FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO HIGROTÉRMICO DO PARQUE ESCOLAR REABILITADO

Ricardo Manuel dos Santos Ferreira de Almeida

Dissertação submetida para obtenção do grau de
Doutor em Engenharia Civil

Dissertação realizada sob a supervisão do
Professor Doutor Vasco Manuel Araújo Peixoto de Freitas,
do Departamento de Engenharia Civil
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

AGOSTO DE 2011

PROGRAMA OPERACIONAL POTENCIAL HUMANO
QUADRO DE REFERÊNCIA ESTRATÉGICO NACIONAL PORTUGAL 2007.2013
UNIÃO EUROPEIA
Fundo Social Europeu

À Magda,
à Mafalda
e aos meus Pais

AGRADECIMENTOS

Embora se trate de uma tarefa individual um trabalho como este só é possível com o apoio e colaboração de outros. Assim, é nesta fase final que surge a oportunidade de publicamente prestar o devido reconhecimento.

Ao meu orientador, Prof. Vasco Peixoto de Freitas, agradeço o seu apoio e disponibilidade, sempre com um total empenhamento e dedicação, engradecendo este trabalho com o seu conhecimento. No entanto, a mais-valia associada ao seu apoio não se esgota no aspecto científico, as conversas, sob as mais diversas matérias, mantidas durante este período, foram uma experiência profundamente enriquecedora. Foi um privilégio trabalhar com o Professor.

Agradeço o apoio financeiro prestado pela FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia, através da Bolsa de Doutoramento refª. SFRH/BD/41280/2007.

À Parque Escolar agradeço a colaboração, essencial para o cumprimento dos objectivos deste trabalho, disponibilizando os recursos necessários às campanhas experimentais de medições.

Aos responsáveis pelas escolas onde decorreram as medições agradeço a sua disponibilidade e apoio logístico prestado durante os períodos de medição.

À Prof.ª Isabel Ribeiro agradeço a forma pronta e disponível como colaborou na leitura do texto, corrigindo-o e fazendo sugestões valiosas.

Agradeço a todos os elementos do Laboratório de Física de Construções da FEUP pelo seu apoio na componente experimental do trabalho, nomeadamente na gestão dos equipamentos laboratoriais.

À ESTGV agradeço o apoio financeiro concedido para a participação em conferências internacionais que permitiram divulgar este trabalho.

Por fim, não posso deixar de referir o apoio prestado pela minha família, pela compreensão das horas ausentes do convívio familiar, possibilitando a serenidade necessária para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

Uma educação de excelência é, hoje em dia, um objectivo claro de qualquer sociedade moderna. Em Portugal a questão da reabilitação dos edifícios escolares apresenta-se como um investimento estratégico, que visa, entre outros objectivos, assegurar um desempenho higrotérmico adequado e melhorar a eficiência energética e a qualidade do ar interior dos edifícios, respeitando a legislação em vigor. A reabilitação dos edifícios escolares deve ser realizada não só com o intuito de cumprir requisitos de eficiência energética mas também o de optimizar os níveis de conforto para professores e alunos, maximizando, por esta via, as condições para uma melhor aprendizagem.

Os objectivos fundamentais deste trabalho consistiram na caracterização do desempenho em serviço dos edifícios escolares e na apresentação de uma proposta de metodologia para a optimização de soluções construtivas. O primeiro objectivo foi cumprido através da realização de duas campanhas experimentais de medições de parâmetros ambientais e de qualidade do ar interior e permitiu efectuar um balanço crítico da aplicação da legislação actual, sugerindo possíveis alterações. O segundo objectivo foi atingido através de um procedimento de optimização multi-objectivo, incluindo aspectos técnicos e económicos, de soluções construtivas tipo a aplicar na reabilitação de edifícios escolares.

A revisão cuidada do estado actual do conhecimento, ao nível da reabilitação de edifícios escolares, da avaliação do desempenho higrotérmico e da simulação numérica do desempenho higrotérmico e energético, permitiu sistematizar toda a informação que serviu de suporte à estruturação das tarefas de caracterização experimental e aos estudos de simulação numérica e de optimização multi-objectivo.

O trabalho experimental desenvolvido foi dividido em duas campanhas. A primeira, de carácter preliminar, permitiu um contacto com o desempenho higrotérmico dos edifícios escolares em condições de serviço, incluindo uma familiarização com os procedimentos e técnicas experimentais necessários para a sua caracterização. Verificou-se que a qualidade do ambiente interior das salas de aula dos edifícios escolares não-reabilitados não é suficiente e que as escolas reabilitadas evidenciaram diferenças substanciais de desempenho. A segunda campanha de medições incidiu em edifícios recentemente reabilitados e permitiu concluir que a orientação das salas de aula, bem com a sua localização em diferentes pisos do edifício, continuam a ser responsáveis por diferenças na temperatura interior, que a humidade relativa não constitui um problema de maior e que os sistemas de AVAC não estão a ser colocados em funcionamento. Os resultados das medições levam a definir como metodologia de reabilitação de um edifico escolar a aposta em envolventes exteriores isoladas e com elevada inércia térmica, protecções solares exteriores, estratégias simples de ventilação e sistemas de aquecimento adequados face ao clima da região.

O recurso à simulação numérica do desempenho de dois edifícios escolares tipo, através do programa *EnergyPlus*, com modelos validados pelos resultados experimentais, acoplado a ferramentas matemáticas de aproximação do tipo das Redes Neurais Artificiais, permitiu

caracterizar a situação actual dos edifícios, incluindo o efeito da orientação, e realizar uma análise paramétrica de sensibilidade com vista à identificação das propriedades dos elementos da envolvente exterior com mais peso no seu desempenho.

Foi realizada uma optimização e uma análise técnico-económica de soluções construtivas a utilizar na reabilitação dos edifícios escolares. Esta tarefa culminou no desenvolvimento de uma ferramenta informática, em ambiente *Excel*, que optimiza, do ponto de vista técnico-económico, os níveis de isolamento térmico a utilizar na reabilitação da parede exterior e da cobertura, de duas tipologias de edifícios escolares. A sua implementação foi conseguida através da aplicação de uma análise de custos de ciclo de vida em conjunto com as frentes de Pareto de soluções óptimas, que resultaram da optimização multi-objectivo com algoritmos evolucionários.

Em síntese, considera-se que este trabalho constitui um contributo original para a avaliação da aplicação prática da legislação actual e do seu impacto na reabilitação de edifícios escolares, sugerindo alterações e propondo alternativas estratégicas para o modelo de edifício escolar reabilitado. É ainda apresentada uma metodologia de optimização de soluções construtivas que inclui objectivos de eficiência energética, de conforto dos ocupantes e de investimento económico.

PALAVRAS-CHAVE: Reabilitação de edifícios escolares, Desempenho higrotérmico, Caracterização experimental, Simulação numérica, Optimização, Análise técnico-económica.

ABSTRACT

An education of excellence is today a clear aim of any modern society. In Portugal, the issue of rehabilitation of school buildings is presented as a strategic investment, which aims, among others, to ensure a proper hygrothermal performance and to improve the energy efficiency and the indoor air quality of buildings, regarding the codes of practice. The rehabilitation of school buildings should be performed not only in order to meet requirements for energy efficiency but also to optimize the comfort levels for teachers and students, maximizing the conditions for better learning.

The most important goals of this work were the characterization of the service performance of school buildings and the presentation of a methodology for the optimization of constructive solutions. The first objective was accomplished by conducting two experimental campaigns for evaluation of the indoor environmental quality and allowed for a critical appraisal of the implementation of the legislation, suggesting possible changes. The second objective was achieved through a procedure of multi-objective optimization, including technical and economic aspects, of constructive solutions to be applied in the rehabilitation of school buildings.

A careful review of the state of the art of rehabilitation of school buildings, assessment of the hygrothermal performance and numerical simulation of the hygrothermal and energy performance, allowed systematizing all the information that served as support for structuring the tasks of the experimental characterization, of the numerical simulation and of the multi-objective optimization.

The experimental work carried out was divided into two campaigns. The first one allowed contacting with the hygrothermal performance of school buildings in service conditions, including understanding the procedures and experimental techniques necessary for its characterization. It was found that the environmental quality of the classrooms of non-rehabilitated school buildings is not adequate and that schools rehabilitated showed substantial differences in performance. The second measurement campaign focused on recently rehabilitated buildings and it was concluded that the orientation of the classrooms, as well as their location on different floors of the building, continue to be responsible for differences in internal temperature, the relative humidity is not a problem and HVAC systems are not being put into operation. The results of the measurements lead to set as a methodology for rehabilitation of a school building an external envelope well isolated, with high thermal inertia, shading devices for windows and simple strategies for ventilation and heating systems.

The use of numerical simulation of two school buildings through the program *EnergyPlus*, with models validated by the experimental results, coupled with mathematical tools as the Artificial Neural Networks, allowed to characterize the current performance of the buildings, including the effect of its orientation, and to perform a parametric sensitivity analysis to identify the properties of the exterior envelope elements of the building with more impact on its performance.

Was performed an optimization and a technical and economic analysis of constructive solutions to be used in the rehabilitation of school buildings. That work culminated in the development of a software tool in *Excel* environment that optimizes the insulation level of the exterior wall and roof of the two types of school buildings. Its implementation was achieved by applying a life cycle analysis in conjunction with the Pareto fronts of optimal solutions, which resulted from a multi-objective optimization with evolutionary algorithms.

KEY-WORDS: School building rehabilitation, Hygrothermal performance, Experimental characterization, Numerical simulation, Optimization, Technical and economic analysis.

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO 1

1.1 ENQUADRAMENTO 1

1.2 OBJECTIVOS E ESTRATÉGIA 3

1.3 ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TEXTO 5

2 O ESTADO DA ARTE SOBRE REABILITAÇÃO, DESEMPENHO HIGROTÉRMICO E SIMULAÇÃO 7

2.1 REABILITAÇÃO DE EDIFÍCIOS ESCOLARES 7

2.1.1 Motivação 7

2.1.1.1 Introdução 7

2.1.1.2 Ambiente interior das salas de aula 8

2.1.1.3 Eficiência energética 10

2.1.1.4 Síntese 12

2.1.2 O caso Português 12

2.1.2.1 Caracterização do parque escolar Português 12

2.1.2.2 Programas de reabilitação 17

2.1.3 Outros exemplos 19

2.2 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO HIGROTÉRMICO 21

2.2.1 Qualidade do Ambiente Interior 21

2.2.1.1 Enquadramento 21

2.2.1.2 Conforto térmico 22

2.2.1.3 Qualidade do ar interior 38

2.2.2 Disposições regulamentares 41

2.2.2.1 Regulamentação nacional 41

2.2.2.2 Regulamentação internacional 42

2.2.2.3 Análise crítica das exigências regulamentares 43

2.2.3 Principais estudos realizados 45

2.2.3.1 Introdução 45

2.2.3.2 Estudos internacionais 46

2.2.3.3 Estudos nacionais 48

2.3 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO DESEMPENHO HIGROTÉRMICO E ENERGÉTICO 49
2.3.1 Modelos de simulação 49
2.3.1.1 Introdução e enquadramento 49
2.3.1.2 Caracterização do modelo do *EnergyPlus* 51
2.3.2 Modelos de aproximação e optimização 54
2.3.2.1 Introdução e enquadramento 55
2.3.2.2 Redes Neurais Artificiais 55
2.3.2.3 Optimização e algoritmos evolucionários 58
3 ESTUDO EXPERIMENTAL PRELIMINAR 67
3.1 OBJECTIVOS E METODOLOGIA 67
3.2 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA ESTUDADA 72
3.2.1 Escolas não-reabilitadas 72
3.2.1.1 Enquadramento 72
3.2.1.2 Caracterização construtiva 74
3.2.1.3 Caracterização dos sistemas de aquecimento e de ventilação 75
3.2.2 Escolas reabilitadas 76
3.2.2.1 Enquadramento 76
3.2.2.2 Caracterização construtiva 78
3.2.2.3 Caracterização dos sistemas de aquecimento e ventilação 79
3.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS 81
3.3.1 Introdução 81
3.3.2 Temperatura 81
3.3.2.1 Escolas não-reabilitadas 81
3.3.2.2 Escolas reabilitadas 83
3.3.3 Humidade relativa 85
3.3.4 Conforto térmico 86
3.3.4.1 Método gráfico simplificado 86
3.3.4.2 Modelos adaptativos 90
3.3.4.3 Síntese crítica 92
3.3.5 Qualidade do Ar Interior 93
3.3.5.1 Introdução 93
3.3.5.2 Escolas não-reabilitadas 93
3.3.5.3 Escolas reabilitadas 96
3.3.5.4 Síntese crítica 101

3.4 CONCLUSÕES 101

4 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO HIGROTÉRMICO DE EDIFÍCIOS ESCOLARES REABILITADOS 105

4.1 OBJECTIVOS E METODOLOGIA 105

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA ESTUDADA 110

4.2.1 Escolas do Tipo II 110

4.2.1.1 Enquadramento 110

4.2.1.2 Caracterização construtiva 111

4.2.2 Escolas do Tipo III 112

4.2.2.1 Enquadramento 112

4.2.2.2 Caracterização construtiva 115

4.2.3 Caracterização dos sistemas de aquecimento e ventilação 116

4.3 RESULTADOS 117

4.3.1 Introdução 117

4.3.2 Estação de arrefecimento (Maio/Junho) 117

4.3.2.1 Introdução 117

4.3.2.2 Temperatura 118

4.3.2.3 Humidade relativa 120

4.3.2.4 Conforto térmico 122

4.3.2.5 Concentração de CO_2 124

4.3.3 Meia-estação (Outubro) 126

4.3.3.1 Introdução 126

4.3.3.2 Temperatura 126

4.3.3.3 Humidade relativa 128

4.3.3.4 Conforto térmico 129

4.3.3.5 Concentração de CO_2 131

4.3.4 Estação de aquecimento (Janeiro/Fevereiro) 133

4.3.4.1 Introdução 133

4.3.4.2 Temperatura 133

4.3.4.3 Humidade relativa 135

4.3.4.4 Conforto térmico 136

4.3.4.5 Concentração de CO_2 138

4.4 DISCUSSÃO E ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS 140

4.4.1 Introdução 140

4.4.2 Temperatura 141
4.4.3 Humidade relativa 144
4.4.4 Conforto térmico 145
4.4.5 Concentração de CO_2 148
4.5 CONCLUSÕES 150

5 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO DESEMPENHO ENERGÉTICO E DO CONFORTO 153

5.1 OBJECTIVOS E METODOLOGIA 153
5.2 DESCRIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MODELOS 156
5.2.1 Geometria 156
5.2.2 Elementos construtivos 159
5.2.3 Ganhos internos 160
5.2.4 Ventilação e sistemas de aquecimento 162
5.3 VALIDAÇÃO DOS MODELOS 163
5.4 MODELO DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO 167
5.4.1 Variáveis em estudo 167
5.4.2 Funções de avaliação do desempenho 170
5.5 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS 171
5.5.1 Descrição e arquitectura 171
5.5.2 Validação 174
5.6 CARACTERIZAÇÃO DA SITUAÇÃO ACTUAL 178
5.6.1 Metodologia 178
5.6.2 Resultados 178
5.7 ANÁLISE PARAMÉTRICA DE SENSIBILIDADE 183
5.7.1 Metodologia 183
5.7.2 Resultados 183
5.7.3 Discussão dos resultados 189
5.8 SÍNTESE CRÍTICA E CONCLUSÕES 190

6 OPTIMIZAÇÃO E ANÁLISE TÉCNICO-ECONÓMICA DE SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS 193

6.1 OBJECTIVOS E METODOLOGIA 193
6.2 OPTIMIZAÇÃO MULTI-OBJECTIVO DO DESEMPENHO 195
6.2.1 Optimização multi-objectivo – frente de Pareto – 2 funções 195
6.2.2 Optimização multi-objectivo – Método dos Pesos – 2 funções 200

6.2.3 Análise crítica 202
6.3 ANÁLISE TÉCNICO-ECONÓMICA DE SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS TIPO 203
6.3.1 Introdução 203
6.3.2 Optimização multi-objectivo – frente de Pareto – 3 funções 204
6.3.3 Análise de custos de ciclo de vida 207
6.3.3.1 Introdução 207
6.3.3.2 Aplicação ao caso em estudo 208
6.3.4 Ferramenta de cálculo 211
6.3.4.1 Apresentação 211
6.3.4.2 Dados de entrada 212
6.3.4.3 Resultados 213
6.3.5 Estudos de sensibilidade 214
6.3.6 Exemplo 216
6.4 CONCLUSÕES 218

7 CONCLUSÕES 221

7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS 221
7.2 SÍNTESE DAS CONCLUSÕES OBTIDAS 221
7.3 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS 224

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 227

ANEXO I RESULTADOS DO ESTUDO EXPERIMENTAL PRELIMINAR

ANEXO II CALIBRAÇÃO DOS *DATA LOGGERS*

ANEXO III RESULTADOS DA AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO

ANEXO IV REDES NEURAIS ARTIFICIAS

ANEXO V ANÁLISE PARAMÉTRICA DE SENSIBILIDADE

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Efeito da ventilação e da temperatura na performance dos estudantes (adaptado de Wargocki e Wyon, 2005) 9

Figura 2.2 – Relação entre o caudal de ventilação e o desempenho escolar (adaptado de Franchimon, et al., 2009) 10

Figura 2.3 – Balanço energético nacional (DGEG, 2008)..... 11

Figura 2.4 – Variação dos consumos de energia em Portugal, no sector doméstico e no dos serviços (DGEG, 2008) 11

Figura 2.5 – Escola Conde de Ferreira (planta e escola em Fafe) (Beja, et al., 1990) 12

Figura 2.6 –Escola Adães Bermudes (planta e escola em Alcobaça) (Beja, et al., 1990) 13

Figura 2.7 – a) Liceu Passos Manuel, em Lisboa; b) Liceu Rodrigues de Freitas, no Porto 14

Figura 2.8 – a) Escola Primária tipo Beira-Alta, 4 salas de aula, arquitecto Rogério de Azevedo, 1935; b) Escola Primária tipo Algarve, 1 sala de aula, arquitecto Raul Lino, 1935 (Beja, et al., 1990)..... 14

Figura 2.9 – Escolas do Plano dos Centenários. a) Escola feminina e masculina, no Porto; b) actual Escola Básica de Treixedo, Santa Comba Dão 15

Figura 2.10 – a) Escola Industrial e Comercial de Peniche; b) actual Escola Secundária Emídio Navarro, em Viseu (Beja, et al., 1990)..... 15

Figura 2.11 – Escolas da década de 70. a) Pavilhonar - Base Liceal; b) Pavilhonar - Base Técnica; c) Tipo "*Brandão*" 16

Figura 2.12 – a) Escola tipo blocos 3x3; b) Escola tipo monobloco 16

Figura 2.13 – Distribuição das escolas secundárias 17

Figura 2.14 – Distribuição das escolas básicas do 2º e 3º ciclo 17

Figura 2.15 – Estratégia da intervenção da Parque Escolar 19

Figura 2.16 – Variáveis e factores que influenciam a qualidade do ambiente interior (adaptado de REHVA, 2010) 22

Figura 2.17 – Variação anual da temperatura num edifício passivo (adaptado de Roulet, 2001) 23

Figura 2.18 – Balanço térmico do corpo humano (Silva, 2006) 25

Figura 2.19 – Nomogramas para vestuário corrente e actividade leve (Piedade et al., 2000) 28

Figura 2.20 – Exemplo de um diagrama de conforto de Fanger (Matias, 2010)..... 29

Figura 2.21 – Relação entre os índices PMV e PPD (adaptado de ISO, 2005) 30
Figura 2.22 – Relação entre os valores médios das temperaturas operativa e do ar (Matias, 2010).....32
Figura 2.23 – Método gráfico de avaliação do conforto térmico em função da temperatura operativa e da humidade absoluta (adaptado de ASHRAE, 2010).....33
Figura 2.24 – Modelo de conforto térmico adaptativo (adaptado de ASHRAE, 2010).....37
Figura 2.25 – Modelo de conforto térmico adaptativo (Matias, 2010).....38
Figura 2.26 – Implicações construtivas dos sistemas de AVAC (Parque Escolar, 2010b) 45
Figura 2.27 – Fluxos de energia num edifício (Clarke, 2001).....50
Figura 2.28 – Modelos multi-zona (Amaral, 2008; Ramos, 2007).....51
Figura 2.29 – Estrutura modular do *EnergyPlus* (EnergyPlus, 2007) 52
Figura 2.30 – *EnergyPlus*: módulos internos (EnergyPlus, 2007).....53
Figura 2.31 –Modelo de balanço térmico. a) superfície exterior; b)superfície interior; c) zona (Strand, et al., 2001).....53
Figura 2.32 – Arquitectura típica de uma RNA.....56
Figura 2.33 – Neurónio de uma RNA.....57
Figura 2.34 – Funções de transferência (Hagan, et al., 1996) 57
Figura 2.35 – Espaço das variáveis de decisão e espaço dos objectivos 60
Figura 2.36 – Representação de soluções no espaço dos objectivos 60
Figura 2.37 – Optimalidade de Pareto no espaço dos objectivos (adaptado de Costa, 2003).....62
Figura 2.38 – Procedimento de optimização multi-objectivo (adaptado de Deb, 2001) 62
Figura 2.39 – Procedimento de optimização pelo Método dos Pesos (adaptado de Deb, 2001).....64
Figura 2.40 – Distribuição das soluções por frentes (adaptado de Costa, 2003).....65
Figura 3.1 – Campanha experimental preliminar 68
Figura 3.2 – Equipamento utilizado para a monitorização em contínuo 69
Figura 3.3 – Analisador de gás fotoacústico.....70
Figura 3.4 – Exemplo da Técnica do Declive. a) decaimento do gás traçador; b) gráfico do logaritmo da concentração versus tempo (adaptado de Awbi, 2003).....71
Figura 3.5 – Escola NR1.....72
Figura 3.6 – Escola NR2.....73

Figura 3.7 – Salas de aula das escolas NR1 e NR2 75
Figura 3.8 – Escola R1 76
Figura 3.9 – Escola R2 77
Figura 3.10 – Sala de aula da escola R1 incluindo pormenor da grelha auto-regulável de admissão de ar 80
Figura 3.11 – Sala de aula da escola R2 com pormenor da admissão de ar e do radiador 80
Figura 3.12 – Variação da temperatura na escola NR1 82
Figura 3.13 – Variação da temperatura na escola NR2 82
Figura 3.14 – Variação da temperatura na escola R1 83
Figura 3.15 – Variação da temperatura na escola R2 84
Figura 3.16 – Variação da humidade relativa na escola NR1 85
Figura 3.17 – Variação da humidade relativa na escola R1 86
Figura 3.18 – Avaliação do conforto térmico na escola NR1 por aplicação do método gráfico simplificado 88
Figura 3.19 – Avaliação do conforto térmico na escola NR2 por aplicação do método gráfico simplificado 88
Figura 3.20 – Avaliação do conforto térmico na escola R1 por aplicação do método gráfico simplificado 89
Figura 3.21 – Avaliação do conforto térmico na escola R2 por aplicação do método gráfico simplificado 89
Figura 3.22 – Avaliação do conforto térmico na escola NR1 por aplicação de modelos adaptativos. a) modelo da ASHRAE; b) modelo do LNEC 90
Figura 3.23 – Avaliação do conforto térmico na escola NR2 por aplicação de modelos adaptativos. a) modelo da ASHRAE; b) modelo do LNEC 91
Figura 3.24 – Avaliação do conforto térmico na escola R1 por aplicação de modelos adaptativos. a) modelo da ASHRAE; b) modelo do LNEC 92
Figura 3.25 – Avaliação do conforto térmico na escola R2 por aplicação de modelos adaptativos. a) modelo da ASHRAE; b) modelo do LNEC 92
Figura 3.26 – Variação da concentração de CO_2 nas salas de aula da escola NR2 93
Figura 3.27 – Distribuição estatística da variação da concentração de CO_2 na escola NR1 94
Figura 3.28 – Distribuição estatística da variação da concentração de CO_2 na escola NR2 94
Figura 3.29 – Envolvente interior da sala do 1º piso da escola NR1 95
Figura 3.30 – a) Envolvente (1); b) Envolvente (2); c) Envolvente (3) 95

Figura 3.31 – Variação da concentração de CO_2 nas salas de aula da escola R1 96
Figura 3.32 – Variação da concentração de CO_2 nas salas de aula da escola R2 96
Figura 3.33 – Distribuição estatística da variação da concentração de CO_2 na escola R1 97
Figura 3.34 – Distribuição estatística da variação da concentração de CO_2 na escola R2 97
Figura 3.35 – a) Situação (1); b) Situação (2).....97
Figura 3.36 – Simulação da concentração de CO_2 na escola R1 100
Figura 4.1 – Edifícios monitorizados na campanha experimental.....107
Figura 4.2 – Campanha experimental 108
Figura 4.3 – *Data logger* utilizado para o registo da temperatura e humidade relativa 108
Figura 4.4 –Temperatura exterior durante as medições. a) Estação de arrefecimento; b) Meia-estação; c) Estação de aquecimento.....109
Figura 4.5 – Escola II-A.....110
Figura 4.6 – Escola II-B.....111
Figura 4.7 – Escola III-A 113
Figura 4.8 – Escola III-B 114
Figura 4.9 – Escola III-C 114
Figura 4.10 – Janelas abertas nas escolas durante as visitas na estação de arrefecimento 117
Figura 4.11 – Variação da temperatura na escola II-B (estação de arrefecimento).....118
Figura 4.12 – Variação da temperatura na escola III-A (estação de arrefecimento) 119
Figura 4.13 – Sala de aula da escola III-B incluindo pormenor do vão envidraçado e respectiva área de abertura 120
Figura 4.14 – Variação da humidade relativa na escola III-A (estação de arrefecimento)....121
Figura 4.15 – Avaliação do conforto térmico na escola III-A por aplicação do método gráfico simplificado (estação de arrefecimento) 122
Figura 4.16 – Avaliação do conforto térmico por aplicação do método gráfico simplificado (estação de arrefecimento). a) Sala de aula da escola II-A; b) Sala de aula da escola III-B 123
Figura 4.17 – Avaliação do conforto térmico em salas do último piso e orientadas a Sul (estação de arrefecimento). a) Escola II-A; b) Escola II-B 123
Figura 4.18 – Avaliação do conforto térmico na escola III-B por aplicação de modelos adaptativos (estação de arrefecimento). a) modelo da ASHRAE; b) modelo do LNEC.....124
Figura 4.19 – Concentração de CO_2 na escola II-B (estação de arrefecimento).....124

Figura 4.20 – Distribuição probabilística da concentração de CO_2 na escola II-B (estação de arrefecimento) 125

Figura 4.21 – Concentração de CO_2 na escola III-B. 126

Figura 4.22 – Variação da temperatura na escola II-B (meia-estação) 127

Figura 4.23 – Variação da humidade relativa na escola II-A (meia-estação) 128

Figura 4.24 – Avaliação do conforto térmico na escola III-A por aplicação do método gráfico simplificado (meia-estação)..... 129

Figura 4.25 – Avaliação do conforto térmico na escola III-A por aplicação de modelos adaptativos (meia-estação)..... 130

Figura 4.26 – Situação de sobreaquecimento da sala do último piso, orientada a Norte, da escola II-B (meia-estação). a) Método gráfico simplificado; b) Modelo adaptativo proposto pelo LNEC..... 130

Figura 4.27 – Situação de sobreaquecimento da sala do r/c, orientada a Este, da escola III-B (meia-estação). a) Método gráfico simplificado; b) Modelo adaptativo proposto pelo LNEC..... 131

Figura 4.28 – Concentração de CO_2 na escola III-A (meia-estação) 131

Figura 4.29 – Distribuição probabilística da concentração de CO_2 na escola III-A (meia-estação) 132

Figura 4.30 – Variação da temperatura na escola II-B (estação de aquecimento) 133

Figura 4.31 – Variação da humidade relativa na escola II-A (estação de aquecimento) 135

Figura 4.32 – Avaliação do conforto térmico na escola II-A por aplicação do método gráfico simplificado (estação de aquecimento)..... 136

Figura 4.33 – Avaliação do conforto térmico na escola III-A por aplicação do método gráfico simplificado (estação de aquecimento)..... 137

Figura 4.34 – Avaliação do conforto térmico numa sala da escola III-B por aplicação de modelos adaptativos (estação de aquecimento). a) modelo da ASHRAE; b) modelo do LNEC..... 137

Figura 4.35 – Concentração de CO_2 na escola II-B (estação de aquecimento)..... 138

Figura 4.36 – Distribuição probabilística da concentração de CO_2 na escola II-B (estação de aquecimento)..... 139

Figura 4.37 – a) Escola II-A; b) Escola III-A..... 142

Figura 4.38 – Variação anual da temperatura..... 143

Figura 4.39 – Variação anual da humidade relativa..... 145

Figura 4.40 – Variação anual do conforto térmico por aplicação do método gráfico simplificado..... 146

Figura 4.41 – Variação anual do conforto térmico por aplicação do modelo adaptativo do LNEC.....147
Figura 4.42 – Variação anual da concentração de CO_2 149
Figura 5.1 – Esquema da metodologia de optimização 154
Figura 5.2 – Esquema de optimização com recurso a RNA 154
Figura 5.3 – Modelo da escola A. a) vista geral; b) planta do r/c; c) planta do 1º piso 157
Figura 5.4 – Modelo da escola B. a) vista geral; b) planta do r/c; c) planta do 1º piso 158
Figura 5.5 – Perfil de funcionamento da iluminação.....162
Figura 5.6 – Dados climáticos utilizados na validação do modelo da escola A 165
Figura 5.7 – Dados climáticos utilizados na validação do modelo da escola B 165
Figura 5.8 – Comparação entre a simulação e a medição para a escola A 166
Figura 5.9 – Comparação entre a simulação e a medição para a escola B 166
Figura 5.10 – Representação esquemática de um sistema do tipo ETICS (Freitas, 2002) 168
Figura 5.11 – Propostas de reabilitação das coberturas. a) escola A; b) escola B 168
Figura 5.12 – Dados climáticos e localização das cidades escolhidas.....170
Figura 5.13 – Combinações das RNA 172
Figura 5.14 – Treino da RNA 172
Figura 5.15 – *Latin Hypercube Sampling* (LHS).....173
Figura 5.16 – Arquitectura das RNA 174
Figura 5.17 – Validação das RNA, resultados absolutos. a) função 1 - energia; b) função 2 - sobreaquecimento.....175
Figura 5.18 –Validação das RNA, coeficiente de determinação. a) função 1 - energia; b) função 2 – sobreaquecimento 176
Figura 5.19 – Caracterização da situação actual, função f_1, escola tipo A 178
Figura 5.20 – Caracterização da situação actual, função f_2, escola tipo A 180
Figura 5.21 – Caracterização da situação actual, função f_1, escola tipo B 181
Figura 5.22 – Caracterização da situação actual, função f_2, escola tipo B 182
Figura 5.23 – Estudo paramétrico, função energia vs. U_{par}, escola tipo A.....184
Figura 5.24 – Estudo paramétrico, função energia vs. U_{cob}, escola tipo A.....184
Figura 5.25 – Estudo paramétrico, função energia vs. RPH, escola tipo A.....185
Figura 5.26 – Estudo paramétrico, função energia vs. U_{vidro} e g, escola tipo A 186
Figura 5.27 – Estudo paramétrico, função energia vs. U_{cob}, escola tipo B 186
Figura 5.28 – Estudo paramétrico, função sobreaquecimento vs. U_{par}, escola tipo A.....187

Figura 5.29 – Estudo paramétrico, função sobreaquecimento vs. U_{cob}, escola tipo A 187
Figura 5.30 – Estudo paramétrico, função sobreaquecimento vs. RPH, escola tipo A 187
Figura 5.31 – Estudo paramétrico, função sobreaquecimento vs. U_{vidro} e g, escola tipo A .. 188
Figura 6.1 – Frente de Pareto, escola tipo A, 2 funções, orientação Este 197
Figura 6.2 – Representação da análise paramétrica na frente de Pareto 198
Figura 6.3 – Frente de Pareto com limites, escola tipo A, 2 funções, orientação Este..... 199
Figura 6.4 – Método dos Pesos, escola tipo A, 2 funções, orientação Este. a) Porto; b) Lisboa; c) Bragança 201
Figura 6.5 – Variabilidade das soluções obtidas através do Método dos Pesos..... 202
Figura 6.6 – Frente de Pareto, escola tipo A, 3 funções, localizada em Bragança com orientação Este 207
Figura 6.7 –Análise de custos de ciclo de vida (adaptado de Kreith & Goswami, 2007) 208
Figura 6.8 – *Layout* principal da aplicação desenvolvida 211
Figura 6.9 – Dados de entrada, opções iniciais 212
Figura 6.10 – *Layout* dos resultados na frente de Pareto..... 214
Figura 6.11 – Análise de sensibilidade da taxa de juro 215
Figura 6.12 – Análise de sensibilidade da variação do custo da energia 216
Figura 6.13 – Dados de entrada do exemplo 216
Figura 6.14 – Resultados do exemplo 217
Figura 6.15 – Representação das soluções do exemplo na frente de Pareto 217

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Escala de conforto térmico (adaptado de ISO, 2005 e ASHRAE, 2010)..... 29
Tabela 2.2 – Categorias de ambiente térmico global (adaptado de ISO, 2005)..... 31
Tabela 2.3 – Valores do parâmetro A (adaptado de ASHRAE, 2010) 31
Tabela 2.4 – Categorias para o ambiente térmico local (adaptado de ISO, 2005)..... 35
Tabela 2.5 – Concentração máxima regulamentar de poluentes do ar interior (adaptado de RSECE, 2006) 40
Tabela 2.6 – Condições de conforto interior de referência (adaptado de RCCTE, 2006) 41
Tabela 2.7 – Exigências de QAI em salas de aula de acordo com o RSECE (2006) 42
Tabela 2.8 – Exigências de temperatura e humidade relativa em salas de aula..... 42
Tabela 2.9 – Exigências de QAI em salas de aula 43
Tabela 2.10 – Relações de dominância..... 61
Tabela 3.1 – Caracterização construtiva da envolvente exterior das escolas não-reabilitadas 74
Tabela 3.2 – Caracterização construtiva da envolvente da escola R1 78
Tabela 3.3 – Caracterização construtiva da envolvente da escola R2 79
Tabela 3.4 – Análise estatística do registo da temperatura nas escolas não-reabilitadas 83
Tabela 3.5 – Análise estatística do registo da temperatura nas escolas reabilitadas..... 85
Tabela 3.6 – Análise estatística do registo da humidade relativa nas quatro escolas monitorizadas..... 86
Tabela 3.7 – Caudais de ventilação na escola NR1 95
Tabela 3.8 – Caudais de ventilação na escola R1 98
Tabela 4.1 – Períodos em que decorreram as medições 107
Tabela 4.2 – Caracterização construtiva da envolvente exterior das escolas do tipo II..... 112
Tabela 4.3 – Caracterização construtiva da envolvente exterior das escolas do tipo III 115
Tabela 4.4 – Sistemas de AVAC utilizados na reabilitação das escolas monitorizadas..... 116
Tabela 4.5 – Análise estatística da variação da temperatura na salas de aula orientadas a Norte e a Sul (estação de arrefecimento) 119
Tabela 4.6 – Análise estatística da variação da temperatura na escola III-B (estação de arrefecimento) 120
Tabela 4.7 – Análise estatística da variação da humidade relativa nas cinco escolas (estação de arrefecimento) 121

Tabela 4.8 – Análise estatística do registo da concentração de CO_2 nas cinco escolas (estação de arrefecimento).....125

Tabela 4.9 – Análise estatística da variação da temperatura nas cinco escolas (meia-estação).....127

Tabela 4.10 – Análise estatística da variação da humidade relativa nas cinco escolas (meia-estação).....128

Tabela 4.11 – Análise estatística do registo da concentração de CO_2 nas cinco escolas (meia-estação).....132

Tabela 4.12 – Análise estatística da variação da temperatura nas cinco escolas (estação de aquecimento).....134

Tabela 4.13 – Análise estatística da variação da temperatura na escola III-A (estação de aquecimento).....135

Tabela 4.14 – Análise estatística da variação da humidade relativa nas cinco escolas (estação de arrefecimento).....136

Tabela 4.15 – Análise estatística do registo da concentração de CO_2 nas cinco escolas (estação de aquecimento).....139

Tabela 5.1 – Elementos construtivos da envolvente exterior opaca dos modelos de simulação.....159

Tabela 5.2 – Vãos envidraçados dos modelos de simulação.....160

Tabela 5.3 – Dados para a contabilização da actividade metabólica.....161

Tabela 5.4 – Variáveis em estudo.....169

Tabela 5.5 – Coeficientes de determinação para o modelo do tipo A.....176

Tabela 5.6 – Coeficientes de determinação para o modelo do tipo B.....177

Tabela 6.1 – Parâmetros da função f_3.....205

Tabela 6.2 – Resultados da análise de custos de ciclo de vida.....218

SIMBOLOGIA

SÍMBOLO	DESIGNAÇÃO	UNIDADE
A	Parâmetro função da velocidade	-
A_{cob}	Área de cobertura	m^2
A_{par}	Área de parede exterior	m^2
a	Idade do indivíduo	anos
C	Produto da massa do elemento (zona) pelo calor específico do ar	J/ºC
C_{en}	Valor actual do custo com energia	€
$C_{en\ ini}$	Valor actual do custo com energia antes da reabilitação	€
$C_{en\ reab}$	Valor actual do custo com energia antes da reabilitação	€
C_{ex}	Concentração do gás no exterior	ppm
C_{in}	Concentração inicial do gás no interior	ppm
C_{inv}	Valor actual do investimento	€
C_{iso}	Custo do isolante térmico	€/m^3
C_{man}	Valor actual do custo de manutenção	€
C_{sub}	Valor actual do custo de substituição	€
$C(t)$	Concentração do gás	ppm
CCV	Custo de ciclo de vida	€
c_e	Custo actual do kWh	€/kWh
DR	Taxa de corrente de ar	%
dC_{en}	Valor actual da variação do custo com energia	€
dC_{inv}	Valor actual do diferencial de investimento	€
$\frac{dT_a}{dt}$	Variação da temperatura, T_a, no incremento de tempo, t	ºC/s
e	Espessura do isolante térmico Taxa para a variação do custo da energia	m -
$f_m(x)$	Função original	-
$f_m^{\ 0}$	Valor mínimo da função original	-
$f_m^{\ max}$	Valor máximo da função original	-
$f_m^{\ trans}(x)$	Função normalizada	-
G	Produção interna do gás	cm^3/s
g	Factor solar do envidraçado	-
$g_{\perp v}$	Factor solar do envidraçado	-
$g_{\perp}^{'}$	Factor solar do envidraçado com protecção solar	-
HR	Humidade relativa	%
h	Altura do indivíduo	m
I_{CL}	Resistência térmica do vestuário	clo
i	Taxa de inflação	-

SÍMBOLO	DESIGNAÇÃO	UNIDADE
M	Actividade metabólica	met
m	Taxa de metabolismo	W/m^2
N_{en}	Necessidades anuais de energia para aquecimento após reabilitação	kWh
$N_{en\ ini}$	Necessidades anuais de energia para aquecimento antes da reabilitação	kWh
n	Período de análise	anos
PD	Percentagem de pessoas insatisfeitas	%
PMV	Voto médio previsível (*Predicted Mean Vote*)	-
PPD	Percentagem previsível de insatisfeitos (*Predicted Percentage Dissatisfied*)	%
p	Pressão atmosférica (101325 Pa)	Pa
p_a	Pressão parcial do vapor de água	Pa
p_i	Valor da função estimado pela RNA	-
p_{sat}	Pressão de saturação do ar	Pa
Q	Caudal de ventilação	m^3/s
Q_{aq}	Carga térmica de aquecimento	kWh
Q_{cond}	Energia transferida por condução	W
Q_{conv}	Trocas convectivas entre a superfície e o ar envolvente	W
$Q_{convIntGains}$	Carga térmica convectiva provocada pelos ganhos internos	W
Q_{infil}	Carga térmica ganha ou perdida devido a infiltrações de ar	W
Q_{LWrad}	Trocas radiativas de onda longa entre a superfície e os elementos envolventes (terreno, ar, outros edifícios, etc.)	W
$Q_{LWradExch}$	Trocas radiativas de onda longa com as outras superfícies da zona	W
$Q_{LWradIntGains}$	Radiação de onda longa emitida pelos ganhos internos (pessoas, equipamentos, etc.) e absorvida pela superfície	W
Q_{solar}	Radiação solar absorvida pela superfície interior	W
$Q_{SWlights}$	Radiação de onda curta emitida pela iluminação e absorvida pela superfície	W
Q_{SWrad}	Radiação solar directa e difusa absorvida pela superfície	W
Q_{sys}	Carga térmica colocada ou retirada da zona pelo sistema de AVAC	W
R^2	Coeficiente de determinação	-
RPH	Renovações horárias	h^{-1}
r	Taxa de juro nominal	-
S	Acumulação de calor no corpo humano Área Área do elemento construtivo	W/m^2 m^2 m^2
T_a	Temperatura do ar	ºC
T_{conf}	Temperatura de conforto	ºC
T_{n-i}	Temperatura média exterior do dia (i) anterior	ºC
T_m	Temperatura média mensal exterior	ºC
T_{mp}	Temperatura exterior exponencialmente ponderada	ºC
T_{mr}	Temperatura média radiante	ºC
T_{oc}	Temperatura operativa de conforto	ºC

SÍMBOLO	DESIGNAÇÃO	UNIDADE
T_{op}	Temperatura operativa	ºC
T_u	Intensidade da turbulência	%
TA	Taxa de actualização	-
TR	Taxa de juro real	-
TRE	Taxa de juro real incluindo o efeito da variação do custo da energia	-
t	Tempo	s
$t_{d,e}$	Temperatura exterior de dimensionamento	ºC
$t_{d,i}$	Temperatura interior de dimensionamento	ºC
U	Coeficiente de transmissão térmica	W/(m^2.ºC)
U_{cob}	Coeficiente de transmissão térmica da cobertura	W/(m^2.ºC)
U_{ini}	Coeficiente de transmissão térmica do elemento antes da reabilitação	W/(m^2.ºC)
$U_{ini\ cob}$	Coeficiente de transmissão térmica da cobertura antes da reabilitação	W/(m^2.ºC
$U_{ini\ par}$	Coeficiente de transmissão térmica da parede exterior antes da reabilitação	W/(m^2.ºC)
U_m	Valor médio entre o coeficiente de transmissão térmica da janela e o da parede	W/(m^2.ºC)
U_{par}	Coeficiente de transmissão térmica da parede exterior	W/(m^2.ºC)
U_{reab}	Coeficiente de transmissão térmica do elemento reabilitado	W/(m^2.ºC)
U_{vidro}	Coeficiente de transmissão térmica dos envidraçados	W/(m^2.ºC)
V	Volume	m^3
V_{CO2}	Produção de CO_2	l/h
v_{ar}	Velocidade relativa do ar	m/s
w	Peso do indivíduo	kg
x_{ar}	Humidade absoluta do ar	kg/kg
y_i	Valor da função obtido através da simulação computacional	-
$\bar{y}$	Média dos valores exactos da função	-
α	Área corporal	m^2
λ_{iso}	Condutibilidade térmica do isolante térmico	W/(m.ºC)

1 INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

Uma educação de excelência é, hoje em dia, um objectivo claro de qualquer sociedade moderna. Vários estudos internacionais têm sido realizados para avaliar a performance/desempenho dos estudantes bem como os factores que mais a influenciam, nomeadamente a qualidade do ambiente interior das salas de aula. Este tema tem ganho particular importância nos últimos anos e tem sido objecto de análise de vários investigadores.

Em Portugal a questão da reabilitação dos edifícios escolares apresenta-se como um investimento estratégico, que visa, entre outros objectivos, assegurar um desempenho higrotérmico adequado e melhorar a eficiência energética e a qualidade do ar interior dos edifícios, respeitando a legislação em vigor. Os edifícios escolares existentes não foram projectados para cumprir os requisitos regulamentares actuais no domínio da higrotérmica. Estes edifícios não garantem as condições de conforto térmico, nem as de qualidade do ar interior, que a população hoje em dia solicita. Todavia, alguns deles apresentam envolventes com elevada durabilidade.

Os edifícios escolares apresentam algumas características únicas que os diferenciam dos restantes e lhes conferem um desempenho higrotérmico altamente dependente de determinadas propriedades e condicionantes, nomeadamente o seu perfil de ocupação. Num edifício escolar a taxa de ocupação é muito elevada, podendo chegar a quatro vezes mais ocupantes por metro quadrado do que num típico edifício de escritórios, e os ocupantes destes edifícios passam grande parte do seu tempo dentro das salas de aula, valor que só é ultrapassado pelo tempo que passam nas suas habitações. Assim, os seguintes aspectos devem ser considerados e o seu efeito devidamente contabilizado:

- Elevadas taxas de ocupação implicam ganho térmicos internos muito significativos;
- Elevadas taxas de ocupação implicam requisitos mais exigentes de ventilação e consequente qualidade do ar interior;
- Para melhorar as condições de iluminação natural das salas de aula as fachadas apresentam uma elevada área de envidraçados (frequentemente acima dos 50%), implicando um aumento significativo do peso da parcela relativa aos envidraçados no balanço térmico do edifício;
- O sombreamento assume particular importância devido às elevadas cargas térmicas geradas pela área envidraçada (ganhos solares).

A reabilitação dos edifícios escolares deve ser realizada não só com o intuito de cumprir requisitos de eficiência energética mas também o de optimizar os níveis de conforto para

professores e alunos, maximizando, por esta via, as condições para uma melhor aprendizagem. Deve ser encarada como um processo de compatibilização de várias condicionantes na busca de uma "solução óptima", nomeadamente as relacionadas com a eficiência energética do edifício, com o conforto térmico, com a qualidade do ar interior e com os custos das soluções adoptadas (iniciais e de exploração e manutenção) e respectiva durabilidade. Desta forma, a procura das soluções construtivas óptimas corresponde a um problema de optimização de vários objectivos, conflituosos entre si, uma vez que se pretende garantir as melhores condições de conforto e qualidade do ar interior minimizando os consumos de energia e os custos associados às soluções.

Na preparação de uma intervenção de reabilitação num edifício escolar uma primeira decisão fundamental para o seu desempenho deve ser devidamente ponderada. Qual a estratégia de ventilação a adoptar? Duas perspectivas podem ser consideradas:

— Uma intervenção baseada na introdução de sistemas mecânicos de climatização e ventilação que serão responsáveis pelo controlo das condições de conforto térmico e qualidade do ar interior;

— Uma intervenção focada na melhoria do desempenho da envolvente do edifício associada a uma ventilação predominantemente natural.

Da aplicação da primeira abordagem resultam edifícios com um elevado controlo das condições ambientais interiores mas com custos muito elevados, não só na aquisição e instalação dos sistemas mecânicos mas também na exploração e manutenção dos mesmos, uma vez que este controlo é conseguido a partir de elevados consumos energéticos e os sistemas requerem intervenções regulares para manterem um funcionamento adequado. Estes edifícios podem apresentar problemas significativos de qualidade do ambiente interior sempre que os sistemas não se encontrem em funcionamento, pois o seu desempenho está fortemente dependente destes, sendo praticamente irrelevante o peso da envolvente. Torna-se ainda essencial referir que a durabilidade destes sistemas levanta inúmeras interrogações.

Da segunda abordagem resultam edifícios passivos, mais sustentáveis, que embora registando maiores flutuações nas condições ambientais interiores, requerendo uma maior capacidade de adaptação por parte dos ocupantes, apresentam custos de utilização incomparavelmente inferiores. Nestes edifícios a envolvente é decisiva para o desempenho final e, como tal, deve ser devidamente analisada.

Esta escolha está indubitavelmente condicionada pelos requisitos regulamentares em termos de ar novo e de concentração máxima dos poluentes, e é determinante para o desempenho final do edifício e para o processo de optimização, devendo ser efectuada de forma consciente e devidamente fundamentada em termos técnicos e científicos, mesmo que para tal seja necessário pôr em causa as exigências em vigor, sempre passíveis de melhoria. A utilização de critérios probabilísticos para a imposição de limites nas condições de conforto térmico e de qualidade do ar interior pode ser uma forma de flexibilizar a legislação, tornando-a mais adequada à realidade e permitindo soluções mais sustentáveis.

Desta forma, a determinação *in situ* das variáveis físicas de avaliação da qualidade do ambiente interior nos edifícios escolares assume um papel fundamental para validar esta escolha e para aferir sobre a adequabilidade das exigências regulamentares.

Concluindo, um dos problemas mais importantes com que um engenheiro/arquitecto se depara na concepção de um projecto de reabilitação de um edifício escolar prende-se com a escolha dos materiais e tecnologias a utilizar de forma a garantir a compatibilização entre a eficiência energética, a qualidade do ar interior, o nível de conforto dos ocupantes e os custos associados a essa escolha.

1.2 OBJECTIVOS E ESTRATÉGIA

Pretende-se que esta Tese se constitua como um estudo aprofundado do problema da reabilitação dos edifícios escolares na vertente do seu desempenho higrotérmico e áreas afins, como a eficiência energética, o conforto térmico e a qualidade do ar interior, evidenciando sempre o aspecto económico relacionado com as opções e soluções escolhidas. Para tal assumem-se dois grandes objectivos centrais:

— Caracterizar o desempenho em serviço dos edifícios escolares: o conhecimento do desempenho actual dos edifícios escolares, reabilitados e não reabilitados, é essencial pois só dessa forma se poderá fazer um balanço crítico da aplicação da legislação existente neste domínio e, a partir daí, avançar para o segundo objectivo de uma forma sustentada em termos de opções de fundo;

— Propor uma metodologia de optimização de soluções construtivas: pretende-se efectuar uma optimização multi-objectivo, incluindo aspectos técnicos e económicos, de soluções construtivas tipo a aplicar na reabilitação de edifícios escolares. Para tal serão utilizadas ferramentas computacionais avançadas de simulação e optimização.

Para atingir os dois objectivos centrais definiu-se um conjunto de tarefas e objectivos parciais, que a seguir se sintetizam:

— Compilar a informação mais actual sobre a reabilitação de edifícios escolares e o seu efeito no desempenho higrotérmico, incluindo todas as componentes relevantes para este trabalho, designadamente a avaliação da qualidade do ambiente interior (conforto térmico e qualidade do ar interior), os modelos computacionais de simulação numérica e os métodos de optimização;

— Realizar uma campanha experimental inicial de sensibilidade que permitisse um primeiro enquadramento com o problema em causa e cujos resultados servissem de suporte às decisões seguintes. Pretendeu-se uma caracterização completa do desempenho dos edifícios escolhidos através da monitorização da temperatura, humidade relativa e concentração de dióxido de carbono, e da medição dos caudais de ventilação. Foram escolhidas quatro escolas, duas não reabilitadas e duas recentemente reabilitadas;

— Promover uma campanha alargada de monitorização em edifícios recentemente reabilitados que permitisse avaliar o seu desempenho anual. Foram definidos três períodos para as campanhas de medições, Verão, meia estação e Inverno, e escolhidos cinco edifícios tipo;

— Os resultados obtidos nas duas campanhas experimentais permitiram suportar a análise crítica da legislação actual e validar as opções de fundo tomadas para a optimização das soluções construtivas, nomeadamente no que diz respeito à definição do modelo de ventilação a adoptar;

— Efectuar uma procura e posterior selecção de um programa de cálculo automático, adequado à simulação térmica e energética de edifícios, que permita avaliar o seu desempenho dentro dos pressupostos e objectivos definidos;

— Criar modelos computacionais de duas escolas tipo, devidamente validados pelos resultados das campanhas experimentais, que permitam avançar para a optimização de soluções construtivas a aplicar na sua reabilitação;

— Realizar uma campanha alargada de simulações anuais dos dois modelos criados, variando as propriedades mais relevantes das soluções construtivas tipo, nomeadamente o coeficiente de transmissão térmica das paredes, coberturas e envidraçados, o factor solar dos envidraçados e as renovações horárias. Estas propriedades correspondem às variáveis a optimizar;

— Definir funções avaliadoras do desempenho dos edifícios, que possam ser calculadas a partir dos resultados da simulação e que traduzam os objectivos a optimizar;

— Uma vez que as simulações anuais são processos computacionalmente exigentes e morosos, e a optimização multi-objectivo requer um elevado número de simulações, criaram-se Redes Neurais Artificiais (RNA) para aproximação das funções de avaliação do desempenho. As RNA foram devidamente treinadas e validadas;

— Utilizando as RNA entretanto criadas pretende-se caracterizar o desempenho actual dos edifícios considerando diferentes orientações e localizações, e realizar um estudo paramétrico de avaliação do efeito da alteração de cada uma das variáveis nos objectivos em estudo;

— Proceder a uma optimização das variáveis em estudo recorrendo a algoritmos evolucionários e considerando duas abordagens distintas, agregando os objectivos numa única função a minimizar (Método dos Pesos) e executando uma verdadeira optimização multi-objectivo obtendo-se o conjunto das soluções óptimas (frente de Pareto);

— A partir dos resultados das optimizações, realizar uma análise técnico-económica das soluções construtivas aplicadas na reabilitação da envolvente de edifícios escolares;

— Será efectuada uma análise de custos de ciclo de vida como forma de avaliar o custo e o benefício de cada solução. A metodologia proposta para a optimização das soluções construtivas será materializada numa folha de cálculo programada para o efeito.

1.3 ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TEXTO

Este trabalho está dividido em sete capítulos:

— O Capítulo 1 enquadra o trabalho desenvolvido, apresenta os seus objectivos e a estratégia utilizada para os alcançar e resume os restantes capítulos;

— O Capítulo 2 corresponde a uma síntese do conhecimento nos domínios específicos desta Tese. Aborda, em primeiro lugar, a temática da reabilitação dos edifícios escolares explicitando a sua necessidade e detalhando o exemplo português e de outros países. Em segundo lugar, são descritos os procedimentos correntes de avaliação do desempenho higrotérmico, particularmente a qualidade do ambiente interior em termos de conforto térmico e qualidade do ar interior, e apresentados os requisitos regulamentares neste domínio em vigor em Portugal e noutros países. Por fim, inclui uma descrição dos procedimentos de simulação numérica do desempenho higrotérmico e energético, incluindo uma descrição geral do modelo de simulação do programa escolhido para este trabalho, o *EnergyPlus*, e uma apresentação quer dos modelos matemáticos de optimização uni e multi-objectivo com recurso a algoritmos evolucionários, quer da utilização de ferramentas avançadas de aproximação de funções do tipo das RNA;

— O Capítulo 3 descreve o estudo experimental preliminar onde foi caracterizado o desempenho em serviço de quatro edifícios escolares através da medição da temperatura, humidade relativa, concentração de dióxido de carbono e caudais de ventilação. Começa-se por descrever os objectivos e a metodologia utilizada, seguindo-se uma caracterização detalhada da amostra escolhida, incluindo uma descrição das propriedades mais relevantes dos elementos construtivos. No final, apresentam-se os resultados das medições efectuadas e são tecidas conclusões;

— O Capítulo 4 apresenta a avaliação experimental do desempenho higrotérmico de edifícios escolares reabilitados, realizada em cinco escolas recentemente intervencionadas. São descritos os objectivos e a metodologia utilizada e caracterizada a amostra estudada em termos construtivos. Após a apresentação dos resultados mais importantes é realizada uma análise crítica dos mesmos em termos de qualidade do ambiente interior destas escolas e respectiva eficácia da intervenção de reabilitação no seu desempenho. Por fim, expõem-se as conclusões mais relevantes;

— O Capítulo 5 caracteriza a campanha de simulação numérica do desempenho térmico e energético. São elencados os objectivos e a metodologia utilizada, bem como os modelos desenvolvidos para a simulação de duas escolas tipo e apresentada a

respectiva validação perante os resultados experimentais. De seguida, descreve-se o modelo de avaliação do desempenho proposto, abrangendo as variáveis em estudo e a quantificação de funções avaliadoras do desempenho a partir dos resultados das simulações anuais. Uma vez que a determinação destas funções é um processo muito moroso é descrita uma metodologia alternativa para o seu cálculo, recorrendo a RNA. Indica-se a arquitectura definida para as RNA, respectivo procedimento de treino e validação. De seguida, apresenta-se uma caracterização do desempenho actual dos edifícios em análise tendo em conta o efeito da orientação das fachadas e da sua localização. Por fim, mostram-se os resultados de um estudo paramétrico do impacto de cada variável no valor das funções de avaliação do desempenho;

— O Capítulo 6 engloba a optimização e a análise técnico-económica de soluções construtivas tipo. Inicialmente descrevem-se os objectivos e a metodologia utilizada. De seguida, é efectuada uma optimização multi-objectivo das variáveis em estudo. No final, realiza-se uma análise técnico-económica das soluções construtivas tipo aplicadas na reabilitação da envolvente de edifícios escolares, propondo-se uma metodologia de optimização baseada na análise de custos de ciclo de vida;

— O Capítulo 7 resume as principais conclusões desta Tese e perspectiva o desenvolvimento de trabalhos futuros neste domínio de investigação.

2 O ESTADO DA ARTE SOBRE REABILITAÇÃO, DESEMPENHO HIGROTÉRMICO E SIMULAÇÃO

2.1 REABILITAÇÃO DE EDIFÍCIOS ESCOLARES

2.1.1 Motivação

2.1.1.1 Introdução

Os edifícios escolares são locais especiais, são a casa da educação, os lugares onde as crianças e os jovens se reúnem para aprender sobre educação cívica e desenvolver habilidades básicas que os transformam em membros produtivos da sociedade. As escolas também são utilizadas para a formação contínua de adultos, para actos eleitorais, eventos comunitários e outras actividades relevantes, demonstrando o simbolismo dado a estes edifícios que muitas vezes representam a própria comunidade onde estão inseridos. Desta forma, o espaço da escola reproduz as mudanças ou continuidades na forma de conceber a educação e as suas relações com a sociedade.

Nos últimos anos têm-se registado significativas alterações nos modelos de aprendizagem e nos curricula levando à mudança de um ensino quase exclusivamente baseado na transmissão de saberes organizados por via expositiva, para práticas pedagógicas mais activas e socializadoras, de âmbito colaborativo e exploratório, com o uso intensivo das novas tecnologias de informação e de comunicação. Estas alterações não só significam uma transformação do modelo de aprendizagem como também requerem uma permanência prolongada na escola dos alunos e docentes. A escola deixa de ser limitada quase exclusivamente às salas de aula, tornando-se necessário repensar a organização tradicional do espaço escolar (Heitor, 2010).

Em Portugal, a actual rede pública de escolas integra um conjunto diversificado de edifícios, que vai desde imóveis com reconhecido valor patrimonial até às construídas a partir do final da década de 60, com base em projectos tipificados por forma a dar resposta rápida à expansão da rede escolar, devido ao alargamento da escolaridade obrigatória. Nos últimos 30 anos o sistema educativo português no seu conjunto sofreu um largo processo de modernização no sentido de equiparar o desempenho dos nossos estudantes com o dos restantes países europeus. Durante este processo foram construídos inúmeros edifícios escolares, de forma a garantir uma rede de escolas capaz de cobrir todo o país. Refira-se que mais de 75%, das actuais escolas com ensino secundário, foram construídas nos últimos 30 anos, das quais 46% na década de 80.

No entanto, tal esforço não foi acompanhado pela alteração e adaptação do modelo de gestão das escolas à realidade actual, de forma a garantir o desenvolvimento de uma prática constante e consistente de adequação funcional e de conservação e manutenção dos edifícios escolares. Não foram tomadas medidas integradas para fazer face ao desgaste provocado pelo

uso e aos problemas construtivos que os edifícios estão sujeitos, nem à necessidade de atender às crescentes exigências decorrentes das novas tecnologias de aprendizagem e requisitos de conforto, acessibilidade e eficiência energética. Assim, parte dos edifícios escolares foram-se degradando fisicamente, tornando-se desadequados às exigências actuais (Heitor, 2010).

Desta forma é imperativo reabilitar os edifícios escolares, tratando-se de uma oportunidade excepcional para melhorar as suas condições de utilização, garantindo-se, simultaneamente, o conforto dos utilizadores, a eficiência energética, a durabilidade das soluções e a sustentabilidade da exploração dos novos edifícios (Freitas & Almeida, 2009).

