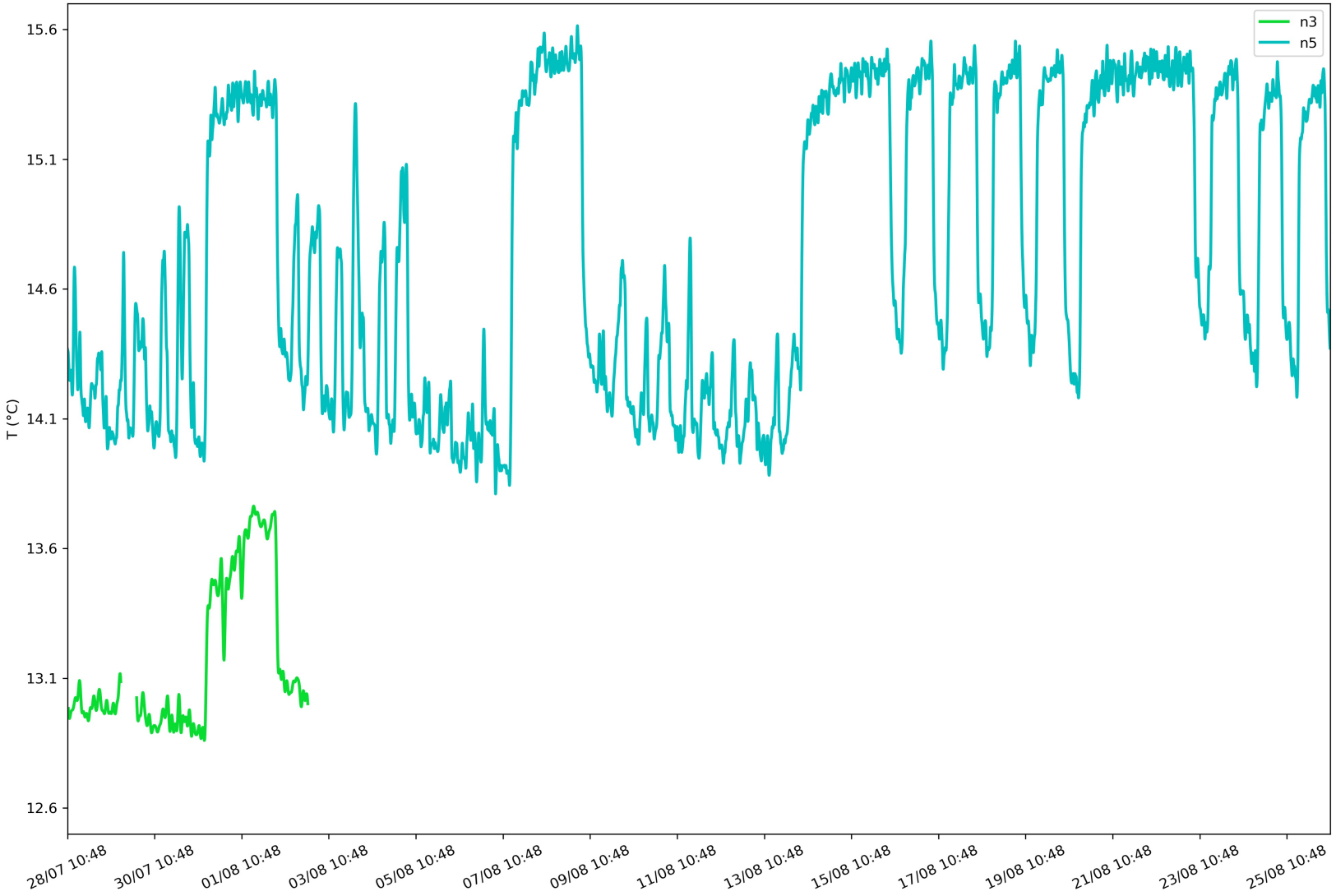


Figura A.10: Séries temporais filtradas completas.

Apêndice B - Filtragem das séries de temperatura da Segunda Campanha de Amostragem das Minas da Panasqueira

B1 Série n1

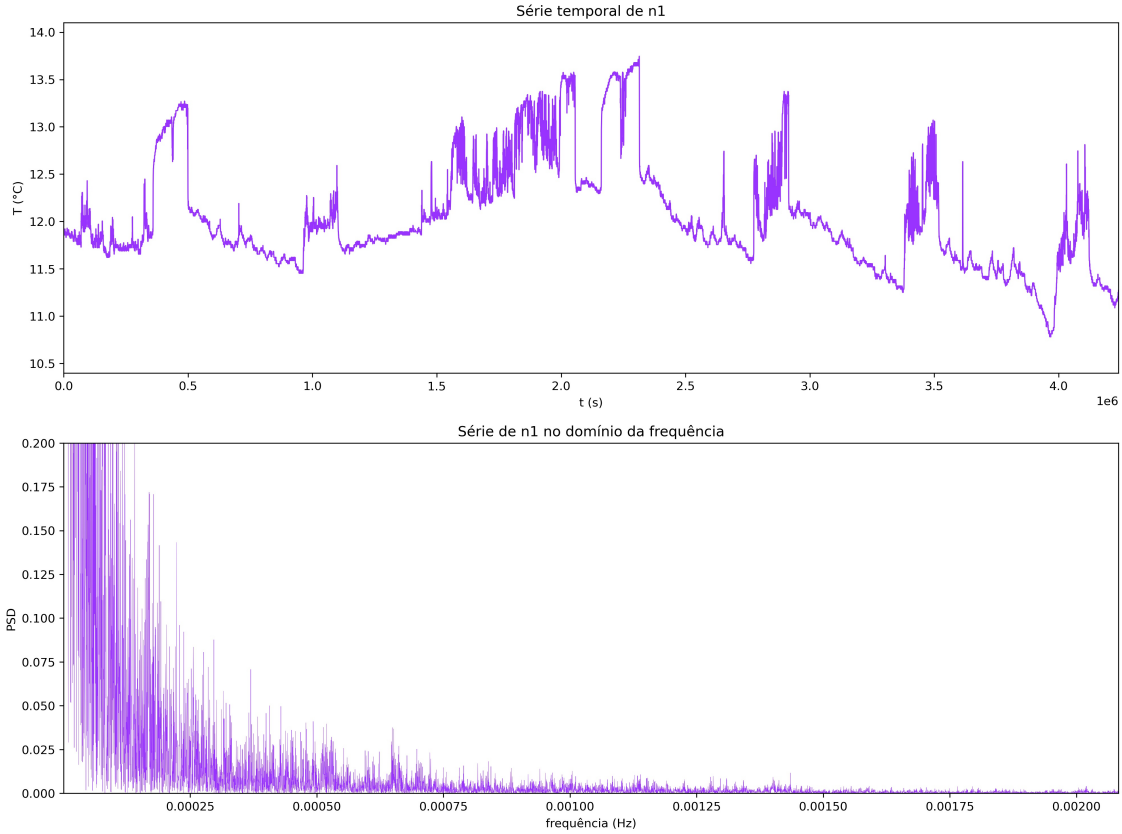


Figura B.1: Série de temperatura de n1 nos domínios do tempo e da frequência.

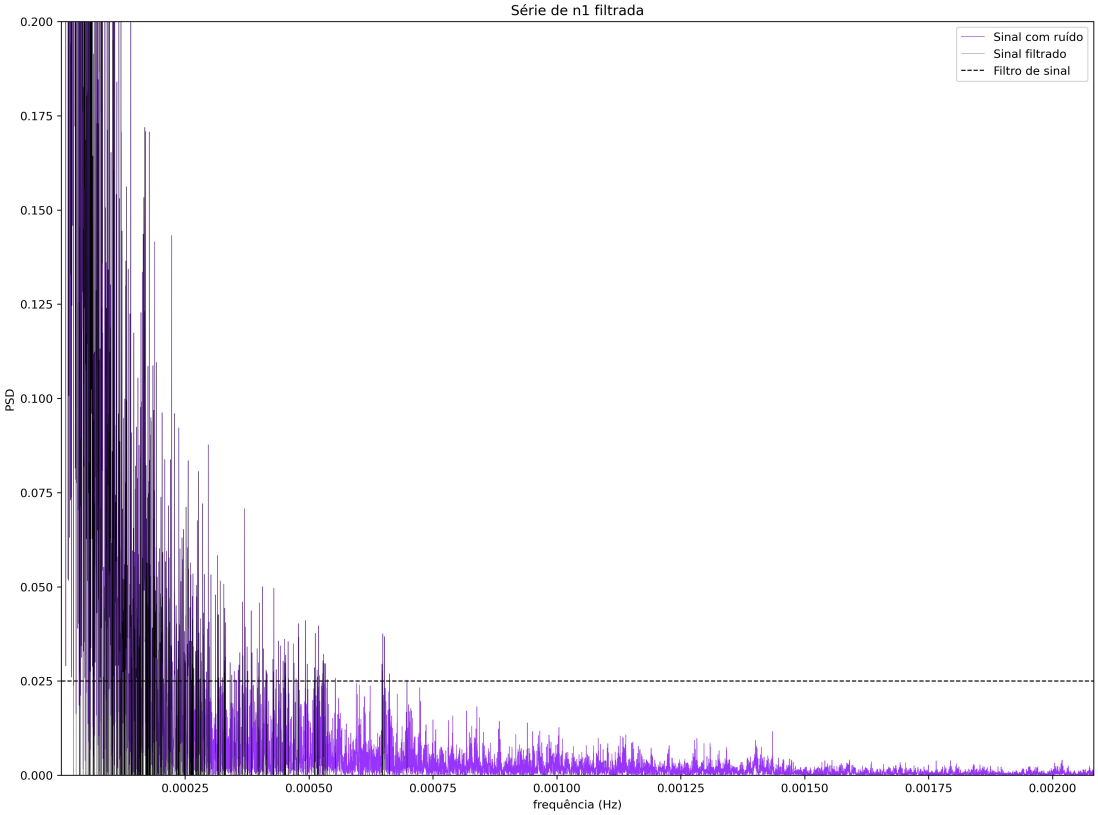
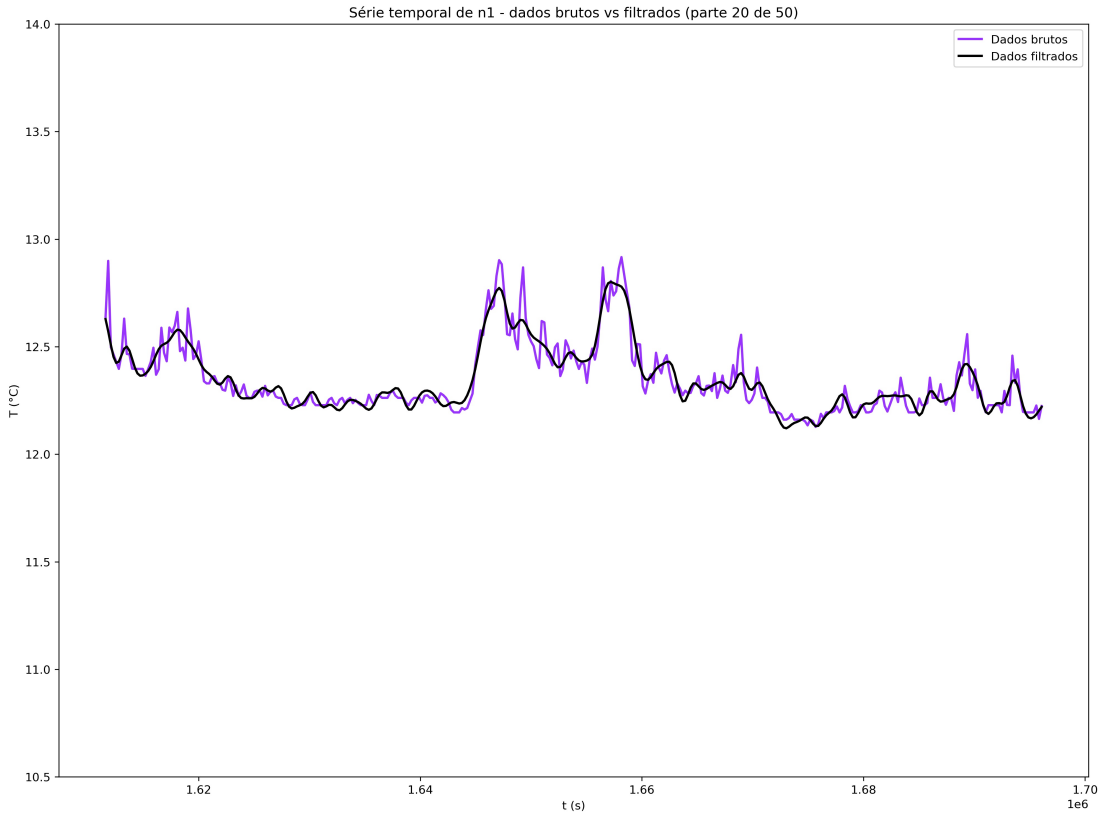


Figura B.2: Filtro do sinal no domínio da frequência.



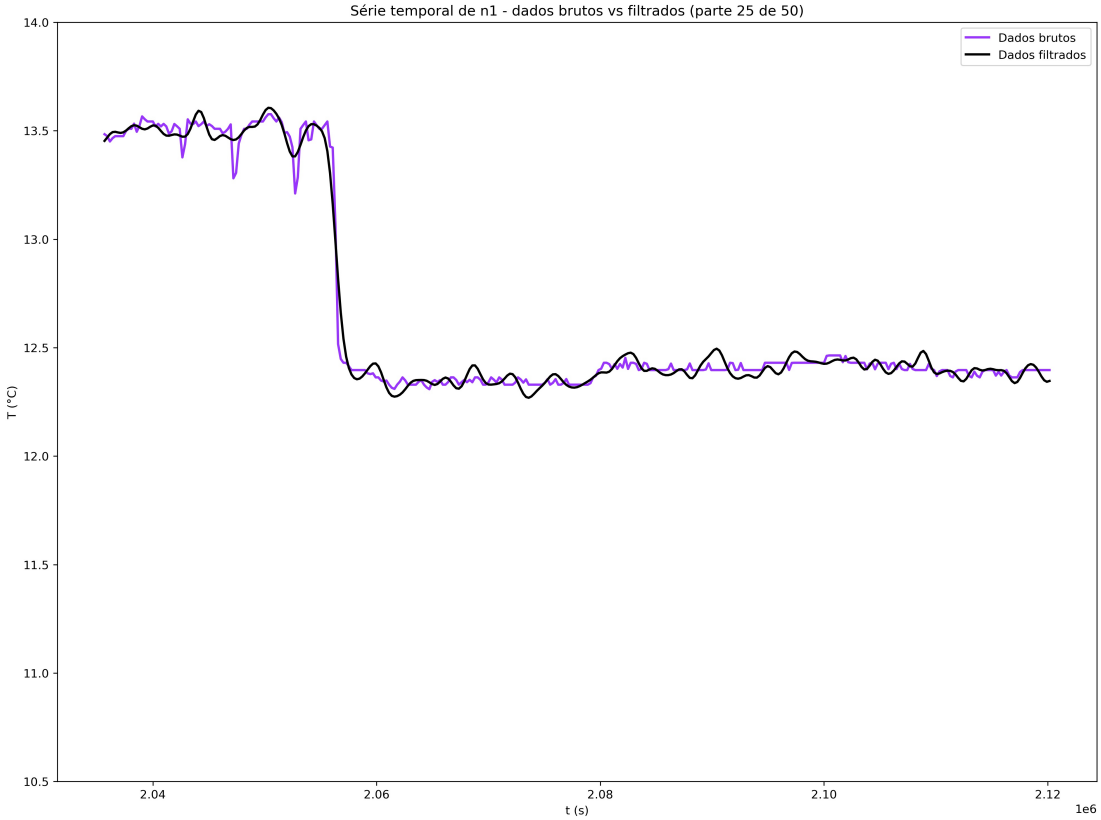


Figura B.3: Séries n1 bruta e filtrada.

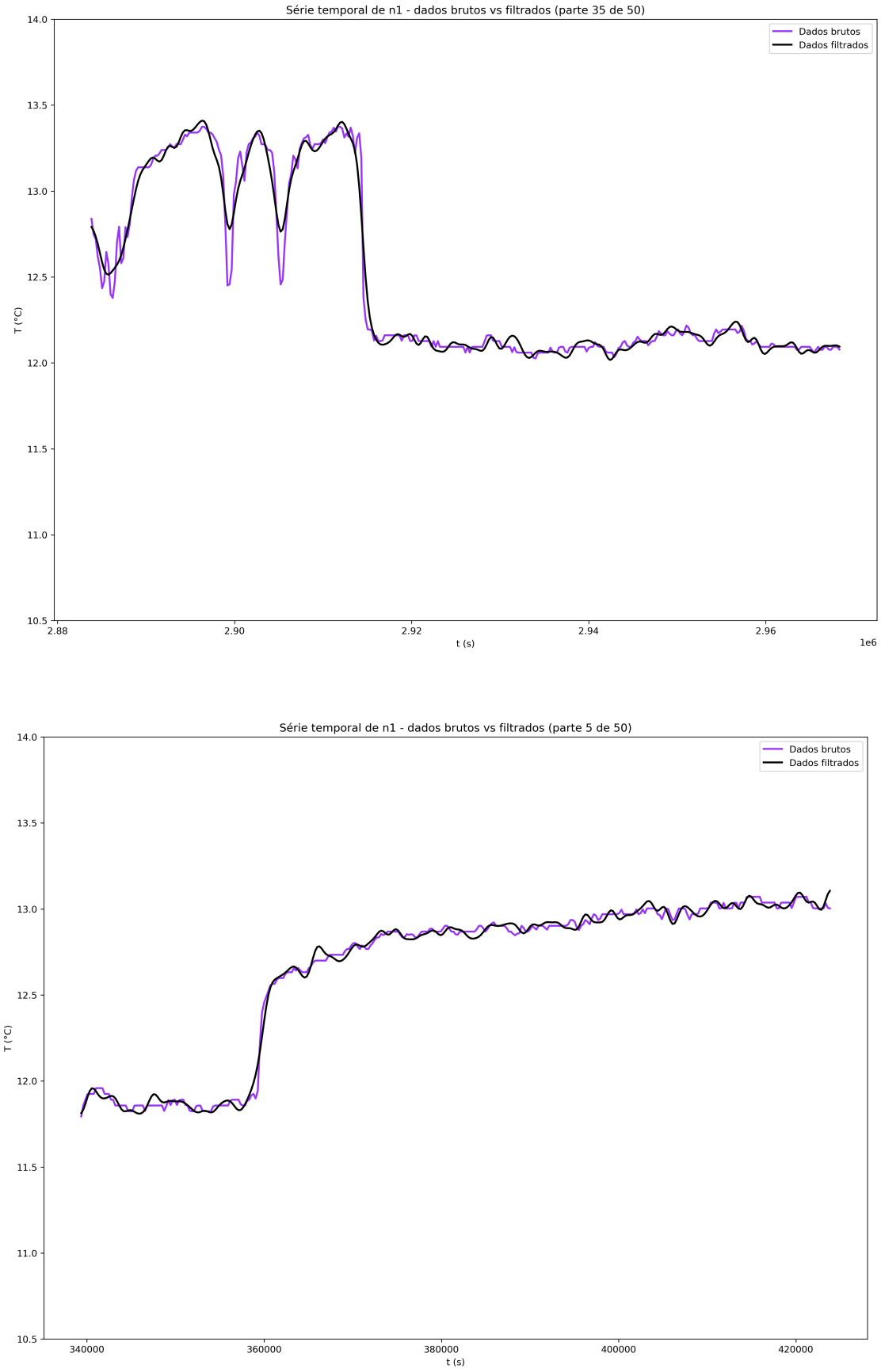


Figura B.4: Séries n1 bruta e filtrada.

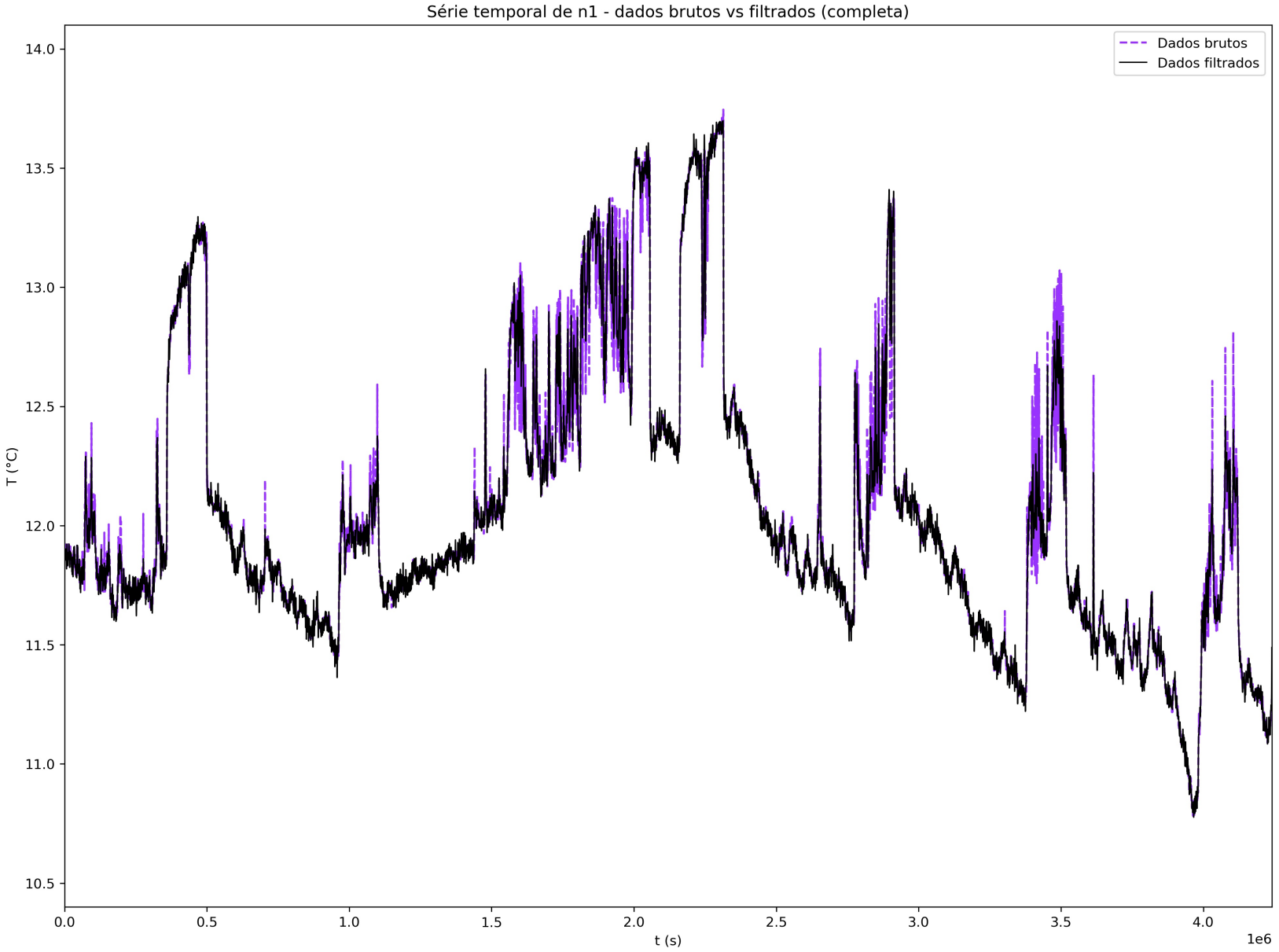


Figura B.5: Séries temporais completas de n1.

B2 Série n3

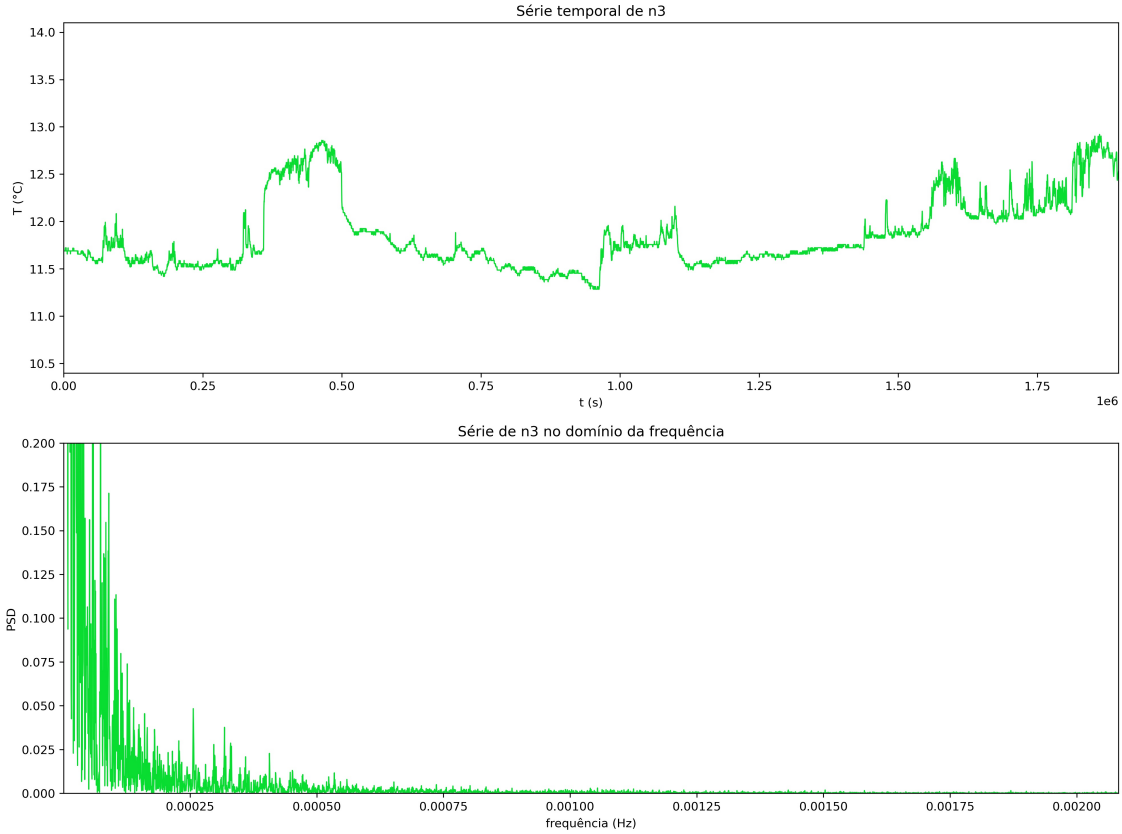


Figura B.6: Série de temperatura de n3 nos domínios do tempo e da frequência.

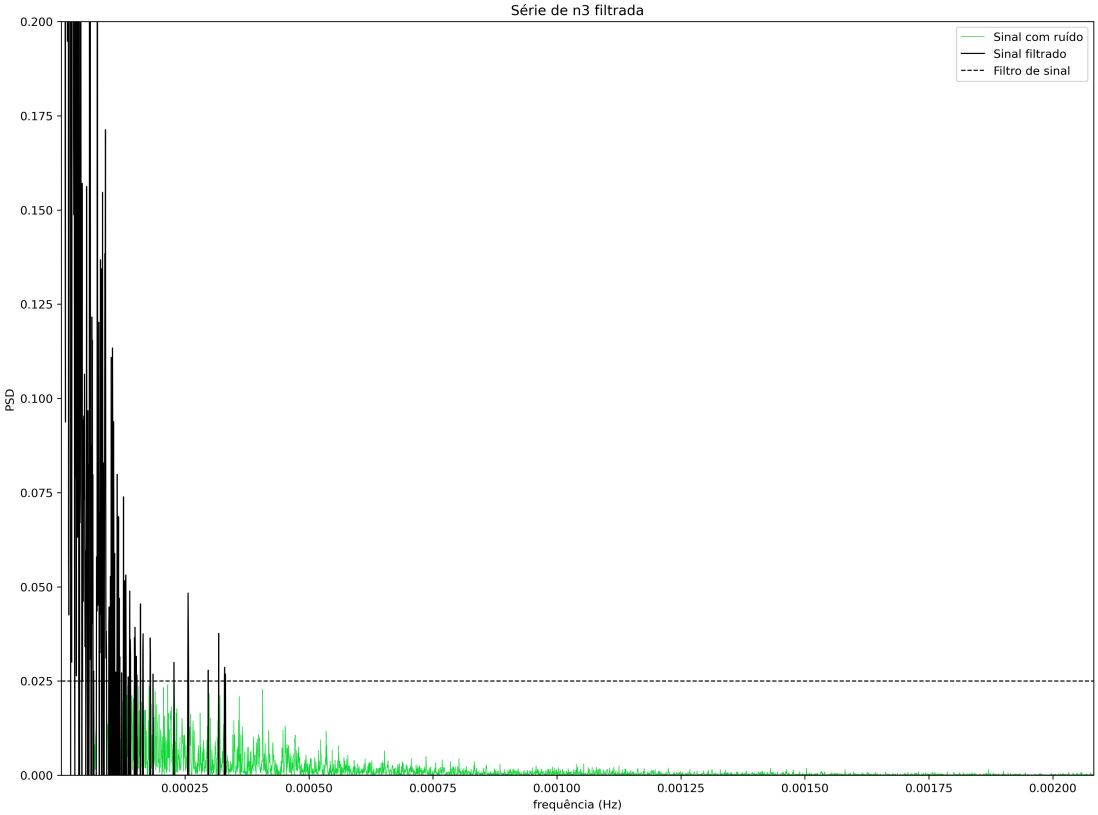
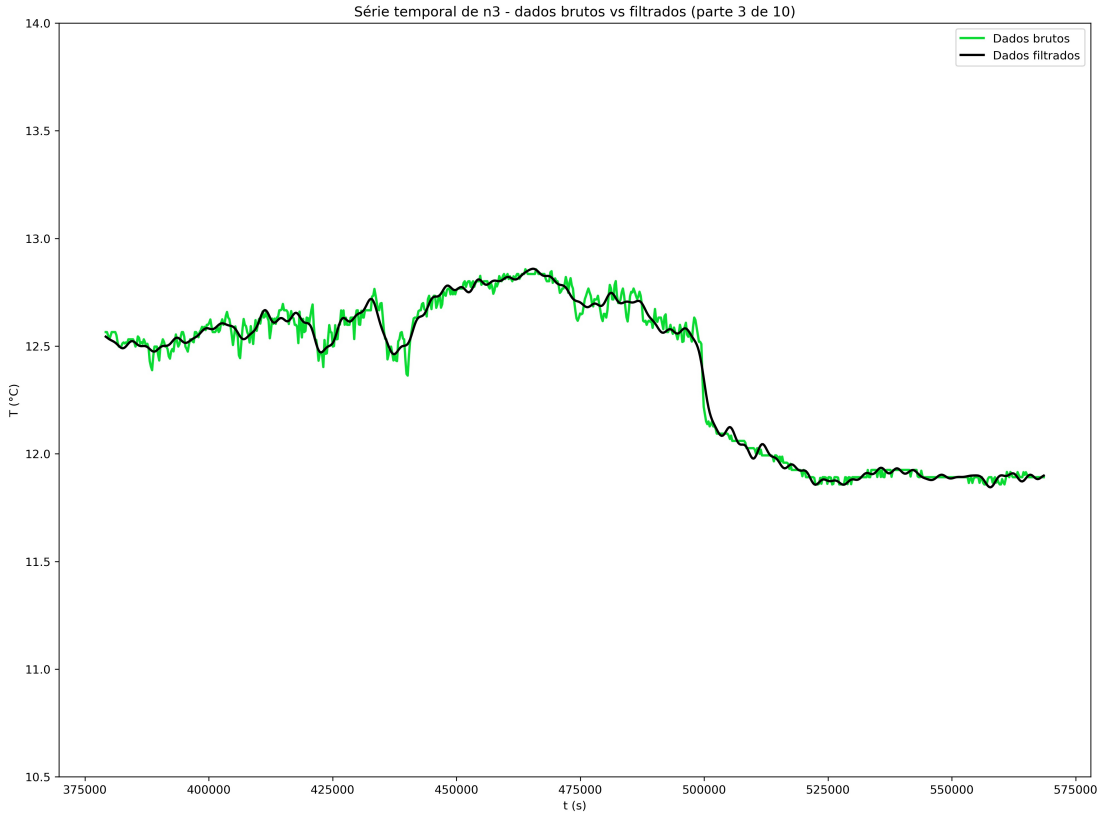


Figura B.7: Filtro do sinal no domínio da frequência.



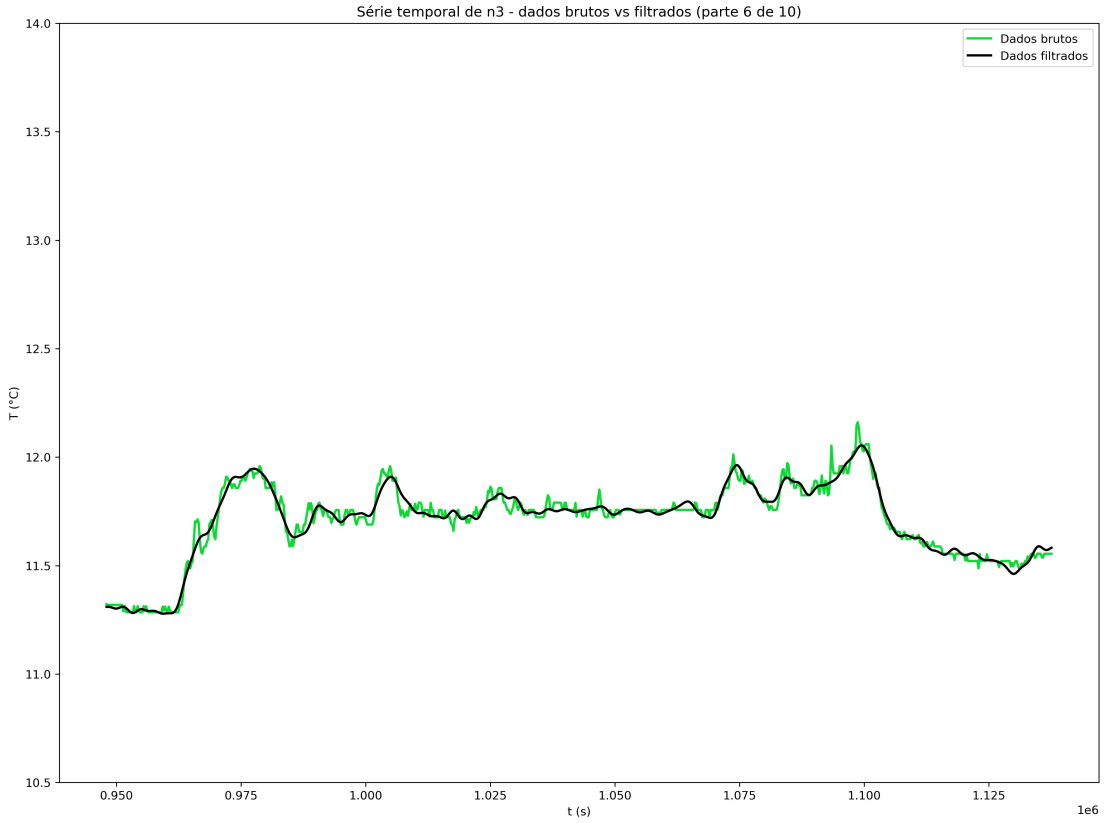


Figura B.8: Séries n3 bruta e filtrada.

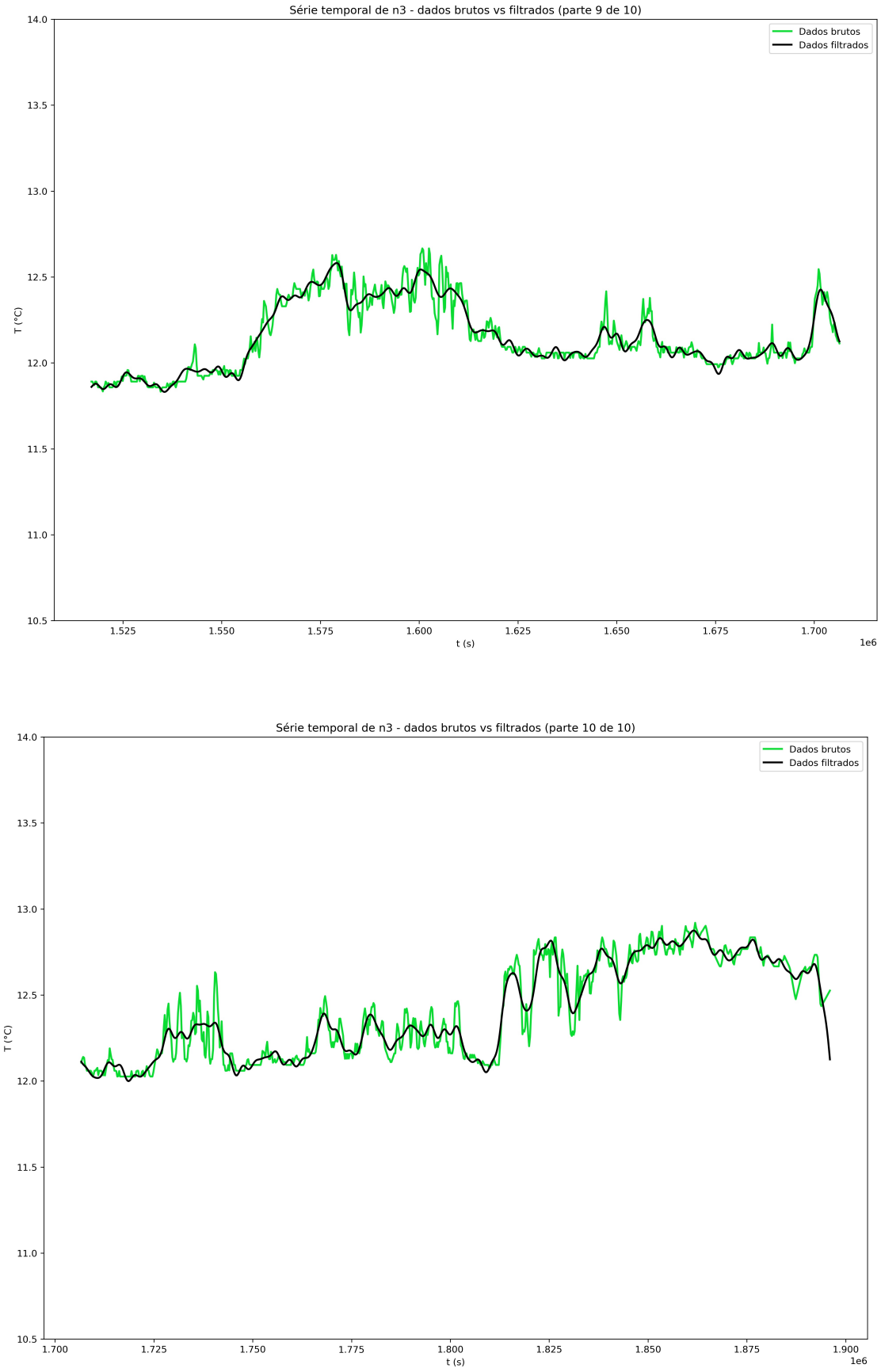


Figura B.9: Séries n3 bruta e filtrada.

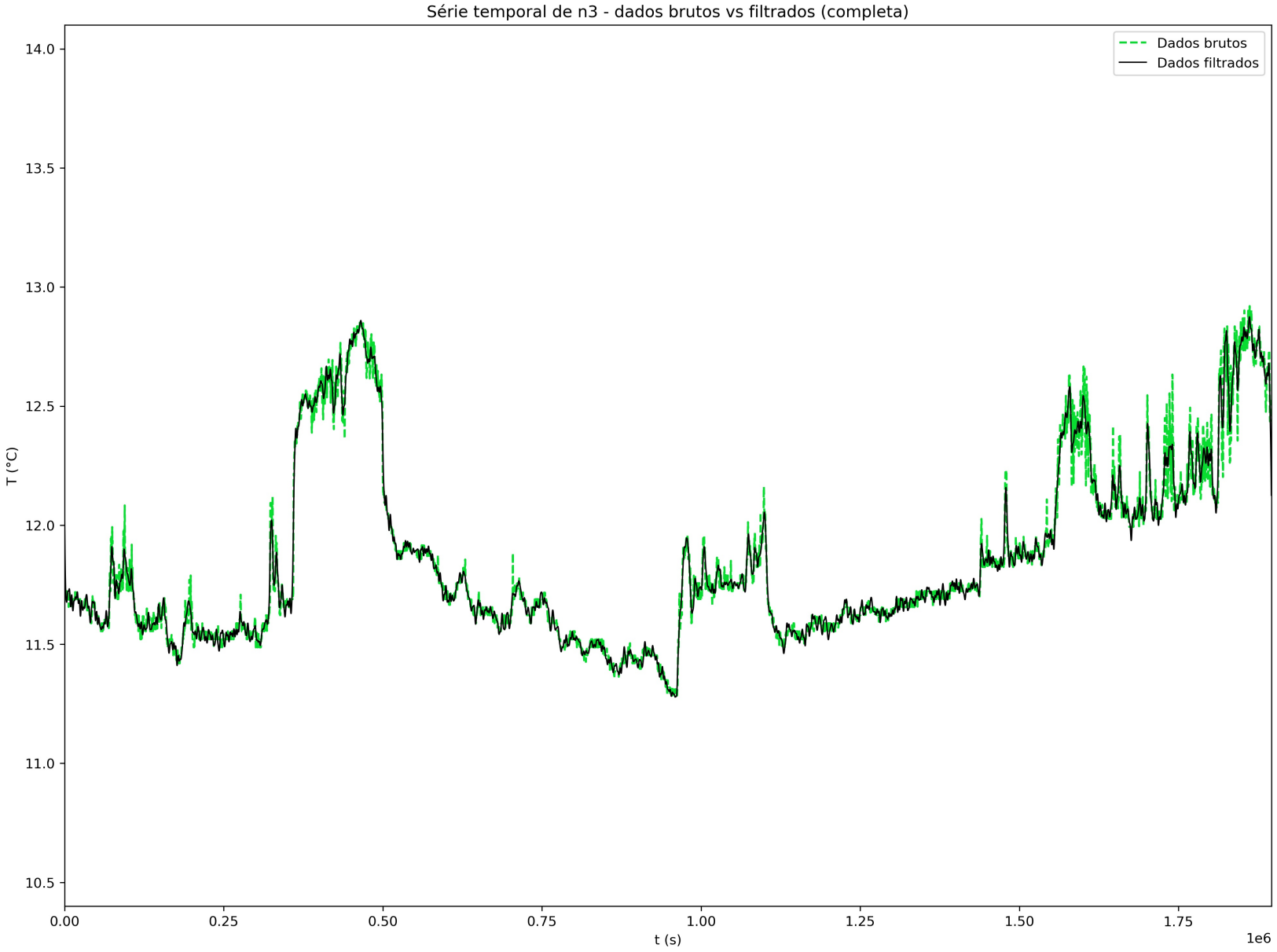


Figura B.10: Séries temporais completas de n3.

B3 Série n4

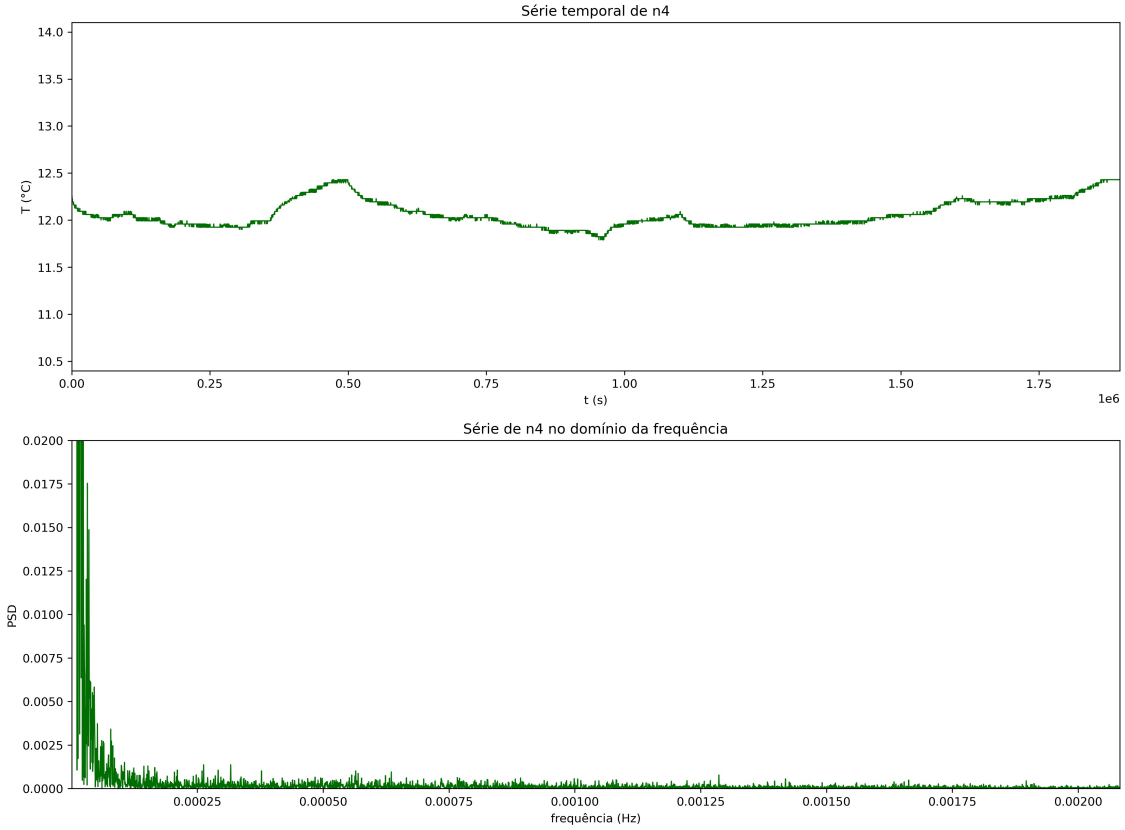


Figura B.11: Série de temperatura de n4 nos domínios do tempo e da frequência.

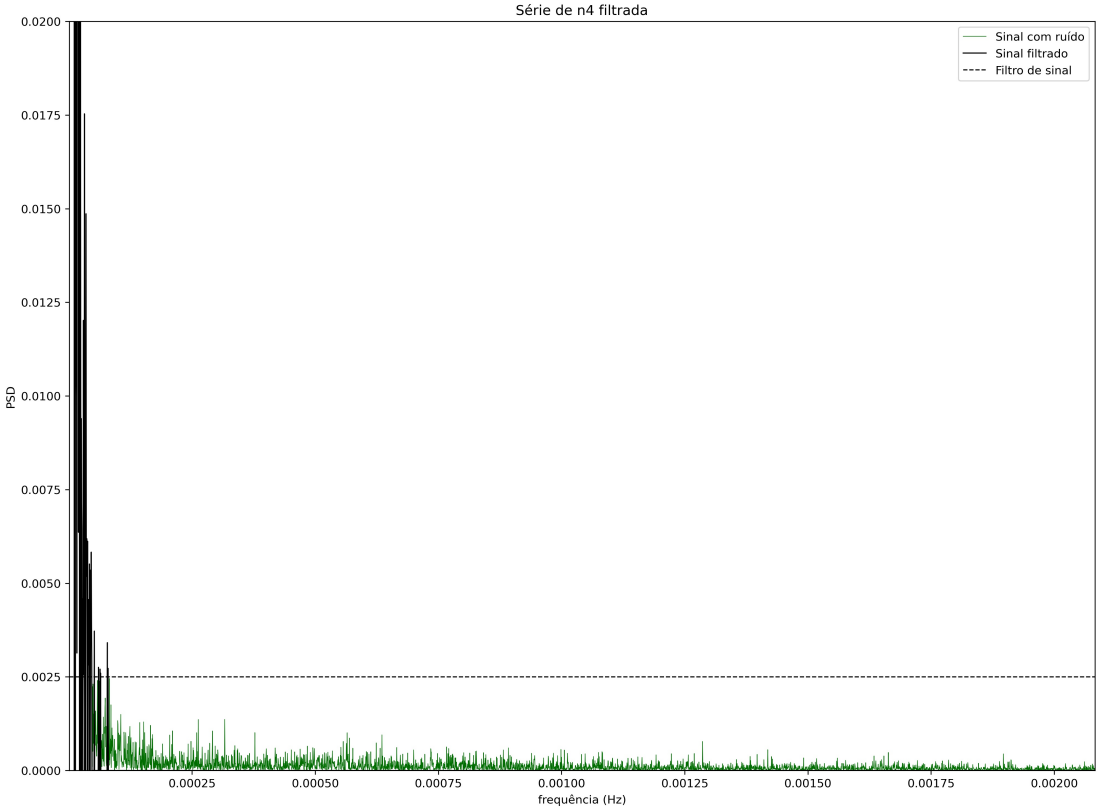
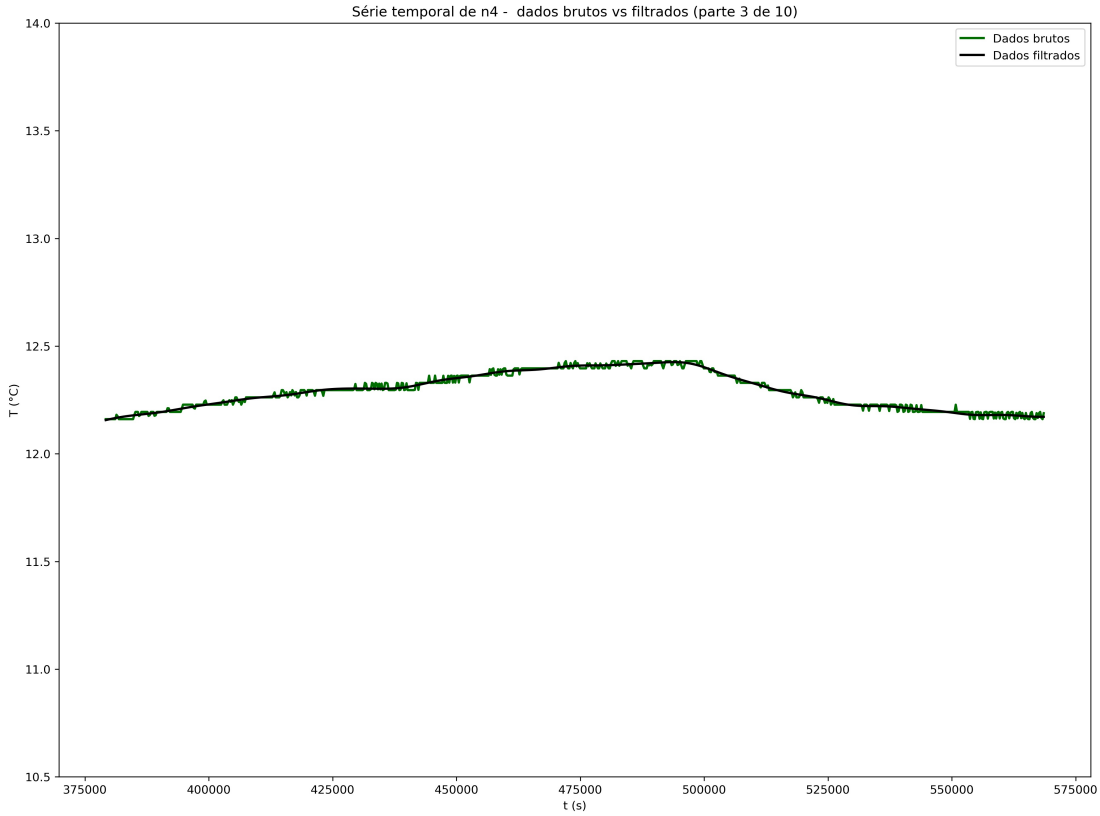


Figura B.12: Filtro do sinal no domínio da frequência.



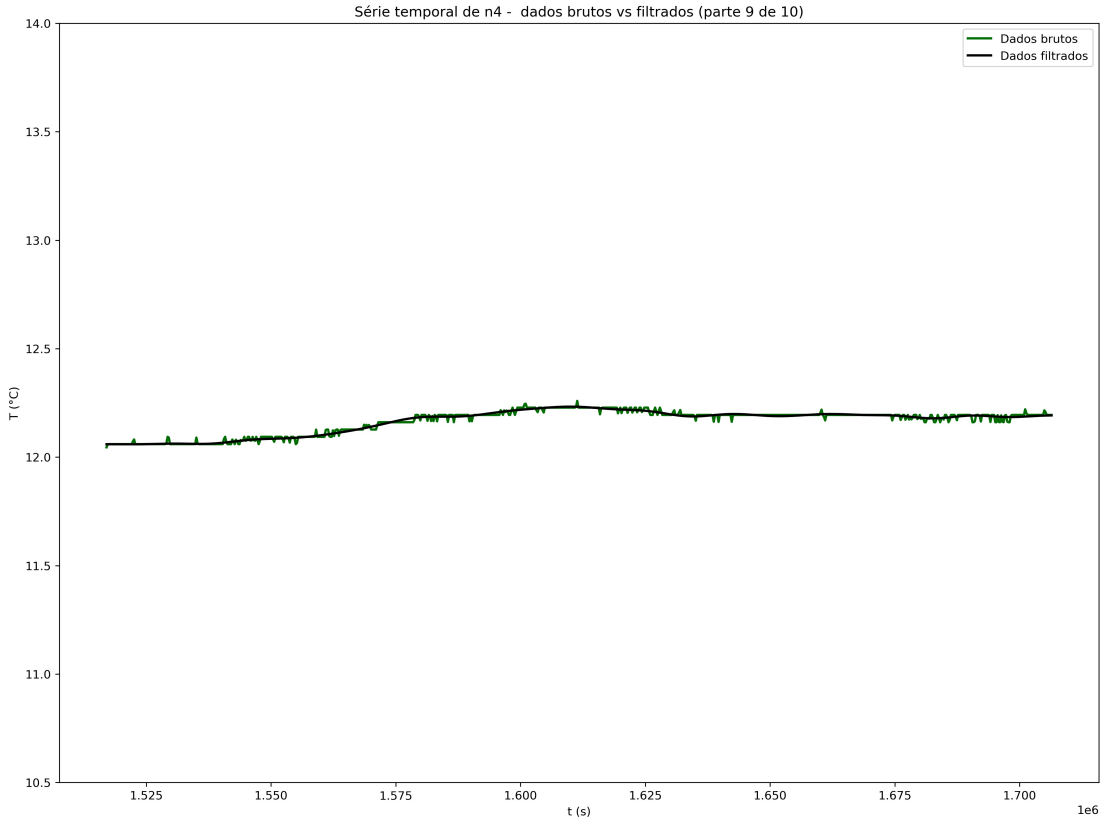


Figura B.13: Séries n4 bruta e filtrada.

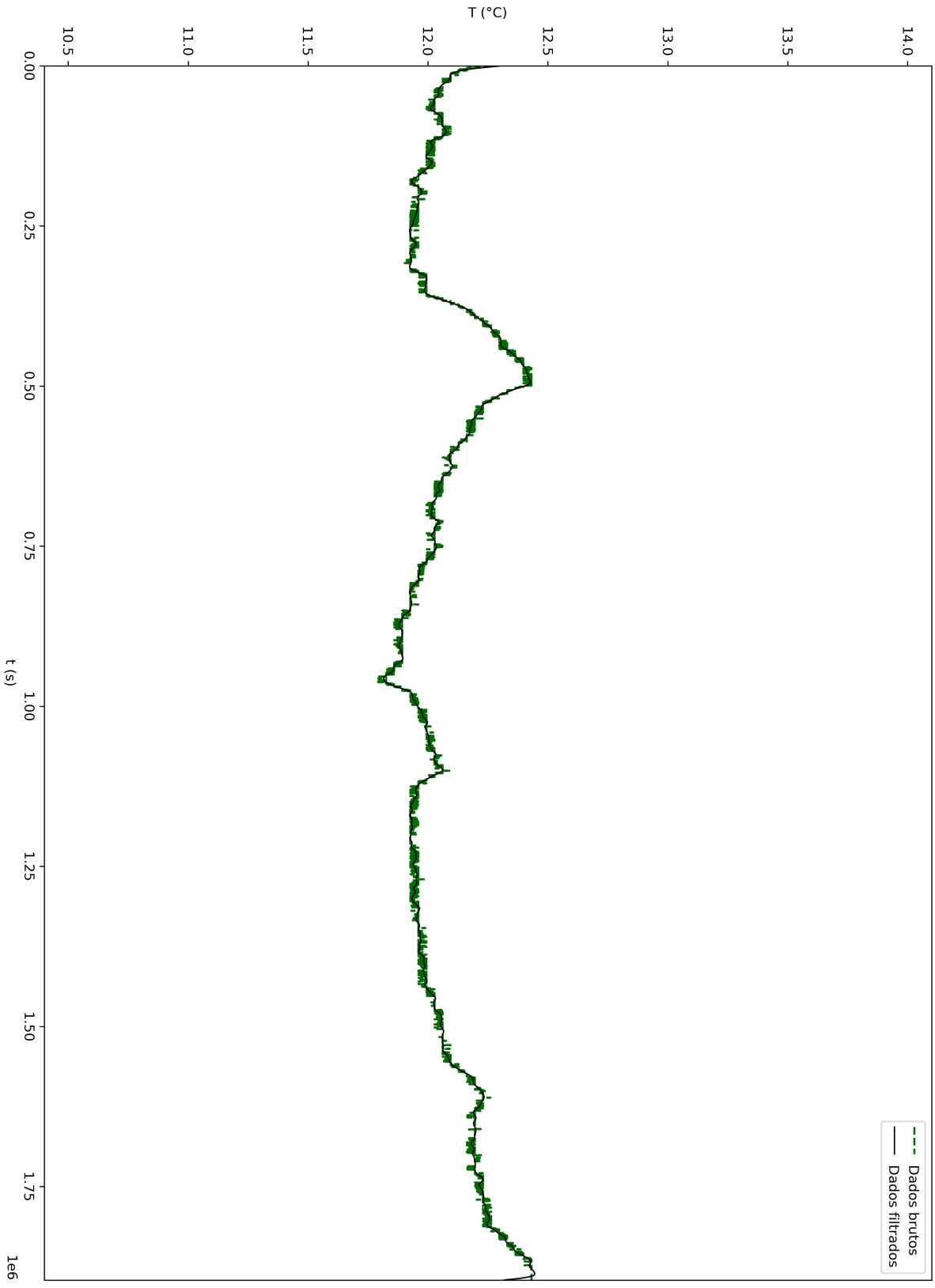


Figura B.14: Séries temporais completas de n4.

B4 Série n5

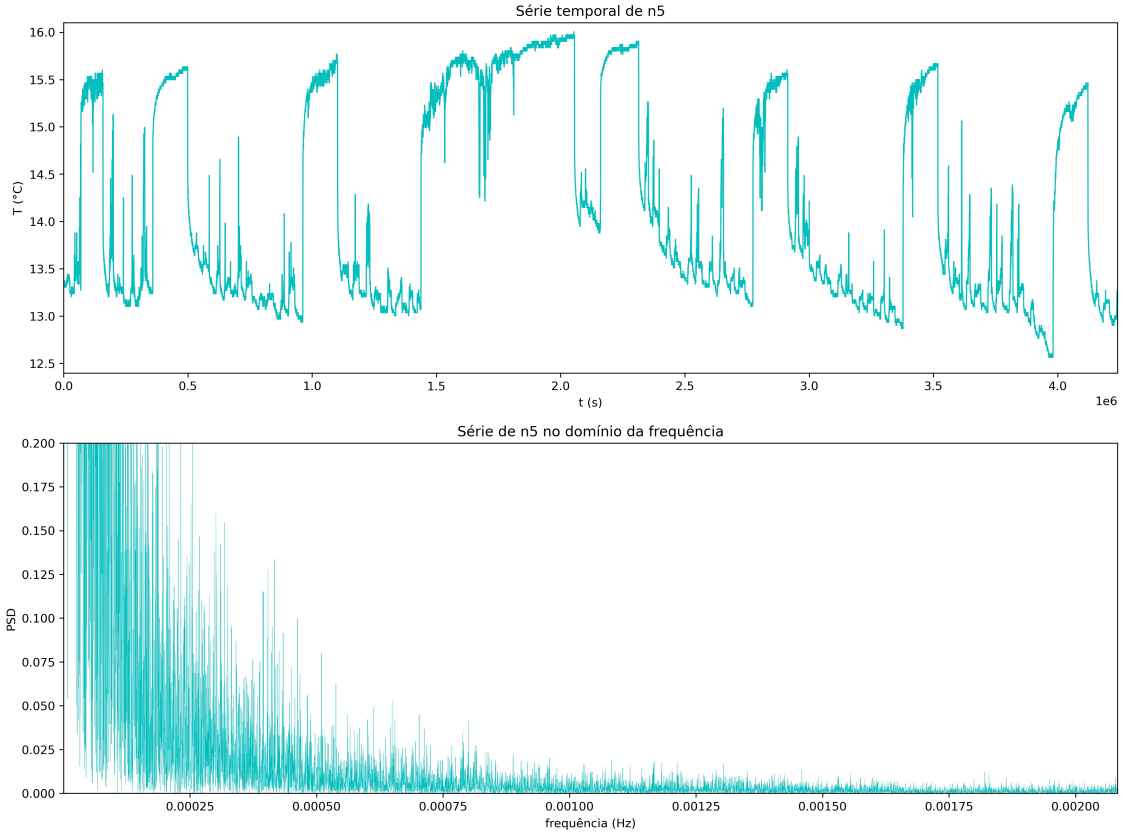


Figura B.15: Série de temperatura de n5 nos domínios do tempo e da frequência.

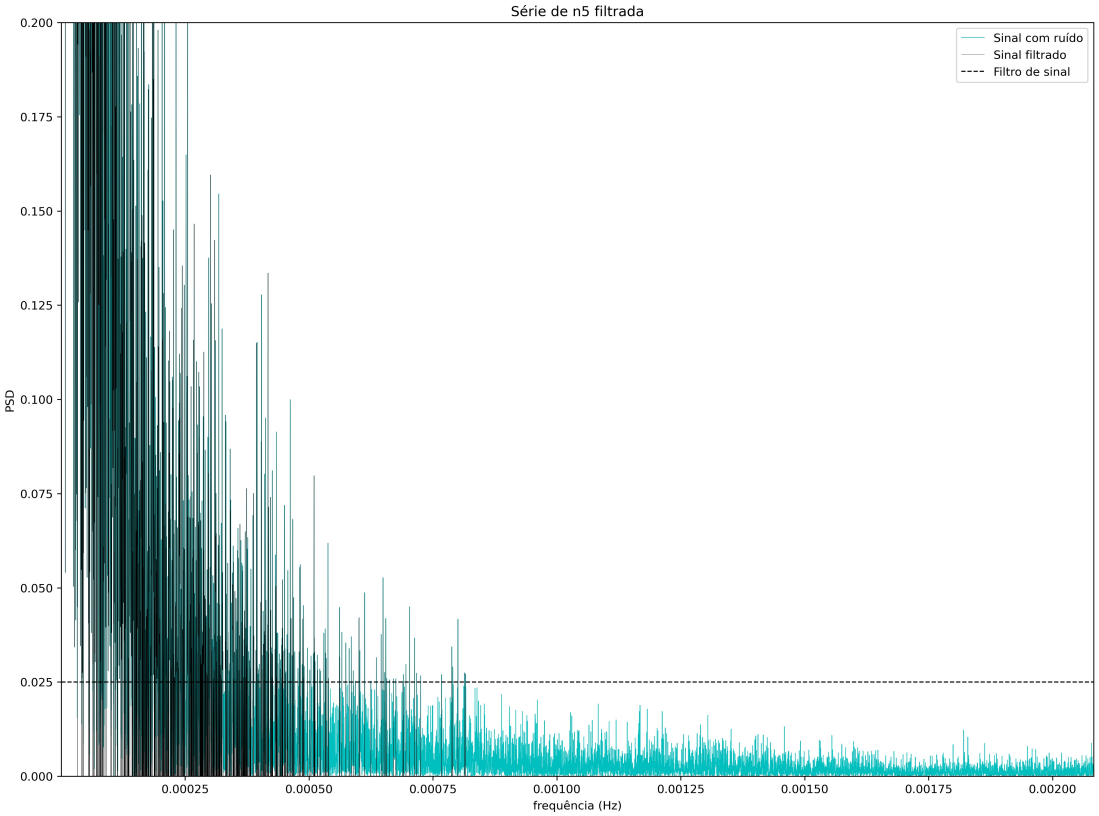


Figura B.16: Filtro do sinal no domínio da frequência.

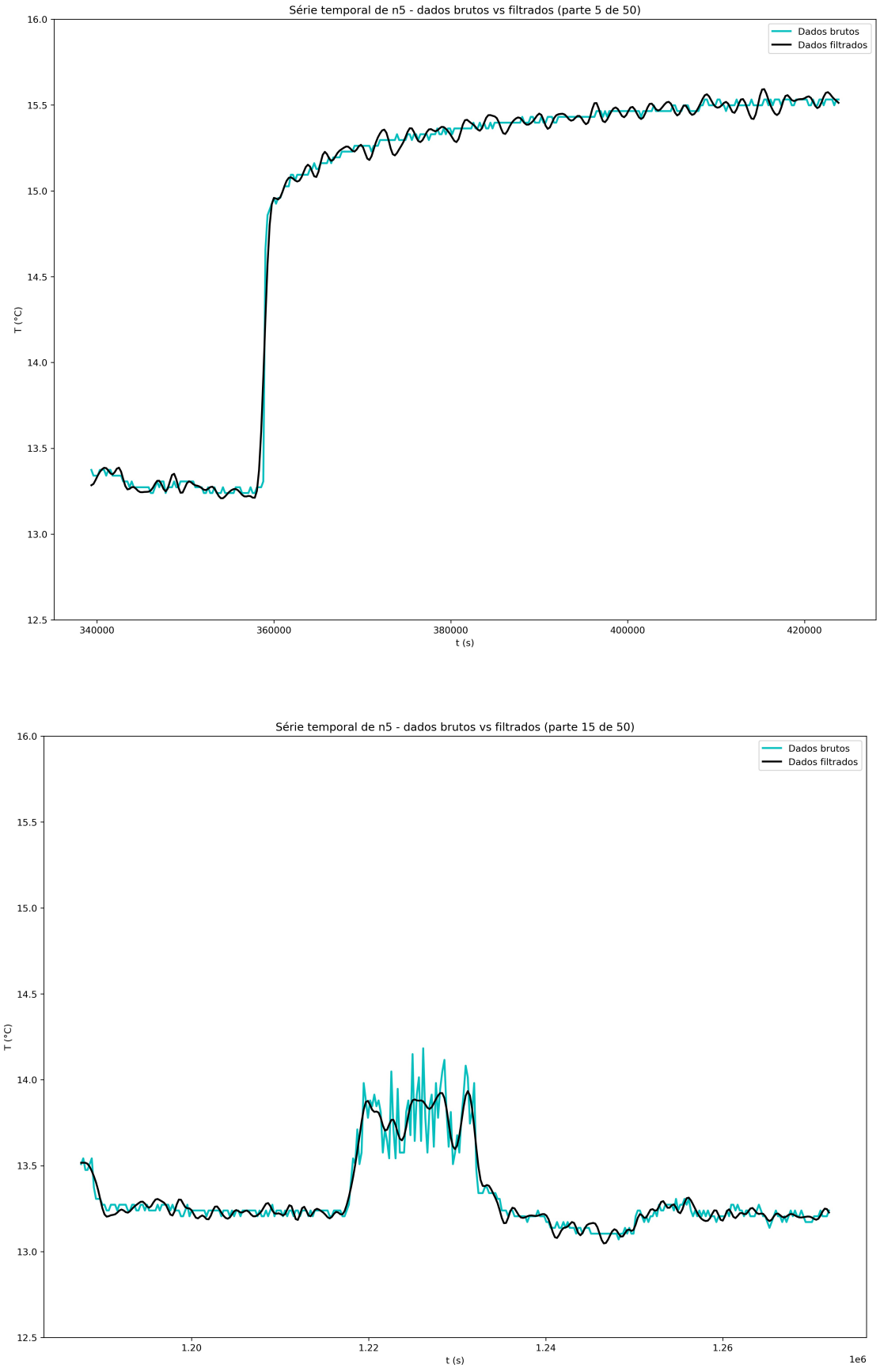


Figura B.17: Séries n5 bruta e filtrada.

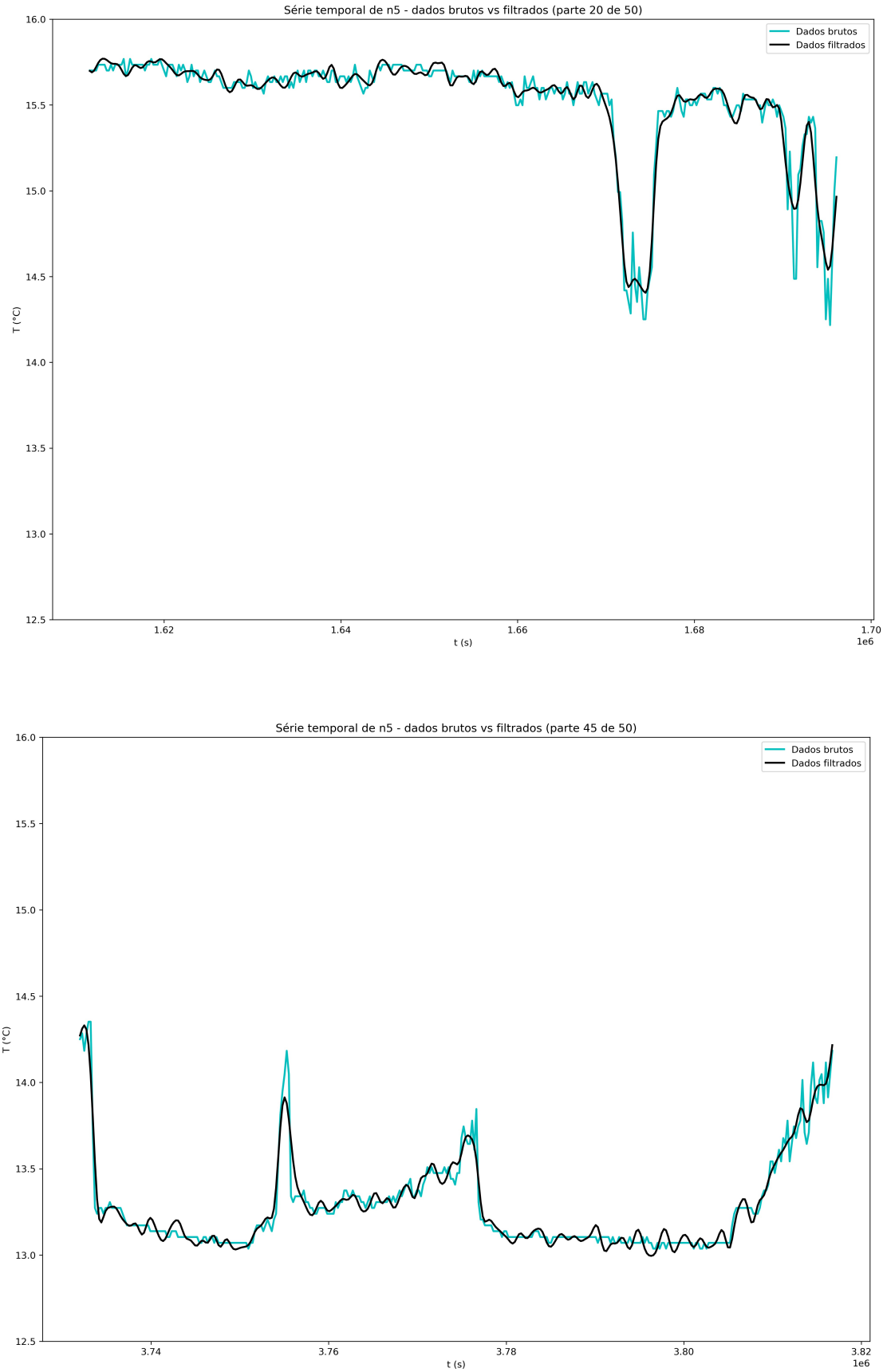


Figura B.18: Séries n5 bruta e filtrada.

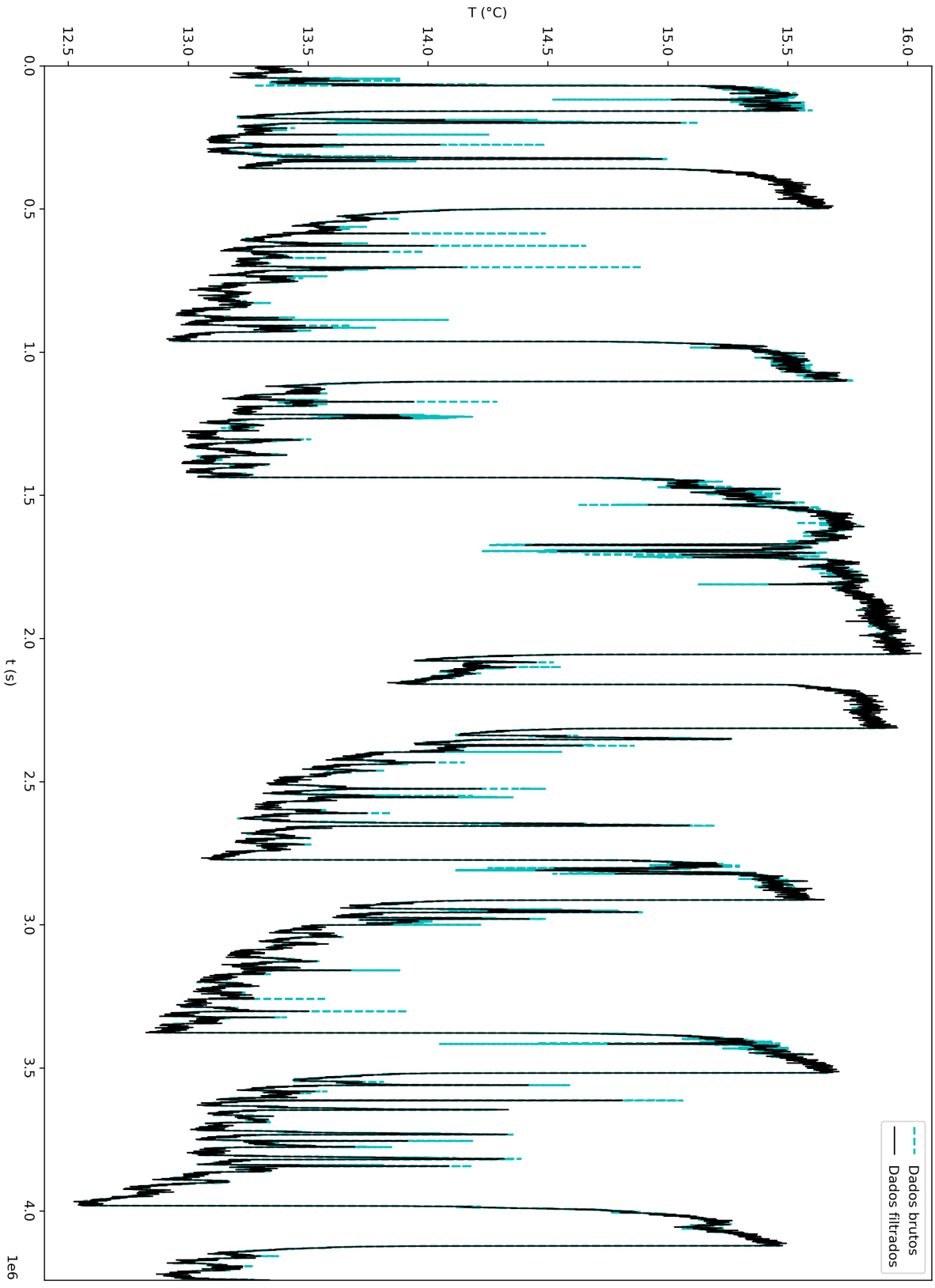


Figura B.19: Séries temporais completas de n5.

B5 Série n6

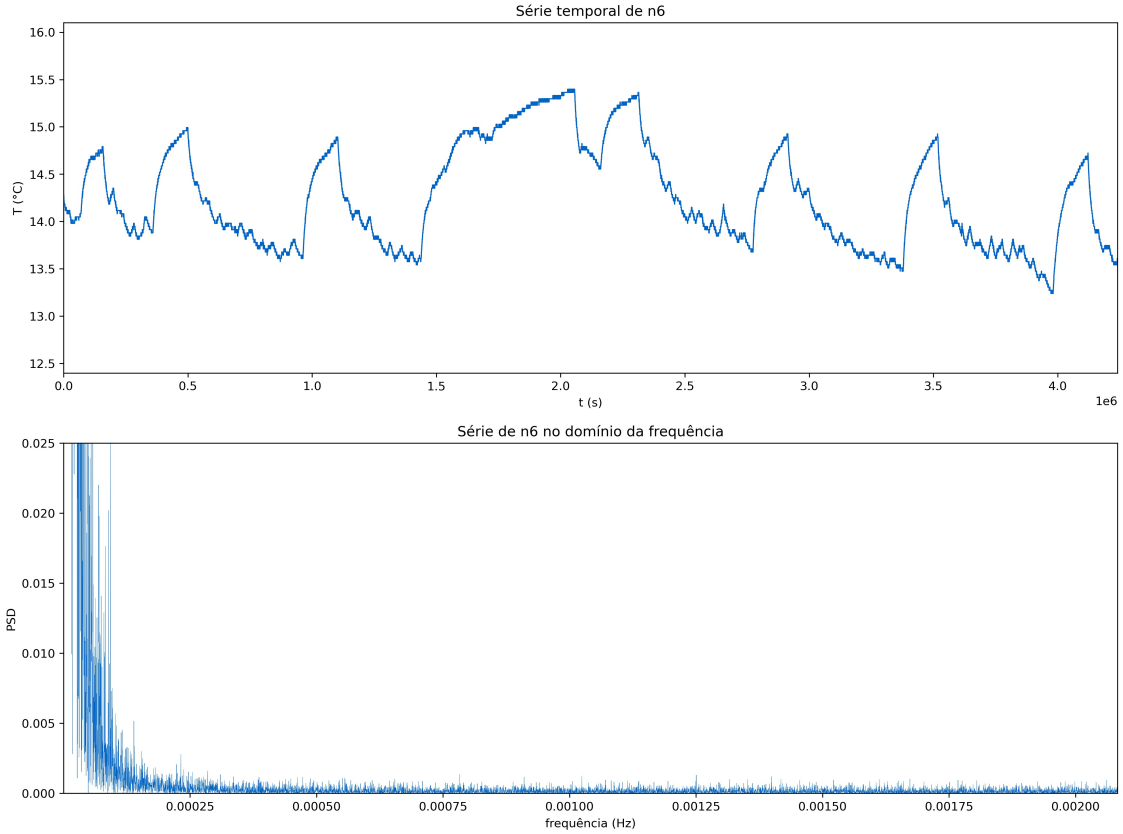


Figura B.20: Série de temperatura de n6 nos domínios do tempo e da frequência.

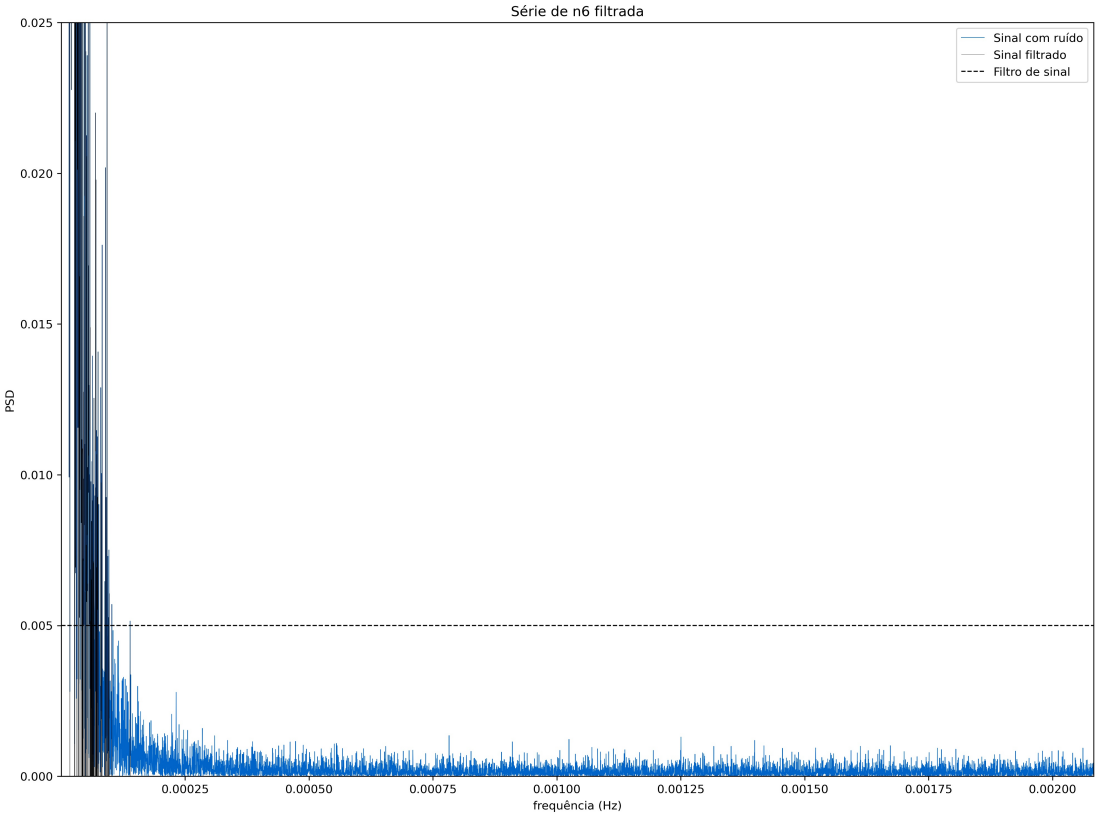


Figura B.21: Filtro do sinal no domínio da frequência.