2.1.1.2 Ambiente interior das salas de aula

Actualmente parece claro que as condições ambientais existentes nas salas de aula, nomeadamente o efeito da temperatura e da qualidade do ar interior (QAI), influenciam a saúde, a atitude e o desempenho dos estudantes. Sabendo que as crianças passam grande parte do seu tempo dentro dos edifícios escolares e que são mais susceptíveis que os adultos aos efeitos adversos dos poluentes interiores, uma vez que é superior a razão entre o volume de ar respirado e o seu peso, e os seus tecidos e órgãos encontram-se ainda em fase de crescimento, a reabilitação dos edifícios escolares assume-se como uma estratégia adequada e que terá repercussão em todo o ambiente escolar, garantindo aos utilizadores dos edifícios as condições necessárias para executarem o seu trabalho. Vários estudos têm sido realizados com o intuito de avaliar os diferentes efeitos resultantes de alterações nas condições ambientais das salas de aula. Salientam-se os seguintes:

- Smedje, et al. (1997) realizaram um estudo procurando demonstrar uma relação entre a má QAI em salas de aula e problemas de asma nos estudantes. Para tal, estimaram os problemas respiratórios e de asma através de um questionário enviado a 762 alunos de 11 escolas suecas, e avaliaram a QAI com medições em 28 salas de aula, dessas mesmas escolas. Os resultados mostraram uma relação entre os problemas de asma e algumas das condições existentes na escola, nomeadamente temperaturas do ar baixas, elevada humidade relativa, altas concentrações de formaldeído e outros compostos orgânicos voláteis e existência de bolores, bactérias e fungos;

- Shendell, et al. (2004) avaliaram o efeito da QAI no absentismo dos alunos e professores. O estudo foi desenvolvido em 436 salas de aula, de 22 escolas primárias, nas quais foram realizadas medições pontuais da concentração de dióxido de carbono (CO_2) (em cada sala de aula duas medições durante um período inferior a 5 minutos). Os resultados mostraram uma relação estatisticamente significativa entre um aumento da concentração de CO_2 e o absentismo. No entanto, o estudo não conseguiu demonstrar o mesmo tipo de relação entre os caudais de ventilação e o absentismo;

- Foi publicado por Mendell e Heath (2005) uma revisão crítica dos estudos editados até à data que pretendiam evidenciar uma relação entre a qualidade do ambiente interior das salas de aula e o desempenho académico dos estudantes em escolas secundárias. Os resultados dos 30 estudos analisados sugerem que determinadas condições

ambientais encontradas em algumas escolas têm um efeito adverso na saúde e no desempenho dos estudantes. O trabalho conclui que os edifícios escolares devem garantir uma adequada ventilação, um controlo da humidade absoluta e limitar a exposição a substâncias químicas e microbiológicas cujo efeito é considerado adverso para a saúde;

— Segundo Wargocki e Wyon (2005) alterar as condições de ventilação e de temperatura nas salas de aula pode provocar uma melhoria significativa na performance dos alunos. Neste estudo o caudal de ventilação foi variado entre 3 e 9,5 l/(s.ocupante) e a temperatura reduzida de 24-25 ºC para 20 ºC. Os resultados evidenciaram aumentos na performance dos estudantes de 8 a 14 % no caso das alterações na ventilação e de 2 a 4 % para variações de 1 ºC na temperatura. A performance foi medida em diferentes actividades, desde a leitura até à matemática, e numa amostra de cerca de 100 alunos. No entanto, é importante referir que os resultados evidenciam uma dispersão muito considerável em função do tipo de actividade desenvolvida, resultando em correlações com um erro muito significativo. A Figura 2.1 ilustra os resultados deste estudo;

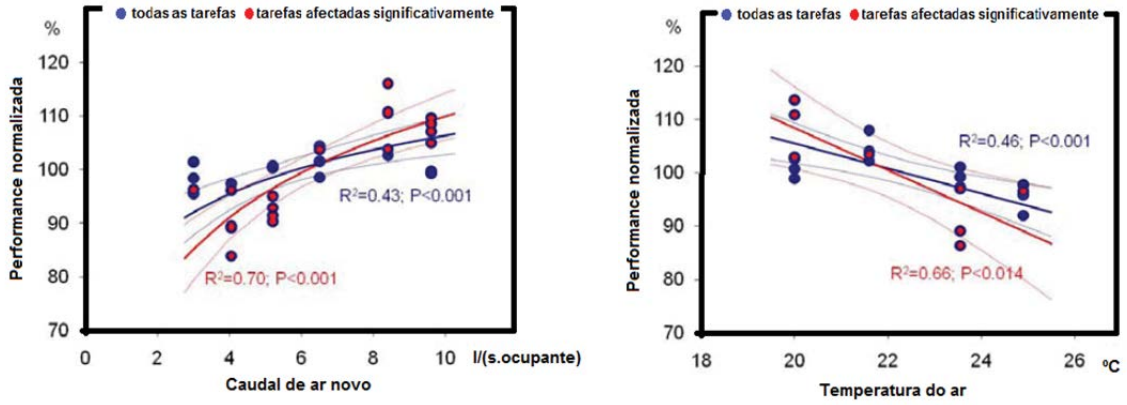


Figura 2.1 - Efeito da ventilação e da temperatura na performance dos estudantes (adaptado de Wargocki e Wyon, 2005)

— Do estudo preliminar desenvolvido por Shaughnessy, et al. (2006) resultou uma relação estatisticamente significativa entre os caudais de ventilação nas salas de aula e os resultados em testes de matemática. Neste estudo foram utilizadas 54 escolas e a ventilação foi estimada a partir de medições da concentração de CO_2 durante períodos de 4 a 5 horas;

— Bakó-Biró, et al. (2007) avaliaram o efeito da variação do caudal de ar novo em escolas com ventilação natural, conseguida através de alterações nas janelas, no desempenho dos alunos no cálculo matemático. Os resultados demonstraram uma melhoria de 5,1 a 5,8 % na performance;

— No Reino Unido procurou-se estudar o efeito da mudança para novas instalações no comportamento e atitude dos alunos de uma escola. Assim, Rudd, et al. (2008), através da utilização de questionários, concluíram existirem evidências de uma melhoria na atitude dos alunos após a mudança. A percentagem de alunos que se consideravam

seguros na escola passou de 57 para 87%, a vontade e o gosto em ir à escola alterou-se de 50 para 61% e o número de alunos que consideravam o vandalismo um problema na sua escola diminuiu de 84 para 33%;

— Num estudo realizado em 11 escolas do Porto, Madureira, et al. (2009) avaliaram a relação entre a QAI das salas de aula e problemas de saúde dos professores. O estudo baseou-se na monitorização da temperatura e humidade relativa das salas de aula, no período lectivo, durante dois dias, e em amostras pontuais retiradas para análise da QAI. Paralelamente foram efectuados questionários aos professores para conhecer eventuais problemas de saúde. Conclui-se existir uma relação entre as duas variáveis, obtendo-se correlações estatisticamente significativas entre problemas no sistema nervoso central e os níveis de concentração de CO_2 e de compostos orgânicos voláteis, e entre problemas no sistema respiratório e os níveis de partículas suspensas no ar;

— Franchimon, et al. (2009) procuraram aglutinar os resultados obtidos em diversos estudos já publicados sobre a relação entre o desempenho e rendimento escolar dos estudantes e o caudal de ventilação. O resultado encontra-se sintetizado na Figura 2.2.

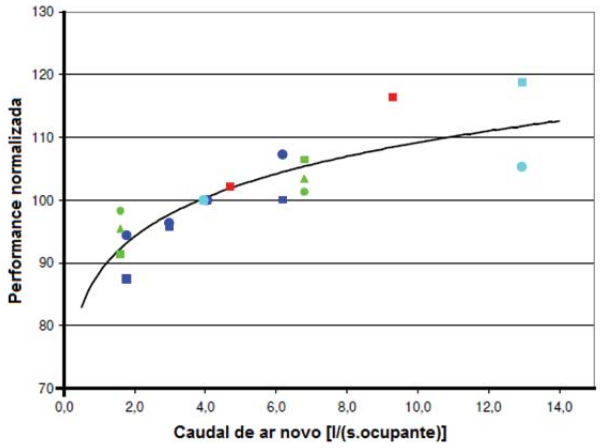


Figura 2.2 - Relação entre o caudal de ventilação e o desempenho escolar (adaptado de Franchimon, et al., 2009)

2.1.1.3 Eficiência energética

Paralelamente ao impacto nas condições ambientais das salas de aula, a reabilitação dos edifícios escolares, deve, também, corresponder a uma melhoria significativa na eficiência energética dos edifícios.

Os edifícios representam uma fatia muito considerável do balanço energético nacional. A Figura 2.3 mostra a distribuição do consumo total de energia e do consumo de energia eléctrica em Portugal, por sector, no ano de 2008. A parcela referente aos edifícios corresponde a cerca de 29% do consumo total de energia (soma dos sectores doméstico e serviços). Em termos de consumo de electricidade esse valor ascende a 62% do consumo total.

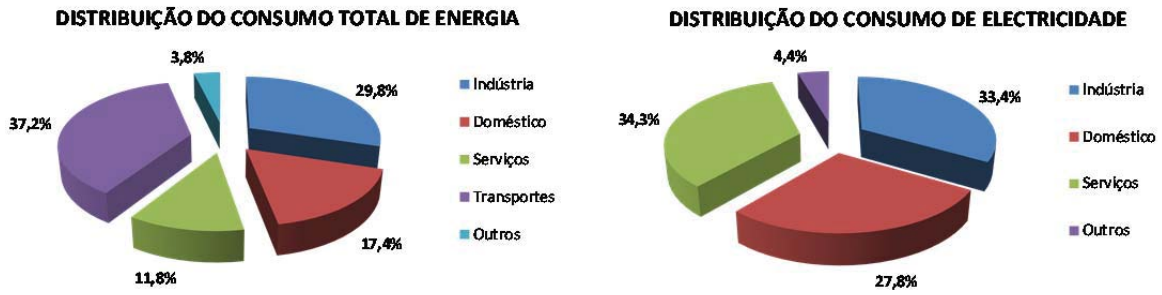


Figura 2.3 – Balanço energético nacional (DGEG, 2008)

Estes consumos têm vindo a crescer nos últimos anos, desde 1990 já se regista um aumento no consumo de energia eléctrica de 125% no sector doméstico e 185% no sector dos serviços. A Figura 2.4 apresenta a variação do consumo total de energia e consumo de energia eléctrica, em Portugal, desde 1990 até 2008, nos sectores doméstico e serviços.

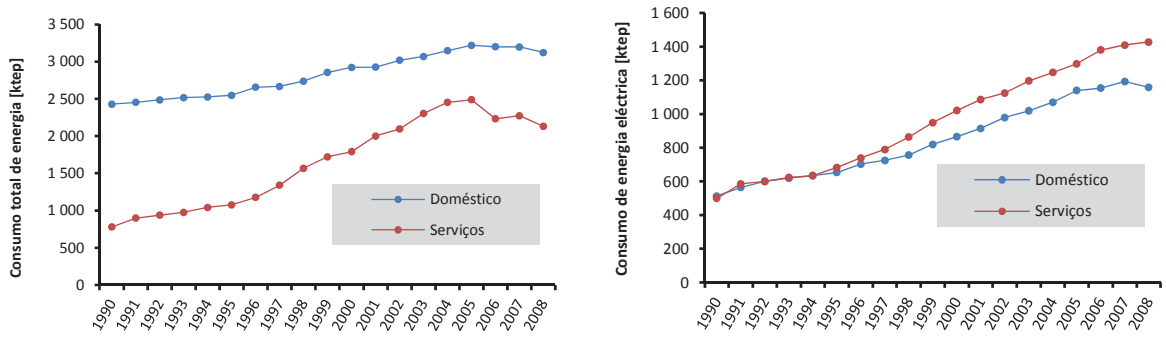


Figura 2.4 – Variação dos consumos de energia em Portugal, no sector doméstico e no dos serviços (DGEG, 2008)

É neste contexto que surge a Directiva 2002/91/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de Dezembro de 2002, (reformulada pela Directiva 2010/31/UE) relativa ao desempenho energético dos edifícios e que levanta questões fundamentais relativamente ao aumento das necessidades energéticas, e às crises energéticas dos últimos anos (União Europeia, 2002).

A directiva indica que o sector residencial e o terciário, a maior parte dos quais constituídos por edifícios, absorvem mais de 40% do consumo final de energia da Comunidade e encontram-se em expansão, tendência que deverá vir a acentuar o valor do referido consumo e, por conseguinte, as correspondentes emissões de CO_2 (União Europeia, 2002).

Num estudo promovido pela Agência Internacional de Energia (IEA) - Anexo 36 - com o intuito de avaliar o impacto de diferentes estratégias de reabilitação de edifícios escolares no seu consumo energético verificou-se, por análise de casos reais, que a necessidade energética para aquecimento pode sofrer uma redução de até 75% e que o consumo de energia eléctrica pode diminuir 40% (Erhorn-Kluttig, et al., 2005). No entanto, estes resultados foram obtidos em edifícios do norte e centro da Europa com realidades climáticas bastante diferentes da portuguesa.

2.1.1.4 Síntese

A reabilitação dos edifícios escolares é um imperativo na sociedade de hoje. Desta intervenção resultarão inúmeros benefícios quer para a comunidade escolar quer para a sociedade em geral.

No âmbito deste trabalho destacam-se as seguintes mais-valias que advêm da reabilitação dos edifícios escolares:

- A beneficiação da qualidade do ambiente interior, em termos de conforto térmico e QAI, implica uma melhoria significativa para a saúde e desempenho dos estudantes;
- A intervenção na envolvente dos edifícios e nos sistemas é uma oportunidade única de melhorar a eficiência energética dos edifícios, reduzindo perdas e utilizando soluções economicamente sustentáveis.

2.1.2 O caso Português

2.1.2.1 Caracterização do parque escolar Português

A imposição da escolaridade obrigatória e a crescente necessidade de instrução, encarada pelos diferentes governos europeus como um direito universal durante o século XIX, está na base da estruturação e organização dos sistemas públicos nacionais de ensino, dando início a um período de experimentação de concepção de edifícios escolares, sendo estes objecto de desenvolvimento no campo da arquitectura escolar no decorrer do século XX. O século XIX representa um período de referência no que diz respeito às ideias e reformas do ensino, perdurando algumas delas até à actualidade. É nas últimas décadas deste século, e no quadro do ensino primário, que se inicia um novo período no campo da construção escolar em Portugal (Alegre, 2010).

As escolas Conde de Ferreira (1866) foram as primeiras escolas primárias portuguesas a obedecer a uma planta tipo (Figura 2.5). O Conde de Ferreira legou 144000 reis para a edificação de 120 escolas de instrução primária, de ambos os sexos, nas sedes de concelho, segundo uma mesma planta. A dimensão da iniciativa obrigou o governo a regular todo o processo, publicando, em portaria de 20 de Julho de 1866, uma série de normas para a edificação dessas escolas (Silva, 2005).

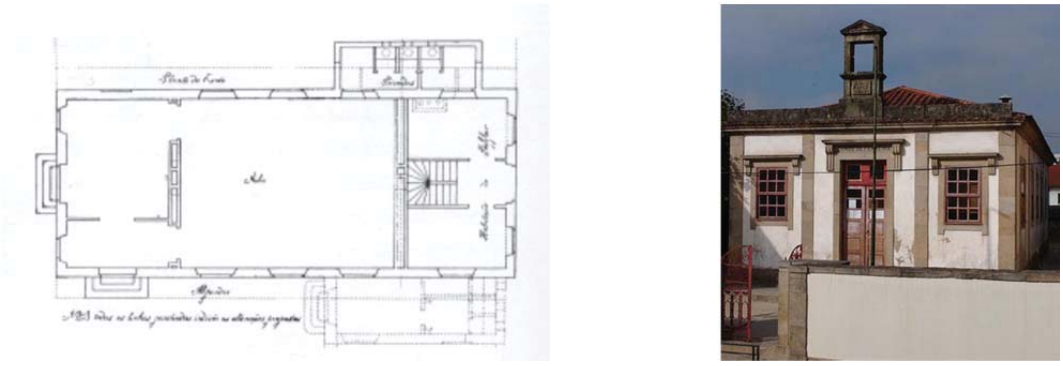


Figura 2.5 – Escola Conde de Ferreira (planta e escola em Fafe) (Beja, et al., 1990)

A referida portaria demonstrava preocupações relativas à exposição solar, ventilação e temperatura das salas de aula. As escolas Conde de Ferreira eram edifícios clássicos, com fachada encimada por um pequeno frontão triangular e porta ladeada por duas janelas. Na fachada lateral localizava-se a porta de acesso dos alunos. O edifício, para além da sala de aula, dispunha de uma sala contígua reservada a recitações, biblioteca e recepção, de área não inferior a um terço da sala principal, e um vestíbulo (dois no caso de frequência de ambos os sexos).

Durante a década 1880-1890 o tema da arquitectura escolar é debatido nas conferências pedagógicas. Nas assembleias realizadas em Lisboa, em 1883, Artur Lucas da Silva, professor da Casa Pia, apresenta uma intervenção de fundo sobre as condições higiénicas das escolas, associando os problemas físicos das crianças à precária condição material da generalidade das escolas do país, sobretudo nas zonas rurais. Deste modo pretende justificar a implementação de prescrições a observar nas construções de escolas alicerçadas na tríade "*bom ar, boa luz e boa temperatura*" (Silva, 1884).

Em 1898 o governo pediu à Associação dos Engenheiros Civis Portugueses a definição das linhas programáticas para um concurso público de projectos de edifícios de escolas primárias. A proposta vencedora do concurso foi a de Adães Bermudes (o seu projecto também venceu uma medalha de ouro na Exposição Mundial de Paris de 1900). Este modelo de escola veio a ser adoptado pelo Estado e ficou conhecido pelo seu nome (Figura 2.6).



Figura 2.6 – Escola Adães Bermudes (planta e escola em Alcobaça) (Beja, et al., 1990)

No que diz respeito aos edifícios liceais, somente com as reformas de Jaime Moniz, de 1894/95 e de Eduardo José Coelho, de 1905, se estabelecem as bases para a sua concepção. No contexto destas reformas foram concebidos e construídos os edifícios liceais das primeiras décadas do século XX, em Portugal, cuja concepção denota uma clara influência dos modelos franceses dos *lycées* construídos a partir da segunda metade do século XIX.

Estes modelos são reinterpretados pelos arquitectos portugueses nos edifícios liceais que projectam e que se assumem como elementos estruturantes das novas áreas de expansão das cidades de Lisboa e Porto (Alegre, 2010).

Destaca-se, em Lisboa, o Liceu Passos Manuel (1882-1911) e o Liceu Camões (1907-1909) e, no Porto, o Liceu Alexandre Herculano (1914-1927) e o Liceu Rodrigues de Freitas (1927-1933), Figura 2.7.

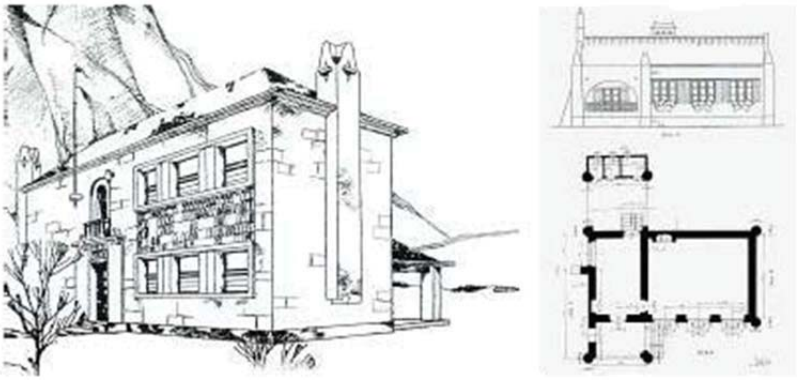


a) b)

Figura 2.7 – a) Liceu Passos Manuel, em Lisboa; b) Liceu Rodrigues de Freitas, no Porto

Durante o período da República, 1910 a 1926, a gestão do ensino português sofreu uma descentralização e ficou a cargo dos municípios, ficando o Estado com a função de elaborar as normas a que deveriam obedecer as construções escolares, segundo preocupações técnicas e higienistas, muito em voga na época. As normas aprovadas, em 1917, previam outros espaços para além das salas de aula tradicionais: salas de desenho, salas para conferências, refeitório, balneário e ginásio.

Em 1928, a construção de escolas acompanha as preocupações de racionalização de meios da gestão do ministro Duarte Pacheco e põe fim aos projectos pontuais. Duarte Pacheco cria a Junta Administrativa do Empréstimo para o Ensino Secundário (JAEES), substituída, em 1933, pela Junta das Construções para o Ensino Técnico e Secundário (JCETS) e propõe construir uma rede de escolas, uniformizadas por região, que obedecessem aos critérios pedagógicos e higienistas da época. São projectados 44 variações de 9 tipos diferentes de edifícios escolares (Figura 2.8).



a) b)

Figura 2.8 – a) Escola Primária tipo Beira-Alta, 4 salas de aula, arquitecto Rogério de Azevedo, 1935; b) Escola Primária tipo Algarve, 1 sala de aula, arquitecto Raul Lino, 1935 (Beja, et al., 1990)

Por ocasião das comemorações da fundação de Portugal (1140) e da restauração da independência, após um período de 60 anos em que Portugal fez parte da Coroa Castelhana (1640), a Ditadura anunciou um grande plano para a concretização da rede escolar, que daria lugar a projectos tipo, designado por Plano dos Centenários. Na verdade, os edifícios deste plano são uma adaptação de dois dos projectos regionais anteriores, procurando tornar

efectiva a separação por sexos: recreios divididos para “meninas” e “meninos”, entradas diferentes e salas também separadas por alas ou por pisos, segundo o seu número (Figura 2.9). Iniciado em 1944, este plano ficou muito aquém do número de edifícios inicialmente previsto, e foi sofrendo alterações sucessivas para reduzir custos.



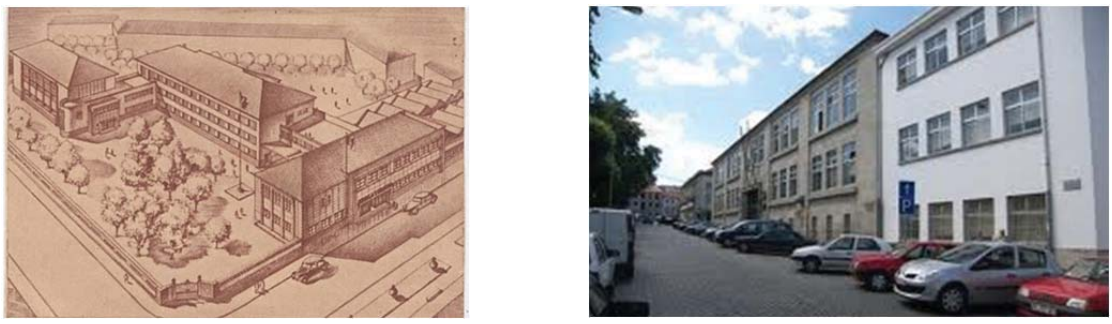
a) b)

Figura 2.9 – Escolas do Plano dos Centenários. a) Escola feminina e masculina, no Porto; b) actual Escola Básica de Treixedo, Santa Comba Dão

Durante a década de 50, houve uma aposta governamental no ensino técnico, tendo sido criadas as escolas técnicas elementares, industriais, comerciais, industriais e comerciais, práticas de agricultura, agro-industriais, de artes, decorativas, e ainda as escolas de regentes agrícolas e os institutos industriais e comerciais (Vaz, 2008).

Uma vez que eram requeridos inúmeros edifícios escolares para o ensino técnico, a JCETS desenvolveu um conjunto de estudos com vista à sistematização de soluções arquitectónicas a adoptar, facilitando, simultaneamente, a sua execução e o controlo administrativo dos seus processos de concepção e construção (Silva, 1971).

Em 1952, o projecto tipo para estes edifícios estabilizou e esteve na base da concepção das escolas destinadas ao ensino técnico durante toda a década de 50. Estes edifícios disponham de três corpos distintos destinados aos espaços lectivos e administrativos, à educação física e às oficinas (Figura 2.10).



a) b)

Figura 2.10 – a) Escola Industrial e Comercial de Peniche; b) actual Escola Secundária Emídio Navarro, em Viseu (Beja, et al., 1990)

Em 1968, e após a integração das estruturas do Ministério da Habitação e Obras Públicas na Direcção-Geral das Construções Escolares foram estudados novos planos de construção, que fossem alternativos ao projecto do Plano dos Centenários. Destes estudos resultou um programa funcional diversificado de escolas normalizadas que incluía um programa-tipo de

escola primária, um programa-tipo de liceu, um programa-tipo de escola técnica, um programa-tipo de escola preparatória e, posteriormente um programa-tipo de escola secundária. Este conceito propõe uma solução que assegura respostas diversificadas que se adaptem a diferentes contextos de inserção e condições locais. Com este objectivo são criadas duas unidades elementares, destinadas ao ensino e aos espaços colectivos que, sendo iguais em termos estruturais, se podem associar de diferentes modos, adaptando-se assim a distintas condições e originando diferentes tipologias de edifício (Figura 2.11).



a) b) c)

Figura 2.11 – Escolas da década de 70. a) Pavilhonar - Base Liceal; b) Pavilhonar - Base Técnica; c) Tipo "*Brandão*"

A partir do início da década de 80, com recurso a sistemas de construção industrializada, desenvolve-se o projecto tipo designado por blocos 3x3, incorporando pré-fabricação pesada e leve. Este projecto assenta o seu princípio de concepção no módulo dimensional da sala de aula de planta quadrada com 50 m^2, desenvolvendo blocos também quadrados com a dimensão final de 22 m x 22 m, com um ou dois pisos (ou mesmo três quando a topografia o obriga), autónomos e normalizados, com ou sem galerias de ligação. Construtivamente, os pavilhões são constituídos por uma estrutura porticada pilar-viga de betão armado e lajes maciças ao nível do 1º piso e cobertura, com os pilares distribuídos por uma malha regular de 7,20 m x 7,20 m. O conhecimento acumulado adquirido relativo aos projectos tipificados é transferido para as direcções regionais que os continuam a aplicar para resolver situações de escolas novas, evoluindo para o projecto do tipo monobloco (Figura 2.12) (Alegre, 2010).



a) b)

Figura 2.12 – a) Escola tipo blocos 3x3; b) Escola tipo monobloco

Resumindo, podem agrupar-se as escolas secundárias portuguesas em três períodos distintos, em função do seu ano de construção: até 1935 onde se englobam os edifícios históricos, de 1936 a 1969 com os edifícios do tipo liceu e do tipo escola técnica e a partir de 1970 com os

projectos do tipo pavilhonar. A grande maioria das actuais escolas secundárias integra-se no último grupo. A Figura 2.13 ilustra, exemplificando, esta distribuição das escolas.

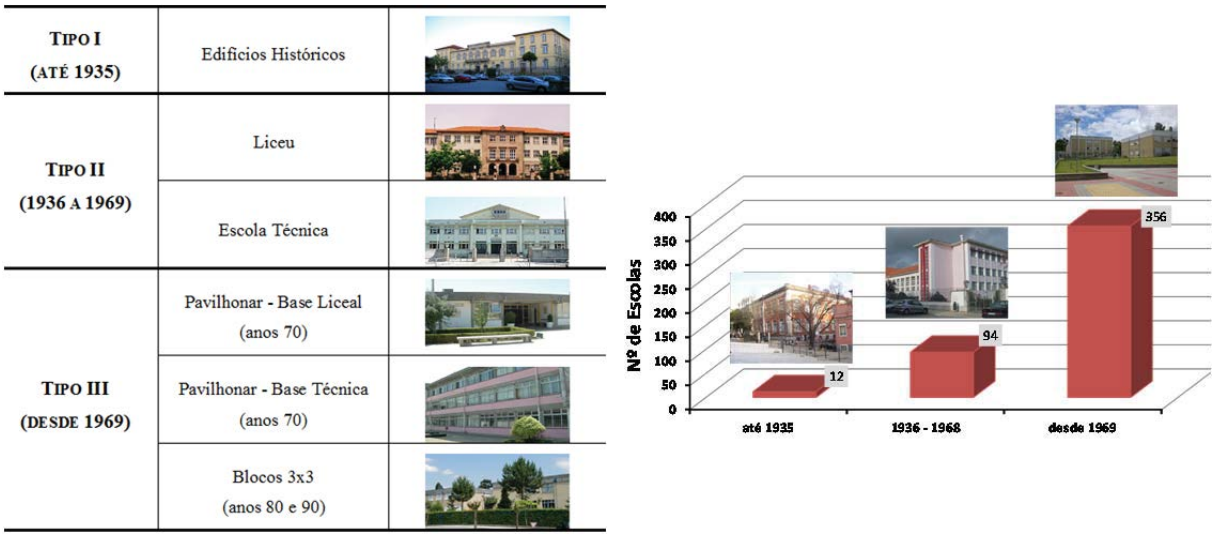


Figura 2.13 – Distribuição das escolas secundárias

Também os edifícios que actualmente recebem as escolas básicas do 2º e 3º ciclo podem ser caracterizados e agrupados de acordo com a sua tipologia e período de construção. A Figura 2.14 mostra essa divisão.



Figura 2.14 – Distribuição das escolas básicas do 2º e 3º ciclo

2.1.2.2 Programas de reabilitação

Em Portugal a questão da reabilitação dos edifícios escolares apresenta-se como um investimento estratégico, consubstanciado no Programa de Modernização do Parque Escolar Destinado ao Ensino Secundário (Resolução do Conselho de Ministros, 2007), que visa, entre outros objectivos, assegurar um desempenho higrotérmico adequado, a eficiência energética e a QAI dos edifícios, respeitando os DL nº 78/2006, 79/2006 e 80/2006 (SCE – Sistema de Certificação Energética, 2006; RSECE - Regulamento dos Sistemas Energéticos de

Climatização nos Edifícios, 2006; RCCTE - Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios, 2006).

Este programa visa, no essencial, cumprir três objectivos fundamentais (Parque Escolar, 2009):

— Requalificar e modernizar os edifícios em que estão instaladas as escolas com ensino secundário, repondo a eficiência física e funcional dos mesmos, potenciando uma cultura de aprendizagem, divulgação do conhecimento e aquisição de competências, através de intervenções que permitam corrigir problemas construtivos existentes, melhorar as condições de habitabilidade e de conforto ambiental, com particular ênfase na higrotérmica, acústica, qualidade do ar, segurança e acessibilidade e garantir a eficiência energética dos edifícios de modo a reduzir os custos de operação;

— Abrir a escola à comunidade, recentrando-a nos meios urbanos em que se inserem, criando condições espaço funcionais e de segurança, para que nos horários pós ou extra-escolares, os edifícios possam ser utilizados pela comunidade no âmbito das actividades associadas à formação contínua, aos eventos culturais e sociais, ao desporto e ao lazer;

— Criar um sistema eficiente e eficaz de gestão dos edifícios, garantindo, para além da operação de requalificação e modernização, três condições: uma resposta eficaz e eficiente às intervenções pontuais de reparação ou às intervenções programadas de conservação e manutenção, fomentar a correcta utilização das instalações e dos equipamentos, formando, acompanhando e responsabilizando os utilizadores e garantir a plena utilização das instalações.

Tendo em conta a grandeza da intervenção e a necessidade de existir uma entidade a supervisionar o processo foi criada a empresa Parque Escolar, E.P.E., responsável pelo planeamento, administração, desenvolvimento e execução do programa de modernização das escolas secundárias.

Face à necessária gestão dos recursos disponíveis o programa foi faseado em quatro períodos, a fase piloto onde foram intervencionadas 4 escolas e três fases mais alargadas que iniciaram em 2009 e decorrerão até 2015.

Um total de 332 escolas serão reabilitadas até ao final do ano lectivo 2014/2015, das quais 205 até ao final do ano lectivo 2010/2011. O investimento total, por escola, ronda os 10 milhões de euros. No conjunto das intervenções prevê-se que 70% corresponda a requalificação e 30% a construção nova.

A Figura 2.15 apresenta a estratégia utilizada na intervenção da Parque Escolar, nas primeiras 205 escolas, em termos de faseamento e sua relação com a divisão dos edifícios pelos períodos de construção indicados em §2.1.2.1. O grande enfoque do programa de reabilitação é nas escolas mais antigas ficando ainda um número significativo de edifícios para intervencionar no futuro.

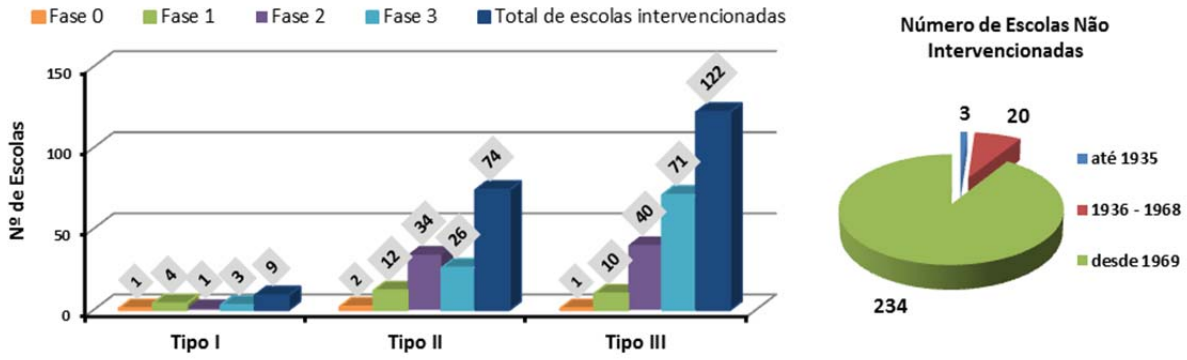


Figura 2.15 – Estratégia da intervenção da Parque Escolar

Portanto, a questão da reabilitação dos edifícios escolares não se esgota com este programa de modernização pois, não só este não abrange todas as escolas secundárias (Figura 2.15), como também os outros edifícios escolares apresentam problemas e anomalias que põem em causa o seu correcto funcionamento. Assim, a grande maioria das escolas que irão necessitar de reabilitação, a curto prazo, são as secundárias não englobadas neste programa e as escolas básicas do 1º, 2º e 3º ciclo.

Segundo dados do Ministério da Educação (2010), existem actualmente, em Portugal, 9226 estabelecimentos de ensino, tendo a grande maioria destes edifícios menos de 40 anos. Portanto os edifícios a intervencionar serão, essencialmente, do tipo pavilhonar, blocos 3x3 e monobloco.

2.1.3 Outros exemplos

A reabilitação dos edifícios escolares e sua adequação às exigências actuais não é uma preocupação exclusiva portuguesa. A comunidade científica internacional tem acompanhado estas preocupações e existem hoje inúmeros estudos e publicações com o intuito de apoiar as intervenções de reabilitação. Outros países têm, também, demonstrado interesse nesta temática e vários têm em marcha programas de reabilitação de âmbito nacional. Destacam-se os seguintes:

- *EnergySmart Schools*

Os Estados Unidos da América (EUA) lançaram, em 2008, um programa de carácter nacional com o grande objectivo de tornar as suas escolas “mais verdes”. Desde então estão a ser investidos 60 mil milhões de dólares na construção e/ou reabilitação de edifícios escolares para melhorar o seu desempenho energético. Pretende-se uma redução de 30% na factura energética das escolas, no espaço de três anos e, os resultados obtidos em alguns projectos entretanto concluídos, indicam que este valor pode mesmo ser ultrapassado em escolas com ventilação natural.

Para apoiar tecnicamente este programa foi lançado pela ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (2008) um guia com recomendações exigênciais para os elementos construtivos da envolvente dos edifícios e para os sistemas de

climatização e ventilação a adoptar. Este documento estratégico define procedimentos e metodologias para, em função da zona climática, ser possível atingir o objectivo de redução da factura energética.

O problema da eficiência energética nos edifícios escolares não é a única preocupação, a Agência de Protecção Ambiental dos Estados Unidos, EPA (2011), publicou um conjunto de directivas relacionadas com a QAI nas escolas, intitulado *IAQ Design Tools for Schools* para, desta forma, incluir estas questões na fase de projecto das novas escolas, alertando para a necessidade de uma abordagem multidisciplinar pois estão em causa vários objectivos, muitas vezes conflituosos entre si, requerendo uma visão global das várias especialidades desde a fase de concepção.

- *Building Schools for the Future*

Em 2004 o governo do Reino Unido lançou um programa de reabilitação dos edifícios escolares em Inglaterra. A ideia era num período de 15 a 20 anos intervir em todas as escolas secundárias, começando naquelas que apresentaram um pior resultado numa avaliação prévia das suas condições que decorreu em 2004 e 2005, estimando-se um investimento de 2,5 mil milhões de libras por ano. A responsabilidade de gestão das intervenções foi transferida para o poder local que deveria financiar-se através de parcerias público-privadas.

Em Julho de 2010 o programa foi cancelado devido à crise económica e à dificuldade de acesso ao crédito e, consequentemente, de angariar os recursos financeiros necessários para a conclusão dos projectos. Até essa data foram intervencionadas 185 escolas.

A grandeza da intervenção e as especificidades associadas a estes edifícios levou à publicação de um conjunto de normas e regulamentos exclusivos para aplicação em edifícios escolares (Building Bulletin 87, 2003). Estas normas elencam as exigências requeridas às novas escolas no que se refere ao desempenho higrotérmico, à ventilação, à iluminação e à acústica das salas de aula.

- *Annex 36 - Retrofitting of Educational Buildings – REDUCE*

Os edifícios públicos por norma apresentam consumos energéticos mais elevados e uma vez que o seu processo construtivo, bem como as tecnologias aplicadas, apresentam algumas semelhanças em diferentes países, a experiência obtida na reabilitação de um determinado edifício pode ser transferida para um projecto afim, a desenvolver noutro local. No caso particular dos edifícios escolares a sua tipologia é muitas vezes similar e o seu nível de consumo energético é de tal forma elevado que a necessidade de uma intervenção de reabilitação nesta área é, em muitas situações, urgente. No entanto, verifica-se que não raras vezes na reabilitação de edifícios escolares foi negligenciada a componente da eficiência energética. Uma razão importante apresentada para justificar este problema é a falta de conhecimento por parte dos decisores sobre as mais-valias económicas que daí podem advir em termos de redução da factura energética do edifício (Mroz & Erhorn, 2003).

Foram estes os pressupostos que estiveram na base da criação, pela IEA, em 2003, de um grupo de trabalho, Anexo 36 - *Retrofitting of Educational Buildings*, para estudar o impacto

económico de diferentes estratégias utilizadas na reabilitação de edifícios escolares. Desta investigação resultou uma aplicação informática, o *Energy Concept Adviser* (ECA), que oferece uma série de ferramentas de apoio aos decisores para as diversas fases que atravessa uma intervenção de reabilitação de um edifício escolar (Schmidt, et al., 2004).

Um total de 10 países, dos quais 9 europeus, participaram neste grupo de trabalho. Estes números demonstram a preocupação existente com os edifícios escolares, o seu desempenho em termos de qualidade do ambiente interior e como os tornar energeticamente mais eficientes.

2.2 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO HIGROTÉRMICO

2.2.1 Qualidade do Ambiente Interior

2.2.1.1 Enquadramento

A procura de um ambiente seguro e confortável tem sido, desde sempre, uma das principais preocupações da humanidade. Em tempos antigos as pessoas utilizaram a experiência que foram adquirindo ao longo dos anos para, fazendo o melhor uso dos recursos disponíveis, alcançar condições de vida adequadas. O escritor grego Xenofonte, nas suas memórias, refere alguns dos ensinamentos do filósofo grego Sócrates (470-399 a.C.) sobre a orientação correcta das habitações, a fim de ter casas frescas no Verão e quentes no Inverno. No século 1º antes de Cristo, pela primeira vez foi concebida, pelos romanos, uma técnica de aquecimento central utilizando pisos duplos com uma cavidade onde passava o ar quente proveniente de uma lareira (Florides, et al., 2002). Também na mesma época os romanos cobriram pela primeira vez os desvãos das janelas com materiais como mica ou vidro admitindo, assim, a entrada da luz na casa, protegendo-a do vento e da chuva. Na Pérsia, por outro lado, utilizou-se o vento predominante para aproveitar o ar fresco da noite e proporcionar um ambiente mais fresco durante o dia (Kreider & Rabl, 1994).

A qualidade do ambiente interior é fundamental para a saúde, o conforto e o desempenho das populações uma vez que, nas zonas desenvolvidas do planeta, estas passam 85 a 95% do seu tempo dentro dos edifícios (Wargocki, 2009). Assim, nas últimas décadas os níveis de ocupação dos edifícios, a própria construção (menor permeabilidade ao ar das envolventes, utilização de sistemas de aquecimento e ar-condicionado) e as exigências dos utilizadores alteraram-se, levando a um crescente interesse na temática da qualidade do ambiente interior (Amaral, 2008). Além disso, os factores ambientais interiores afectam significativamente o consumo energético de um edifício e, por essa razão, a sua avaliação e quantificação em projecto tem sido bastante discutida.

O conceito de qualidade do ambiente interior é muito abrangente e depende de inúmeras variáveis tais como: temperatura, humidade relativa, velocidade do ar, caudal de ar novo, tipo de ocupação, concentração de poluentes, nível de ruído, iluminação, etc.. Estas podem ser

agrupadas em quatro grandes áreas que definem a qualidade do ambiente interior de um espaço, a saber:

— Conforto térmico;

— Qualidade do ar interior;

— Conforto acústico;

— Conforto visual.

A sua avaliação depende de inúmeros factores que podem ser subdivididos em quatro categorias: condições exteriores, edifício, serviços no edifício e actividades humanas (REHVA, 2010). A Figura 2.16 ilustra de forma esquemática as variáveis e os factores que interferem na qualidade do ambiente interior.

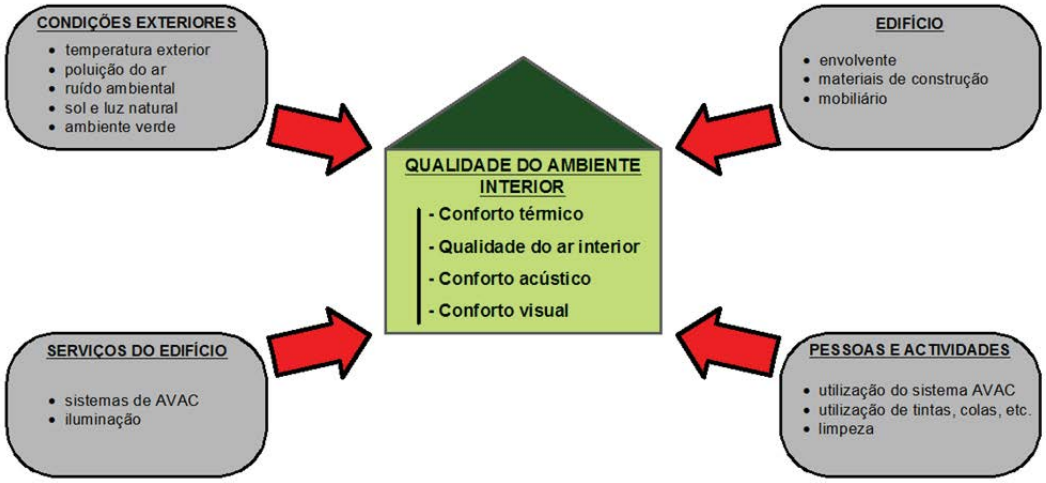


Figura 2.16 – Variáveis e factores que influenciam a qualidade do ambiente interior (adaptado de REHVA, 2010)

No âmbito dos objectivos a que esta Tese se propõe, no presente capítulo, só serão abordadas as duas primeiras variáveis.

2.2.1.2 Conforto térmico

A definição clássica de conforto térmico é a apresentada por Fanger (1970) que o descreve como sendo “o estado de espírito em que o indivíduo expressa satisfação com o ambiente térmico”.

De acordo com Matias, et al. (2006) essa satisfação relativamente ao ambiente térmico depende, além dos factores físicos que determinam as trocas de calor entre o corpo humano e o meio ambiente em que este se encontra (balanço térmico), de outros factores de carácter social, cultural e psicológico que se relacionam com as diferenças na percepção e na resposta a estímulos sensoriais, fruto de experiências passadas e da expectativa dos utentes dos espaços.

A avaliação do conforto térmico em ambientes interiores tem sido objecto de vários estudos e investigações com o intuito de melhor compreender as variáveis que envolve, como pode ser atingido, qual o seu impacto em termos de saúde e produtividade dos ocupantes e como pode ser quantificado.

Segundo Chatelet, et al. (1998) num edifício passivo, sem sistemas de aquecimento ou arrefecimento, o ambiente interior deve ser pelo menos tão confortável como o ambiente exterior. Esta ideia está traduzida na Figura 2.17, referente a edifícios de habitação. A zona de conforto é maior no Verão do que no Inverno, uma vez que as exigências e necessidades das pessoas variam devido às alterações no seu vestuário.

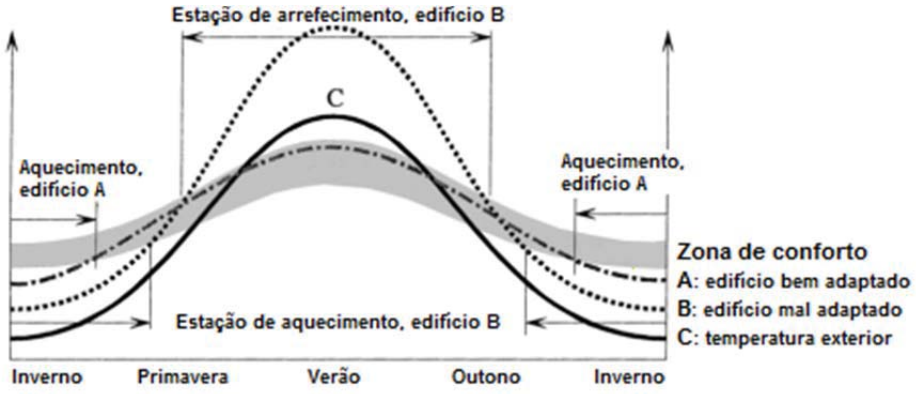


Figura 2.17 – Variação anual da temperatura num edifício passivo (adaptado de Roulet, 2001)

Os edifícios mal adaptados só conseguirão garantir condições de conforto adequadas aos seus ocupantes através de consumos elevados de energia, uma vez que terão de recorrer a sistemas de climatização, para aquecimento no Inverno e arrefecimento no Verão (de Dear & Bragger, 1998).

- *Trocas de calor, mecanismos termo-reguladores e balanço térmico*

O homem é um ser homeotérmico, ou seja, a temperatura interna do organismo tende a permanecer constante independentemente das condições climáticas. Para garantir esta condição o organismo recorre ao oxigénio para, através do processo de metabolismo, produzir calor interno. Este fenómeno ocorre através da queima das calorias existentes no organismo, com a utilização do oxigénio, transformando-as em energia. Gera-se desta forma o calor interno do corpo humano (Lamberts, et al., 1997). Esta energia produzida deve ser dissipada para permitir o equilíbrio e, consequentemente, garantir o correcto funcionamento do organismo. Ou seja, para uma pessoa poder estar confortável, é necessário que, pelo menos, o corpo esteja em equilíbrio térmico, isto é, que a energia produzida seja igual às perdas.

Havendo desequilíbrio entre ganhos e perdas de calor, pode ocorrer uma tendência para o aumento ou diminuição da temperatura interna do organismo, aproximadamente 36±1 ºC, podendo causar danos à saúde e, em casos extremos, até mesmo a morte. Por este motivo existem mecanismos com a finalidade de manter a temperatura interna aproximadamente constante, designados termo-reguladores, e que são activados quando as condições térmicas do meio exterior ultrapassam determinados limites.

O centro de regulação da temperatura no corpo humano é o hipotálamo, localizado no cérebro, que tem um funcionamento semelhante a um termóstato. A temperatura interna pode variar ligeiramente em função das condições fisiológicas e dos sinais que o hipotálamo recebe a partir do sistema nervoso. Assim, em ambientes frios a temperatura interna pode descer e as perdas de calor do corpo humano diminuírem por efeito de vasoconstrição e/ou arrepios. Por outro lado, em ambientes quentes a temperatura interna pode subir e as perdas de calor aumentarem através da vasodilatação e/ou suor (Astrand & Rodahl, 1986).

As trocas de calor entre o corpo humano e o meio ambiente que o envolve ocorrem através da transferência de calor do corpo mais quente para o mais frio até se estabelecer a igualdade de temperaturas. Esta transferência traduz a transmissão de energia entre os dois sistemas, potenciada pela diferença de temperatura existente entre eles (Hens, 2007). Ela pode ocorrer dos seguintes modos:

— Condução: transferência de calor por contacto directo de partes do corpo com elementos da envolvente;

— Convecção: transferência de calor através de fluidos em movimento (movimento do ar sobre o corpo);

— Radiação: transferência de calor sob a forma de ondas electromagnéticas entre a pele e o ambiente circundante devido à diferença de temperatura entre os dois;

— Respiração: transferência de calor devido à diferença de temperatura entre o ar inspirado e o expirado;

— Evaporação: transferência de calor para o meio ambiente devido à evaporação de água à superfície da pele.

Um ser humano em repouso produz, aproximadamente, 100 W de calor. Se o vestuário e as condições ambientais forem adequados, a perda de calor para o exterior é equivalente, logo, existe equilíbrio energético e a pessoa sente-se termicamente neutra.

Com o aumento da temperatura no exterior as trocas de calor por condução, convecção e radiação diminuem e a evaporação tem de compensar este fenómeno de modo a garantir o equilíbrio térmico. No entanto, a evaporação, devido ao suor, está associada a um aumento da temperatura e provoca uma sensação de desconforto.

Com a diminuição da temperatura as trocas por condução, convecção e radiação aumentam, fazendo com que as perdas energéticas totais sejam superiores ao valor de equilíbrio. A resposta fisiológica a esta condição consiste na redução da circulação sanguínea para, deste modo, diminuir o gradiente de temperatura com o exterior. Nestas condições o ser humano sente frio e desconforto e uma das respostas é alterar o vestuário.

Portanto, para se garantir condições de conforto térmico as transferências de calor devem manter-se dentro de um intervalo relativamente estreito (Nilsson, 2004).

Como foi referido os mecanismos termo-reguladores do corpo humano têm como função manter a temperatura interna aproximadamente constante, obrigando a existir um equilíbrio entre o calor gerado internamente e as transferências para o meio ambiente (Figura 2.18).

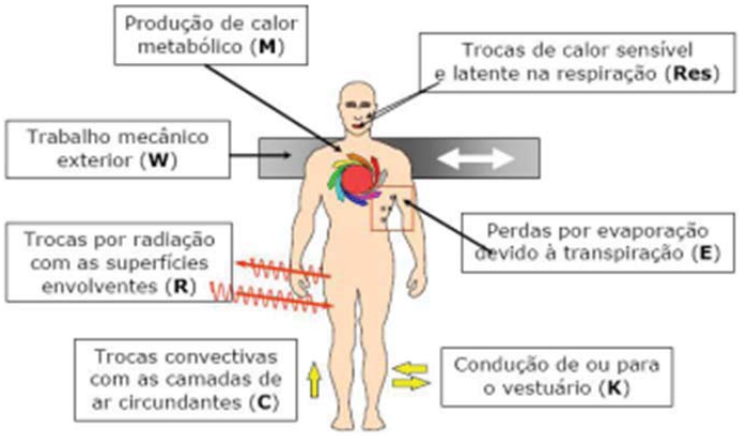


Figura 2.18 – Balanço térmico do corpo humano (Silva, 2006)

Este equilíbrio é traduzido pela equação de balanço térmico para o corpo humano:

$$S = M \pm W \pm R \pm C \pm K - E \pm Res \tag{2.1}$$

Quando existe equilíbrio térmico o valor de S é nulo uma vez que corresponde à acumulação total de calor no corpo humano.

- *Factores que influenciam o conforto térmico*

Segundo Fanger (1970), a sensação de conforto térmico do ser humano em relação ao meio ambiente que o envolve depende essencialmente de seis factores, dois individuais e quatro ambientais:

— Factores individuais: a actividade física do indivíduo (actividade metabólica, M [met]) e o seu vestuário (resistência térmica do vestuário, I_{CL} [clo]);

— Factores ambientais: a temperatura do ar, T_a [ºC], a temperatura média radiante, T_{mr} [ºC], a velocidade relativa do ar, v_{ar} [m/s] e a pressão parcial do vapor de água, p_a [Pa].

Estes factores são determinantes para condições de equilíbrio em regime estacionário. No entanto, além destes, outros de carácter mais subjectivo (parâmetros psicossociais) condicionam também de forma significativa a percepção de conforto térmico experimentada por um indivíduo num dado ambiente (Matias, 2010).

A actividade metabólica é o processo fisiológico através do qual o ser humano produz energia a partir de elementos orgânicos (processo de metabolismo). O total da energia produzida é dividido em energia potencial de trabalho e calor interno. Quanto maior a actividade física do ser humano maior será a produção metabólica e consequentemente a produção interna de calor.

Em termos de conforto térmico a actividade metabólica é habitualmente expressa pelo calor produzido por unidade de superfície corporal. A unidade utilizada é o *met*, em que 1 met corresponde à situação de repouso, acordado, e vale 58,2 W/m^2. Este valor é baseado num adulto europeu médio, do sexo masculino, com uma superfície corporal de 1,8 m^2 (a título de comparação um adulto europeu médio, do sexo feminino, tem uma superfície corporal de 1,6 m^2) (ASHRAE, 2009).

O valor da produção calorífica do corpo humano depende do tipo de actividade desenvolvida e pode ser obtido nas normas ISO 7730 (ISO, 2005) e ASHRAE 55 (ASHRAE, 2010). Os valores aí apresentados resultam de ensaios experimentais e devem ser interpretados como médias, uma vez que existem variações em função de diversos factores, nomeadamente a idade, o peso e o sexo.

O ser humano, através da pele, troca calor com o vestuário que por sua vez troca calor com o meio ambiente. Estas trocas dependem do valor da resistência térmica do vestuário. Assim, quanto maior a resistência térmica menores serão as trocas de calor. O vestuário também tem o efeito de reduzir a sensibilidade do organismo à velocidade do ar e às variações de temperatura.

A resistência térmica do vestuário depende de alguns parâmetros nomeadamente do tipo de tecido, da fibra e do ajuste ao corpo e expressa-se pela unidade *clo*, em que 1 clo (resistência térmica de um homem de fato) corresponde a 0,155 (m^2.ºC)/W. Valores da resistência térmica de peças de vestuário típicas podem ser obtidos nas normas ISO 7730 (ISO, 2005) e ASHRAE 55 (ASHRAE, 2010). Para a determinação da resistência térmica do vestuário com uma combinação de roupas o valor da soma das resistências térmicas individuais deve ser multiplicado por 0,82, factor que traduz o efeito das sobreposições das diferentes peças de roupa. Salienta-se que os valores tabelados são médias, devendo ser utilizados com algum cuidado e rigor.

A temperatura do ar é a variável mais importante na definição do conforto térmico. A sensação de conforto térmico baseia-se nas trocas de calor do organismo com o meio ambiente, devido ao gradiente térmico entre os dois, complementada pelos mecanismos termo-reguladores (Lamberts, 2005).

Numa visão simples do conforto térmico este é por vezes definido apenas em termos de temperatura do ar. No RCCTE (2006), são estabelecidas as condições de conforto de referência baseadas na temperatura do ar, 20 ºC e 25 ºC, respectivamente, para as estações de aquecimento (Inverno) e arrefecimento (Verão).

A temperatura média radiante é, por definição, a temperatura uniforme superficial de um espaço imaginário negro no qual um ocupante troca a mesma quantidade de calor por radiação com o meio que no espaço real não uniforme (ASHRAE, 2010). Pode ser definida como a média pesada das temperaturas das superfícies envolventes do espaço onde se encontram as pessoas e inclui o efeito da radiação solar incidente (Almeida & Silva, 2007).

Em termos matemáticos, o cálculo exacto deste parâmetro não é simples visto que, além de serem necessários os valores da temperatura, emissividade e área de todas as superfícies que constituem o espaço em análise, é preciso determinar o factor de forma entre o indivíduo e cada superfície. A quantificação do efeito da exposição directa à radiação solar torna esse cálculo ainda mais complexo (Matias, 2010).

Desta forma, é geralmente utilizada uma estimativa para a determinação da temperatura média radiante, sendo que, na prática, é habitualmente medida através de um termómetro de bolbo negro.

A velocidade do ar é considerada como a norma do vector velocidade do fluxo de ar no ponto de medição. Deve ser levada em consideração na análise do conforto térmico de ambientes fechados devido à sua participação directa nos fenómenos de trocas de calor do organismo com o ambiente por convecção e por evaporação.

A velocidade do ar em ambientes interiores, habitualmente inferior a 1 m/s, ocorre sem intervenção directa do vento. O ar desloca-se pela diferença de temperatura no meio ambiente, onde o ar quente sobe e o ar frio desce (convecção natural). Quando o movimento do ar é forçado, por exemplo com uma ventoinha, o coeficiente de convecção aumenta provocando um aumento das perdas de calor (convecção forçada). A velocidade do ar também tem efeito nas perdas de calor por evaporação retirando a água resultante da transpiração da superfície da pele com mais eficiência, reduzindo a sensação de calor (Lamberts, 2005).

A pressão parcial do vapor de água está directamente relacionada com a humidade relativa e corresponde à pressão que o vapor de água poderia exercer se ocupasse sozinho todo o volume ocupado pelo ar húmido à mesma temperatura. Este vapor forma-se pela evaporação da água. O ar, a certa temperatura, só pode conter uma determinada quantidade máxima de vapor de água, para a qual o ar está saturado, e a partir deste valor ocorre o fenómeno de condensação (o vapor excedente passa para o estado líquido) provocando um aumento da temperatura da superfície onde ocorre. Este processo origina uma transferência de calor entre um corpo que perde calor por evaporação que será ganho por outro onde ocorre a condensação.

A pressão parcial do vapor de água e a velocidade do ar intervêm nas trocas de calor por evaporação. Uma vez que aproximadamente 25% da energia térmica gerada pelo organismo é eliminada por calor latente (10% por respiração e 15% por transpiração) é importante que as condições ambientais favoreçam essas perdas. À medida que a temperatura do ar aumenta, as perdas por convecção e radiação são menores e o organismo tem de compensar através do aumento da evaporação. Quanto maior a humidade relativa menor será a eficiência da evaporação, sendo, portanto, necessária uma ventilação adequada para controlar a quantidade de vapor de água existente no ar.

- *Critérios para o estabelecimento de condições de conforto térmico*

De longa data se tem procurado estabelecer, para diferentes tipos de edifícios, o conjunto de combinações dos factores ambientais que conduzem a condições de conforto. Assim, têm sido

realizadas várias tentativas de quantificar num único parâmetro, índice termo-higrométrico, o ambiente interno de um espaço que, simultaneamente, permita a delimitação, numa escala desse parâmetro, dos valores correspondentes às condições de conforto admissíveis (Rodrigues, et al., 2009).

De forma geral, estes índices são desenvolvidos fixando o tipo de actividade e vestuário de um indivíduo para, a partir daí, relacionar os factores ambientais e reunir, sob a forma de cartas ou nomogramas, as diversas condições ambientais que proporcionam respostas iguais por parte dos indivíduos (Figura 2.19).

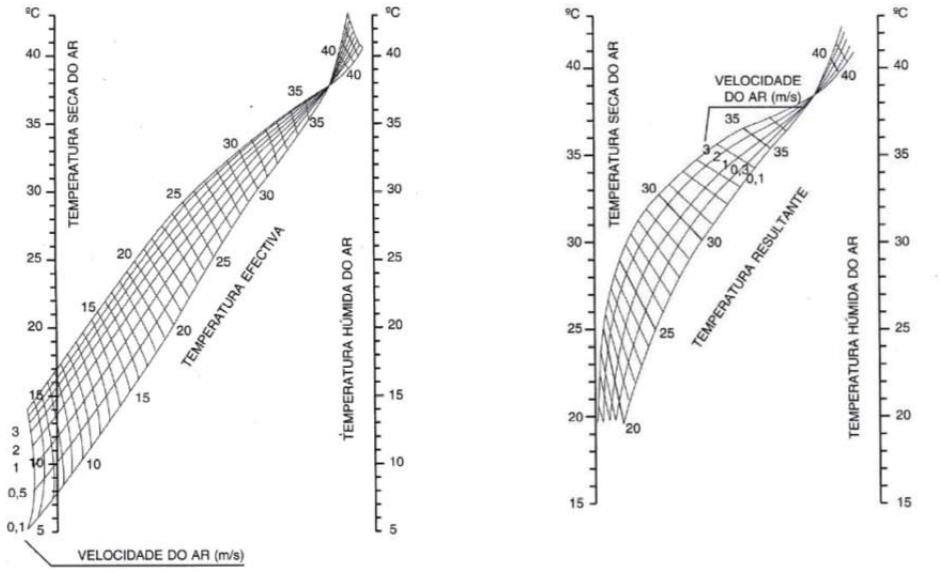


Figura 2.19 – Nomogramas para vestuário corrente e actividade leve (Piedade et al., 2000)

O conceito de conforto térmico é extremamente complexo pela sua natureza subjectiva, sendo fundamental que se complemente uma análise objectiva dos espaços interiores, em termos das condições de conforto que podem proporcionar, com o estudo do que significa "estar confortável" para cada indivíduo ou grupo de indivíduos que ocupam esses mesmos espaços.

Nesse sentido, a definição de padrões de conforto térmico, através da avaliação das opiniões que as pessoas têm acerca do ambiente envolvente, é possível recorrendo ao inquérito por questionário. As perguntas aí formuladas, mediante a utilização de escalas subjectivas, permitem avaliar a percepção térmica que os inquiridos têm em relação ao ambiente térmico do espaço em que se encontram (Matias, 2010).

Nos anos 70, baseada nos estudos de Fanger (1970), a ASHRAE apresentou uma escala de sete níveis para avaliação do conforto térmico (Tabela 2.1). Esta escala generalizou-se e tornou-se dominante nos estudos de conforto térmico, sendo adoptada nas normas ISO 7730 (ISO, 2005) e ASHRAE 55 (ASHRAE, 2010).

Tabela 2.1 – Escala de conforto térmico (adaptado de ISO, 2005 e ASHRAE, 2010)

+3	Muito Quente	*Desconfortável devido ao calor*
+2	Quente	
+1	Ligeiramente quente	*Satisfeito*
0	Neutro / Confortável	
-1	Ligeiramente Frio	
-2	Frio	*Desconfortável devido ao frio*
-3	Muito Frio	

Procurando definir e quantificar o conforto térmico através de um único parâmetro, Fanger (1970), derivou uma equação geral de conforto que tenta incluir o efeito dos factores ambientais e individuais. Ele propôs um método para calcular o voto médio de um grupo de pessoas de diferentes nacionalidades, idades e sexos, a partir dos parâmetros higrotérmicos (temperatura, velocidade do ar e pressão parcial do vapor de água), da resistência térmica da roupa e da actividade metabólica, a que designou *Predicted Mean Vote* (PMV), ou voto médio previsível. O PMV resultou da análise estatística dos resultados obtidos em numerosos ensaios (mais de 1300) desenvolvidos em condições ambientais controladas e consiste num valor numérico que traduz a sensibilidade humana ao frio e ao calor de acordo com a escala apresentada na Tabela 2.1.

A equação de conforto de Fanger é bastante complexa e permite uma série de combinações dos factores individuais e ambientais que a satisfazem (situações de conforto térmico). Desta forma, é habitual apresentá-las sob a forma de diagramas de conforto (Figura 2.20).

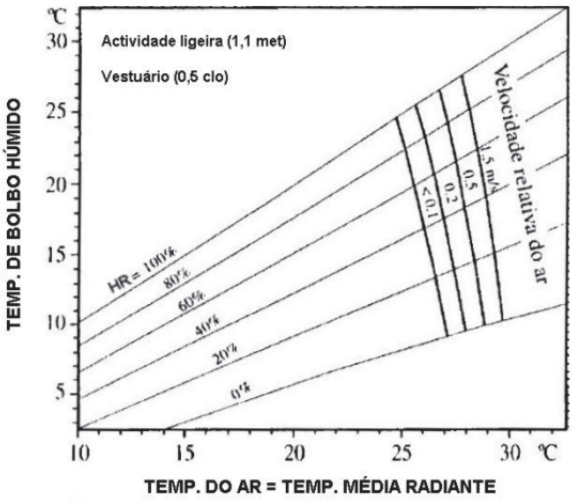


Figura 2.20 – Exemplo de um diagrama de conforto de Fanger (Matias, 2010)

O índice PMV pode ser utilizado para a verificação do conforto térmico de um determinado espaço físico e/ou para estabelecer critérios mínimos admissíveis para diferentes níveis de conforto pretendidos. Este índice foi determinado para condições de regime estacionário, no entanto pode ser utilizado como boa aproximação quando uma ou mais variáveis sofrem

pequenas variações temporais, sendo nestes casos utilizada uma média ponderada dos seus valores no período de 1 hora anterior.

No mesmo trabalho, Fanger (1970), sugere que a percentagem de pessoas que se consideram desconfortáveis (sentindo frio ou calor) está relacionada com o seu voto médio, definindo, assim, um segundo índice designado por *Predicted Percentage Dissatisfied* (PPD). A relação entre os dois índices é a seguinte:

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{\left(-0{,}03353 \cdot PMV^4 - 0{,}2179 \cdot PMV^2\right)} \tag{2.2}$$

O índice PPD estabelece uma previsão quantitativa da percentagem de pessoas que consideram um determinado ambiente desconfortável. Salienta-se que os índices PMV e PPD exprimem sensações térmicas de desconforto em relação à totalidade do corpo. A representação gráfica da relação entre os dois índices encontra-se na Figura 2.21.

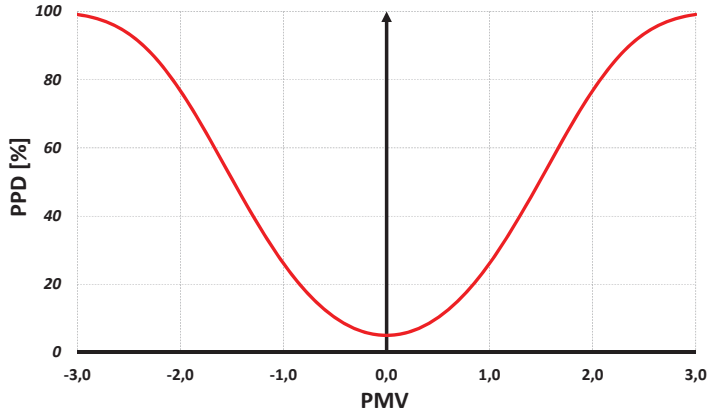


Figura 2.21 – Relação entre os índices PMV e PPD (adaptado de ISO, 2005)

De acordo com este modelo é impossível que num dado instante, num determinado espaço, todas as pessoas presentes se sintam confortáveis. Mesmo para a condição de conforto térmico, em que o voto médio corresponde a uma sensação de neutro/confortável, a que corresponde um índice PMV de 0, existem 5% de pessoas desconfortáveis.

Os índices PMV e PPD têm uma utilização generalizada e são apresentados em diversas publicações como os valores de referência para garantir condições de conforto térmico em espaços interiores. A norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2010) refere que a condição a cumprir para garantir condições de conforto térmico é:

$$-0{,}5 < PMV < +0{,}5$$

a que corresponde uma percentagem previsível de insatisfeitos, índice PPD, inferior a 10%.

Esta condição também aparece na norma ISO 7730 (ISO, 2005), correspondendo na classificação desta à categoria B. A norma referida propõe que os ambientes térmicos interiores sejam classificados em categorias: A, B e C. Esta abordagem considera que as condições de conforto térmico interior não têm necessariamente de ser as mesmas em todos os

espaços, uma vez que as condições locais, nacionais ou técnicas poderão sugerir a adopção de valores diferenciados. Os valores propostos pela norma estão indicados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Categorias de ambiente térmico global (adaptado de ISO, 2005)

Categoria	Estado térmico global do corpo	
	PPD [%]	PMV
A	<6	-0,2 < PMV < +0,2
B	<10	-0,5 < PMV < +0,5
C	<15	-0,7 < PMV < +0,7

Uma outra forma de avaliar o conforto térmico recorre ao conceito de temperatura operativa, T_{op} [ºC]. A temperatura operativa combina a influência de alguns dos factores anteriores, nomeadamente a temperatura do ar, a temperatura média radiante e a velocidade relativa do ar. Numericamente pode ser determinada através da seguinte expressão:

$$T_{op} = A \cdot T_a + (1 - A) \cdot T_{mr} \tag{2.3}$$

em que

T_{op}	[ºC]	Temperatura operativa
A	[-]	Parâmetro função da velocidade (Tabela 2.3)
T_a	[ºC]	Temperatura do ar
T_{mr}	[ºC]	Temperatura média radiante

Tabela 2.3 – Valores do parâmetro A (adaptado de ASHRAE, 2010)

v_{ar}	< 0,2	0,2 a 0,6	0,6 a 1,0
A	0,5	0,6	0,7

Da análise da equação (2.3) e dos valores da Tabela 2.3 conclui-se que para valores de velocidade do ar inferiores a 0,2 m/s, situação corrente em ambientes interiores, a temperatura operativa pode ser considerada como sendo a média da temperatura do ar e da temperatura média radiante.

De acordo com a norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2010) é admissível a utilização da temperatura do ar como uma aproximação para a temperatura operativa, desde que certos pressupostos sejam cumpridos.

As condicionantes em causa são as seguintes: não existirem painéis radiantes de aquecimento ou arrefecimento, factor solar dos envidraçados inferior a 0,48, não existir uma grande fonte de calor pontual no espaço e o coeficiente de transmissão térmica dos vidros e paredes obedecer à seguinte relação:

$$U_m < \frac{50}{t_{d,i} - t_{d,e}} \tag{2.4}$$

em que

U_m	[W/(m^2.ºC)]	Valor médio entre o coeficiente de transmissão térmica da janela e o da parede
$t_{d,i}$	[ºC]	Temperatura interior de dimensionamento
$t_{d,e}$	[ºC]	Temperatura exterior de dimensionamento

Na investigação desenvolvida por Matias (2010) foi realizado um conjunto significativo de estudos de campo em edifícios de serviços (ensino e escritórios) e edifícios residenciais (convencionais e lares de idosos) para avaliação das condições de conforto.

Para tal foram medidos vários parâmetros ambientais (interiores e exteriores) incluindo a temperatura do ar e a temperatura média radiante. Na Figura 2.22 apresenta-se a relação obtida entre os seus valores médios, para a totalidade dos levantamentos efectuados.

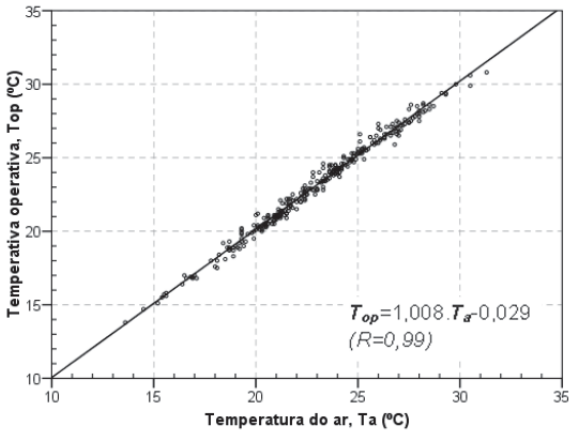


Figura 2.22 – Relação entre os valores médios das temperaturas operativa e do ar (Matias, 2010)

A relação matemática e respectivo coeficiente de correlação linear de Pearson (*R*) vêm demonstrar a forte relação de dependência linear entre os dois parâmetros, confirmando que, para casos correntes, a temperatura do ar pode ser utilizada como uma boa aproximação à temperatura operativa.

A norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2010) propõe um método gráfico (Figura 2.23) simplificado para avaliar as condições de conforto térmico, que é aplicável a ambientes com velocidades do ar inferiores a 0,2 m/s, onde as actividades dos ocupantes são sobretudo sedentárias, a que correspondem valores de actividade metabólica entre 1,0 e 1,3 met, e estes apresentam vestuário com resistência térmica compreendida entre 0,5 e 1,0 clo, a que corresponde a situação de Verão e a de Inverno, respectivamente.

As zonas indicadas correspondem a uma situação de conforto térmico para 80% dos ocupantes, resultante do efeito conjunto de 10% de insatisfeitos devido a desconforto referente ao balanço térmico do global (determinado a partir dos índices PMV-PPD) e os restantes 10% referentes a situações de desconforto térmico localizado.

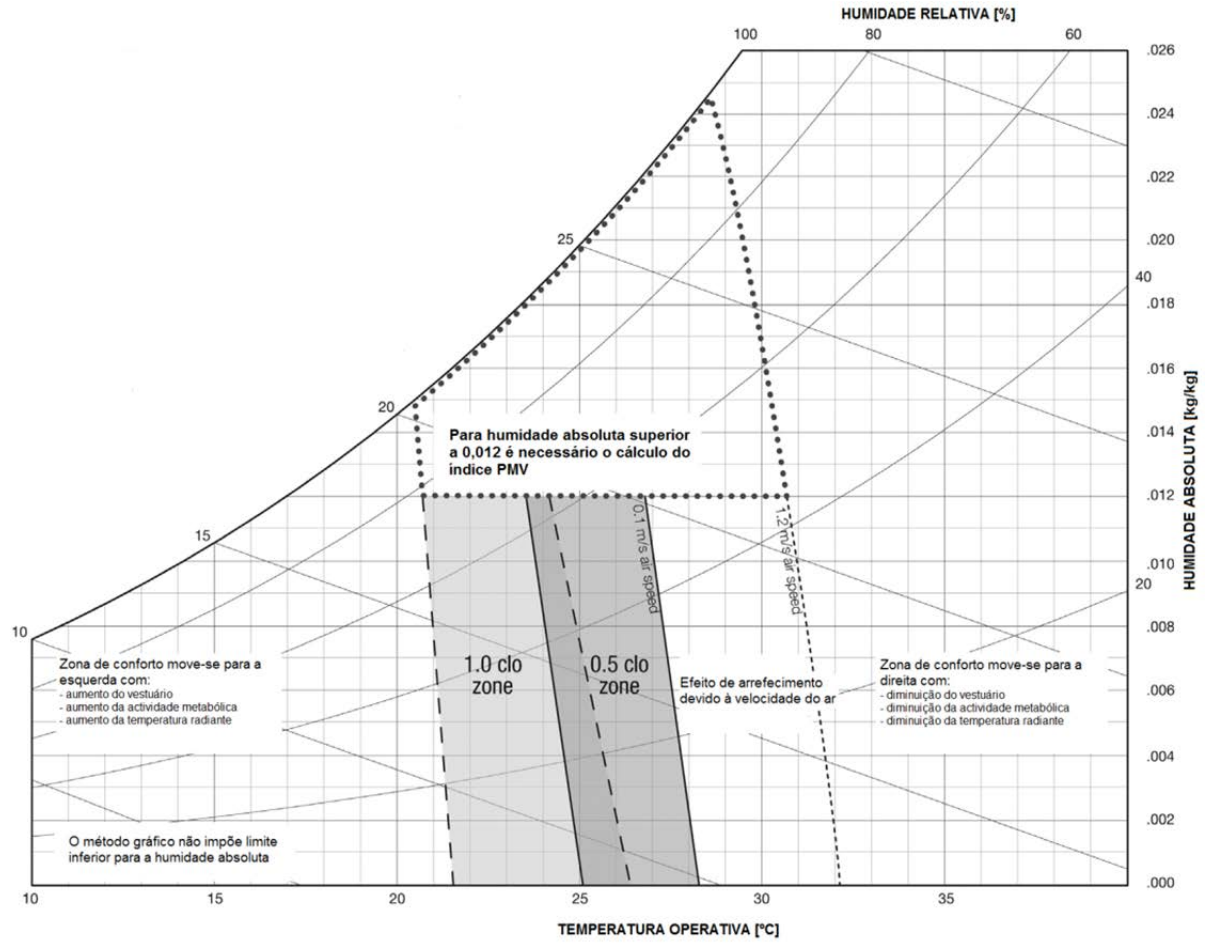


Figura 2.23 – Método gráfico de avaliação do conforto térmico em função da temperatura operativa e da humidade absoluta (adaptado de ASHRAE, 2010)

Os índices e métodos descritos anteriormente avaliam a sensação de conforto térmico da globalidade do corpo. Porém, vários factores podem causar uma sensação de desconforto localizado em indivíduos no desempenho de quaisquer actividades. Esses factores não atingem o corpo como um todo, apenas uma parte (por exemplo uma corrente de ar), e embora a pessoa possa estar satisfeita com a temperatura do corpo como um todo, não se encontrará em conforto devido a essa insatisfação localizada.

Habitualmente são consideradas quatro causas fundamentais de situações de desconforto local:

— Assimetria da temperatura radiante;

— Correntes de ar;

— Temperatura do pavimento demasiado elevada ou baixa;

— Diferenças de temperatura do ar na vertical.

A assimetria da temperatura radiante corresponde a um desconforto localizado devido à presença de uma superfície a uma temperatura diferente, fazendo com que o indivíduo esteja

sujeito a duas temperaturas distintas em lados opostos do corpo. Este fenómeno pode ter origem em janelas frias, superfícies não isoladas, entradas de fornos, calor gerado por máquinas e outras. Assim, a pessoa tem uma parte do seu corpo atingida por uma radiação diferenciada das demais e, dessa forma, quanto maior for esse diferencial mais insatisfeito com a situação ficará a pessoa. É quantificada através da percentagem de pessoas insatisfeitas.

As correntes de ar são uma forma de desconforto local que se reflecte num arrefecimento do corpo devido ao movimento do ar a uma velocidade excessivamente elevada. A sensação de corrente de ar depende da velocidade e temperatura do ar, da intensidade da turbulência, da actividade metabólica e da resistência térmica do vestuário. O desconforto devido à corrente de ar é mais sentido nas zonas do corpo que não estão protegidas pelo vestuário. O seu efeito é quantificado através da percentagem de pessoas insatisfeitas devido a correntes de ar, denominada "taxa de corrente de ar":

$$DR = (34 - T_a) \cdot (v_{ar} - 0{,}05)^{0{,}62} \cdot (0{,}37 \cdot v_{ar} \cdot T_u + 3{,}14) \tag{2.5}$$

em que

DR	[%]	Taxa de corrente de ar
T_a	[ºC]	Temperatura do ar
v_{ar}	[m/s]	Velocidade relativa do ar
T_u	[%]	Intensidade da turbulência

A intensidade da turbulência corresponde à razão entre o desvio padrão da velocidade e a velocidade média no local. A intensidade da turbulência varia habitualmente entre 10 e 60% e quando não for medida pode ser considerada igual a 40%. Para a determinação da "taxa de corrente de ar" a temperatura do ar deve estar entre 20 e 26 ºC e a velocidade do ar deve ser inferior a 0,5 m/s. Este modelo pode ser aplicado a pessoas cuja sensação térmica global é próxima de neutra (PMV≈0) e percepcionando o desconforto local ao nível do pescoço (para correntes de ar ao nível dos braços e tornozelos este modelo pode sobrestimar os valores). A sensação de desconforto local devido a correntes de ar é menor no caso de actividade metabólica mais elevada (> 1,2 met) e no caso de existir uma sensação térmica de ligeiramente quente (ISO, 2005; ASHRAE, 2010).

O contacto com superfícies de pavimentos que estão demasiado frias ou demasiado quentes é outro factor de desconforto local. No caso de um indivíduo com calçado "ligeiro" (no caso de calçado mais "pesado" o resultado pode ser conservativo) o tipo de revestimento do pavimento não é importante para a sensação de desconforto local, esta depende essencialmente da temperatura do mesmo. O seu efeito é contabilizado através da percentagem de pessoas insatisfeitas.

O desconforto local devido à diferença de temperatura do ar na vertical ocorre quando a temperatura do ar ao nível dos tornozelos é diferente da temperatura do ar ao nível da cabeça. Esta estratificação térmica pode provocar desconforto quando a diferença entre os dois níveis atinge valores significativos. É quantificado através da percentagem de pessoas insatisfeitas.

A norma ISO 7730 (ISO, 2005) define valores limite para a percentagem de pessoas insatisfeitas, por desconforto local, para cada uma das três categorias referidas anteriormente. A Tabela 2.4 apresenta esses limites.

Tabela 2.4 – Categorias para o ambiente térmico local (adaptado de ISO, 2005)

Categoria	Desconforto local			
	Assimetria de temperatura radiante	Corrente de ar	Pavimento demasiado quente ou frio	Diferença de temperatura na vertical
	PD* [%]	DR [%]	PD* [%]	PD* [%]
A	< 5	< 10	< 10	< 3
B	< 5	< 20	< 10	< 5
C	< 10	< 30	< 15	< 10

*PD – percentagem de pessoas insatisfeitas.

- *Modelos de conforto térmico adaptativo*

Actualmente existem duas formas de abordar a questão do conforto térmico no interior dos edifícios. A primeira, descrita anteriormente, corresponde a uma abordagem analítica do problema baseada em resultados experimentais obtidos em câmaras climáticas e que utiliza a equação de balanço térmico do organismo considerando regime estacionário. A segunda abordagem, modelo adaptativo, encara este processo em regime dinâmico no qual um indivíduo pode interagir física e psicologicamente com o ambiente térmico que o rodeia. Este método alternativo à convencional teoria do conforto térmico considera que o indivíduo tem um papel fundamental na criação do seu próprio ambiente térmico, através da forma como interage com o meio ambiente, ou modifica os seus comportamentos e hábitos ou gradualmente vai adaptando as suas expectativas em função das condições ambientais existentes (Brager & de Dear, 1998).

O modelo em regime estacionário, que quantifica o conforto térmico interior através do índice PMV, tem apresentado algumas discrepâncias de resultados para situações reais. Estas diferenças podem ser justificadas por razões relacionadas com os dados de entrada no modelo, com as próprias considerações em que se baseia o modelo e com factores de natureza diferente dos fenómenos físicos do equilíbrio térmico (de Dear, et al., 1997).

Em relação aos dados de entrada no modelo podem aparecer dificuldades:

— Na estimativa da resistência térmica do vestuário (foi demonstrado por Brager, et al. (1994) que o valor da resistência térmica do vestuário pode variar cerca de 20% em função das tabelas ou algoritmos utilizados na sua determinação e os próprios valores da resistência térmica do vestuário que estão tabelados foram obtidos com manequins inanimados o que pode resultar em diferenças significativas para os valores em utilização real);

— Na não contabilização da resistência térmica da cadeira (McCullough e Olesen (1994) estudaram a resistência térmica do mobiliário num manequim sentado e concluíram que o efeito de uma cadeira típica corresponde a, aproximadamente, 0,15 clo);

— Na definição da actividade metabólica (segundo Cena (1994) a correspondência entre uma determinada actividade física e a actividade metabólica não contabiliza factores como o stress relacionado com a própria actividade, efeitos diferidos de actividades desenvolvidas anteriormente e o vigor com que essa actividade é desempenhada);

— No facto de as medições dos parâmetros físicos serem pontuais e localizadas e, desta forma, poder existir alguma diferença para as condições reais que os indivíduos encontram.

No que diz respeito às condições inerentes ao próprio modelo refere-se o facto de este considerar um regime estacionário e basear-se em resultados de ensaios laboratoriais em condições controladas, situação bastante diferente da utilização real de um edifício onde os parâmetros físicos e mesmo os individuais (a actividade de um indivíduo não é sempre constante) apresentam flutuações temporais que podem ser significativas.

Os factores de natureza diferente dos fenómenos físicos do equilíbrio térmico englobam uma série de parâmetros que não são contabilizados na equação do balanço térmico em que se baseia o modelo. Entre estes destacam-se aspectos como a idade, a cultura, o sexo, a situação económica, o clima, o tipo de edifício, a QAI e aspectos cognitivos como a atitude, as preferências de cada indivíduo e as expectativas individuais.

O interesse no estudo dos modelos adaptativos de conforto térmico começou na década de 70 como resposta à crise energética que se vivia na altura e tem nos últimos anos ganho novamente interesse por parte da comunidade científica em virtude das alterações climáticas. Permitir às pessoas terem um maior controlo sobre o ambiente interior em que se encontram e admitir que a temperatura do ar interior seja mais próxima da exterior pode corresponder a uma significativa melhoria quer das condições de conforto térmico interior, quer na redução dos consumos energéticos (Milne, 1995).

O modelo adaptativo considera que um indivíduo está satisfeito com o ambiente térmico de um determinado local e num determinado instante quando as condições actuais do ambiente correspondem às suas expectativas. Assim, o termo “adaptativo” pode ser interpretado como a diminuição gradual da resposta do organismo a determinado ambiente térmico com o objectivo de melhor se ajustar às condições ambientais (de Dear, et al., 1997).

Na definição do modelo adaptativo são habitualmente consideradas três formas de adaptação às condições ambientais (de Dear, et al., 1997):

— Comportamentais (ajustamentos) – englobam todas as acções que um indivíduo pode, consciente ou inconscientemente, realizar para garantir o equilíbrio térmico;

— Fisiológicas (aclimatização) – englobam alterações nos mecanismos termo-reguladores do indivíduo durante um determinado período de tempo com o objectivo de ajustar a resposta do organismo às condições ambientais;

— Psicológicas (habituação e expectativas) – englobam alterações de percepção e reacção aos estímulos sensoriais (a percepção térmica é fortemente condicionada pelas experiências térmicas anteriores bem como pelas expectativas do indivíduo).

Tal como acontece no modelo de previsão de conforto através do índice PMV, também o modelo adaptativo se encontra normalizado. A norma americana ASHRAE 55 (ASHRAE, 2010) inclui um método de avaliação do conforto térmico interior baseado no modelo adaptativo (Figura 2.24).

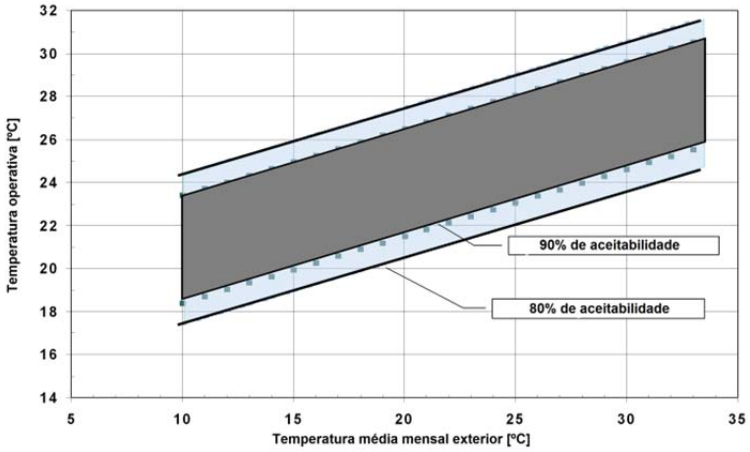


Figura 2.24 – Modelo de conforto térmico adaptativo (adaptado de ASHRAE, 2010)

O modelo é válido para ambientes sem meios mecânicos de arrefecimento do ar e em que o utilizador tenha controlo sobre a abertura das janelas. A norma limita a aplicação deste modelo a temperaturas médias mensais exteriores entre os 10 e os 33,5 ºC e níveis de actividade dos ocupantes entre 1,0 e 1,3 met. O modelo considera duas classes de conforto correspondendo a 80% e 90% de aceitação/satisfação dos utilizadores. A equação que rege o modelo foi proposta por Brager, et al. (2004) e define a temperatura operativa de conforto, T_{oc}, em função da temperatura média mensal exterior, T_m:

$$T_{oc} = 17{,}8 + 0{,}31 \cdot T_m \tag{2.6}$$

em que

T_{oc}	[ºC]	Temperatura operativa de conforto
T_m	[ºC]	Temperatura média mensal exterior

A zona de conforto correspondente a 80% de aceitabilidade, com uma largura de banda de 7 ºC em torno da temperatura operativa de conforto, é aplicável a situações correntes. A zona de conforto correspondente a 90% de aceitabilidade, com uma largura de banda de 5 ºC em torno da temperatura operativa de conforto, deve ser aplicada a edifícios onde se exigem níveis elevados de conforto.

Após um estudo experimental aprofundado realizado por Matias (2010), que incluiu a medição *in situ* dos parâmetros de conforto térmico e realização de inquéritos aos ocupantes para posterior comparação, o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) propõe um modelo de conforto adaptativo a aplicar em edifícios em Portugal. Esse estudo permitiu definir duas temperaturas de conforto, T_{conf}, uma para ser aplicada em espaços com sistema de climatização activado e outra em espaços não climatizados, por estes não possuírem qualquer tipo de sistema de climatização instalado ou por os sistemas existentes se encontrarem desactivados. A temperatura de conforto é obtida a partir da temperatura exterior exponencialmente ponderada, T_{mp}, calculada de acordo com a equação (2.7):

$$T_{mp} = \frac{\left(T_{n-1} + 0{,}8 \cdot T_{n-2} + 0{,}6 \cdot T_{n-3} + 0{,}5 \cdot T_{n-4} + 0{,}4 \cdot T_{n-5} + 0{,}3 \cdot T_{n-6} + 0{,}2 \cdot T_{n-7}\right)}{3{,}8} \tag{2.7}$$

em que

T_{mp}	[ºC]	Temperatura exterior exponencialmente ponderada
T_{n-i}	[ºC]	Temperatura média exterior do dia (i) anterior

O mesmo estudo inclui uma zona de conforto para uma aceitabilidade de 90% definida como ±3 ºC em torno da temperatura de conforto (Figura 2.25).

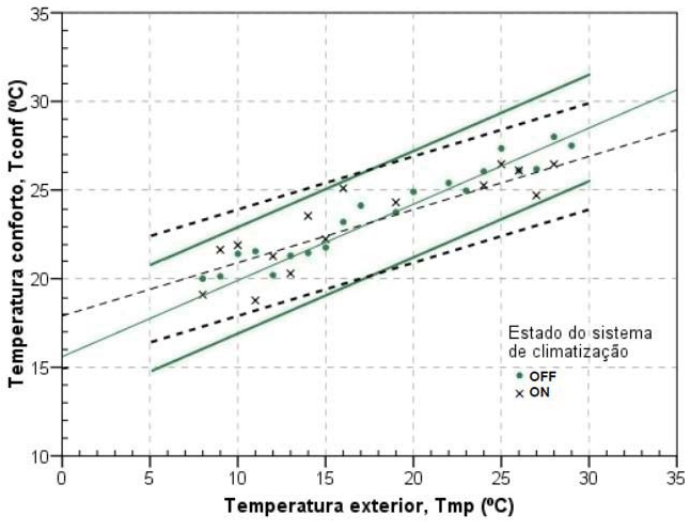


Figura 2.25 – Modelo de conforto térmico adaptativo (Matias, 2010)

2.2.1.3 Qualidade do ar interior

Nos últimos anos os sistemas construtivos e as tecnologias aplicadas na construção dos edifícios foram-se modificando na procura de garantir aos seus ocupantes níveis de conforto adequados a exigências crescentes. Esta evolução esteve, também, fortemente relacionada com a necessidade de economia de energia, bem patente após a crise petrolífera da década de 70. Com a alta dos preços dos combustíveis, houve uma tendência mundial para a conservação da energia, eliminando quase por completo quaisquer aberturas para ventilação

para, deste modo, minimizar as perdas de calor para o exterior. Contudo, dentro dos edifícios também existe produção de poluentes.

De facto, a composição do ar interior é afectada pela presença de diversos contaminantes, provenientes não só de fontes exteriores como também interiores. O ar exterior entra nos edifícios através da ventilação, daí podermos encontrar os seus contaminantes no ambiente interior. Para além disso, o mobiliário, os materiais de construção, as pessoas e uma má manutenção dos sistemas de condicionamento de ar podem ser fontes de poluição interior (REHVA, 2010).

Uma QAI aceitável é definida na norma AHSRAE 62.1 (ASHRAE, 2004) como o ar onde não existem contaminantes conhecidos em concentrações perigosas, de acordo com o determinado pelas autoridades reconhecidas e onde a maioria (pelo menos 80%) dos ocupantes expostos não expressem insatisfação.

Em 1984 um relatório (WHO, 1984) da Organização Mundial de Saúde (OMS) indicava que 30% dos edifícios, novos ou reabilitados, estavam sujeitos a níveis excessivos de poluentes relacionados com a QAI. Este problema levou ao aparecimento do designado "Síndrome do Edifício Doente" (*Sick Building Syndrome*), utilizado para descrever situações em que os ocupantes de um edifício sofrem de problemas de saúde ou desconforto relacionados com o tempo que passam dentro do mesmo, sem ser possível detectar causa específica. Os indicadores mais comuns deste tipo de problema são (EPA, 1991):

— Ocupantes do edifício com problemas de dores de cabeça, irritação nasal, irritação da garganta, irritação nos olhos, tosse, alergias, asma, náuseas, dificuldade de concentração e fadiga;

— Causas desses problemas desconhecidas;

— Maioria das queixas deixa de existir quando as pessoas abandonam os edifícios.

- *Poluentes do ar interior*

A QAI deve ser assegurada quer para evitar que poluentes perigosos atinjam concentrações que possam por em risco a saúde dos ocupantes, quer para manter um ambiente agradável (Viegas, 2000).

Em Portugal, a QAI é regulamentada pelo RSECE (2006), que define concentrações máximas de referência de poluentes no interior dos edifícios. Esses valores encontram-se sintetizados no Tabela 2.5.

No âmbito desta Tese o CO_2 é o contaminante do ar interior mais importante uma vez que é um bioefluente humano causado pela respiração. Portanto em edifícios com as características dos escolares é a principal fonte de poluição, devido à elevada taxa de ocupação.

A concentração de CO_2 no ar interior é utilizada na legislação internacional como parâmetro de avaliação da QAI e da taxa de ventilação. O CO_2 é um gás incolor, inodoro, insípido e não

inflamável, constituinte da atmosfera terrestre com concentrações que numa região não poluída rondam os 380 ppm (0,68 g/m^3).

Habitualmente a concentração de CO_2 dentro dos edifícios é bastante reduzida e como tal, este torna-se inofensivo. Porém, quando presente em concentrações muito elevadas, situação relativamente corrente em salas de aula devido à elevada taxa de ocupação e baixos níveis de ventilação, pode provocar problemas de respiração, dificuldade de concentração e dores de cabeça.

Tabela 2.5 – Concentração máxima regulamentar de poluentes do ar interior (adaptado de RSECE, 2006)

Poluentes	**Concentração Máxima de Referência**
Partículas suspensas no ar (PM_{10})	0,15 mg/m^3
Dióxido de carbono	1800 mg/m^3
Monóxido de carbono	12,5 mg/m^3
Ozono	0,2 mg/m^3
Formaldeído	0,1 mg/m^3
Compostos orgânicos voláteis totais	0,6 mg/m^3
Microorganismos (bactérias e fungos)	500 UFC/m^3
Legionella	100 UFC/m^3
Radão*	400 Bq/m^3

*a sua pesquisa é apenas obrigatória em edifícios construídos em zonas graníticas, nomeadamente nos distritos de Braga, Vila Real, Porto, Guarda, Viseu e Castelo Branco.

Uma vez que o CO_2 não é considerado um gás tóxico, a OMS não indica um valor limite máximo para a sua concentração no interior de edifícios não industriais. No entanto, nas legislações europeias mais actuais, relacionadas com a QAI em edifícios escolares, a concentração máxima de CO_2 é utilizada como critério de dimensionamento para determinar as necessidades de ar novo a disponibilizar.

O valor limite para a concentração de um poluente é habitualmente expresso numa das seguintes formas:

— Valores de pico: estas quantidades de contaminantes nunca podem ser excedidas;

— Valores de Concentração Máxima Permitida (MAC – *Maximum Allowable Concentration*) referem-se ao valor médio de 8 horas;

— Concentração Interior Aceitável (AIC – *Acceptable Indoor Concentration*) refere-se a um valor médio anual.

Uma vez que a concentração pode variar com o tempo, também a exposição pode ser avaliada de acordo com um período particular de tempo, e expressa como média ponderada temporal (TWA – *time-weighted average*), ou como limite de exposição a curto prazo (STEL – *short*

term exposure limit), ou ainda como valor limite admissível (TLV – *threshold limit value*) (REHVA, 2010).

Em termos normativos uma solução exigencial mais flexível, incluindo outros valores limite para além do de pico, pode possibilitar a utilização de soluções de ventilação mais simples e sustentáveis.

2.2.2 Disposições regulamentares

2.2.2.1 Regulamentação nacional

Um edifício escolar objecto de uma intervenção de reabilitação, que atendendo ao seu custo por metro quadrado é considerada uma grande reabilitação, está sujeito aos requisitos impostos pelo RSECE (2006) e deve obedecer ao Sistema de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE, 2006).

As condições de conforto térmico de referência do RSECE (2006), de acordo com o seu Artigo 4º, são os valores definidos no RCCTE (2006) acrescentando apenas que a velocidade do ar interior seja inferior a 0,2 m/s e que quaisquer desequilíbrios radiativos térmicos devem ser devidamente compensados (situações de desconforto localizado). Por sua vez o RCCTE (2006) apresenta as condições interiores de referência para as estações de aquecimento (Inverno) e de arrefecimento (Verão) no seu Artigo 14º. Assim, em termos de exigências regulamentares de conforto interior, as salas de aula devem obedecer aos seguintes valores de referência de temperatura (Inverno e Verão) e humidade relativa (Verão):

Tabela 2.6 – Condições de conforto interior de referência (adaptado de RCCTE, 2006)

Inverno	$T_a = 20\ ºC$
Verão	$T_a = 25\ ºC$ $HR = 50\%$

em que

T_a	[ºC]	Temperatura do ar
HR	[%]	Humidade relativa

No RSECE (2006) a QAI surge também com requisitos que abrangem as taxas de renovação do ar interior nos espaços e a concentração máxima dos principais poluentes (Tabela 2.5). Assim, as exigências regulamentares de QAI em salas de aula são definidas no Artigo 4º do RSECE (2006), prevendo o regulamento:

— Valor mínimo de renovação do ar por espaço, em função da sua utilização e do tipo de fontes poluentes nele existentes, nomeadamente as derivadas dos materiais de construção aplicados;

— Valores máximos das concentrações de algumas substâncias poluentes do ar interior, seja porque estas são reconhecidas como poluentes prioritários, seja porque podem funcionar como indicadores gerais do nível da QAI.

Para as salas de aula exigem-se os seguintes valores limite de ar novo e de concentração de CO_2:

Tabela 2.7 – Exigências de QAI em salas de aula de acordo com o RSECE (2006)

Valor mínimo de renovação do ar	*30 m^3/(h.ocupante)*
Valor máximo da concentração de CO_2	*1800 mg/m^3 ≈ 1000 ppm*

2.2.2.2 Regulamentação internacional

A qualidade do ambiente interior, em termos de conforto térmico e QAI, está regulamentada em cada país através dos respectivos regulamentos nacionais e, também, através de normas internacionais. Na Tabela 2.8 elencam-se as diferentes exigências de conforto (temperatura e humidade relativa) e na Tabela 2.9 os limites impostos para uma adequada QAI, ambas para salas de aula. Refira-se que os valores apresentados para o caudal de ar novo e para a concentração máxima de CO_2 (Tabela 2.9) correspondem a uma situação típica de uma sala de aula com 21 ocupantes (20 alunos e 1 professor) e uma área de 50 m^2.

Tabela 2.8 – Exigências de temperatura e humidade relativa em salas de aula

País / Norma	**Temperatura do ar [ºC]**		**Humidade relativa [%]**	
	Inverno	**Verão**	**Inverno**	**Verão**
Portugal (RCCTE)	20	25	-	50
Reino Unido (Building Bulletin 87 e 101)	18	< 28*	-	< 70**
Alemanha (DIN 4108 e 4701)	20-23	< 26	40-60	
Finlândia (National building code – Part D2)	21±1	< 25	-	-
EN 15251 (2007)***	20	26	-	-

*este valor pode ser excedido durante 80 horas por ano
**este valor pode ser excedido no máximo durante 2 horas num período de 12 horas
***valores correspondentes à classe II (expectativa normal – edifícios novos e reabilitados)

Tabela 2.9 – Exigências de QAI em salas de aula

País / Norma	**Caudal de ar novo [m^3/h]**	**Concentração máxima de CO_2 [ppm]**
Portugal (RSECE)	630	984
Reino Unido (Building Bulletin 101)	378*	1500**
Alemanha (DIN 4108 e 4701)	315 a 420	1500
Finlândia (National building code – Part D2)	450	1200
França (Règlement Sanitaire Départmental Type)	315 a 378	-
ASHRAE 62.1 (2007)	486	700***
EN 15251 (2007)****	650	500***

*valor médio diário; o regulamento obriga a prever a possibilidade de atingir um valor 600 m^3/h, por exemplo através da abertura de janelas
**valor médio diário; o regulamento obriga a prever a possibilidade de garantir um valor 1000 ppm, por exemplo através da abertura de janelas
***concentração máxima acima do valor exterior
****valores correspondentes à classe II (expectativa normal – edifícios novos e reabilitados)

2.2.2.3 Análise crítica das exigências regulamentares

Da análise da Tabela 2.9 verifica-se que as exigências regulamentares actualmente em vigor em Portugal, definidas pelo RSECE (2006), são das mais restritivas, condicionando decisivamente as escolhas em termos de concepção do sistema de ventilação a adoptar nos edifícios escolares a reabilitar.

Perante estas exigências duas questões fundamentais devem ser levantadas:

— Quais as implicações, económicas e construtivas, da escolha do sistema de ventilação?

— Deve ser este o modelo de exigência regulamentar ou pode ser possível uma abordagem mais flexível?

Os limites actuais impedem quase definitivamente a utilização de sistemas de ventilação natural, ou até mesmo híbrida, obrigando à instalação de complexos sistemas mecânicos de elevado custo inicial e de manutenção e exploração. O caudal de ar novo necessário torna praticamente irrelevante o efeito da envolvente pois as condições de ambiente interior ficam quase exclusivamente dependentes das propriedades do ar introduzido na sala pelo sistema mecânico. Tendo em conta que as envolventes são quase estanques facilmente se percebe que, caso haja algum problema no sistema, ou por qualquer outra razão este não seja colocado em

funcionamento, o desempenho do edifício em termos de QAI será desastroso. Adicionalmente, a utilização de sistemas de ventilação mecânica com volume constante pode resultar em "sobre-ventilação" e dispêndio desnecessário de energia em escolas com pouca ocupação ou ocupação intermitente das salas de aula.

Este modelo de ventilação tem sido adoptado nas escolas recentemente reabilitadas ao abrigo do programa de reabilitação descrito anteriormente (§2.1.2.2). De acordo com a empresa gestora do programa, dessas experiências já podem ser retiradas algumas ilações (Parque Escolar, 2010a):

— Aumento significativo do custo de construção;

— Aumento dos consumos de energia eléctrica e de gás, apesar da implementação de sistemas, equipamentos e materiais com vista à redução do consumo energético, devido essencialmente aos sistemas de Aquecimento, Ventilação e Ar-condicionado (AVAC) e informáticos;

— Grande dificuldade na implementação dos novos sistemas de AVAC nos edifícios existentes;

— Aumento da complexidade das instalações e consequente aumento significativo dos custos de manutenção e exploração;

— Dificuldades na gestão operacional dos sistemas, e obtenção de meios humanos qualificados;

— Soluções muito intrusivas mesmo em edifícios de interesse patrimonial;

— A utilização de muito equipamento com pouca incorporação nacional acentua o endividamento externo do país.

Refira-se que de acordo com Parque Escolar (2010b) os sistemas de AVAC são responsáveis por aproximadamente 16% do custo total da obra de reabilitação correspondendo a cerca de 50% do total do custo das especialidades. No entanto, o impacto económico não se limita ao forte aumento do custo inicial da obra. Os custos previstos para a manutenção, considerando um ciclo de 30 anos, e incluindo a manutenção preventiva, a manutenção correctiva e a grande conservação, são de 83 €/aluno/ano. Para uma escola secundária tipo (considerando 800 alunos), significa um valor próximo dos 65000 €/ano.

A juntar ao forte impacto económico também em termos construtivos se registam dificuldades. Estes equipamentos requerem espaço físico, muitas vezes inexistente numa intervenção de reabilitação, obrigando a soluções muito intrusivas (Figura 2.26).



Figura 2.26 – Implicações construtivas dos sistemas de AVAC (Parque Escolar, 2010b)

Face a este cenário várias propostas têm sido efectuadas com vista à revisão da regulamentação em vigor, tornando-a mais adequada face à realidade socioeconómica portuguesa, nomeadamente através da redução dos caudais mínimos de ar novo e inclusão da obrigatoriedade de contabilização de uma componente de ventilação natural. Assim, algumas incoerências têm sido apontadas ao actual regulamento (Parque Escolar, 2010a):

— Ausência da obrigatoriedade do cálculo da componente de ventilação natural em função do clima temperado de Portugal, tendo como consequência o excesso de soluções e componentes mecânicos contrariando o propósito da eficiência energética;

— Tendência à uniformização de tratamento igual para todos os espaços do edifício não contabilizando a especificidade da actividade das escolas, nomeadamente a sazonalidade, os horários de funcionamento, as diferentes taxas de ocupação e a diversidade de funções;

— Maiores exigências nos parâmetros do caudal e qualidade de ar nos regulamentos nacionais do que na maioria das normas internacionais.

2.2.3 Principais estudos realizados

2.2.3.1 Introdução

Tal como foi referido anteriormente a qualidade do ambiente interior tem sido objecto de preocupação e de estudo de vários investigadores nacionais e internacionais. Desses trabalhos resultaram inúmeras publicações sobre avaliação do conforto térmico e da QAI em edifícios

escolares. No que diz respeito à QAI, a ventilação desadequada pode conduzir à acumulação de bioefluentes dos ocupantes de um espaço fechado. Desta forma a concentração de CO_2 num espaço fechado é habitualmente considerada como um bom indicador da QAI. A relação entre a concentração de CO_2, a QAI e a ventilação de um espaço baseia-se em dois pressupostos fundamentais: o primeiro é que os seres humanos emitem CO_2 a uma taxa que depende da sua constituição física e da actividade que estão a desenvolver; o segundo é que o CO_2 pode ser utilizado como gás traçador para determinar a taxa de ventilação quando a concentração interior é superior à exterior (Persily, 1996). Compreende-se então que nos estudos relacionados com a QAI de edifícios escolares, onde as taxas de ocupação são elevadas, a concentração de CO_2 seja utilizada para a sua avaliação.

2.2.3.2 Estudos internacionais

Daisey, et al. (2003) publicaram o resultado de uma recolha bibliográfica sobre estudos realizados para avaliar a qualidade do ambiente interior em salas de aula de escolas dos EUA, do Canadá e escolas europeias, até ao ano de 1999. Cerca de 450 publicações foram analisadas e em termos gerais concluiu-se que as normas em vigor muitas vezes não eram cumpridas.

No âmbito de um estudo realizado no Texas, EUA, em 2000, a concentração de CO_2 foi monitorizada durante um dia em 115 salas de aula. Verificou-se que o valor médio diário da concentração variou de 529 a 3112 ppm, com uma média de 1440 ppm e um desvio padrão de 642 ppm. O valor máximo diário da concentração de CO_2 variou de 744 a 4969 ppm, sendo o valor médio de 2178 ppm, com um desvio padrão de 995 ppm. Os resultados evidenciaram que os caudais de ventilação das salas de aula estavam aquém do previsto em projecto (Corsi, et al., 2002).

A QAI foi avaliada por Coley e Beisteiner (2002) em 7 salas de aula de 4 escolas, do Reino Unido, durante a estação de aquecimento. O sistema de ventilação de todas as escolas era natural. Foi registada a concentração de CO_2 tendo-se obtido um valor médio de 1957 ppm e um máximo superior a 4000 ppm.

Vários resultados têm sido publicados sobre a ambiente interior em salas de aula na Grécia. Gaitani, et al. (2006) mediram, entre outros parâmetros, a temperatura, a humidade relativa e a concentração de CO_2 em 10 escolas. As medições decorreram durante o período de meia-estação e as escolas dispunham de ventilação natural. As temperaturas registadas variaram de 19,1 a 27,8 ºC, a humidade relativa flutuou entre 47 e 75% e a concentração de CO_2 média mais elevada foi de 1258 ppm. Noutro estudo efectuado por Santamouris, et al. (2008) a QAI foi monitorizada em 62 salas de aula de 27 escolas de Atenas com ventilação natural. Observou-se uma concentração de CO_2 máxima de 3000 ppm e um valor médio de 1400 ppm. Por fim, Dascalaki e Sermpetzoglou (2011) mediram, em 5 escolas, durante uma semana, a temperatura, a humidade relativa e a concentração de CO_2. As medições decorreram durante a Primavera e as escolas eram ventiladas naturalmente. A temperatura média obtida foi de 27 ºC, variando entre 22,6 e 32,5 ºC. O valor médio da humidade relativa foi de 34% (20 a 55%). A concentração de CO_2 máxima foi de 2000 ppm e o valor médio 855 ppm.

Na Finlândia, foram estudadas por Kurnitski (2007) 6 escolas novas ou recentemente reabilitadas, registando-se a temperatura e a concentração de CO_2, durante uma semana, no final da estação de aquecimento (Maio) com temperaturas exteriores entre os 9 e 12 ºC. Todas as escolas disponham de modernos sistemas de AVAC para controlo do ambiente interior. Verificou-se que a temperatura variou de 20,7 ºC a 24,9 ºC, a concentração de CO_2 média foi de 600 ppm e o seu valor máximo de 1300 ppm. Conclui-se que as temperaturas interiores registadas eram acima do esperado, não correspondendo ao previsto em projecto.

Holm, et al. (2008) realizaram um estudo numa escola da Alemanha, medindo a temperatura, a humidade relativa e a concentração de CO_2 durante dois períodos de uma semana, no Inverno e no Verão. O sistema de ventilação era natural. Nas medições no Inverno obtiveram flutuações da temperatura entre 17 e 22 ºC e da humidade relativa entre 38 e 64%. A concentração média de CO_2 foi de 1800 ppm com um máximo de 4100 ppm. No Verão os resultados foram uma variação de 23,5 a 27,5 ºC na temperatura e de 35 a 54% na humidade relativa. A concentração média de CO_2 diminuiu significativamente para 700 ppm com um máximo de 3000 ppm.

Também na Alemanha foi medida por Heudorf, et al. (2009) a concentração de CO_2 em 2 escolas, com ventilação natural, durante três semanas. Nas duas primeiras em funcionamento normal e na última foi aumentada a ventilação através da abertura das janelas durante os intervalos. Verificou-se que nas duas primeiras semanas a concentração média de CO_2 foi de 1500 ppm, com um máximo de 4850 ppm. Na terceira semana houve uma diminuição da concentração obtendo-se uma valor médio de 1000 ppm, com um máximo de 3600 ppm.

Foi registada por Griffiths e Eftekhari (2008) a concentração de CO_2 numa escola secundária nova do Reino Unido, durante uma semana, na estação de aquecimento com temperaturas exteriores entre 2 e 13 ºC. A escola está equipada com um sistema de ventilação natural. O valor médio diário variou entre 700 e 1500 ppm e o máximo registado foi de 2800 ppm.

Morse, et al. (2009) efectuaram um estudo em escolas do Sul da Florida, EUA, durante os anos de 2005 e 2006. Nesta pesquisa foram utilizadas 40 salas de aula e a concentração de CO_2 foi registada durante uma semana, em intervalos de 4 e 6 minutos. Verificou-se que a concentração média variou entre 800 e 1200 ppm acima da concentração exterior. As escolas estudadas disponham de ventilação mecânica e concluiu-se que quando a manutenção de todo o sistema não era a adequada os valores da concentração subiam acima dos 2000 ppm (limite do equipamento de registo utilizado). Nas situações em que o sistema tinha a manutenção adequada o valor médio obtido foi de 1100 ppm.

Está a ser desenvolvido no Reino Unido um estudo de grande dimensão com o objectivo de avaliar o conforto térmico, a QAI e o desempenho acústico de escolas recentemente reabilitadas. Já foram publicados os primeiros resultados (Mumovic, et al., 2009). Foi efectuada uma campanha de medições em 9 escolas secundárias, registando a temperatura, a humidade relativa e a concentração de CO_2 em duas salas de aula de cada uma. Do total de salas monitorizadas, 13 disponham de ventilação natural, 2 ventilação híbrida e 3 ventilação mecânica. As medições decorreram durante uma semana, na estação de aquecimento. Os resultados obtidos para a temperatura do ar variaram entre 18,2 e 29,1 ºC. Verificou-se que as

temperaturas registadas foram muito superiores às adoptadas em projecto. A humidade relativa variou entre 35 e 70%. Em relação à QAI apenas 6 salas de aula não cumpriram o valor médio de 1500 ppm. Todas dispunham de ventilação natural, no entanto o valor médio foi sempre inferior a 2000 ppm. Refira-se que, durante o período de medições, em duas salas com ventilação mecânica foi necessário efectuar uma reparação no sistema. Durante esse período a concentração de CO_2 atingiu os 3000 ppm.

2.2.3.3 Estudos nacionais

Em Portugal e ao abrigo do programa MIT-Portugal está em curso um projecto de investigação com o objectivo de estudar o impacto das acções (activas ou passivas) visando a melhoria das condições de conforto ambiente, de aprendizagem e de eficiência energética implementadas numa escola objecto de obras de reabilitação. O estudo está a ser realizado numa escola de Lisboa, do tipo blocos 3x3, que vai ser reabilitada ao abrigo do programa descrito em §2.1.2.2. Foram efectuadas medições, antes da intervenção de reabilitação, de parâmetros higrotérmicos e de QAI e foi avaliada a satisfação dos ocupantes através de inquéritos, em dois períodos, Inverno e meia-estação (LNEC, 2010a; LNEC, 2010b).

No período de Inverno foram realizadas medições da temperatura, da temperatura média radiante, da humidade relativa e da velocidade do ar, em 11 salas de aula, durante 1 hora, para avaliar o conforto térmico. Em duas dessas salas foi ainda registada a temperatura, a humidade relativa e a concentração de CO_2, durante um dia, para avaliar a QAI. Os resultados permitiram concluir que as temperaturas médias variaram entre 15 e 18 ºC (longe do valor do RCCTE, 2006) e que, utilizando a abordagem adaptativa, os valores se aproximam mais dos limites inferiores de conforto. Apesar desses resultados, nos inquéritos apenas 20% dos ocupantes se mostraram desconfortáveis. A humidade relativa apresentou valores adequados (40 a 70%) e a concentração de CO_2 foi muito acima do limite regulamentar do RSECE (2006), chegando a 4000 ppm.

No período de meia-estação a metodologia do estudo foi semelhante, tendo sido avaliado o conforto térmico em 15 salas de aula. Refira-se que em 9 dessas medições as condições exteriores eram de meia-estação mas nas restantes eram típicas de Verão. Dos resultados obtidos em clima de meia-estação verificou-se que a temperatura média flutuou entre 20 e 23 ºC, indiciando condições adequadas de conforto. Situação confirmada pelo resultado dos inquéritos onde 90% dos ocupantes se mostraram satisfeitos com o ambiente térmico. A QAI melhorou significativamente em relação ao Inverno apresentando uma concentração máxima de CO_2 de 2500 ppm e um valor médio de 1500 ppm. Sob condições de Verão as temperaturas variaram entre 26 e 29 ºC e apenas 40% dos ocupantes se mostraram satisfeitos com as condições ambientais.

Também em Portugal, Conceição e Lúcio (2008, 2011) têm desenvolvido investigação sobre a qualidade do ambiente interior em edifícios escolares utilizando programas de simulação para avaliar o conforto térmico sobre diferentes condições climáticas e de envolvente.

2.3 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO DESEMPENHO HIGROTÉRMICO E ENERGÉTICO

2.3.1 Modelos de simulação

2.3.1.1 Introdução e enquadramento

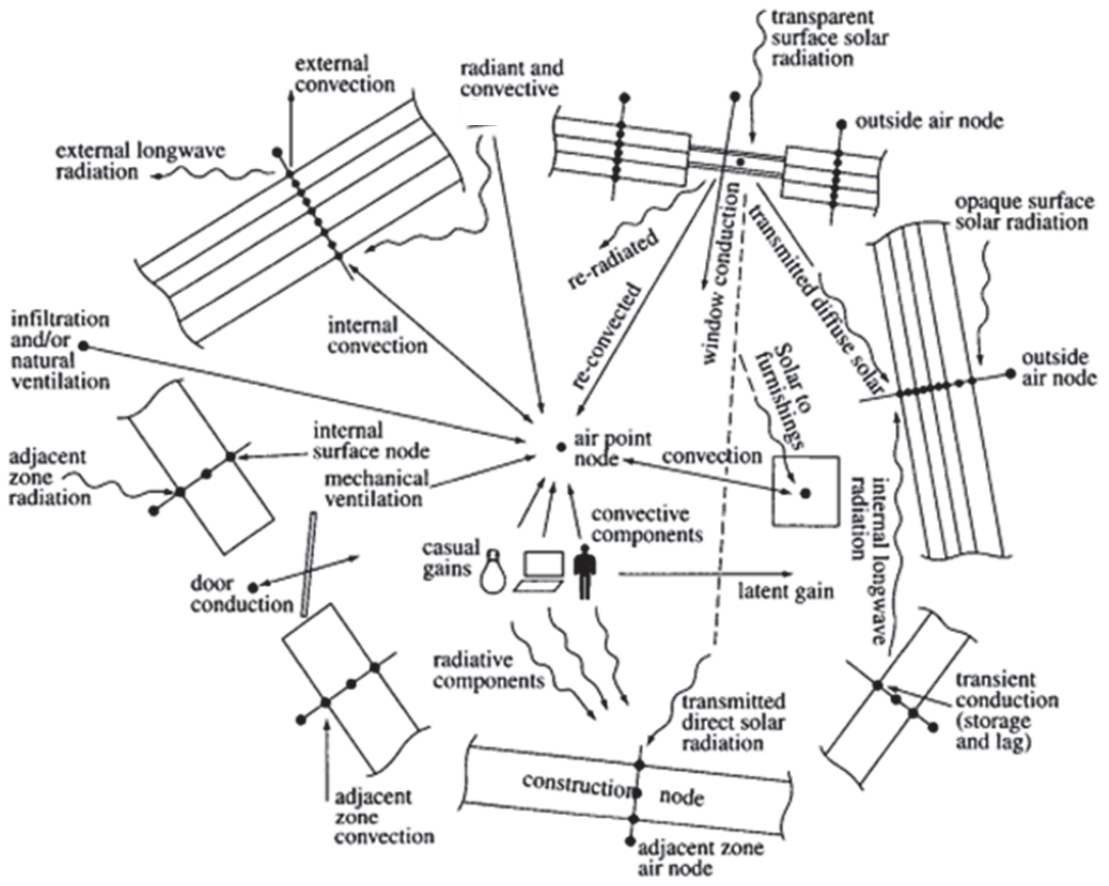
Os parâmetros e processos físicos envolvidos nos fenómenos de transferência de calor, ar e humidade nos edifícios bem como, em muitas situações, a própria complexidade geométrica do edifício, implicam que análises mais detalhadas do seu desempenho higrotérmico e energético recorram à utilização de modelações e simulações computacionais.

A utilização de ferramentas informáticas de simulação tem aumentado significativamente e é unanimemente reconhecida a sua contribuição na busca de soluções que potenciem a eficiência energética dos edifícios, nomeadamente na escolha do sistema de ventilação, de soluções construtivas para a envolvente dos edifícios, do sistema de aquecimento, de equipamentos de iluminação mais eficientes, de protecções solares, etc..

Uma vez que os fenómenos higrotérmicos que ocorrem no interior de um edifício influenciam o seu sistema de ventilação (como é o caso do efeito de chaminé nos edifícios com ventilação natural em que os caudais de ventilação dependem das diferenças de temperatura existentes entre o ar interior e o ar exterior) e este tem um forte impacto no desempenho energético, torna-se claro que a melhor forma de simular o desempenho de um edifício será recorrendo a modelos que combinem os fenómenos de transferência de calor com os fenómenos associados à ventilação (Dutton, et al., 2008).

O grande objectivo da simulação é obter a evolução das condições ambientais e dos fluxos de energia em todos os pontos do sistema durante o período analisado. No entanto, trata-se de uma tarefa complicada face ao número de fenómenos físicos que ocorrem. A Figura 2.27 mostra os diferentes fluxos existentes dentro e fora de edifícios, que interagem de forma transiente, e que são responsáveis pelos níveis de conforto e pelas exigências de energia do edifício.

Do ponto de vista matemático, é necessário resolver vários tipos de equações que caracterizam o sistema e, uma vez que estas equações representam processos de transferência de calor que estão altamente inter-relacionados, é indispensável utilizar técnicas de solução simultânea (Clarke, 2001).



Legenda:

adjacent zone air node: nó correspondente à zona adjacente
adjacent zone convection: convecção da zona adjacente
adjacent zone radiation: radiação da zona adjacente
air point node: nó correspondente à zona
casual gains: ganhos internos casuais
construction node: nó correspondente ao elemento construtivo
convection: convecção
convective components: componentes convectivas
door conduction: condução pelas portas
external convection: convecçãoexterior
external longwave radiation: radiação exterior de onda longa
infiltration and/or natural ventilation: infiltração e/ou ventilação natural
internal convection: convecção interior
internal longwave radiation: radiação de onda longa no interior
internal surface node: nó correspondente à superfície interior
latent gain: ganhos latentes
mechanical ventilation: ventilação mecânica
opaque surface solar radiation: radiação solar em superfícies opacas
outside air node: nó exterior
radiant and convective: radiação e convecção
radiative componentes: componentes radiativas
re-convected: convecção
re-radiated: radiação reflectida
solar to furnishings: radiação solar no mobiliário
transient conduction (storage and lag): condução diferida (efeito da inércia térmica)
transmitted diffuse solar: radiação solar difusa
transmitted direct solar radiation: radiação solar directa transmitida ao elemento
transparent surface solar radiation: radiação solar em superfícies transparentes
window conduction: condução pela janela

Figura 2.27 – Fluxos de energia num edifício (Clarke, 2001)

Nos últimos 50 anos inúmeros programas de simulação do desempenho energético dos edifícios têm sido desenvolvidos. De entre eles destacam-se as ferramentas multi-zona (Figura 2.28) que simulam o edifício como um todo através de modelos transientes e fornecem ao utilizador indicadores chave do desempenho do edifício como as necessidades energéticas, a temperatura, a humidade relativa e os custos (Crawley, et al., 2005).

Estas ferramentas permitem modelar o edifício completo, desde a definição geométrica do conjunto de espaços físicos que o compõem até à caracterização das propriedades dos

materiais constituintes de cada elemento construtivo. Estes modelos incluem, ainda, a definição do controlo e das características dos sistemas mecânicos de AVAC.

Os modelos simplificam o edifício num conjunto de fluxos de energia e sistemas e efectuam uma simulação horária a partir dos dados climáticos introduzidos.

Cada zona criada na discretização do edifício é considerada uniforme e deve corresponder a um compartimento. Esta modelação permite ter em conta as diferentes condições de cada compartimento e os movimentos do ar dentro do edifício. Como se baseia na hipótese de que o ar tem características uniformes no interior de cada zona, as suas limitações surgem em compartimentos onde se verificam fortes heterogeneidades do ar (Ramos, 2007).

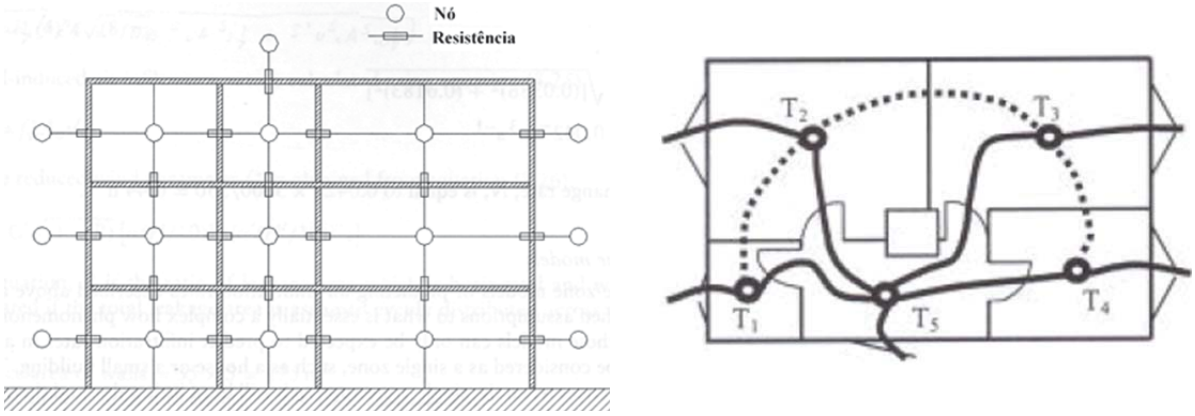


Figura 2.28 – Modelos multi-zona (Amaral, 2008; Ramos, 2007)

Com o intuito de facilitar a escolha dos utilizadores, existem alguns estudos publicados contendo uma compilação das ferramentas computacionais mais importantes de avaliação do desempenho higrotérmico e energético dos edifícios, incluindo uma comparação entre eles, evidenciando as potencialidades e os pontos fracos de cada modelo (Crawley, et al.,2005; Delgado, et al., 2010).

Face aos objectivos deste trabalho optou-se, como ferramenta a utilizar para a modelação e simulação computacional do desempenho dos edifícios escolares, pela utilização do programa *EnergyPlus* (Crawley, et al., 1999).

2.3.1.2 Caracterização do modelo do *EnergyPlus*

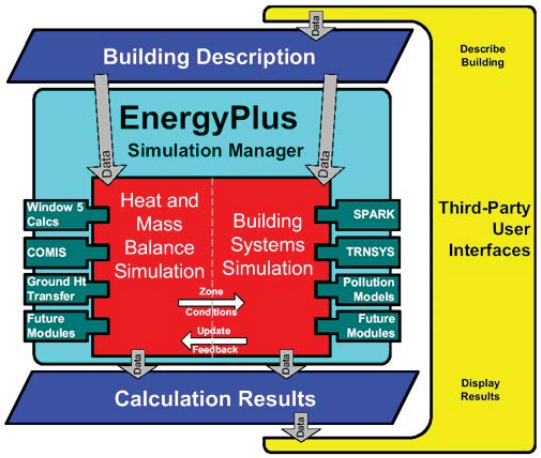
O programa *EnergyPlus* foi desenvolvido pelo *Lawrence Berkeley National Laboratory*, em sociedade com outros laboratórios, e resultou da fusão dos programas DOE-2 e BLAST. A criação do *EnergyPlus* foi incentivada pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos com o intuito de proporcionar aos utilizadores um código computacional capaz de calcular não só a carga térmica de um edifício, mas também prever o seu desempenho energético, de modo a garantir uma abordagem mais completa (Crawley, et al., 2000).