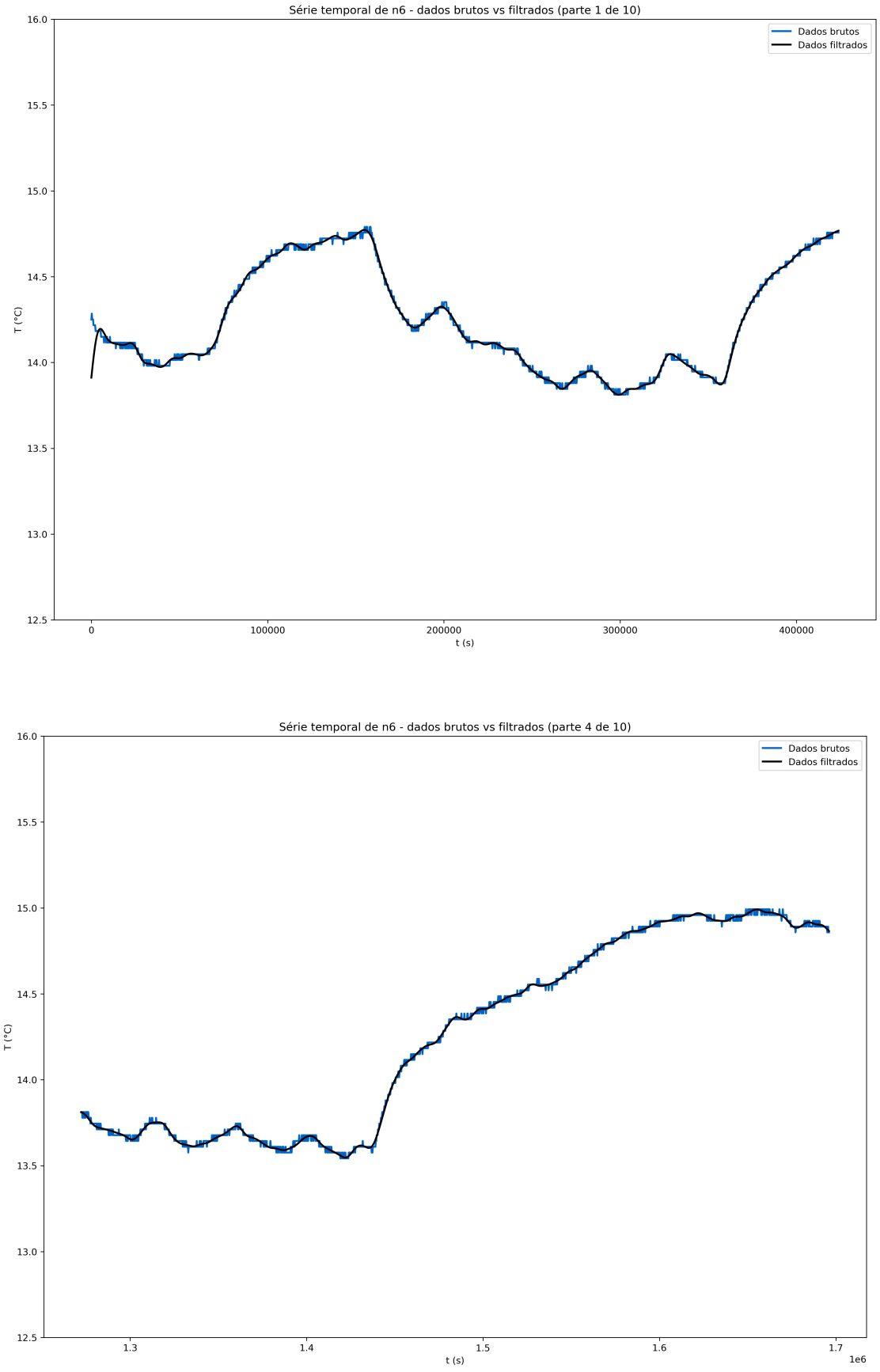
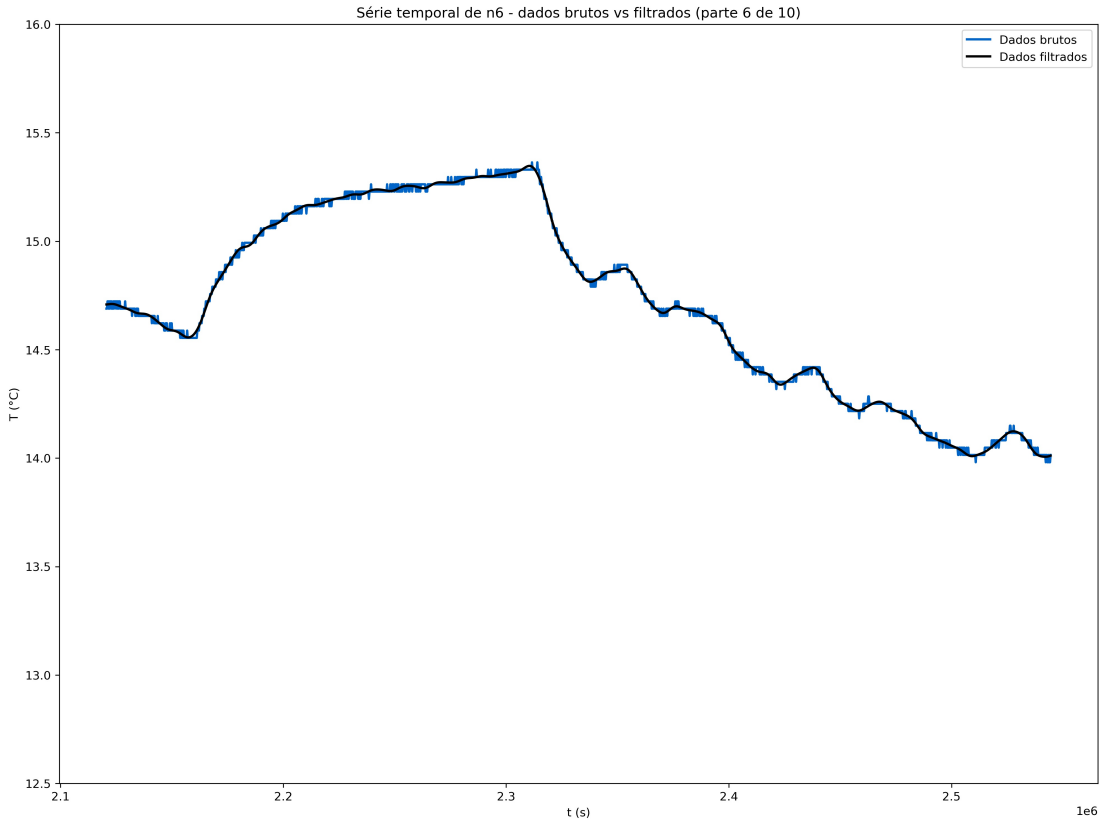


Figura B.22: Séries n6 bruta e filtrada.



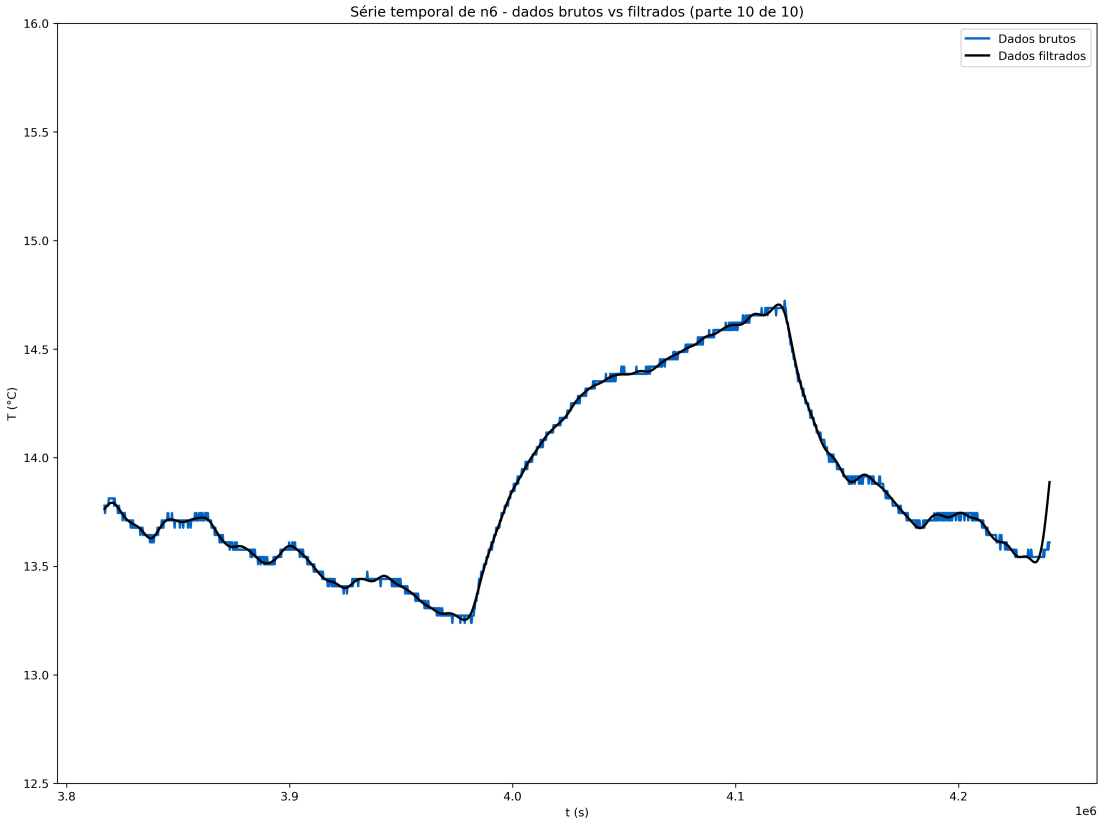


Figura B.23: Séries n6 bruta e filtrada.

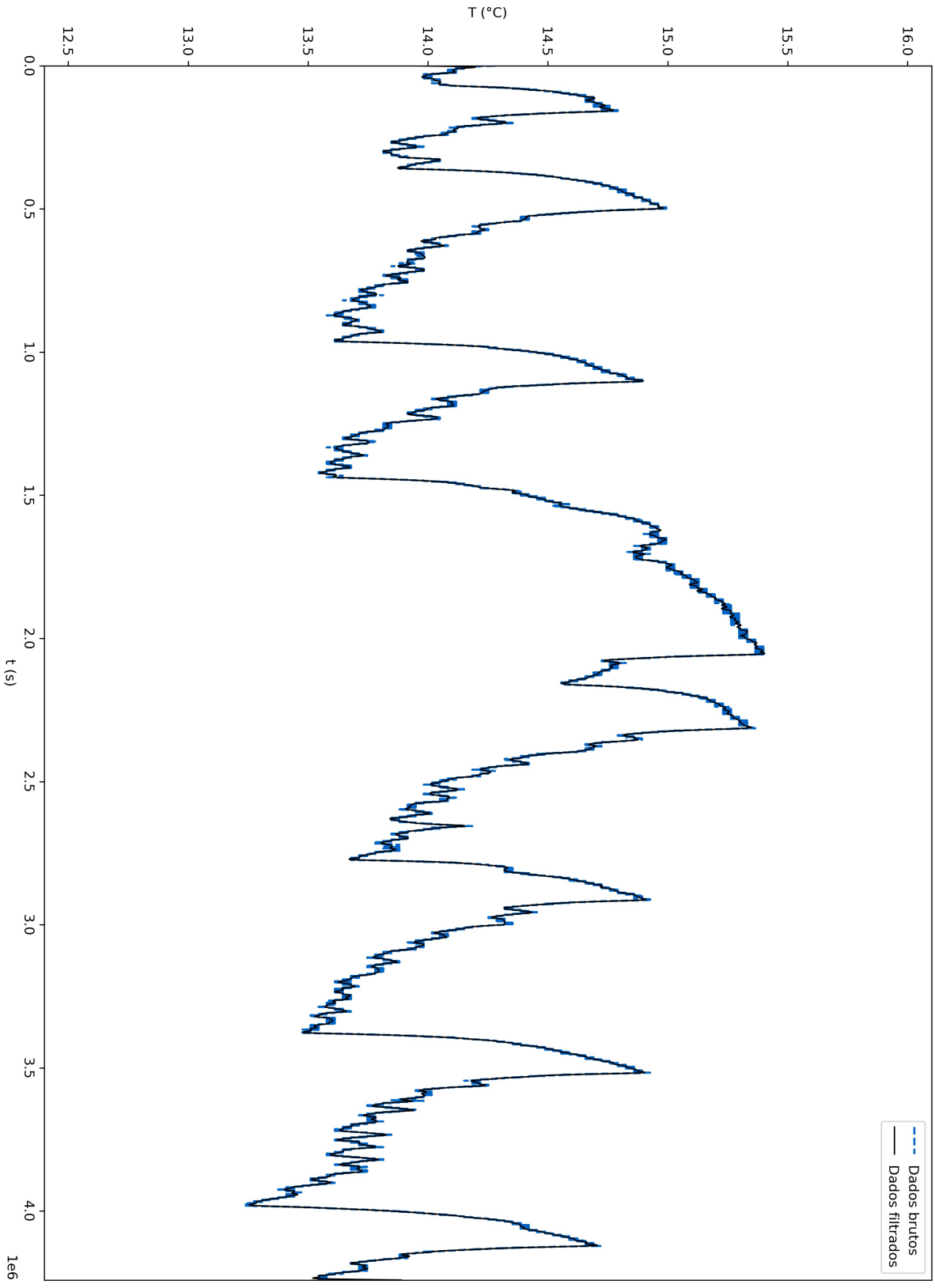


Figura B.24: Séries temporais completas de n6.

B6 Série n7

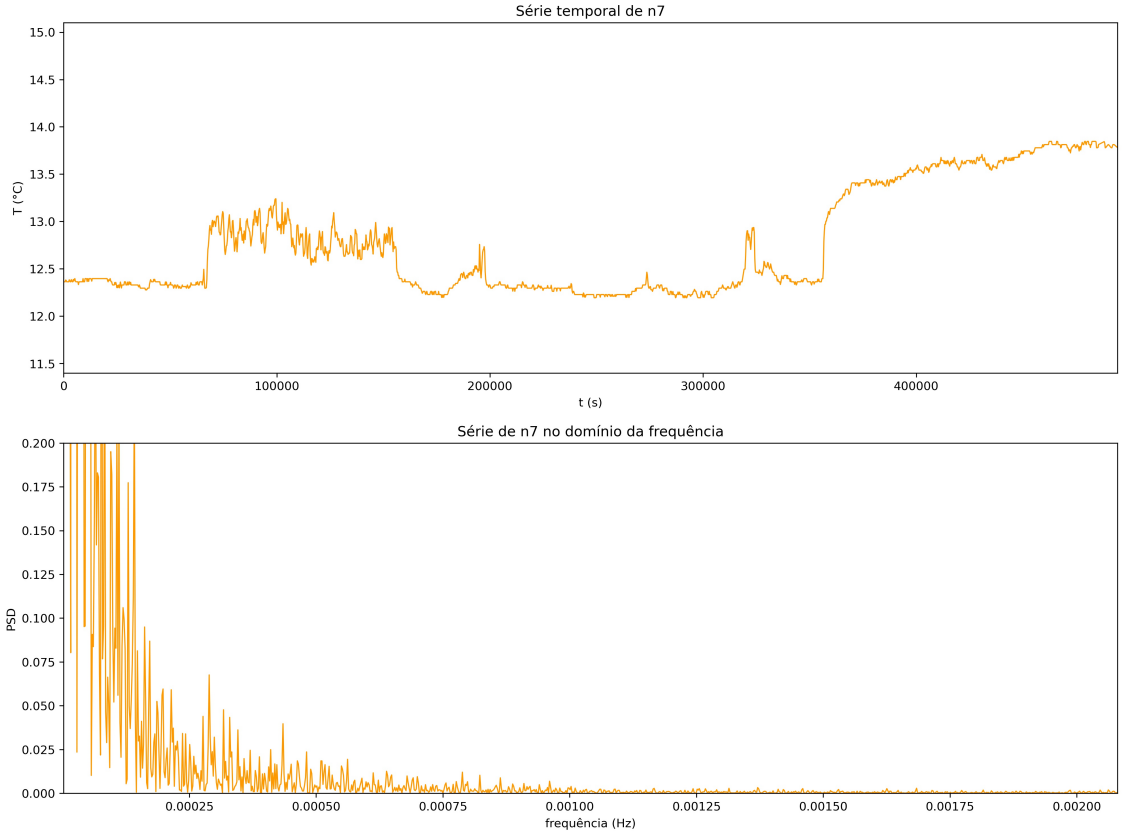


Figura B.25: Série de temperatura de n7 nos domínios do tempo e da frequência.

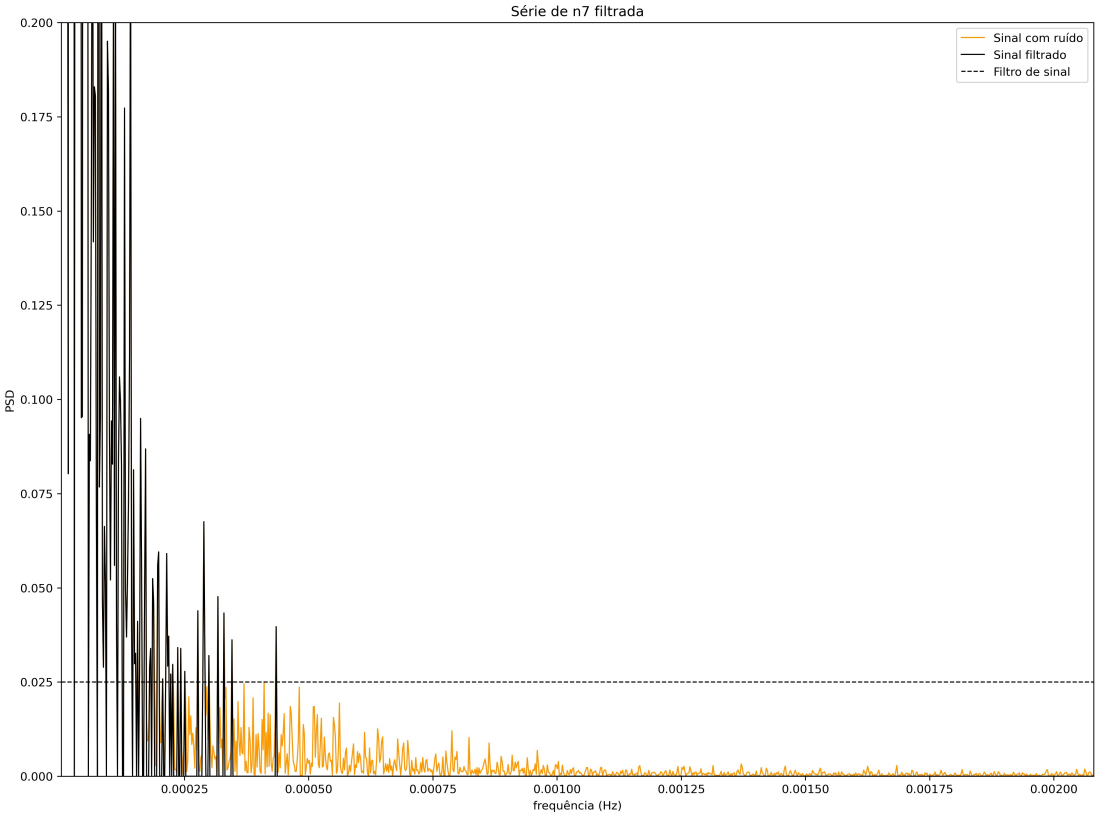
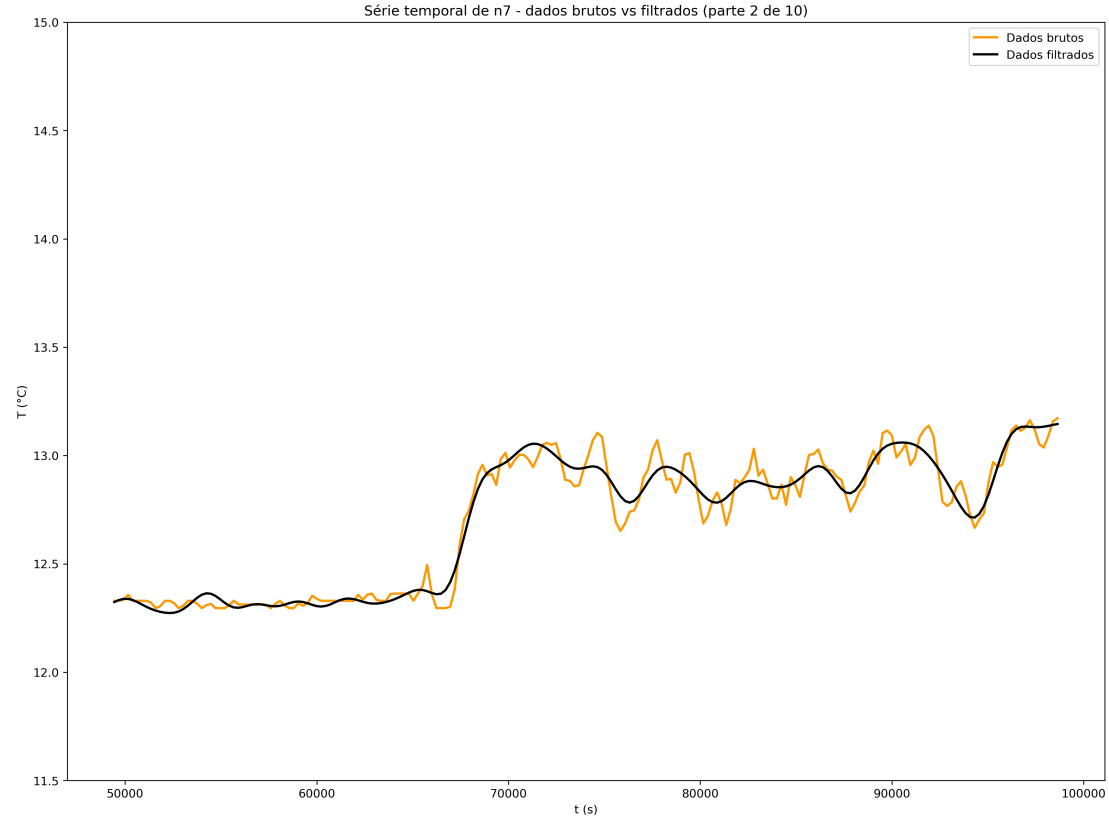


Figura B.26: Filtro do sinal no domínio da frequência.



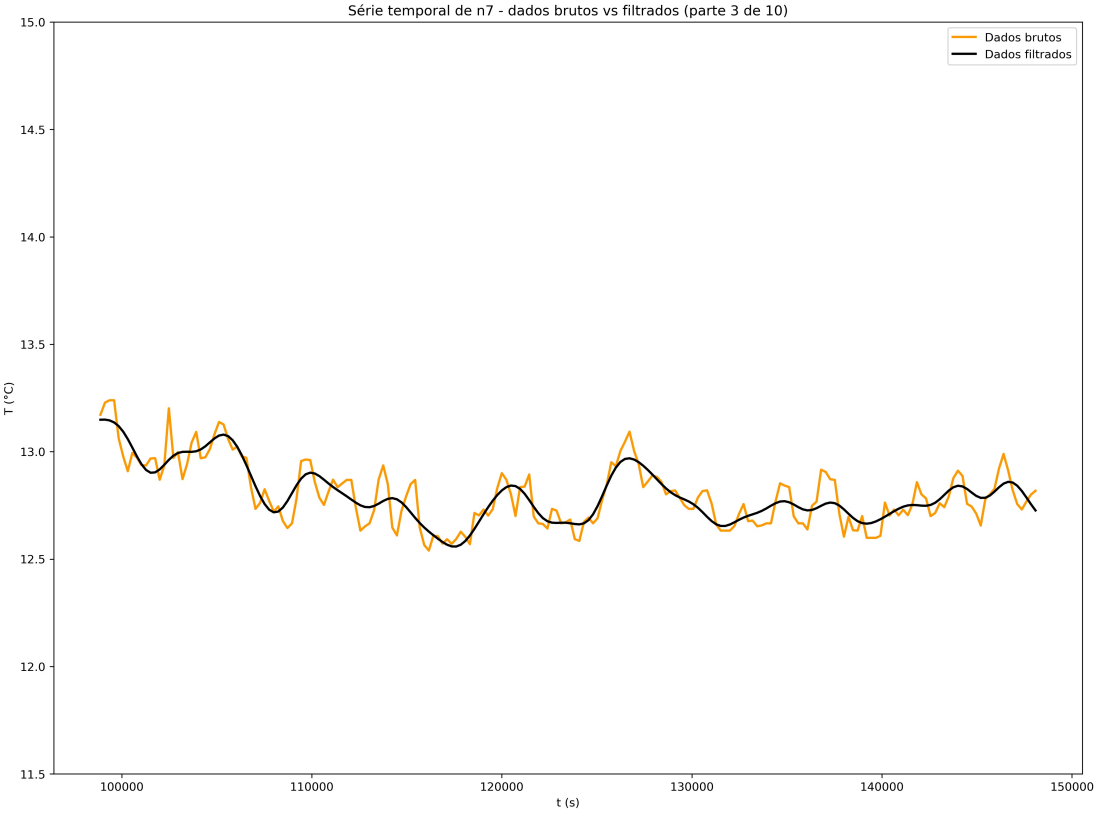
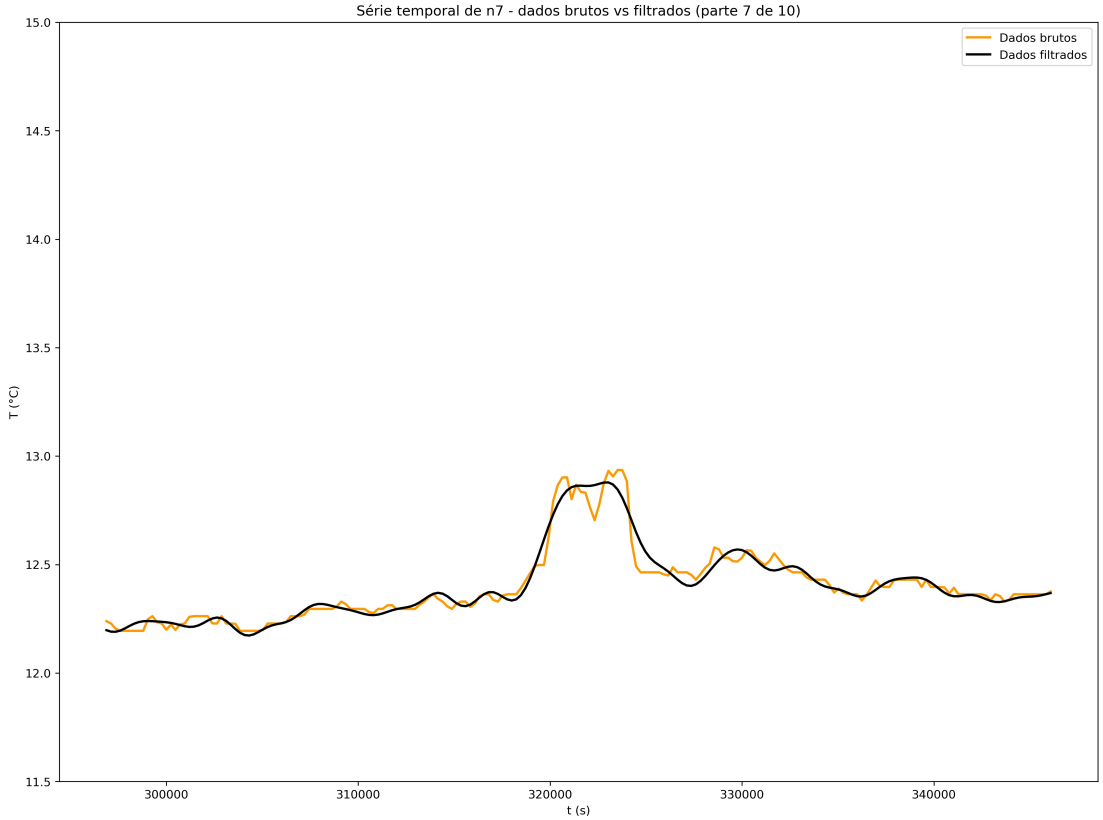


Figura B.27: Séries n7 bruta e filtrada.



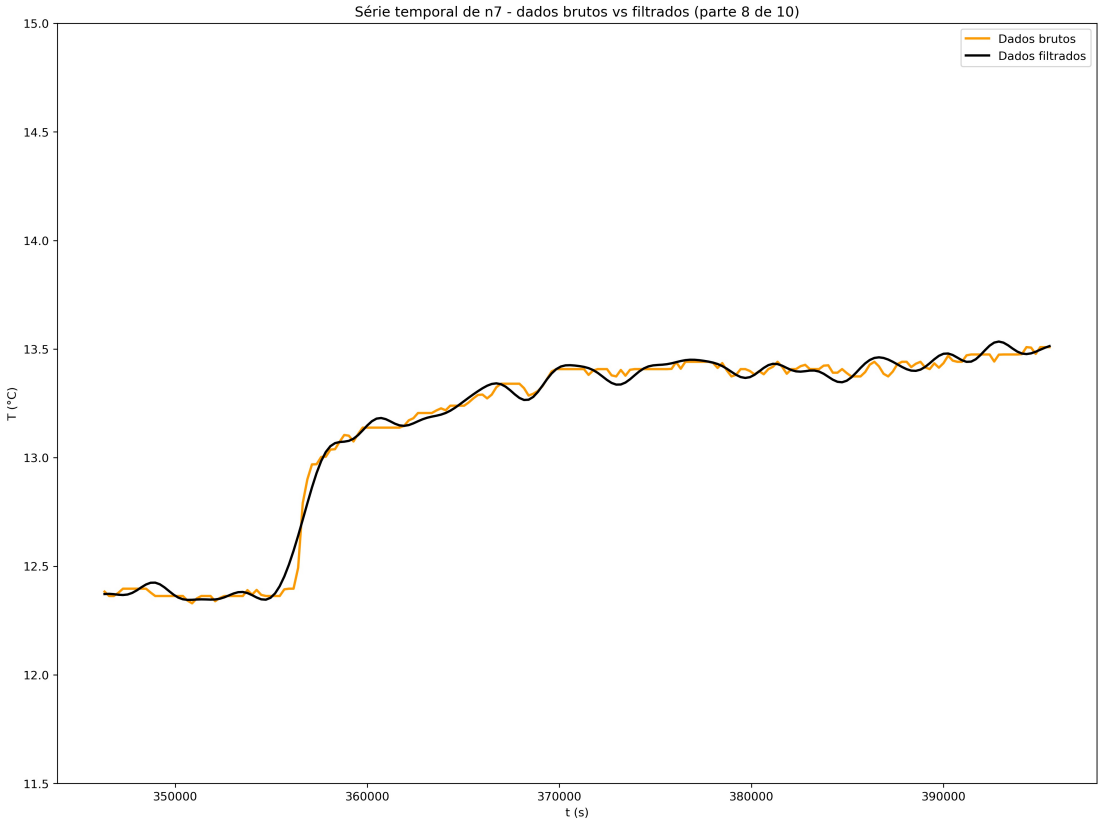


Figura B.28: Séries n7 bruta e filtrada.

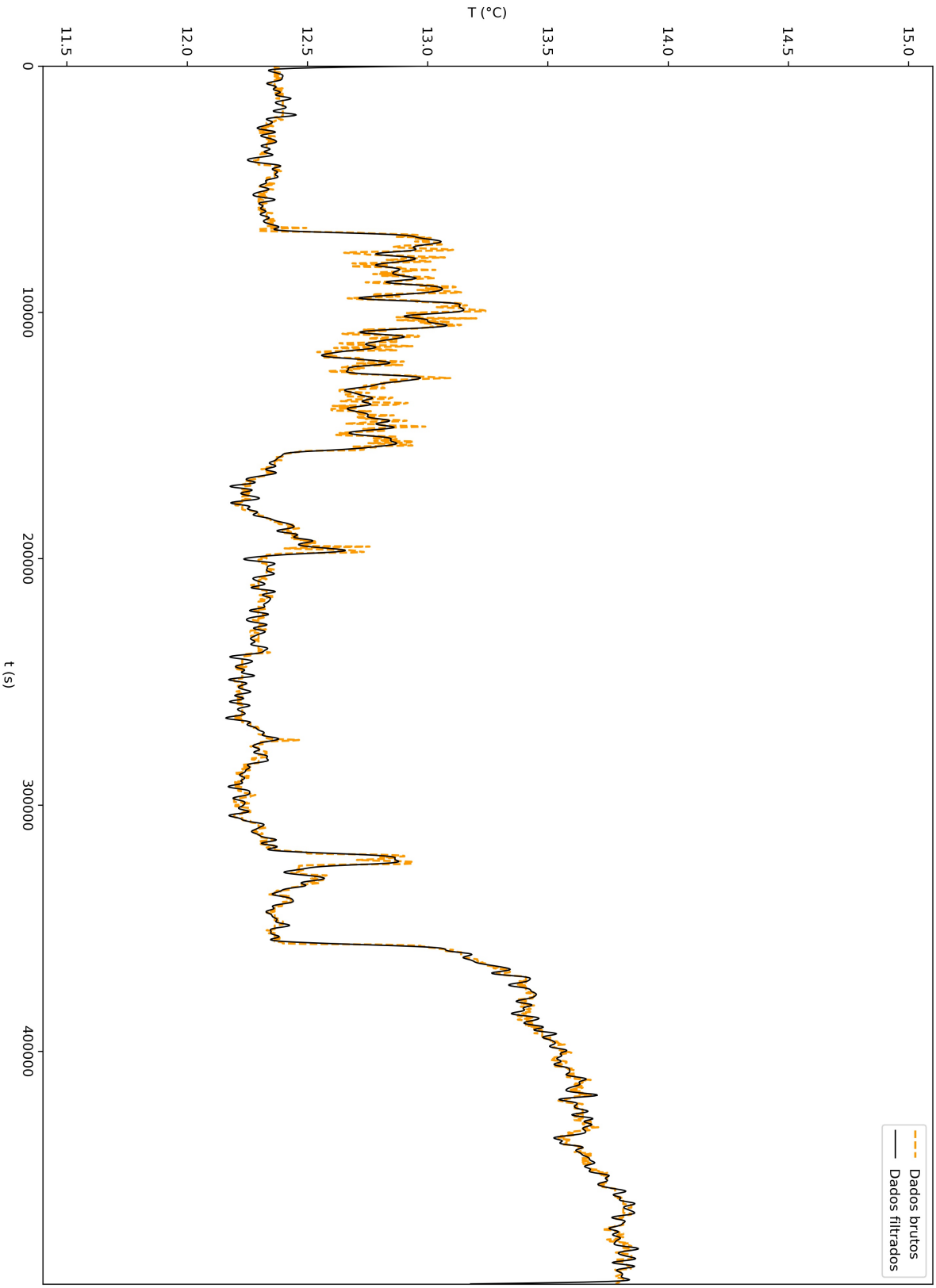


Figura B.29: Séries temporais completas de n7.

B7 Todas as séries filtradas

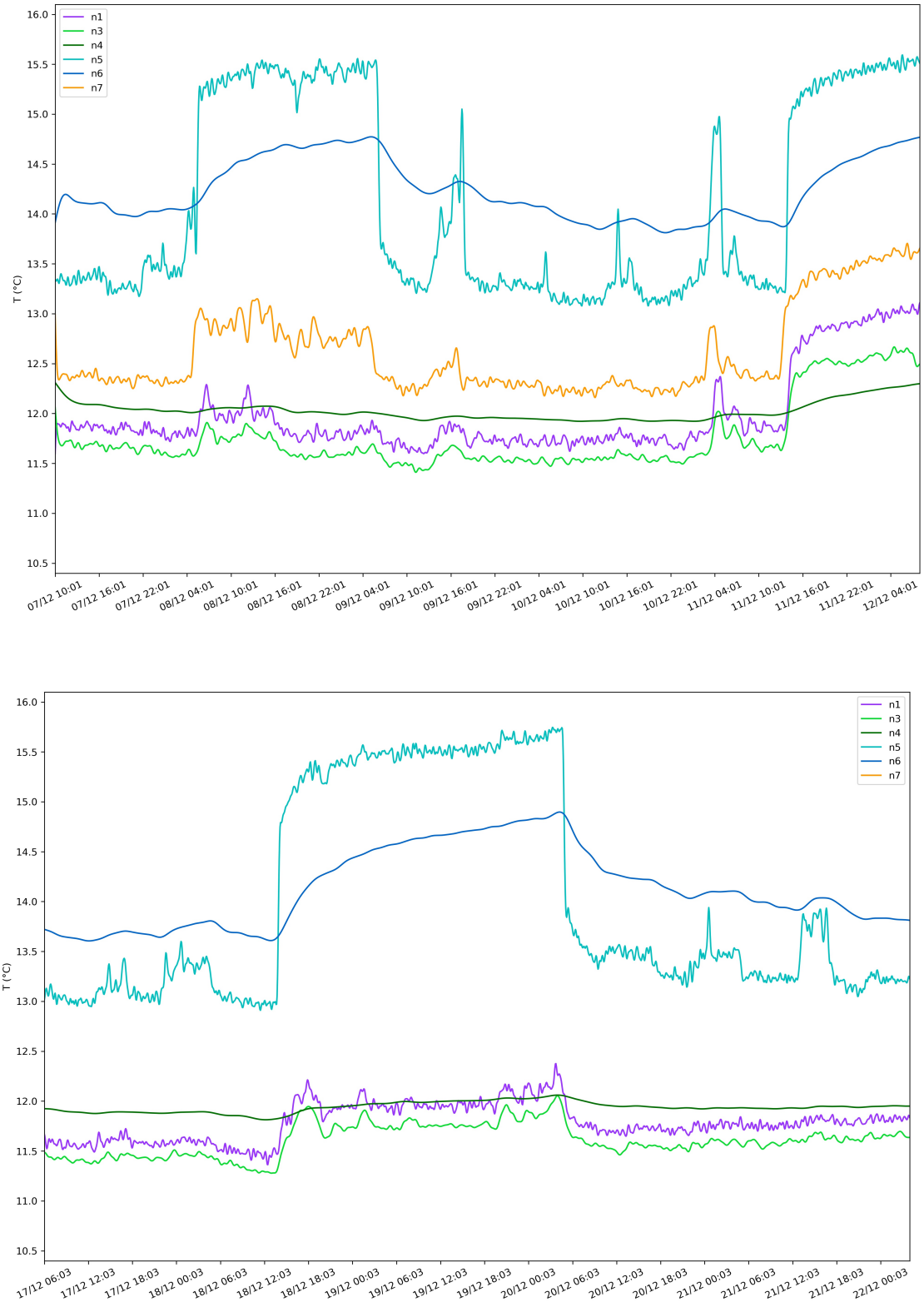


Figura B.30: Séries filtradas.

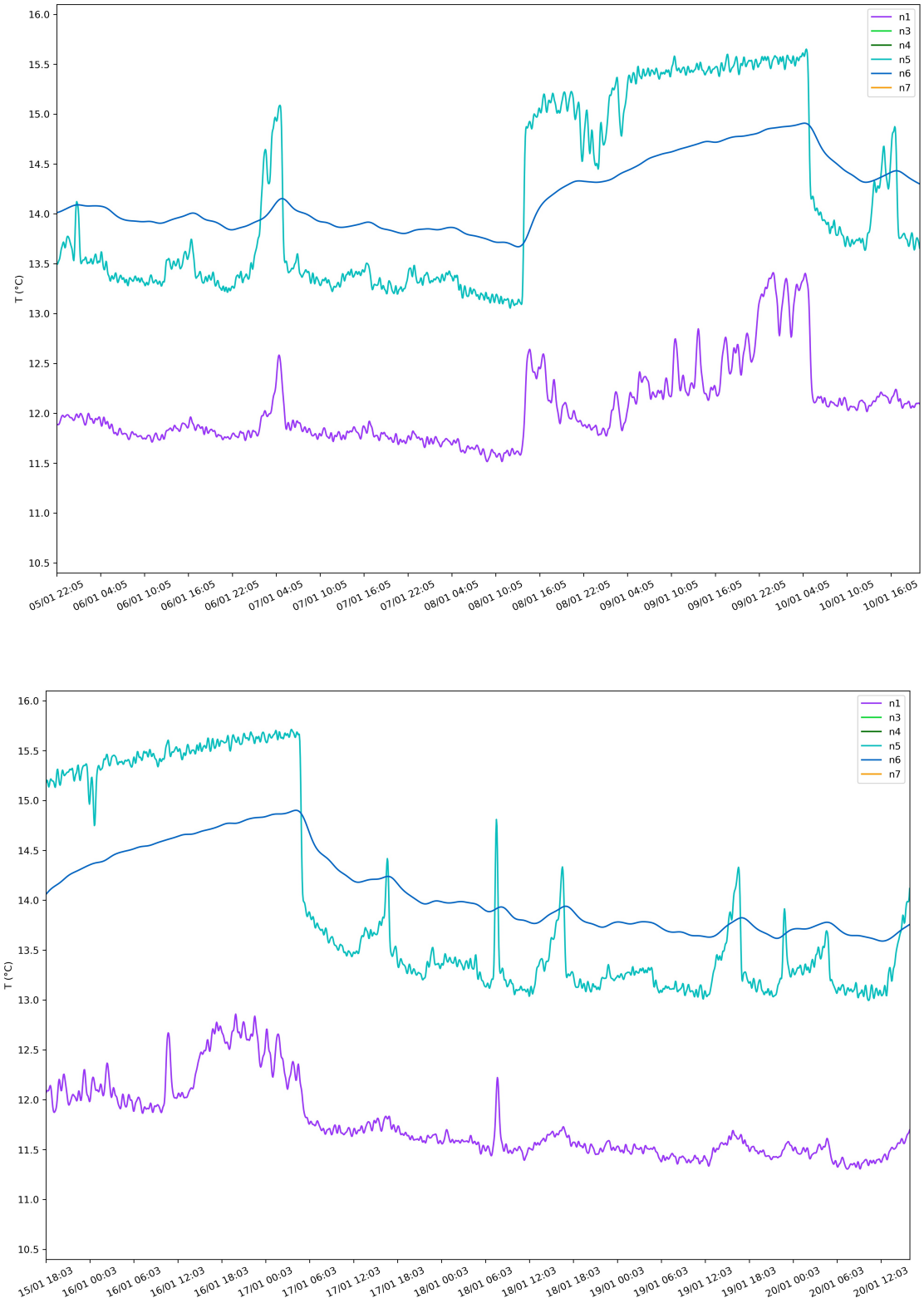


Figura B.31: Séries filtradas.

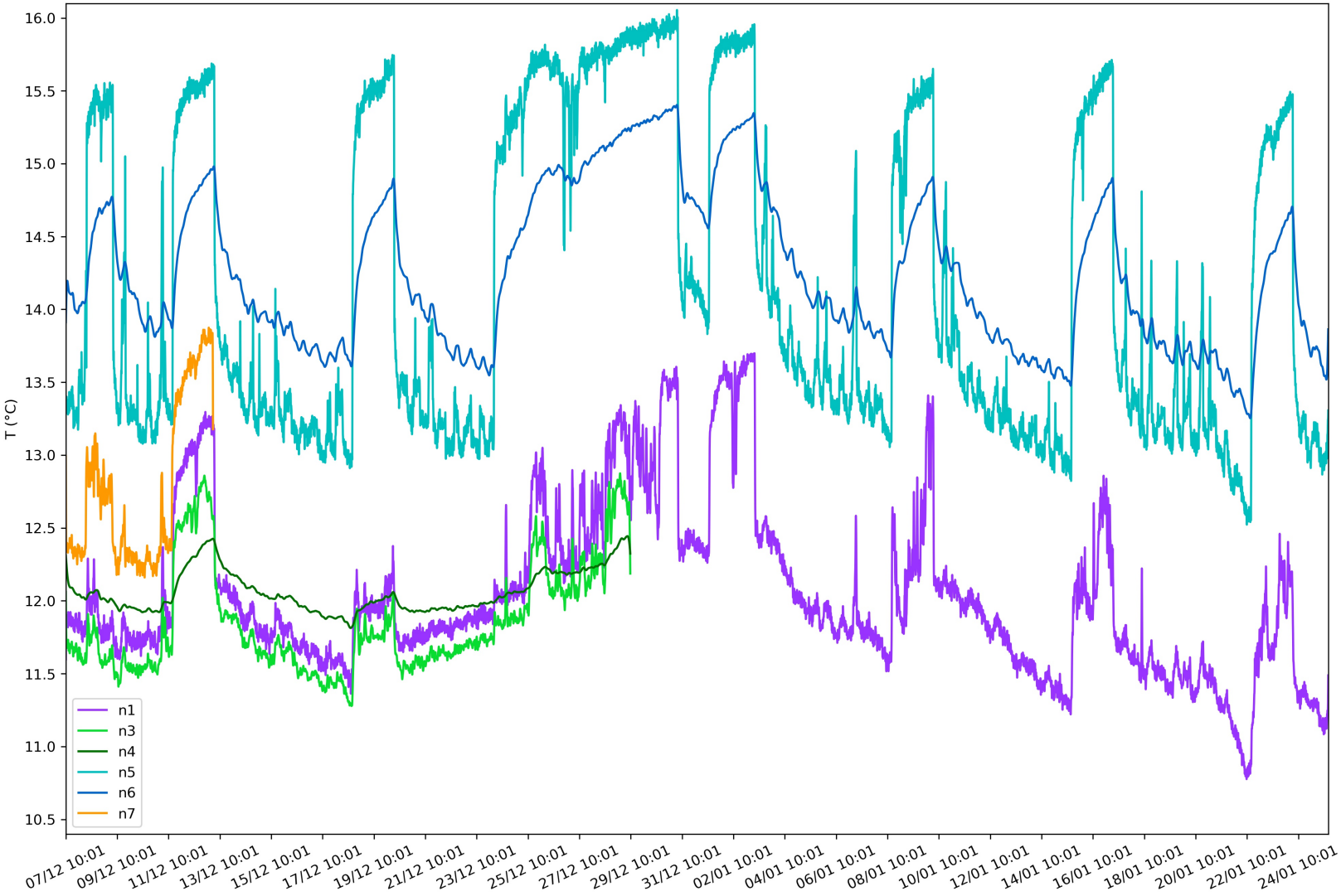


Figura B.32: Séries temporais filtradas completas.