O programa foi editado em 2001, incorporando modelos para os vários componentes do edifício, desenvolvidos em todo o mundo devido ao carácter de código *Open Source*.

Posteriormente foi incluído no *EnergyPlus* o algoritmo COMIS (Feustel, 1998) que permite a simulação da ventilação natural juntamente com a simulação térmica do edifício, a partir da sua geometria, elementos construtivos e das condições climáticas do local de implantação (Huang, et al., 1999). A partir da versão 1.3.0 do programa *EnergyPlus* o modelo de cálculo do fluxo de ar passou a ser designado por *AirflowNetwork*. Este modelo, para além de incluir partes mais recentes do COMIS, passou a adoptar algumas rotinas de cálculo do programa AIRNET, desenvolvido no NIST – *National Institute of Standards and Technology* (Melo, et al., 2008).

O programa não inclui uma *Graphical User Interface* (GUI) para introdução dos dados de entrada. No entanto, existem inúmeras ferramentas no mercado que disponibilizam uma GUI para simplificar a criação de modelos para posterior simulação no *EnergyPlus*.

O programa *EnergyPlus* tem uma estrutura modular permitindo o cálculo simultâneo das cargas térmicas e dos sistemas. As cargas internas são determinadas a partir de um algoritmo de balanço térmico e enviadas para o módulo de simulação dos sistemas. Este procedimento é realizado iterativamente em todos os incrementos de tempo definidos pelo utilizador. Este modelo de simulação integrada do edifício e dos sistemas de AVAC permite resultados mais rigorosos na previsão da temperatura nos espaços. A Figura 2.29 traduz esquematicamente este procedimento.



Legenda:

building description: modelo do edifício
building systems simulation: simulação dos sistemas do edifício
calculation results: resultados do cálculo
data: informação
describe building: modelação do edifício
display results: mostra os resultados
future modules: módulos futuros
ground ht transfer: transferência de calor para o solo
heat and mass balance simulation: simulação do balanço de calor e massa
pollution models: módulos de poluentes
simulation manager: controlador da simulação
third-party user interfaces: programas de ligação exteriores
update/feedback: actualização/retorno
zone/conditions: zona/condições

Figura 2.29 – Estrutura modular do *EnergyPlus* (EnergyPlus, 2010)

O módulo de simulação controla todo o processo, fornecendo os dados de entrada e ligando os outros módulos (incluindo ligações a outros programas). O módulo de balanço térmico e de massa aplica os princípios de conservação de massa e energia para calcular a transferência de energia através de uma zona. O módulo de simulação dos sistemas lida com a comunicação entre a equação de balanço térmico e os módulos dos sistemas AVAC (chillers, bombas de calor e outros equipamentos/componentes). Este módulo não limita o utilizador à selecção de um sistema pré-definido, permitindo a simulação de um qualquer sistema (Silva, 2009). O diagrama da Figura 2.30 apresenta a integração destes módulos internos no programa principal.

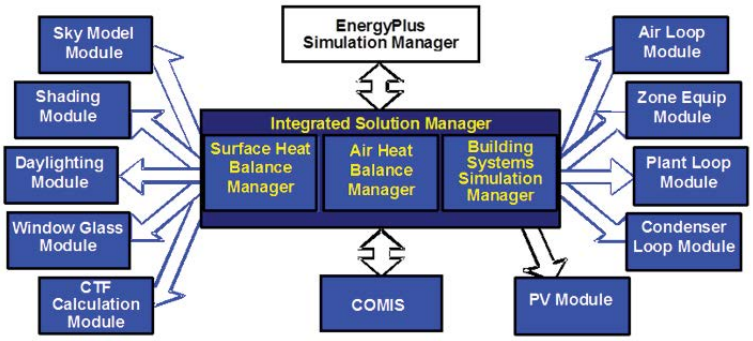
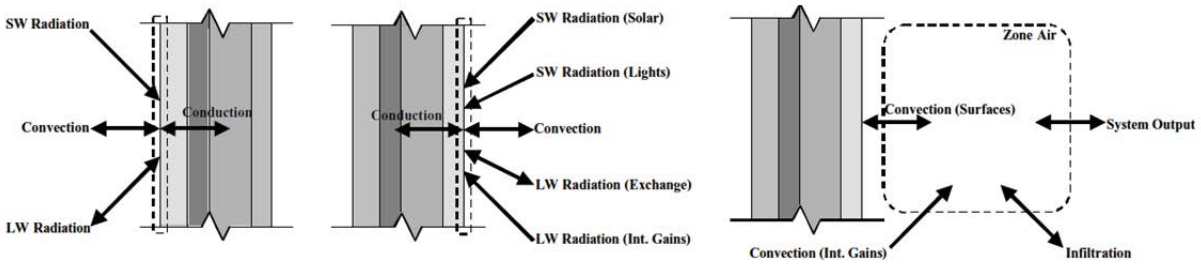


Figura 2.30 – *EnergyPlus*: módulos internos (EnergyPlus, 2010)

O modelo de balanço térmico tenta traduzir os princípios básicos da transferência de calor em elementos da envolvente, através da aplicação da lei de conservação de energia a pontos notáveis da geometria do edifício. Esta formulação é aplicada considerando elementos de volume na face exterior de cada superfície do edifício, na face interior de cada superfície do edifício e no interior de cada zona (compartimento) definida pelo utilizador (Strand, et al., 2001). A Figura 2.31 representa graficamente o modelo.



a) b) c)

Legenda:

conduction: condução
convection (int. gains): convecção (ganhos internos)
infiltration: infiltração
LW radiation (exchange): radiação de onda longa (trocas)
SW radiation: radiação de onda curta
SW radiation (solar): radiação de onda curta (solar)
zone air: volume de ar (zona/compartimento)
convection: convecção
convection (surfaces): convecção (superfícies)
LW radiation: radiação de onda longa
LW radiation (int. gains): radiação de onda longa (ganhos internos)
SW radiation (lights): radiação de onda curta (iluminação)
system output: carga térmica dos sistemas

Figura 2.31 – Modelo de balanço térmico. a) superfície exterior; b)superfície interior; c) zona (Strand, et al., 2001)

No balanço térmico da superfície exterior os quatro fluxos que actuam no volume devem ser equilibrados para garantir a conservação da energia. Esta metodologia pressupõe que o volume em estudo não tem massa e, desta forma, não consegue acumular energia. A equação (2.8) traduz matematicamente este fenómeno (Strand, et al., 2001):

$$Q_{SWrad} + Q_{LWrad} + Q_{conv} + Q_{cond} = 0 \qquad (2.8)$$

em que

Q_{SWrad}	[W]	Radiação solar directa e difusa absorvida pela superfície
Q_{LWrad}	[W]	Trocas radiativas de onda longa entre a superfície e os elementos envolventes (terreno, ar, outros edifícios, etc.)

Q_{conv}	[W]	Trocas convectivas entre a superfície e o ar envolvente
Q_{cond}	[W]	Energia transferida por condução

Da mesma forma, no elemento de volume da superfície interior, considerando igualmente que não tem massa, também deve existir equilíbrio entre os fluxos:

$$Q_{solar} + Q_{SWlights} + Q_{LWradExch} + Q_{LWradIntGains} + Q_{conv} + Q_{cond} = 0 \tag{2.9}$$

em que

Q_{solar}	[W]	Radiação solar absorvida pela superfície interior
$Q_{SWlights}$	[W]	Radiação de onda curta emitida pela iluminação e absorvida pela superfície
$Q_{LWradExch}$	[W]	Trocas radiativas de onda longa com as outras superfícies da zona
$Q_{LWradIntGains}$	[W]	Radiação de onda longa emitida pelos ganhos internos (pessoas, equipamentos, etc.) e absorvida pela superfície

Não considerando a capacidade de armazenamento de energia do elemento de volume no interior da zona, a equação de equilíbrio dos fluxos neste ponto continha apenas as quatro parcelas representadas na Figura 2.31c). No entanto, quando o objectivo é acoplar este modelo a módulos caracterizadores dos sistemas de AVAC, interligando-os no mesmo incremento de tempo, deve considerar-se a capacidade do ar para armazenar energia pois desta forma é matematicamente mais simples de estabilizar a solução da equação (Strand, et al., 2001). Assim, em vez da soma dos fluxos ser zero incluiu-se uma nova parcela na equação:

$$Q_{conv} + Q_{convIntGains} + Q_{infil} + Q_{sys} = C\frac{dT_a}{dt} \tag{2.10}$$

em que

$Q_{convIntGains}$	[W]	Carga térmica convectiva provocada pelos ganhos internos
Q_{infil}	[W]	Carga térmica ganha ou perdida devido a infiltrações de ar
Q_{sys}	[W]	Carga térmica colocada ou retirada da zona pelo sistema de AVAC
C	[J/ºC]	Produto da massa do elemento (zona) pelo calor específico do ar
$\frac{dT_a}{dt}$	[ºC/s]	Variação da temperatura, T_a, no incremento de tempo, t

Este procedimento de balanço térmico quando aplicado a uma zona com N superfícies resulta num sistema de 2N+1 equações com 2N+1 incógnitas. A resolução destes sistemas não é trivial sendo necessário recorrer a algoritmos iterativos (Pedersen, et al., 1997). A metodologia adoptada no *EnergyPlus* baseia-se no método das diferenças finitas.

A primeira versão do *EnergyPlus* foi lançada em Abril de 2001 e, desde então, foi alvo de diversas actualizações. O programa foi sujeito a vários testes de validação, analíticos

(comparando com soluções matemáticas), comparativos (comparando com outros programas), de sensibilidade (comparando pequenas alterações dos dados com uma base) e empíricos (comparação com dados experimentais) (Silva, 2009). O programa foi ainda validado de acordo com o procedimento descrito na norma ASHRAE 140 (ASHRAE, 2001; Henninger & Witte, 2004).

2.3.2 Modelos de aproximação e optimização

2.3.2.1 Introdução e enquadramento

Um dos objectivos deste trabalho consiste em procurar definir soluções construtivas optimizadas para aplicação na reabilitação de edifícios escolares. Os objectivos associados à optimização são o consumo de energia, a qualidade do ambiente interior e os custos das soluções. Logo, trata-se de um procedimento de optimização multi-objectivo uma vez que se pretendem garantir condições adequadas de conforto e QAI, minimizando os consumos energéticos e os custos.

Para avaliar adequadamente o efeito de uma determinada solução construtiva no desempenho do edifício é necessário recorrer a programas de simulação como o *EnergyPlus*. No entanto, quando se pretende simular modelos complexos, por longos períodos de tempo (simulações anuais), este procedimento torna-se muito demorado e exigente em termos computacionais. Uma vez que os algoritmos de optimização multi-objectivo requerem inúmeras iterações torna-se praticamente impossível utilizá-los directamente com o programa de simulação (Almeida & Freitas, 2011).

Vários investigadores têm apresentado alternativas para superar esta dificuldade, nomeadamente através da utilização de métodos estatísticos, tais como séries temporais, séries de Fourier, modelos de regressão e Redes Neurais Artificiais (RNA). Os métodos estatísticos são modelos de previsão que utilizam funções de aproximação às soluções e que podem ser aplicados tanto em problemas contínuos como discretos.

Neste trabalho optou-se pela utilização de RNA para o cálculo das funções escolhidas para caracterizar o desempenho dos edifícios, tornando o processo de avaliação e optimização das soluções construtivas muito mais simples e rápido. Esta escolha deveu-se ao facto de as RNA apresentarem um melhor desempenho, neste tipo de problemas, do que outros métodos estatísticos (Kawashima, et al., 1995).

Após a validação das RNA, estas foram aplicadas para a optimização das variáveis em estudo utilizando algoritmos evolucionários. Foram implementadas duas abordagens:

— Método dos Pesos: as funções objectivo, cada uma afectada com um certo peso que reflecte a sua importância para o decisor, são agregadas numa única função a optimizar;

— Optimização multi-objectivo: é efectuada uma verdadeira optimização multi-objectivo de modo a obter a frente de Pareto de soluções óptimas.

2.3.2.2 Redes Neurais Artificiais

A utilização de RNA começou na década de 40 com a pesquisa de McCulloch e Pitts (1943), que mostrou que, em teoria, uma RNA tem a capacidade de calcular o valor de qualquer função aritmética ou lógica.

A primeira aplicação prática de uma RNA surgiu no final dos anos 50 por Rosenblatt (1958) no domínio do reconhecimento de padrões. A pesquisa sobre RNA teve grandes avanços nos anos 80, com os computadores a tornarem-se mais poderosos e acessíveis, e devido a duas novas ideias fundamentais que surgiram: o uso de métodos estatísticos para explicar o comportamento de alguns tipos de neurónios e a introdução do algoritmo de *backpropagation* para as redes com vários *layers* de neurónios (Hagan, et al., 1996).

A estrutura das RNA é baseada no sistema nervoso central do cérebro humano. É composta por uma rede de neurónios interligados que têm a capacidade de auto-aprendizagem, quando devidamente treinados, e a partir daí podem responder a estímulos (Patterson, 1996). Trata-se então de um modelo matemático definido por três parâmetros: os neurónios, a arquitectura da rede e o algoritmo de aprendizagem.

A Figura 2.32 mostra a estrutura típica de uma RNA, neste caso com 2 *inputs*, 2 *layers* de 3 neurónios e 1 *output*.

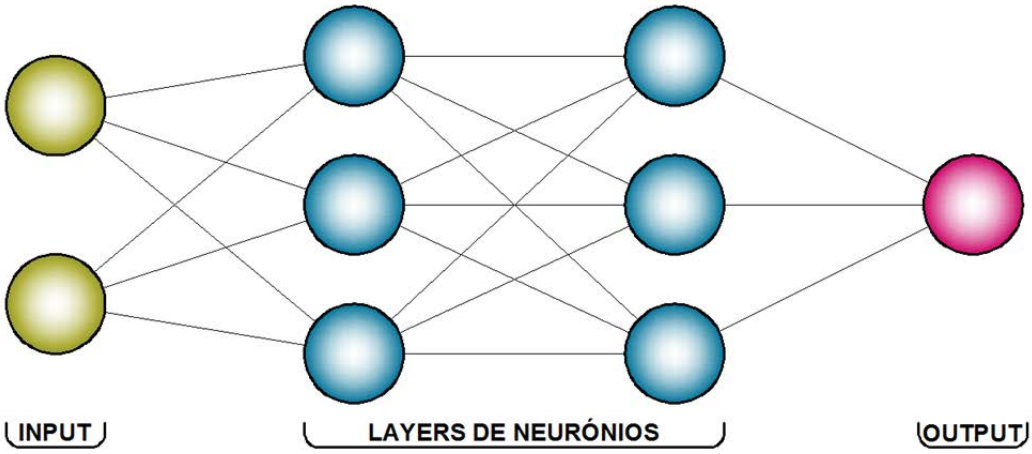


Figura 2.32 – Arquitectura típica de uma RNA

Cada nó das camadas intermédias de uma RNA corresponde a um neurónio. O neurónio recebe um conjunto de sinais, x_i, provenientes do *input* ou de neurónios do *layer* anterior e aplica-lhes um coeficiente de peso, w_i. Todos os sinais são posteriormente somados, afectados ou não de uma constante, *b*, que representa um desvio, para entrarem numa função de transferência, *f*, que gera o output do neurónio, *Y*. A Figura 2.33 traduz este processo.

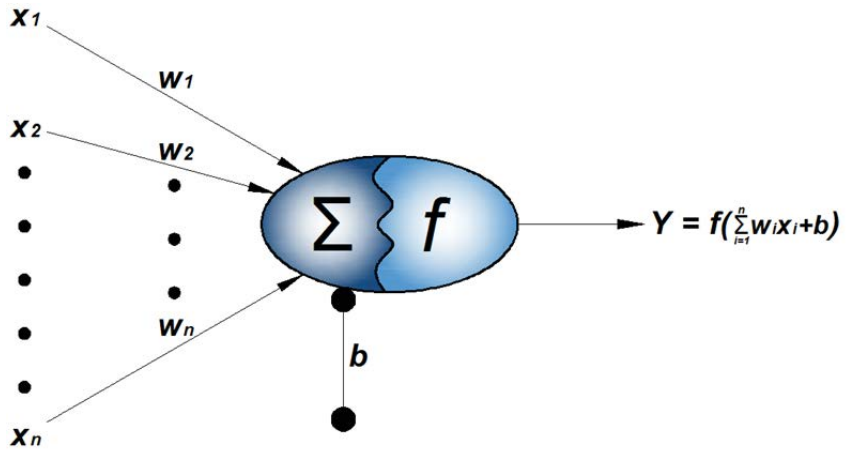


Figura 2.33 – Neurónio de uma RNA

Existem inúmeras funções de transferência que podem ser utilizadas, no entanto, três delas assumem destaque e são as mais utilizadas (Figura 2.34): a função *hard-limit*, a função linear e a função *log-sigmoid*.

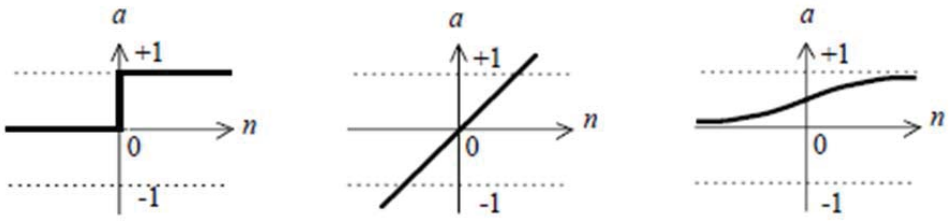


Figura 2.34 – Funções de transferência (Hagan, et al., 1996)

Teoricamente não existe limite para o número de *inputs*, *ouputs* e neurónios, mas a complexidade da rede e, especialmente, o número de neurónios nos *layers* intermédios têm um peso muito significativo no tempo de processamento. Também a precisão da aproximação dada pela RNA está fortemente influenciada pelo número de neurónios utilizados. De acordo com MATLAB (2006) uma RNA com dois *layers* de neurónios, que utilize uma função de transferência do tipo *log-sigmoid* no primeiro e do tipo linear no segundo, deve conseguir aproximar qualquer função com um número finito de descontinuidades.

O conceito subjacente às RNA é a aprendizagem. A partir do momento em que o número de *layers*, o número de neurónios e as funções de transferência estão escolhidos, a rede irá entrar num processo iterativo de aprendizagem para se aproximar de um determinado sistema objectivo, fazendo variar os pesos, w_i, de cada neurónio. Este processo é designado por treino da RNA, e exige um conjunto de dados de entrada que contenha um número suficiente de *inputs* e respectivos *outputs*.

Este conjunto de dados tem de ser preciso (muitas vezes valores obtidos experimentalmente e/ou em programas de simulação), em quantidade suficiente e representativo do espaço dos parâmetros que a RNA é suposto aproximar. Após o treino, a RNA deve ser testada e validada utilizando outro conjunto de dados, diferente do inicial. Os dados são processados pela RNA e

os resultados comparados, considerando-se, habitualmente, como admissível um erro de 5% (Magnier & Haghighat, 2010).

Existem vários algoritmos de treino com diferentes eficiências. O mais utilizado é o de *backpropagation*. Quando a rede recebe os primeiros dados de *input* ela define aleatoriamente os pesos dos neurónios e calcula os primeiros *outputs*. A diferença entre o valor calculado e o real constitui o erro desta primeira iteração. O algoritmo *backpropagation* é o responsável pelo cálculo desse erro e terá como objectivo minimizá-lo. Para tal, o valor dos pesos deve ser ajustado a cada nova iteração. A regra *backpropagation* obriga a que sejam os pesos da camada de saída os primeiros a serem ajustados e, posteriormente, os pesos das restantes camadas, de trás para a frente.

A utilização de RNA tem aumentado significativamente nos últimos anos, pois trata-se de uma ferramenta muito versátil com aplicação na resolução de problemas não só na engenharia, mas em áreas tão diversas como a medicina, economia, finanças, literatura e, obviamente, a matemática.

O potencial das RNA como ferramenta matemática para a aproximação de funções complexas tem sido aplicado com sucesso não só na avaliação do desempenho energético de sistemas de AVAC em edifícios (Kalogirou, 1999), mas também em diferentes áreas da engenharia, tais como a geotécnica, a acústica e as estruturas (Pala, et al., 2008; Lin, et al., 2009; Arslan, 2010). Recentemente vários investigadores têm utilizado RNA em problemas relacionados com a energia e o desempenho higrotérmico dos edifícios.

Kalogirou, et al. (2003), investigaram o uso de RNA para previsão dos coeficientes de pressão em aberturas num edifício com ventilação natural. Yang, et al., (2005), avaliaram o desempenho de modelos de RNA adaptativos ao serem aplicados em tempo real na previsão do consumo energético de edifícios. Ruano, et al., (2006) utiliza RNA para prever a temperatura dentro de um edifício escolar utilizando dados de simulações para treinar a rede. Utilizando modelos de RNA, Ayata, et al. (2007), previu a distribuição da velocidade do ar dentro de edifícios ventilados naturalmente. A iluminação natural de um edifício de escritórios foi estimada por uma RNA devidamente treinada com dados de uma campanha experimental efectuada por Kazanasmaz, et al., (2009), durante três meses. Mustafanaj, et al., (2010) estudaram o efeito da variação do algoritmo de aprendizagem, do número de camadas e do número de neurónios de uma RNA utilizada para prever a temperatura e a humidade relativa do ar num edifício de escritórios.

2.3.2.3 Optimização e algoritmos evolucionários

Optimização é um processo contínuo de procura e comparação de soluções possíveis de um determinado problema, até não se encontrar uma solução melhor (Deb, 2001).

A optimização multi-objectivo é um problema de decisão onde estão presentes dois ou mais objectivos habitualmente conflituosos entre si. A principal diferença face à optimização uni-objectivo reside no facto de nos problemas multi-objectivo não existir apenas uma solução

óptima mas sim um conjunto de soluções, onde cada uma representa um compromisso entre as diferentes funções objectivo em estudo.

A resolução de um problema de optimização multi-objectivo é matematicamente complexa e na maioria das situações resulta num procedimento bastante demorado. Uma forma corrente de evitar esta complexidade é transformar a optimização multi-objectivo num problema uni-objectivo através da adopção de uma única função objectivo que agregue todas as funções objectivo, afectando-as de um peso que caracterize a importância dada a cada uma. O problema desta metodologia é ser bastante subjectiva, uma vez que deixa à responsabilidade do decisor a definição dos pesos a dar a cada objectivo, assumindo que este tem um conhecimento antecipado da importância relativa dos mesmos.

- *Formulação matemática e conceitos básicos*

Um problema de optimização multi-objectivo engloba um determinado número de funções objectivo que se pretende minimizar ou maximizar. Estas funções podem estar sujeitas a restrições. Assim, um problema de optimização multi-objectivo pode ser formulado da seguinte forma (Deb, 2001):

$$\begin{array}{lll} \text{Minimizar} & f_m(X), & \text{m=1,2,…,M;} \\ \text{sujeito a} & g_j(X) \geq 0, & \text{j=1,2,…,J;} \\ & h_k(X) = 0, & \text{k=1,2,…,K;} \\ & x_i^{(\inf)} \leq x_i \leq x_i^{(\sup)}, & \text{i=1,2,…,n.} \end{array} \tag{2.11}$$

Uma solução do problema corresponde a um vector X com n componentes que correspondem às variáveis de decisão: $X=(x_1,x_2,\ldots,x_n)^T$.

O último conjunto de restrições corresponde aos limites inferiores e superiores, $x_i^{(inf)}$ e $x_i^{(sup)}$, impostos a cada variável de decisão. Estes limites constituem o espaço das variáveis de decisão, *D*.

Associado ao problema estão J restrições de desigualdade e K restrições de igualdade. Qualquer solução X que satisfaça simultaneamente todas as restrições impostas, limites, igualdade e desigualdade, é considerada uma solução admissível e o seu conjunto corresponde à região admissível, *S*. Desta forma, nem todas as soluções pertencentes ao espaço das variáveis de decisão são soluções admissíveis.

Habitualmente, para simplificar os procedimentos, as funções são todas convertidas em problemas de minimização através da seguinte expressão:

$$Max(Z) = -Min(-Z) \tag{2.12}$$

Ao contrário dos problemas de optimização uni-objectivo, numa optimização multi-objectivo as funções objectivo constituem um espaço multidimensional, a juntar ao espaço das variáveis de decisão. Este espaço adicional é designado por espaço dos objectivos, *Z*. Para cada solução X do espaço das variáveis de decisão existe um ponto no espaço dos objectivos, definido por

$f(X) = Z = (z_1,z_2,\ldots,z_M)^T$. A Figura 2.35 ilustra esta relação num problema com três variáveis de decisão e duas funções objectivo.

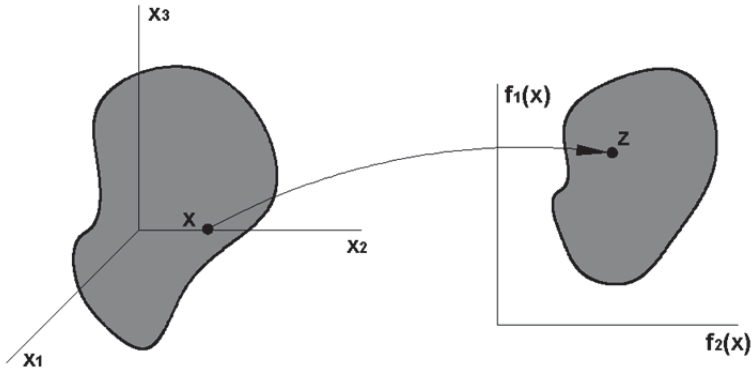


Figura 2.35 – Espaço das variáveis de decisão e espaço dos objectivos

A transição da optimização uni-objectivo para a multi-objectivo introduz um novo desafio que consiste em como comparar as diferentes soluções, uma vez que a cada uma corresponde um vector de valores objectivo e não um único escalar. Na optimização uni-objectivo o espaço de procura é totalmente ordenado em termos de função objectivo, uma vez que para quaisquer duas soluções x_1 e x_2 se verifica $f(x_1) \leq f(x_2)$ ou $f(x_2) < f(x_1)$, tal não acontece quando estão presentes mais do que uma função objectivo, como mostra a Figura 2.36 onde estão representadas quatro soluções **a**, **b**, **c** e **d** de um problema de optimização (minimização) com dois objectivos definidos pelas funções $f_1(x)$ e $f_2(x)$ (Costa, 2003).

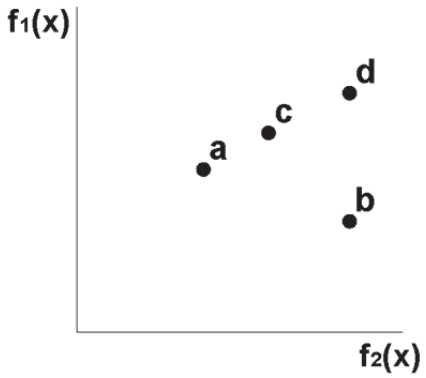


Figura 2.36 – Representação de soluções no espaço dos objectivos

A solução **a** é melhor do que a solução **c** nos dois objectivos. Por outro lado, a solução **b** é preferível à **d**, uma vez que embora seja igual no segundo objectivo é melhor no primeiro. Contudo, quando se comparam as soluções **a** e **b** não se pode afirmar que uma é melhor do que a outra, por um lado a solução **a** é melhor no segundo objectivo mas a solução **b** é melhor no primeiro.

Desta forma, surge o conceito de dominância de Pareto que permite a comparação de diferentes soluções. Diz-se que a solução x_1 domina a solução x_2, $x_1 \prec x_2$, se as seguintes duas condições se verificarem: 1) a solução x_1 não é pior do que a solução x_2 em nenhum

objectivo; 2) a solução x_1 é melhor do que solução x_2 em pelo menos um objectivo. Estas condições estão formuladas na equação (2.13):

$$f_m(x_1) \leq f_m(x_2) \forall\, m \in \{1,...,M\} \quad \wedge \quad \exists\, i \in \{1,...,M\} : f_i(x_1) < f_i(x_2) \tag{2.13}$$

O conceito de dominância de Pareto permite concluir que numa optimização verdadeiramente multi-objectivo uma solução dominante é a melhor escolha. Assim, através das relações de dominância que se estabelecem entre as diferentes soluções é possível classificá-las e ordená-las utilizando o ranking de Pareto. O melhor ranking é obtido pelas soluções mais dominantes.

A relação binária de dominância apresenta algumas propriedades importantes como a transitividade, a assimetria e a não-reflexividade, ou seja se $x \prec y$ e $y \prec z$ então $x \prec z$, se $x \prec y$ então $y \not\prec x$ e $x \not\prec x$.

No entanto, existem outras relações, entre as soluções, correntemente utilizadas em procedimentos de optimização multi-objectivo. Na Tabela 2.10 apresentam-se as mais relevantes com a notação correspondente bem como a respectiva interpretação.

Tabela 2.10 – Relações de dominância

Relação	**Notação**	**Interpretação**
Dominância total	$x \prec\prec y$	$f_m(x) < f_m(y)\ \forall\ m$
Dominância	$x \prec y$	$f_m(x) \leq f_m(y)\ \forall\ m\ \wedge$ $\exists i : f_i(x) < f_i(y)$
Dominância fraca	$x \preccurlyeq y$	$f_m(x) \leq f_m(y)\ \forall\ m$

A partir do conceito de dominância de Pareto pode-se definir o critério de optimalidade na escolha e comparação das soluções de um problema de optimização multi-objectivo. Uma solução *x* será uma solução óptima de Pareto se não for dominada por nenhuma outra solução da região admissível. As soluções óptimas de Pareto são caracterizadas por não permitirem a melhoria de um objectivo sem implicar a degradação de, pelo menos, um dos outros objectivos. A formulação matemática da definição de solução óptima de Pareto está apresentada na equação (2.14):

$$\neg \exists\, y \in S :\ y \prec x \tag{2.14}$$

Na Figura 2.37 as soluções 1, 2 e 3 são soluções óptimas de Pareto e são indiferentes entre si no sentido de não existir qualquer relação de dominância entre elas.

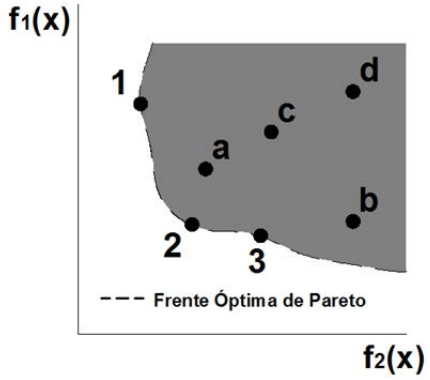


Figura 2.37 – Optimalidade de Pareto no espaço dos objectivos (adaptado de Costa, 2003)

Ao contrário dos problemas uni-objectivo, aqui não existe uma única solução para o problema mas sim um conjunto de soluções óptimas de Pareto, cada uma traduzindo um diferente compromisso entre os objectivos em causa. O conjunto das imagens no espaço dos objectivos de todas as soluções óptimas de Pareto constitui a superfície ou frente óptima de Pareto.

Desta forma, um processo de optimização multi-objectivo passa pela procura das soluções óptimas de Pareto, através de um algoritmo eficiente para o problema em causa, e após o seu conhecimento o decisor escolhe a solução óptima tendo em conta o nível de compromisso desejado entre os objectivos em estudo. Esta metodologia de tomada de decisão está esquematicamente representada na Figura 2.38.

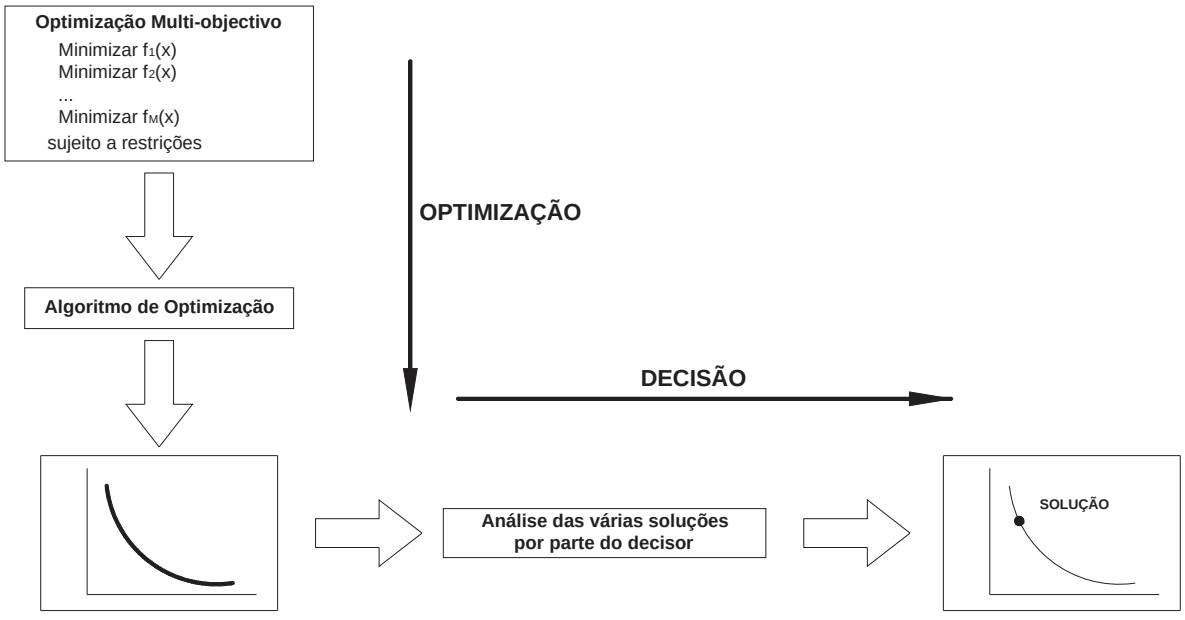


Figura 2.38 – Procedimento de optimização multi-objectivo (adaptado de Deb, 2001)

- *Método dos Pesos*

O Método dos Pesos transforma um problema de optimização multi-objectivo num problema uni-objectivo, através da utilização de uma única função que agrega todos os objectivos, afectando-os de um peso pré-definido pelo decisor. Assim, o processo fica muito simplificado

em termos matemáticos e computacionais. O peso escolhido para cada objectivo irá reflectir a importância dada pelo decisor a esse objectivo no contexto global do problema, implicando desta forma alguma subjectividade no processo de optimização. A escolha dos pesos também está dependente da ordem de grandeza das funções objectivo, que podem ser substancialmente diferentes. Para contornar este problema, habitualmente, recorre-se a uma normalização das funções objectivo, sendo a metodologia mais utilizada a definida na equação (2.15):

$$f_m^{\,trans}(x) = \frac{f_m(x) - f_m^{\,0}}{f_m^{\,max} - f_m^{\,0}} \tag{2.15}$$

em que

$f_m^{\,trans}(x)$	[-]	Função normalizada
$f_m(x)$	[-]	Função original
$f_m^{\,0}$	[-]	Valor mínimo da função original
$f_m^{\,max}$	[-]	Valor máximo da função original

Utilizando este procedimento as funções objectivo tomam valores entre 0 e 1, ficando garantida a mesma ordem de grandeza entre elas.

Após a normalização, a função objectivo é definida como uma combinação linear dos diversos objectivos, afectados dos respectivos pesos, e o problema de optimização uni-objectivo pode ser formulado:

$$\begin{aligned} &\text{Minimizar} && F(X) = \sum_{m=1}^{M} w_m \cdot f_m^{\,trans}(x) && \\ &\text{sujeito a} && g_j(X) \geq 0, && \text{j=1,2,…,J;} \\ & && h_k(X) = 0, && \text{k=1,2,…,K;} \\ & && x_i^{(\inf)} \leq x_i \leq x_i^{(\sup)}, && \text{i=1,2,…,n.} \end{aligned} \tag{2.16}$$

O coeficiente w_m corresponde ao peso atribuído à função m. Os pesos aplicados a cada função devem obedecer às seguintes condições:

$$w_m \in [0,1] \quad \wedge \quad \sum_{m=1}^{M} w_m = 1 \tag{2.17}$$

Neste método está implícito que a tomada de decisão é feita antes da procura, uma vez que os pesos atribuídos aos objectivos, por parte do decisor, vão ser fundamentais na solução final. A resolução deste problema uni-objectivo vai conduzir a uma única solução óptima, que será uma solução óptima de Pareto, sempre que os pesos aplicados forem todos positivos.

Através da utilização de diferentes combinações de pesos também se pode obter um conjunto de soluções óptimas de Pareto. A principal desvantagem é que este procedimento nunca poderá encontrar todas as soluções óptimas de Pareto se a frente for não convexa, é o que acontece na Figura 2.37 onde o ponto 3 não poderá ser obtido.

Para além disso, a obtenção de múltiplas soluções implica diversas execuções do algoritmo de optimização uni-objectivo, perdendo-se desta forma a mais-valia associada ao tempo de processamento. A Figura 2.39 ilustra esquematicamente a metodologia associada a este procedimento de optimização.

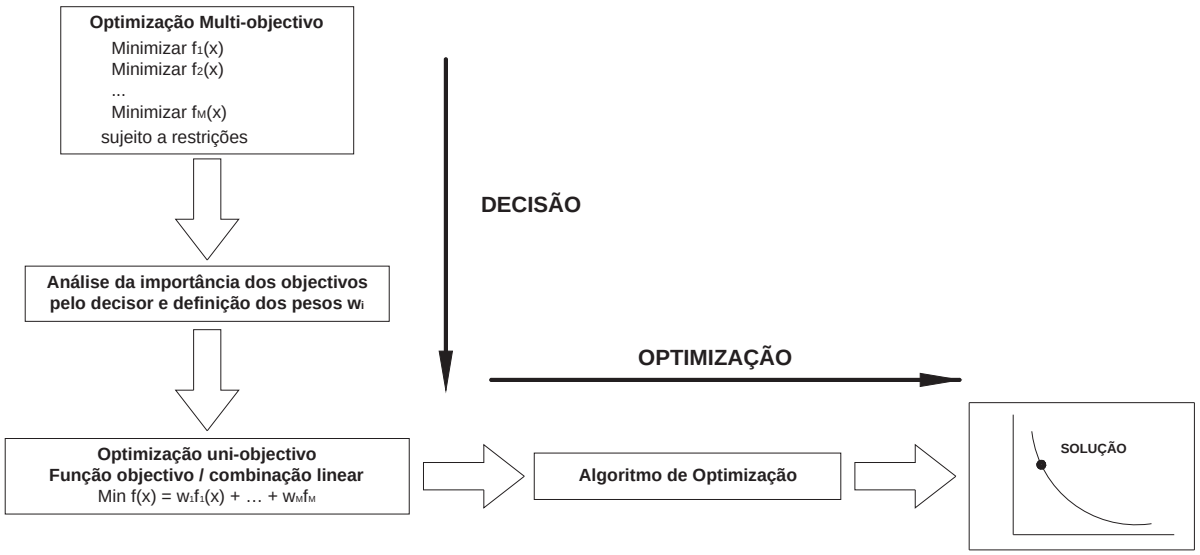


Figura 2.39 – Procedimento de optimização pelo Método dos Pesos (adaptado de Deb, 2001)

- *Algoritmos evolucionários*

Uma forma de realizar uma optimização multi-objectivo é através da utilização de algoritmos evolucionários. Estes algoritmos baseiam-se na Teoria da Evolução de Darwin e englobam o conceito de sobrevivência dos mais fortes. Nos algoritmos evolucionários cada solução é considerada como um indivíduo de uma determinada população, em que a sua força é medida pela forma como resolve, melhor ou pior, o problema em causa. Na população os indivíduos podem cruzar-se para criar descendentes, fazendo com que progenitores e descendentes compitam entre si pela inclusão na nova geração. Uma vez que apenas os mais fortes, melhores soluções para o problema, vão sobrevivendo, a população vai iterativamente sendo melhorada em cada geração.

A grande vantagem dos algoritmos evolucionários prende-se com a utilização de um conjunto de soluções (população) em cada geração, em vez da melhoria de uma única solução, tornando-se muito mais eficiente na procura das soluções óptimas de Pareto. Por outro lado, numa optimização multi-objectivo pretende-se encontrar um conjunto bem distribuído de aproximações às soluções óptimas de Pareto. Os algoritmos evolucionários, utilizando mecanismos para preservar a diversidade das soluções na população, garantem um conjunto de soluções representativas do espaço dos objectivos.

Um algoritmo evolucionário é um método estocástico que se baseia em operadores probabilísticos. Assim, contrariamente aos algoritmos determinísticos, os algoritmos

evolucionários, para um mesmo problema, podem produzir soluções diferentes de cada vez que são utilizados.

Nas últimas décadas foram desenvolvidos vários algoritmos evolucionários que se podem dividir em dois grupos, em função da utilização ou não do conceito de elitismo. A utilização do elitismo garante que soluções valiosas não são perdidas durante o processo e que a qualidade da população de soluções só pode melhorar.

O primeiro grupo, os que não incluem o elitismo, contém os primeiros algoritmos evolucionários nomeadamente o *Vector Evaluated Genetic Algotrithm* (VEGA) (Schaffer, 1985), o *Multiple Objective Genetic Algorithm* (MOGA) (Fonseca & Fleming, 1993), o *Niched Pareto Genetic Algorithm* (NPGA) (Horn, et al., 1994) e o *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm* (NSGA) (Srinivas & Deb, 1994).

O segundo grupo, que inclui o elitismo, engloba os algoritmos mais recentes. O primeiro algoritmo evolucionário elitista foi o *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGAII) (Deb, et al., 2000), seguindo-se-lhe o *Strenght Pareto Evolutionary Algorithm* (SPEA2) (Zitzler, et al., 2001).

Neste trabalho foi utilizado o NSGAII uma vez que é um algoritmo que se encontra devidamente testado e validado e disponível numa *ToolBox* do programa MATLAB. Este algoritmo é um dos mais eficientes em termos de convergência e diversidade das soluções (Zitzler, et al., 2000; Jain, et al., 2005). A sua estrutura é relativamente simples e, desta forma, requere menos esforço computacional e consequentemente menos tempo de processamento do que outros algoritmos.

O algoritmo NSGAII utiliza o conceito de *ranking* entre os indivíduos de modo a classificá-los em frentes de acordo com o grau de dominância. Assim, os que estão na primeira frente são considerados a melhor solução daquela geração, enquanto que na última frente estão os piores (Figura 2.40).

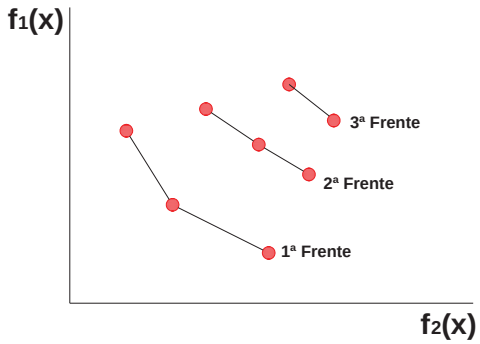


Figura 2.40 – Distribuição das soluções por frentes (adaptado de Costa, 2003)

Adicionalmente o algoritmo NSGAII inclui um operador essencial, o *Crowding Distance*. Após a classificação dos indivíduos, e consequente colocação em frentes, este operador vai ordená-los de acordo com a sua distância aos pontos vizinhos da mesma frente. Para garantir a diversidade e representatividade das soluções no espaço dos objectivos, alargando desta forma

a frente de Pareto, os indivíduos que apresentarem uma *Crowding Distance* maior são preferidos em relação aos outros.

Assim, após a classificação em frentes e cálculo da *Crowding Distance*, pode ser efectuado o processo de selecção da próxima geração e, desta forma, o algoritmo avança iterativamente até alcançar as soluções que constituem a frente de Pareto.

3 ESTUDO EXPERIMENTAL PRELIMINAR

3.1 OBJECTIVOS E METODOLOGIA

Definiu-se como um dos objectivos centrais desta Tese a caracterização do desempenho em serviço dos edifícios escolares. Pretende-se aferir sobre as condições de conforto térmico e qualidade do ar interior (QAI) que são proporcionadas aos utilizadores destes edifícios em condições correntes de utilização. Tal tarefa reverte-se de inúmeras especificidades e requer uma preparação cuidada. Desta forma, foi delineada uma campanha experimental preliminar de medição de parâmetros higrotérmicos em quatro edifícios escolares.

Esta avaliação decorreu em dois edifícios escolares não-reabilitados e dois edifícios recentemente intervencionados. Os dois edifícios não-reabilitados são representativos de tipologias correntes. A campanha de medições assentou na monitorização em contínuo de parâmetros higrotérmicos e de caracterização da QAI e em medições pontuais do caudal de ventilação em algumas das salas de aula, sob diferentes condições de envolvente.

A campanha experimental preliminar de avaliação do desempenho foi delineada com os seguintes objectivos:

— Promover um primeiro contacto com o desempenho higrotérmico dos edifícios escolares em condições de serviço;

— Familiarizar com os procedimentos e técnicas experimentais necessários para a caracterização do desempenho higrotérmico e da QAI;

— Conhecer as condições de qualidade do ambiente interior das salas de aula de edifícios escolares existentes não-reabilitados;

— Avaliar o efeito da reabilitação do edifício nas condições ambientais proporcionadas aos utilizadores das salas de aula;

— Aferir sobre a adequabilidade das soluções de ventilação adoptadas na reabilitação destas escolas em relação à legislação actual e face a outras normas e regulamentos internacionais;

— Definir, a partir dos resultados obtidos, a estratégia a seguir neste trabalho em termos de avaliação experimental do desempenho dos edifícios escolares;

— Concluir sobre a necessidade de intervenção em edifícios escolares com tipologia blocos 3x3 e monobloco e, tendo em consideração os resultados obtidos nas escolas reabilitadas, definir uma estratégia sustentável para a mesma;

— Aproveitar os resultados obtidos nas escolas não-reabilitadas para a validação dos modelos computacionais de simulação do desempenho que serão posteriormente utilizados no procedimento de optimização de soluções construtivas.

Os edifícios estudados foram escolhidos por representarem um determinado sistema construtivo tipo, de acordo com o descrito no ponto §2.1.2.1. Em cada escola foram monitorizadas duas salas de aula e a campanha abrangeu medições em contínuo e medições pontuais.

Foram registados, em cada sala de aula, durante uma semana, os seguintes parâmetros:

— Temperatura;

— Humidade relativa;

— Concentração de dióxido de carbono (CO_2).

Foram, ainda, efectuadas medições pontuais do caudal de ventilação em algumas das salas, sob diferentes condições de envolvente. A Figura 3.1 retrata a estratégia utilizada na campanha de medições.

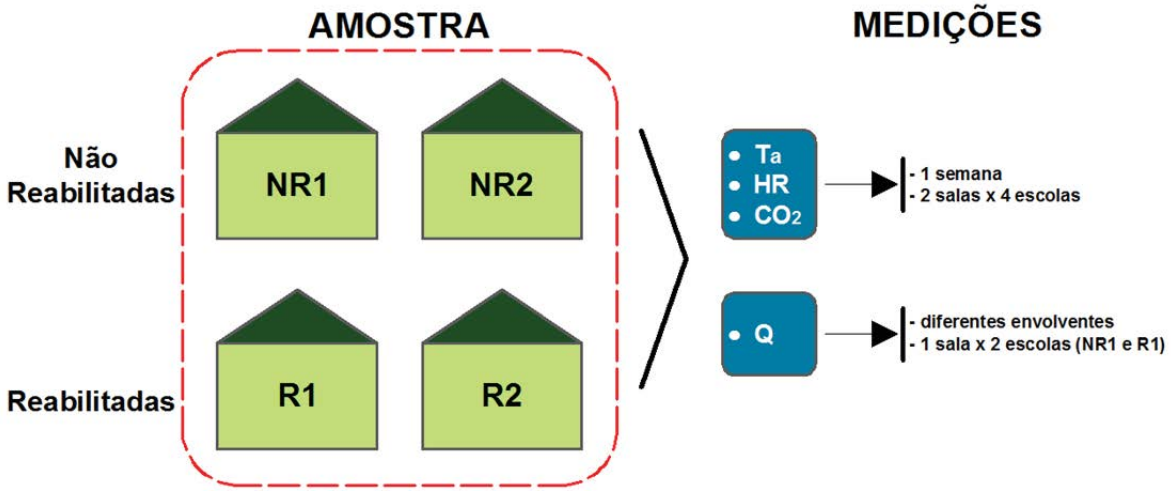


Figura 3.1 – Campanha experimental preliminar

Para cumprir esta estratégia foram utilizados equipamentos portáteis para registo da temperatura, humidade relativa e concentração de CO_2.

Estes equipamentos foram colocados nas salas de aula durante uma semana, junto às paredes, procurando evitar-se localizações que pudessem alterar os resultados, como próximas de portas, janelas, fontes de calor, entradas de ar, etc.. Foram colocados a uma altura de cerca de 1,1 m, de acordo com o especificado na norma ISO 7726 (ISO, 1998).

Para o registo da concentração de CO_2 foram utilizados medidores *TelAire 7001*. Estes equipamentos são do tipo Infra Vermelho Não Dispersivo (NDIR) e apresentam uma resolução de ±1 ppm e um erro máximo admissível de ±50 ppm ou 5% da leitura (o que for

mais elevado). Estes equipamentos cumprem os requisitos da Nota Técnica 2 publicada pela ADENE para apoio às auditorias periódicas de QAI em edifícios de serviços existentes no âmbito do RSECE (ADENE, 2009).

Os medidores de CO_2 funcionam associados a um *data logger HOBO-H08-007-02*, responsável pelo armazenamento dos dados e também pela medição da temperatura e da humidade relativa. Este *data logger* tem uma precisão de ±0,7 ºC e uma resolução de ±0,4 ºC, para medições de temperatura. Em relação ao registo da humidade relativa, a precisão do equipamento é de ±5%.

Quando o medidor de CO_2 é acoplado ao *data logger* para registo da informação, a sua gama de medição fica limitada a um *output* máximo de 2,5 V, a que corresponde uma concentração de 2500 ppm.

A Figura 3.2 mostra os equipamentos utilizados nas medições durante a campanha experimental preliminar.



Figura 3.2 – Equipamento utilizado para a monitorização em contínuo

Os dados climáticos exteriores apresentados, temperatura e humidade relativa, foram obtidos na estação meteorológica localizada no aeroporto Francisco Sá Carneiro no Porto (Pedras Rubras) e fornecidos pelo Instituto de Meteorologia (IM).

Adicionalmente foram realizadas medições pontuais do caudal de ventilação nas salas de aula, utilizando o Método do Gás Traçador e a Técnica do Declive. Este procedimento assenta na medição ao longo do tempo da concentração de um gás traçador, previamente introduzido no espaço. Esse gás deve ser pouco comum na atmosfera e obedecer a determinados requisitos, nomeadamente (Etheridge e Sandberg, 1996):

— Não deve ser um constituinte habitual do ambiente que está a ser estudado;

— Deve ser facilmente mensurável, incluindo a baixas concentrações;

— Não deve ser tóxico nem trazer qualquer risco para a saúde;

— Deve ser não inflamável e não explosivo;

— Não deve ser dispendioso;

— Deve ser ambientalmente inerte.

Neste trabalho o gás traçador utilizado foi o hexafluoreto de enxofre (SF_6) e a sua concentração nas salas de aula foi medida através de um analisador de gás fotoacústico da *Innova* (refª. 1312), representado na Figura 3.3.



Figura 3.3 – Analisador de gás fotoacústico

O procedimento experimental para a determinação do caudal de ventilação através do Método do Gás Traçador e da Técnica do Declive está regulamentado pelas normas ISO 12569 (ISO, 2000) e ASTM E741-00 (ASTM, 2000).

- *Procedimento numérico do Método do Gás Traçador – Técnica do Declive*

A variação temporal da concentração de um gás numa determinada zona depende apenas da sua concentração no ar admitido e no ar extraído e da produção interna desse mesmo gás. Assim, a equação diferencial que traduz este fenómeno é a seguinte:

$$V \cdot \frac{dC(t)}{dt} = G + Q \cdot C_{ex} - Q \cdot C(t) \tag{3.1}$$

em que

V	[m^3]	Volume
$C(t)$	[ppm]	Concentração do gás
t	[s]	Tempo
G	[cm^3/s]	Produção interna do gás
Q	[m^3/s]	Caudal de ventilação
C_{ex}	[ppm]	Concentração do gás no exterior

A solução da equação (3.1) pode ser obtida por integração, resultando:

$$C(t) = C_{ex} + \frac{G}{Q} + \left(C_{in} - C_{ex} - \frac{G}{Q} \right) \cdot e^{-\frac{Q}{V} \cdot t} \tag{3.2}$$

em que

C_{in}	[ppm]	Concentração inicial do gás no interior

Uma vez que o gás traçador deve possuir concentrações baixas no ar exterior e interior (abaixo das utilizadas nos ensaios), pode ser considerada nula na equação (3.2) a parcela referente ao ar exterior. Portanto, a solução pode ser simplificada para:

$$C(t) = \frac{G}{Q} + \left(C_{in} - \frac{G}{Q} \right) \cdot e^{-\frac{Q}{V} \cdot t} \tag{3.3}$$

Como também não existe produção interna do gás traçador no espaço em estudo, a solução final da equação (3.1) é:

$$C(t) = C_{in} \cdot e^{-\frac{Q}{V} \cdot t} \tag{3.4}$$

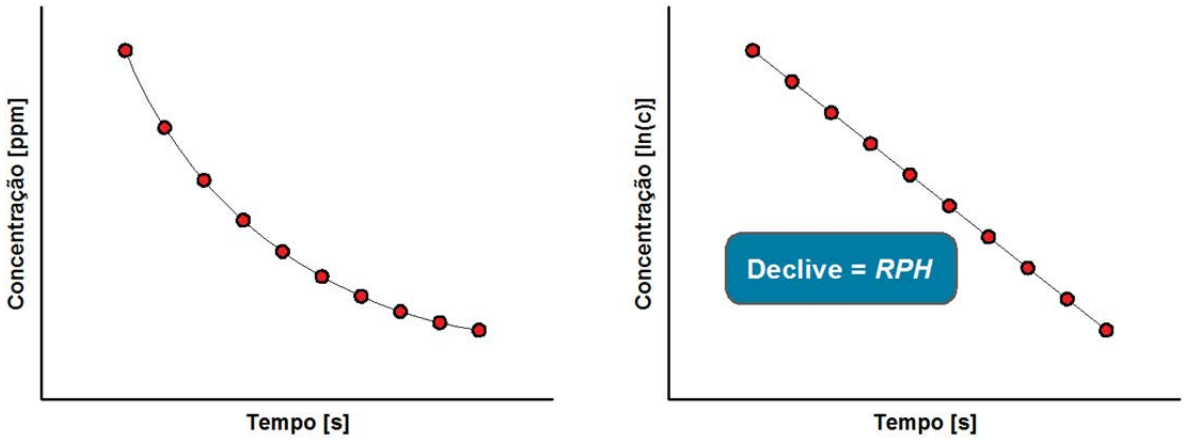
Rearranjando esta última equação, obtém-se:

$$\frac{Q}{V} = RPH = \frac{\ln\left(\frac{C_{in}}{C(t)} \right)}{t} \tag{3.5}$$

em que

RPH [h^{-1}] Renovações horárias

Assim, para o cálculo das infiltrações ou caudais de ventilação em espaços que podem ser considerados como uma única zona, é suficiente introduzir um gás traçador até se atingir uma concentração inicial uniforme, C_{in}. Então, basta registar a evolução da concentração desse gás com o tempo, que num gráfico ln(C) versus tempo, pela equação (3.5), é uma recta (Figura 3.4). O módulo do declive desta recta, *Q/V*, é a incógnita que permite o cálculo das renovações horárias, *RPH*.



a) b)

Figura 3.4 – Exemplo da Técnica do Declive. a) decaimento do gás traçador; b) gráfico do logaritmo da concentração versus tempo (adaptado de Awbi, 2003)

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA ESTUDADA

3.2.1 Escolas não-reabilitadas

3.2.1.1 Enquadramento

A escola NR1 é uma escola básica do 2.º e 3.º ciclo, situada na freguesia de Paranhos, no Porto. Foi construída em 1997 e inaugurada em Agosto de 1998.

Esta escola enquadra-se na tipologia monobloco. O edifício principal da escola tem dois pisos, situando-se o pavilhão e o campo de jogos a Noroeste.

Nesta escola foram monitorizadas em contínuo duas salas de aula, pertencentes ao corpo mais a Oeste. Uma das salas de aula está situada no rés-do-chão (r/c) e a outra no 1º piso. As duas estão orientadas, aproximadamente, a Oeste. Na sala de aula do 1º piso foi medido o caudal de ventilação considerando diferentes situações de envolvente.

As medições na escola NR1 decorreram durante a semana de 15 a 21 de Novembro de 2008. Durante as medições as salas de aula estiveram ocupadas e a escola funcionou normalmente com excepção da sexta-feira, último dia de medições, em que a utilização do edifício não foi a habitual, uma vez que coincidiu com um dia de greve.

A Figura 3.5 mostra uma vista aérea do edifício, evidenciando o corpo onde se situam as salas de aula objecto de monitorização.



Figura 3.5 – Escola NR1

A escola NR2 também é uma escola básica do 2.º e 3.º ciclo, situada na freguesia de Aldoar, no Porto. Foi inaugurada em Fevereiro de 1993.

O edifício da escola NR2 insere-se na tipologia blocos 3x3, com uma pequena variante em relação ao modelo original uma vez que os corpos do edifício estão ligados. No entanto, as soluções construtivas utilizadas são iguais às das escolas em que os corpos/blocos estão fisicamente separados.

O edifício principal desta escola é constituído por três corpos, tendo um deles apenas um piso e os restantes dois pisos. O espaço escolar inclui ainda um pavilhão desportivo que foi construído numa fase posterior, um campo de jogos e um pequeno edifício de apoio que serve de balneários.

As duas salas de aula que foram monitorizadas pertencem ao corpo central do edifício, ambas no 1º piso e orientadas a Nordeste. Não foi possível efectuar as medições em pisos diferentes porque nesta escola as salas de aula são todas no 1º piso, estando o r/c destinado a receber os serviços administrativos e académicos.

As medições decorreram no período compreendido entre 17 e 23 de Janeiro de 2009, com a escola em condições típicas de serviço não havendo registo de qualquer alteração ao funcionamento normal das aulas.

A Figura 3.6 mostra uma vista aérea do edifício, evidenciando o corpo onde se situam as salas de aula objecto de monitorização.



Figura 3.6 – Escola NR2

3.2.1.2 Caracterização construtiva

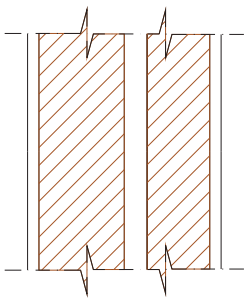
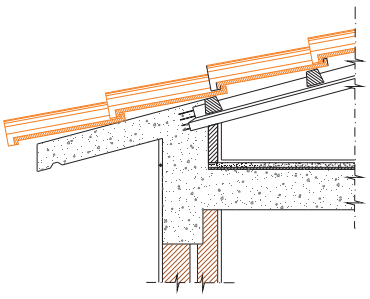
O desempenho higrotérmico de um edifício está decisivamente dependente das propriedades dos elementos construtivos da sua envolvente exterior. Portanto, qualquer tentativa de interpretação dos resultados obtidos na campanha de monitorização da temperatura e da humidade relativa tem de ser realizada tendo por base as soluções construtivas que foram utilizadas em cada escola.

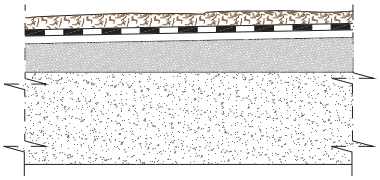
As duas escolas não-reabilitadas que foram monitorizadas são edifícios relativamente recentes, com períodos de construção próximos e que, como tal, apresentam muitas afinidades construtivas. De facto, tal como foi descrito no ponto §2.1.2.1, os edifícios monobloco (escola NR1) são uma evolução dos edifícios bloco 3x3 (escola NR2).

Em termos construtivos, a única diferença significativa entre os dois edifícios prende-se com a solução adoptada na cobertura. A escola NR1 apresenta uma cobertura inclinada, com desvão não-útil, e a escola NR2 uma cobertura plana do tipo tradicional, ambas sem isolamento térmico.

Na Tabela 3.1 apresentam-se as características térmicas da parede exterior corrente, das coberturas e dos vãos envidraçados, designadamente os respectivos coeficientes de transmissão térmica, U [W/(m^2.ºC)], e o factor solar dos envidraçados com e sem protecção solar activada, $g_{\perp v}$ [-] e $g_{\perp}^{'}$ [-].

Tabela 3.1 – Caracterização construtiva da envolvente exterior das escolas não-reabilitadas

Elemento	Descrição	Esquema	Propriedades
Parede Exterior Corrente	Alvenaria dupla de tijolo com caixa-de-ar, rebocada. Sem isolamento térmico.		U = 0,96 W/(m^2.ºC)
Cobertura (Escola NR1)	Cobertura inclinada com revestimento em telha cerâmica e desvão não útil. Sem isolamento térmico. Laje maciça em betão armado.		U = 3,40 W/(m^2.ºC) (fluxo ascendente) U = 2,30 W/(m^2.ºC) (fluxo descendente)

Cobertura (Escola NR2)	Cobertura plana do tipo tradicional, com laje em betão armado, sem isolamento térmico.		U = 1,60 W/(m^2.ºC) (fluxo ascendente) U = 1,40 W/(m^2.ºC) (fluxo descendente)
Vãos Envidraçados	Caixilharia de alumínio de correr, sem corte térmico e com vidro simples de 8 mm. Persiana pelo exterior em plástico.	-	U = 6,20 W/(m^2.ºC) $g_{\perp v}$ = 0,82 (vão sem protecção) $g_{\perp}{}'$ = 0,07 (vão com protecção)

3.2.1.3 Caracterização dos sistemas de aquecimento e de ventilação

Também no que se refere aos sistemas de aquecimento e de ventilação se observa uma semelhança entre os dois edifícios, já que nenhuma das escolas dispõe de qualquer sistema centralizado de aquecimento e/ou de ventilação.

A ventilação das salas de aula realiza-se, apenas, por abertura das janelas exteriores e por infiltrações de ar. As salas de aula dispõem de janelas interiores basculantes que permitem trocas de ar com o corredor do edifício. A Figura 3.7 ilustra uma sala de aula tipo, pormenorizando as aberturas interiores, na escola NR1 e NR2.



Figura 3.7 – Salas de aula das escolas NR1 e NR2

3.2.2 Escolas reabilitadas

3.2.2.1 Enquadramento

A escola R1, desde o início da sua actividade em 1958/59, já recebeu várias intervenções de melhoria das suas condições, quer ampliações, quer reparações. A escola hoje em dia recebe alunos desde o jardim-de-infância até ao ensino secundário e situa-se na freguesia de Massarelos, no Porto.

O corpo onde se inserem as salas de aula escolhidas para a monitorização foi construído na década de 80 e sofreu uma profunda intervenção de reabilitação durante o ano lectivo de 2007/2008, estando concluída desde Outubro de 2008.

Nesta escola foram monitorizadas em contínuo duas salas de aula, uma localizada no r/c e orientada a Sul e a outra localizada no 1º piso e orientada a Oeste. As medições decorreram no período de 6 a 12 de Dezembro de 2008. Na sala de aula do r/c foi ainda medido o caudal de ventilação utilizando o Método do Gás Traçador e a Técnica do Declive, considerando duas situações: o sistema mecânico de extracção ligado (ventilação mecânica da sala) e desligado (ventilação natural da sala).

Durante as medições as salas de aula estiveram ocupadas e a escola funcionou normalmente de terça a sexta-feira (na segunda-feira foi feriado).

A Figura 3.8 mostra a escola e apresenta uma perspectiva do edifício estudado antes e após a intervenção de reabilitação.



Figura 3.8 – Escola R1

A escola R2 insere-se no conjunto dos edifícios Tipo I – Edifícios Históricos, definidos em §2.1.2.1. Trata-se de um edifício da autoria do arquitecto Marques da Silva datado de 1932-1933. É actualmente uma escola de ensino secundário e situa-se na freguesia de Cedofeita, no Porto.

Esta escola foi reabilitada ao abrigo do programa governamental apresentado em §2.1.2.2 sendo um dos quatro edifícios piloto (fase 0 do programa). A intervenção iniciou-se em 2007 tendo ficado concluída no final do ano de 2008.

Na escola R2 foram monitorizadas em contínuo duas salas de aula, ambas situadas no r/c e com orientação a Este, aproximadamente. A escolha das salas de aula a monitorizar obedeceu a algumas restrições quer burocráticas quer inerentes ao próprio funcionamento do edifício, impedindo a realização das medições em salas localizadas em pisos diferentes ou com orientações distintas.

O período de medições foi de 25 a 30 de Abril de 2009 e as salas de aula estiveram ocupadas de acordo com o normal funcionamento da escola. Esta foi a única escola em que as medições não decorreram durante o período de aquecimento, situação que, como seria expectável, afectou decisivamente os resultados obtidos.

A Figura 3.9 mostra a escola R2 e apresenta uma perspectiva da ala do edifício onde foram efectuadas as medições, antes e após a intervenção de reabilitação.



Figura 3.9 – Escola R2

3.2.2.2 Caracterização construtiva

Ao contrário do descrito na caracterização construtiva das duas escolas não-reabilitadas, nas escolas reabilitadas os dois edifícios são construtivamente muito diferentes. Não só o edifício original data de períodos perfeitamente distintos, o que implica soluções construtivas diferenciadas, como também a abordagem estratégica aplicada na reabilitação foi substancialmente diferente. A intervenção na escola R1 foi mais pontual e claramente menos intrusiva do que na escola R2, implicando, obviamente, custos mais reduzidos.

A diversidade das soluções construtivas utilizadas em cada uma das escolas não permite agrupá-las, pelo que se apresentam as características térmicas dos elementos das envolventes separadamente. A Tabela 3.2 mostra a caracterização da escola R1 e a Tabela 3.3 da escola R2.

Tabela 3.2 – Caracterização construtiva da envolvente da escola R1

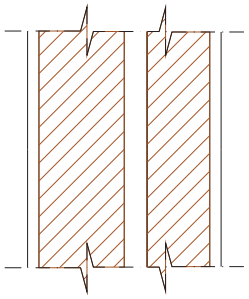
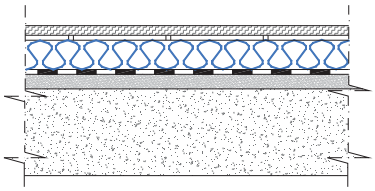
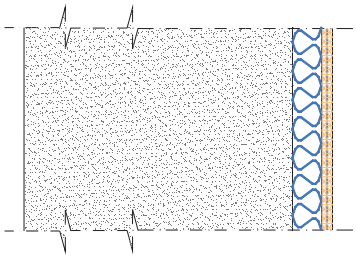
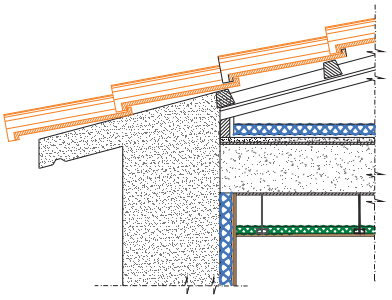
Elemento	Descrição	Esquema	Propriedades
Parede Exterior Corrente	Alvenaria dupla de tijolo com caixa-de-ar, rebocada. Sem isolamento térmico.		U = 0,96 W/(m^2.ºC)
Cobertura	Cobertura plana, com revestimento em chapa de zinco e isolamento térmico de 6 cm em placas de poliestireno extrudido.		U = 0,53 W/(m^2.ºC) (fluxo ascendente) U = 0,41 W/(m^2.ºC) (fluxo descendente)
Vãos Envidraçados	Caixilharia de madeira com vidro duplo 6+8+6 com o vidro interior laminado. Grelha de sombreamento exterior constituída por lâminas metálicas fixas.	-	U = 2,00 W/(m^2.ºC) $g_{\perp v}$ = 0,73 (vão sem protecção) $g_{\perp}^{'}$ = 0,09 (vão com protecção)

Tabela 3.3 – Caracterização construtiva da envolvente da escola R2

Elemento	Descrição	Esquema	Propriedades
Parede Exterior Corrente	Alvenaria de granito (existente), isolamento com placas de "Wallmate" com 6 cm de espessura, forrado com duas placas de gesso cartonado.		U = 0,46 W/(m^2.ºC)
Cobertura	Cobertura inclinada com revestimento em telha cerâmica e desvão não útil. Manta de lã mineral, com 10 cm, sobre laje de esteira e tecto falso com isolamento acústico em lã mineral (4 cm).		U = 0,36 W/(m^2.ºC) (fluxo ascendente) U = 0,34 W/(m^2.ºC) (fluxo descendente)
Vãos Envidraçados	Vidro duplo laminado em ambas as faces "3x3+12+3x3". Protecção solar interior com estores enroláveis.	-	U = 2,80 W/(m^2.ºC) $g_{\perp v}$ = 0,71 (vão sem protecção) $g_{\perp}{}'$ = 0,38 (vão com protecção)

3.2.2.3 Caracterização dos sistemas de aquecimento e ventilação

Os sistemas de aquecimento aplicados nas salas de aula das duas escolas são idênticos. Em ambas a escolha recaiu sobre um sistema de aquecimento por radiadores com circuito de água quente.

No caso da escola R1 este sistema pode ser controlado pelo utilizador, individualmente, em cada sala de aula. Na escola R2 o controlo de temperatura nas salas de aula é efectuado por sondas de ambiente que comandam válvulas motorizadas modulantes na entrada da tubagem de alimentação aos radiadores de cada sala.

Em relação à ventilação das salas de aula as soluções utilizadas são conceptualmente semelhantes. As duas escolas utilizam um sistema mecânico de ventilação em que a admissão de ar exterior é realizada através de aberturas nas fachadas e a extracção é mecânica.

Na escola R1 cada sala de aula está equipada com grelhas auto-reguláveis junto à caixa-de-estore para admissão de ar exterior e dispõe de um sistema mecânico de velocidade variável para a extracção. O equipamento mecânico de extracção é individual e a velocidade é regulada pelo utilizador, permitindo um caudal máximo de 400 m^3/h. Caso o sistema

mecânico esteja desligado a ventilação das salas de aula é apenas natural. A Figura 3.10 mostra uma sala de aula da escola R1 destacando os equipamentos de aquecimento e ventilação (grelhas de admissão auto-reguláveis).

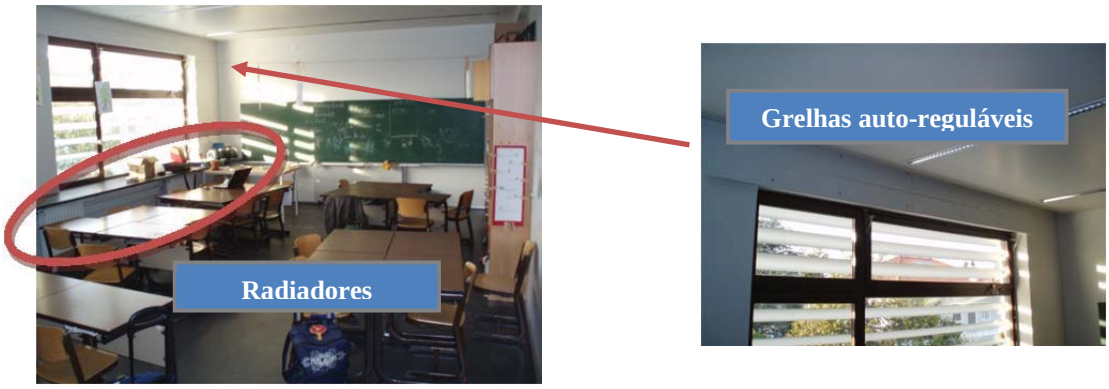


Figura 3.10 – Sala de aula da escola R1 incluindo pormenor da grelha auto-regulável de admissão de ar

A ventilação das salas de aula da escola R2 recorre a um ventilador mecânico de extracção de ar, sendo a compensação obtida directamente do exterior, através de grelhas na fachada de cada sala. Caso o ventilador mecânico não esteja em funcionamento as salas são ventiladas naturalmente.

Para controlar a temperatura do ar de compensação de cada sala, minimizando o aparecimento de correntes de ar com temperaturas muito baixas, os radiadores estão instalados à frente das grelhas de admissão de ar. O ar passa através da grelha na fachada e de seguida pelo radiador, entrando na zona ocupada com a sua temperatura corrigida.

Os ventiladores utilizados permitem um caudal máximo de extracção de 660 m^3/h e podem ser controlados individualmente, em cada sala, no quadro eléctrico, através de botoneira própria. A Figura 3.11 mostra uma sala de aula da escola R2 evidenciando os equipamentos de aquecimento e ventilação (grelhas de admissão).

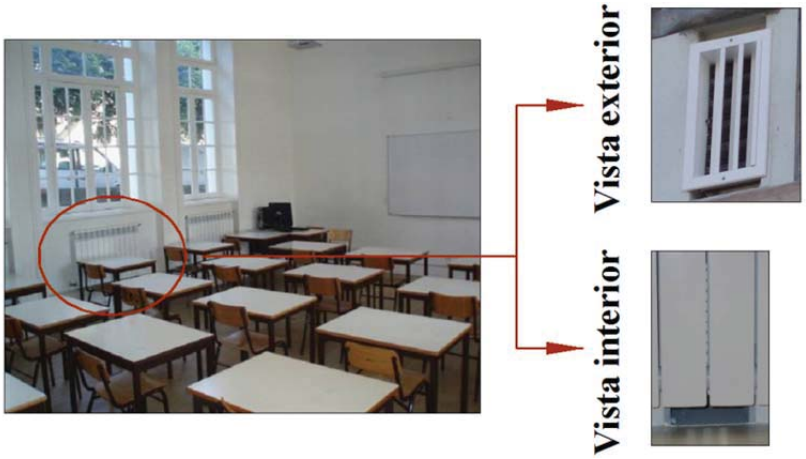


Figura 3.11 – Sala de aula da escola R2 com pormenor da admissão de ar e do radiador

3.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.3.1 Introdução

A campanha experimental preliminar de medições incidiu na monitorização em contínuo da temperatura, da humidade relativa e da concentração de CO_2 e na medição pontual do caudal de ventilação das salas de aula. Daqui resultou um elevado número de resultados/medições cuja apresentação exaustiva nesta Tese se considera desnecessária face aos objectivos fixados. Desta forma, são expostos apenas alguns dos resultados obtidos nas medições, considerados como representativos, disponibilizando-se no Anexo I desta Tese todos os restantes.

A organização do texto inclui, inicialmente, uma análise dos resultados separadamente para a temperatura e para a humidade relativa, seguindo-se uma visão conjunta dos dois parâmetros na avaliação do conforto térmico das salas de aula. É aplicado o método gráfico simplificado de avaliação do conforto térmico, proposto pela norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2010), complementando-se com a utilização dos modelos adaptativos de conforto, quer o proposto na mesma norma ASHRAE quer o proposto pelo LNEC (Matias, 2010). No final são apresentados e discutidos os resultados obtidos nas medições da concentração de CO_2 e dos caudais de ventilação, permitindo-se, assim, concluir sobre a QAI nas salas de aula das escolas monitorizadas.

De facto, os resultados obtidos nas medições permitem retirar algumas ilações imediatas relativamente ao desempenho em serviço das escolas monitorizadas. No entanto, tal análise deve ser cuidada e devidamente enquadrada face às limitações inerentes à metodologia utilizada, nomeadamente:

— O espaço temporal em que foram realizadas as medições é limitado e corresponde a condições climáticas exteriores específicas que podem ser consideradas como representativas apenas de uma determinada época do ano. Qualquer extrapolação para um desempenho anual do edifício é abusiva;

— A amostra escolhida em cada escola não permite uma caracterização completa do edifício. Não é possível avaliar o efeito da orientação das salas de aula no seu desempenho e, no caso das escolas NR2 e R2, as salas monitorizadas são no mesmo piso, não permitindo sequer a comparação do desempenho entre pisos.

3.3.2 Temperatura

3.3.2.1 Escolas não-reabilitadas

As medições efectuadas evidenciaram que as salas de aula das escolas não-reabilitadas não garantem aos seus utilizadores condições adequadas de temperatura, pelo menos durante a estação de aquecimento.

A Figura 3.12 mostra os resultados obtidos na monitorização da temperatura nas salas de aula da escola NR1 e a Figura 3.13 nas salas de aula da escola NR2. Em ambas é ainda apresentada a variação da temperatura exterior.

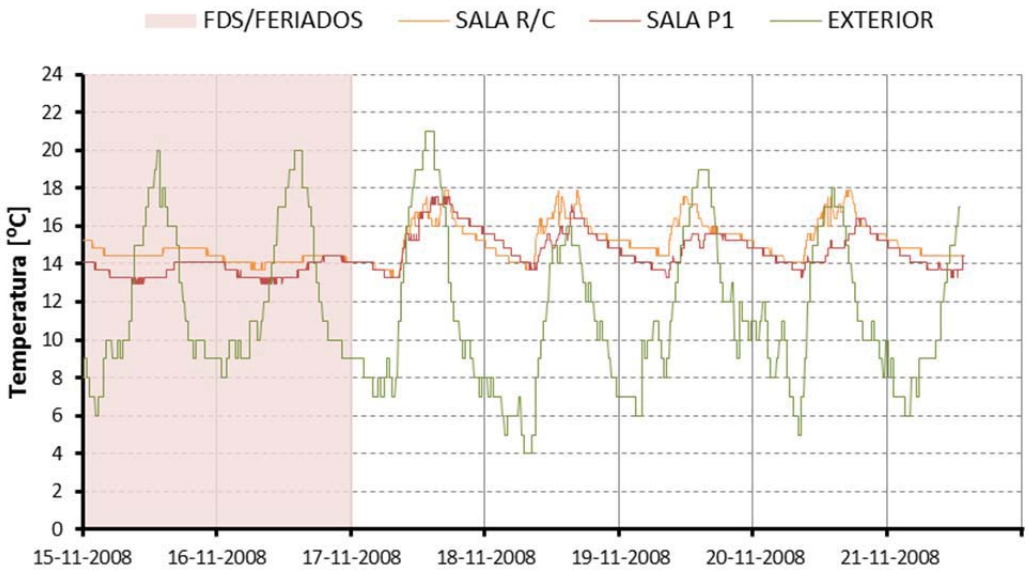


Figura 3.12 – Variação da temperatura na escola NR1

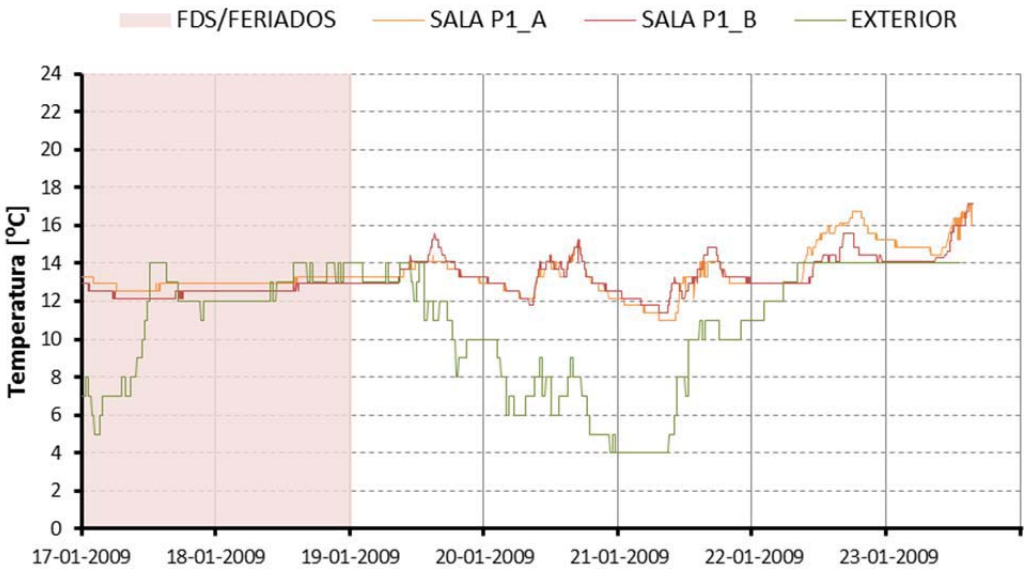


Figura 3.13 – Variação da temperatura na escola NR2

As temperaturas registadas são muito baixas ao longo de todo o período de medição. Quando comparadas com o valor de referência regulamentar proposto pelo RCCTE (2006) para a estação de aquecimento, 20 ºC, verifica-se que em nenhum instante esse valor foi atingido, ficando até sempre abaixo dos 18 ºC.

Em alguns períodos, mesmo com a sala de aula provavelmente ocupada, a temperatura no interior é inferior à temperatura exterior, como por exemplo nas duas salas de aula da escola NR1 nos registos do dia 17 de Novembro.

Para complementar esta avaliação apresenta-se na Tabela 3.4 uma análise estatística dos resultados, incluindo o valor médio, o máximo, o mínimo e desvio padrão. Para cada escola mostram-se os valores obtidos em cada uma das salas de aula e no conjunto da escola. Uma vez que o objectivo é avaliar e compreender o desempenho em serviço, no cálculo foi apenas considerado o período teórico de ocupação das salas de aula, ou seja, nos dias úteis das 8:30 às 18:00. No entanto, não há garantia que as salas de aula tenham estado de facto ocupadas durante esse intervalo.

Tabela 3.4 – Análise estatística do registo da temperatura nas escolas não-reabilitadas

	ESCOLA NR1			**ESCOLA NR2**		
	SALA R/C	SALA P1	**TOTAIS**	SALA P1_A	SALA P1_B	**TOTAIS**
média	16,22	15,20	15,71	14,18	14,08	14,13
máximo	17,90	17,52	17,90	16,76	16,01	16,76
mínimo	13,32	13,32	13,32	10,99	11,38	10,99
desvio padrão	1,00	1,11	1,17	1,21	0,90	1,07

Concluindo, os valores médios da temperatura registada nas salas de aula das escolas não-reabilitadas são muito baixos, entre 14,1 e 16,2 ºC, indicando que as condições ambientais de conforto não são adequadas.

3.3.2.2 Escolas reabilitadas

O cenário observado nas escolas reabilitadas é substancialmente diferente, embora não sendo cumprido o valor referido na regulamentação. A Figura 3.14 mostra os resultados registados nas salas de aula da escola R1 e a Figura 3.15 nas salas de aula da escola R2. Tal como para as escolas não-reabilitadas é ainda apresentada a temperatura exterior.

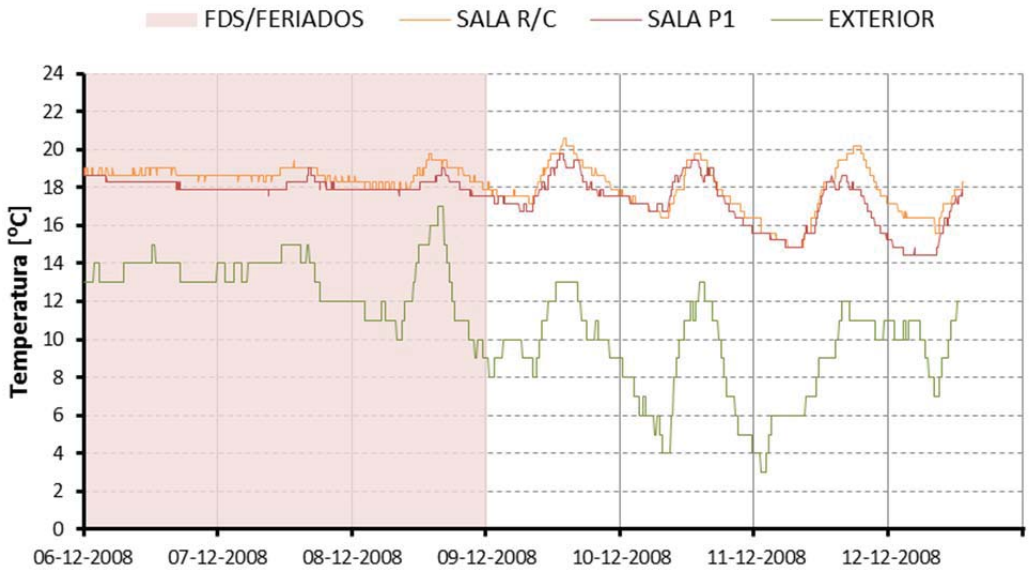


Figura 3.14 – Variação da temperatura na escola R1

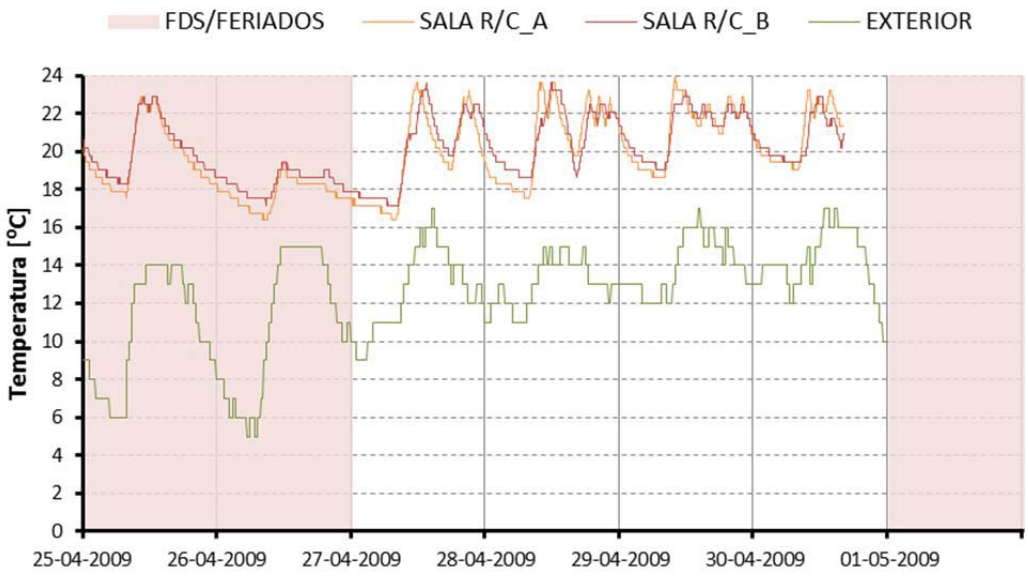


Figura 3.15 – Variação da temperatura na escola R2

A temperatura nas escolas reabilitadas está mais próxima do valor de referência regulamentar mas, no caso da escola R1, ainda abaixo deste. Tendo em consideração que os ocupantes das salas de aula desta escola têm controlo sobre o sistema de aquecimento parece poder concluir-se que os utilizadores consideraram-se termicamente confortáveis com temperaturas inferiores à indicada na regulamentação em vigor. Durante o período em que decorreram as medições nesta escola a temperatura exterior foi invulgarmente baixa podendo indiciar que os ocupantes mostraram alguma adaptação a temperaturas inferiores.

Estes resultados abrem caminho a uma discussão sobre a forma de definição dos limites regulamentares. De facto, a imposição de um valor de referência para a temperatura é muito pouco flexível e pode ser responsável pelo sobredimensionamento de alguns sistemas de aquecimento. A utilização de modelos adaptativos ou até de critérios probabilísticos permitiria ter em consideração alguma capacidade de adaptação dos utilizadores ao ambiente interior onde estão inseridos e, por esta via, conduzir a uma diminuição dos custos associados aos equipamentos de climatização.

Em relação à escola R2 os resultados são muito próximos dos valores de referência regulamentares, no entanto, deve ser referido que estas medições decorreram durante um período muito ameno que, obviamente, condicionou favoravelmente o desempenho do edifício.

A Tabela 3.5 apresenta o resultado da análise estatística efectuada ao registo da temperatura nas escolas reabilitadas.

Tabela 3.5 – Análise estatística do registo da temperatura nas escolas reabilitadas

	ESCOLA R1			ESCOLA R2		
	SALA R/C	SALA P1	**TOTAIS**	SALA P1_A	SALA P1_B	**TOTAIS**
média	18,53	18,04	18,29	21,71	21,47	21,59
máximo	20,57	19,81	20,57	24,01	23,63	24,01
mínimo	14,85	14,85	14,85	17,14	17,52	17,14
desvio padrão	1,26	1,14	1,22	1,31	1,24	1,28

Os valores médios da temperatura registada nas salas de aula das escolas reabilitadas variaram entre 18,0 e 21,7 ºC, indicando condições ambientais de conforto significativamente mais adequadas do que nas escolas não-reabilitadas.

3.3.3 Humidade relativa

A monitorização da humidade relativa evidenciou que esta não se constitui como um problema nas salas de aula, quer nas escolas não-reabilitadas, quer nas reabilitadas. No entanto, salienta-se novamente que se trata de uma amostragem muito limitada temporalmente e, como tal, não é possível extrapolar esta conclusão para outras estações do ano.

Todavia, embora se observe que a flutuação da humidade relativa se limita a intervalos tipicamente considerados como adequados, parece existir uma tendência de valores ligeiramente superiores nas salas de aula das escolas não-reabilitadas.

A título de exemplo apresenta-se na Figura 3.16 o registo da humidade relativa numa escola não-reabilitada, a escola NR1, e na Figura 3.17 o registo numa escola reabilitada, a escola R1.

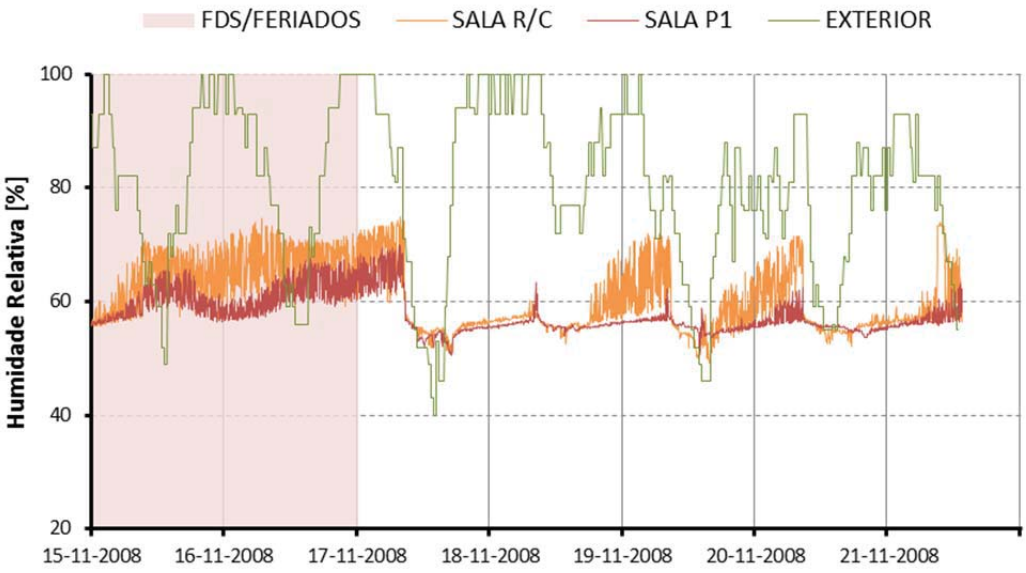


Figura 3.16 – Variação da humidade relativa na escola NR1

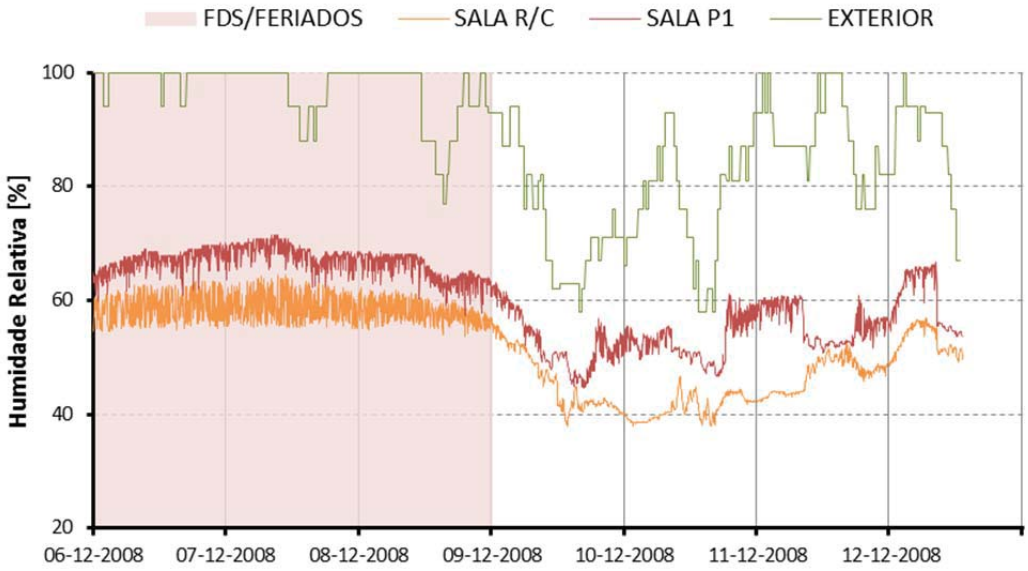


Figura 3.17 – Variação da humidade relativa na escola R1

A Tabela 3.6 inclui um resumo da análise estatística efectuada aos registos da humidade relativa. Apresenta-se o valor médio, máximo, mínimo e o desvio padrão para cada escola monitorizada, ou seja, considerando em cada edifício as duas salas de aula em que foram realizadas medições. Tal como na análise da temperatura os resultados apresentados referem-se exclusivamente ao período teórico de ocupação das salas de aula.

Tabela 3.6 – Análise estatística do registo da humidade relativa nas quatro escolas monitorizadas

	ESCOLA NR1	**ESCOLA NR2**	**ESCOLA R1**	**ESCOLA R2**
média	55,82	58,78	48,25	46,85
máximo	74,10	82,40	57,80	58,30
mínimo	49,10	52,00	37,90	37,30
desvio padrão	3,28	4,73	4,47	3,95

Os valores da Tabela 3.6 confirmam que a humidade relativa nas salas de aula das escolas não-reabilitadas é ligeiramente superior à observada nas escolas reabilitadas. Em termos médios nas escolas não-reabilitadas a humidade relativa varia entre os 55% e os 60%, enquanto nas escolas reabilitadas esse valor reduz-se, aproximadamente, 10%.

3.3.4 Conforto térmico

3.3.4.1 Método gráfico simplificado

Habitualmente o procedimento para avaliar *in situ* o conforto térmico passa pela medição dos parâmetros ambientais e individuais necessários ao cálculo dos índices de conforto PMV e PPD. Face ao elevado número de parâmetros ambientais necessários e respectiva

complexidade de medição em termos de equipamentos, o seu registo é usualmente realizado num espaço de tempo relativamente curto.

Contudo, existem outros procedimentos simplificados que estão previstos nas normas internacionais para avaliação do conforto térmico em espaços interiores, tal como descrito anteriormente no ponto §2.2.1.2.

Assim, como forma de complementar a análise individual efectuada ao registo da temperatura e da humidade relativa, procedeu-se à aplicação da metodologia gráfica simplificada, proposta pela norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2010) e apresentada em §2.2.1.2 – Figura 2.23.

Tal metodologia prevê a determinação da temperatura operativa no interior do espaço que está a ser estudado, todavia, tendo em conta os pressupostos apresentados em §2.2.1.2, considerou-se que para os objectivos deste trabalho se pode considerar como razoável a utilização da temperatura monitorizada como aproximação à temperatura operativa.

Esta aproximação introduz erros e, como tal, qualquer análise mais detalhada dos resultados apresentados deve ser devidamente ponderada. No estudo aqui apresentado não foi esse o objectivo, apenas se pretende, através da utilização de uma metodologia muito simplificada, ter uma ideia dos níveis de conforto térmico das salas de aula monitorizadas.

Para além da temperatura operativa, a metodologia gráfica requer a determinação da humidade absoluta do ar a partir das medições da temperatura e da humidade relativa. Esse cálculo pode ser realizado através das seguintes equações:

$$p_{sat} = 610{,}5 \cdot e^{\left(\frac{17{,}269 \cdot T_a}{237{,}3 + T_a}\right)} \tag{3.6}$$

$$HR = \frac{p_a}{p_{sat}} \times 100 \Leftrightarrow p_a = \frac{HR \cdot p_{sat}}{100} \tag{3.7}$$

$$x_{ar} = 0{,}62198 \cdot \frac{p_a}{p - p_a} \tag{3.8}$$

em que

p_{sat}	[Pa]	Pressão de saturação do ar
T_a	[ºC]	Temperatura do ar
HR	[%]	Humidade relativa
p_a	[Pa]	Pressão parcial do vapor de água
x_{ar}	[kg/kg]	Humidade absoluta do ar
p	[Pa]	Pressão atmosférica (101325 Pa)

Este método prevê duas zonas de conforto referentes a diferentes tipos de vestuário (0,5 e 1,0 clo) que correspondem à situação de Verão e à de Inverno. Na sua definição foi considerada a velocidade do ar inferior a 0,2 m/s e admite-se que os ocupantes dos espaços realizam tarefas sobretudo sedentárias a que correspondem valores de actividade metabólica

entre 1,0 e 1,3 met. As zonas de conforto foram definidas admitindo que 80% dos ocupantes estão satisfeitos com o ambiente térmico do espaço.

Na edição da norma ASHRAE 55 actualmente em vigor (datada de 2010) a humidade absoluta é limitada apenas superiormente, indicando-se um valor máximo de 12 g/kg, não sendo especificado qualquer valor mínimo. Contudo, de acordo com a norma, ultrapassar o valor máximo não implica obrigatoriamente uma situação de desconforto térmico. Nessas situações propõe-se o cálculo exacto dos índices PMV e PPD para avaliação mais precisa do conforto térmico do espaço em estudo.

- *Escolas não-reabilitadas*

A aplicação da metodologia gráfica simplificada à avaliação do ambiente térmico nas salas de aula das escolas não-reabilitadas confirma que as condições oferecidas aos utilizadores destes espaços não são adequadas.

A Figura 3.18 mostra os resultados obtidos para os registos nas salas de aula da escola NR1 e a Figura 3.19 para a escola NR2.

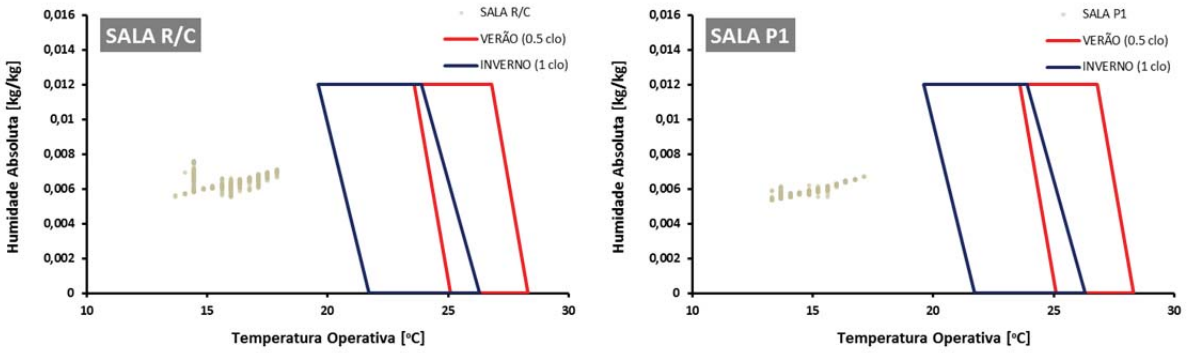


Figura 3.18 – Avaliação do conforto térmico na escola NR1 por aplicação do método gráfico simplificado

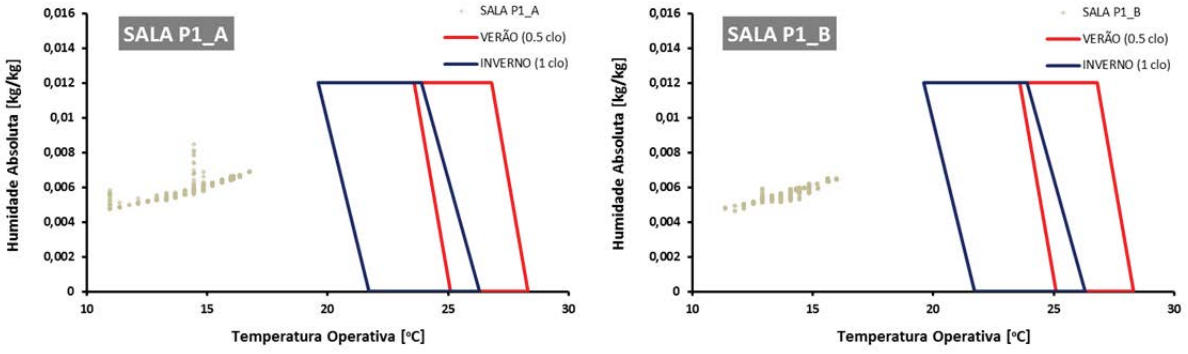


Figura 3.19 – Avaliação do conforto térmico na escola NR2 por aplicação do método gráfico simplificado

Os resultados obtidos são inequívocos, em todos os instantes das medições os valores registados estão claramente fora da zona de conforto.

- *Escolas reabilitadas*

A aplicação deste método aos registos obtidos nas medições nas escolas reabilitadas indica uma melhoria das condições de conforto em relação às observadas nas escolas não-reabilitadas.

A Figura 3.20 mostra os resultados obtidos nas salas de aula da escola R1 e a Figura 3.21 para a escola R2.

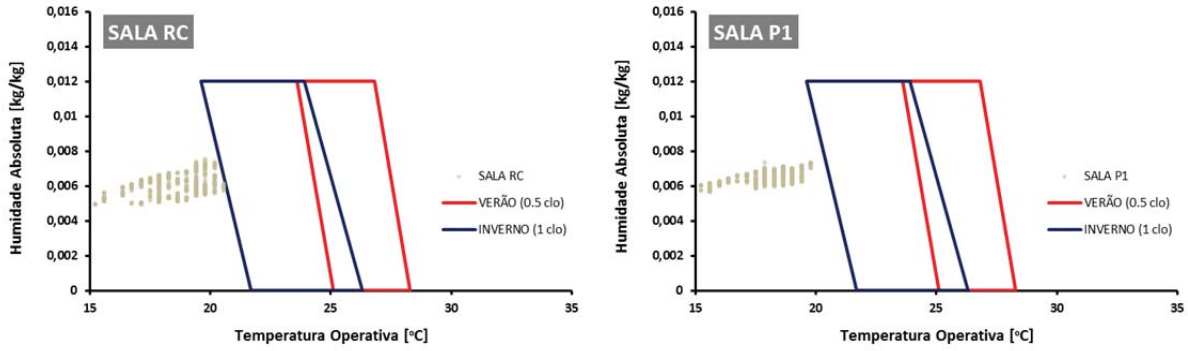


Figura 3.20 – Avaliação do conforto térmico na escola R1 por aplicação do método gráfico simplificado

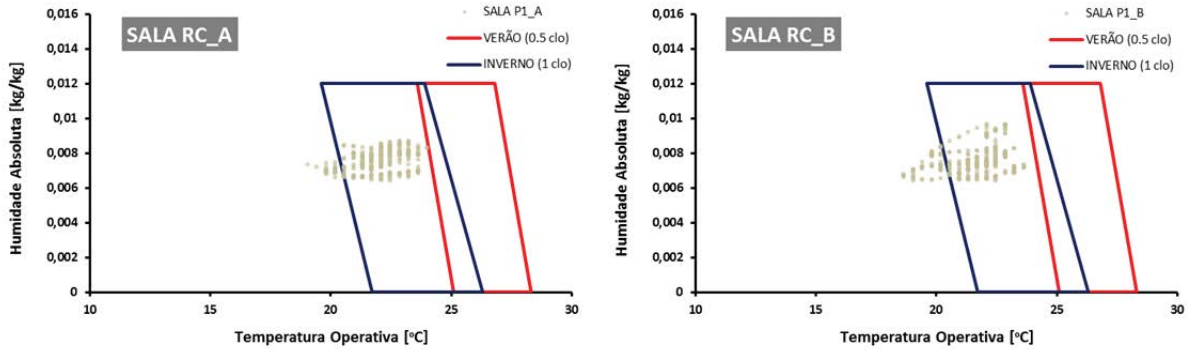


Figura 3.21 – Avaliação do conforto térmico na escola R2 por aplicação do método gráfico simplificado

No caso da escola R2 a grande maioria dos registos está inserida nas zonas de conforto propostas pela norma indicando que as salas apresentaram níveis de qualidade claramente adequados. Porém, tal como referido anteriormente, esta análise não pode ser dissociada do facto de estas medições terem decorrido durante um período de temperaturas exteriores muito amenas, ao contrário do observado nas outras três escolas.

Na escola R1 os resultados estão fora da zona de conforto apesar de os ocupantes das salas de aula terem controlo sobre os sistemas de aquecimento. Estes resultados parecem confirmar uma das maiores limitações apontadas a estes modelos, a não consideração da adaptação dos ocupantes aos ambientes em que estão inseridos.

No seguimento do discutido no ponto §3.3.2.2 verifica-se que este método gráfico proposto pela ASHRAE também é bastante limitativo em relação à capacidade de adaptação dos

ocupantes dos espaços. De facto, de acordo com este método o valor mínimo de temperatura que conduz a ambientes confortáveis é 20 ºC e apenas para a situação de humidade absoluta máxima (12 g/kg). Para valores de humidade inferiores a temperatura mínima de conforto é ainda mais elevada.

3.3.4.2 Modelos adaptativos

Nos pontos anteriores evidenciaram-se algumas das limitações das metodologias apresentadas para avaliação do ambiente térmico de um espaço interior.

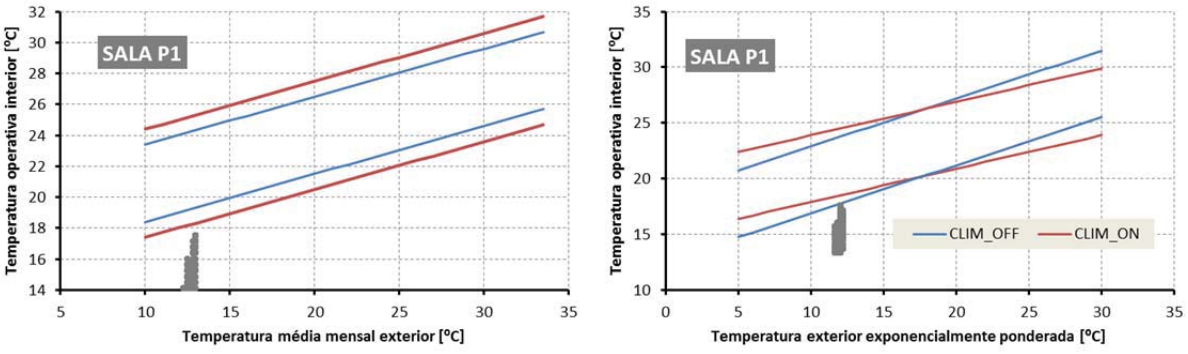
Por princípio a utilização de metodologias adaptativas para avaliar o conforto térmico de um espaço interior faz todo o sentido. A grande dificuldade prende-se com os limites a considerar, que dificilmente podem ser os mesmos para realidades socioculturais distintas. A capacidade de adaptação das populações não é idêntica, estando fortemente condicionada pelos hábitos instalados, resultantes em grande medida do clima existente no local. Assim, a generalização de uma metodologia adaptativa pode ser uma tarefa algo complexa.

Neste estudo foram utilizados dois modelos adaptativos de conforto térmico, descritos no ponto §2.2.1.2. O modelo referido na ASHRAE 55 (ASHRAE, 2010) e o modelo proposto pelo LNEC (Matias, 2010).

Tal como no método gráfico simplificado, também estes modelos incluem a temperatura operativa como dado de entrada e, como tal, as simplificações enunciadas anteriormente, bem como o cuidado na interpretação dos resultados obtidos, devem estar sempre presentes.

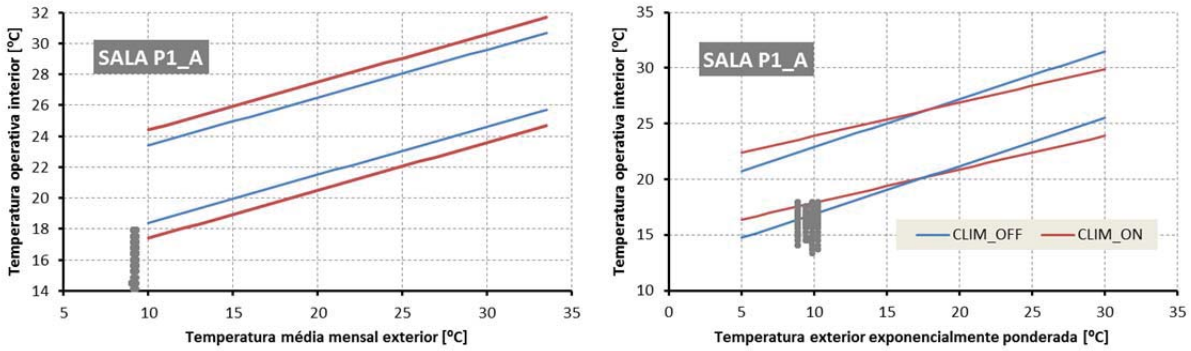
- *Escolas não-reabilitadas*

Uma vez que os registos obtidos nas duas salas de aula de cada escola não-reabilitada são semelhantes, optou-se por incluir neste texto apenas uma delas. A Figura 3.22 ilustra os resultados numa das salas de aula da escola NR1 e a Figura 3.23 numa das salas de aula da escola NR2.



a) b)

Figura 3.22 – Avaliação do conforto térmico na escola NR1 por aplicação de modelos adaptativos. a) modelo da ASHRAE; b) modelo do LNEC



a) b)

Figura 3.23 – Avaliação do conforto térmico na escola NR2 por aplicação de modelos adaptativos. a) modelo da ASHRAE; b) modelo do LNEC

Os modelos adaptativos confirmam que as condições nas salas de aula das escolas não-reabilitadas não são adequadas, embora se observe que estas metodologias permitem uma maior flexibilidade na temperatura dos espaços. Ao contrário do observado com o método gráfico simplificado agora, durante alguns períodos de medição, os registos já estão dentro da zona de conforto.

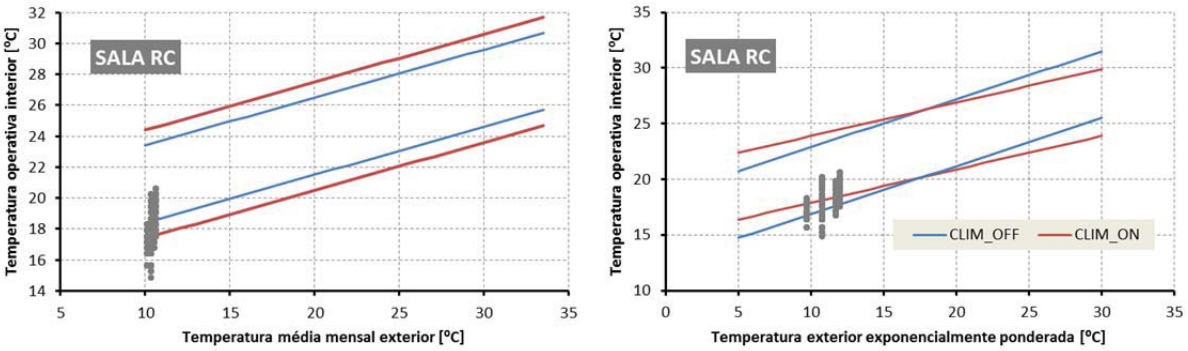
Destaca-se ainda o facto de o modelo de conforto adaptativo proposto pela ASHRAE apenas ser aplicável a temperaturas médias mensais exteriores superiores a 10 ºC. Este limite pode ser restritivo em medições realizadas durante o período de aquecimento, tal como sucedeu com a escola NR2. Na realidade climática portuguesa certamente existirão inúmeras situações em que este limite não é cumprido, daí que o modelo apresentado pelo LNEC já permita que a temperatura exterior baixe até aos 5 ºC.

O modelo no LNEC, que pressupõe uma aceitabilidade das condições ambientais por parte de 90% dos ocupantes do espaço, no caso da escola NR2 já inclui uma percentagem significativa dos registos dentro da zona de conforto. As escolas não-reabilitadas não dispõem de sistema de climatização e, como tal, o limite a considerar é a linha azul.

- *Escolas reabilitadas*

A aplicação dos modelos adaptativos aos registos das escolas reabilitadas ajuda a justificar a temperatura na escola R1 que, de acordo com as outras metodologias, parecia ser demasiado baixa, embora os ocupantes do espaço tivessem a oportunidade de a modificar.

A Figura 3.24 ilustra os resultados para a sala de aula da escola R1, localizada no r/c, por aplicação dos modelos adaptativos de conforto. Na sala de aula do 1º piso o resultado foi semelhante.

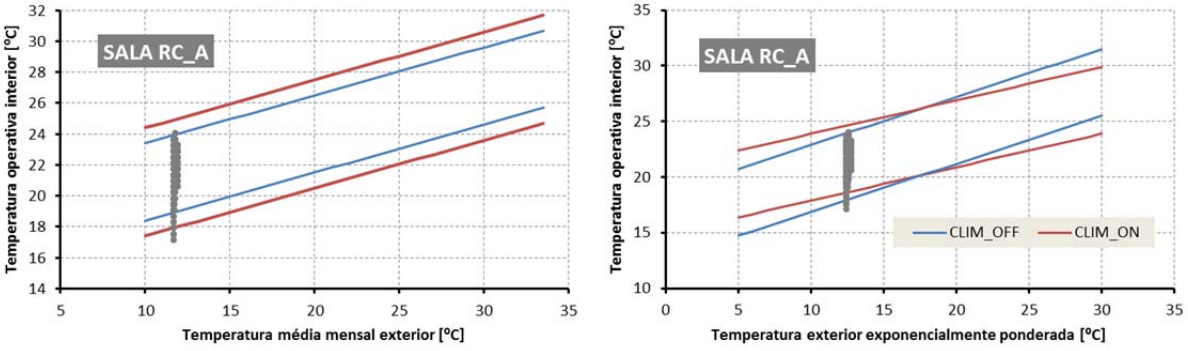


a) b)

Figura 3.24 – Avaliação do conforto térmico na escola R1 por aplicação de modelos adaptativos. a) modelo da ASHRAE; b) modelo do LNEC

Considerando o modelo adaptativo proposto pelo LNEC verifica-se que a grande maioria dos registos se encontram dentro da zona de conforto. Mesmo na metodologia proposta pela ASHRAE, observa-se que uma percentagem significativa dos instantes de medição se encontra dentro da zona de conforto. Uma vez que os resultados apresentados incluem os registos durante o período teórico de ocupação das salas de aula, é possível que os valores mais baixos da temperatura correspondam a situações em que a ocupação das salas de aula ainda não é total.

Em relação à escola R2 os modelos adaptativos confirmam que as condições ambientais são perfeitamente adequadas. A Figura 3.25 mostra os resultados para uma das salas aula monitorizadas.



a) b)

Figura 3.25 – Avaliação do conforto térmico na escola R2 por aplicação de modelos adaptativos. a) modelo da ASHRAE; b) modelo do LNEC

3.3.4.3 Síntese crítica

Globalmente, olhando para os resultados obtidos na avaliação do conforto térmico quer das escolas não-reabilitadas quer das reabilitadas, salientam-se os seguintes aspectos:

— Existe uma enorme discrepância entre a aplicação da metodologia gráfica simplificada e os modelos adaptativos;

— Os modelos adaptativos parecem reflectir melhor a realidade sentida pelos ocupantes dos espaços;

— A inclusão na regulamentação das metodologias adaptativas pode significar uma redução clara nos custos com os sistemas de climatização.

3.3.5 Qualidade do Ar Interior

3.3.5.1 Introdução

O estudo da QAI das salas de aula incluiu o registo contínuo da concentração de CO_2 durante os períodos de monitorização e medições pontuais do caudal de ventilação em algumas salas de aula através do Método do Gás Traçador e da Técnica do Declive.

A avaliação dos resultados revelou uma enorme diferença entre o desempenho das escolas não-reabilitadas e o das escolas reabilitadas, embora em nenhuma delas se tenha cumprido o limite máximo regulamentar para a concentração de CO_2.

3.3.5.2 Escolas não-reabilitadas

Nenhuma das escolas não-reabilitadas está equipada com dispositivos de ventilação, natural ou mecânica. Portanto, a única forma de admissão de ar novo nas salas de aula, para além das infiltrações, é através da abertura das janelas.

As medições nas duas escolas decorreram durante a estação de aquecimento, Novembro e Janeiro, com temperaturas exteriores baixas e precipitação em alguns períodos. Tal situação não é compatível com a abertura das janelas, compreendendo-se desta forma os valores muito elevados da concentração de CO_2.

A Figura 3.26 mostra o registo da concentração de CO_2 numa das salas de aula da escola NR2.

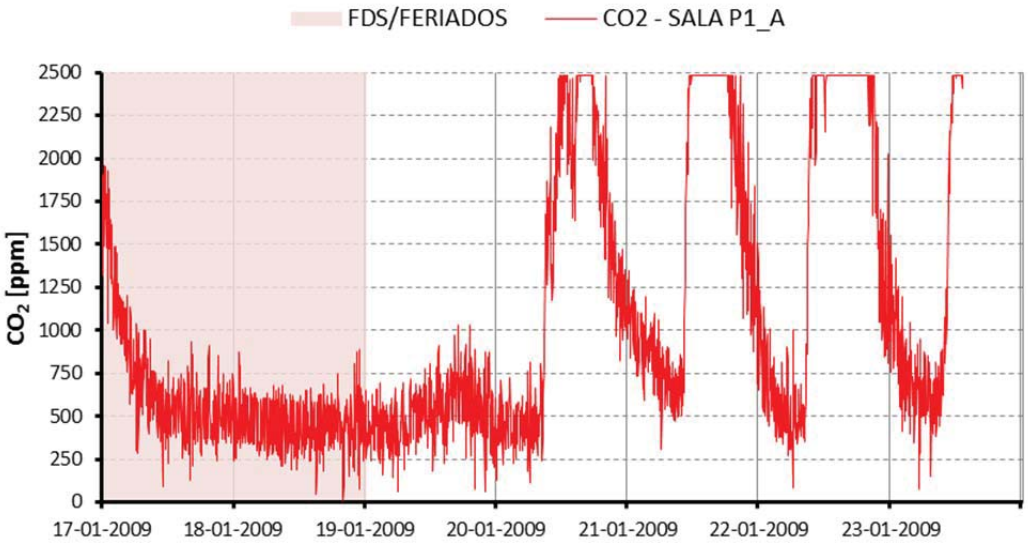


Figura 3.26 – Variação da concentração de CO_2 nas salas de aula da escola NR2

Os resultados são idênticos em todas as salas de aula das escolas não-reabilitadas e demostram claramente que imediatamente após o início da ocupação a concentração sobe atingindo níveis superiores ao limite de medição do equipamento (2500 ppm).

Para além do valor máximo registado é importante conhecer a distribuição estatística da concentração de CO_2 durante o período teórico de ocupação. Assim, procedeu-se a uma análise probabilística dos resultados, por intervalos de concentração, incluindo os respectivos valores acumulados. Adicionalmente apresentam-se os valores percentuais de tempo em que a concentração de CO_2 foi inferior ao valor máximo regulamentar de 1000 ppm, ao valor de referência utilizado em regulamentações internacionais de 1500 ppm e superior ao limite de aquisição do equipamento, os 2500 ppm.

A Figura 3.27 ilustra os resultados para as salas de aula da escola NR1 e a Figura 3.28 para a escola NR2.

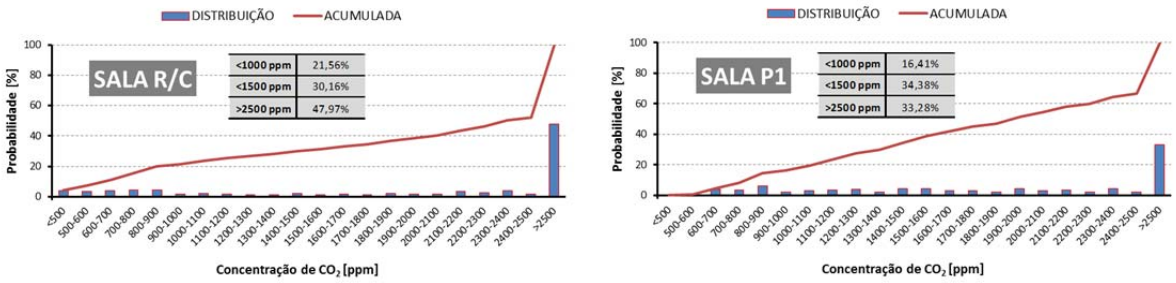


Figura 3.27 – Distribuição estatística da variação da concentração de CO_2 na escola NR1

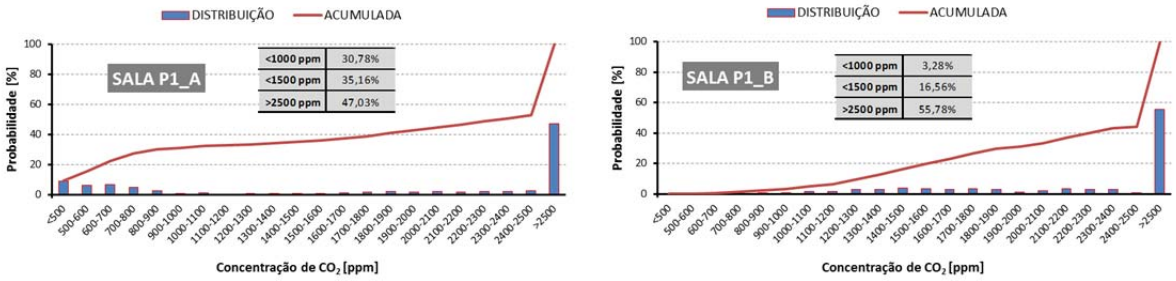


Figura 3.28 – Distribuição estatística da variação da concentração de CO_2 na escola NR2

Verifica-se que a ventilação nas salas de aula destas escolas não é adequada permitindo concentrações de CO_2 que chegaram a ser superiores a 2500 ppm em 55% do período teórico de ocupação.

A medição dos caudais de ventilação, que decorreu numa das salas de aula da escola NR1, confirma que a admissão de ar novo é muito reduzida, conduzindo a uma situação de baixa QAI. Estas medições foram realizadas na sala do primeiro piso com três condições típicas de utilização da envolvente interior (Figura 3.29):

— (1) Porta e janelas interiores fechadas;

— (2) Porta aberta e janelas interiores fechadas;

— (3) Porta fechada e janelas interiores abertas.

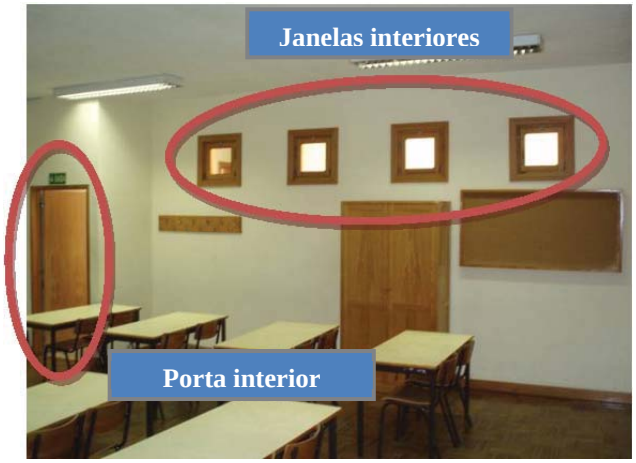
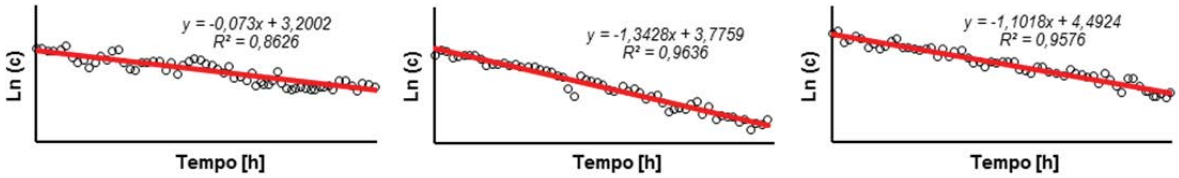


Figura 3.29 – Envolvente interior da sala do 1º piso da escola NR1

A Figura 3.30 ilustra os resultados obtidos para o decaimento do gás traçador nas três condições de envolvente.



a) b) c)

Figura 3.30 – a) Envolvente (1); b) Envolvente (2); c) Envolvente (3)

A Tabela 3.7 mostra os valores dos caudais de ventilação e das respectivas renovações horárias.