Apêndice C - Filtragem das séries de temperatura da Primeira Campanha de Amostragem das Caves da Murganheira

C1 Série n1

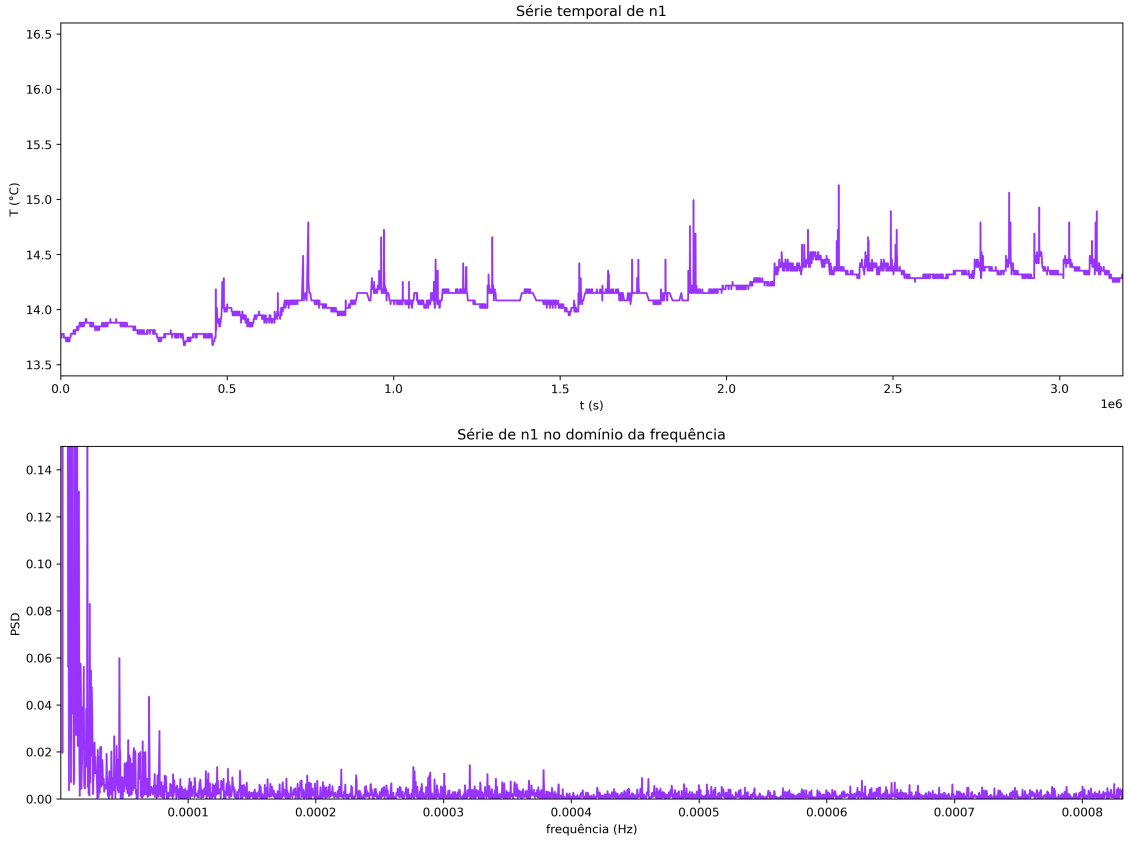


Figura C.1: Série de temperatura de n1 nos domínios do tempo e da frequência.

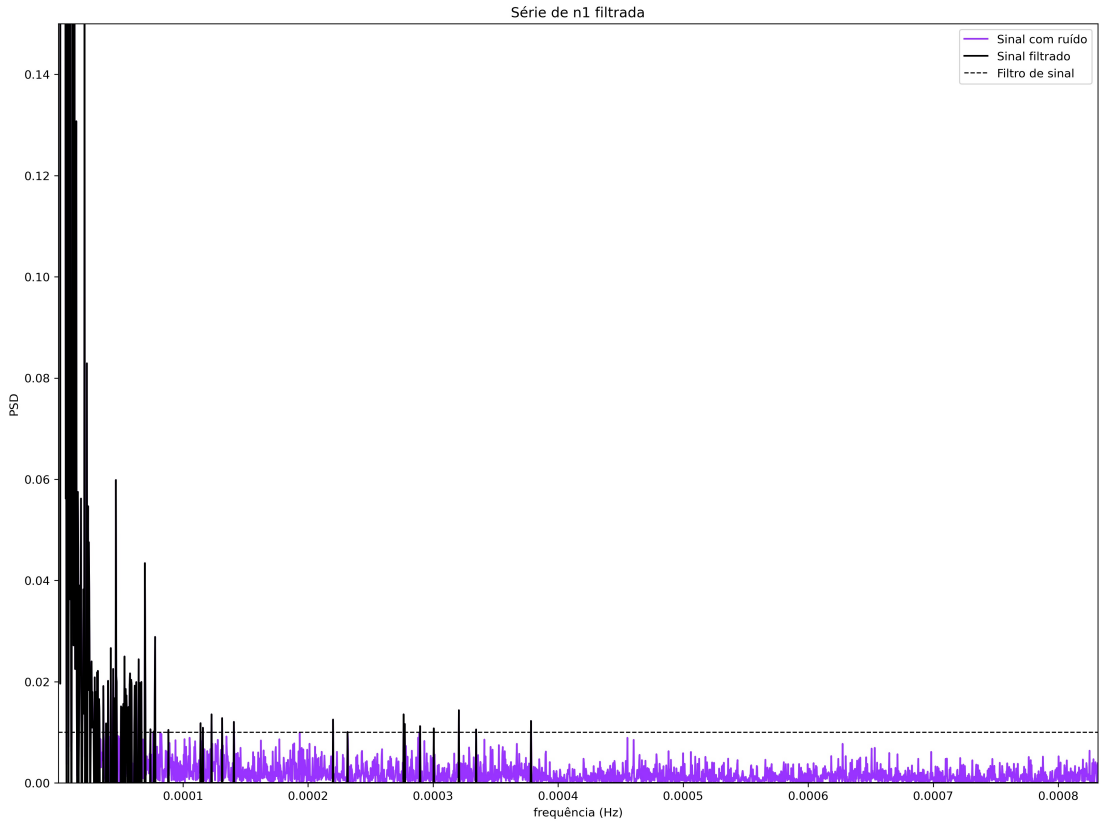
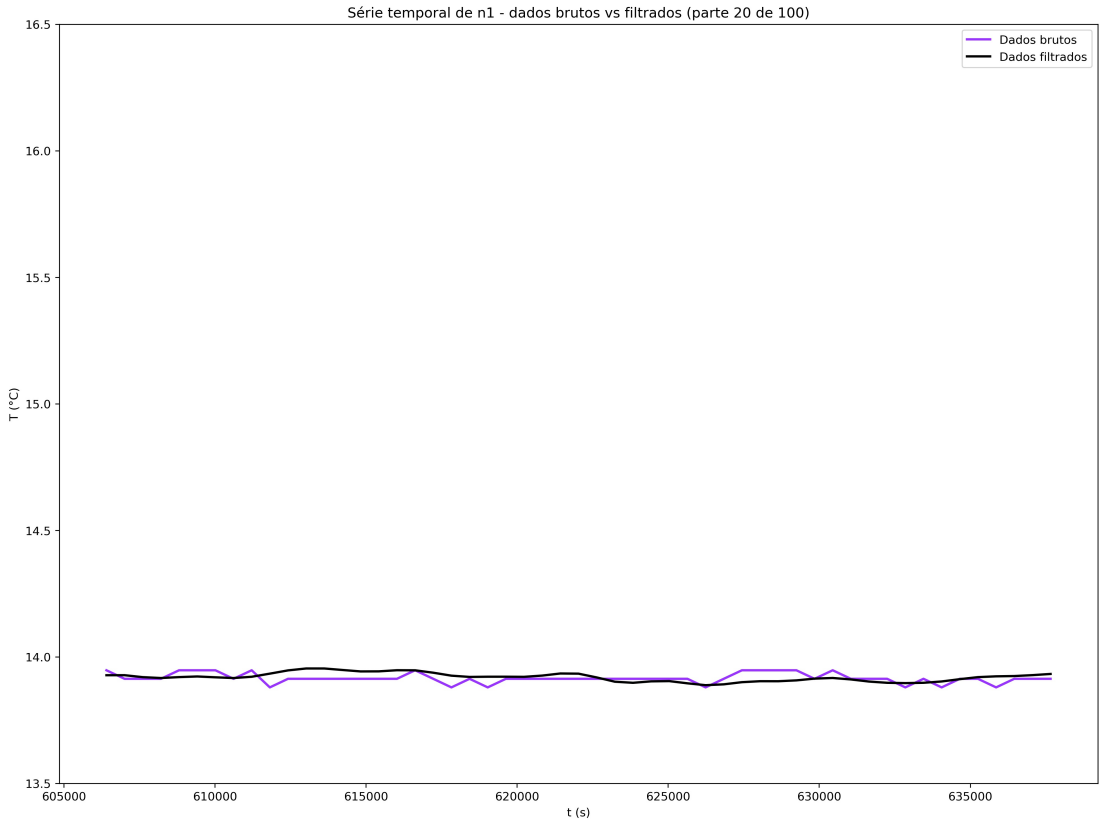


Figura C.2: Filtro do sinal no domínio da frequência.



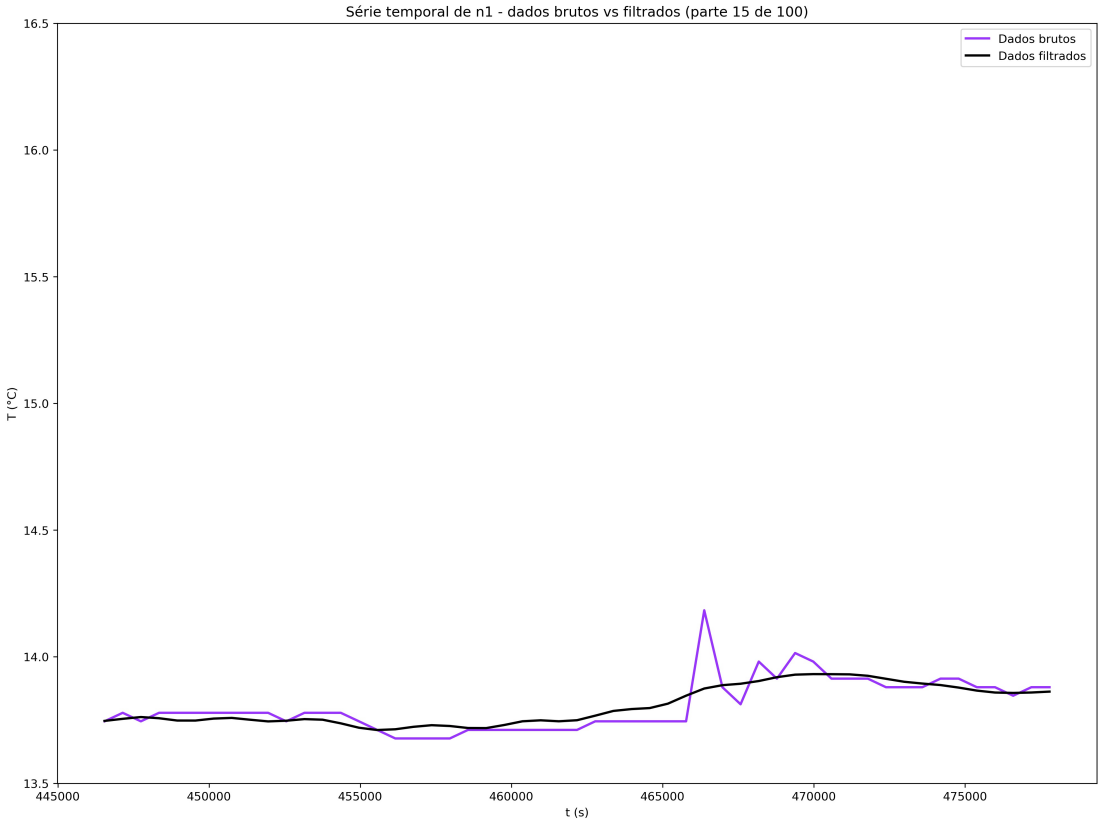


Figura C.3: Séries n1 bruta e filtrada.

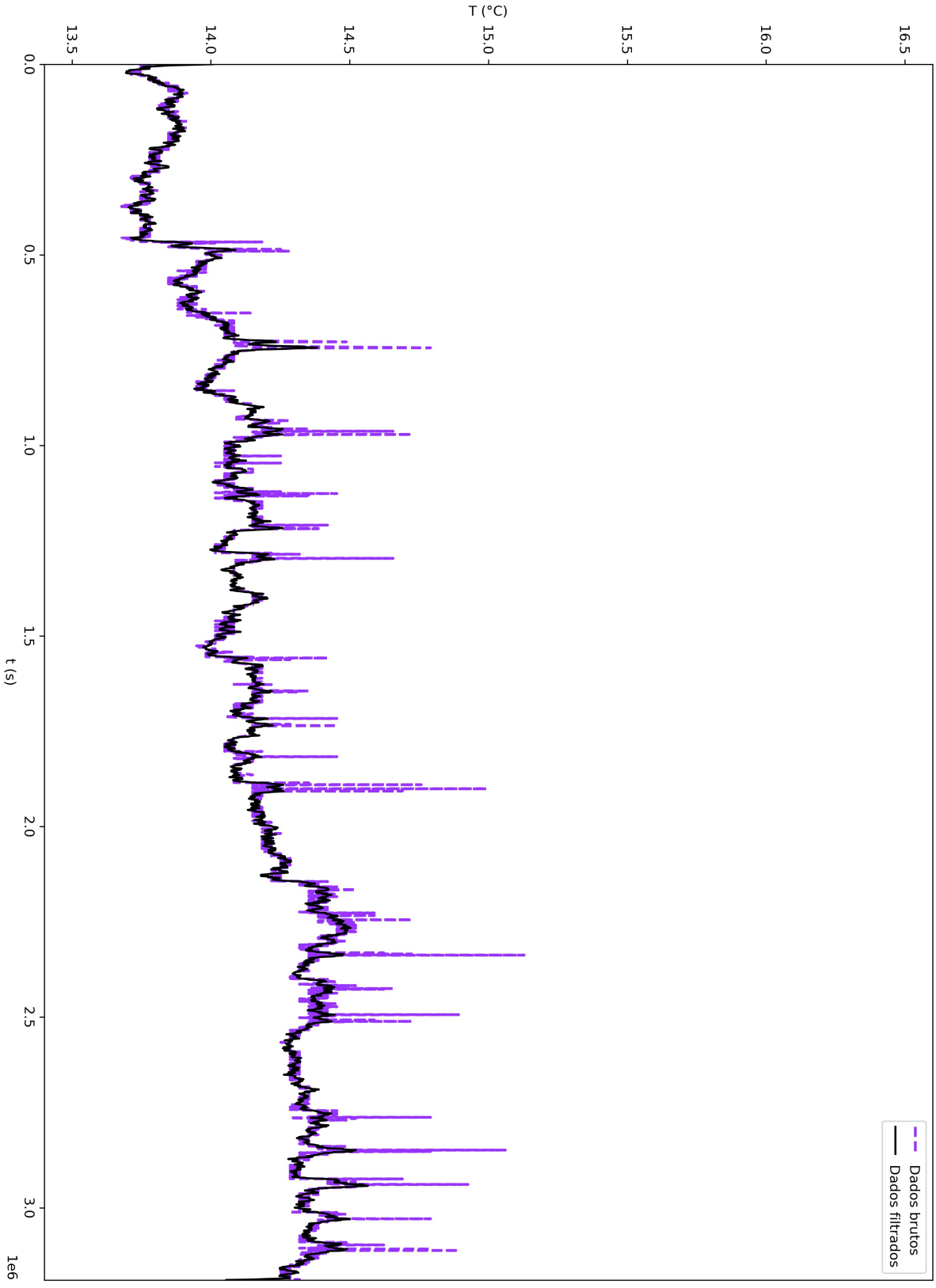


Figura C.4: Séries temporais completas de n1.

C2 Série n2

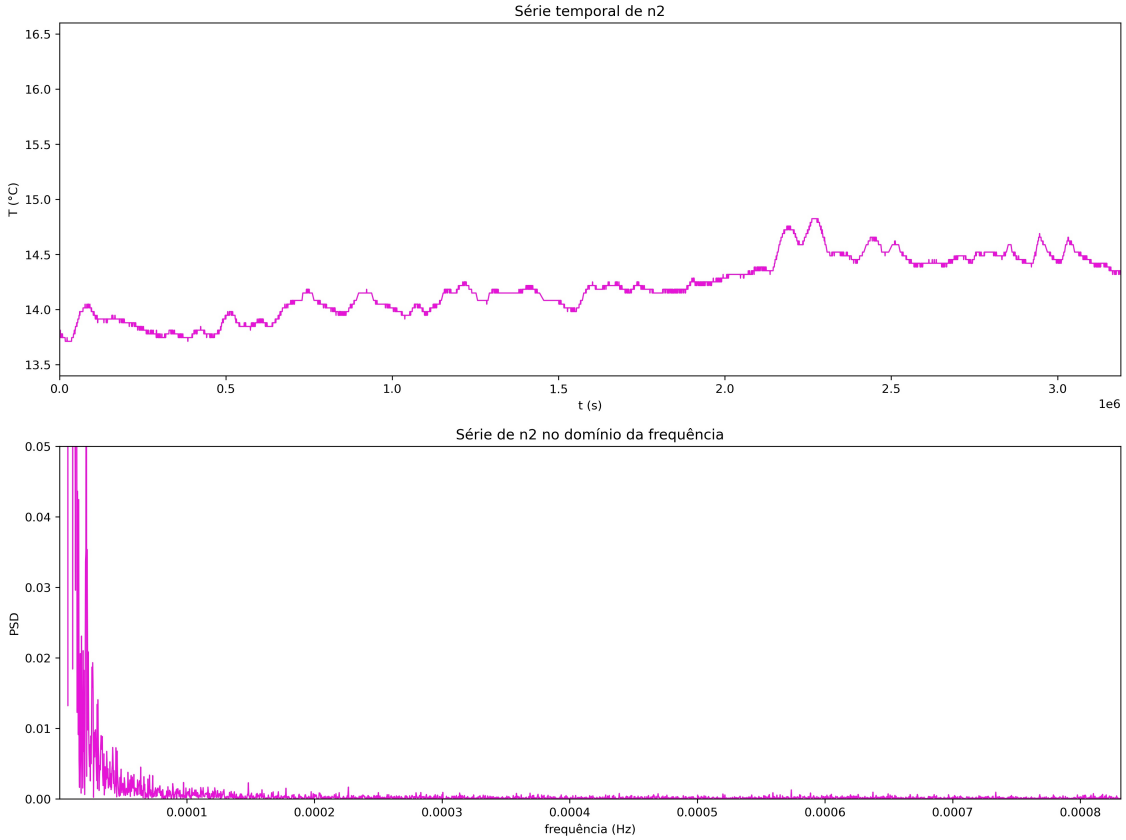


Figura C.5: Série de temperatura de n2 nos domínios do tempo e da frequência.

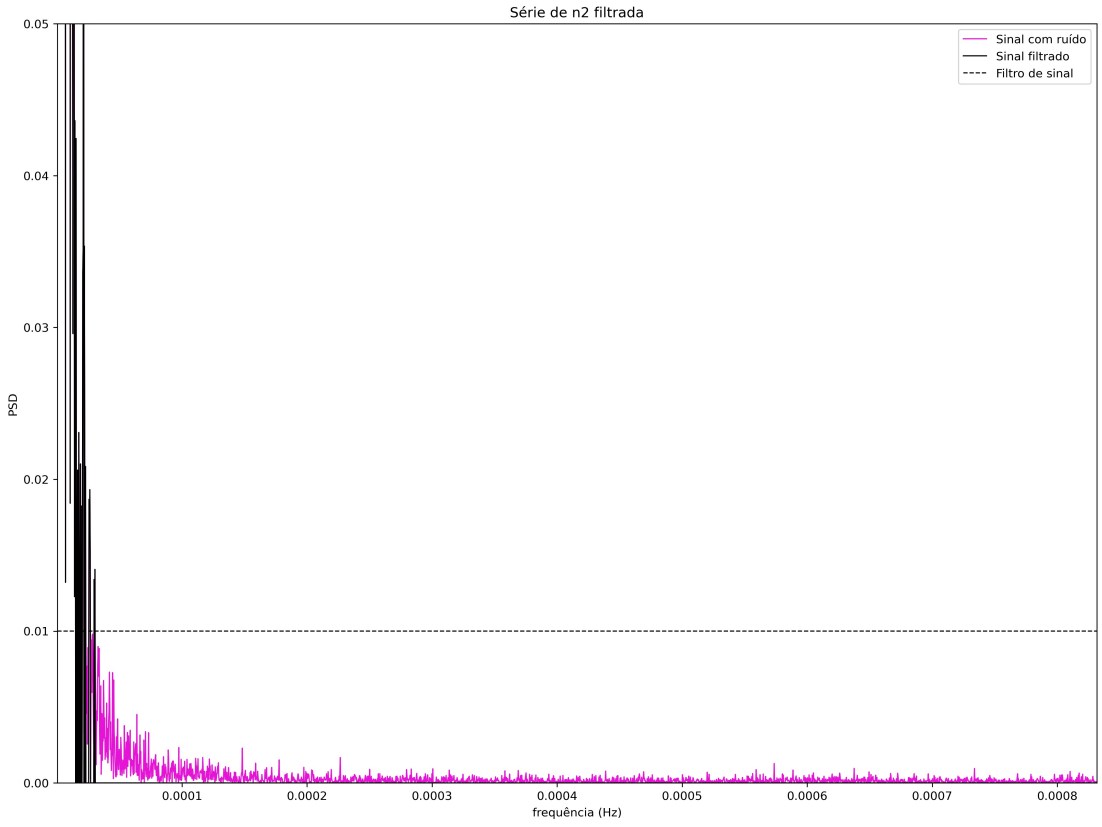


Figura C.6: Filtro do sinal no domínio da frequência.

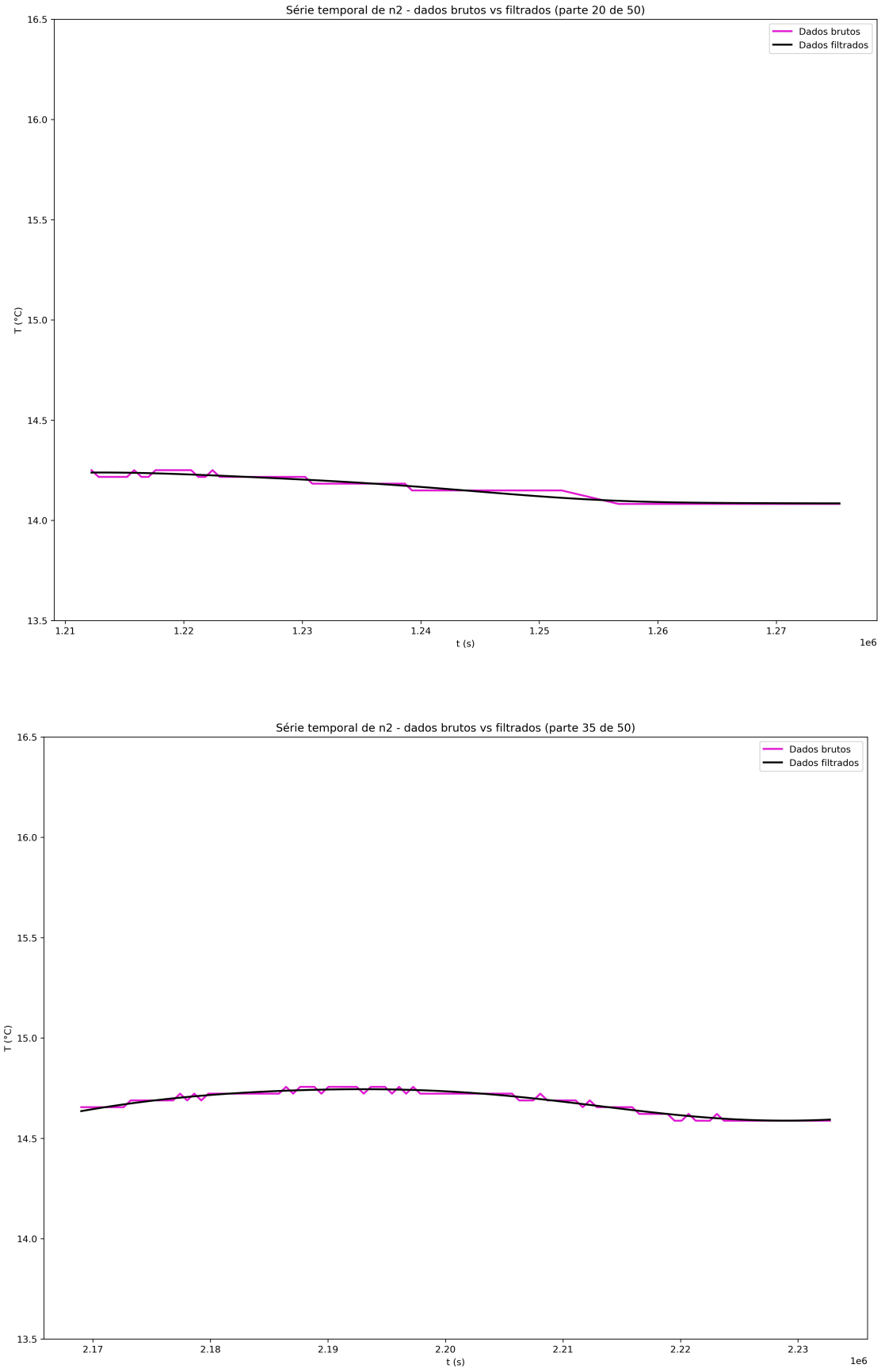


Figura C.7: Séries n2 bruta e filtrada.

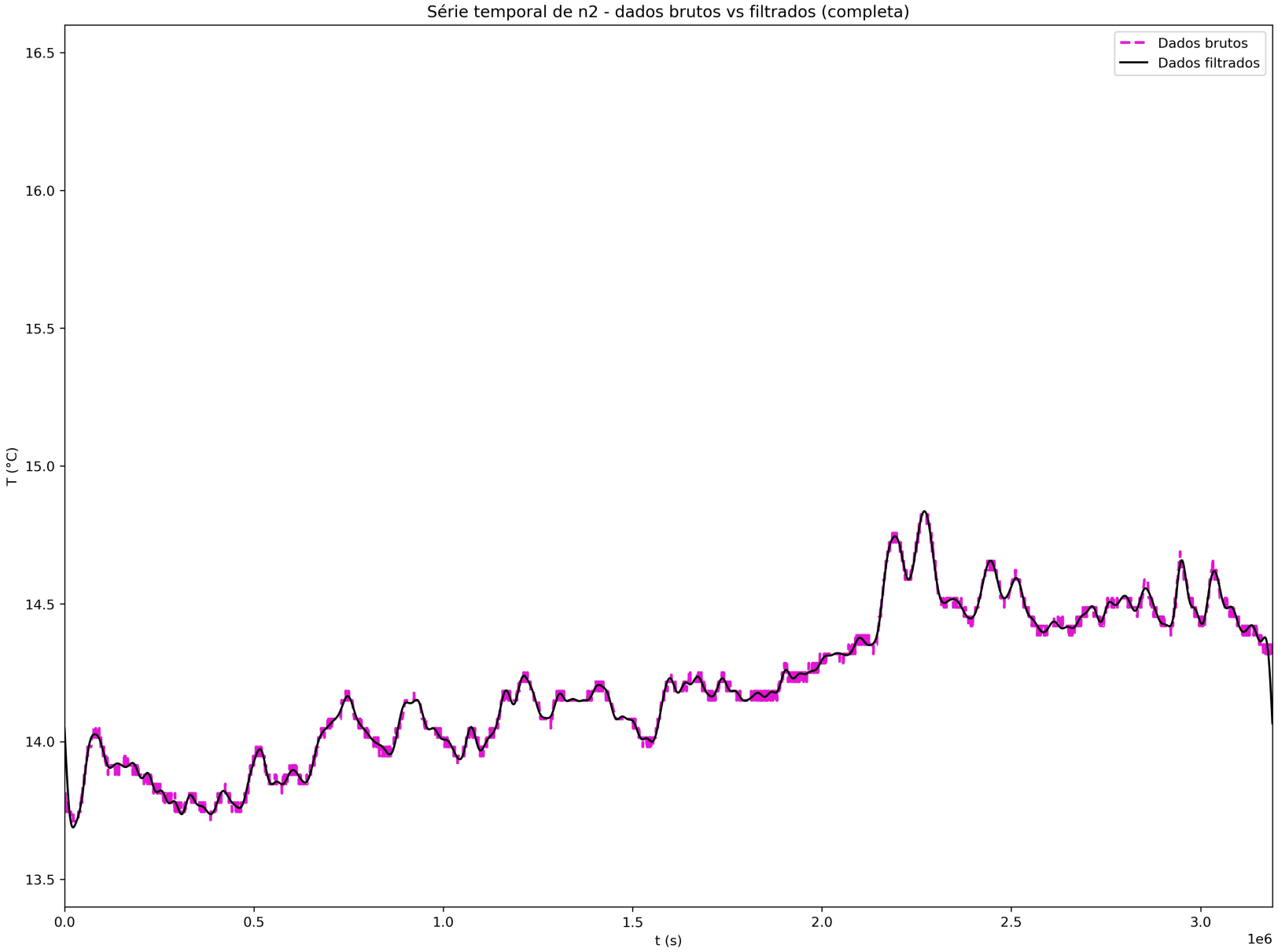


Figura C.8: Séries temporais completas de n2.

C3 Série n3

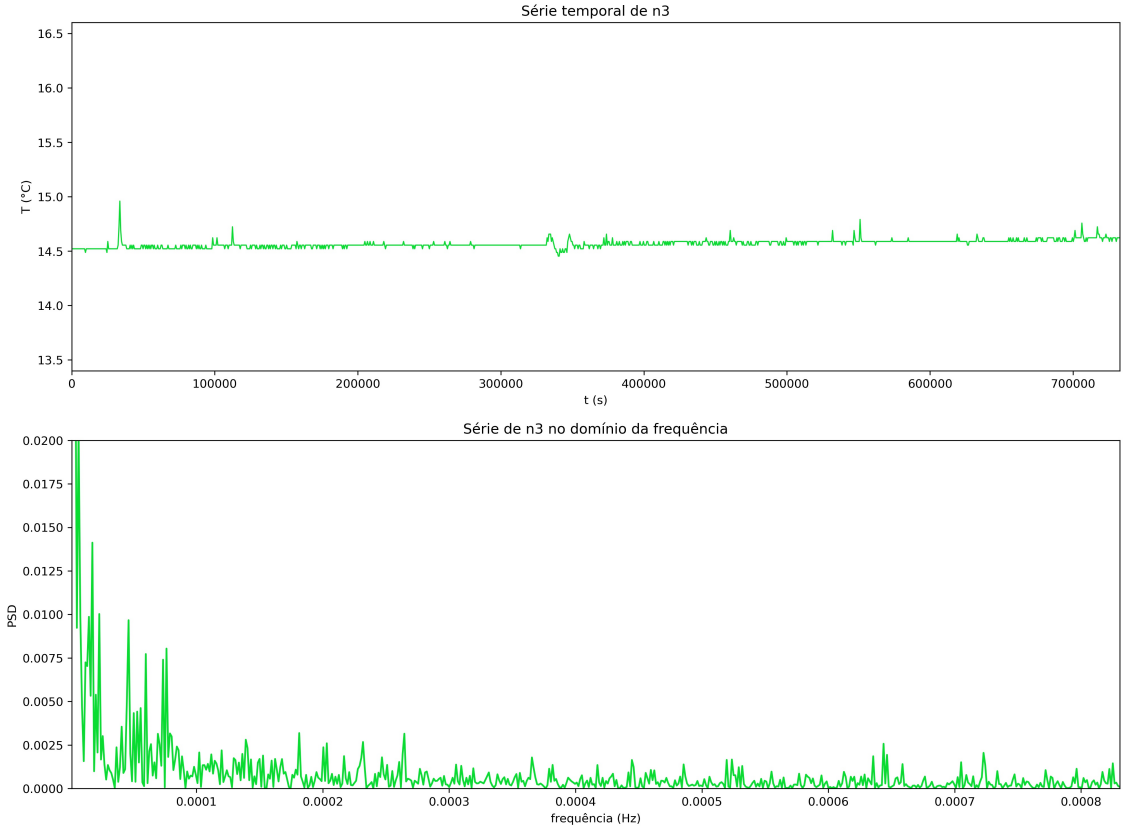


Figura C.9: Série de temperatura de n3 nos domínios do tempo e da frequência.

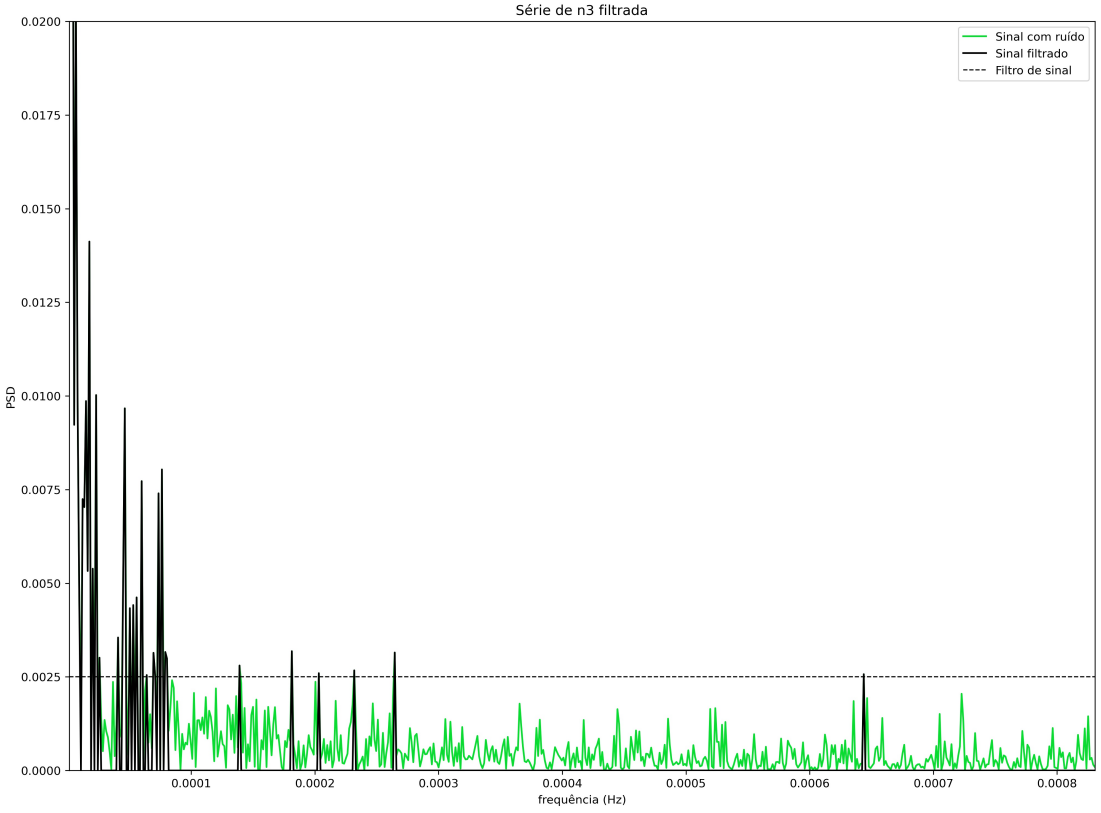


Figura C.10: Filtro do sinal no domínio da frequência.

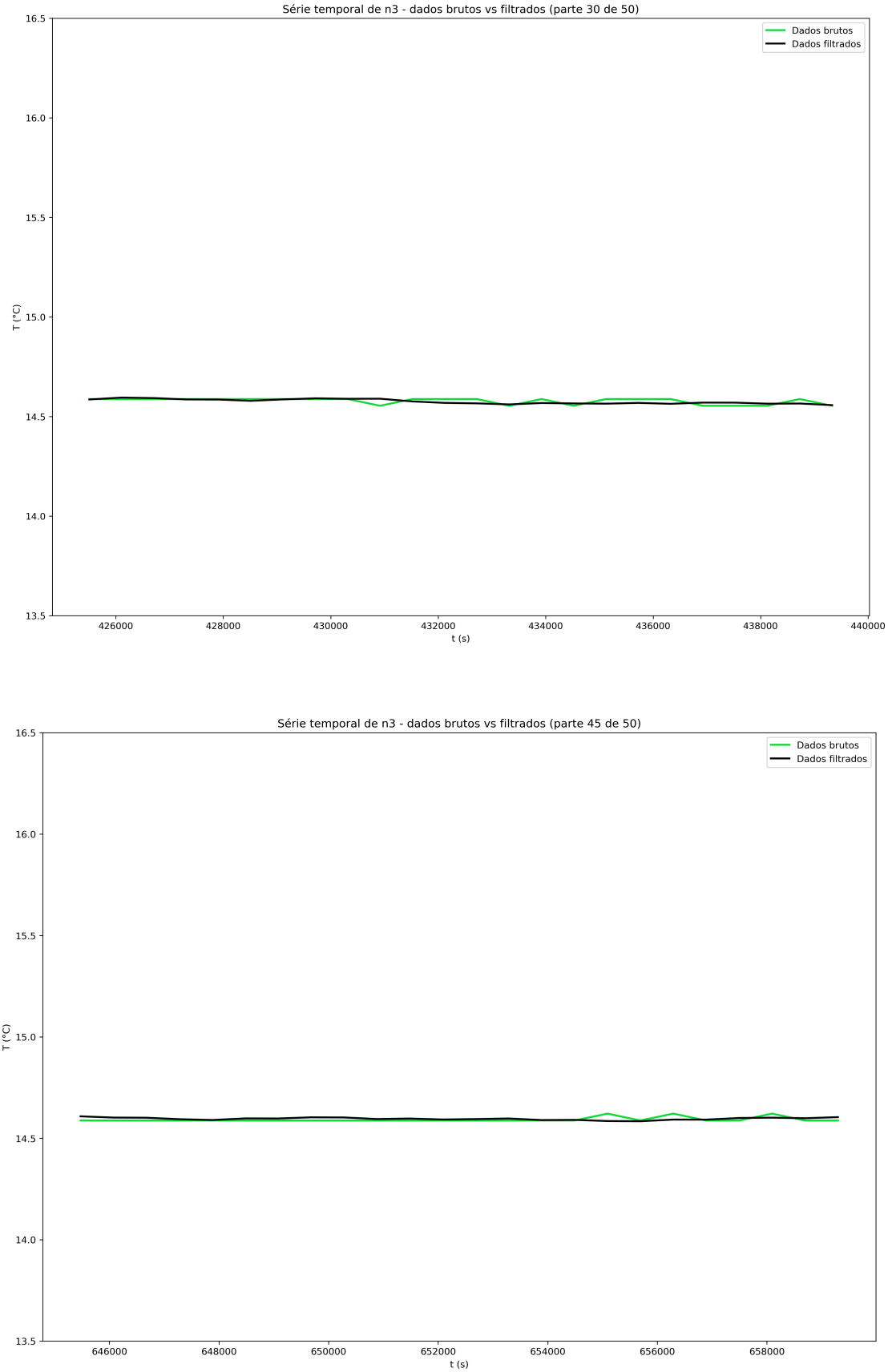


Figura C.11: Séries n3 bruta e filtrada.