Tabela 3.7 – Caudais de ventilação na escola NR1

Envolvente (1)		Envolvente (2)		Envolvente (3)	
RPH [h^{-1}]	Caudal [m^3/h]	*RPH* [h^{-1}]	Caudal [m^3/h]	*RPH* [h^{-1}]	Caudal [m^3/h]
0,07	11	1,34	201	1,10	165

Mesmo o caudal obtido nas situações de janelas interiores abertas e porta aberta não é suficiente para diluir e controlar a produção interna de CO_2. Uma vez que as janelas exteriores não devem ter sido abertas durante as medições, o caudal de ventilação variou entre os valores apresentados na Tabela 3.7, sendo de referir que durante as visitas às duas escolas as janelas interiores estavam sempre fechadas e durante o período das aulas as portas também se encontravam fechadas. Daqui se pode aferir que, na grande maioria do tempo de ocupação destas salas, as renovações horárias foram muito baixas (0,1 h^{-1}).

No entanto, estas conclusões apenas podem ser retiradas para as condições exactas em que decorreram as medições. Quando as condições climáticas exteriores permitem é prática usual a abertura das janelas, pelo que os resultados seriam completamente distintos.

3.3.5.3 Escolas reabilitadas

Os resultados obtidos nas escolas reabilitadas mostram um cenário bastante diferente, embora face aos critérios estabelecidos na legislação actual, nenhuma das escolas apresente concentrações de CO_2 regulamentares.

Apresenta-se de seguida o registo da concentração de CO_2 numa das salas de aula das escolas reabilitadas. A Figura 3.31 refere-se à escola R1 e a Figura 3.32 à escola R2.

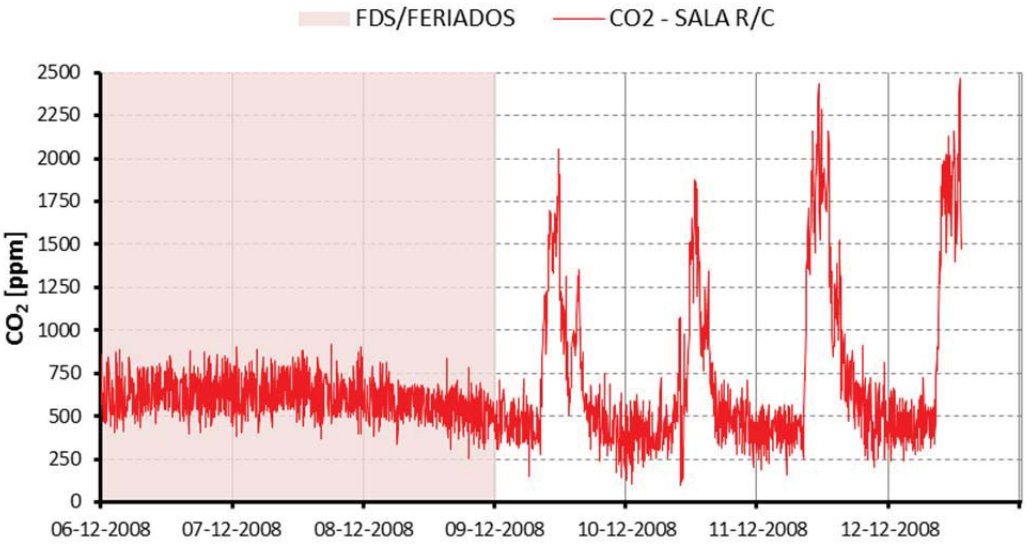


Figura 3.31 – Variação da concentração de CO_2 nas salas de aula da escola R1

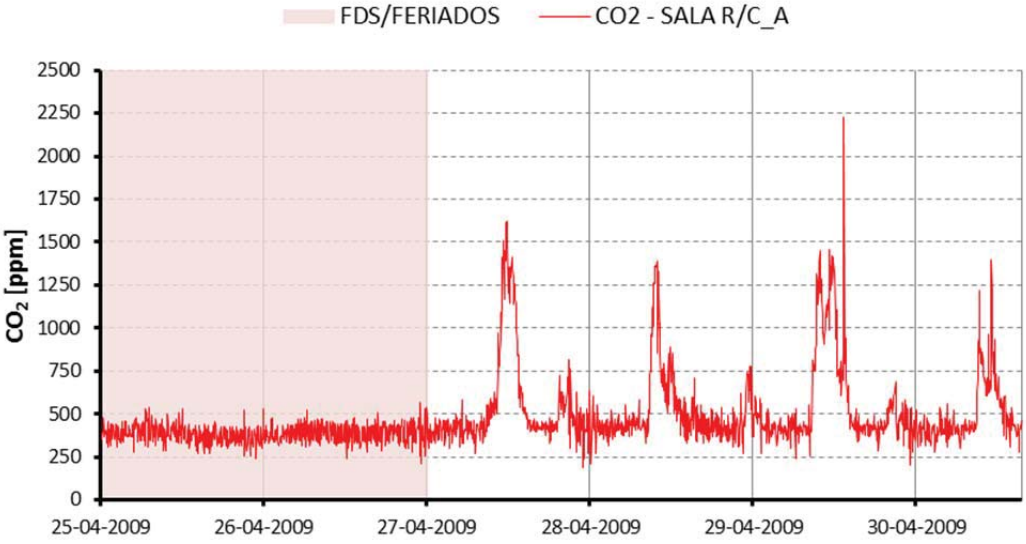


Figura 3.32 – Variação da concentração de CO_2 nas salas de aula da escola R2

A análise estatística dos resultados reflecte uma melhoria face ao observado nas escolas não-reabilitadas, registando-se, agora, uma percentagem significativa do tempo de ocupação com valores de concentração abaixo dos limites regulamentares. A Figura 3.33 ilustra os resultados para as salas de aula da escola R1 e a Figura 3.34 para a escola R2.

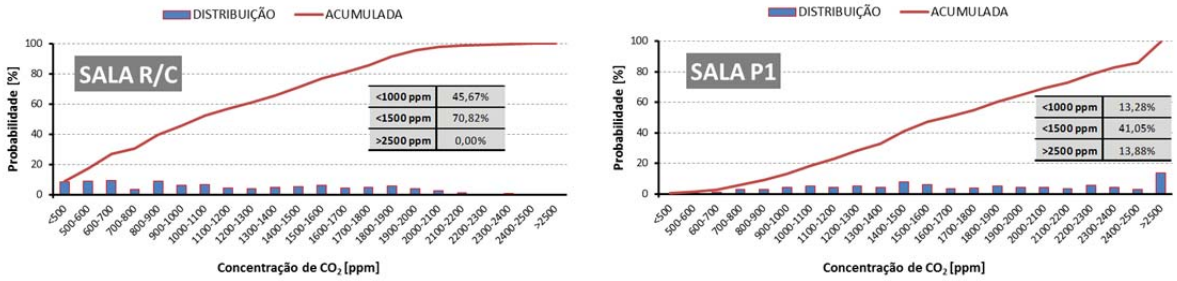


Figura 3.33 – Distribuição estatística da variação da concentração de CO_2 na escola R1

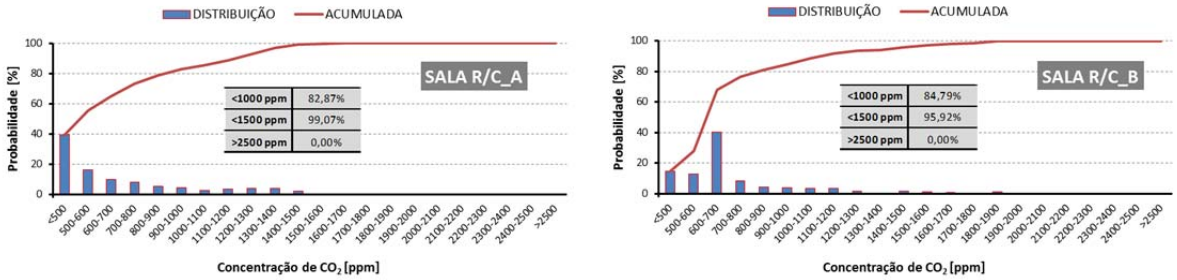


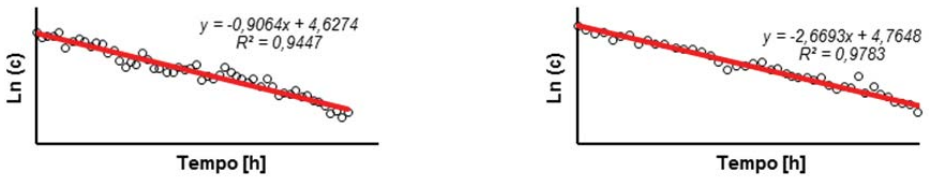
Figura 3.34 – Distribuição estatística da variação da concentração de CO_2 na escola R2

Estas escolas funcionam com um sistema de ventilação mecânico que inclui admissão de ar por via natural através de aberturas nas fachadas e extracção mecânica. Para avaliar a eficácia dos sistemas foi realizada uma campanha de medição do caudal de ventilação numa das salas da escola R1. O objectivo foi avaliar o caudal quando a sala funciona com ventilação mecânica e quando funciona com ventilação natural. Assim, definiram-se duas situações:

— (1) Sistema mecânico de extracção desligado;

— (2) Sistema mecânico de extracção ligado.

A Figura 3.35 ilustra os resultados obtidos para o decaimento do gás traçador nas duas situações referidas.



a) b)

Figura 3.35 – a) Situação (1); b) Situação (2)

A Tabela 3.8 sintetiza os resultados obtidos para o caudal de ventilação e respectivas renovações horárias.

Tabela 3.8 – Caudais de ventilação na escola R1

Situação (1)		Situação (2)	
RPH [h^{-1}]	Caudal [m^3/h]	*RPH* [h^{-1}]	Caudal [m^3/h]
0,91	137	2,67	405

Verificou-se que na situação (2) se obteve um valor muito próximo do esperado (os sistemas mecânicos de extracção estão limitados a 400 m^3/h), validando, por esta via, as medições efectuadas com o Método do Gás Traçador.

As duas escolas dispõem de um sistema mecânico de ventilação que apresenta alguma flexibilidade, uma vez que se não for colocada em funcionamento a extracção mecânica, continua a existir admissão de ar novo nas salas de aula através das grelhas existentes nas fachadas, passando as mesmas a ser ventiladas naturalmente. No caso da escola R1 as grelhas são auto-reguláveis, ou seja, capazes de garantir um caudal de admissão aproximadamente constante, na escola R2 são simples aberturas para o exterior.

Este tipo de solução é bastante interessante uma vez que permite, quando o utilizador entender adequado, colocar em funcionamento o sistema mecânico e em situações de menor ocupação das salas de aula ou quando o clima exterior permitir a abertura de janelas, poupar energia desligando o sistema. Adicionalmente, caso haja alguma falha ou impossibilidade de colocar em funcionamento o sistema mecânico (por razões económicas ou devido a uma avaria), existe sempre alguma ventilação das salas de aula.

Esta situação não se verifica quando as escolas são equipadas unicamente com sistemas mecânicos de ventilação, quer para admissão quer para extracção, e, para minimizar os seus consumos, se definem envolventes exteriores altamente estanques.

A solução utilizada nas escolas reabilitadas pode ainda ser utilizada em conjunto com uma central de comando que accione o sistema mecânico em função de um sensor colocado na sala de aula. Esse sensor pode estar programado para emitir o sinal quando uma determinada temperatura ou concentração de CO_2 máxima são atingidas ou, até mesmo, em função de uma ocupação limite definida para a sala de aula.

Durante as medições realizadas na escola R2 o sistema mecânico de extracção não esteve em funcionamento (segundo informação dos responsáveis da escola a instalação ainda não estava operacional). Portanto, os resultados obtidos correspondem a uma situação exclusiva de ventilação natural com admissão de ar através das grelhas nas fachadas.

As medições nesta escola decorreram com o clima exterior ameno, com a temperatura média próxima de 15 ºC. Desta forma, algumas janelas podem ter sido abertas durante os períodos lectivos aumentando o caudal de ventilação.

Na escola R2 a concentração de CO_2 nunca ultrapassou os 2000 ppm e raramente foi acima dos 1500 ppm. Em relação ao valor limite da legislação portuguesa, os 1000 ppm foram ultrapassados em 15 e 18% do tempo de ocupação, numa e noutra sala. Foi, ainda, calculado o valor médio da concentração de CO_2, em cada sala, no período teórico de ocupação, tendo-se obtido 667 e 732 ppm. Estes resultados seriam considerados adequados à luz de alguma legislação internacional (§2.2.2.2). Considerando que o custo imediato de baixar esta concentração para o valor máximo de 1000 ppm (que poucas vezes foi ultrapassado) é muito significativo e juntando-lhe custos diferidos de cerca de 83 €/aluno/ano durante 30 anos (Parque Escolar, 2010b), alguma reflexão deve ser feita pelos legisladores sobre a necessidade de tão avultado investimento tendo em conta a realidade socioeconómica portuguesa.

A concentração de CO_2 na escola R1 não foi tão baixa como na escola R2. No entanto, como foi referido anteriormente, a temperatura exterior durante as medições nesta escola foi bastante baixa, significando que dificilmente terá havido abertura das janelas por parte dos ocupantes das salas de aula.

Em relação ao sistema de ventilação da escola R1, não se conseguiu obter o registo do seu funcionamento. Assim, com o objectivo de tentar compreender se o mesmo esteve ou não em funcionamento durante as medições, efectuou-se uma simulação da concentração de CO_2, uma vez que é conhecida a ocupação da sala de aula. Para tal utilizou-se a metodologia proposta por Coley e Beisteiner (2002) e aplicada por Griffiths e Eftekhari (2008) e que se baseia no facto de a variação da concentração de CO_2 numa sala de aula depender apenas da sua concentração no ar admitido e no ar extraído e da produção interna de dióxido de carbono. Portanto as equações (3.1) e (3.2), que traduzem a sua variação temporal, podem ser aplicadas a esta situação.

Nesta metodologia é necessário estimar a produção interna de CO_2, V_{CO_2}, no espaço que está a ser analisado. Para tal utilizou-se a formulação proposta por Coley e Beisteiner (2002), que se baseia nas seguintes equações:

Professora: $$V_{CO_2} = 0{,}9 \cdot k \tag{3.9}$$

Professor: $$V_{CO_2} = k \tag{3.10}$$

Aluno: $$V_{CO_2} = \frac{-0{,}94 \cdot (a-5) + 52{,}3}{40} \cdot k \tag{3.11}$$

$$k = 0{,}148 \cdot \alpha \cdot m \cdot \left(\frac{273 + T_a}{273} \right) \tag{3.12}$$

em que

V_{CO2}	[l/h]	Produção de CO_2
a	[anos]	Idade do indivíduo
α	[m^2]	Área corporal
m	[W/m^2]	Taxa de metabolismo
T_a	[ºC]	Temperatura do ar

A determinação da área corporal pode ser efectuada utilizando a fórmula de DuBois (ASHRAE, 2009):

$$\alpha = 0{,}202 \cdot w^{0{,}425} \cdot h^{0{,}725} \tag{3.13}$$

em que

w	[kg]	Peso do indivíduo
h	[m]	Altura do indivíduo

Uma vez que a definição da altura e peso de cada aluno é uma tarefa bastante complexa, utilizaram-se dados médios retirados de Malina et al. (2004). O único parâmetro ainda não definido é a taxa de metabolismo, que depende do nível de actividade desenvolvida. Para este estudo considerou-se um valor de 70 W/m^2 para os alunos e 100 W/m^2 para os professores.

Desta forma estimou-se a produção interna de CO_2 em função do número de ocupantes do espaço. Juntando a esse dado a concentração de CO_2 no ar exterior (considerada igual 450 ppm) e os caudais de ventilação da sala de aula em estudo, entretanto medidos pelo Método do Gás Traçador (Figura 3.35 e Tabela 3.8), foi possível realizar uma simulação da concentração de CO_2 numa das salas de aula da escola R1.

A simulação realizada considerou duas situações: equipamento mecânico de extracção de ar a funcionar em potência máxima e desligado. De acordo com as medições do caudal de ventilação, ao primeiro cenário corresponde um valor de 405 m^3/h e ao segundo 137 m^3/h. A Figura 3.36 mostra os resultados obtidos na simulação.

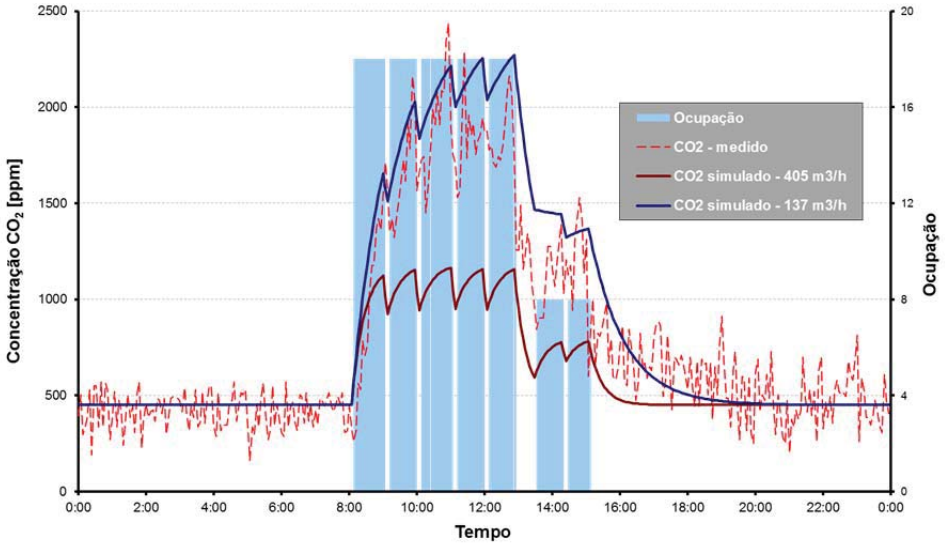


Figura 3.36 – Simulação da concentração de CO_2 na escola R1

O resultado mostra uma aproximação muito significativa entre os valores registados na monitorização e a simulação num cenário de extracção desligada, indiciando que os ocupantes da sala de aula não colocaram o sistema mecânico em funcionamento.

Este facto ajuda a justificar os valores obtidos para a concentração de CO_2 pois, aparentemente, as salas estiveram a funcionar apenas com ventilação natural. No entanto, deve salientar-se que esta parcela por si só é suficiente para uma melhoria significativa da QAI relativamente às escolas não-reabilitadas, pois os valores médios registados andaram próximos dos 1500 ppm.

3.3.5.4 Síntese crítica

Foi estudada a QAI das salas de aula das quatro escolas através do registo em contínuo da concentração de CO_2 no seu interior e através de medições pontuais do caudal de ventilação. Os resultados obtidos permitem retirar as seguintes ilações:

— A QAI nas escolas não reabilitadas é má. As medições dos caudais de ventilação na escola NR1 confirmam esta ideia. A admissão de ar exterior ocorre apenas por abertura das janelas, situação não recorrente no período de Inverno (altura em que decorreram as medições), e por infiltrações. Mesmo o caudal obtido nas situações de janelas interiores abertas e porta aberta não são suficientes para diluir e controlar a produção interna de CO_2;

— Nas escolas reabilitadas o cenário é bastante diferente. Embora nenhuma das escolas cumpra a legislação actualmente em vigor, os resultados mostram situações consideradas adequadas à luz de alguma legislação internacional.

3.4 CONCLUSÕES

A campanha experimental preliminar tinha objectivos bem definidos e que foram, no essencial, cumpridos. Assim, do estudo efectuado é possível tecer as seguintes conclusões:

— Os procedimentos e técnicas experimentais utilizadas são adequados para a caracterização do desempenho dos edifícios escolares. No entanto alguns detalhes podem ser melhorados. Os *data loggers* utilizados na medição da temperatura deveriam ter uma maior precisão. A medição dos caudais de ventilação através do Método do Gás Traçador para caracterizar a QAI pode ser dispensada. Estes valores estão directamente relacionados com a concentração de CO_2 no interior da sala de aula. Desta forma, considera-se que a QAI fica devidamente caracterizada através do registo em contínuo da concentração de CO_2;

— Verificou-se que a qualidade do ambiente interior das salas de aula dos edifícios escolares não-reabilitados não é suficiente. As medições mostraram que as salas são termicamente desconfortáveis, com resultados significativamente abaixo da temperatura de referência indicada na legislação nacional. A aplicação de outras

metodologias de avaliação do conforto térmico, como o método gráfico simplificado da ASHRAE e os modelos adaptativos, confirmaram que as salas são demasiado frias. Contudo, destaca-se que os modelos adaptativos utilizados confirmaram que permitem uma maior flexibilidade das condições ambientais das salas de aula, em especial o proposto pelo LNEC;

— As medições efectuadas nas escolas reabilitadas evidenciaram diferenças substanciais de desempenho em relação às escolas não-reabilitadas. O efeito da intervenção de reabilitação na qualidade do ambiente interior destas escolas foi evidente, quer em termos da melhoria das condições de conforto térmico quer de QAI. Salienta-se que na escola R1 apenas na aplicação dos modelos adaptativos se obtiveram resultados correspondentes a situações de conforto térmico. Tendo em consideração que os ocupantes desta escola têm controlo sobre a temperatura interior, através da manipulação do sistema de aquecimento, o que leva a pressupor que se consideravam confortáveis durante as medições, os modelos adaptativos parecem ser os mais adequados e os que melhor retratam as sensações dos utilizadores destes espaços;

— Como seria de esperar os sistemas de ventilação utilizados nas escolas reabilitadas não garantiram concentrações de CO_2 regulamentares. A legislação nacional considera apenas um valor limite máximo e, como tal, apenas com recurso a sistemas de AVAC complexos pode ser cumprido. No entanto, para além do enorme investimento, inicial e diferido no tempo, associado aos sistemas, em grande parte dos períodos de ocupação estes não seriam necessários. Os sistemas que foram aplicados nas escolas monitorizadas são bastante mais simples e económicos e, mesmo sem estarem a funcionar em pleno (em nenhuma das escolas a componente mecânica do sistema esteve ligada), permitiram obter resultados que seriam considerados adequados de acordo com outras legislações e normas internacionais;

— As ilações retiradas a partir dos resultados da campanha de monitorização correspondem a determinadas condições exteriores típicas de uma estação do ano. Não podem ser extrapoladas para o desempenho anual destes edifícios;

— Ficou claro que o desempenho dos edifícios tipo blocos 3x3 e monobloco não é adequado nem no que se refere ao conforto térmico nem à QAI. Uma vez que existe um grande número de edifícios escolares destas tipologias que a curto ou médio prazo terão de ser intervencionados, justifica-se a opção efectuada neste trabalho em centrar as atenções, no que se refere à optimização das soluções construtivas, nestes edifícios. Portanto, serão criados modelos de simulação computacional do desempenho das escolas NR1 e NR2, que serão calibrados e validados com os resultados obtidos nestas medições;

— Em relação aos edifícios reabilitados verificou-se que a intervenção a que foram sujeitos permitiu que o seu desempenho melhorasse, embora não cumprindo a legislação. Desta forma, decidiu-se preparar uma campanha alargada de medições em escolas recentemente reabilitadas, onde foram instalados sistemas de AVAC para

controlo das condições ambientais e de QAI. Estas medições deverão caracterizar o desempenho anual destes edifícios sendo, para tal, definidos três períodos mais alargados que correspondem à estação de aquecimento, à meia-estação e à estação de arrefecimento.

4 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO HIGROTÉRMICO DE EDIFÍCIOS ESCOLARES REABILITADOS

4.1 OBJECTIVOS E METODOLOGIA

O estudo experimental preliminar, descrito no capítulo anterior, permitiu verificar que não só o comportamento em serviço dos edifícios escolares não-reabilitados não é adequado, como confirmou que as intervenções de reabilitação garantem uma melhoria significativa do seu desempenho.

Contudo, mesmo os edifícios reabilitados monitorizados na campanha preliminar não apresentaram um desempenho dentro dos limites impostos pela legislação actual no que se refere ao caudal de ventilação para controlo dos poluentes do ar interior.

Tal facto é, em parte, justificado pela estratégia utilizada para a ventilação das salas de aula, que passou pela utilização de um sistema mecânico de extracção, controlável pelo utilizador, com compensação através da admissão de ar por grelhas colocadas na fachada. Este mostrou-se incapaz de garantir os valores regulamentares de admissão de ar novo, no entanto, e mesmo sem a extracção mecânica a funcionar, conseguiu baixar a concentração de dióxido de carbono (CO_2) para níveis dentro de limites considerados legais de acordo com alguma legislação internacional.

Adicionalmente, verificou-se que, como seria de esperar, os resultados são bastante dependentes do clima exterior, pelo que uma campanha de medições em diferentes períodos do ano conduzirá a conclusões necessariamente diferentes e que permitirão fundamentar uma análise global do desempenho dos edifícios.

Uma vez que os edifícios recentemente reabilitados ao abrigo do programa descrito em §2.1.2.2 foram projectados para cumprir os limites regulamentares, através da introdução de sistemas de AVAC mais complexos, que serão responsáveis pela manutenção do conforto térmico e da qualidade do ar interior (QAI), desenvolveu-se uma campanha de medições mais alargada, a decorrer em cinco destas escolas e ao longo do ano lectivo.

Esta campanha experimental foi delineada com o objectivo principal de avaliar a eficácia das intervenções de reabilitação dos edifícios escolares, através da caracterização do seu desempenho higrotérmico em condições de serviço para, desta forma, se proceder a uma análise crítica das exigências regulamentares em vigor, procurando-se, por esta via, dar resposta a um dos objectivos centrais desta Tese.

A estratégia definida para a concretização deste objectivo inclui um conjunto de tarefas e objectivos parciais:

— Escolher uma amostra representativa das diferentes tipologias de edifícios escolares de acordo com o classificação apresentada no ponto §2.1.2.1 – Figuras 2.13 e 2.14;

— Compreender o impacto da posição relativa das salas de aula dentro do edifício no seu desempenho. Para tal, sempre que possível, foram monitorizadas salas de aula com diferentes orientações e localizadas em diferentes pisos;

— Analisar o desempenho anual dos edifícios procurando compreender o peso do clima exterior. Embora estas escolas sejam climatizadas, ficando o clima interior controlado pelos sistemas de AVAC, estes nem sempre são colocados em funcionamento, passando a envolvente do edifício a assumir um papel decisivo;

— Avaliar o impacto da aplicação dos sistemas de AVAC no conforto térmico e, principalmente, na QAI das salas de aula, comparando os registos com os resultados obtidos na campanha experimental descrita no capítulo anterior e com os limites regulamentares;

— Verificar se a humidade relativa nas salas de aula não constitui um problema. Os resultados apresentados no capítulo anterior indiciam que a humidade relativa flutua dentro de limites adequados. Com estas novas medições verificar-se-á se, nas escolas reabilitadas, se confirma este pressuposto ao longo de todo o ano lectivo;

— Realizar uma análise crítica da legislação actual no domínio da higrotérmica e da QAI, tendo por suporte os resultados obtidos, e enquadrando-a na realidade económica e sociocultural portuguesa.

A amostra utilizada inclui cinco escolas situadas na zona do grande Porto, sendo duas edifícios do tipo II e três do tipo III (§2.1.2.1 – Figura 2.13). Três destas escolas localizam-se junto à faixa costeira. A Figura 4.1 localiza e identifica as escolas monitorizadas.

A metodologia utilizada assentou na escolha de quatro salas de aula em cada escola, duas no rés-do-chão (r/c) e duas no último piso. Em cada piso as duas salas deveriam apresentar orientações diferentes.

Esta estratégia não foi possível de implementar em todas as escolas. Na escola II-B o r/c é utilizado apenas para os serviços académicos, administrativos e para a biblioteca. Na escola III-C houve, durante o período em que decorreram as medições, alguns reajustamentos das salas de aula, nomeadamente a instalação das salas de informática no r/c. Uma vez que estas salas têm características diferentes das correntes, devido ao acréscimo de carga térmica decorrente da utilização dos equipamentos, optou-se por não as utilizar neste estudo.

Em cada sala de aula foi monitorizada em registo contínuo a temperatura interior e a humidade relativa. Numa das salas de aula de cada escola foi, ainda, medida a concentração de CO_2.

A reabilitação destas escolas originou, na maioria dos casos, corpos reabilitados e construção nova. Neste trabalho apenas foram monitorizadas salas de aula localizadas em zonas reabilitadas.



Figura 4.1 – Edifícios monitorizados na campanha experimental

Uma vez que se pretende a caracterização anual do desempenho dos edifícios, foram definidos três períodos de medição que procuram ser representativos das estações de arrefecimento, aquecimento e do clima de meia-estação. A Tabela 4.1 mostra os períodos definidos para as medições. Em algumas escolas foi necessário proceder a alguns ajustes a estas datas devido a pequenos imprevistos que foram surgindo.

Tabela 4.1 – Períodos em que decorreram as medições

	PERÍODO
Estação de arrefecimento	21 de Maio a 16 de Junho de 2010
Meia-estação	2 a 22 de Outubro de 2010
Estação de aquecimento	14 de Janeiro a 3 de Fevereiro de 2011

A Figura 4.2 resume, esquematicamente, a estratégia utilizada na campanha de medições, incluindo a descrição da amostra, as grandezas que foram monitorizadas e os períodos em que decorreram.

As medições correspondentes à estação de arrefecimento foram agendadas tendo em consideração que a partir da segunda metade do mês de Junho as escolas passam a ter um

perfil de ocupação substancialmente diferente devido ao término do período escolar. Portanto, os meses mais quentes do ano coincidem com as férias escolares e, como tal, as escolas desenvolvem a grande maioria da sua actividade lectiva em condições climáticas de meia-estação e de Inverno.

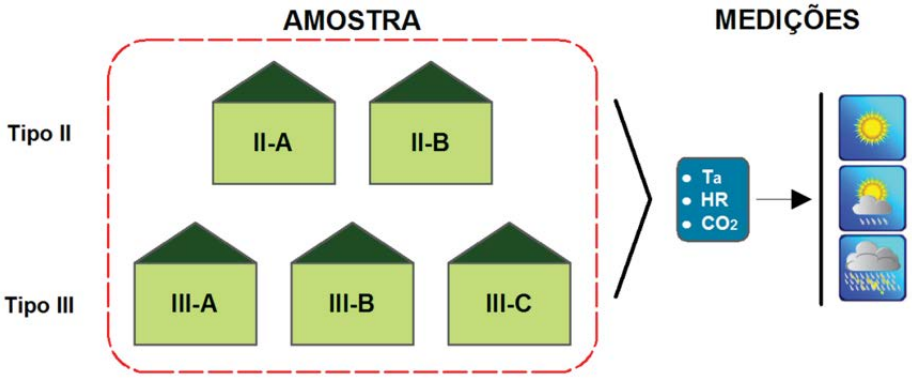


Figura 4.2 – Campanha experimental

Verificou-se que as condições climáticas no primeiro e segundo período de medições, correspondentes à estação de arrefecimento e meia-estação respectivamente, foram bastante idênticas pelo que também os resultados obtidos nestas medições apresentaram algumas semelhanças.

Apresenta-se na Figura 4.4 a temperatura exterior registada na estação meteorológica localizada no aeroporto Francisco Sá Carneiro no Porto (Pedras Rubras) durante os três períodos de medição. Os resultados exibidos nos gráficos correspondem a valores médios diários e junta-se ainda, para cada período de medição, uma tabela com os correspondentes valores médios globais.

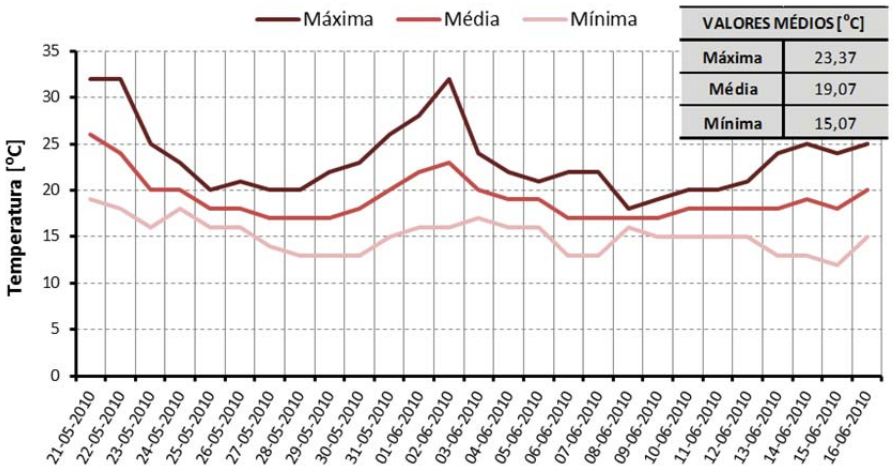
A campanha experimental exploratória demonstrou que os *data logger* utilizados não apresentavam uma precisão e resolução satisfatória, pelo que se optou por outros equipamentos nesta campanha. Os *data logger* escolhidos foram os *HOBO U12-011* representados na Figura 4.3.



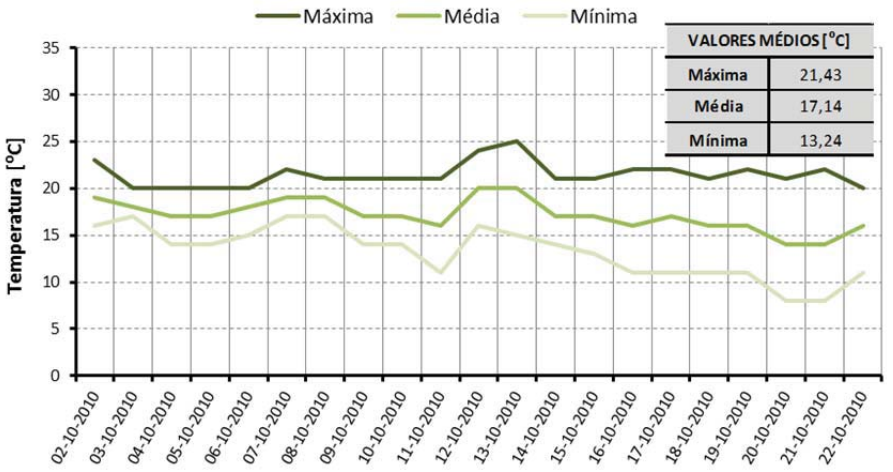
Figura 4.3 – *Data logger* utilizado para o registo da temperatura e humidade relativa

Em medições de temperatura estes equipamentos garantem uma precisão de ±0,35 ºC e uma resolução de 0,03 ºC. No registo da humidade relativa a precisão é de ±2,50% e a resolução 0,03%. Estes equipamentos foram testados e calibrados na câmara climática do Laboratório de Física das Construções (LFC) da FEUP (Anexo II).

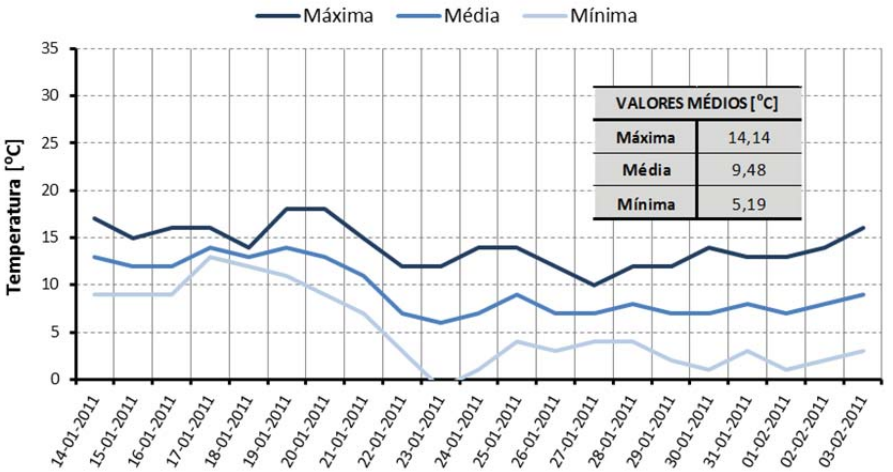
Para a medição da concentração de CO_2 manteve-se o sistema utilizado na campanha descrita no capítulo anterior.



a)



b)



c)

Figura 4.4 – Temperatura exterior durante as medições. a) Estação de arrefecimento; b) Meia-estação; c) Estação de aquecimento

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA ESTUDADA

4.2.1 Escolas do Tipo II

4.2.1.1 Enquadramento

A escola II-A é uma escola secundária situada na cidade da Póvoa de Varzim. O edifício original foi inaugurado em 1962 e sofreu uma intervenção de reabilitação que decorreu entre Julho de 2008 e Dezembro de 2009.

Nesta escola os edifícios têm três pisos e foram monitorizadas quatro salas de aula, duas no r/c e duas no 2º piso, e, em cada piso, uma orientada a Sul e outra a Norte, aproximadamente.

A Figura 4.5 identifica a escola estudada destacando o edifício onde decorreram as medições.



Figura 4.5 – Escola II-A

A escola II-B é uma escola secundária situada na cidade de Vila Nova de Gaia. O edifício original foi inaugurado em 1955 e sofreu uma intervenção de reabilitação que decorreu durante os anos lectivos 2008/2009 e 2009/2010.

Na escola II-B os edifícios têm três pisos e foram monitorizadas apenas duas salas de aula, ambas do 2º piso, com orientações aproximadas a Norte e a Sul. Nesta escola no r/c não existem salas de aula impossibilitando a medição em quatro salas.

A Figura 4.6 identifica a escola estudada destacando o edifício onde decorreram as medições.

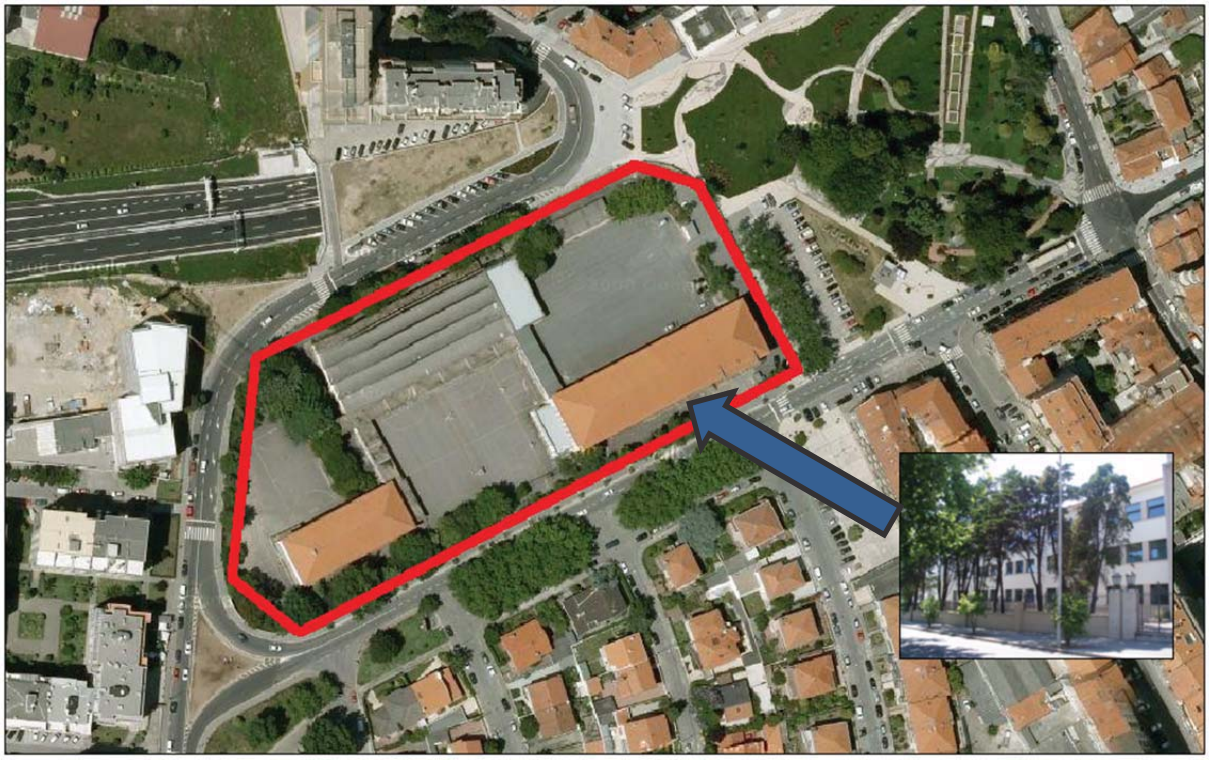


Figura 4.6 – Escola II-B

4.2.1.2 Caracterização construtiva

Os edifícios originais das duas escolas do tipo II são obviamente muito semelhantes. Ambos resultaram de projectos tipificados apresentados pela Junta das Construções para o Ensino Técnico e Secundário (JCETS) nas décadas de 40 e 50.

Não só as construções originais dos dois edifícios são muito próximas, como também a intervenção de reabilitação a que foram sujeitos conduziu a soluções construtivas idênticas para os elementos mais importantes da sua envolvente exterior, dotando-a de características térmicas condizentes com as exigências regulamentares actuais.

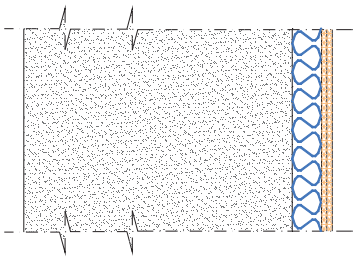
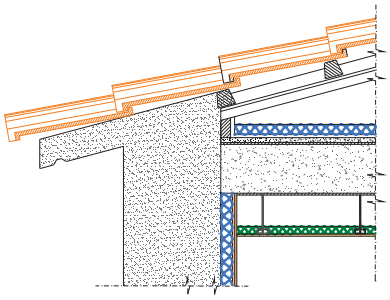
Ambas as coberturas são inclinadas, com revestimento em telha cerâmica, com um desvão não útil, tendo sido isoladas termicamente através da aplicação de poliestireno extrudido sobre a laje horizontal.

Nas paredes exteriores foi mantida a alvenaria em granito original aplicando-se uma forra interior em gesso cartonado associada ao isolante térmico. Na escola II-A foi escolhida a lã mineral e na escola II-B o isolamento foi efectuado com placas do tipo “Wallmate”.

Os vãos envidraçados exteriores são constituídos por vidro duplo laminado em ambas as faces. A protecção solar é pelo interior com estores enroláveis.

Na Tabela 4.2 apresenta-se uma descrição construtiva dos elementos da envolvente, o respectivo pormenor construtivo e as características térmicas mais relevantes.

Tabela 4.2 – Caracterização construtiva da envolvente exterior das escolas do tipo II

Elemento	Descrição	Esquema	Propriedades
Parede Exterior Corrente	Alvenaria exterior existente e forra interior em placas de gesso cartonado, associadas ao isolante térmico. Isolamento com 5 cm de lã mineral, na escola II-A. Isolamento com placas de "Wallmate" com 6 cm de espessura, na escola II-B.		Escola II-A: U = 0,55 W/(m^2.ºC) Escola II-B: U = 0,46 W/(m^2.ºC)
Cobertura	Cobertura inclinada com revestimento em telha cerâmica e desvão não útil. Isolamento térmico com poliestireno extrudido (5+5 cm), sobre laje de esteira e tecto falso com isolamento acústico em lã mineral (4 cm).		U = 0,36 W/(m^2.ºC) (fluxo ascendente) U = 0,34 W/(m^2.ºC) (fluxo descendente)
Vãos Envidraçados	Vidro duplo laminado em ambas as faces "3x3+12+3x3". Protecção solar interior com estores enroláveis.	-	U = 2,80 W/(m^2.ºC) $g_{\perp v}$ = 0,71 (vão sem protecção) $g_{\perp}^{'}$ = 0,38 (vão com protecção)

4.2.2 Escolas do Tipo III

4.2.2.1 Enquadramento

A escola III-A é uma escola secundária situada na cidade de Vila do Conde. O edifício original foi construído em 1970 e sofreu uma intervenção de reabilitação que decorreu durante os anos lectivos 2008/2009 e 2009/2010.

A escola III-A é composta por edifícios com três pisos e foram monitorizadas quatro salas de aula, duas no r/c e duas no 2º piso, e, em cada piso, uma orientada a Sul e outra a Norte, aproximadamente. Na campanha que decorreu no período de meia-estação houve um problema num dos *data logger*, pelo que só se conseguiu o registo da temperatura e da humidade relativa em três salas de aula.

A Figura 4.7 identifica a escola estudada destacando o edifício onde se encontram as salas de aula em que decorreram as medições.



Figura 4.7 – Escola III-A

A escola III-B é uma escola secundária situada na cidade de Penafiel. O edifício original foi inaugurado em 1976 e sofreu uma intervenção de reabilitação que decorreu durante os anos lectivos 2008/2009 e 2009/2010.

Nesta escola os edifícios têm três pisos e foram monitorizadas quatro salas de aula, duas no r/c e duas no 2º piso, e, em cada piso, uma orientada a Este e outra a Oeste, aproximadamente. A Figura 4.8 identifica a escola estudada e o edifício onde decorreram as medições.

A escola III-C é uma escola secundária situada na cidade de Oliveira de Azeméis. O edifício original foi inaugurado em 1988 e está a sofrer uma intervenção de reabilitação que se iniciou no ano lectivo 2008/2009.

O edifício onde decorreram as medições tem dois pisos e já tinha a sua intervenção de reabilitação concluída. No entanto, nos restantes edifícios da escola as obras de reabilitação ainda não estavam totalmente finalizadas. Este facto fez com que algumas salas de aula mudassem de função durante o período das medições, nomeadamente transformadas em salas de informática. Desta forma, não foi possível utilizar sempre as mesmas salas nos três períodos de medição: no primeiro período foram monitorizadas duas salas, uma no r/c e outra no 1º piso, ambas orientadas a Oeste; no segundo período foram monitorizadas três salas, duas no r/c, uma orientada a Oeste e outra a Este, e uma no 1º piso orientada a Oeste; no terceiro período foram monitorizadas quatro salas, uma no r/c orientada a Norte e três no 1º piso, orientadas a Este, a Oeste e a Sul.

Nesta escola os períodos de medição foram inferiores aos das outras devido a uma limitação na capacidade de armazenamento dos *data loggers* disponíveis. A Figura 4.9 identifica a escola estudada destacando o edifício onde decorreram as medições.



Figura 4.8 – Escola III-B

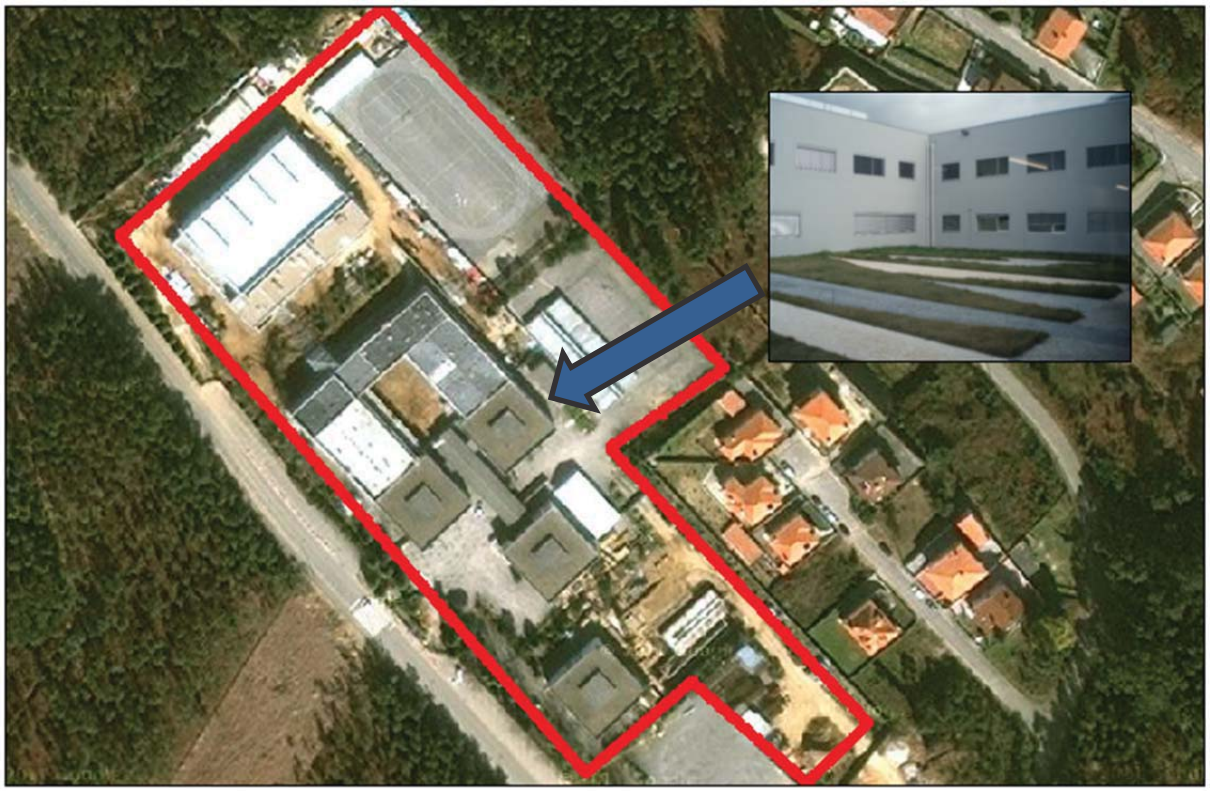


Figura 4.9 – Escola III-C

4.2.2.2 Caracterização construtiva

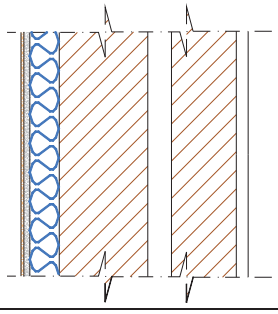
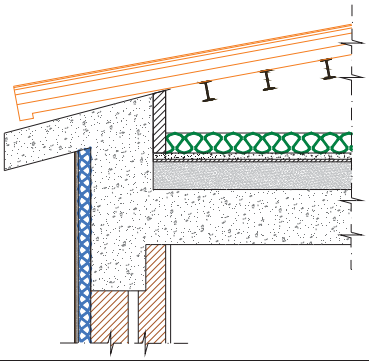
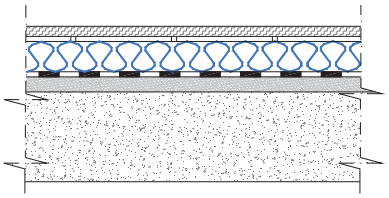
As soluções construtivas adoptadas na reabilitação da envolvente exterior destas escolas apresentam algumas semelhanças.

Nas três escolas a parede exterior foi reabilitada mantendo a parede dupla existente sobre a qual se aplicou reboco delgado sobre isolante térmico, num sistema de isolamento térmico pelo exterior do tipo ETICS (*External Thermal Insulation Composite Systems*).

As soluções utilizadas nas coberturas foram diferenciadas. Nas escolas III-A e III-B a cobertura é inclinada com revestimento em chapa de naturocimento e desvão não útil com isolamento térmico sobre a laje horizontal. Na escola III-C a cobertura é plana com revestimento em chapa de zinco.

Na Tabela 4.3 descrevem-se as soluções construtivas dos elementos da envolvente incluindo o respectivo pormenor construtivo e características térmicas mais relevantes.

Tabela 4.3 – Caracterização construtiva da envolvente exterior das escolas do tipo III

Elemento	Descrição	Esquema	Propriedades
Parede Exterior Corrente	Parede exterior dupla sobre a qual se aplicou reboco delgado armado sobre isolante térmico (ETICS). Isolamento térmico com 5 cm de EPS.		U = 0,44 W/(m^2.ºC)
Cobertura (Escolas III-A e III-B)	Cobertura inclinada com revestimento em chapa de naturocimento e desvão não útil. Isolamento térmico com 8 cm em lã de rocha sobre laje maciça existente em betão armado.		U = 0,44 W/(m^2.ºC) (fluxo ascendente) U = 0,41 W/(m^2.ºC) (fluxo descendente)
Cobertura (Escola III-C)	Cobertura plana, com revestimento em chapa de zinco e isolamento térmico de 6 cm em placas de poliestireno extrudido.		U = 0,53 W/(m^2.ºC) (fluxo ascendente) U = 0,41 W/(m^2.ºC) (fluxo descendente)

Vãos Envidraçados (Escolas III-A e III-B)	Vidro duplo 6 mm (baixa emissividade) + 8 mm caixa-de-ar + 6 mm (temperado). Protecção solar interior com estores enroláveis.	-	U = 1,60 W/(m^2.ºC) $g_{\perp v}$ = 0,61 (vão sem protecção) $g_{\perp}{}'$ = 0,36 (vão com protecção)
Vãos Envidraçados (Escolas III-C)	Vidro duplo laminado em ambas as faces "3x3+12+3x3". Estores exteriores em alumínio.	-	U = 2,80 W/(m^2.ºC) $g_{\perp v}$ = 0,71 (vão sem protecção) $g_{\perp}{}'$ = 0,09 (vão com protecção)

4.2.3 Caracterização dos sistemas de aquecimento e ventilação

As cinco escolas estudadas foram reabilitadas ao abrigo do programa governamental descrito no ponto §2.1.2.2 tendo, obviamente, sido cumprida toda a legislação em vigor. Como tal, face às exigências legais relativas ao caudal mínimo de ar novo necessário para diluir os poluentes interiores, principalmente o CO_2, o controlo do ambiente interior das salas de aula fica dependente, exclusivamente, de sistemas mecânicos de AVAC.

Consequentemente, as envolventes exteriores são altamente estanques, como forma de minimizar os consumos energéticos dos sistemas, o que pode originar situações de deficiente QAI caso os equipamentos não estejam em funcionamento contínuo.

Nas escolas monitorizadas os sistemas instalados foram bastante semelhantes podendo ser agrupados em dois tipos, de acordo com o indicado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Sistemas de AVAC utilizados na reabilitação das escolas monitorizadas

Escolas	Sistemas de AVAC
II-A, II,-B, III-A e III,B	A climatização é efectuada através de um sistema do tipo chiller/bomba de calor, existindo em casos específicos sistemas individuais de expansão directa. A ventilação é assegurada por unidades individuais de tratamento de ar.
III-C	As salas de aula estão dotadas de um sistema de termoventilação através de um conjunto de unidades de tratamento de ar novo que, para além da ventilação e renovação de ar de cada sala, estão projectadas para vencer a carga térmica na estação de aquecimento.

4.3 RESULTADOS

4.3.1 Introdução

A campanha experimental desenvolvida incluiu um número muito elevado de medições. Foi efectuado o registo de três grandezas, temperatura, humidade relativa e concentração de CO_2, em quatro salas de aula, de cinco escolas e em três períodos distintos. No total foram realizadas, aproximadamente, 150 medições com 8640 registos cada.

Daqui adveio um número muito significativo de registos que, em alguns casos, são muito idênticos. De facto, a localização geográfica dos edifícios em estudo não é muito alargada, todos na zona Norte e relativamente próximos do litoral, e as soluções construtivas adoptadas, como se verificou anteriormente, são em muitas situações as mesmas, portanto, o desempenho destes edifícios deve, obrigatoriamente, apresentar algumas semelhanças.

Assim, na organização deste texto optou-se por incluir apenas os aspectos mais relevantes e diferenciadores entre os resultados que foram obtidos em cada período de medição. Todos os registos, bem como o respectivo tratamento estatístico e probabilístico, estão incluídos no Anexo III desta Tese.

Todas as análises estatísticas e probabilísticas apresentadas, bem como as aplicações dos modelos de conforto, reportam apenas ao período teórico de ocupação das salas de aula, ou seja, nos dias úteis das 8:30 às 18:00.

4.3.2 Estação de arrefecimento (Maio/Junho)

4.3.2.1 Introdução

As medições na estação de arrefecimento decorreram nos meses de Maio e Junho de 2010, nos últimos dias antes do final do ano lectivo e respectiva interrupção para férias. O clima exterior durante esse período não foi particularmente quente para a época do ano.

Durante as visitas às escolas, para colocar e retirar os equipamentos de medição, observou-se, em todas elas, que a grande maioria das salas de aula tinham as janelas abertas. A Figura 4.10 ilustra esse facto numa sala de aula da escola II-A.



Figura 4.10 – Janelas abertas nas escolas durante as visitas na estação de arrefecimento

Este facto indicia que o sistema de climatização e ventilação pode não ter estado em funcionamento durante as medições. A variabilidade registada na temperatura dentro das salas de aula parece confirmar este facto.

Observou-se ainda que as três escolas localizadas junto à faixa litoral, escolas II-A, II-B e III-A, apresentaram um desempenho muito idêntico. O clima exterior continua a condicionar o ambiente interior das salas de aula, situação que, caso os sistemas de AVAC estivessem a funcionar, não deveria ocorrer.

4.3.2.2 Temperatura

Os registos da temperatura permitem verificar que a orientação das salas de aula, apesar dos elementos de sombreamento introduzidos nos edifícios, continua a influenciar significativamente o seu desempenho. Esta diferença foi notória quando comparadas salas orientadas a Norte com salas orientadas a Sul. No caso Este/Oeste a diferença já não foi evidente.

A Figura 4.11 mostra o registo da temperatura na escola II-B durante todo o período de medições observando-se claramente que a temperatura na sala de aula orientada a Sul é mais elevada do que na sala orientada a Norte.

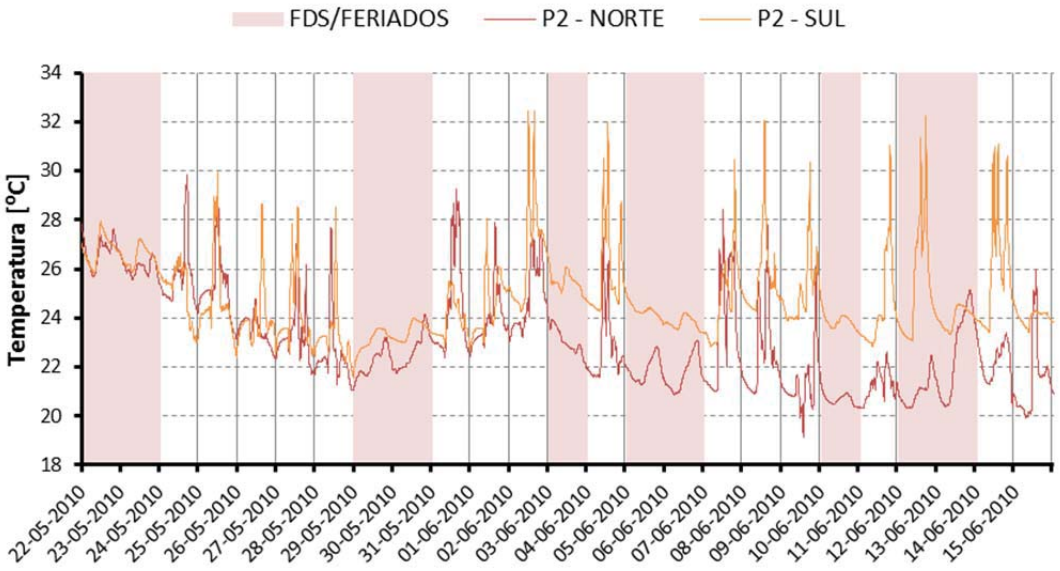


Figura 4.11 – Variação da temperatura na escola II-B (estação de arrefecimento)

Verificou-se, ainda, que nas salas orientadas a Sul a variação/flutuação de temperatura ao longo do dia é mais significativa do que nas orientadas a Norte. Este facto é confirmado pelo valor do desvio padrão das temperaturas e deve-se em grande medida ao efeito da radiação solar.

A Tabela 4.5 sintetiza, para todas as salas de aula com orientação a Norte e a Sul, os respectivos valores médios e do desvio padrão da temperatura.

Tabela 4.5 – Análise estatística da variação da temperatura na salas de aula orientadas a Norte e a Sul (estação de arrefecimento)

	ESCOLA II-A				ESCOLA II-B		ESCOLA III-A			
	P0-Norte	P0-Sul	P2-Norte	P2-Sul	P2-Norte	P2-Sul	P0-Norte	P0-Sul	P2-Norte	P2-Sul
Média	23,85	25,98	25,01	26,81	24,07	25,56	23,12	25,04	24,30	26,72
Desvio padrão	1,54	2,28	1,34	2,31	2,14	1,86	0,85	1,12	0,87	1,10

O efeito do posicionamento das salas de aula em diferentes pisos também mostrou ser relevante. As salas de aula do último piso apresentam valores de temperatura superiores aos das salas do r/c. A Figura 4.12 ilustra o registo da temperatura nas salas de aula da escola III-A, evidenciando não só o impacto da orientação, comentado anteriormente, mas também a diferença observada entre salas de aula com a mesma orientação mas localizadas em pisos diferentes.

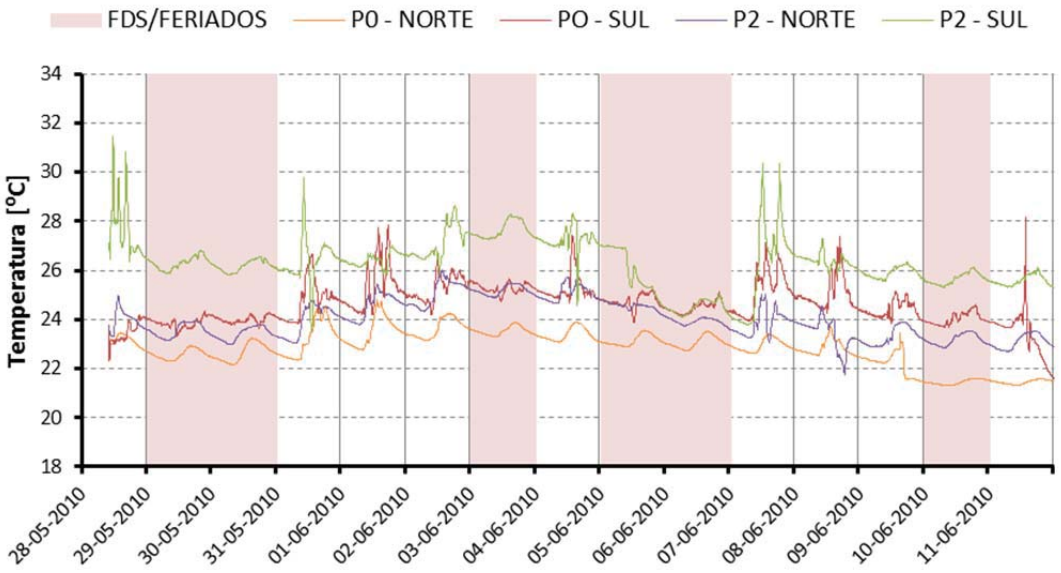


Figura 4.12 – Variação da temperatura na escola III-A (estação de arrefecimento)

Globalmente, as salas de aula do último piso apresentaram valores médios de temperatura aproximadamente 1 ºC acima das salas do r/c com a mesma orientação. Na escola III-C esta diferença chegou aos 2 ºC.