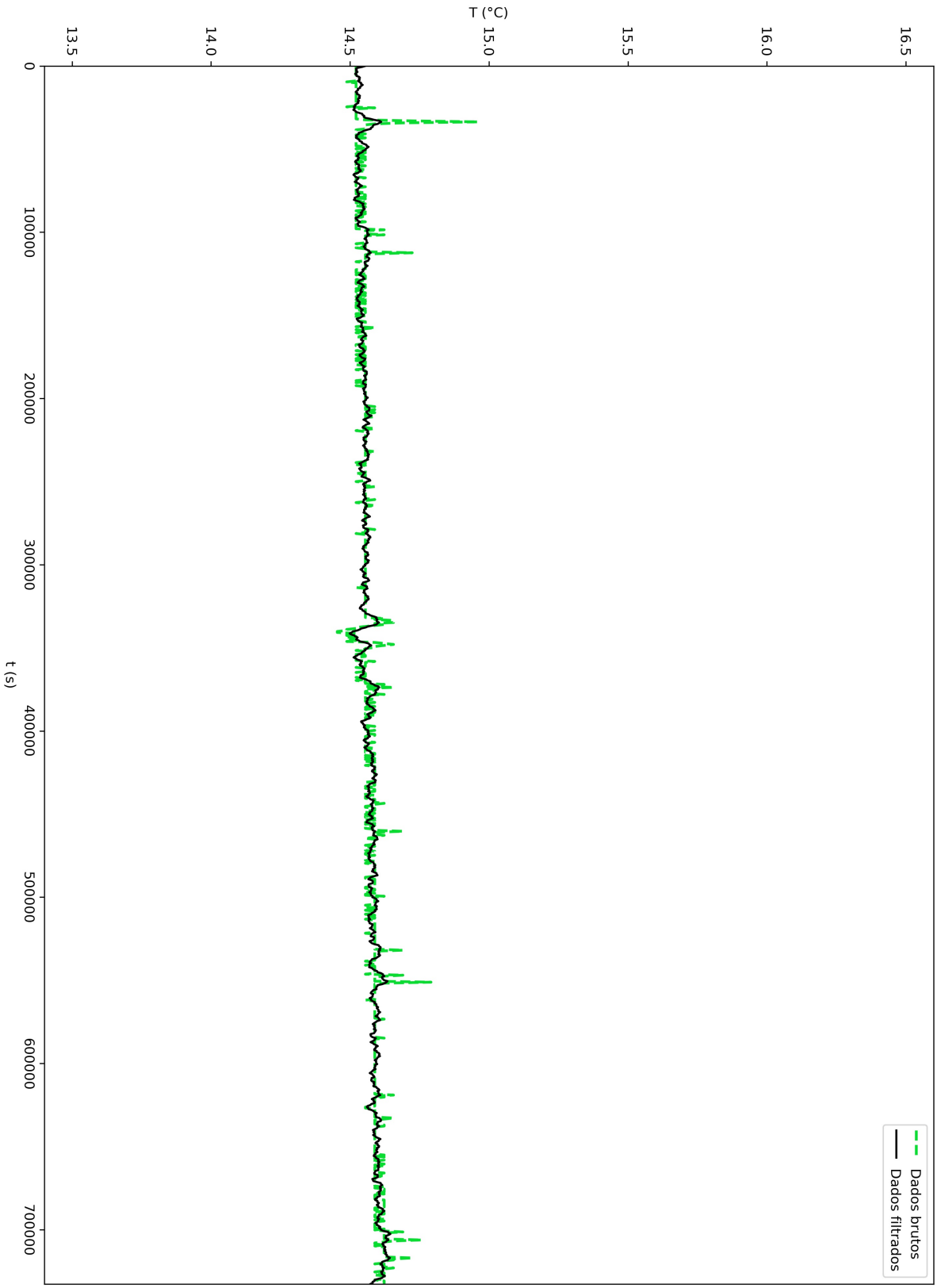


Figura C.12: Séries temporais completas de n3.

C4 Série n4

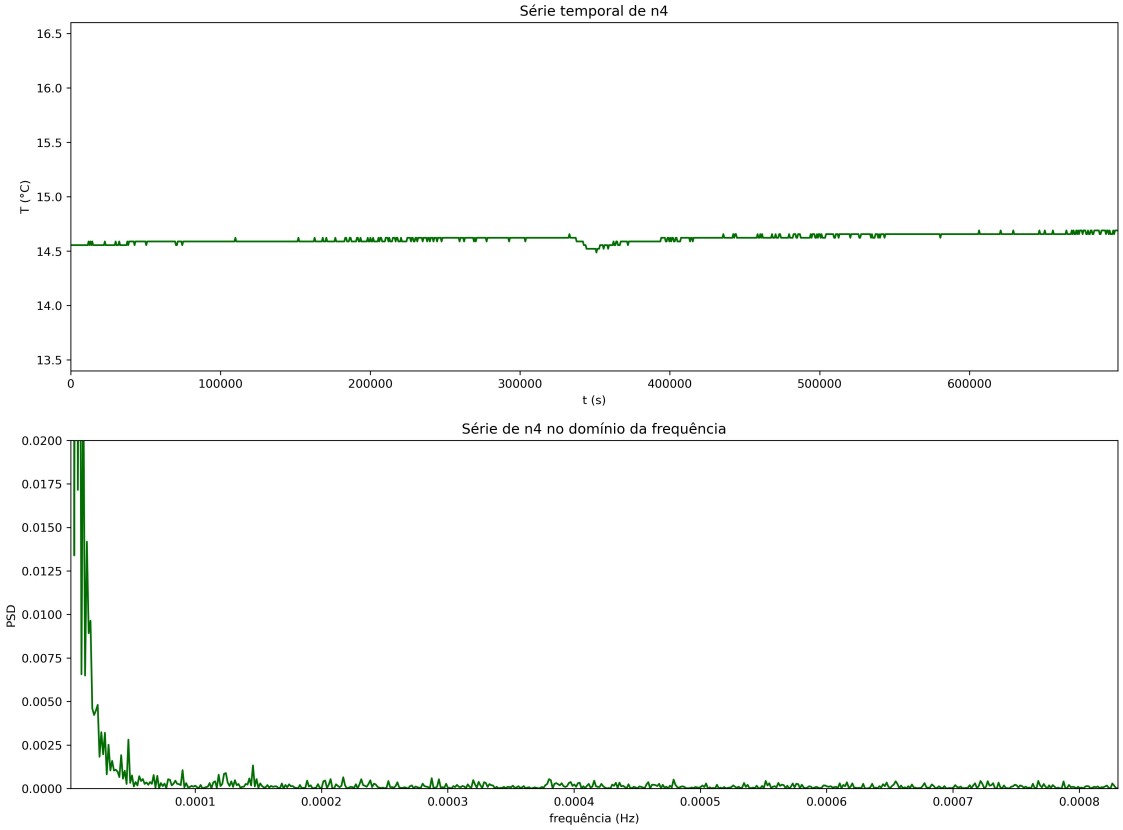


Figura C.13: Série de temperatura de n4 nos domínios do tempo e da frequência.

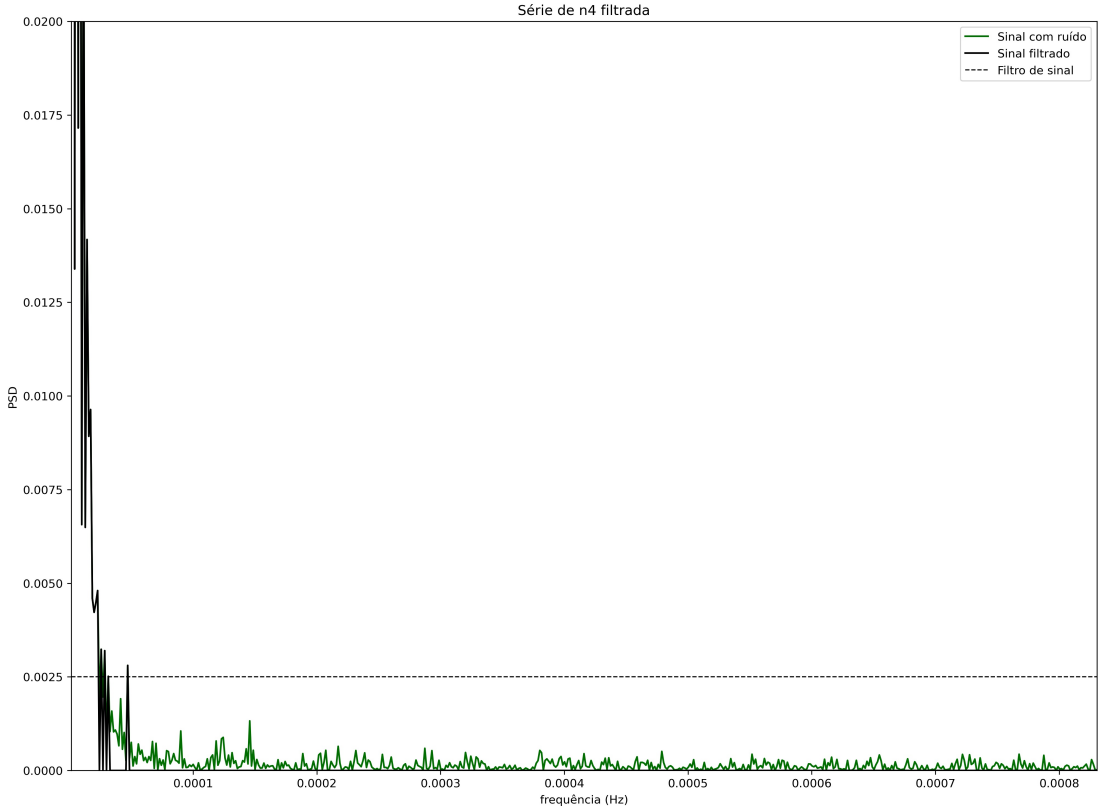


Figura C.14: Filtro do sinal no domínio da frequência.

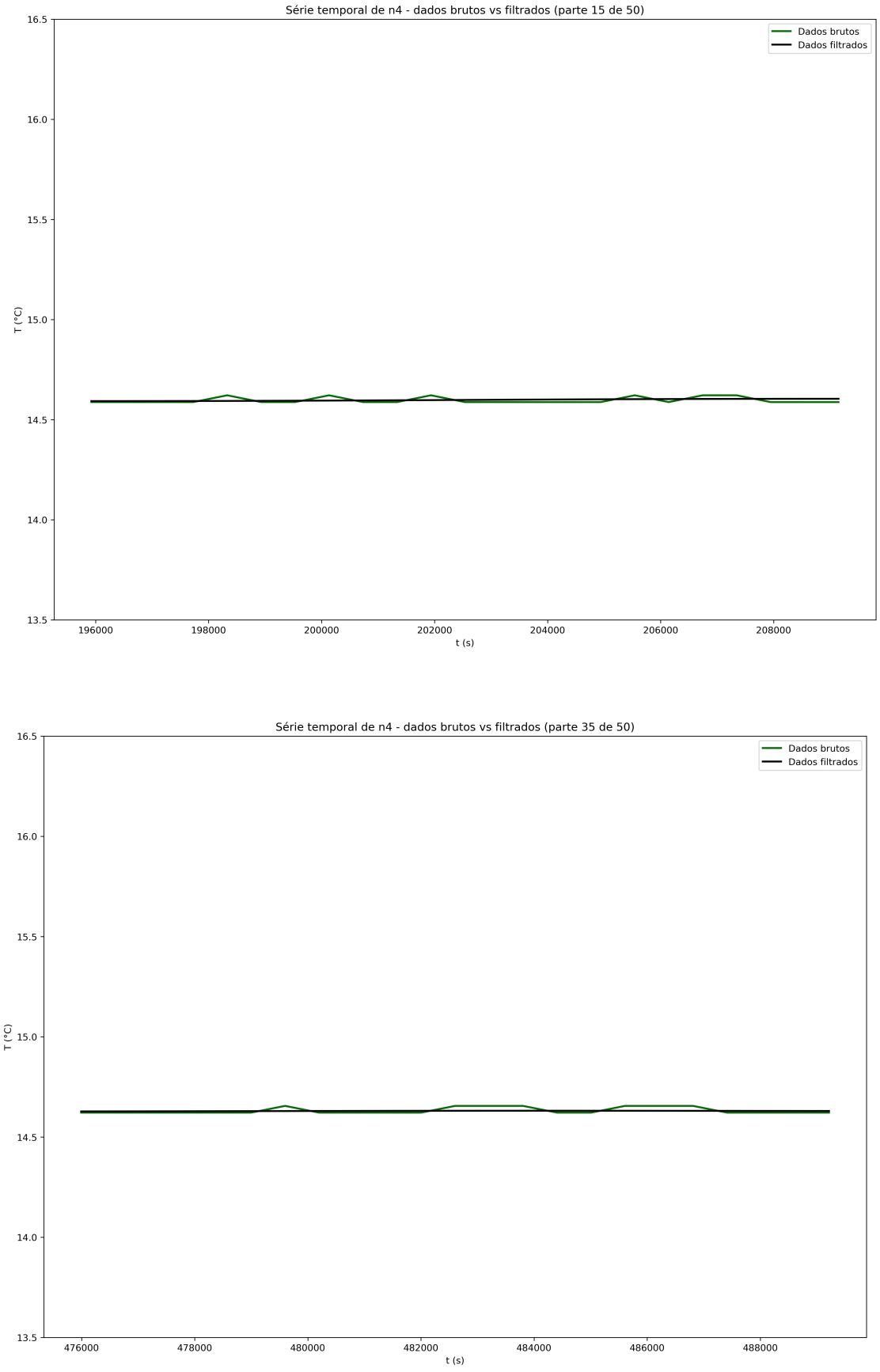


Figura C.15: Séries n4 bruta e filtrada.

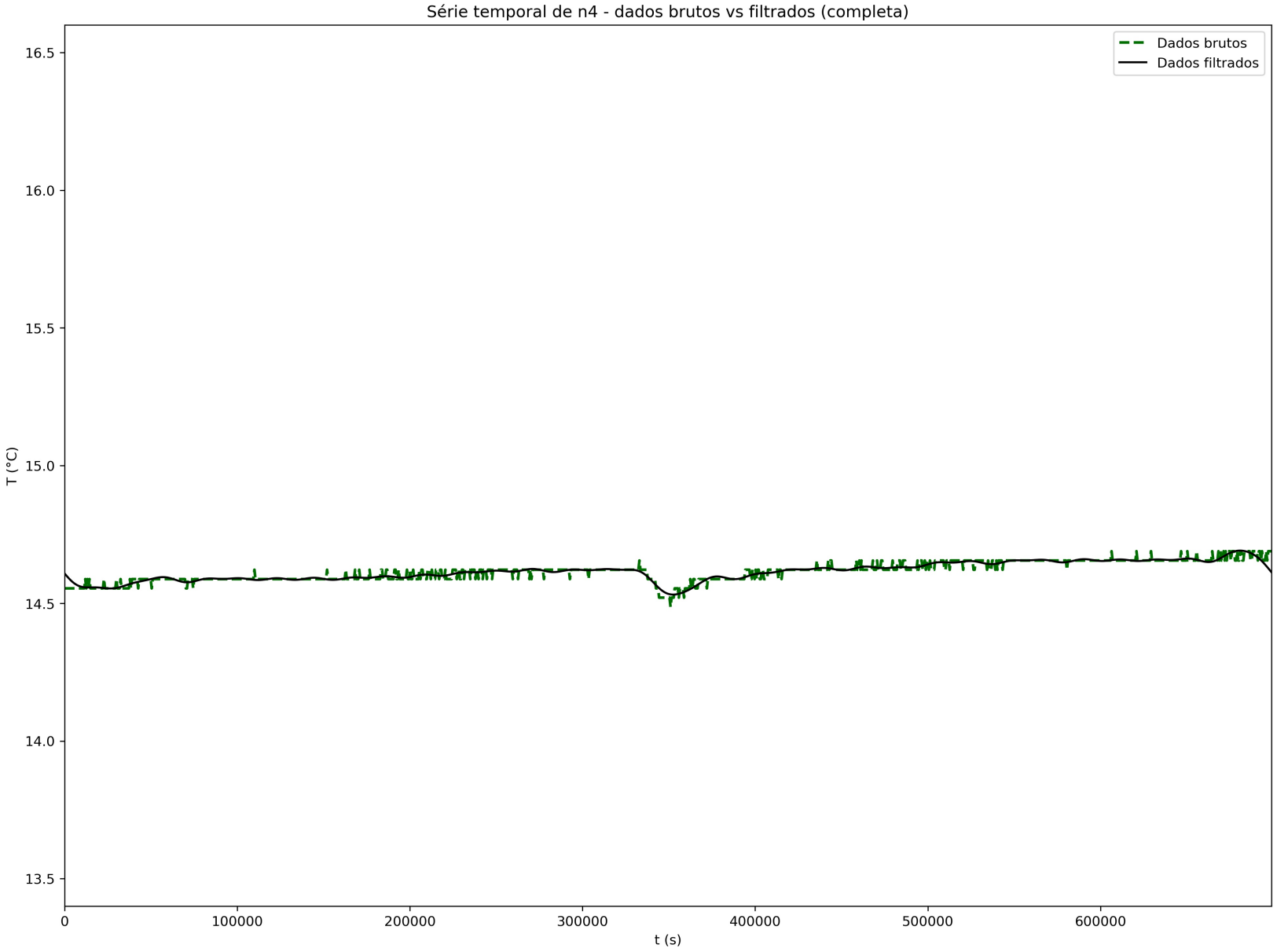


Figura C.16: Séries temporais completas de n4.

C5 Série n5

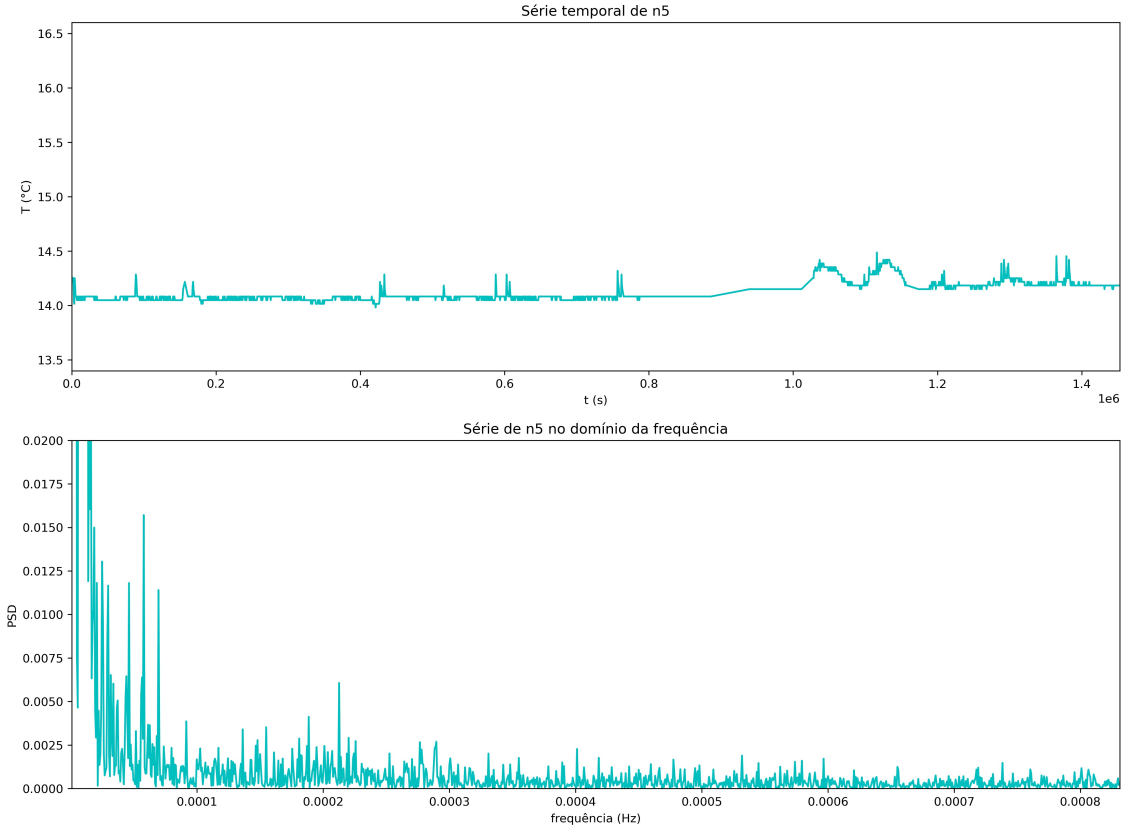


Figura C.17: Série de temperatura de n5 nos domínios do tempo e da frequência.

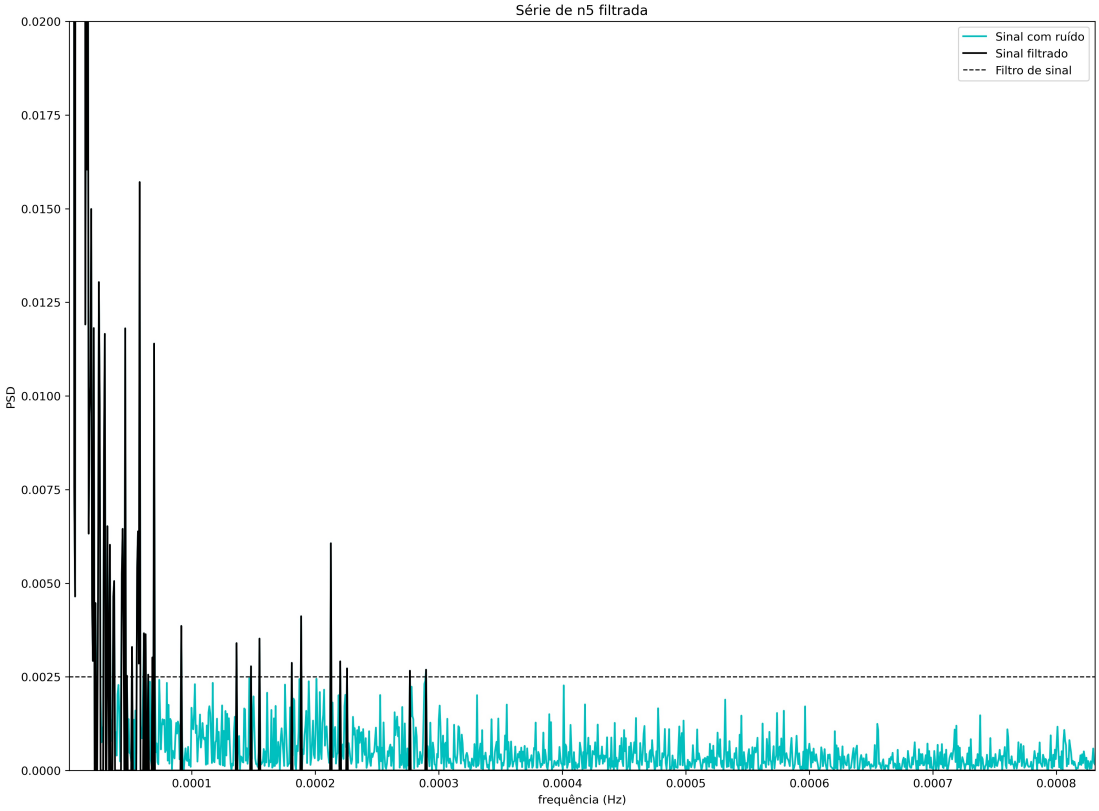
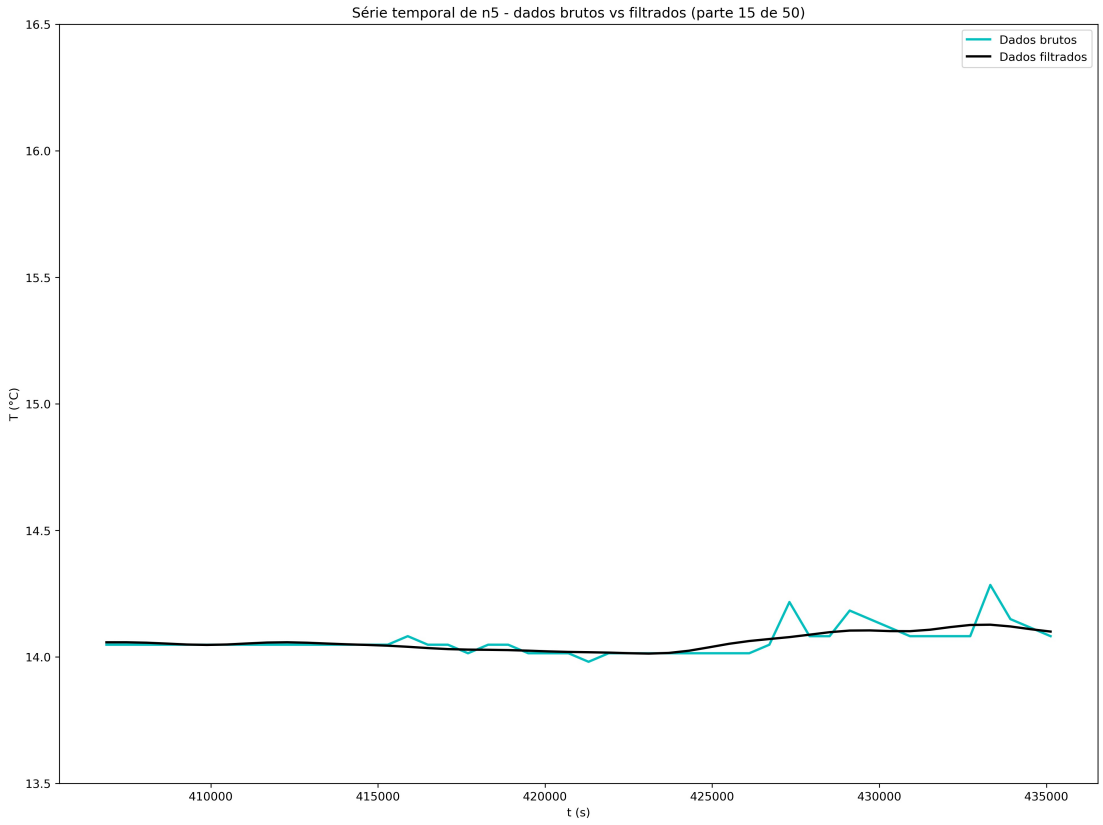


Figura C.18: Filtro do sinal no domínio da frequência.



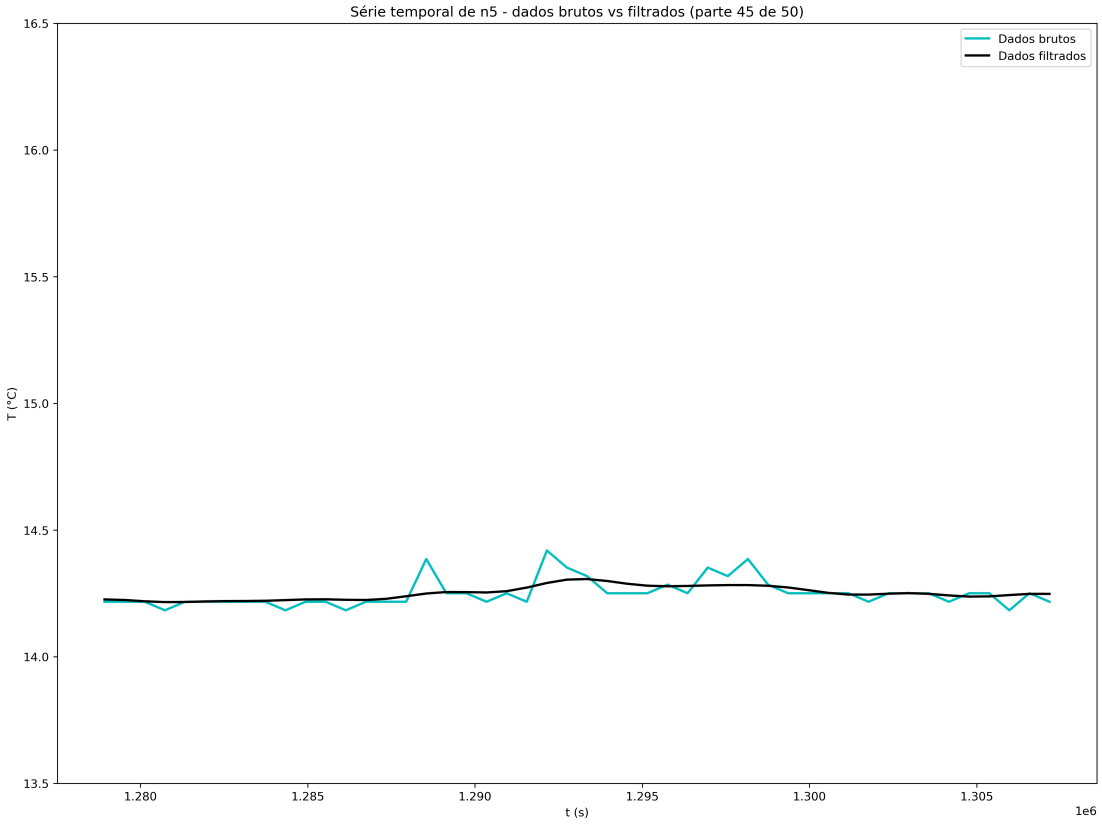


Figura C.19: Séries n5 bruta e filtrada.

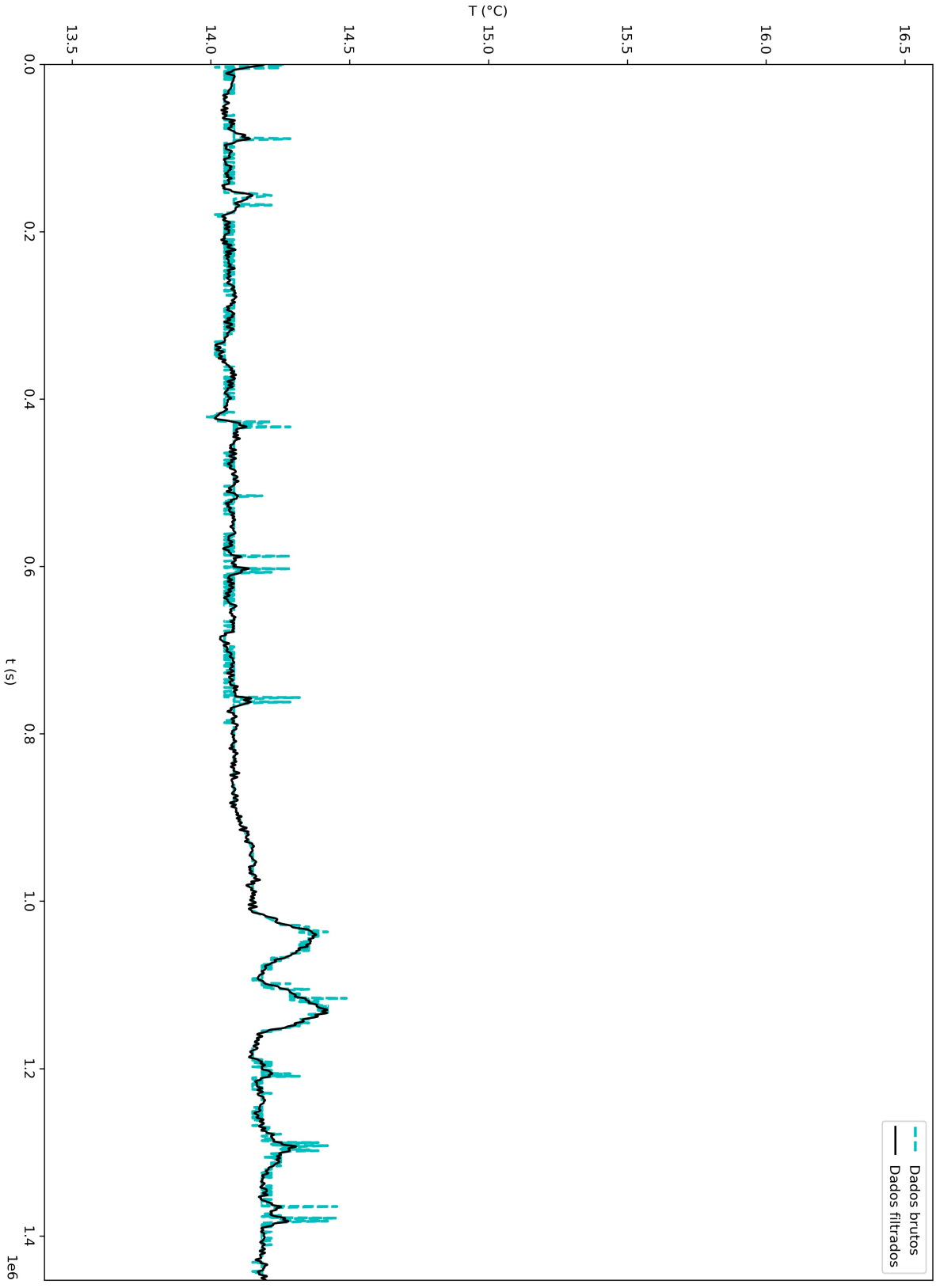


Figura C.20: Séries temporais completas de n5.

C6 Série n9

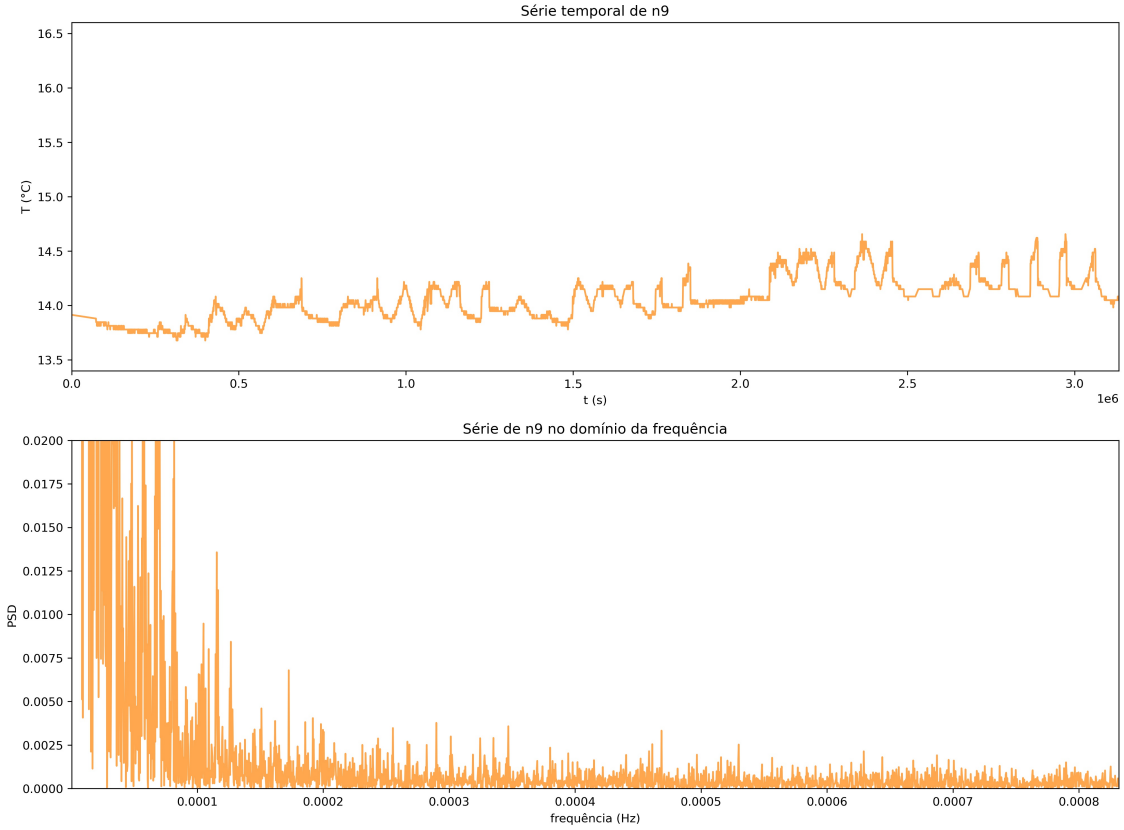


Figura C.21: Série de temperatura de n9 nos domínios do tempo e da frequência.

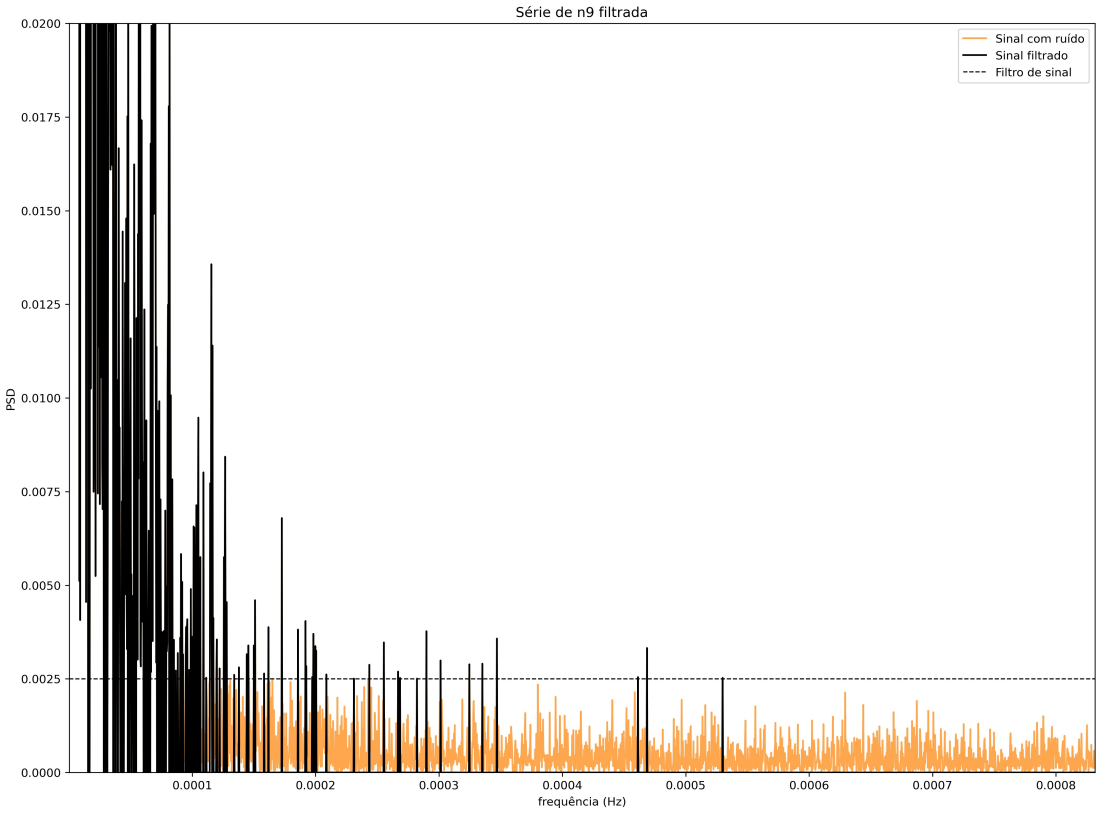


Figura C.22: Filtro do sinal no domínio da frequência.

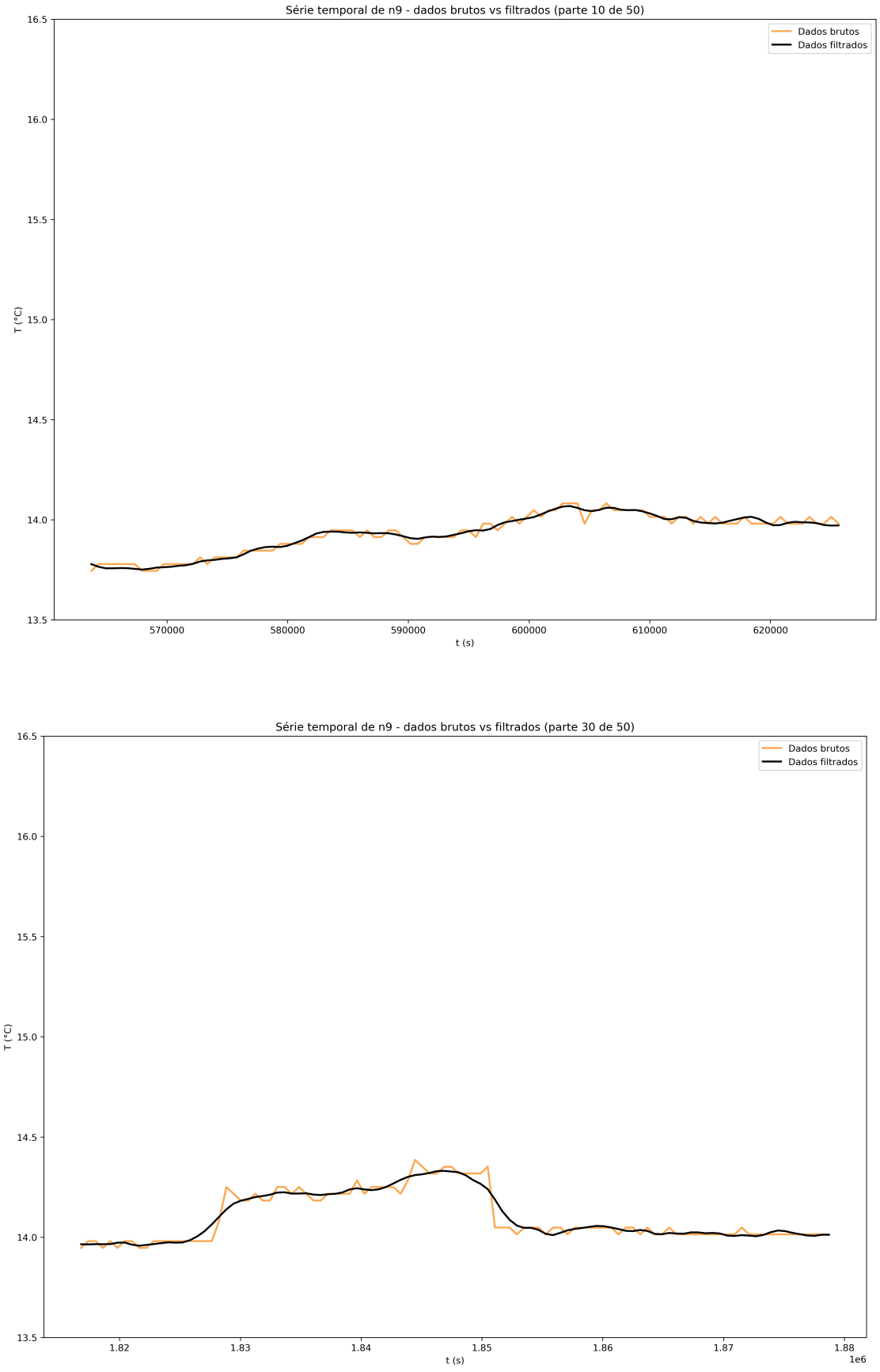


Figura C.23: Séries n9 bruta e filtrada.

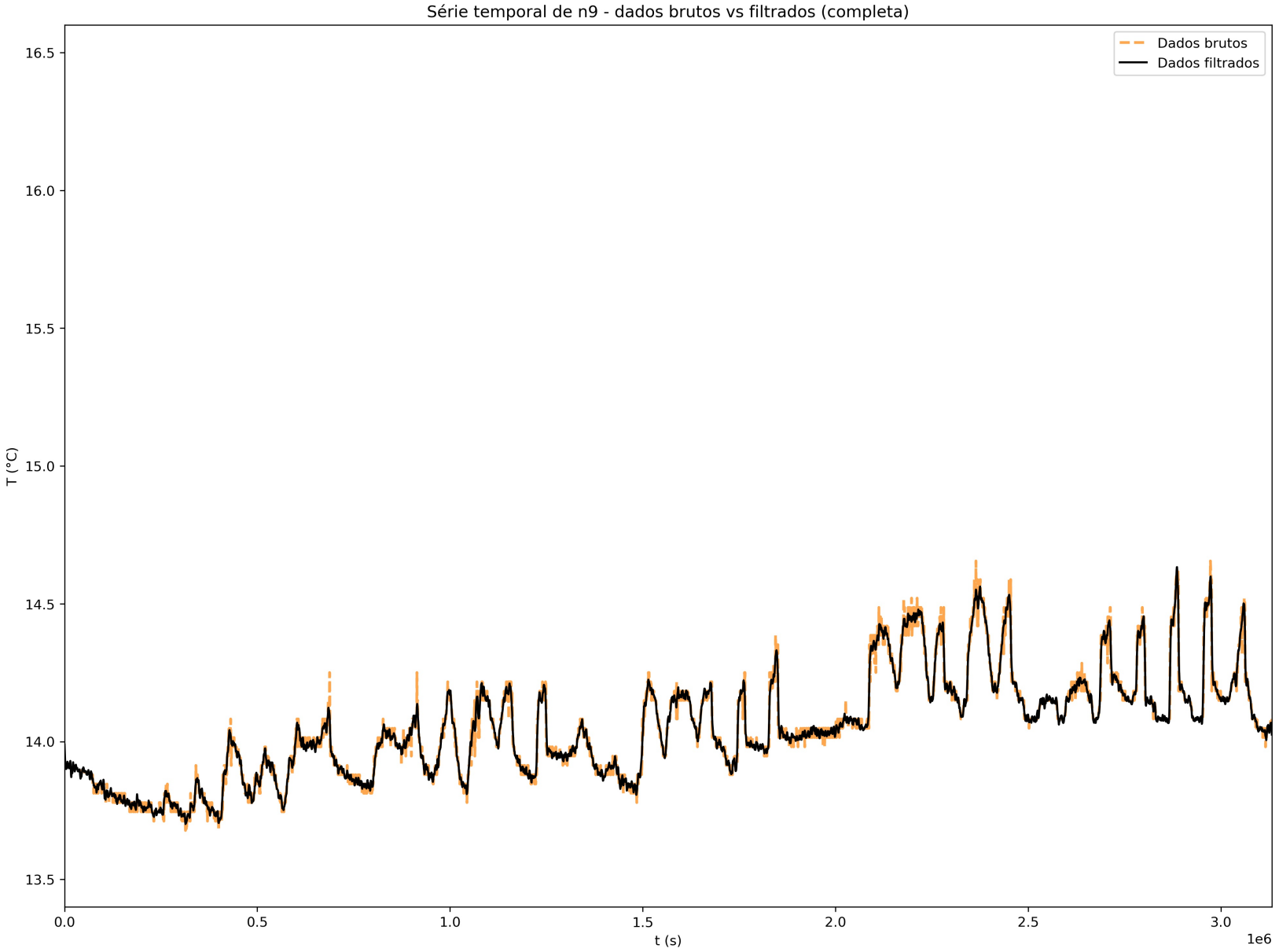


Figura C.24: Séries temporais completas de n9.

C7 Série n10

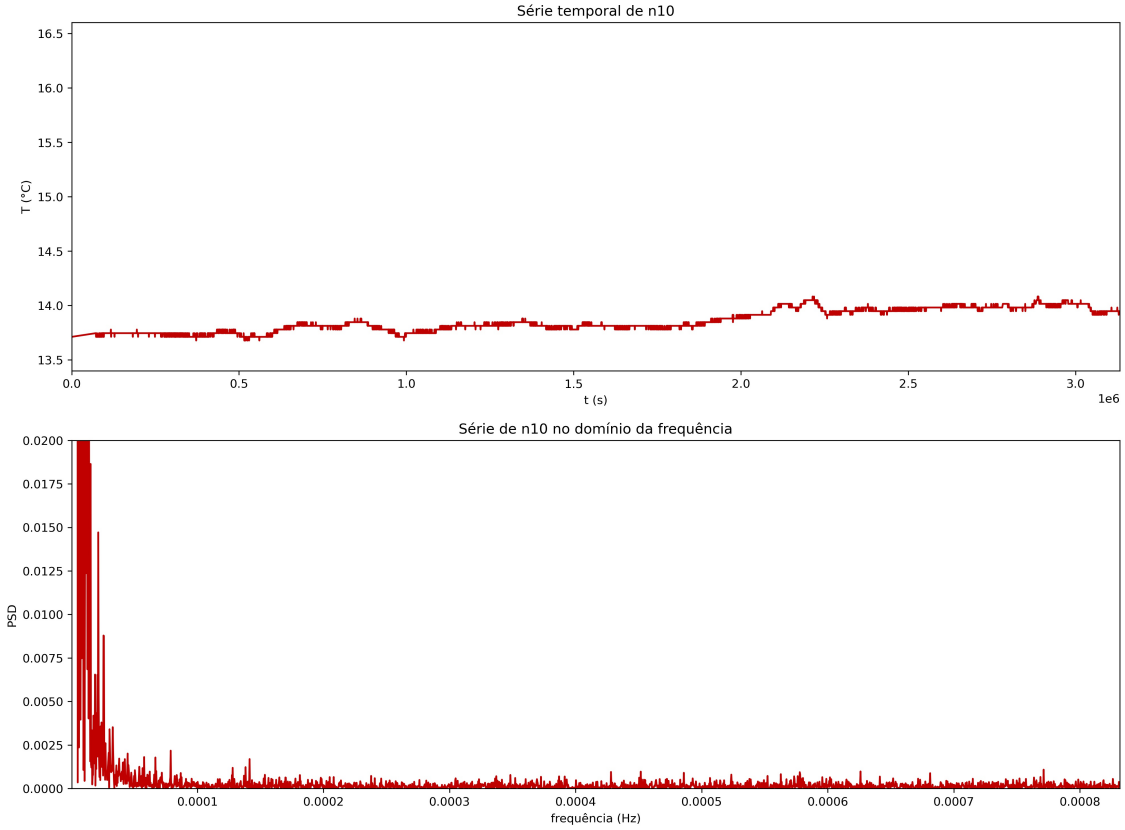


Figura C.25: Série de temperatura de n10 nos domínios do tempo e da frequência.

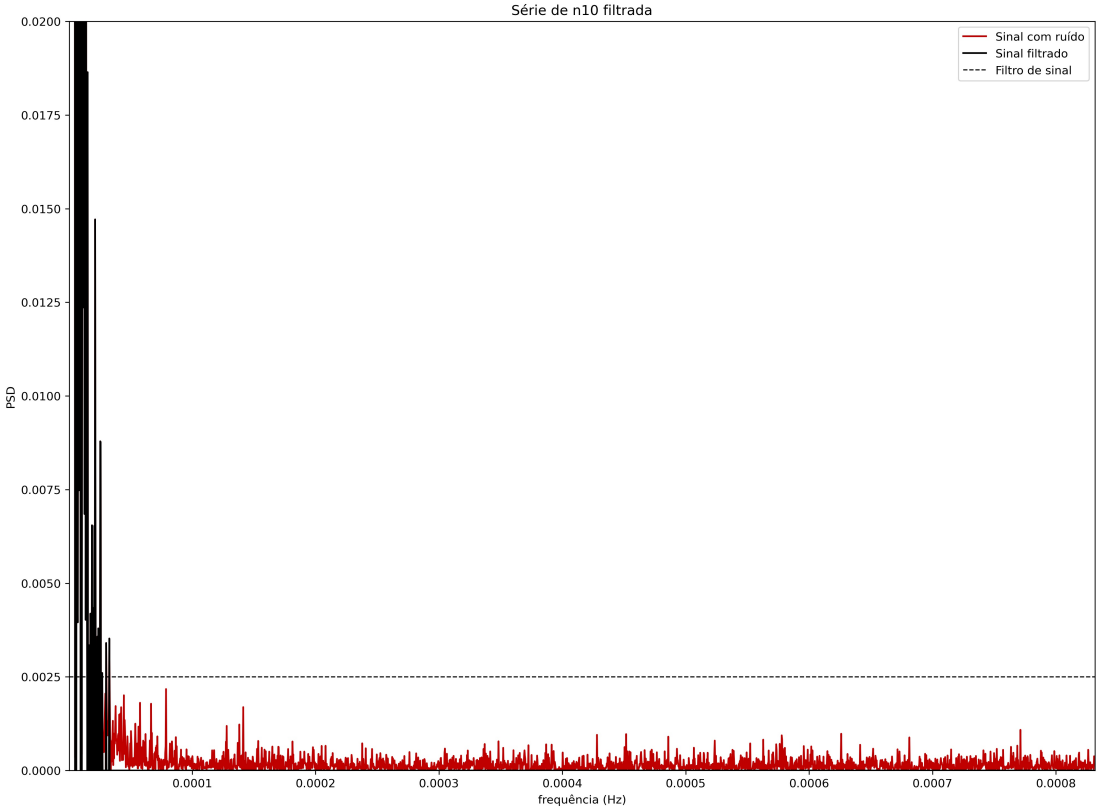
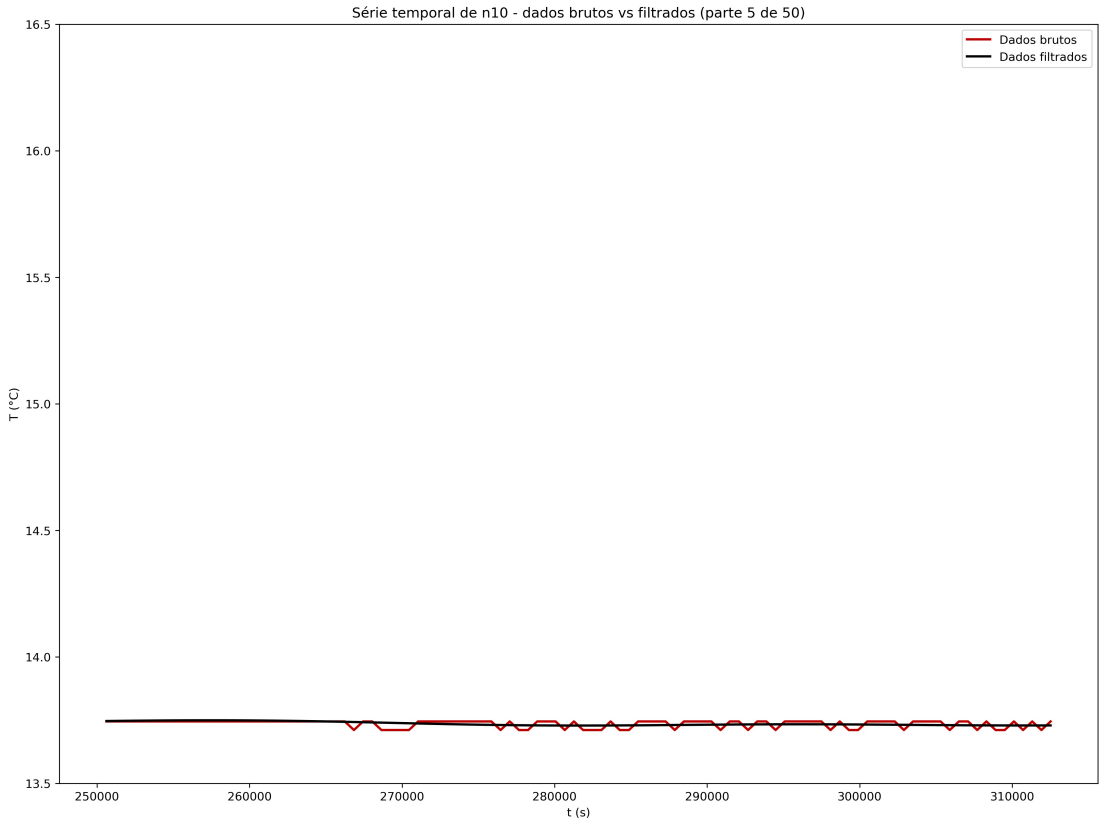


Figura C.26: Filtro do sinal no domínio da frequência.



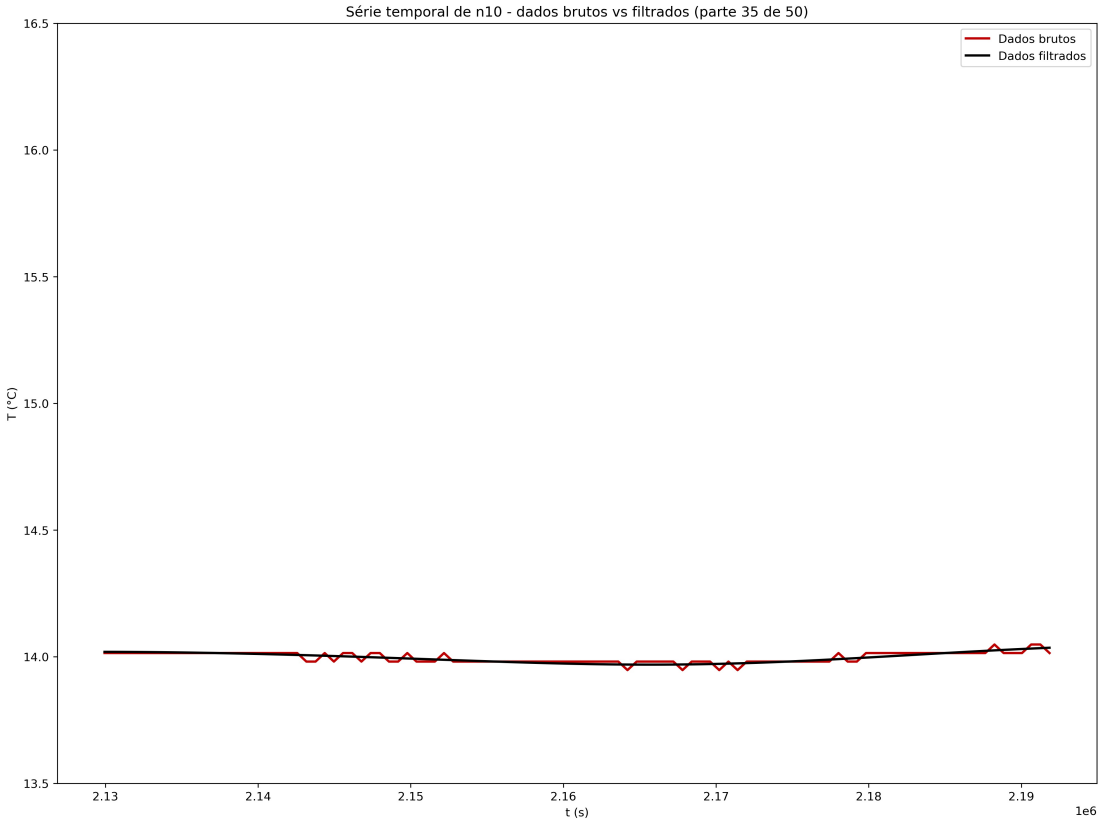


Figura C.27: Séries n10 bruta e filtrada.

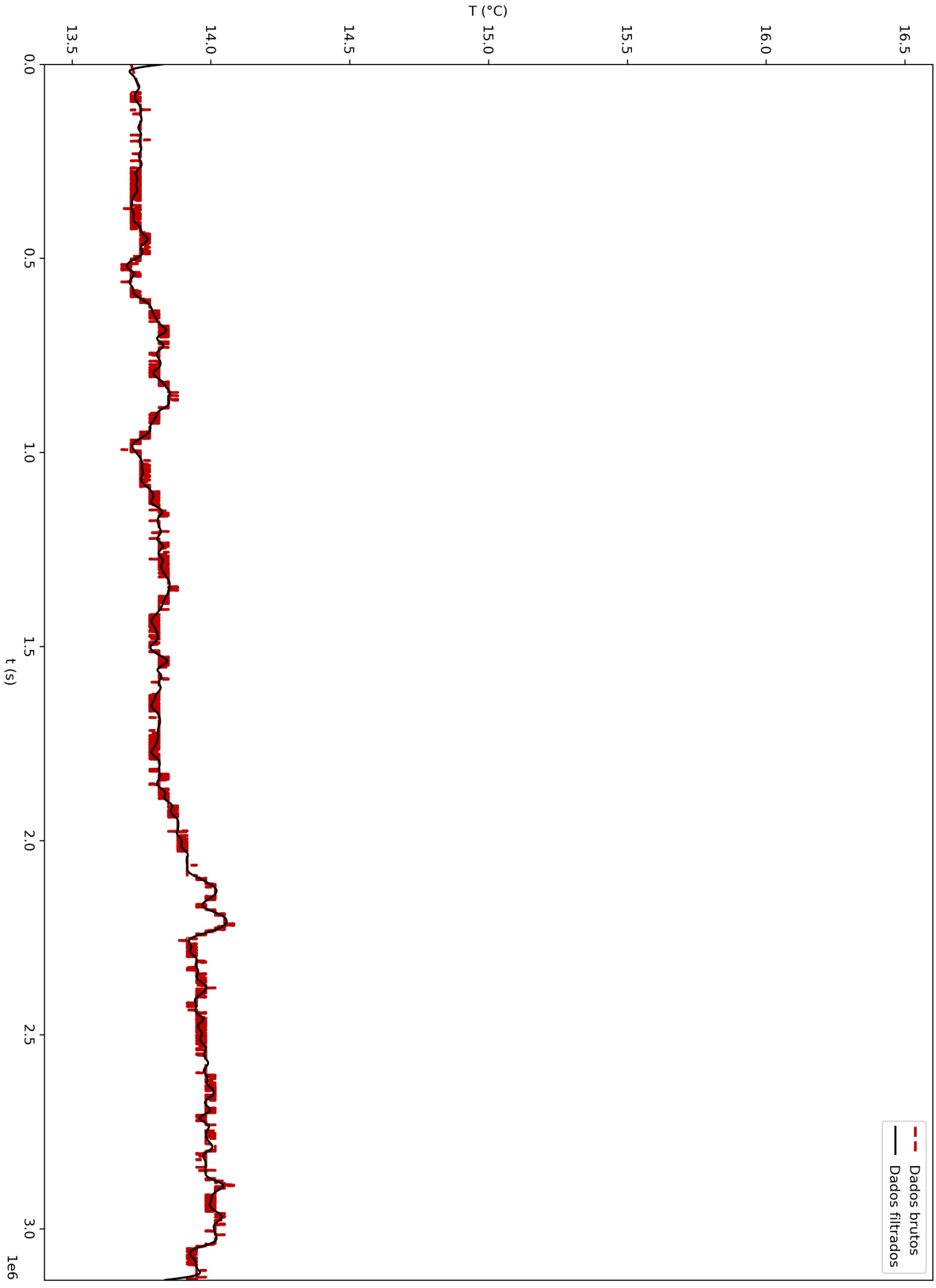


Figura C.28: Séries temporais completas de n10.

C8 Série n11

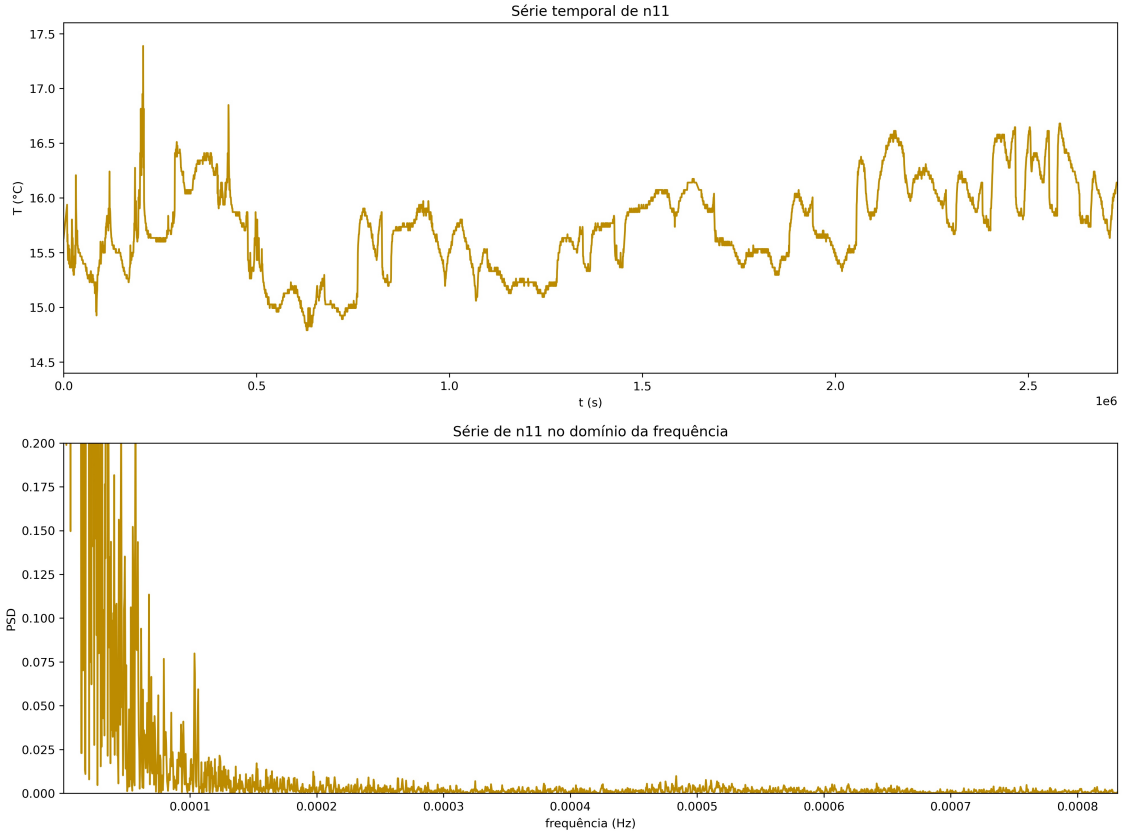


Figura C.29: Série de temperatura de n11 nos domínios do tempo e da frequência.

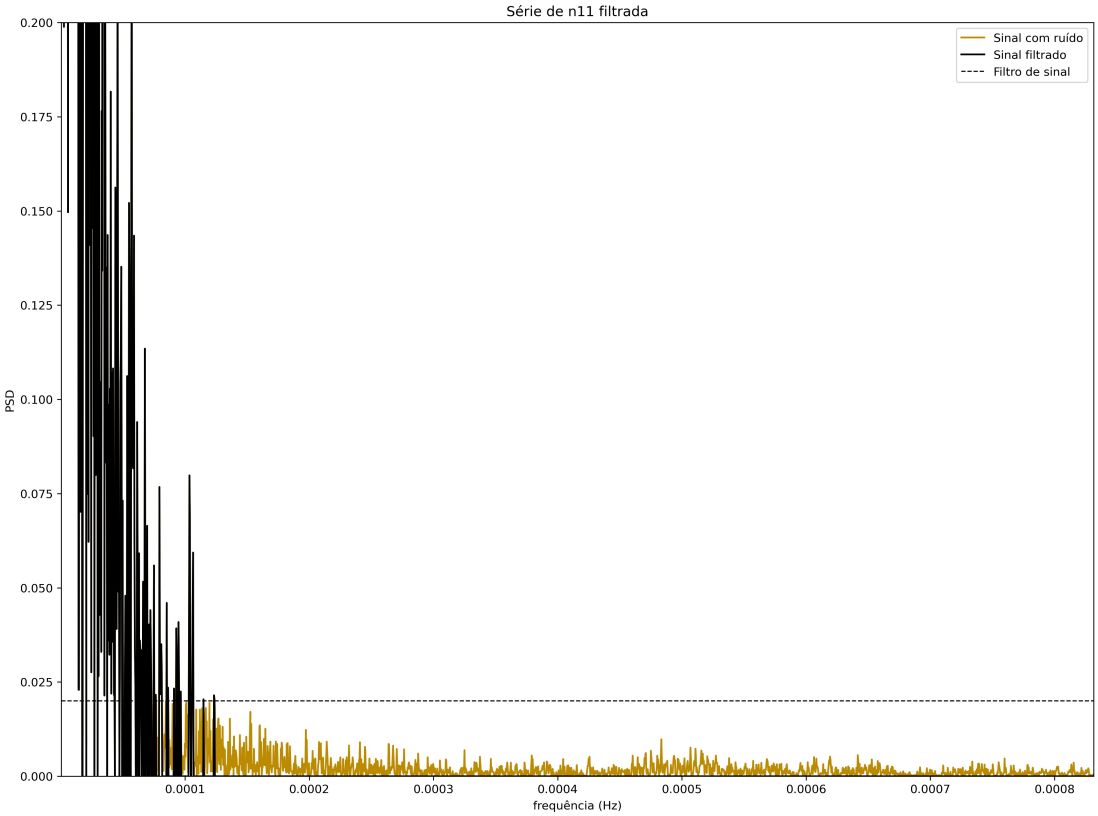


Figura C.30: Filtro do sinal no domínio da frequência.

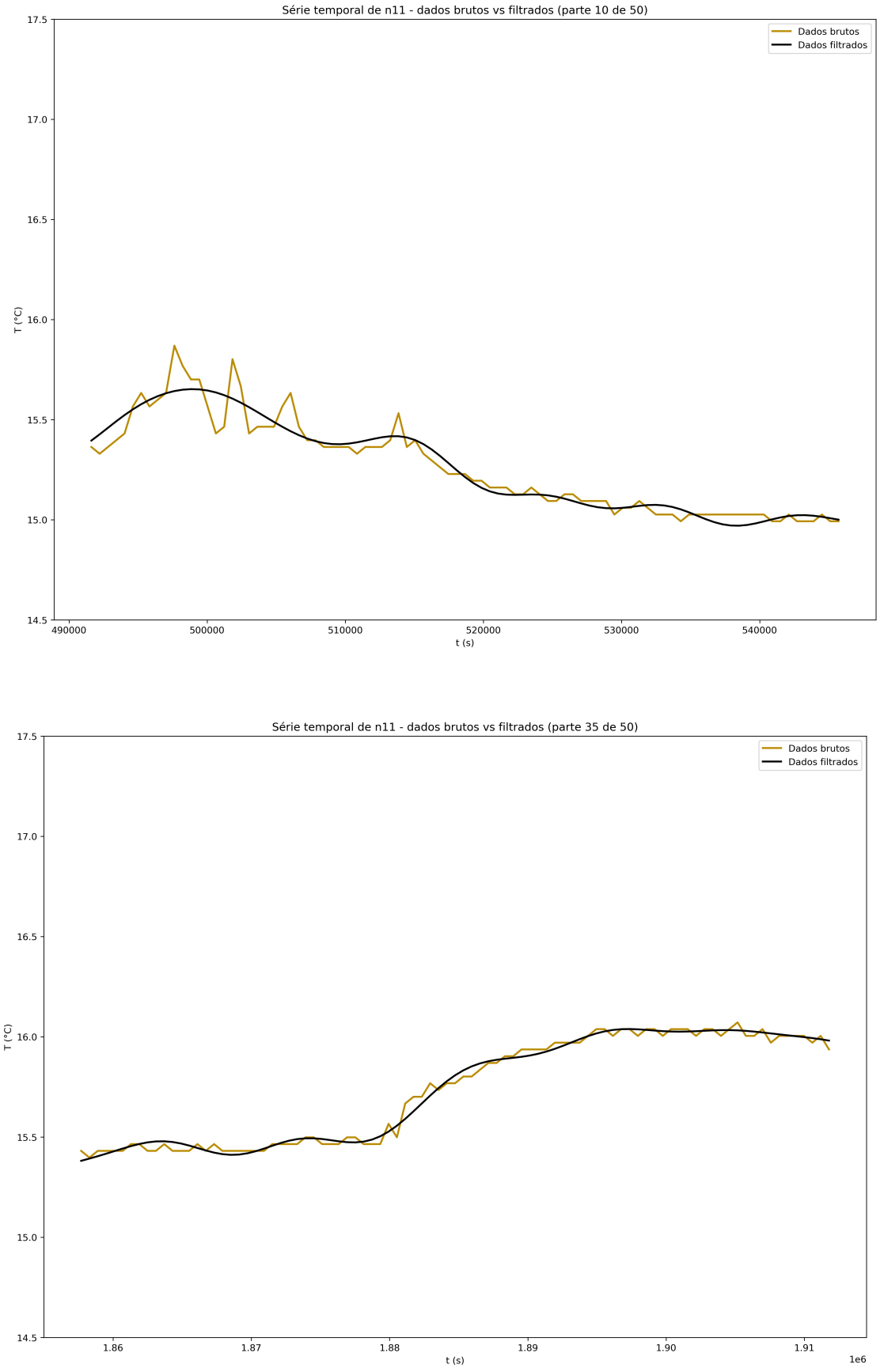


Figura C.31: Séries n11 bruta e filtrada.

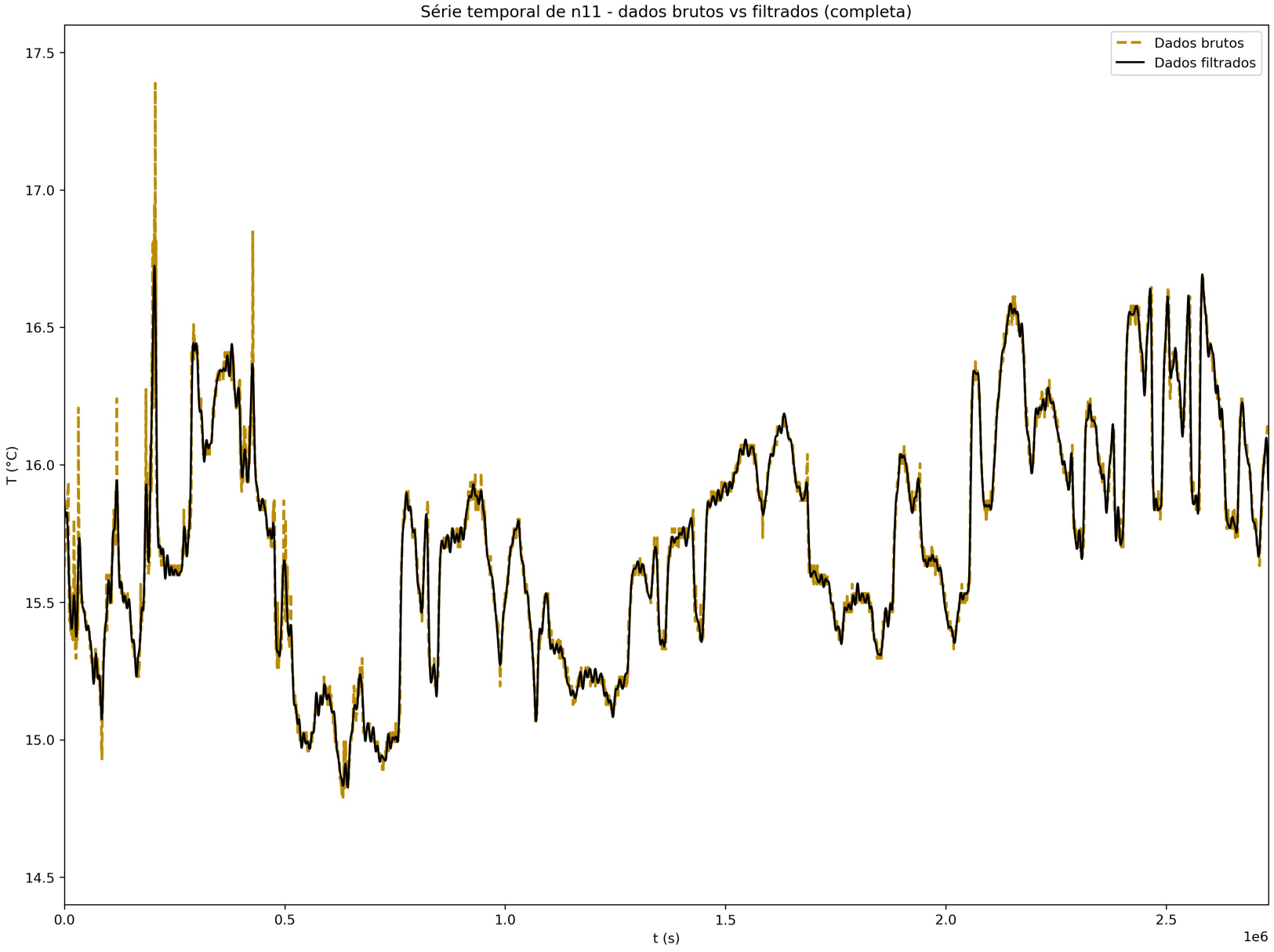


Figura C.32: Séries temporais completas de n11.

C9 Todas as séries filtradas

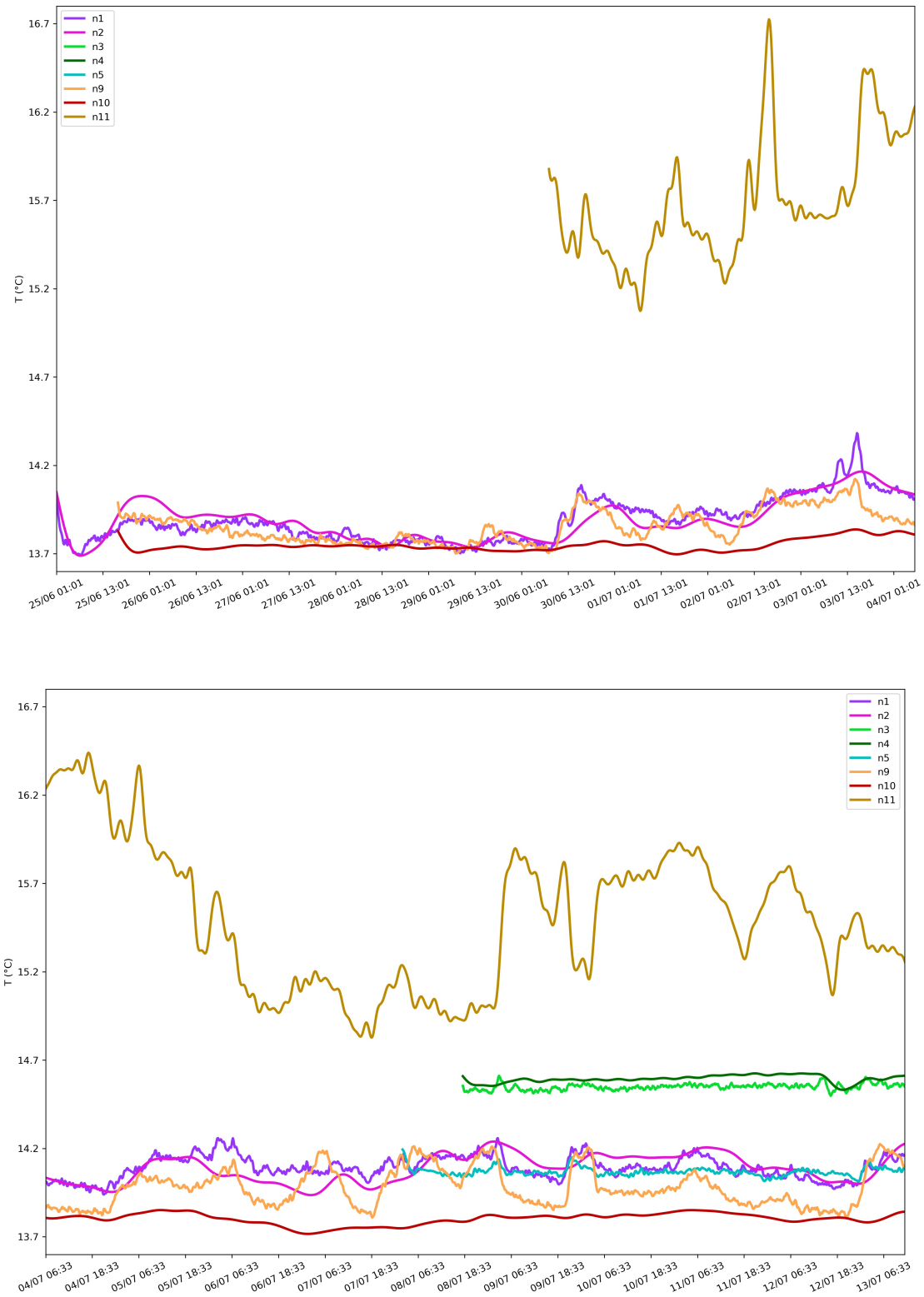


Figura C.33: Séries filtradas.

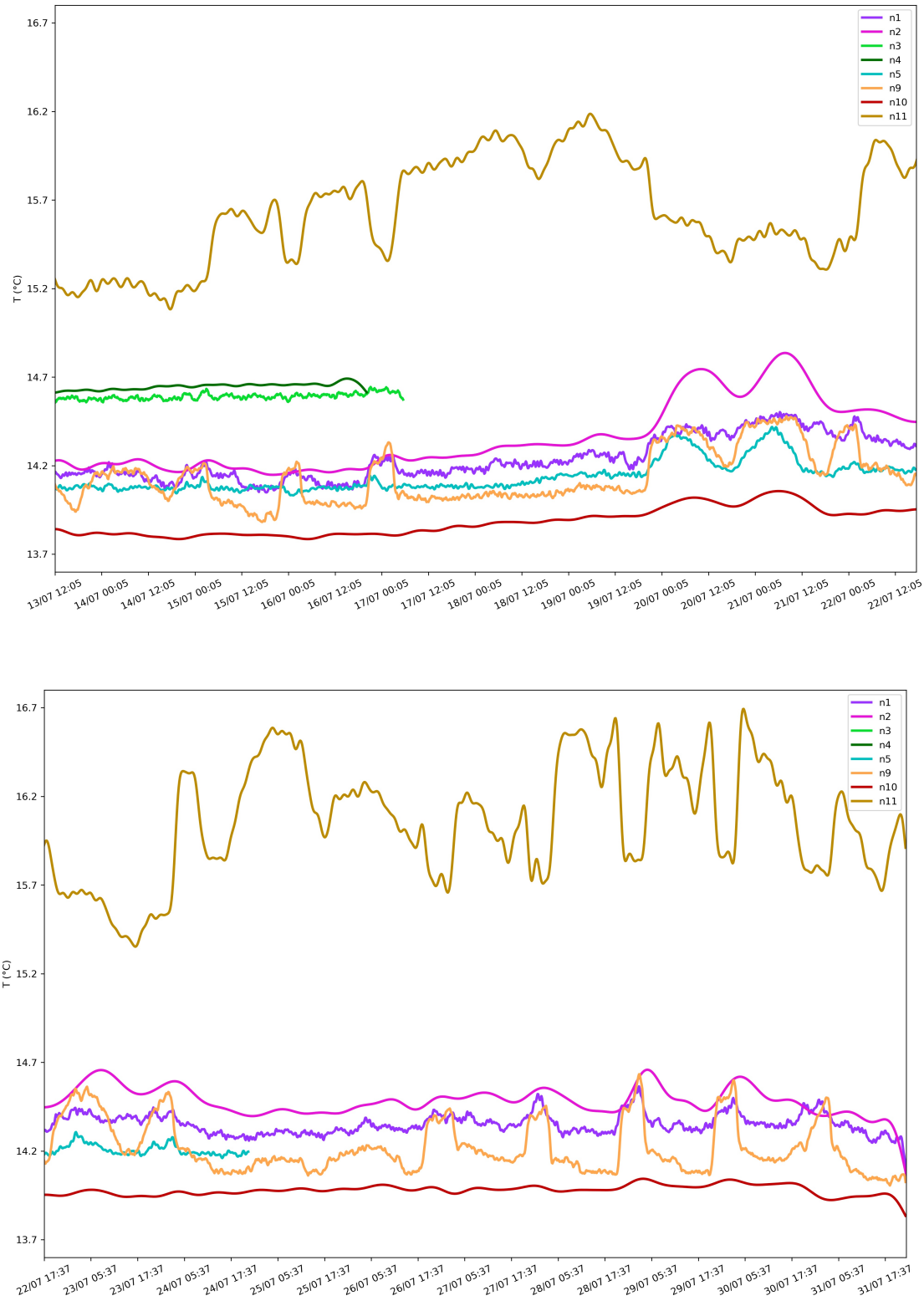


Figura C.34: Séries filtradas.

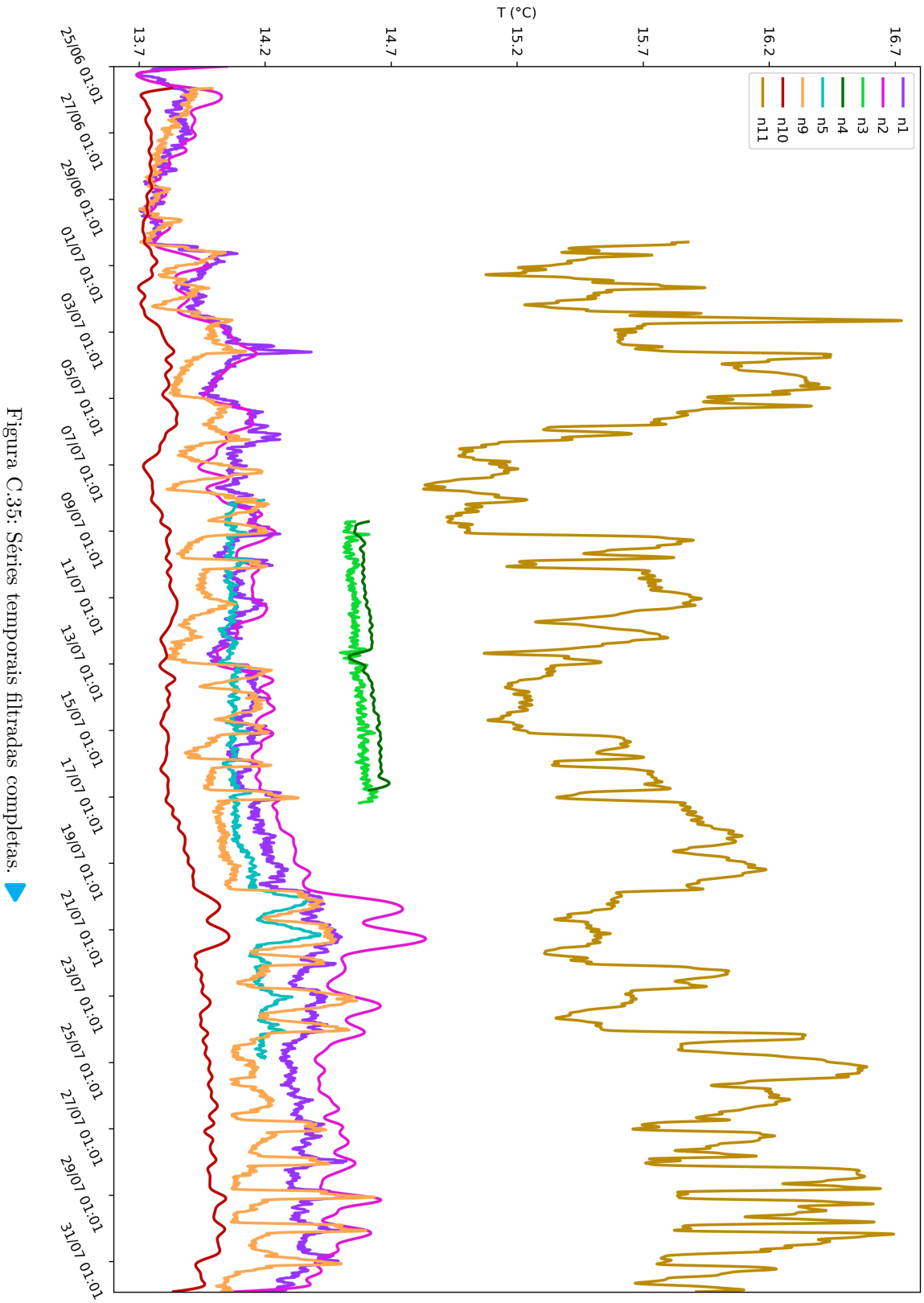


Figura C.35: Séries temporais filtradas completas.