As escolas III-B e III-C apresentaram um desempenho com algumas diferenças face às restantes. Esta situação pode ser explicada por duas razões: estão situadas numa zona mais afastada da faixa litoral, onde tradicionalmente as temperaturas exteriores são mais elevadas, do que as escolas II-A, II-B e III-A; e as salas de aula destas escolas estão equipadas com vãos envidraçados com uma área de abertura bastante reduzida (face à área total envidraçada) e sem a possibilidade de abertura basculante, apenas com abertura para o interior, situação

que pode ser incómoda para os ocupantes das secretárias junto às janelas. A Figura 4.13 pormenoriza esta situação numa sala de aula da escola III-B.



Figura 4.13 – Sala de aula da escola III-B incluindo pormenor do vão envidraçado e respectiva área de abertura

A Tabela 4.6 inclui a análise estatística dos registos da temperatura nas salas de aula da escola III-B.

Tabela 4.6 – Análise estatística da variação da temperatura na escola III-B (estação de arrefecimento)

	P0-Este	P0-Oeste	P0	P2-Este	P2-Oeste	P2	ESCOLA TOTAIS
média	28,49	26,85	27,67	27,44	27,15	27,30	27,48
máximo	34,02	32,10	34,02	32,10	36,91	36,91	36,91
mínimo	22,92	22,37	22,37	21,10	21,15	21,10	21,10
desvio padrão	2,49	2,25	2,51	2,49	2,84	2,68	2,60

Nesta escola a temperatura foi significativamente superior e acima do valor de referência regulamentar para a estação de aquecimento. Em termos médios atingiu 28,5 ºC numa das salas de aula registando-se uma valor máximo próximo dos 37 ºC.

O valor médio da temperatura nas salas do último piso foi ligeiramente inferior ao das do r/c, situação algo inesperada cuja explicação se prende com as diferentes taxas de ocupação das salas de aula (ocupações mais elevadas nas salas do r/c que compensam a diferença de temperatura que seria de esperar). Nos dias em que não houve ocupação pode verificar-se que as salas do último piso apresentam valores de temperatura superiores.

4.3.2.3 Humidade relativa

Em relação à humidade relativa verifica-se, em todos os registos, que os valores médios se encontram dentro dos limites tipicamente considerados como adequados. A Figura 4.14 mostra a flutuação da humidade relativa na escola III-A.

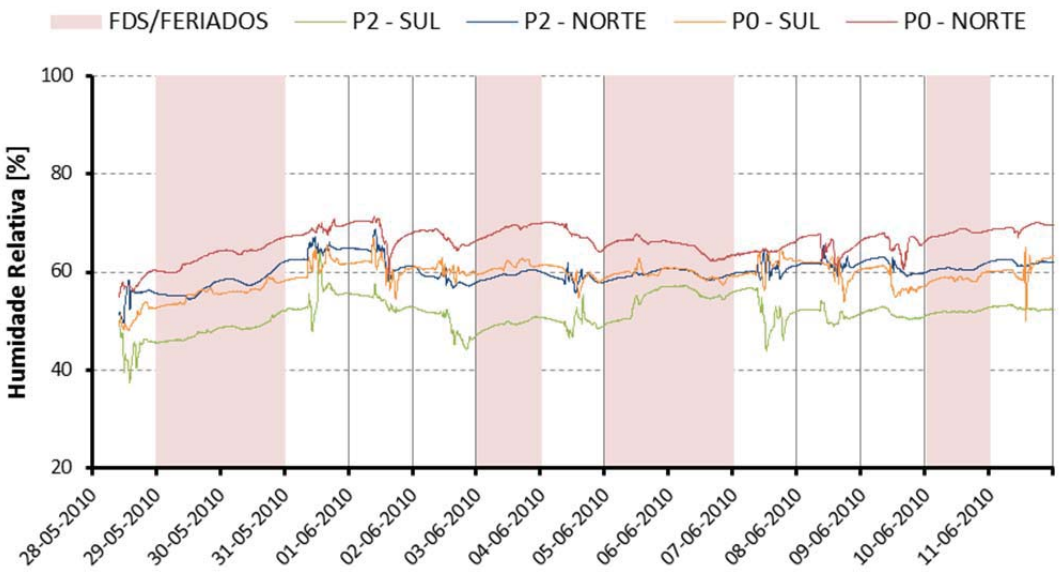


Figura 4.14 – Variação da humidade relativa na escola III-A (estação de arrefecimento)

A Tabela 4.7 sintetiza os valores médios obtidos, considerando o período teórico de ocupação, no total das salas de aula de cada escola monitorizada.

Tabela 4.7 – Análise estatística da variação da humidade relativa nas cinco escolas (estação de arrefecimento)

	ESCOLA II-A	**ESCOLA II-B**	**ESCOLA III-A**	**ESCOLA III-B**	**ESCOLA III-C**
média	53,55	50,45	59,09	46,51	64,60
máximo	72,39	66,41	71,29	67,10	79,74
mínimo	27,30	31,76	37,37	17,94	45,42
desvio padrão	7,93	7,12	6,41	7,46	7,87

Na escola III-C a humidade relativa registada foi ligeiramente superior. Contudo, as medições nesta escola decorreram num período especial, uma vez que o edifício fora inaugurado, parcialmente, na semana anterior, tratando-se portanto, de uma época de transição com alguma actividade fora do normal funcionamento da escola. Este facto pode ter condicionado os resultados da monitorização.

Concluindo, os valores médios são perfeitamente adequados e bastante próximos da referência regulamentar para a estação de arrefecimento. Porém, salienta-se que parece confirmar-se que as escolas após a reabilitação apresentam uma tendência para humidades relativas mais baixas, como no caso da escola III-B onde se observou um valor mínimo de 17,94%.

4.3.2.4 Conforto térmico

A avaliação do conforto térmico nas salas de aula foi efectuada de acordo com o descrito no capítulo anterior deste Tese. Foi utilizado o método gráfico simplificado, proposto pela ASHRAE 55 (ASHRAE, 2010), que pela sua facilidade de interpretação permite obter uma visão global imediata do nível de conforto térmico que está a ser proporcionado aos ocupantes do espaço em estudo. Foi ainda aplicada a metodologia adaptativa de conforto utilizando os modelos sugeridos pela ASHRAE e pelo LNEC.

Importa referir uma vez mais que os dois métodos requerem como dado de entrada a temperatura operativa, porém, de acordo com o apresentado nos pontos §2.2.1.2 e §3.3.4.1, sob determinadas condições, a temperatura medida neste trabalho pode ser considerada uma aproximação razoável. No entanto, esta simplificação deve estar sempre presente na interpretação dos resultados aqui apresentados.

Em todas as medições observou-se um considerável número de registos fora das zonas de conforto, mesmo admitindo o conjunto das zonas correspondentes ao vestuário de Verão e ao de Inverno. De facto, numa análise com as características da que esta a ser efectuada não se justifica diferenciar as zonas de conforto, pois os utilizadores das salas de aula certamente adaptaram o seu vestuário às condições ambientais dos espaços.

O limite superior de humidade absoluta considerado no modelo, 12 g/kg, também foi ultrapassado em muitos registos, no entanto, tal como discutido anteriormente, este facto não implica necessariamente a existência de desconforto. A norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2010) refere que quando este limite não é cumprido, deve ser efectuado o cálculo do índice PMV para avaliar o ambiente térmico, desde que a temperatura operativa esteja dentro do intervalo de conforto. Esta recomendação está traduzida graficamente na Figura 2.23 apresentada no ponto §2.2.1.3.

Os resultados obtidos mostraram uma grande variabilidade, quer entre escolas, quer entre salas de aula do mesmo edifício. A título de exemplo, na Figura 4.15 apresentam-se os resultados obtidos em duas salas de aula da escola III-A, observando-se claramente uma diferença no nível de conforto proporcionado aos seus utilizadores.

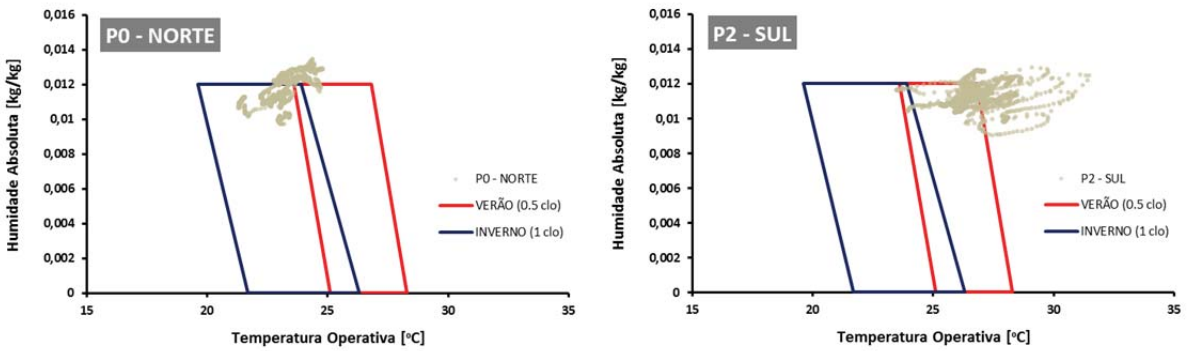
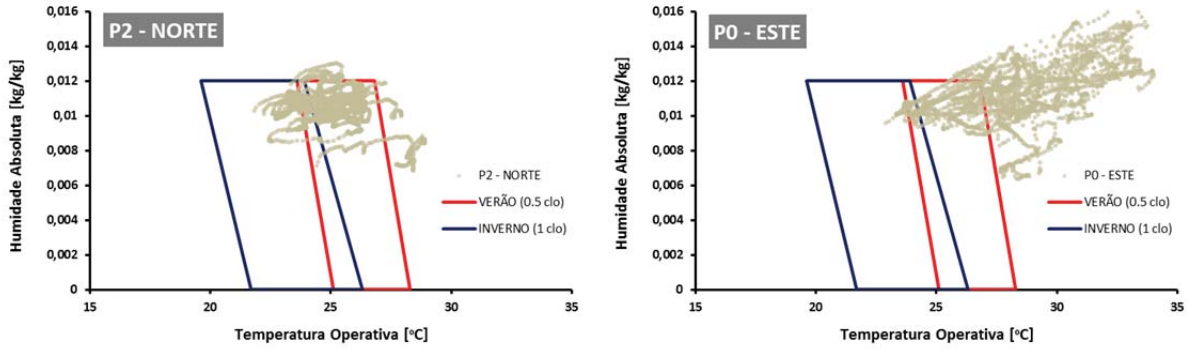


Figura 4.15 – Avaliação do conforto térmico na escola III-A por aplicação do método gráfico simplificado (estação de arrefecimento)

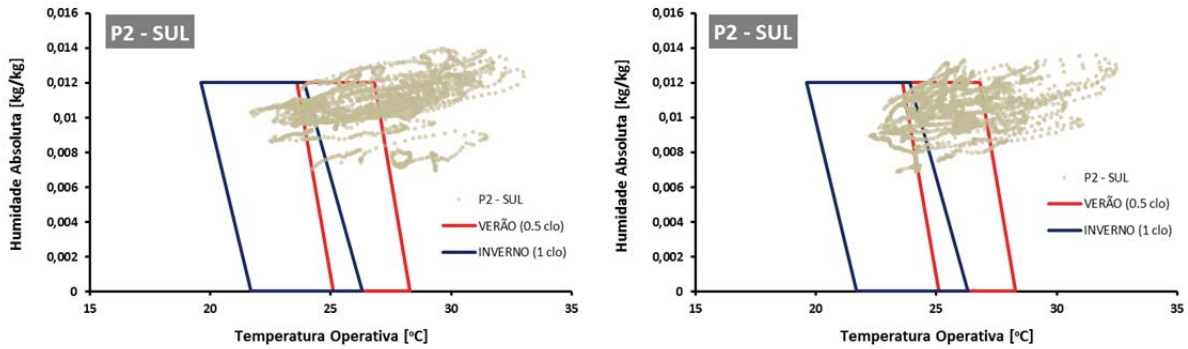
A Figura 4.16 mostra a aplicação do método gráfico simplificado aos registos de uma sala de aula da escola II-A e uma sala da escola III-B, ficando bem patente as diferenças significativas de desempenho entre as duas escolas.



a) b)

Figura 4.16 – Avaliação do conforto térmico por aplicação do método gráfico simplificado (estação de arrefecimento). a) Sala de aula da escola II-A; b) Sala de aula da escola III-B

Globalmente os resultados evidenciaram que as condições de conforto nas salas de aula foram adequadas, embora se tenham observado, em alguns registos, problemas de sobreaquecimento. Estes problemas foram especialmente evidentes nas salas de aula do último piso e orientadas a Sul, confirmando-se que a radiação solar incidente nestas salas de aula provoca uma maior variabilidade nos valores da temperatura e, consequentemente, o aparecimento de valores de pico mais elevados. Assim, tendo em conta o critério de conforto proposto pela ASHRAE, estas salas, durante uma parte significativa do seu período de ocupação, estão numa situação de sobreaquecimento. A Figura 4.17 mostra os resultados obtidos em duas dessas salas.



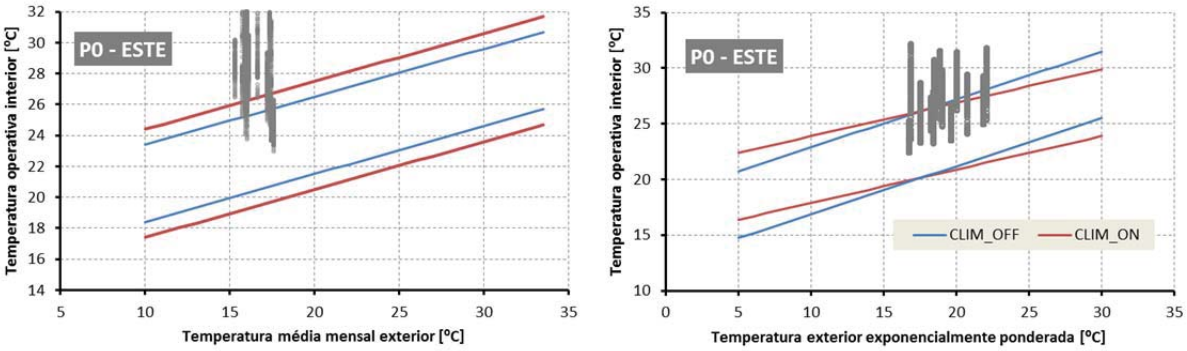
a) b)

Figura 4.17 – Avaliação do conforto térmico em salas do último piso e orientadas a Sul (estação de arrefecimento). a) Escola II-A; b) Escola II-B

No caso da escola III-B o sobreaquecimento das salas de aula foi generalizado e ocorreu durante largos períodos de tempo. Tal como foi referido na análise do registo da temperatura,

o clima exterior mais quente e a reduzida área de abertura das janelas condicionam decisivamente o desempenho destes espaços.

A aplicação dos modelos adaptativos conduziu a conclusões idênticas. A Figura 4.18 ilustra o problema do sobreaquecimento na escola III-B com a aplicação dos modelos adaptativos aos registos em duas salas.



a) b)

Figura 4.18 – Avaliação do conforto térmico na escola III-B por aplicação de modelos adaptativos (estação de arrefecimento). a) modelo da ASHRAE; b) modelo do LNEC

4.3.2.5 Concentração de CO_2

A monitorização da concentração de CO_2 permitiu avaliar a QAI das salas de aula e verificar se estas escolas, nas quais foi efectuado um avultado investimento em sistemas de ventilação, cumprem a legislação em vigor. No entanto, os sistemas de ventilação parecem não estar a ser colocados em funcionamento e, como tal, o desempenho real das salas de aula não é o previsto em projecto. Em nenhuma das escolas se cumpriu o limite máximo regulamentar de concentração de CO_2. A Figura 4.19 mostra o resultado do registo da concentração de CO_2 na escola II-B.

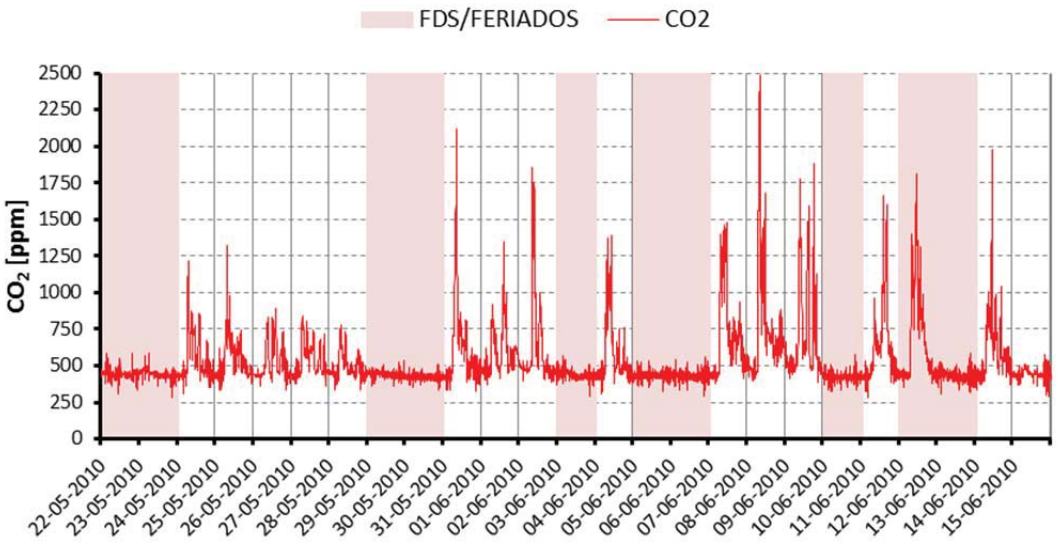


Figura 4.19 – Concentração de CO_2 na escola II-B (estação de arrefecimento)

Na análise dos resultados da concentração de CO_2 é essencial a utilização de uma abordagem probabilística. Assim, foi realizada uma distribuição estatística de todas as medições. A Figura 4.20 mostra o resultado para o registo na escola II-B.

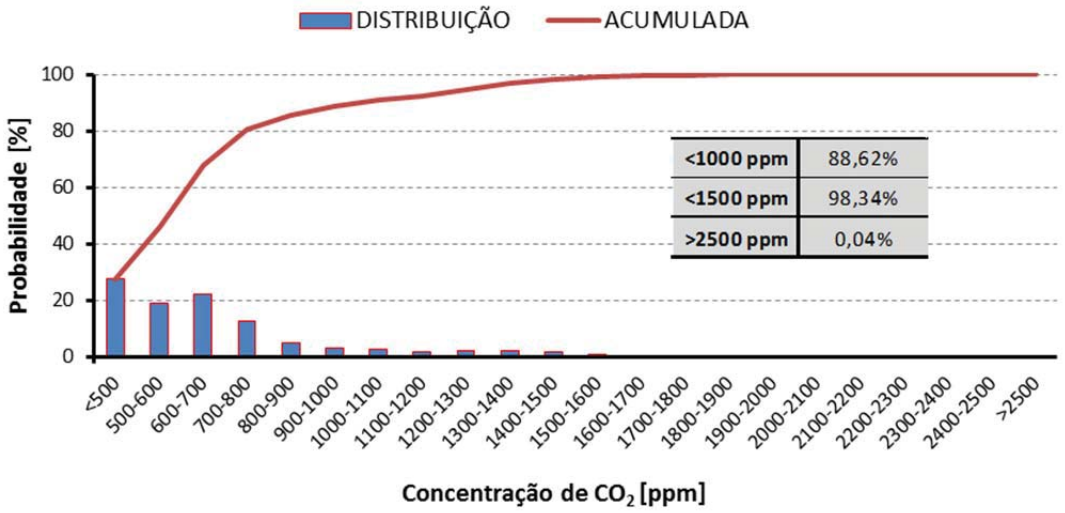


Figura 4.20 – Distribuição probabilística da concentração de CO_2 na escola II-B (estação de arrefecimento)

Na Tabela 4.8 sintetizam-se os resultados obtidos na análise probabilística dos registos nas cinco escolas.

Tabela 4.8 – Análise estatística do registo da concentração de CO_2 nas cinco escolas (estação de arrefecimento)

	ESCOLA II-A	**ESCOLA II-B**	**ESCOLA III-A**	**ESCOLA III-B**	**ESCOLA III-C***
< 1000 ppm	95%	89%	88%	66%	37%
< 1500 ppm	100%	98%	96%	81%	71%
> 2500 ppm	0%	0%	0%	6%	0%

*nesta escola o equipamento esteve desligado durante um período muito significativo

Embora não cumprindo o máximo regulamentar, os resultados são bastante satisfatórios e seriam considerados adequados de acordo com algumas regulamentações internacionais. Como foi referido anteriormente, a admissão de ar novo nas salas de aula ficou a dever-se essencialmente à abertura das janelas, demonstrando que este procedimento é capaz de garantir caudais de ventilação significativos e suficientes para controlar os poluentes do ar interior, pelo menos quando o clima exterior o permite.

Os problemas de concepção das janelas das escolas III-B e III-C, discutido no ponto §4.3.2.2 (Figura 4.13), justificam o seu desempenho menos bom. A Figura 4.21 mostra o registo da concentração de CO_2 na escola III-B.

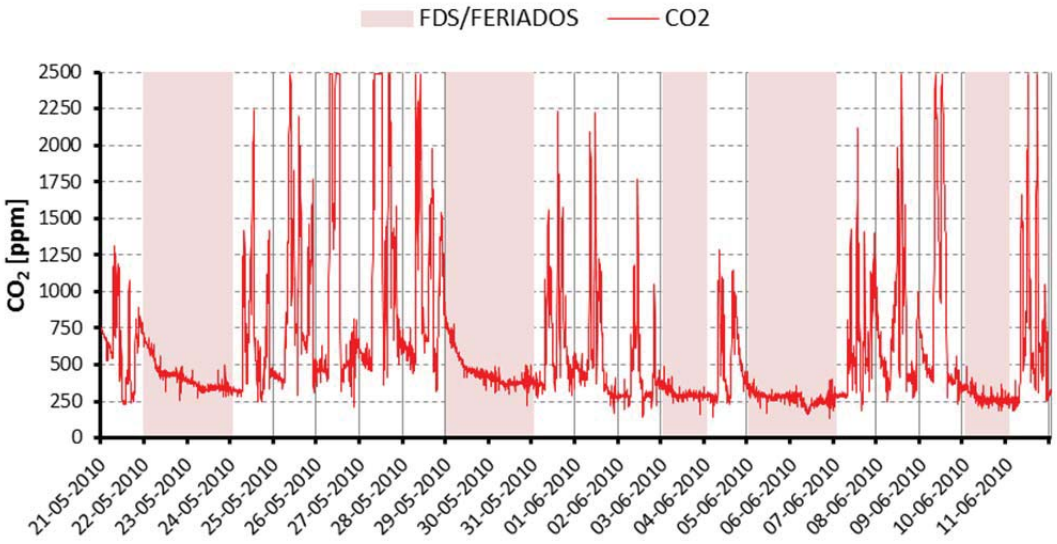


Figura 4.21 – Concentração de CO_2 na escola III-B.

4.3.3 Meia-estação (Outubro)

4.3.3.1 Introdução

O segundo período de medições decorreu durante o mês de Outubro de 2010 procurando retratar as condições climáticas típicas de meia-estação. Porém, de acordo com o apresentado no ponto §4.1, Figura 4.4, o clima exterior durante as medições não foi substancialmente diferente do registado na estação de arrefecimento.

Assim, tendo em conta que o desempenho dos edifícios é altamente condicionado pelo clima exterior, grande parte das considerações efectuadas anteriormente foram confirmadas nestas medições.

Durante as visitas às escolas voltou a verificar-se que, em todas elas, a grande maioria das salas de aula tinham as janelas abertas. Uma vez mais a opção parece ser a de não colocar em funcionamento os sistemas mecânicos de ventilação. Portanto, os edifícios estão a ser utilizados de um modo passivo e, como tal, o seu desempenho é substancialmente diferente das previsões em projecto.

4.3.3.2 Temperatura

Em termos médios as temperaturas registadas em todas as escolas foram semelhantes às medidas no período de arrefecimento e, consequentemente, próximas dos valores de referência regulamentares.

Todavia, ao contrário dos resultados anteriores, agora deixa de ser tão evidente a diferença de desempenho entre as salas orientadas a Norte e as orientadas a Sul, bem como a diferença entre as do r/c e as do último piso. A Figura 4.22 mostra o registo na escola II-B, que pode ser comparado com o da Figura 4.11, verificando-se uma aproximação nos valores das duas salas.

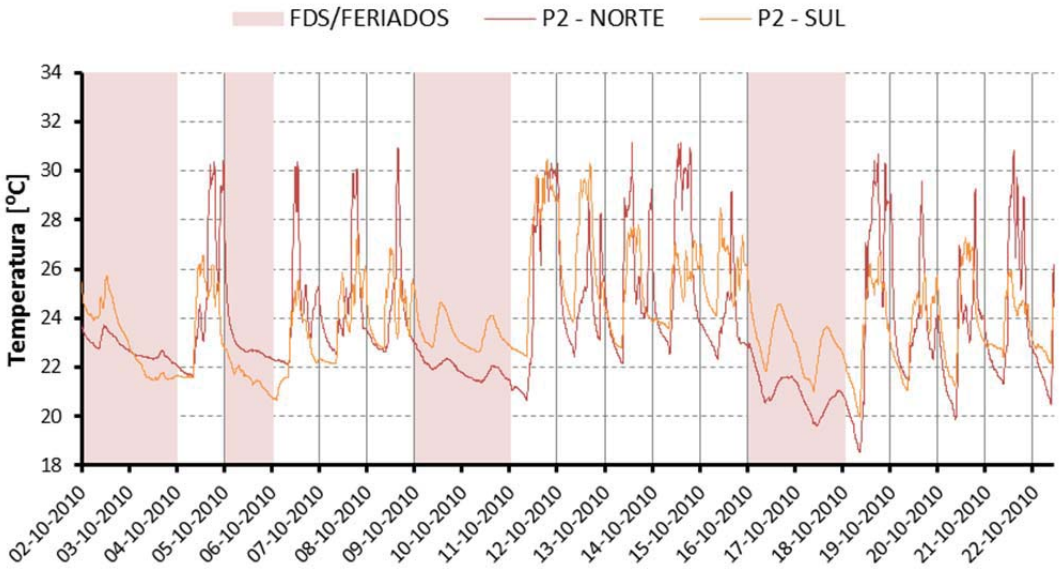


Figura 4.22 – Variação da temperatura na escola II-B (meia-estação)

A flutuação de temperatura foi inferior, implicando valores de pico também menores. O valor máximo da temperatura mais baixo e o desaparecimento das diferenças entre salas pode ser explicado, em parte, pela diminuição do peso da radiação solar no balanço térmico do edifício.

A Tabela 4.9 apresenta um resumo da análise estatística dos resultados da temperatura para cada uma das escolas monitorizadas.

Tabela 4.9 – Análise estatística da variação da temperatura nas cinco escolas (meia-estação)

	ESCOLA II-A	**ESCOLA II-B**	**ESCOLA III-A**	**ESCOLA III-B**	**ESCOLA III-C**
média	24,86	25,77	23,57	24,57	22,22
máximo	29,34	31,18	26,38	32,72	25,91
mínimo	18,77	18,82	19,89	17,75	19,51
desvio padrão	1,57	2,22	1,03	2,50	1,27

Analisando os dados da Tabela 4.9 verifica-se que:

— Os valores médios da temperatura estão quase todos dentro do intervalo 20-25 ºC definido no RCCTE (2006), indiciando que as salas de aula apresentaram condições adequadas de conforto;

— Os sistemas de climatização não devem ter sido colocados em funcionamento pois continua a existir uma variabilidade significativa na temperatura dentro das salas de aula;

— A escola III-B volta a ter um desempenho diferente das demais. Ao localizar-se mais no interior o clima é menos ameno e, como tal, também a temperatura nas salas de aula sofre uma maior variação. É nesta escola que se regista, simultaneamente, o valor mais elevado de temperatura, 32,7 ºC, e o mais baixo, 17,8 ºC.

4.3.3.3 Humidade relativa

Nesta campanha de medições a flutuação da humidade relativa manteve-se dentro de limites adequados. A Figura 4.23 ilustra a variação da humidade relativa nas quatro salas de aula monitorizadas na escola II-A.

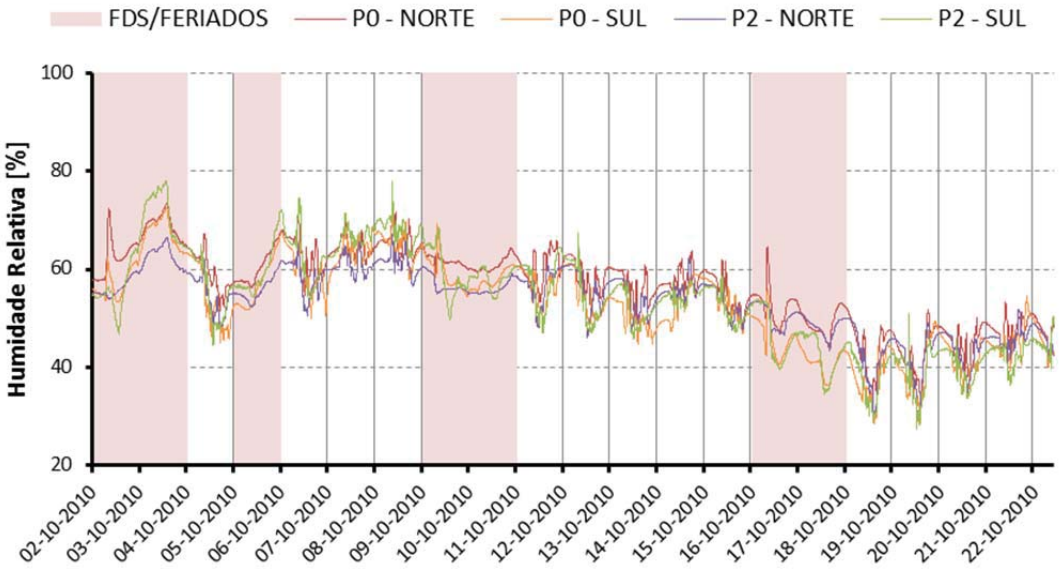


Figura 4.23 – Variação da humidade relativa na escola II-A (meia-estação)

A Tabela 4.10 mostra os resultados da análise estatística do registo da humidade relativa efectuada ao total das medições realizadas em cada escola.

Tabela 4.10 – Análise estatística da variação da humidade relativa nas cinco escolas (meia-estação)

	ESCOLA II-A	**ESCOLA II-B**	**ESCOLA III-A**	**ESCOLA III-B**	**ESCOLA III-C**
média	51,53	48,69	57,37	48,68	65,65
máximo	77,91	69,92	80,44	75,97	79,26
mínimo	27,36	27,58	35,31	20,25	50,65
desvio padrão	9,88	10,68	9,22	13,22	6,59

Os valores médios estão mais uma vez bastante próximos da referência regulamentar de 50%. Tal como sucedeu com a temperatura é a escola III-B a que apresenta uma maior flutuação

nos registos da humidade relativa. Este facto reflecte-se no valor mais elevado do desvio padrão.

4.3.3.4 Conforto térmico

A avaliação do conforto térmico nas salas de aula conduziu a resultados bastante satisfatórios com a grande maioria dos registos a corresponder a situações de conforto, de acordo com o método gráfico simplificado e com os modelos adaptativos.

A Figura 4.24 exemplifica a aplicação do método gráfico simplificado nos registos das três salas de aula monitorizadas na escola III-A. Durante as medições na escola III-A ocorreu um problema técnico com um dos *data loggers* utilizados, tendo-se perdido o registo da temperatura e da humidade relativa da sala de aula do r/c orientada a Norte.

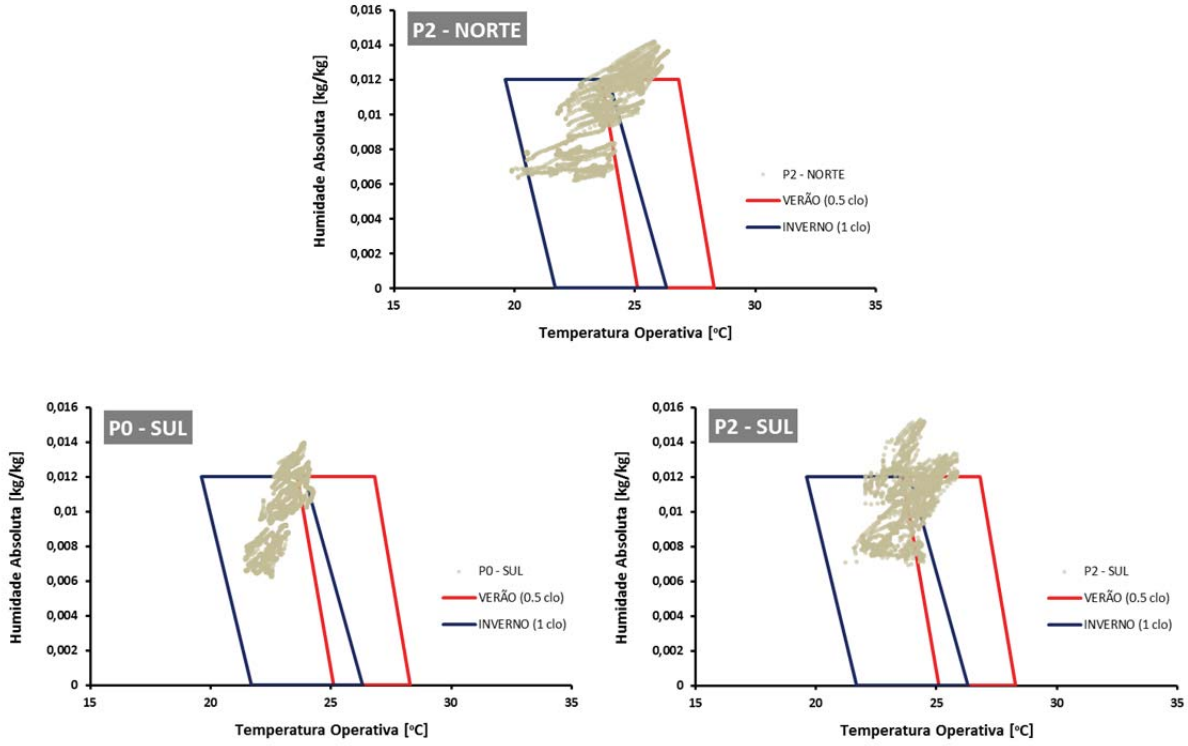


Figura 4.24 – Avaliação do conforto térmico na escola III-A por aplicação do método gráfico simplificado (meia-estação)

Se não considerarmos os pontos acima do limite da humidade absoluta, apenas em situações pontuais as salas de aula proporcionaram condições de desconforto aos seus ocupantes. Tal como referido anteriormente, os registos acima dos 12 g/kg de humidade absoluta podem não significar desconforto. De facto, os limites apresentados têm sofrido ajustes nas várias revisões da norma ASHRAE 55, tratando-se, portanto, de uma questão em aberto.

Quando são aplicados os modelos adaptativos a humidade absoluta não é contabilizada. Estes métodos apenas consideram o efeito da temperatura operativa na sensação de conforto dos ocupantes. Portanto, os pontos que ultrapassam o limite máximo de humidade absoluta no método gráfico simplificado quando transpostos para os modelos adaptativos correspondem

muitas vezes a situações de conforto térmico. A Figura 4.25 ilustra este facto, mostrando os resultados da aplicação dos modelos adaptativos da ASHRAE e do LNEC aos registos nas duas salas de aula da escola III-A orientadas a Sul.

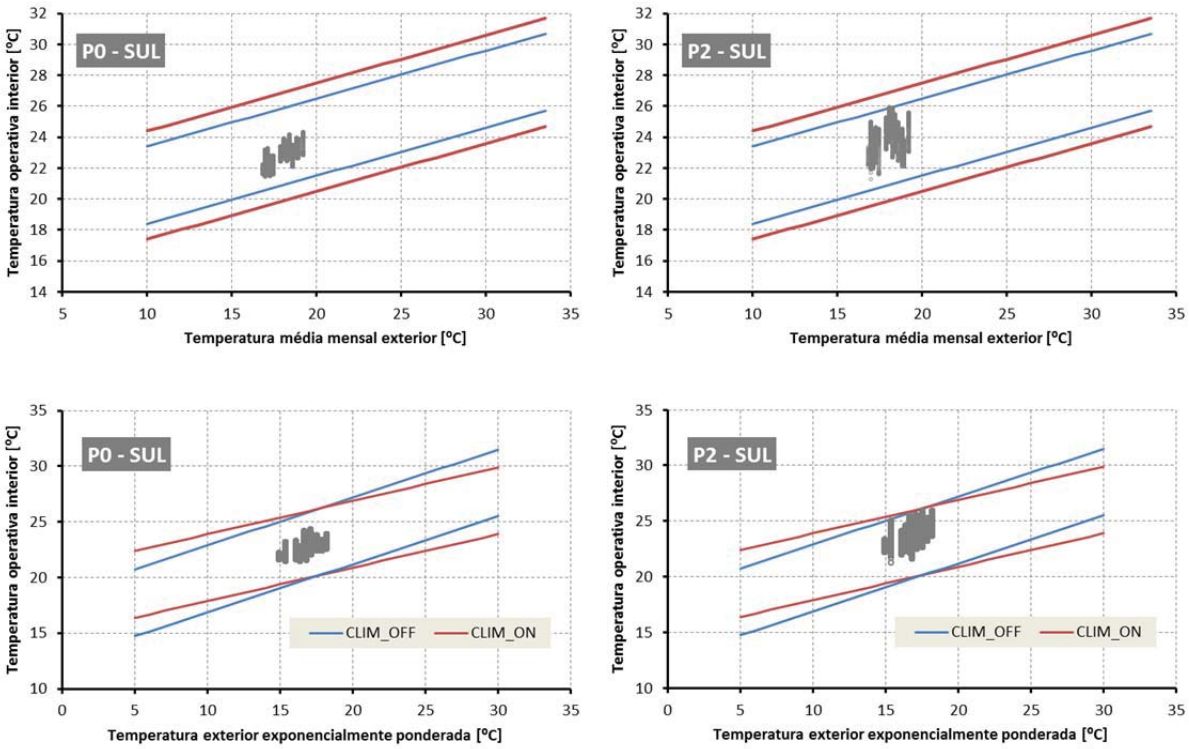
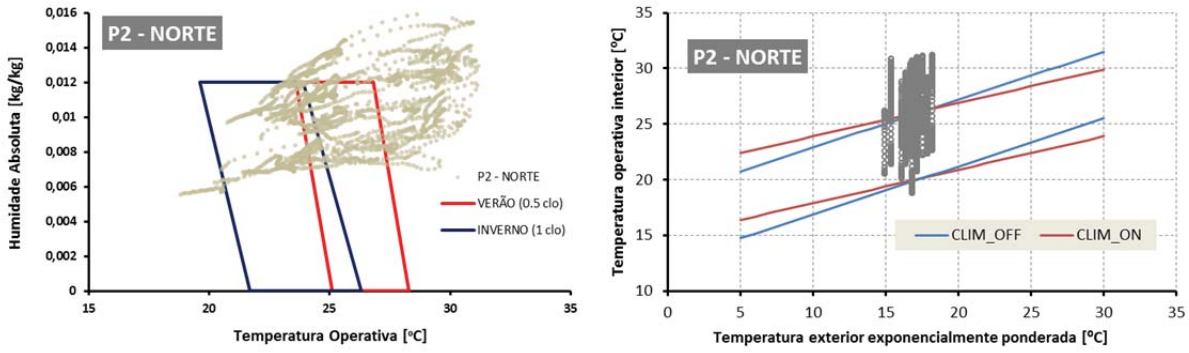


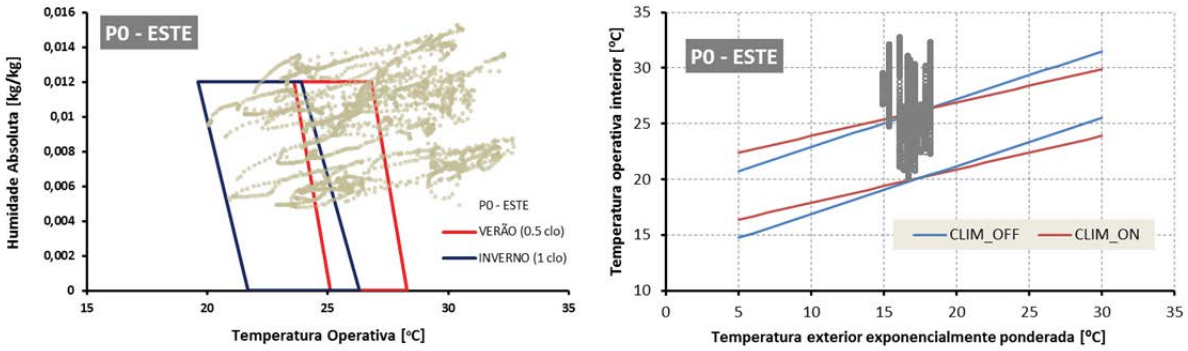
Figura 4.25 – Avaliação do conforto térmico na escola III-A por aplicação de modelos adaptativos (meia-estação)

Neste período de medições os resultados relativos ao conforto térmico foram muito satisfatórios registando-se apenas duas excepções, uma na escola II-B e outra na escola III-B, em que se observaram períodos significativos de desconforto devido ao sobreaquecimento. A Figura 4.26 mostra os resultados na sala de aula da escola II-B e a Figura 4.27 na sala da escola III-B.



a) b)

Figura 4.26 – Situação de sobreaquecimento da sala do último piso, orientada a Norte, da escola II-B (meia-estação). a) Método gráfico simplificado; b) Modelo adaptativo proposto pelo LNEC



a) b)

Figura 4.27 – Situação de sobreaquecimento da sala do r/c, orientada a Este, da escola III-B (meia-estação). a) Método gráfico simplificado; b) Modelo adaptativo proposto pelo LNEC

4.3.3.5 Concentração de CO_2

Neste período de medições verificou-se um ligeiro aumento na concentração de CO_2, originando uma deterioração da QAI em todas as escolas. A Figura 4.28 mostra o registo obtido na sala de aula da escola III-A.

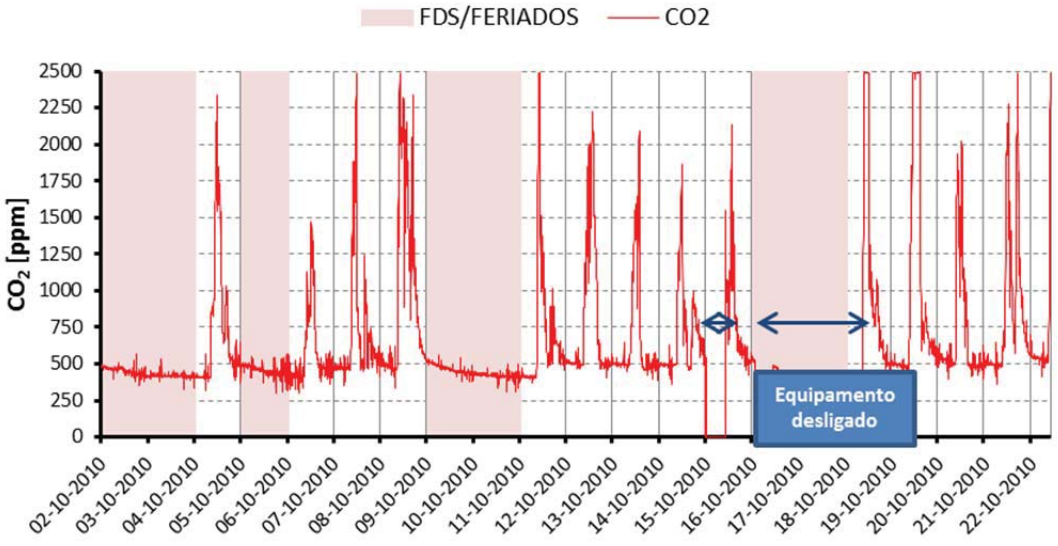


Figura 4.28 – Concentração de CO_2 na escola III-A (meia-estação)

A Figura 4.29 mostra a respectiva distribuição probabilística dos registos da concentração de CO_2. Comparativamente com o período de medições anterior (estação de arrefecimento), a percentagem de tempo com concentração de CO_2 abaixo de 1000 ppm diminuiu 35% e abaixo de 1500 ppm diminuiu 21%. No período anterior não houve nenhum registo acima dos 2500 ppm e agora esse valor foi excedido em 6 % do período teórico de ocupação da sala de aula.

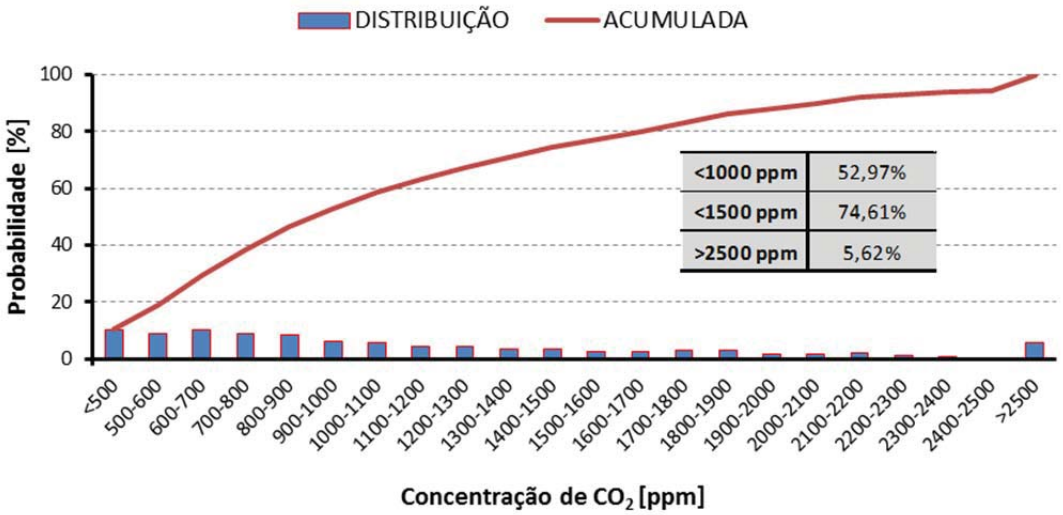


Figura 4.29 – Distribuição probabilística da concentração de CO_2 na escola III-A (meia-estação)

Na Tabela 4.11 sintetizam-se os resultados obtidos na análise probabilística dos registos da concentração de CO_2 nas cinco escolas monitorizadas.

Tabela 4.11 – Análise estatística do registo da concentração de CO_2 nas cinco escolas (meia-estação)

	ESCOLA II-A	**ESCOLA II-B**	**ESCOLA III-A**	**ESCOLA III-B**	**ESCOLA III-C**
< 1000 ppm	86%	75%	53%	49%	41%
< 1500 ppm	100%	99%	75%	77%	71%
> 2500 ppm	0%	0%	6%	8%	7%

O aumento da concentração de CO_2 nas salas de aula não foi muito significativo, no entanto, mostra uma tendência que as medições realizadas no período de aquecimento vieram a confirmar.

Mais uma vez os resultados indiciam que os sistemas mecânicos de ventilação não estiveram em funcionamento durante as medições. Assim, a abertura das janelas das salas de aula parece ser o método utilizado para admissão de ar novo.

Portanto, o ligeiro aumento da concentração de CO_2 é, assim, explicado pelo menor tempo de abertura das janelas das salas, devido à diminuição da temperatura exterior. Se a temperatura no exterior continuar a descer, a tendência será de aumentar significativamente a concentração de CO_2 nas salas de aula.

4.3.4 Estação de aquecimento (Janeiro/Fevereiro)

4.3.4.1 Introdução

O terceiro período de medições decorreu durante os meses de Janeiro e Fevereiro de 2011 com o objectivo de observar o desempenho em condições climáticas típicas da estação de aquecimento.

Durante as medições as temperaturas exteriores foram bastante baixas, principalmente na segunda e terceira semana, e registaram-se alguns dias com precipitação acentuada. Este facto conduziu a diferenças significativas no desempenho das escolas em relação às medições anteriores. Essas diferenças foram notórias quer no registo das condições higrotérmicas e, consequentemente, na avaliação do conforto térmico, quer no estudo da QAI onde se observou um aumento muito substancial da concentração de CO_2.

Portanto, face aos resultados obtidos, parece claro que mesmo em condições climáticas mais adversas, a opção foi não colocar em funcionamento os sistemas de climatização e de ventilação.

4.3.4.2 Temperatura

Tal como nos períodos de medição apresentados anteriormente exemplificam-se os resultados obtidos utilizando o registo da temperatura nas salas de aula da escola II-B. A Figura 4.30 ilustra o resultado dessa medição.

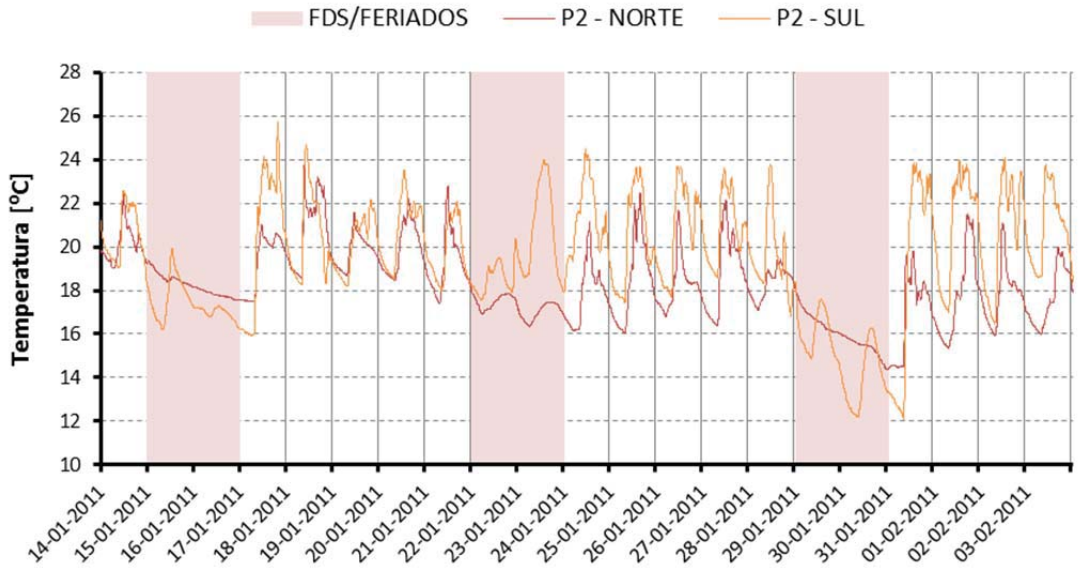


Figura 4.30 – Variação da temperatura na escola II-B (estação de aquecimento)

Globalmente a temperatura média nas salas de aula foi, na maioria das escolas, adequada para a estação de aquecimento. A Tabela 4.12 mostra a síntese da análise estatística dos resultados obtidos.

Tabela 4.12 – Análise estatística da variação da temperatura nas cinco escolas (estação de aquecimento)

	ESCOLA II-A	ESCOLA II-B	ESCOLA III-A	ESCOLA III-B	ESCOLA III-C
média	22,02	20,87	17,01	19,99	19,75
máximo	29,44	24,70	21,37	26,55	23,06
mínimo	14,51	12,63	11,90	12,05	14,75
desvio padrão	2,11	1,91	1,70	2,60	1,29

Analisando os dados apresentados na Tabela 4.12 destacam-se os seguintes aspectos:

— Comparando com a referência regulamentar de 20 ºC, os registos médios estão muito próximos, verificando-se inclusivamente um valor 2 ºC acima na escola II-A. A excepção foi a escola III-A onde a temperatura foi significativamente inferior com um valor médio de 17 ºC;

— Mesmo no período de aquecimento continuam a existir registos de temperaturas relativamente altas. No levantamento do estado da arte sobre qualidade do ambiente interior em salas de aula, apresentado anteriormente no ponto §2.2.3, verificou-se que habitualmente a temperatura dentro das salas de aula, em condições de serviço, é mais elevada do que a prevista em projecto. Os resultados obtidos nestas medições parecem confirmar esta ideia;

— Em todas as escolas observaram-se valores mínimos de temperatura muito baixos, no entanto, observando os instantes em que eles ocorreram verifica-se que, em todos os casos, correspondem a registos no início da manhã. Portanto, trata-se de situações pontuais. A análise estatística assentou na definição de um período teórico de ocupação das salas de aula e, portanto, durante os instantes em que ocorreram estas temperaturas anormalmente baixas as respectivas salas de aula podem até ter estado desocupadas.

A escola III-A apresentou um desempenho substancialmente diferente com registos de temperatura muito mais baixos do que as restantes. Os valores medidos estão longe dos recomendados na regulamentação.

Nesta escola o efeito da orientação da sala de aula no seu desempenho foi evidente, com uma tendência bem definida de temperaturas mais baixas nas salas orientadas a Norte. Entre as duas salas estudadas orientadas a Norte observou-se que a sala do 2º piso foi bastante mais fria do que a do r/c. Durante as medições no período de arrefecimento, a sala do 2º piso, orientada a Sul, já havia apresentado um comportamento diferente, com uma temperatura claramente superior. Desta forma, parece claro que mesmo após a intervenção de reabilitação o efeito das trocas térmicas pela cobertura continua significativo.

A Tabela 4.13 mostra em detalhe a análise estatística dos registos da temperatura nas salas de aula da escola III-A.

Tabela 4.13 – Análise estatística da variação da temperatura na escola III-A (estação de aquecimento)

	P0-Norte	P0-Sul	P0	P2-Norte	P2-Sul	P2	ESCOLA TOTAIS
média	16,90	17,50	17,20	15,51	18,13	16,82	17,01
máximo	19,87	19,60	19,87	18,72	21,37	21,37	21,37
mínimo	12,68	14,96	12,68	11,90	14,89	11,90	11,90
desvio padrão	1,42	0,92	1,23	1,78	1,34	2,05	1,70

4.3.4.3 Humidade relativa

Apesar da significativa diminuição da temperatura exterior nas duas últimas semanas de medição, a humidade relativa nas salas de aula continua a apresentar valores médios adequados, embora nessas duas semanas se verifiquem registos pontuais bastante baixos. A Figura 4.31 mostra a variação da humidade relativa na escola II-A durante o período de medição.

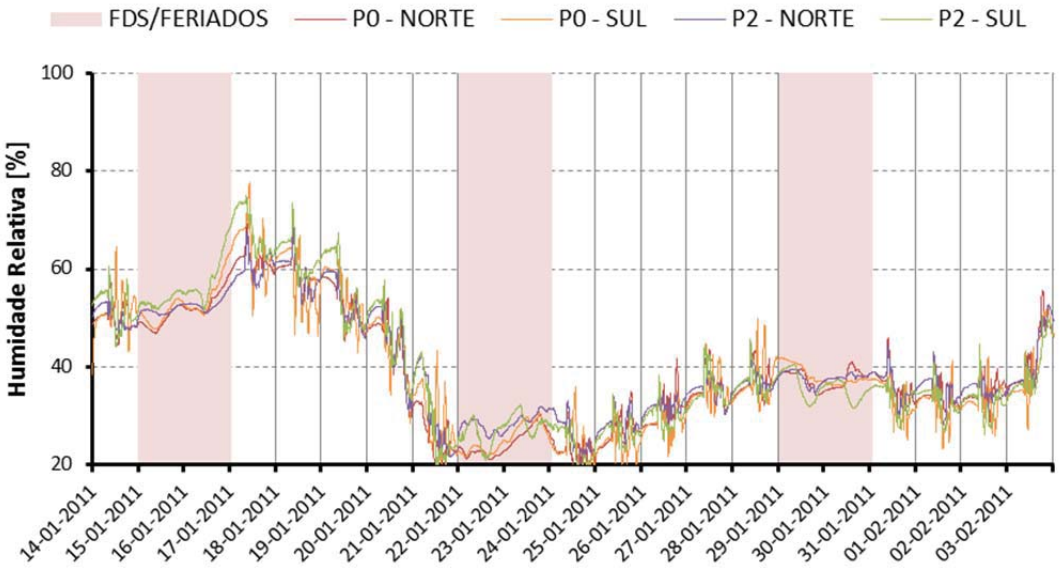


Figura 4.31 – Variação da humidade relativa na escola II-A (estação de aquecimento)

A tendência das escolas após a reabilitação apresentarem valores de humidade relativa baixos foi confirmada por alguns dos registos realizados neste período de medições. A Tabela 4.14 sintetiza os valores médios obtidos, considerando o período teórico de ocupação, no total das salas de aula de cada escola monitorizada.

Tabela 4.14 – Análise estatística da variação da humidade relativa nas cinco escolas (estação de arrefecimento)

	ESCOLA II-A	ESCOLA II-B	ESCOLA III-A	ESCOLA III-B	ESCOLA III-C
média	39,90	43,89	61,24	43,27	68,58
máximo	77,76	69,05	83,20	67,73	87,88
mínimo	17,39	26,09	30,01	17,02	29,52
desvio padrão	12,23	10,85	11,58	10,32	10,74

Em todas as escolas se observaram valores mínimos abaixo dos 35%, situação algo inesperada face à elevada produção de vapor devido à ocupação das salas de aula. No entanto, uma vez que a análise estatística se refere ao período teórico de ocupação, estes registos mais baixos podem ter ocorrido em períodos em que a sala de aula se encontrava desocupada.

4.3.4.4 Conforto térmico

Os resultados da aplicação dos modelos de conforto térmico reflectem, em grande medida, as considerações anteriores referentes aos registos da temperatura e da humidade relativa. Assim, a maioria dos registos encontra-se em zona de conforto, com excepções correspondentes a condições de sala de aula demasiado fria. A Figura 4.32 exemplifica este cenário com os resultados do método gráfico simplificado aplicado aos registos na escola II-A.

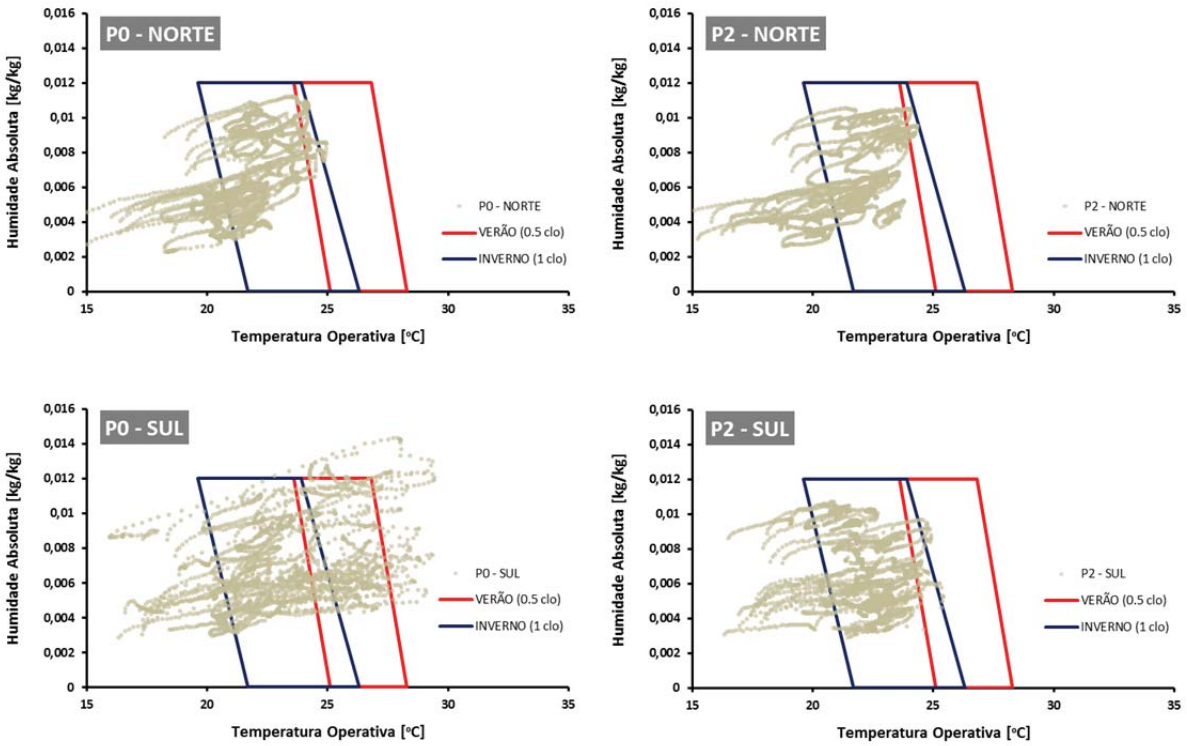


Figura 4.32 – Avaliação do conforto térmico na escola II-A por aplicação do método gráfico simplificado (estação de aquecimento)

A escola III-A foi claramente a excepção apresentando resultados perfeitamente desadequados com cenários de total desconforto nas salas de aula. A Figura 4.33 mostra a aplicação do método gráfico simplificado na escola III-A.