Apêndice D - Filtragem das séries de temperatura da Segunda Campanha de Amostragem das Caves da Murganheira

D1 Série n1

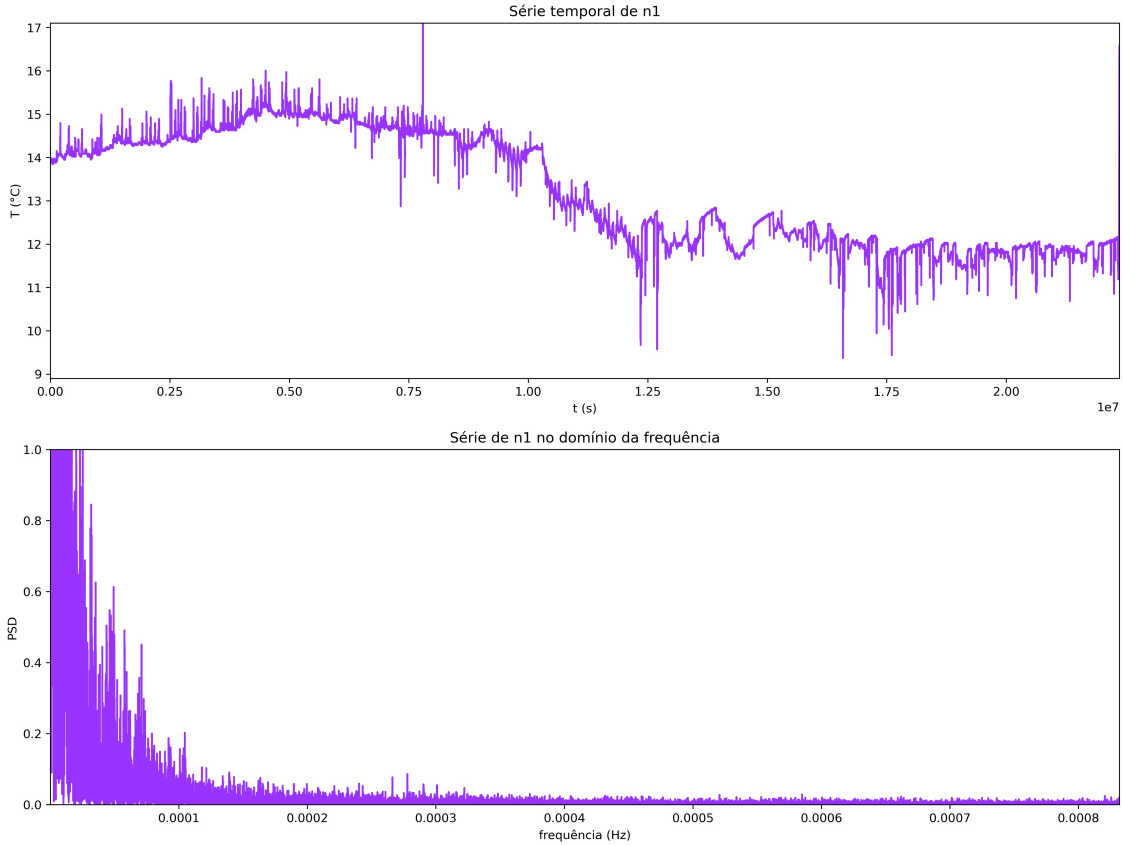


Figura D.1: Série de temperatura de n1 nos domínios do tempo e da frequência.

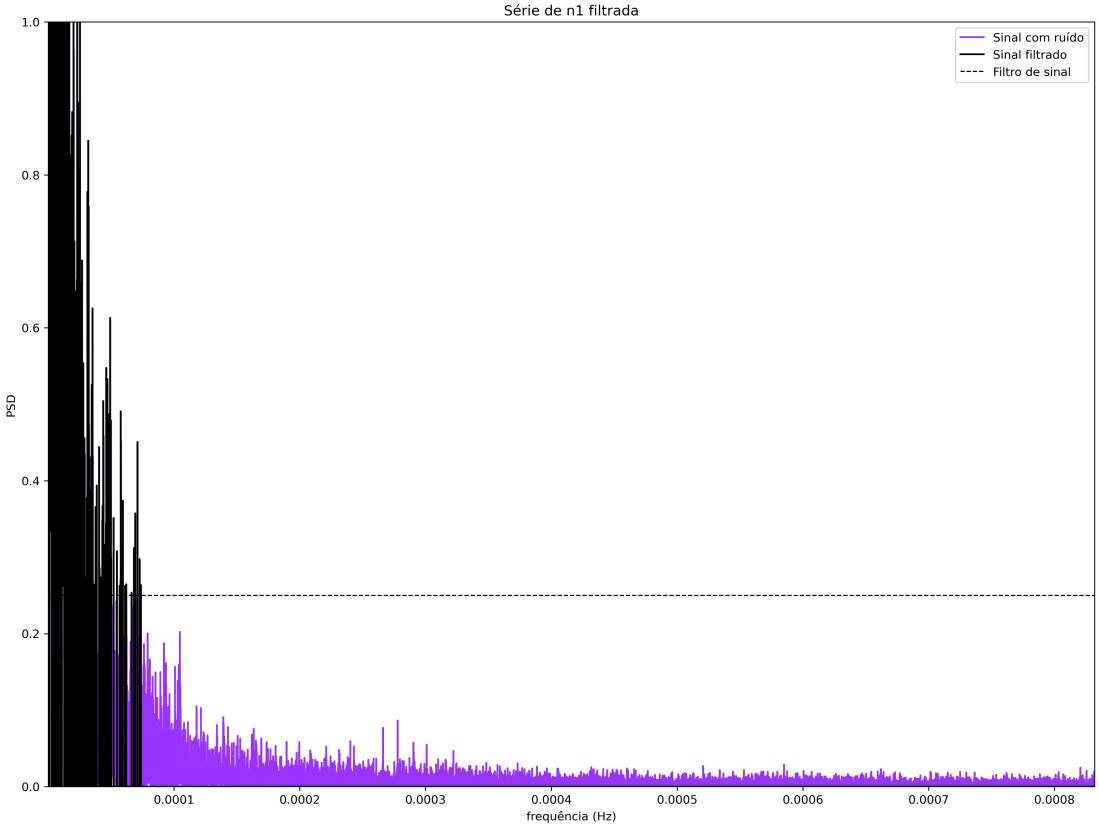


Figura D.2: Filtro do sinal no domínio da frequência.

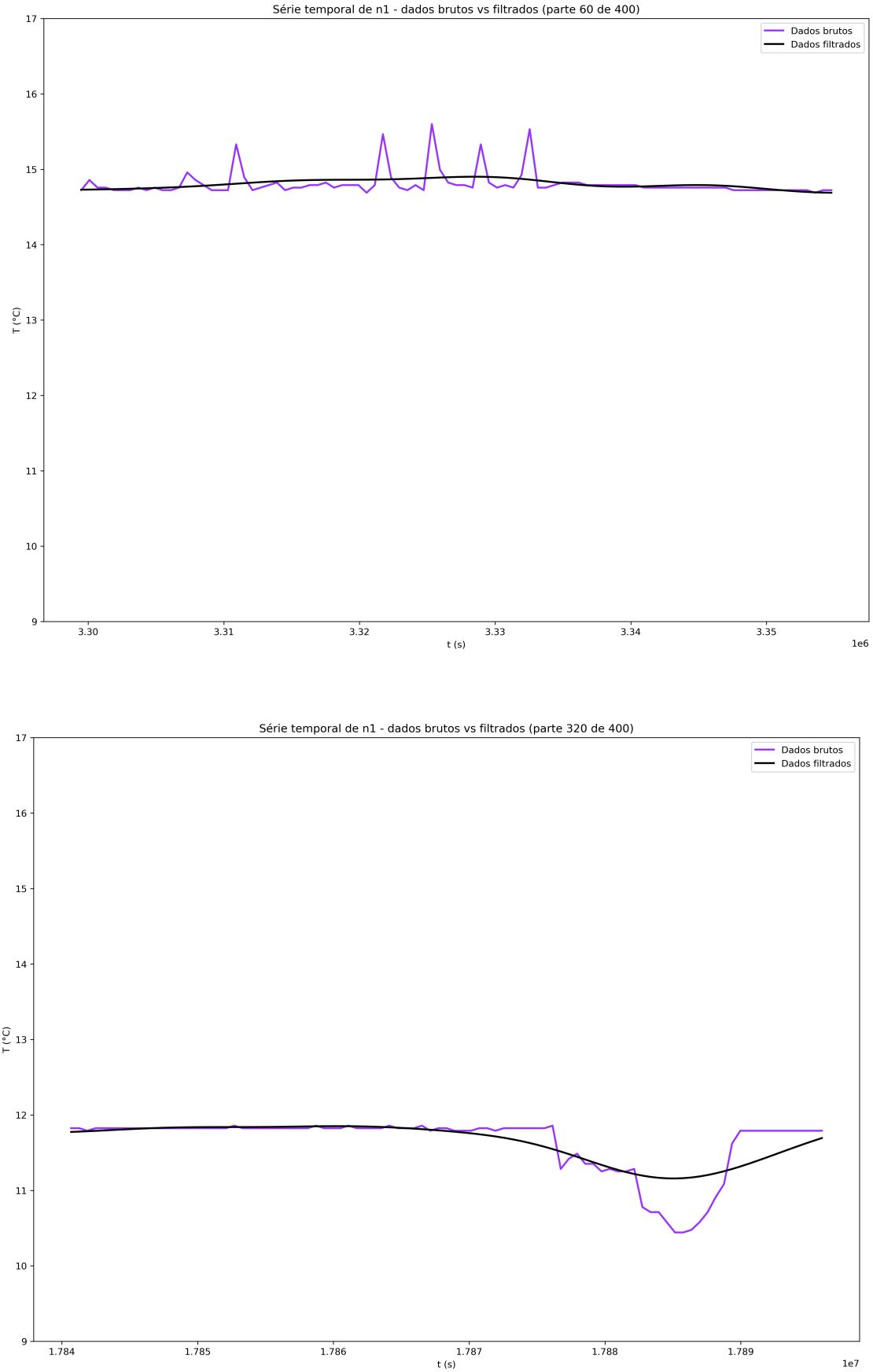


Figura D.3: Séries n1 bruta e filtrada.

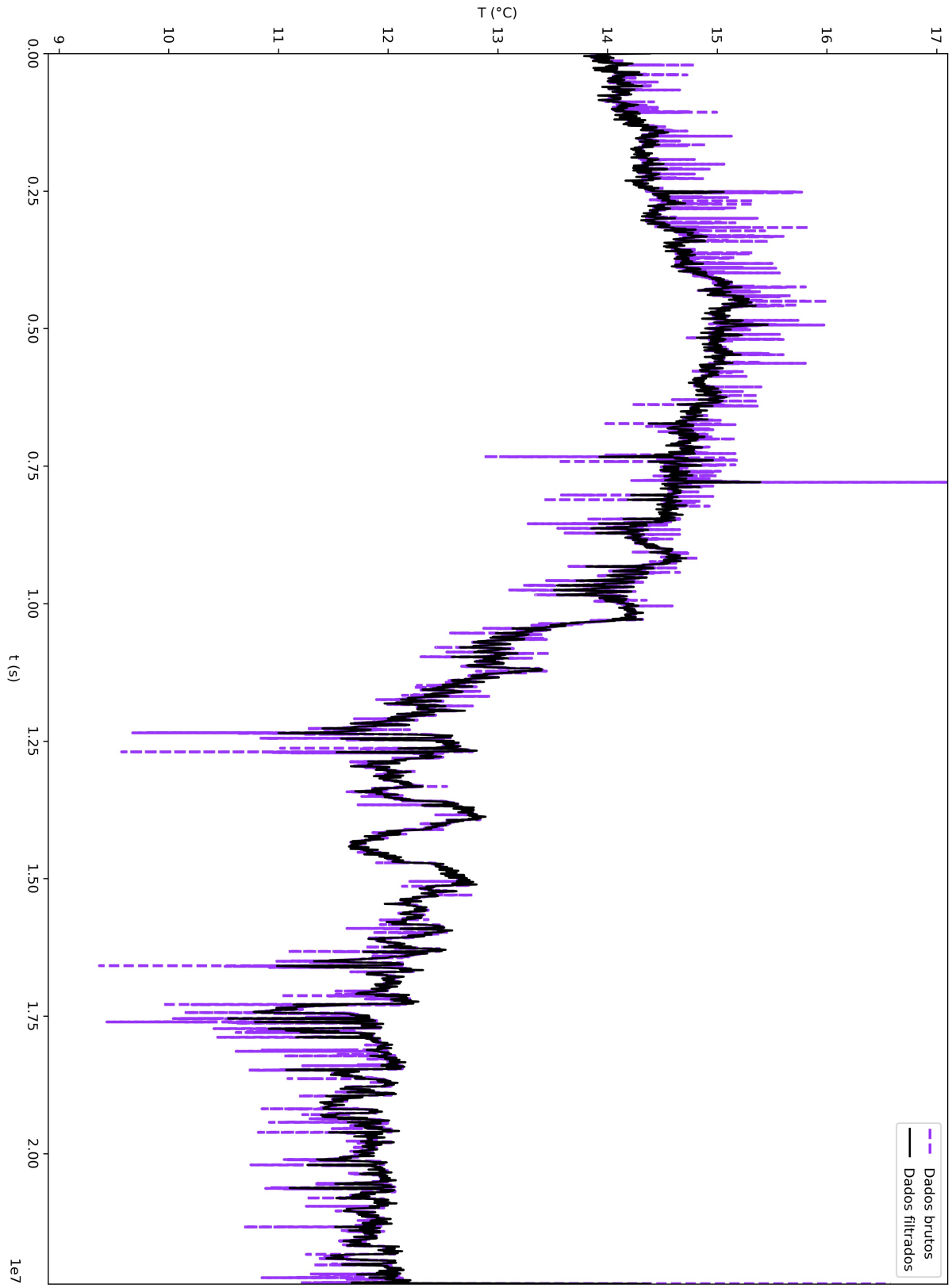


Figura D.4: Séries temporais completas de n1.

D2 Série n2

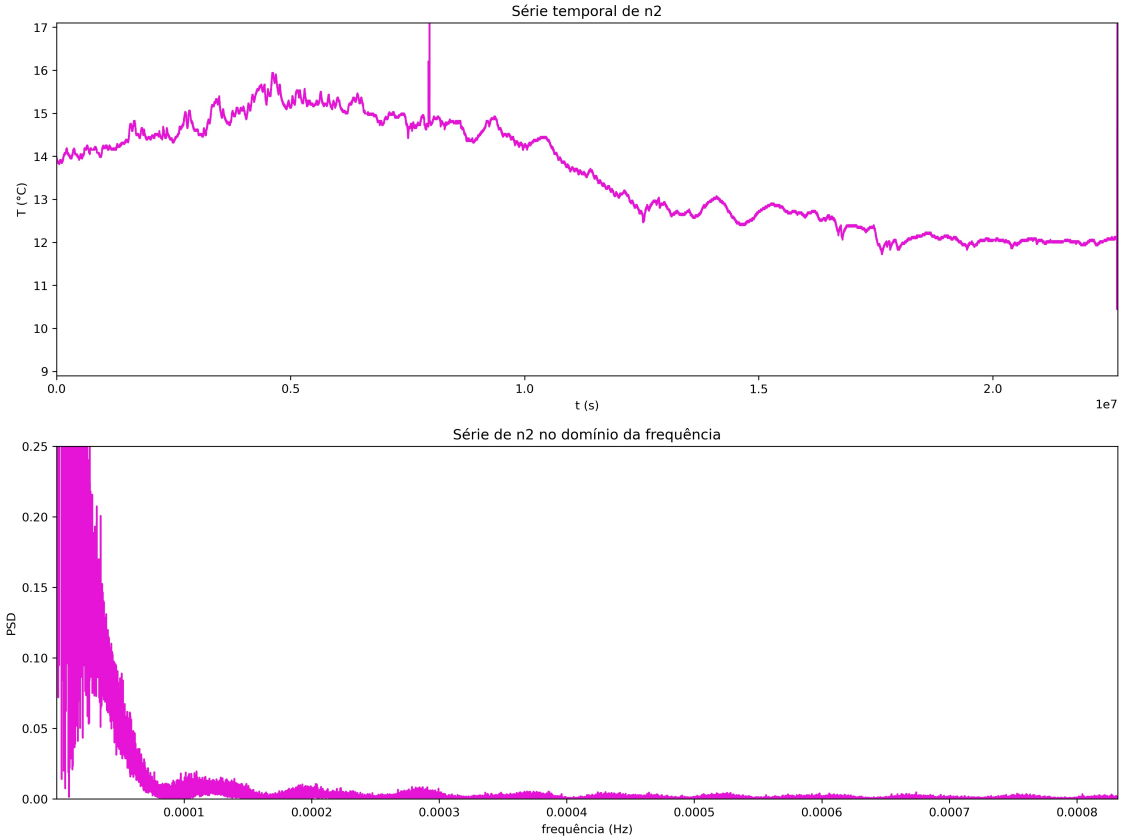


Figura D.5: Série de temperatura de n2 nos domínios do tempo e da frequência.

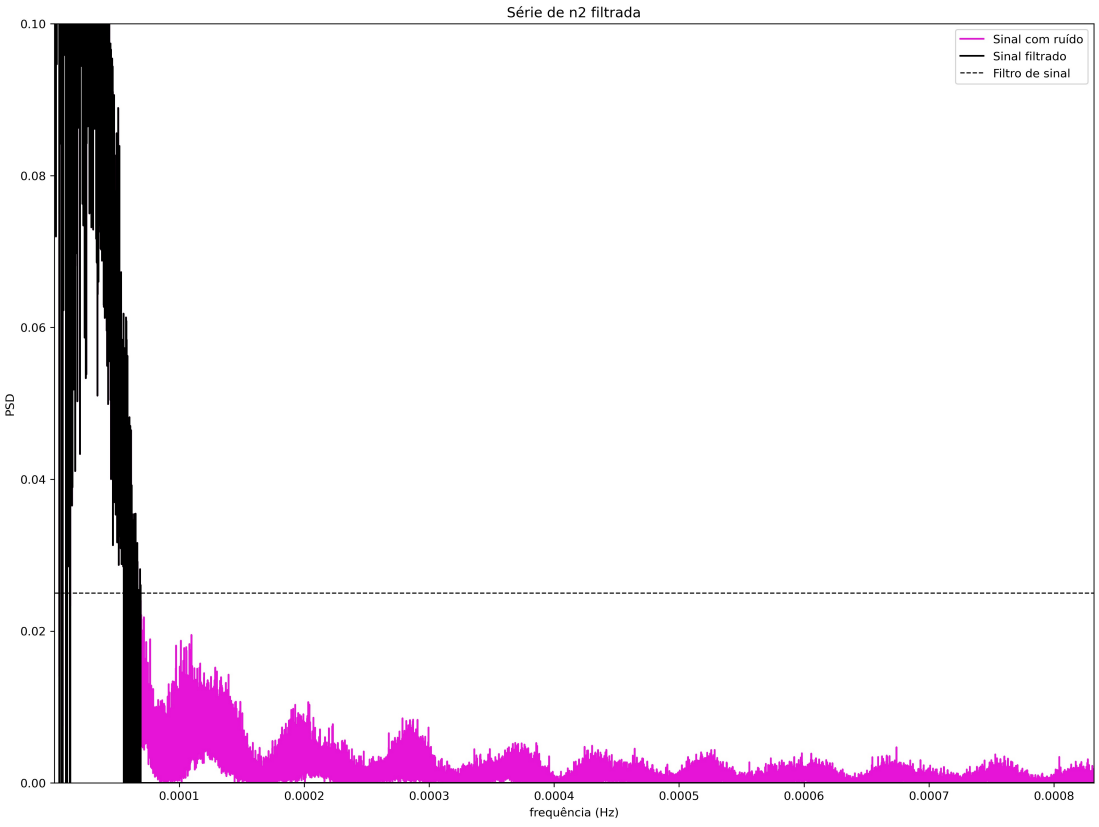


Figura D.6: Filtro do sinal no domínio da frequência.

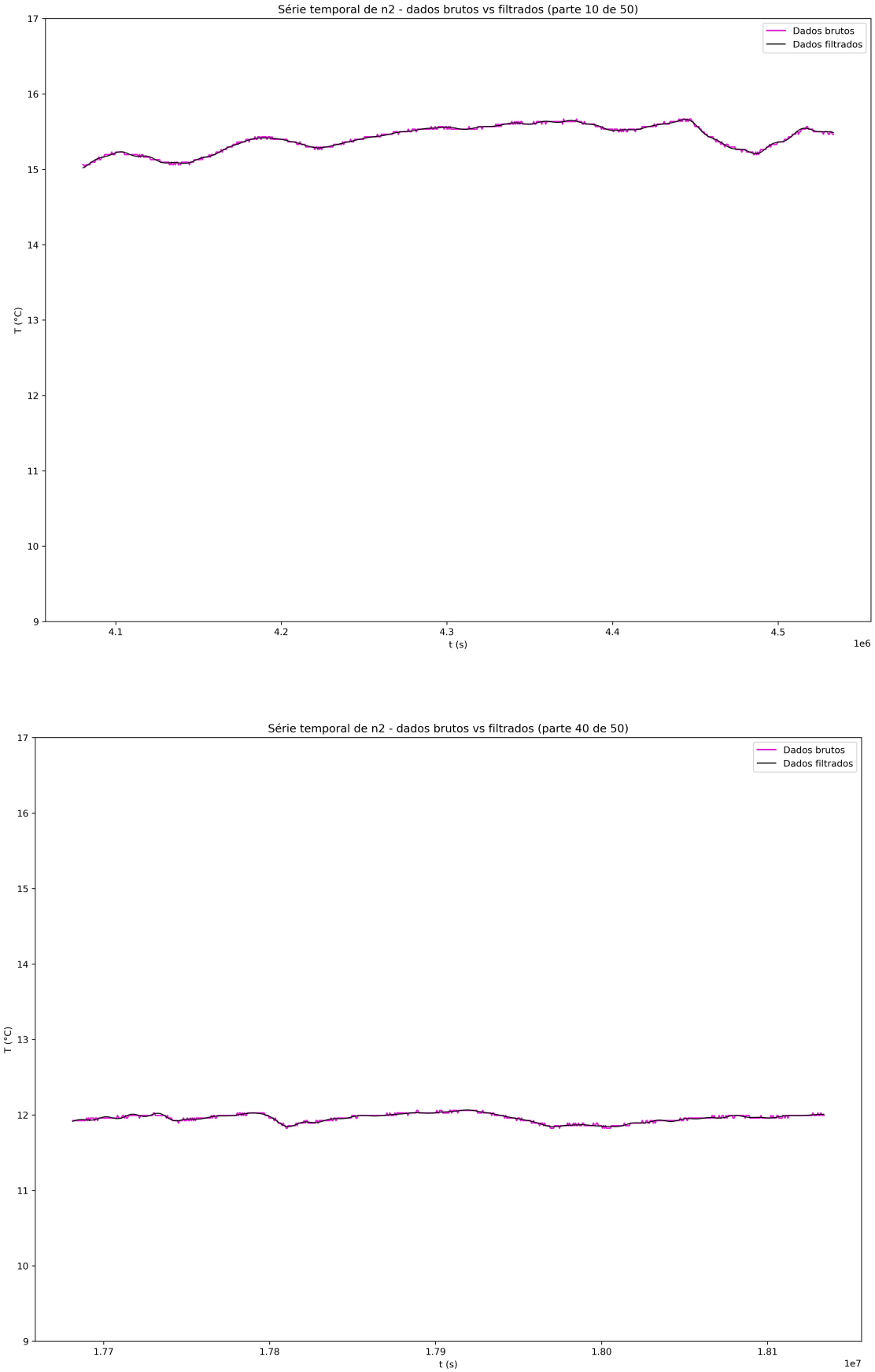


Figura D.7: Séries n2 bruta e filtrada.

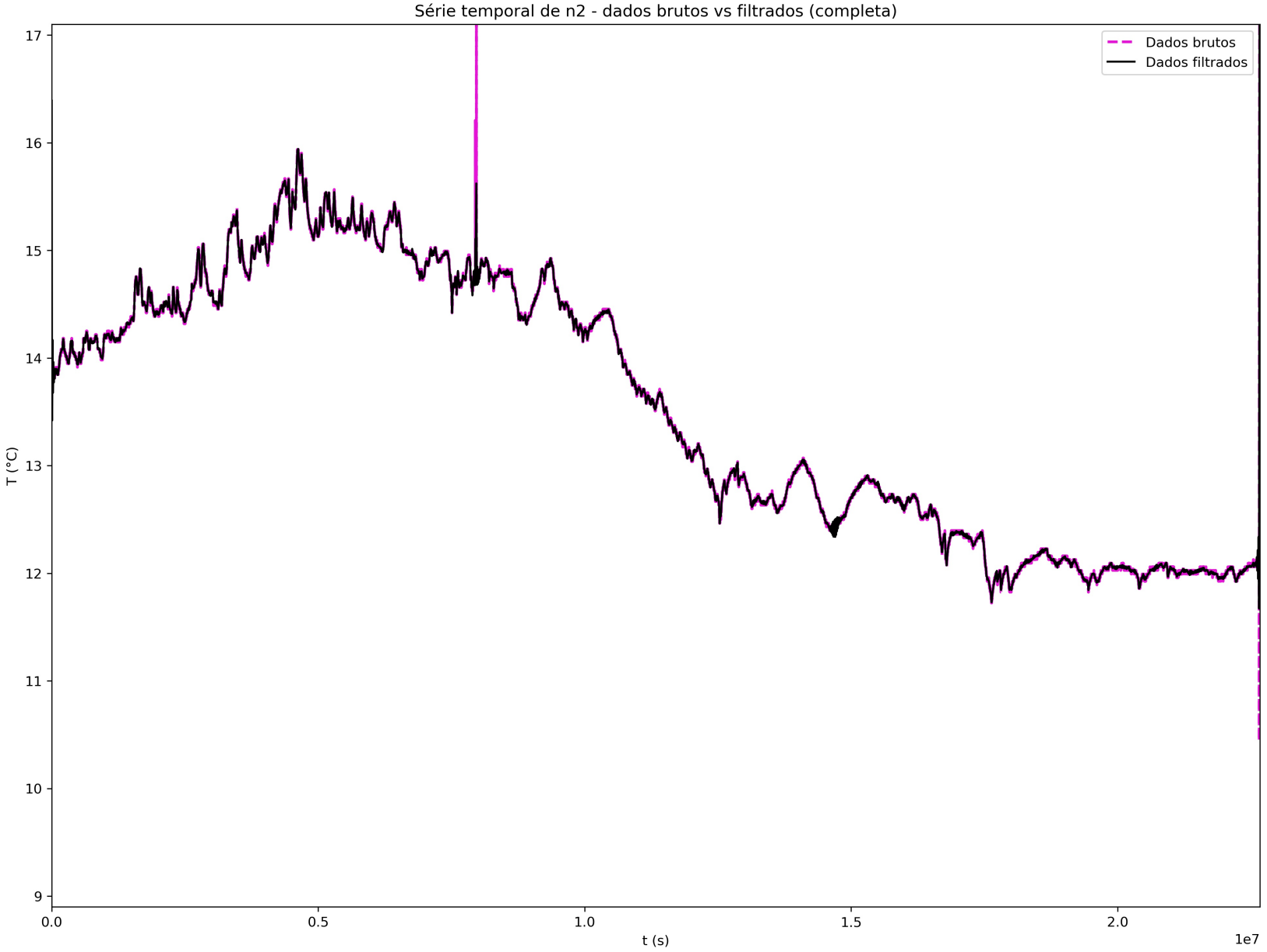


Figura D.8: Séries temporais completas de n2.

D3 Série n9

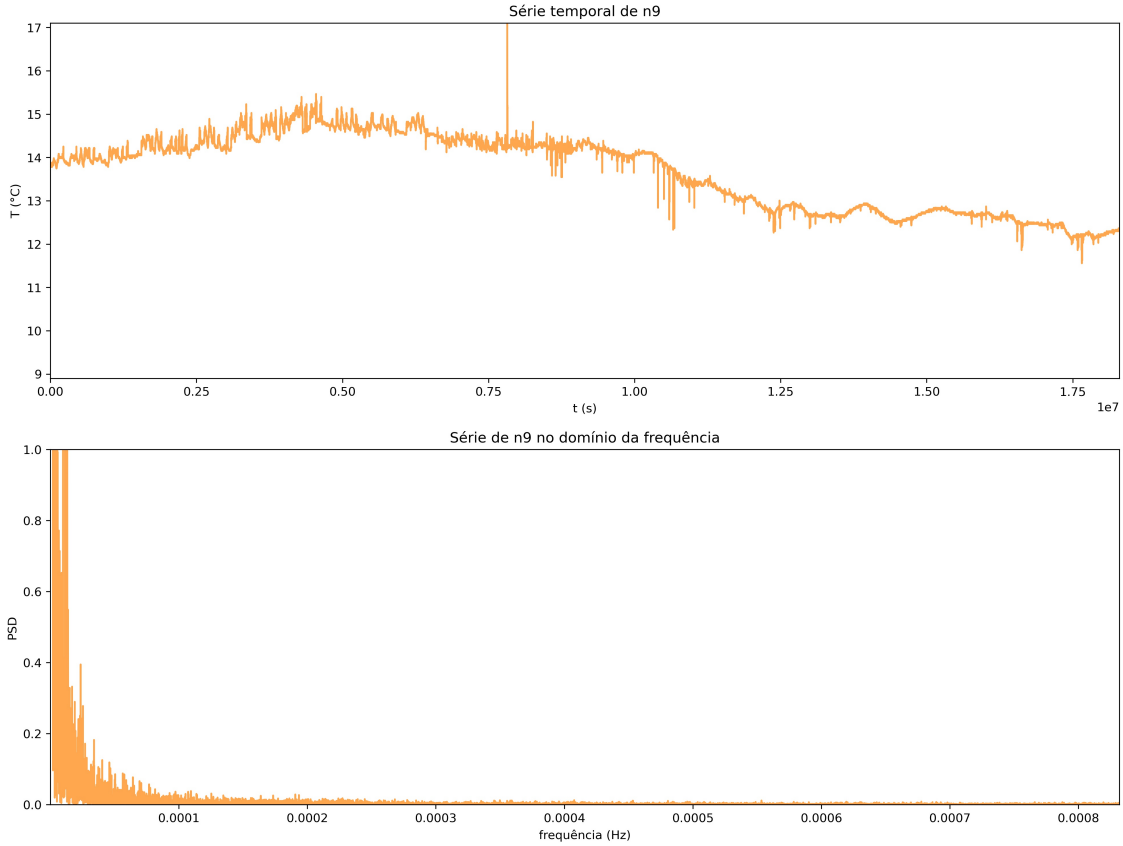


Figura D.9: Série de temperatura de n9 nos domínios do tempo e da frequência.

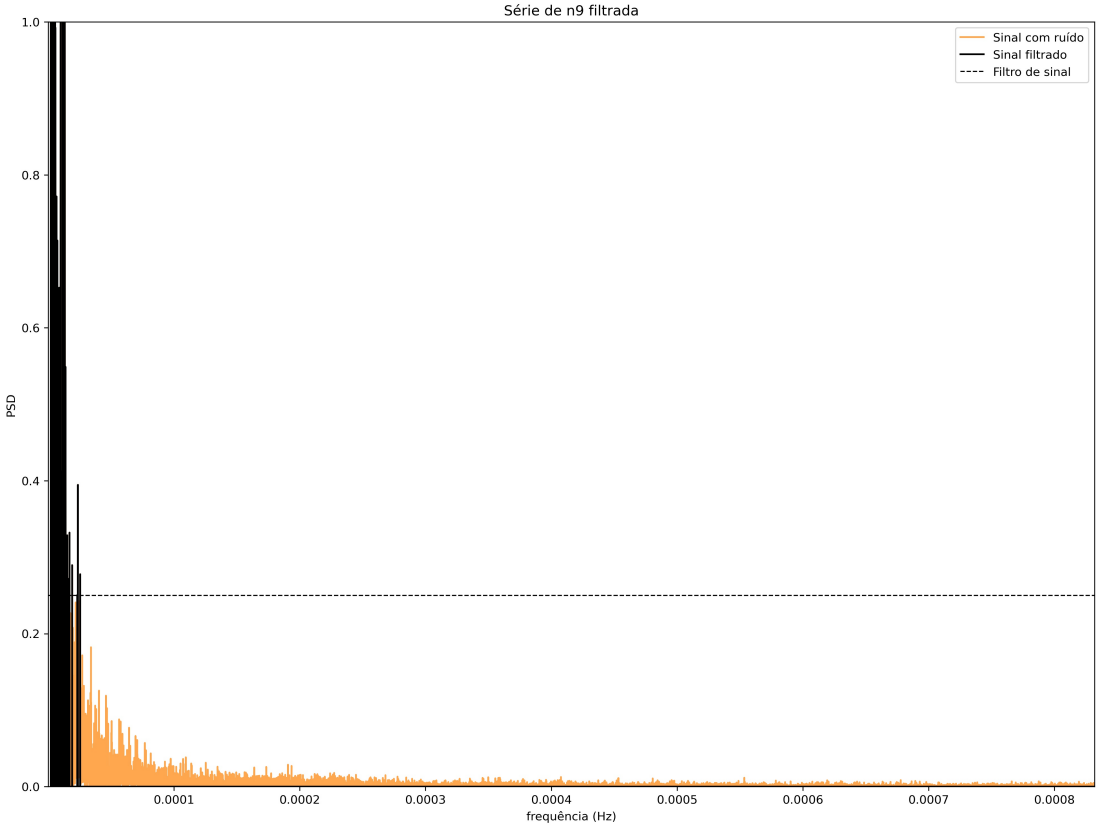
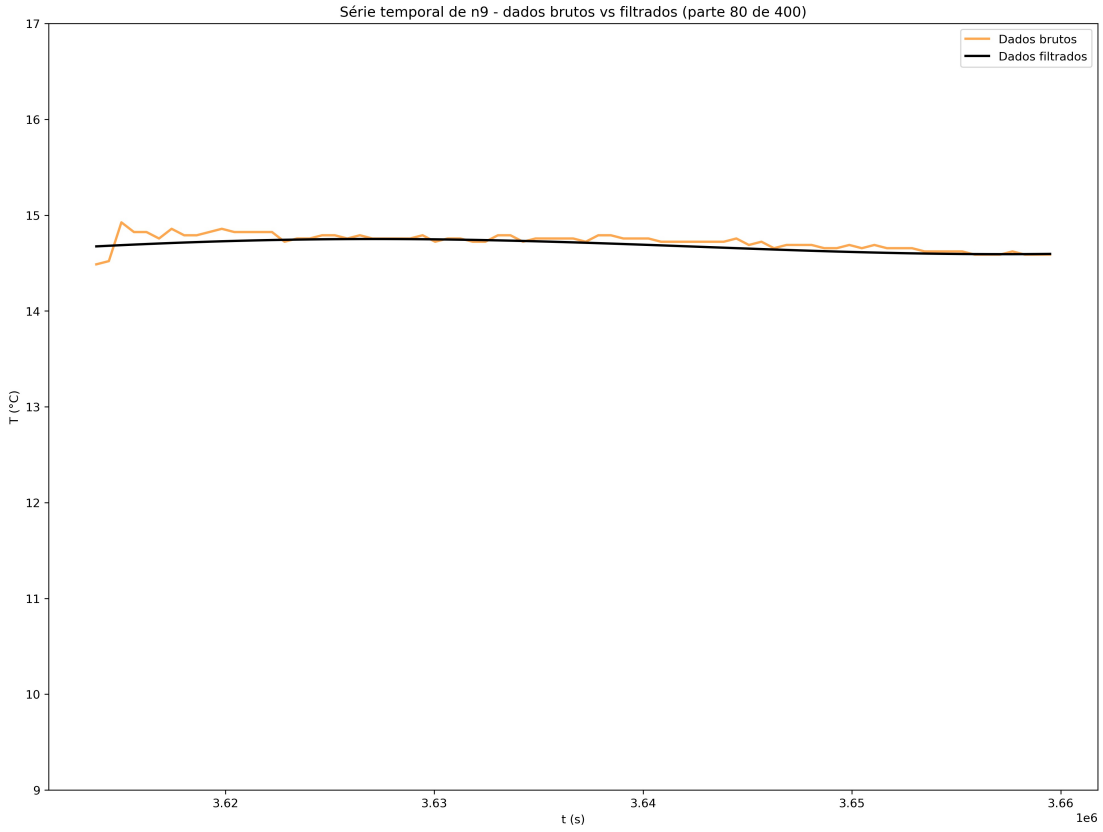


Figura D.10: Filtro do sinal no domínio da frequência.



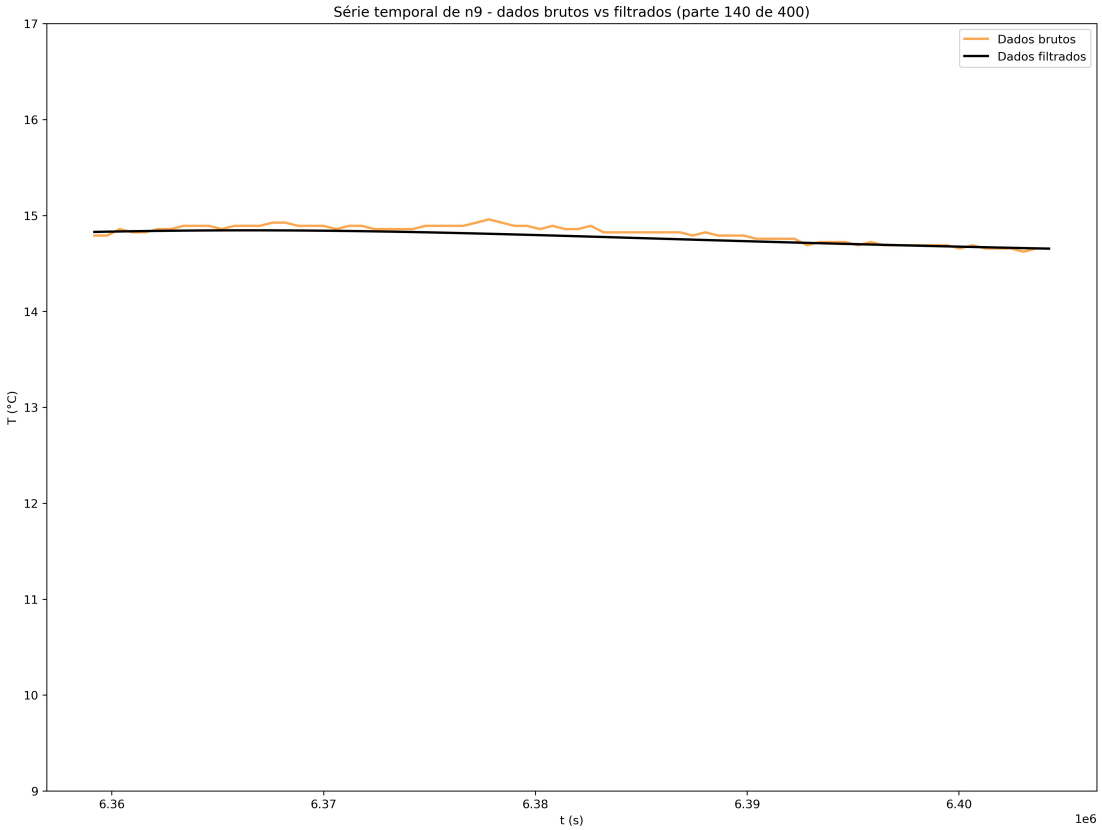


Figura D.11: Séries n9 bruta e filtrada.

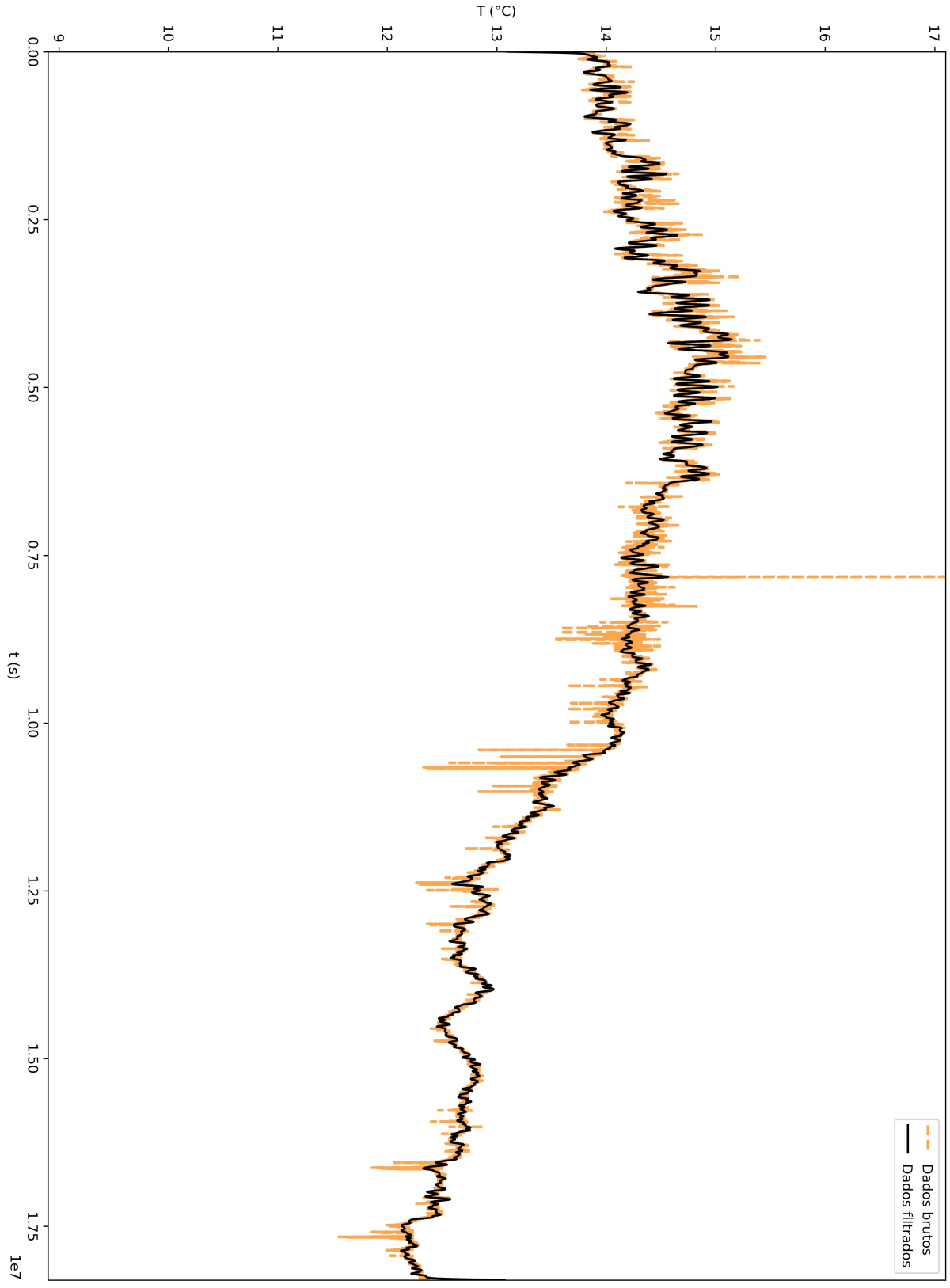


Figura D.12: Séries temporais completas de n9.

D4 Série n10

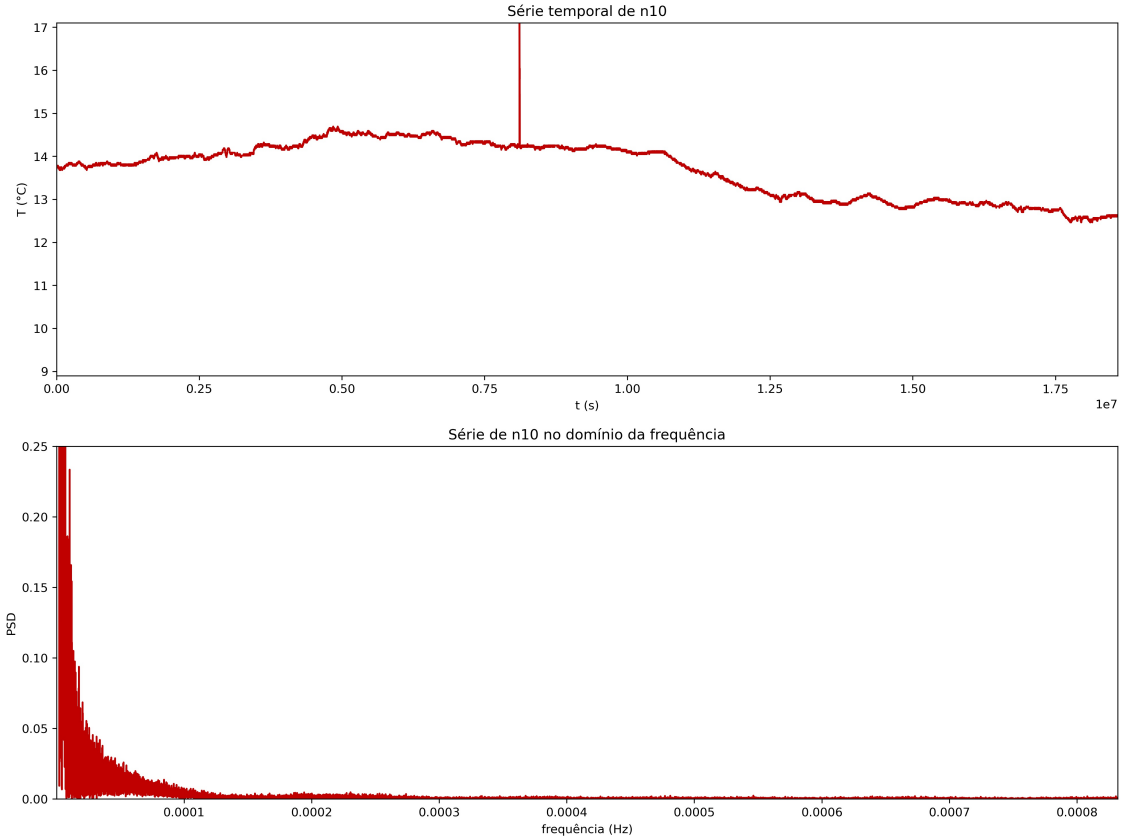


Figura D.13: Série de temperatura de n10 nos domínios do tempo e da frequência.

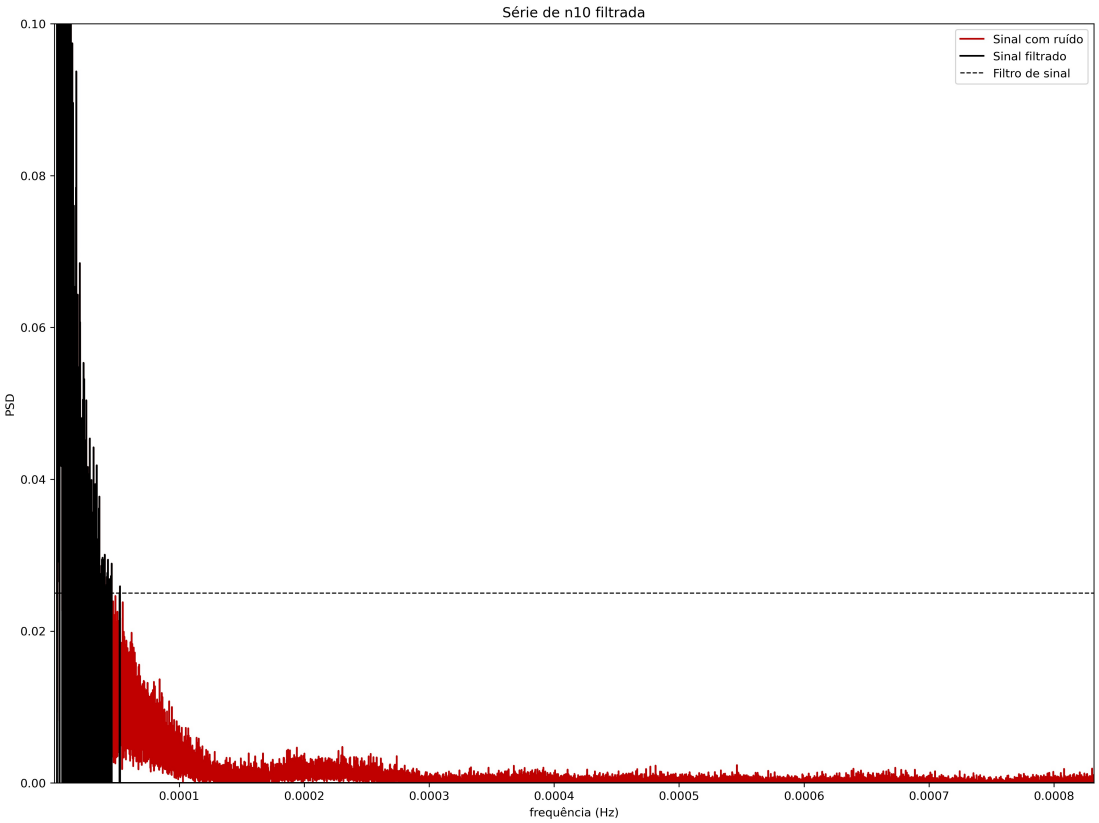


Figura D.14: Filtro do sinal no domínio da frequência.

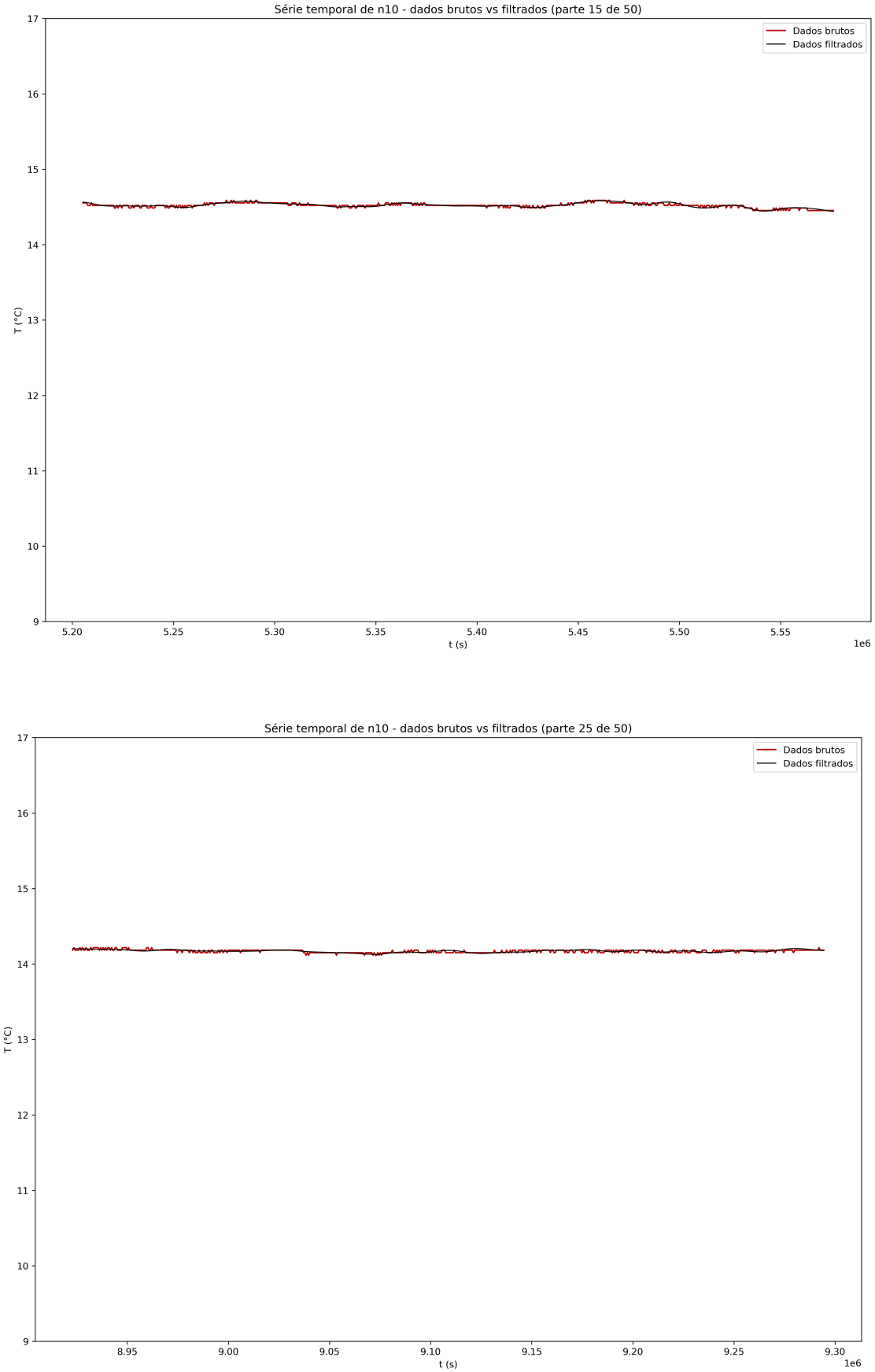


Figura D.15: Séries n10 bruta e filtrada.

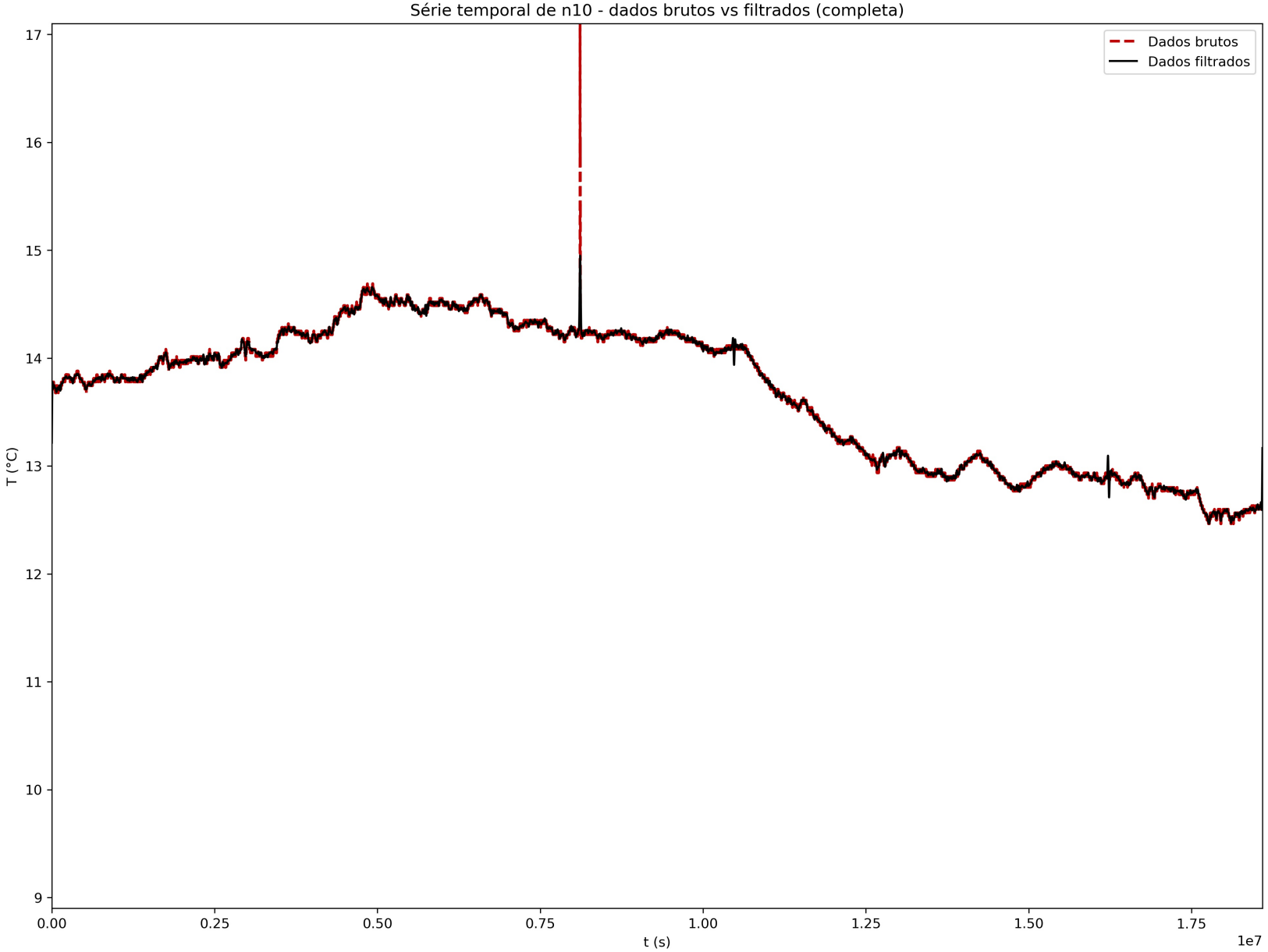


Figura D.16: Séries temporais completas de n10.

D5 Série n11

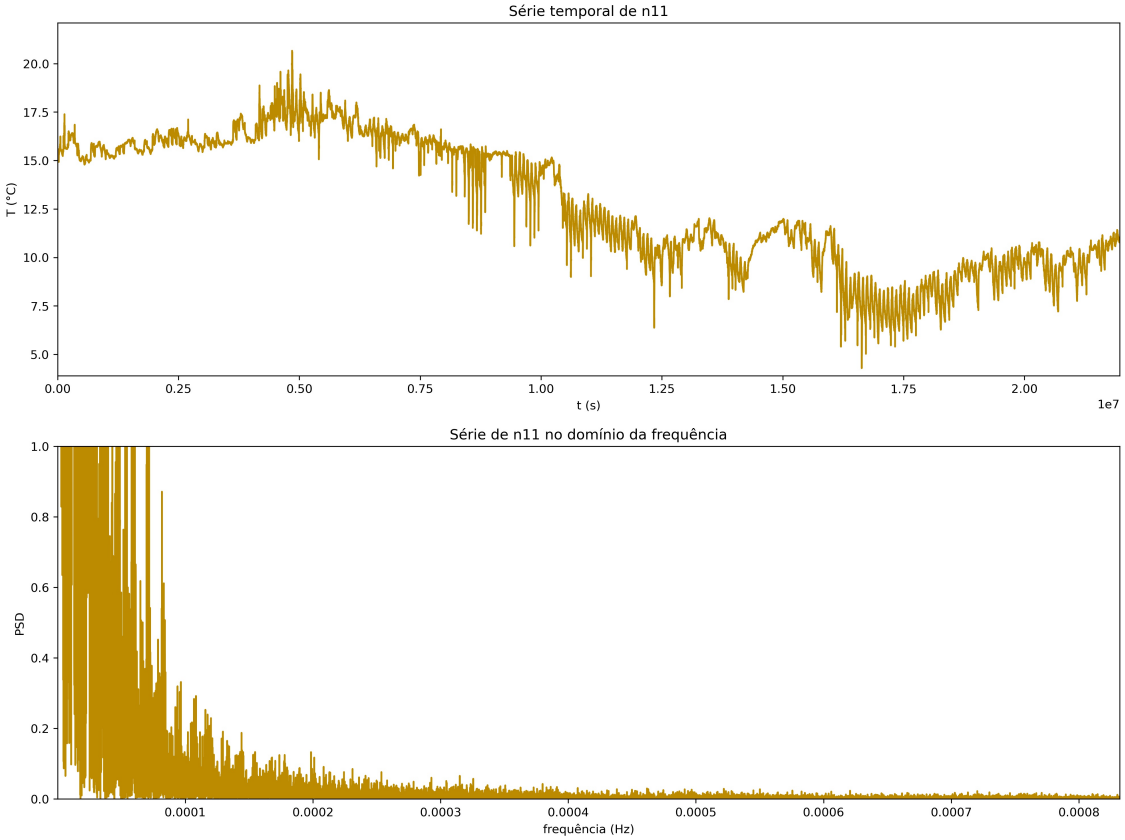


Figura D.17: Série de temperatura de n11 nos domínios do tempo e da frequência.

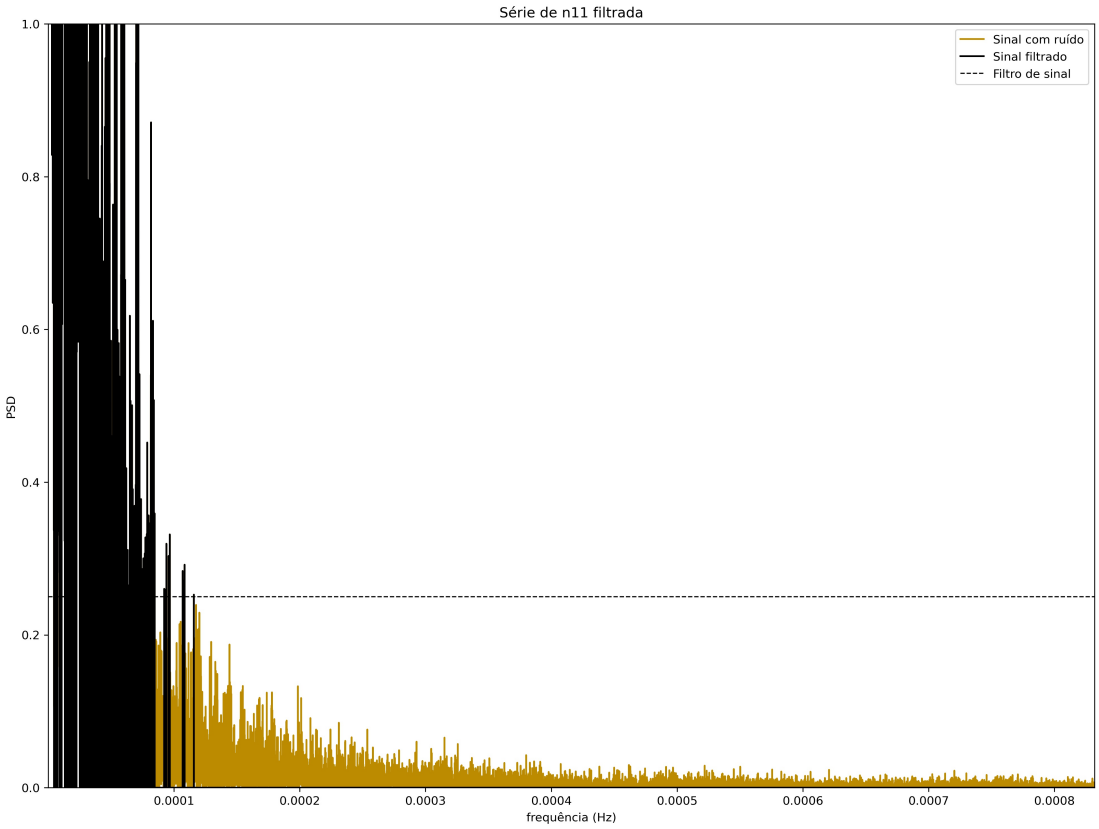
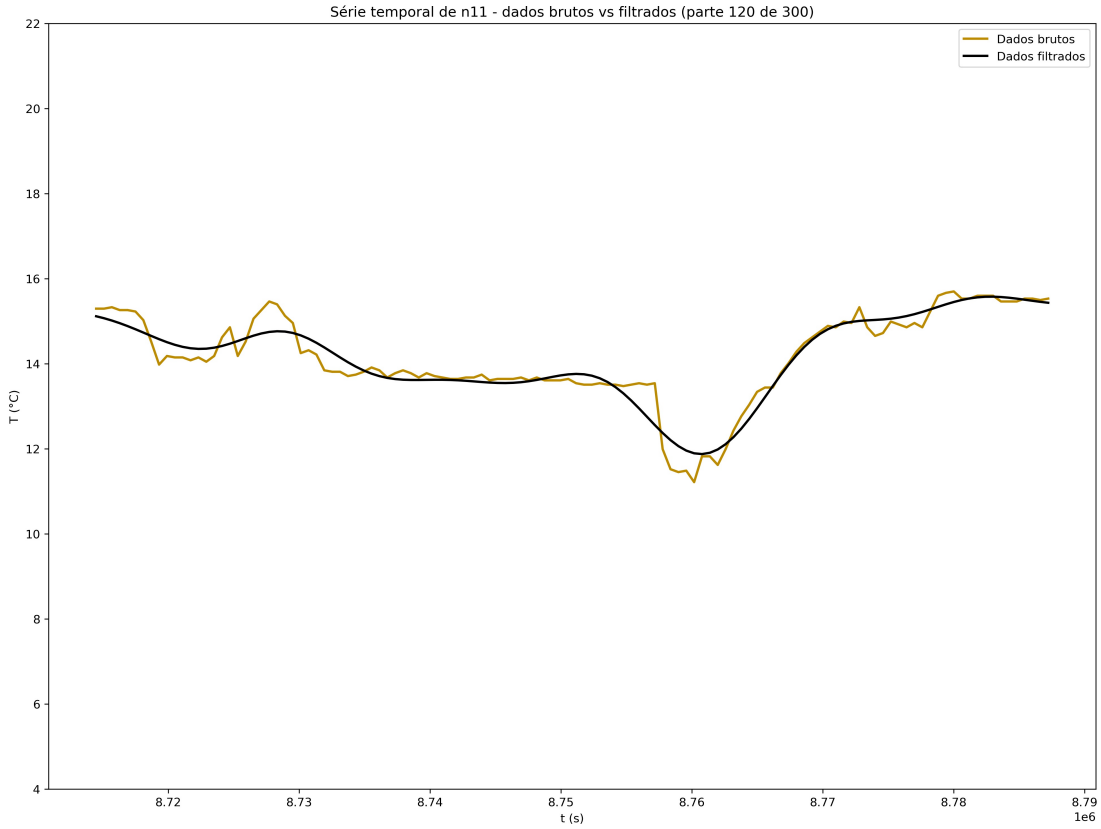


Figura D.18: Filtro do sinal no domínio da frequência.



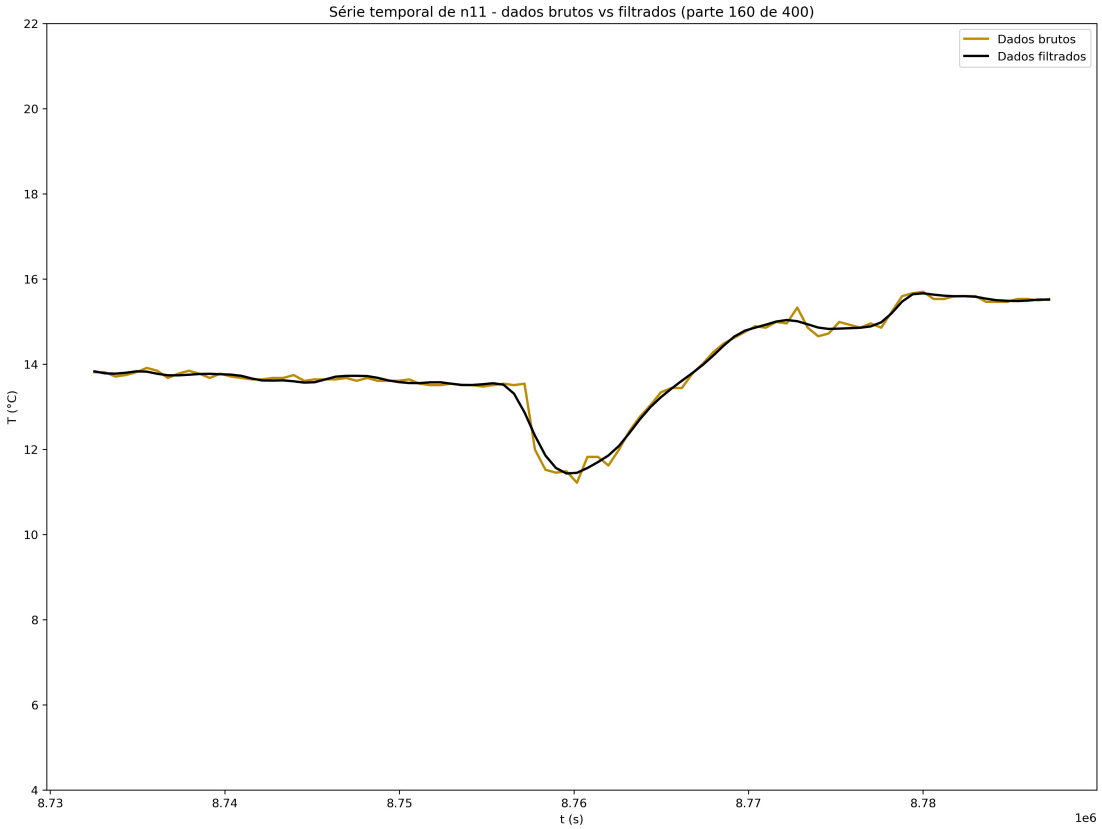


Figura D.19: Séries n11 bruta e filtrada.

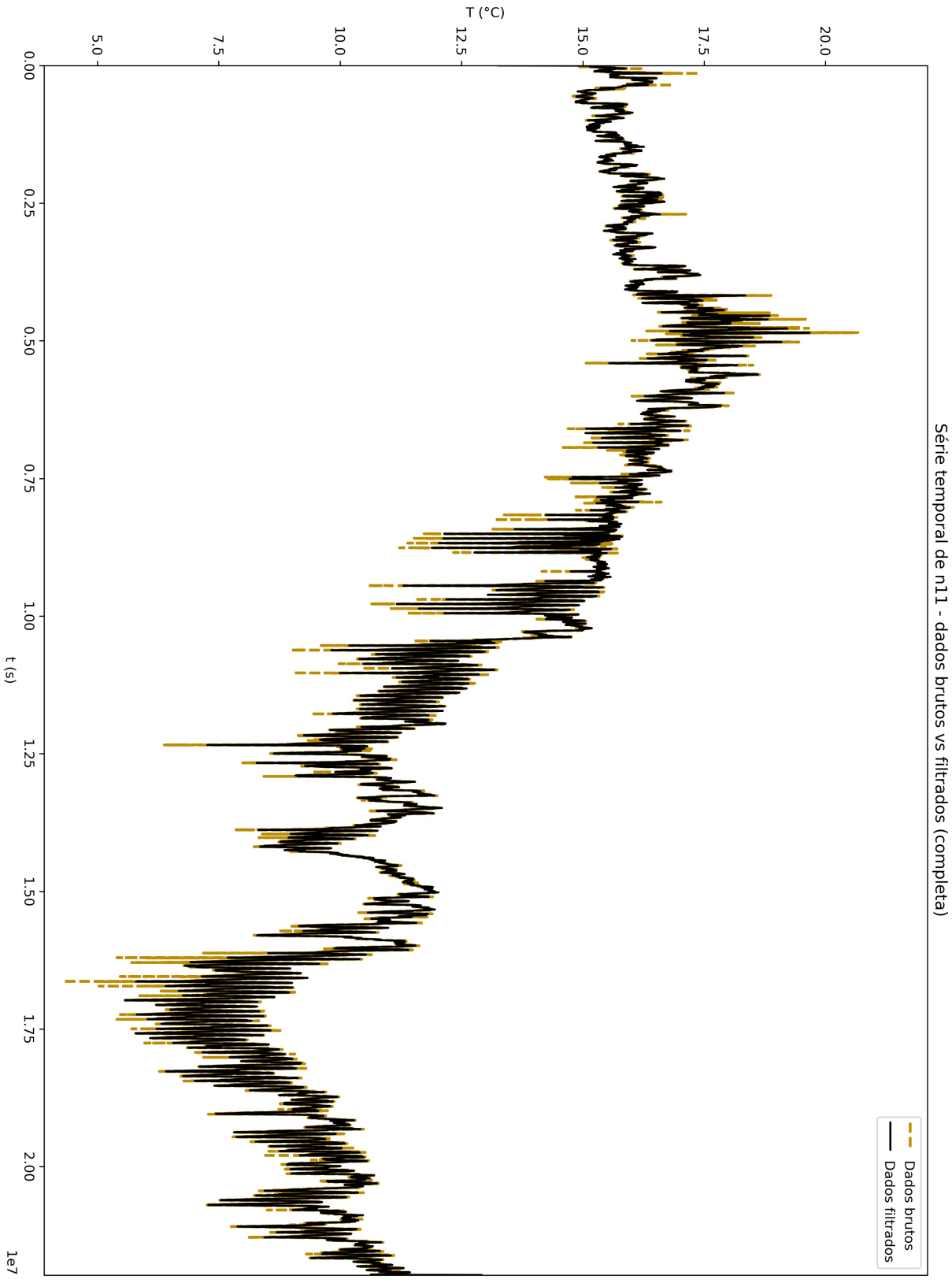


Figura D.20: Séries temporais completas de n11.

D6 Todas as séries filtradas

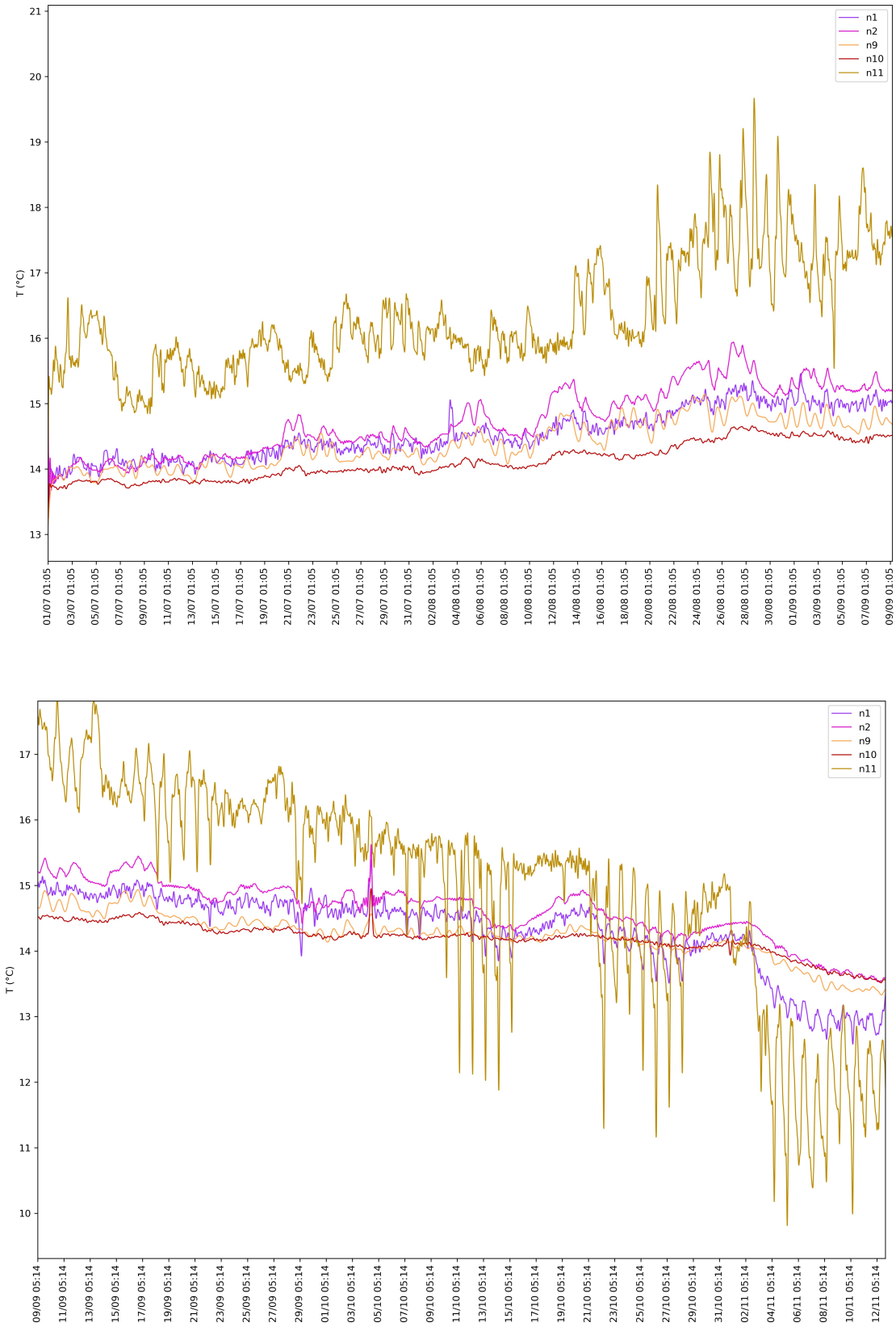


Figura D.21: Séries filtradas.

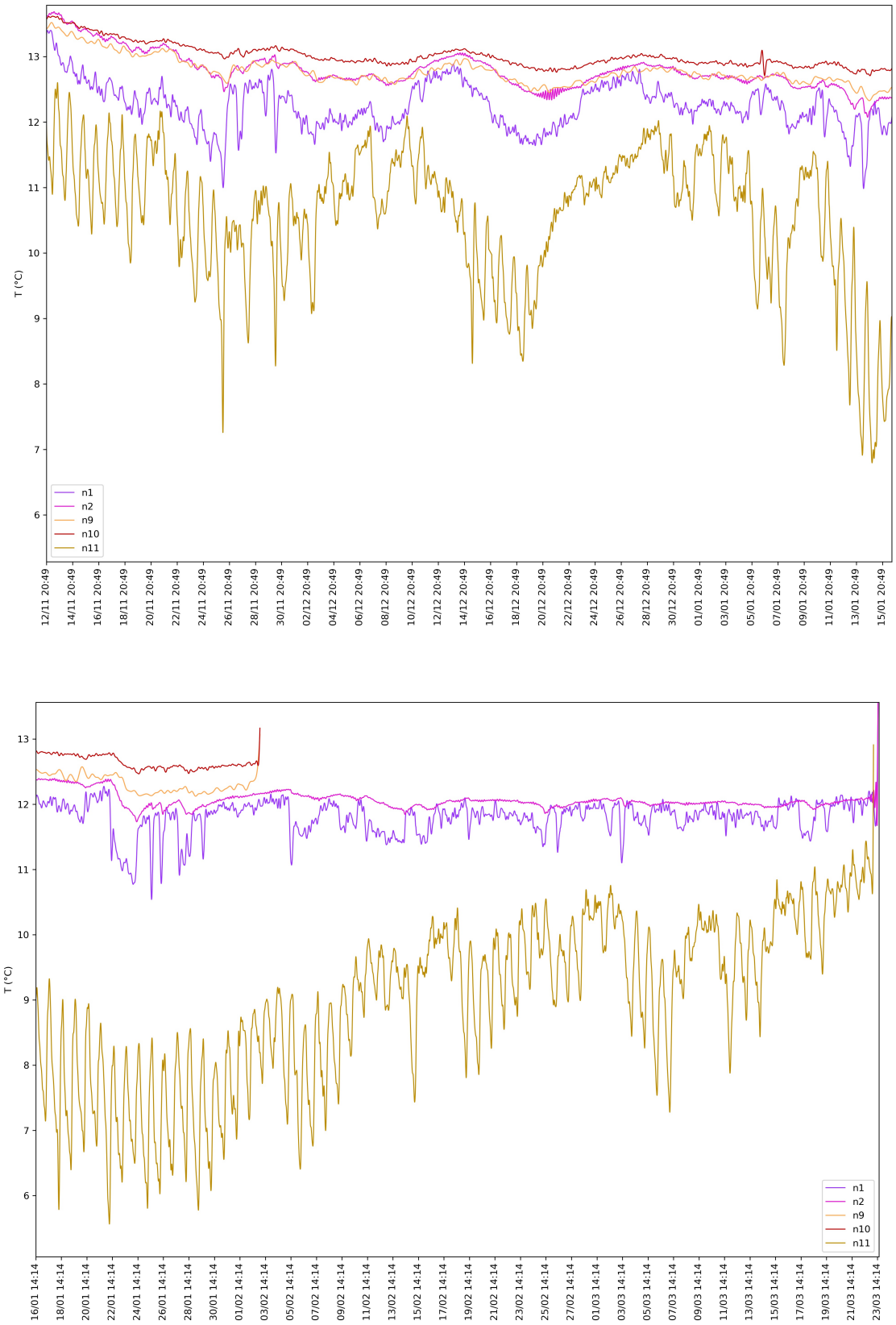


Figura D.22: Séries filtradas.

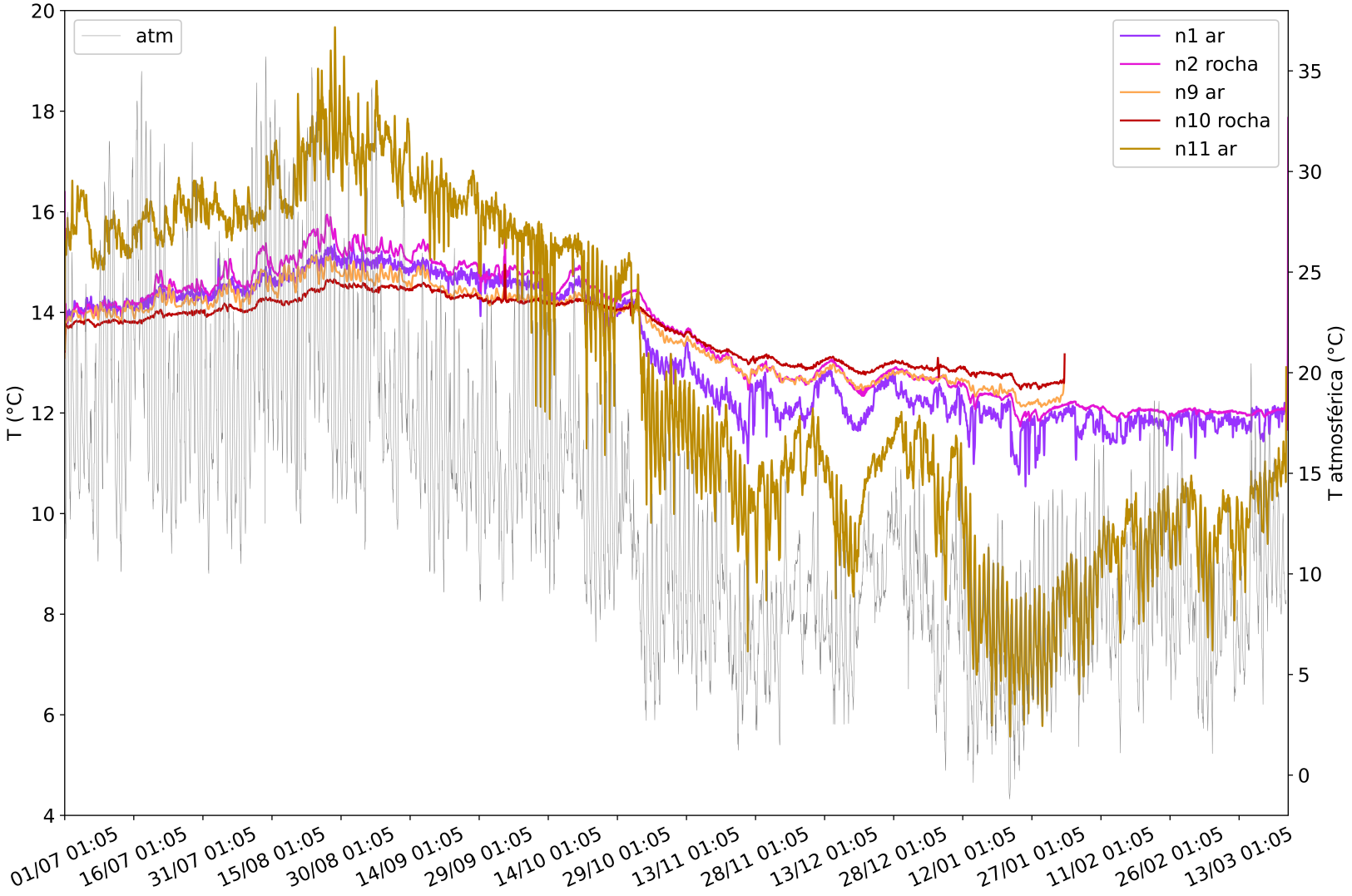


Figura D.23: Séries temporais filtradas completas.