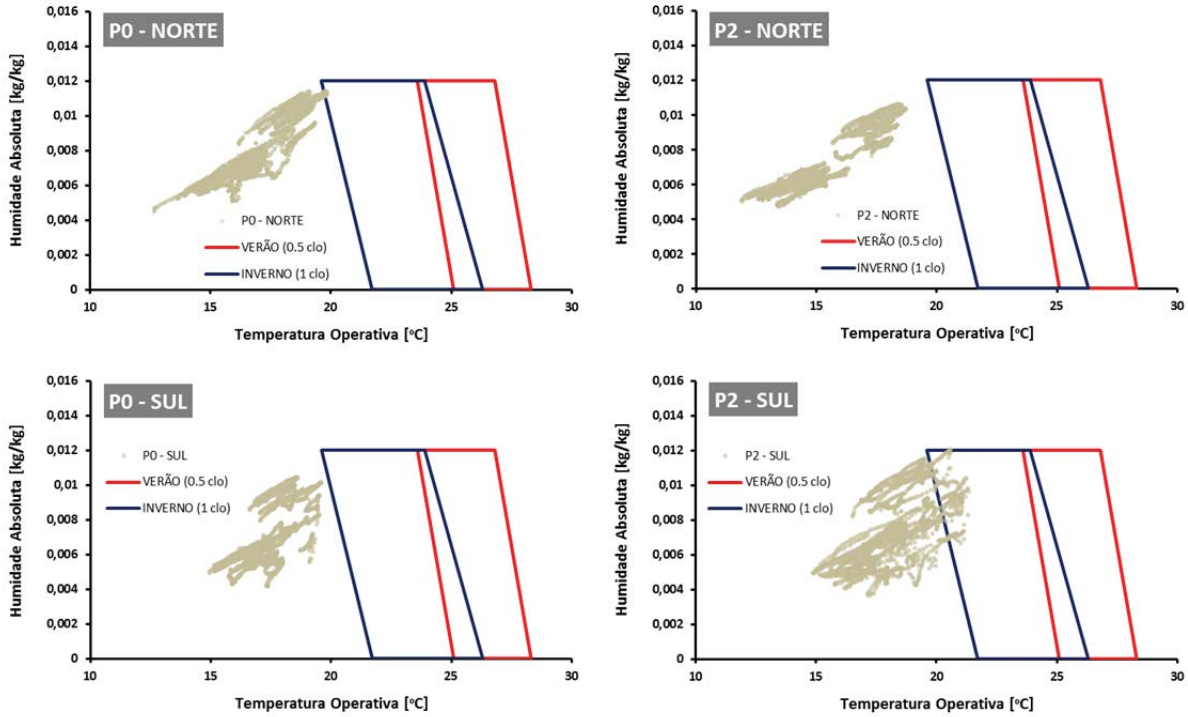
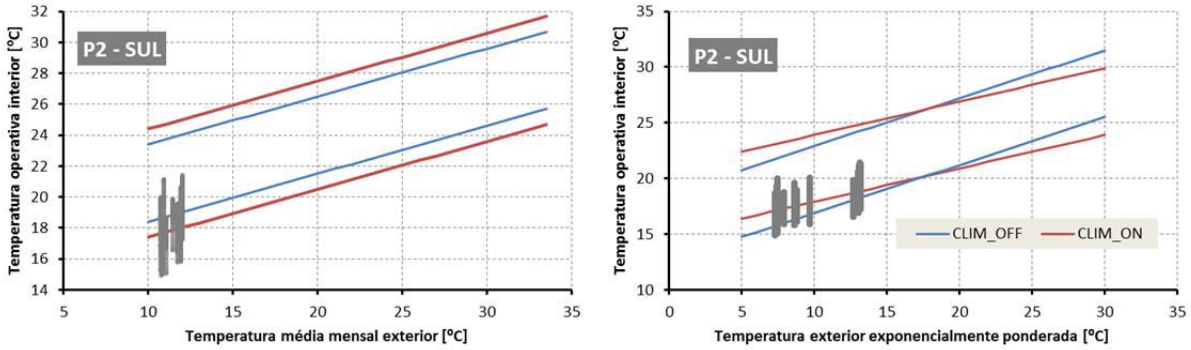


Figura 4.33 – Avaliação do conforto térmico na escola III-A por aplicação do método gráfico simplificado (estação de aquecimento)

Um aspecto muito relevante que resultou do estudo do conforto térmico, foi a confirmação de que, em registos no período de aquecimento, os modelos adaptativos permitem uma flutuação de temperaturas muito superior ao observado no método gráfico simplificado, sendo possível garantir conforto térmico com temperaturas substancialmente mais baixas. A Figura 4.34 demostra este facto mostrando o resultado da aplicação dos modelos adaptativos da ASHRAE e do LNEC nos registos da sala de aula do último piso, orientada a Sul, da escola III-A, cujo resultado da aplicação do método gráfico simplificado se encontra ilustrado na Figura 4.33.



a) b)

Figura 4.34 – Avaliação do conforto térmico numa sala da escola III-B por aplicação de modelos adaptativos (estação de aquecimento). a) modelo da ASHRAE; b) modelo do LNEC

Portanto, os modelos adaptativos, em condições de Inverno, parecem ser mais flexíveis, permitindo temperaturas mais baixas dentro das salas. O modelo proposto pelo LNEC ao incluir as temperaturas exteriores apenas dos sete dias anteriores, e com mais peso nos dias mais próximos, permite contabilizar melhor o efeito do arrefecimento acentuado registado a partir do final da primeira semana de medições.

4.3.4.5 Concentração de CO_2

A concentração de CO_2 registada foi substancialmente mais elevada do que nas medições anteriores, acentuando a tendência já observada no período de meia-estação. Se os sistemas mecânicos de ventilação estivessem com um funcionamento de acordo com o previsto em projecto, tal não seria expectável. Assim, parece claro que a ventilação das salas de aula continua a ser realizada principalmente através da abertura das janelas, implicando que fique fortemente dependente das condições climáticas exteriores.

Mesmo nestas condições os resultados obtidos estão longe dos observados nas escolas não-reabilitadas descritas no capítulo anterior desta Tese. A melhoria das propriedades higrotérmicas dos elementos da envolvente exterior ajudou a que a temperatura no interior das salas de aula se mantivesse mais elevada, permitindo, por esta via, uma abertura mais regular das janelas.

A Figura 4.35 ilustra o registo da concentração de CO_2 na sala de aula monitorizada na escola II-B.

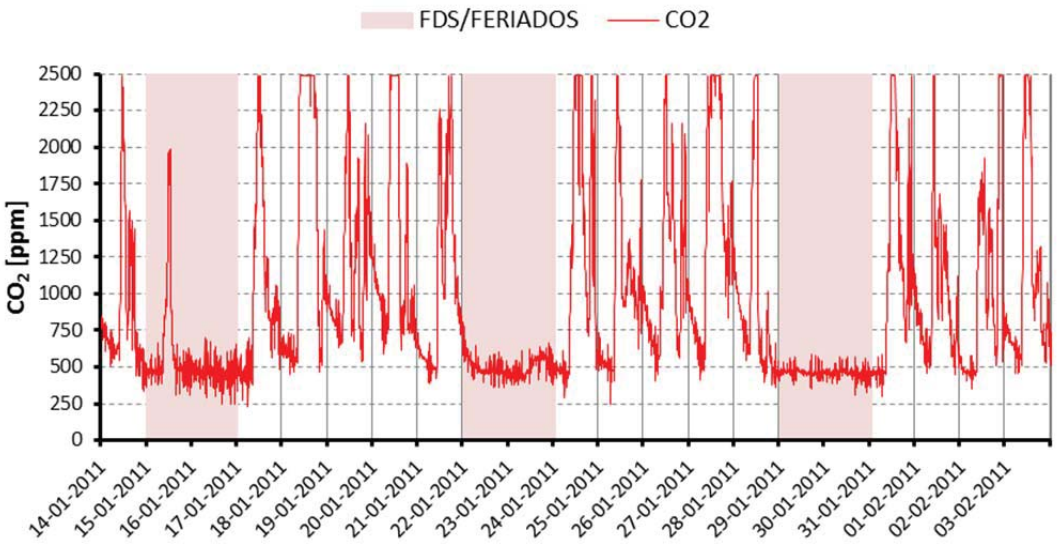


Figura 4.35 – Concentração de CO_2 na escola II-B (estação de aquecimento)

Nesta escola, o período de tempo em que a concentração de CO_2 se manteve abaixo dos 1000 ppm diminuiu 68% face ao observado no período de arrefecimento e 54% em relação ao registo durante o período de meia-estação. Nos dois períodos anteriores a concentração de CO_2 nunca havia atingido ou superado os 2500 ppm verificando-se agora que esse limite foi ultrapassado em 19% do período teórico de ocupação da sala de aula. A Figura 4.36 ilustra o

resultado da distribuição probabilística dos registos da concentração de CO_2 na sala de aula da escola II-B.

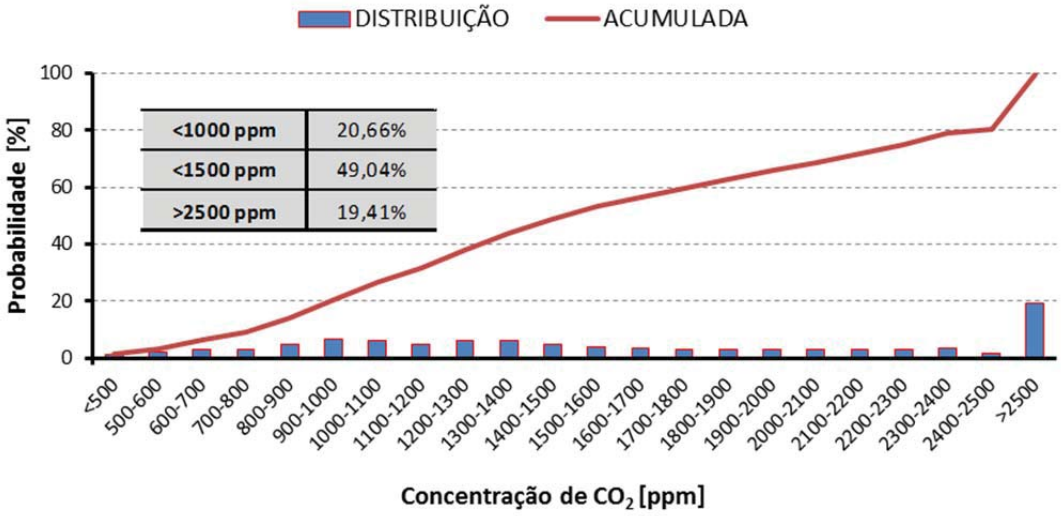


Figura 4.36 – Distribuição probabilística da concentração de CO_2 na escola II-B (estação de aquecimento)

Na Tabela 4.15 sintetizam-se os resultados obtidos na análise probabilística dos registos da concentração de CO_2 nas cinco escolas monitorizadas.

Tabela 4.15 – Análise estatística do registo da concentração de CO_2 nas cinco escolas (estação de aquecimento)

	ESCOLA II-A	**ESCOLA II-B**	**ESCOLA III-A**	**ESCOLA III-B**	**ESCOLA III-C**
< 1000 ppm	57%	21%	31%	33%	7%
< 1500 ppm	90%	49%	51%	67%	16%
> 2500 ppm	0%	19%	22%	10%	56%

Nesta medição ficou clara uma deterioração das condições de QAI, comparativamente aos dois períodos anteriores. Inclusivamente, estes resultados não mostram qualquer melhoria relativamente ao desempenho das duas escolas reabilitadas analisadas no capítulo anterior desta Tese (§3.3.5.3).

De facto, é imperativo parar e avaliar do ponto de vista custo/benefício as soluções de ventilação que estão a ser implementadas na reabilitação destas escolas, sob pena de se estar a desperdiçar recursos financeiros significativos e as condições de ambiente interior das salas de aula não serem efectivamente melhoradas.

4.4 DISCUSSÃO E ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS

4.4.1 Introdução

Um dos objectivos centrais desta Tese incidia na caracterização experimental do desempenho em serviço de edifícios escolares recentemente reabilitados para, desta forma, fundamentar uma avaliação crítica dos regulamentos actualmente em vigor no domínio da higrotérmica e da QAI.

A questão de fundo que deve ser levantada prende-se com a obrigatoriedade de cumprimento das exigências de QAI que, na prática, impossibilitam a utilização de sistemas de ventilação natural e implicam o recurso a sistemas mecânicos. No entanto, tal como foi discutido no ponto §2.2.2.3, não só os valores limite regulamentares adoptados na regulamentação nacional são claramente dos mais restritivos, quando comparados com outras legislações internacionais, como a aplicação destes equipamentos significa um aumento muito substancial do custo da intervenção de reabilitação e do custo de manutenção e exploração dos edifícios escolares ao longo dos próximos anos, sendo essencial analisar a situação do ponto de vista do custo e do benefício.

No capítulo 3 apresentaram-se os resultados de uma campanha de caracterização do desempenho de dois edifícios escolares recentemente reabilitados em que foram utilizados sistemas mecânicos de ventilação mais simples e flexíveis, tendo-se verificado que, embora não cumprindo as exigências regulamentares, estas escolas apresentavam valores razoáveis de concentração de CO_2, mesmo sem recurso à extracção mecânica.

É, portanto, essencial compreender qual a real mais-valia que advém da utilização dos sistemas mecânicos de AVAC mais dispendiosos. Será através destes equipamentos que se cumpre a legislação no domínio da QAI? Tornar-se-ão significativamente melhores as condições ambientais interiores nas salas de aula?

A campanha experimental aqui descrita pretendia dar resposta a estas questões e, para tal, optou-se por realizar as medições com as salas de aula a funcionar em condições reais de utilização. Solicitar aos responsáveis das escolas que colocassem os sistemas em funcionamento para, desta forma, aferir sobre a sua eficácia não fazia sentido para o problema em causa.

O objectivo não é perceber se os equipamentos apresentam um funcionamento conforme o previsto em projecto, mas sim compreender se os utilizadores recorrem a eles e os utilizam para controlar o ambiente interior, incluindo a QAI, ou se pelo contrário, seja por razões económicas, ou socioculturais, ou ambas, os sistemas mecânicos estão a ser aplicados nas escolas, com todos os custos envolvidos, e não estão a ser utilizados.

Numa análise global dos resultados obtidos pode aferir-se que, claramente, a introdução dos sistemas de AVAC não implicou uma melhoria das condições de QAI. Os resultados da concentração de CO_2 revelam que as exigências regulamentares não são cumpridas e os níveis atingidos estão dependentes do clima exterior, pois a admissão de ar novo é realizada por

abertura das janelas. Assim, parece óbvio que os sistemas de AVAC instalados não estão a ser utilizados.

Para além desta abordagem genérica os resultados da campanha experimental permitem uma reflexão mais detalhada e alargada relativamente ao desempenho higrotérmico, ao conforto térmico e à QAI das salas de aula.

4.4.2 Temperatura

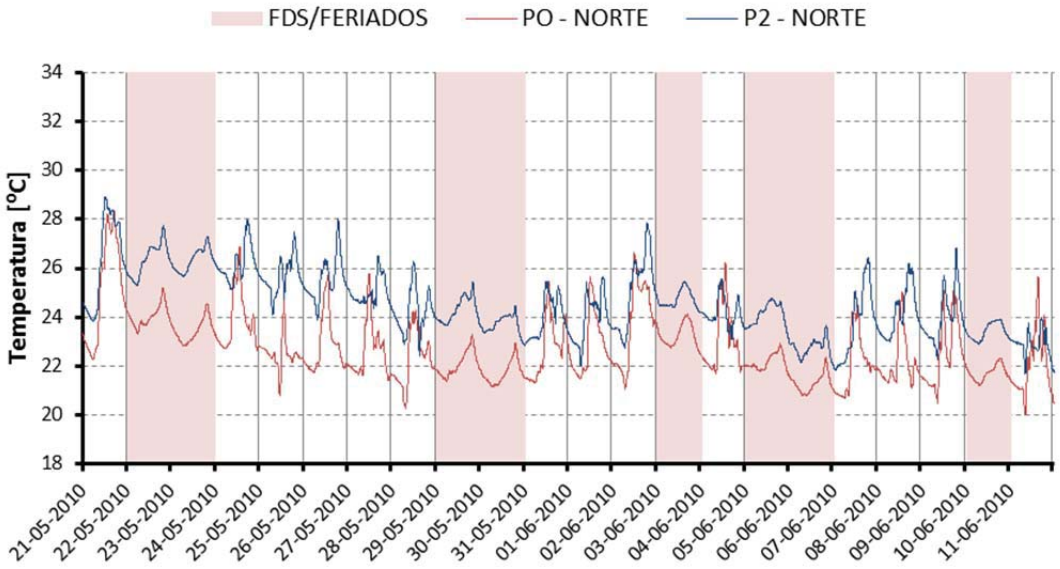
Os resultados da monitorização da temperatura interior permitiram verificar que as salas de aula destes edifícios continuam a apresentar um desempenho dependente da sua orientação e da sua localização.

Embora tenham sido introduzidas nos edifícios medidas de melhoria, nomeadamente através da aplicação de isolamento térmico nas coberturas, utilização de protecções solares (em alguns dos edifícios) e substituição dos vãos envidraçados, introduzindo-se vidros com propriedades térmicas mais adequadas, a temperatura no interior das salas continua fortemente relacionada com a sua orientação e localização. Este efeito, embora observável em quase todos os registos, mostrou-se mais significativo durante as medições no período de arrefecimento, fruto da radiação solar mais elevada.

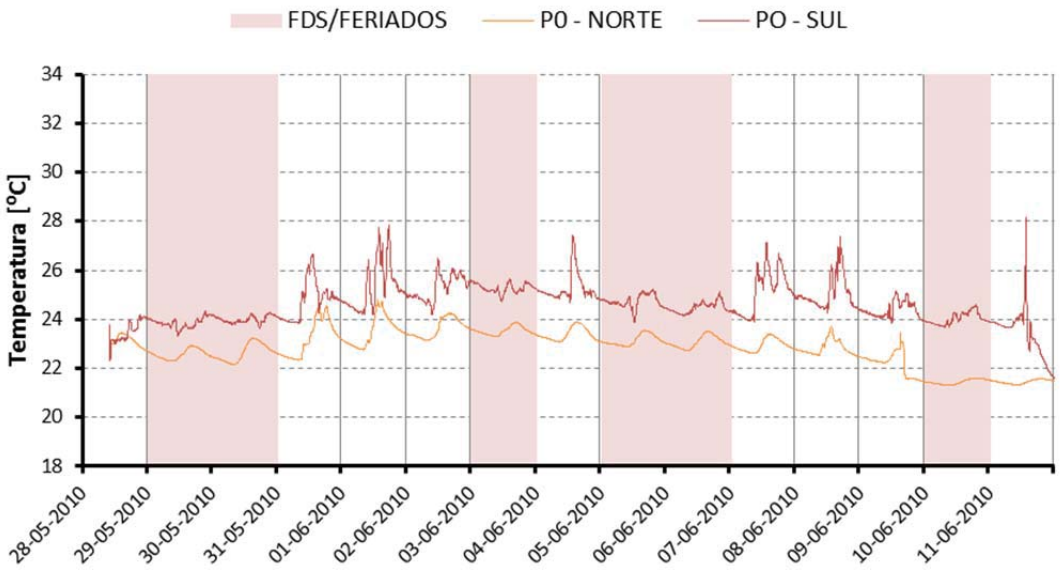
Estes resultados confirmam que os ganhos solares correspondem a uma parcela importante no balanço térmico das salas de aula, revelando-se responsáveis por um desempenho diferenciado em função da sua orientação. Portanto, a estratégia utilizada no projecto de reabilitação deve assentar numa escolha de vidros com um factor solar adequado e na utilização de protecções solares exteriores devidamente estudadas. A diferença de desempenho em função da orientação é evidente quando comparadas salas orientadas a Norte e salas orientadas a Sul, e menos claro quando comparadas salas com orientações a Este e a Oeste.

As diferenças registadas nos valores de temperatura entre salas com a mesma orientação mas situadas em pisos distintos, no r/c e no último piso, revelam que a introdução de isolamento térmico na cobertura não foi suficiente para nivelar o desempenho.

A Figura 4.37 ilustra as diferenças observadas no desempenho das salas de aula, em função da sua orientação e da sua localização, nas medições realizadas durante a estação de arrefecimento. São comparadas as duas salas orientadas a Norte, na escola II-A, ficando claro que na sala do último piso as temperaturas são superiores. Na escola III-A verifica-se que nas duas salas de aula do r/c a temperatura na que se encontra orientada a Sul é substancialmente mais elevada.



a)



b)

Figura 4.37 – a) Escola II-A; b) Escola III-A

No que se refere aos sistemas de AVAC, os registos de temperatura parecem confirmar que os mesmos não estão a ser utilizados, uma vez que se observam grandes flutuações nos valores, situação que não é habitual observar-se em espaços com controlo mecânico das condições ambientais.

A temperatura dentro das salas de aula é, como seria de esperar, altamente dependente do clima exterior registando-se variações significativas no desempenho anual. A Figura 4.38 mostra a distribuição probabilística dos resultados globais (incluem todas as salas de aula monitorizadas) em cada escola, nos três períodos de medição, para os registos da temperatura.

Não são apresentados os resultados da escola III-C porque não houve possibilidade de efectuar registos sempre nas mesmas salas, pelo que a avaliação anual do seu desempenho não é possível.

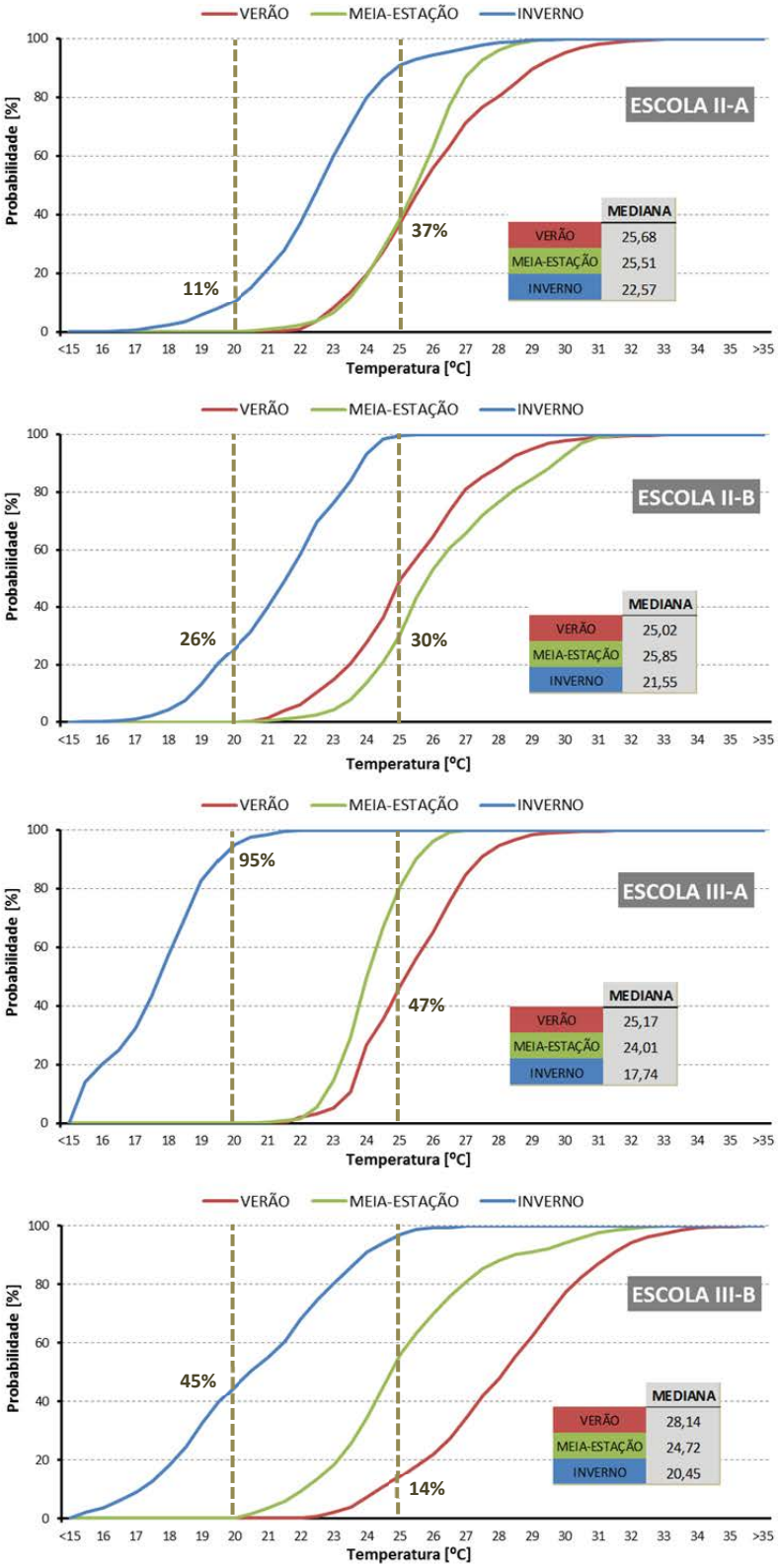


Figura 4.38 – Variação anual da temperatura

Os valores da mediana são bastante próximos das temperaturas de referência apresentadas na regulamentação nacional. No entanto, em algumas das escolas esses valores são acompanhados de uma forte dispersão implicando, desta forma, períodos alargados com temperaturas desadequadas.

Destaca-se, pela negativa, o registo na estação de aquecimento na escola III-A, em que, durante 95% do período teórico de ocupação, a temperatura foi inferior aos 20 ºC de referência, e o registo de Verão na escola III-B, em que a referência do RCCTE (2006) de 25 ºC foi ultrapassada em 86% dos registos.

De acordo com a distribuição dos concelhos de Portugal continental segundo as zonas climáticas, proposta pelo RCCTE (2006), todas as escolas monitorizadas se incluem na zona climática I_2, no Inverno, e V_1, no Verão. A única excepção é a escola III-B que em termos de Verão está incluída na zona V_2. Este facto encontra-se bem patente nos resultados pois foi nesta escola que se observaram mais períodos de sobreaquecimento.

Assim, os resultados obtidos, por corresponderem a um conjunto de escolas restrito, não são representativos do total nacional. Todavia, refira-se que se trata de medições em zonas de clima moderado, pelo que em zonas de temperaturas mais extremas, quer de Inverno, quer de Verão, os problemas registados em algumas das salas de aula podem ser ainda mais significativos.

4.4.3 Humidade relativa

As medições realizadas confirmam que a humidade relativa, na grande maioria do tempo de ocupação, se encontra dentro de limites adequados.

Os resultados obtidos na campanha experimental exploratória, descrita no capítulo anterior, indiciavam que a humidade relativa não se apresentava como um problema no ambiente interior das salas de aula e esta campanha confirma essa ideia alargando a sua base de sustentação, pois tratou-se de uma caracterização do desempenho anual.

No entanto, observou-se uma tendência para valores baixos da humidade relativa durante períodos específicos, nomeadamente quando a temperatura exterior, nas duas últimas semanas de medição, no período de aquecimento, sofreu uma descida acentuada. Porém, mesmo nessa campanha de medições, os valores médios da humidade relativa no período teórico de ocupação são adequados.

A Figura 4.39 mostra os valores globais médios da humidade relativa observados nas cinco escolas monitorizadas.

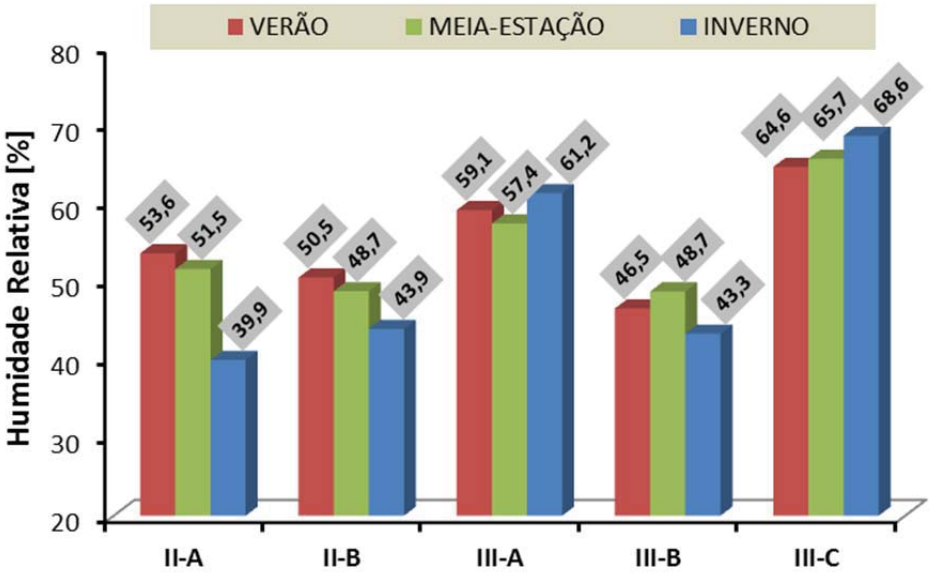


Figura 4.39 – Variação anual da humidade relativa

Os valores médios são muito próximos do valor de referência regulamentar. Não se observou um padrão comum de variação anual dos valores da humidade relativa. Em algumas escolas verificou-se uma diminuição dos valores nas medições de Inverno, mas noutras aconteceu o contrário.

4.4.4 Conforto térmico

A avaliação do conforto térmico das salas de aula, realizada a partir dos resultados obtidos nas medições, apesar de conter algumas aproximações no que se refere à estimativa da temperatura operativa (§2.2.1.2 e §3.3.4.1), permitiu concretizar dois objectivos:

— Visualizar e caracterizar o desempenho global das salas de aula de uma forma simples, identificando-se rapidamente as situações de desconforto térmico;

— Comparar os resultados da aplicação do método gráfico simplificado proposto pela ASHRAE com os modelos adaptativos de conforto térmico.

Verificou-se que as salas de aula apresentaram um grande número de registos com valores correspondentes à zona de conforto. No entanto, observaram-se quer situações de sobreaquecimento em algumas salas de aula, quer situações de temperaturas demasiado frias no período de Inverno.

O método gráfico simplificado proposto pela norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2010) é muito limitativo em condições de Inverno pois exclui da zona de conforto térmico qualquer registo de temperatura inferior a 20 ºC.

Foi realizada uma avaliação anual dos resultados globais de cada escola em que se incluíram os registos obtidos em todas as salas de aula. Os resultados estão ilustrados na Figura 4.40. Mais uma vez excluiu-se deste estudo a escola III-C por terem sido monitorizadas salas de

aula diferentes nos três períodos de medição, perdendo-se a possibilidade de comparação do desempenho.

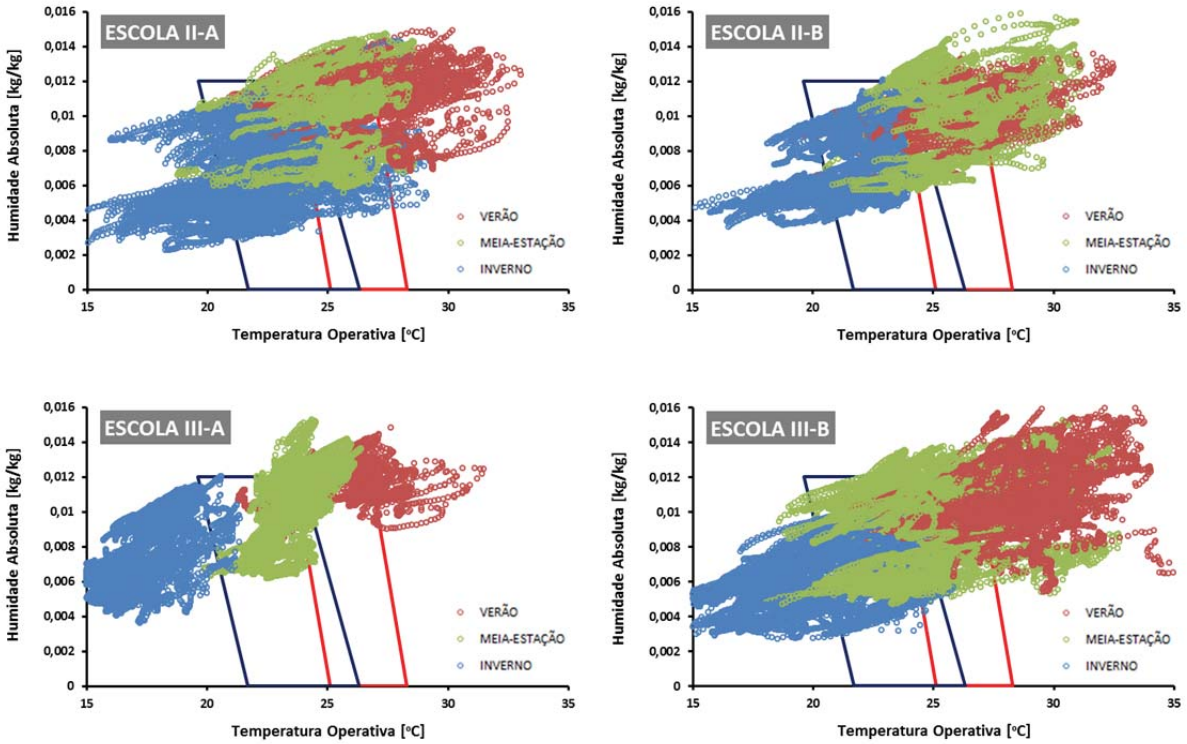


Figura 4.40 – Variação anual do conforto térmico por aplicação do método gráfico simplificado

As flutuações observadas nos valores da temperatura indiciam que os sistemas de AVAC não estiveram em funcionamento e, como tal, o edifício funcionou de um modo passivo. Portanto, as medidas de melhoria das propriedades térmicas dos elementos da envolvente exterior parecem ser as responsáveis pelo desempenho mais adequado do edifício, face ao observado nas escolas não-reabilitadas descritas no capítulo anterior.

Nestas condições a utilização de um modelo de conforto adaptativo parece ser o mais adequado, pois na sua génese engloba o efeito da possível adaptação dos ocupantes ao ambiente interior através de ajustes comportamentais que vão desde a alteração do vestuário até a interacção com o edifício, por exemplo abrindo as janelas ou portas.

Desta forma, aplicaram-se dois modelos de conforto térmico adaptativo, o proposto pela ASHRAE e o proposto pelo LNEC. Verificou-se que o modelo proposto pelo LNEC permite uma maior flutuação de temperaturas, principalmente em situação de Inverno.

Uma vez que uma parcela significativa da amostra escolhida para o desenvolvimento do modelo do LNEC foram edifícios escolares, optou-se por utilizá-lo para caracterizar o desempenho anual das escolas em estudo. Adicionalmente considera-se que a temperatura exterior exponencialmente ponderada, que o modelo do LNEC utiliza como dado de entrada em contraponto com a temperatura média mensal exterior do modelo da ASHRAE, poderá conduzir a resultados mais fiáveis, uma vez que alguns dos valores calculados com a

metodologia proposta pela ASHRAE são altamente influenciados por temperaturas exteriores registadas há bastante tempo e cujo efeito na memória de um individuo já estará diluído, diminuindo, por esta via, a sua capacidade de adaptação psicológica às condições ambientais actuais.

A Figura 4.41 ilustra os resultados anuais globais da aplicação do modelo adaptativo do LNEC às quatro escolas, incluindo os registos de todas as salas de aula.

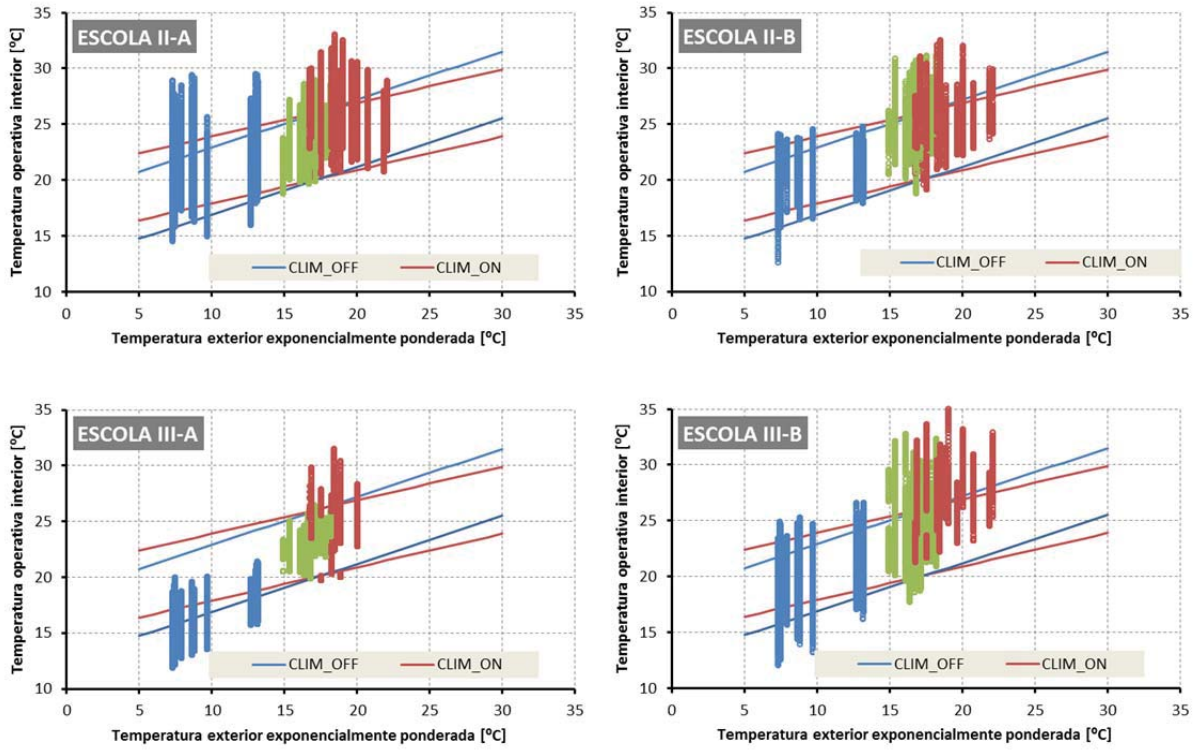


Figura 4.41 – Variação anual do conforto térmico por aplicação do modelo adaptativo do LNEC

Os resultados confirmam que globalmente o desempenho é adequado, observando-se mais registos de sobreaquecimento do que situações de temperatura demasiado baixa, nomeadamente na escola III-B situada na zona climática V_2. Nas escolas situadas em V_1 o cenário é diferente com problemas de sobreaquecimento mais pontuais. Escolas situadas na zona V_3 deverão ter este problema agravado.

O problema do sobreaquecimento poderia ser minimizado, por meios passivos, através da aplicação de sistemas devidamente dimensionados de ventilação natural das salas de aula, nocturna e durante o período de ocupação. A ventilação nocturna de um edifício escolar que apresente elevada inércia térmica pode ser uma estratégia muito eficaz no controlo da temperatura e, consequentemente, na diminuição do período de sobreaquecimento.

A legislação existente no Reino Unido (Building Bulletin 101, 2006), específica para edifícios escolares, refere o problema do sobreaquecimento das salas de aula, propondo os seguintes limites:

— A temperatura nas salas de aula em período lectivo não pode ser superior a 28 ºC durante mais do que 120 horas, por ano;

— O diferencial entre a temperatura exterior e a temperatura interior não pode ser superior a 5 ºC (a temperatura interior não pode ser superior à exterior em mais do que 5 ºC);

— A temperatura interior da sala de aula não pode ser superior a 32 ºC.

Para se considerar que uma escola não apresenta problemas de sobreaquecimento, dois dos limites anteriores têm de ser cumpridos. A aplicação desta metodologia é apoiada numa folha de cálculo (ClassCool, 2005) desenvolvida para o efeito, que permite o estudo de diferentes soluções de ventilação natural para controlo do sobreaquecimento.

Obviamente este modelo não poderá ser directamente utilizado na avaliação dos edifícios escolares portugueses uma vez que foi desenvolvido para o clima do Reino Unido. Contudo, soluções deste tipo, com critérios flexíveis, devem ser propostas para aplicação em Portugal. Metodologias como esta conduzem a soluções construtivas baseadas no binómio, envolventes de elevada inércia térmica fortemente isoladas e sistemas de ventilação natural, que são significativamente mais económicas do que as que estão a ser utilizadas.

As temperaturas demasiado frias dentro das salas de aula podem ser controladas através da aplicação de sistemas simples de aquecimento. Estes equipamentos poderão, ainda, servir para pré-aquecer o ar novo admitido na sala de aula, por ventilação natural, desde que sejam introduzidas grelhas de admissão em locais apropriados, tal como descrito na escola R2 no capítulo anterior (§3.2.2.3).

4.4.5 Concentração de CO_2

A primeira ilação que resulta da análise dos registos da concentração de CO_2 é que estas escolas continuam a não cumprir o limite legal máximo de 1000 ppm. Nenhuma das escolas, em nenhum dos períodos de medição, conseguiu apresentar concentrações sempre inferiores a 1000 ppm.

Os resultados obtidos nas medições em período de Inverno não evidenciaram uma melhoria no desempenho destes edifícios face às duas escolas reabilitadas estudadas no capítulo anterior. Assim, pode questionar-se a eficácia de tão avultados investimentos em sistemas de AVAC se, na prática, eles não são colocados em funcionamento.

Tal como foi referido anteriormente, a concentração de CO_2 nas salas de aula mostrou-se fortemente dependente do clima exterior, uma vez que a admissão de ar novo ocorreu predominantemente por abertura das janelas. Assim, registaram-se valores significativamente superiores nas medições durante a estação de aquecimento.

A Figura 4.42 ilustra os resultados globais obtidos em cada escola. Refira-se que se optou por calcular o valor da mediana porque o valor médio não é possível de determinar a partir dos registos, uma vez que o *data logger* de aquisição dos dados está limitado a um máximo de

2500 ppm. Assim, o valor apresentado corresponde a uma concentração de CO_2 que não foi ultrapassada em 50% do período teórico de ocupação. Pelas razões apresentadas anteriormente não se incluem os resultados da escola III-C.

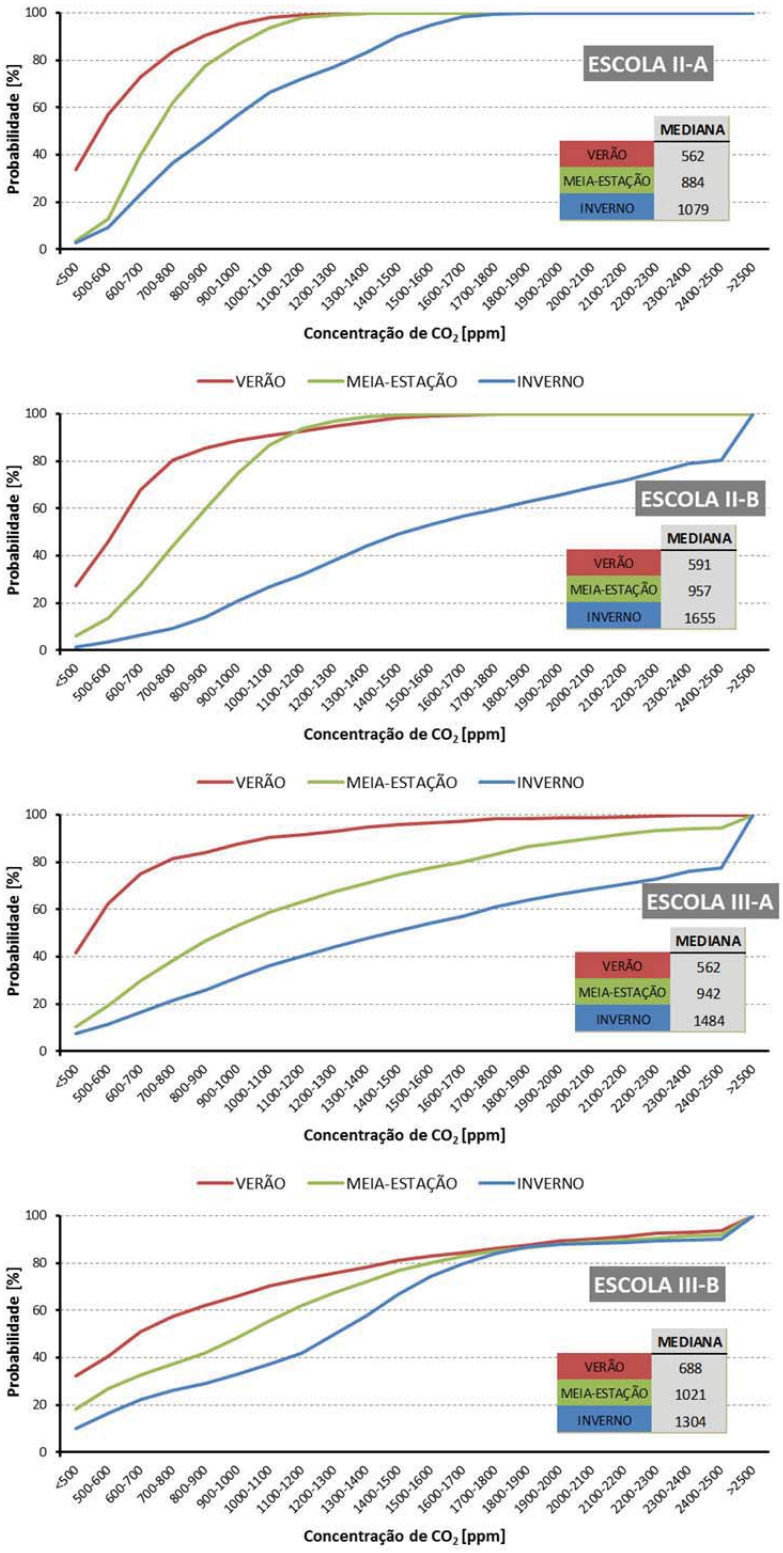


Figura 4.42 – Variação anual da concentração de CO_2

Apesar de não ser cumprida a legislação, os resultados são, na sua maioria, adequados à luz de outros regulamentos. Um pequeno incremento de ventilação, conseguido através da admissão de ar do exterior por grelhas na fachada, seria suficiente para baixar as concentrações de CO_2 para níveis adequados, desde que a legislação se torne mais flexível, nomeadamente através da adopção de critérios probabilísticos para os limites a cumprir.

Das medições realizadas fica claro que na estação de aquecimento e em meia-estação a abertura das janelas consegue garantir níveis de QAI aceitáveis. Apenas na estação de aquecimento o recurso a mecanismos adicionais se mostra necessário. No entanto, transformar essa necessidade esporádica numa obrigatoriedade de utilização de sistemas de AVAC parece algo excessivo.

Numa época de significativas restrições orçamentais deve ser feita uma ponderação clara sobre os prós e os contras da aplicação dos sistemas. Considera-se que essa ponderação irá, obrigatoriamente, conduzir a uma alteração das exigências regulamentares, tornando-as mais adequadas à realidade, flexibilizando os limites, e permitindo, por esta via, o recurso a sistemas de ventilação natural, ou sistemas mecânicos/naturais mais simples do tipo dos apresentados no ponto §3.2.2.3.

Parece evidente que a opção de instalar sistemas mecânicos de AVAC nas escolas não está a ser bem sucedida. Seja por restrições orçamentais das escolas, seja até por razões de natureza social e cultural, o facto é que os sistemas que foram colocados mas não estão a ser utilizados. Refira-se ainda que à medida que o tempo for passando e os equipamentos forem necessitando de intervenções de manutenção e conservação, mais onerosos estes se tornarão e, provavelmente, serão deixados de lado, sem utilização real, pelos responsáveis pela gestão dos edifícios escolares.

4.5 CONCLUSÕES

A campanha experimental de monitorização de parâmetros higrotérmicos e de QAI em edifícios escolares reabilitados apresentava-se como um dos pontos-chave deste trabalho e serviria de suporte à concretização de um dos objectivos centrais propostos para esta Tese, o de caracterizar o desempenho em serviço dos edifícios escolares. Assim, do trabalho realizado é possível tecer as seguintes conclusões:

— A orientação das salas de aula, bem com a sua localização em diferentes pisos do edifício, apesar da intervenção de reabilitação que englobou medidas para colmatar esta situação, continuam a ser responsáveis por diferenças na temperatura interior. Tais diferenças foram bastante significativas quando comparadas salas orientadas a Norte e salas orientadas a Sul e salas situadas no r/c e salas situadas no último piso. Na comparação entre salas orientadas a Este e a Oeste as diferenças não foram evidentes. Assim, parece claro que a estratégia a utilizar na reabilitação de edifícios escolares tem de passar pela utilização de protecções solares exteriores, envidraçados com

propriedades térmicas adequadas, juntamente com um forte isolamento térmico da cobertura;

— Apesar de a amostra estudada pertencer a uma região limitada do País, verificaram-se diferenças entre as escolas mais no litoral e as escolas mais no interior, nomeadamente a escola III-B. Estas diferenças deverão agravar-se em escolas situadas em regiões climáticas mais extremas (zonas climáticas I_3 e V_3). Assim, as soluções construtivas devem ser diferenciadas por região e optimizadas ao clima em causa;

— Os resultados obtidos na avaliação da humidade relativa das salas de aula indicam que esta não constitui um problema de maior nestes edifícios, embora se tenham registado valores pontuais abaixo dos 35%. Contudo, estes registos podem corresponder a instantes em que a sala de aula estava desocupada, uma vez que toda a análise estatística dos resultados foi realizada considerando um período teórico de ocupação para os espaços;

— Os ganhos internos devido à ocupação, iluminação, equipamentos, etc., associados a uma envolvente exterior devidamente isolada, parecem ser suficientes para, num clima moderado como o das escolas estudadas, garantir temperaturas próximas das de conforto em situação de Inverno. No entanto, os mesmos ganhos, associados a ganhos solares mais significativos, podem conduzir estas escolas a situações de sobreaquecimento em períodos mais quentes. O sobreaquecimento das salas de aula poderia ser controlado através de envolventes exteriores de elevada inércia térmica associadas a estratégias de ventilação nocturna;

— O registo da concentração de CO_2 mostrou que os sistemas de AVAC não estão a ser colocados em funcionamento e, como tal, apesar do avultado investimento efectuado, estas escolas continuam a não cumprir a legislação;

— Embora não cumprindo o máximo regulamentar de 1000 ppm, a concentração de CO_2 foi, na maioria das medições, próxima de níveis considerados adequados noutras regulamentações manifestamente mais flexíveis do que a portuguesa. Adicionalmente, a admissão de ar novo nas salas de aula foi conseguida sem recurso aos sistemas mecânicos pelo que ficou evidente que um sistema mecânico simples, para extracção com compensação através de grelhas de admissão nas fachadas, complementar à ventilação natural, pode ser suficiente para garantir uma adequada QAI. O recurso ao sistema mecânico deverá ser necessário apenas nos períodos de Inverno e durante picos de ocupação das salas de aula. Desta forma os custos imediatos, de aquisição e instalação, e os diferidos, de exploração e manutenção, serão significativamente reduzidos.

A caracterização do desempenho em serviço permitiu efectuar um balanço crítico da legislação em vigor e apresentar algumas sugestões de melhoria numa futura revisão regulamentar. Assim:

— As exigências regulamentares de conforto térmico devem ser mais abrangentes do que as actuais. A apresentação de um valor de temperatura de referência para o Inverno e outro para o Verão é algo limitado e restritivo. A adopção de um modelo de conforto térmico adaptativo, que garante alguma flexibilidade aos ocupantes do edifício, permitirá compatibilizar uma solução de ventilação predominantemente natural com equipamentos de aquecimento simples para controlo da temperatura mínima no Inverno, mantendo-a dentro de níveis adequados;

— O critério único de definição de um valor máximo regulamentar para a concentração de CO_2 é demasiado restritivo e leva à quase exclusão da possibilidade de utilização de ventilação natural, impondo, por esta via, o recurso a sistemas mecânicos de AVAC que, como se observou, não têm utilização prática. A regulamentação deve ser reavaliada e novos limites, baseados em critérios probabilísticos, podem ser uma solução para, simultaneamente, garantir uma QAI dentro de níveis adequados e permitir o recurso a sistemas de ventilação que tornem os novos edifícios mais sustentáveis.

Como conclusão final refere-se que os resultados obtidos na campanha de medições, bem como toda a experiência obtida durante o processo de preparação e execução das medições, nomeadamente durante a visita às escolas, reforçaram a profunda convicção de que a estratégia de reabilitação de um edifico escolar deve assentar na aposta em envolventes adequadas, isoladas e com elevada inércia térmica, protecções solares exteriores, sistemas simples de ventilação, que incluam grelhas de admissão nas fachadas e, possivelmente, extracção mecânica, e sistemas de aquecimento adequados face ao clima da região.

Desta forma, a escola funcionará na grande maioria do tempo com ventilação natural recorrendo-se à extracção mecânica apenas em situações pontuais. A aposta na ventilação nocturna poderá ser adequada para ajudar a controlar o problema do sobreaquecimento das salas de aula durante a estação de arrefecimento.

Uma solução deste tipo é incomparavelmente mais económica do que as que estão a ser utilizadas actualmente e conduzirá a desempenhos, pelo menos, ao nível dos apresentados neste trabalho.

5 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO DESEMPENHO ENERGÉTICO E DO CONFORTO

5.1 OBJECTIVOS E METODOLOGIA

O segundo grande objectivo desta Tese passa por propor uma metodologia de optimização de soluções construtivas, para aplicação em intervenções de reabilitação de edifícios escolares, tendo como pressupostos a melhoria da sua eficiência energética, o conforto dos seus ocupantes e a durabilidade e sustentabilidade económica das soluções adoptadas.

Para tal é necessário recorrer a um procedimento de optimização multi-objectivo, pois trata-se de objectivos conflituosos entre si, uma vez que se pretende garantir adequadas condições de conforto e qualidade do ar interior (QAI) minimizando o consumo energético e os custos. O processo de optimização assentará na simulação numérica do desempenho térmico e energético das soluções construtivas.

De acordo com o descrito no ponto §2.3.2.3, a resolução matemática deste tipo de problemas pode ser efectuada de uma forma bastante eficaz recorrendo a algoritmos evolucionários, como, por exemplo, os algoritmos genéticos.

A formulação do problema de optimização implica, numa primeira fase, a definição dos seguintes parâmetros:

— As variáveis: correspondem às propriedades e características dos elementos construtivos e do próprio edifício que mais condicionam o seu desempenho e cujo valor se pretende optimizar;

— As funções de avaliação do desempenho: são as funções matemáticas propostas para caracterizar o desempenho do edifício em função do valor das variáveis em estudo. O seu cálculo exacto implica o recurso a simulações computacionais do desempenho anual do edifício.

Posteriormente os conjuntos de variáveis que minimizarem as funções de avaliação do desempenho correspondem às soluções óptimas do problema. A minimização das funções será conseguida com recurso a algoritmos evolucionários de optimização multi-objectivo. A Figura 5.1 traduz esquematicamente este procedimento.

No entanto, esta metodologia exige, para cada iteração do algoritmo evolucionário, o recurso a numerosas simulações computacionais do desempenho do edifício. Tendo em consideração que as simulações anuais do desempenho são um processo computacionalmente muito exigente e, consequentemente, muito moroso, é praticamente impossível de ser realizado em modelos muito complexos. Adicionalmente, para implementar esta metodologia seria necessário ligar o programa utilizado para a optimização multi-objectivo, neste caso o

MATLAB, ao programa adoptado para a simulação anual do desempenho do edifício, o *EnergyPlus*.

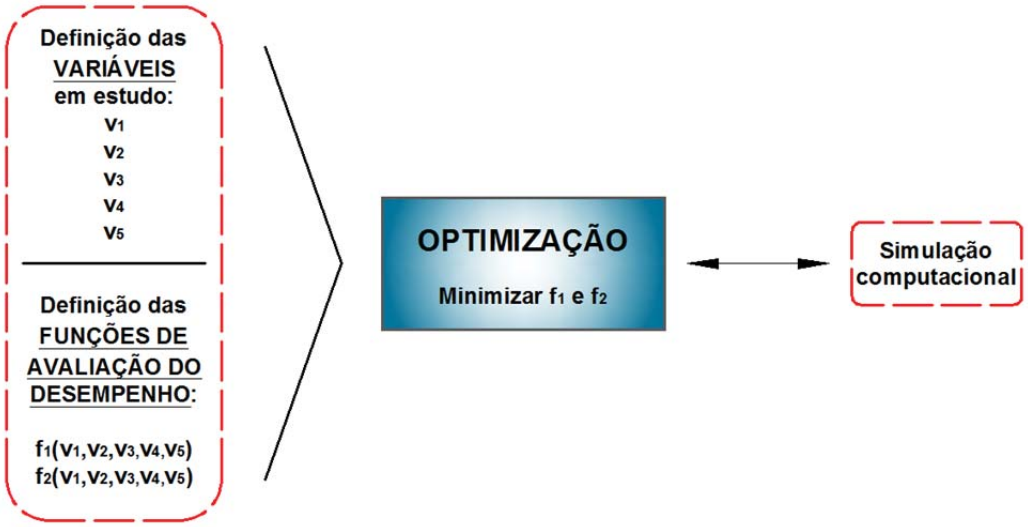


Figura 5.1 – Esquema da metodologia de optimização

Para ultrapassar estas dificuldades optou-se por recorrer a Redes Neurais Artificiais (RNA), como ferramenta matemática de aproximação dos resultados das simulações, e, desta forma, não só evitar a ligação directa entre o algoritmo de optimização multi-objectivo e a simulação computacional do desempenho, como também diminuir muito significativamente o tempo global de processamento.

Com a introdução das RNA a simulação numérica é apenas utilizada no seu treino e validação, passando as redes neurais a ser responsáveis pelo cálculo das funções a optimizar, tal como mostra a Figura 5.2.

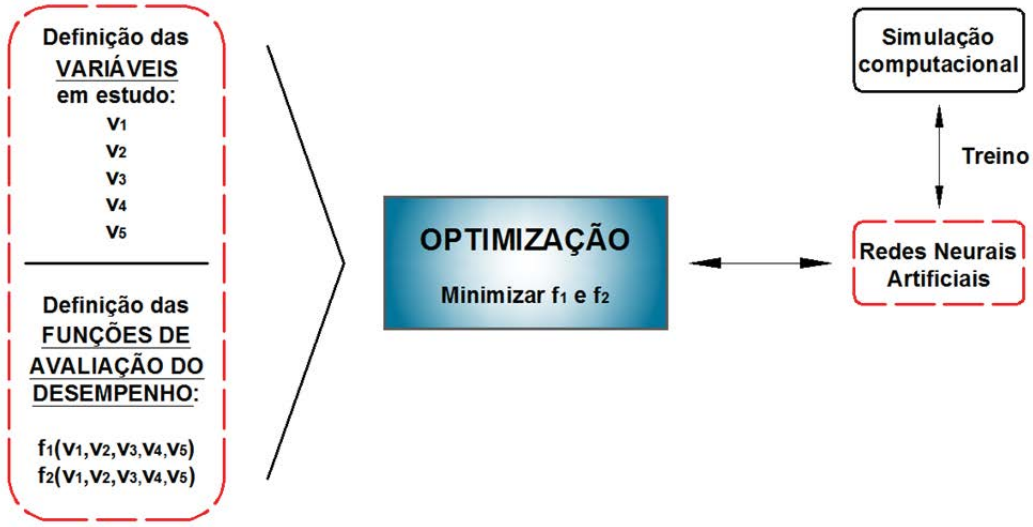


Figura 5.2 – Esquema de optimização com recurso a RNA

Após a definição do esquema de optimização que seria utilizado, por forma a tornar esta tarefa exequível, foi necessário tomar algumas opções de fundo, nomeadamente no que se

refere ao tipo de edifício escolar a estudar, quais as variáveis a considerar na optimização e como contabilizar matematicamente o desempenho do edifício. Estas opções foram, em parte, suportadas pelas conclusões retiradas dos resultados experimentais das campanhas de medição descritas nos capítulos anteriores.

Em relação ao tipo de edifícios escolares que seriam estudados, a decisão foi tomada tendo em consideração os seguintes aspectos:

— Na campanha experimental preliminar, descrita no capítulo 3, verificou-se que os edifícios do tipo blocos 3x3 (anos 80) e monobloco (anos 90) não apresentam condições adequadas de conforto térmico e QAI;

— Estas tipologias são as mais correntes, ou seja, englobam a grande maioria dos edifícios escolares portugueses;

— O programa governamental de reabilitação de escolas secundárias, descrito no ponto §2.1.2.2, incidiu essencialmente nas escolas do tipo II (construídas entre 1936 e 1969).

Portanto, parece claro que num futuro próximo, no que se refere à reabilitação de edifícios escolares, a aposta terá de passar, obrigatoriamente, pelos edifícios dos anos 80 e 90.

Assim, a opção foi modelar as duas escolas monitorizadas durante a campanha experimental exploratória e utilizar os dados dessas medições para calibração e validação dos modelos criados. Os modelos foram designados de tipo A e tipo B, para a escola monobloco e para a escola blocos 3x3, respectivamente.

As variáveis a optimizar devem corresponder a propriedades e características do edifício que representem o seu desempenho térmico e energético e, obviamente, devem poder ser alteradas/melhoradas durante uma intervenção de reabilitação do edifício.

A partir destes pressupostos foram definidas quatro variáveis relacionadas com as propriedades dos materiais a utilizar na envolvente exterior do edifício e uma variável que caracteriza a ventilação.

A avaliação do desempenho do edifício assentou na definição de critérios relacionados com o conforto térmico e com a eficiência energética, que foram formulados matematicamente através de duas funções de avaliação do desempenho.

Desta forma, numa fase inicial, será um processo de optimização de cinco variáveis com dois objectivos. Posteriormente será incluído um terceiro objectivo que traduz o aspecto económico associado às variáveis.

O programa de simulação escolhido foi o *EnergyPlus* pois inclui todas as potencialidades requeridas para este trabalho, tem um grande suporte bibliográfico de apoio à sua utilização e o seu modelo de cálculo encontra-se perfeitamente validado.

A principal desvantagem desta ferramenta prende-se com a dificuldade de introdução dos dados, uma vez que não dispõe de nenhuma interface gráfica para esse fim. No entanto,

existem no mercado várias soluções que permitem criar os modelos de uma forma mais simples e intuitiva, para posterior simulação no *EnergyPlus*. Neste trabalho foi utilizado o programa *DesignBuilder* (DesignBuilder, 2009) para apoio na criação dos modelos de simulação.

5.2 DESCRIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MODELOS

5.2.1 Geometria

A modelação dos dois edifícios iniciou-se com a criação da sua geometria. Para tal, foram consultados os seus respectivos projectos originais e foram utilizados dados obtidos em visitas aos locais, no decorrer de um trabalho desenvolvido pelo Laboratório de Física das Construções (LFC), com o objectivo de identificar o estado de conservação das escolas EB 2,3 da cidade do Porto, propondo estratégias de intervenção de reabilitação e estimativas orçamentais para os trabalhos propostos. Dessas visitas resultaram vários relatórios técnicos, que incluem a caracterização detalhada dos elementos construtivos que foram utilizados na envolvente exterior dos edifícios (LFC 2008, 2009).

A simulação numérica, quando realizada para períodos extensos e em modelos complexos, é um processo computacionalmente muito exigente e, naturalmente, bastante demorado. Logo, modelos detalhados dos edifícios completos aumentariam de tal forma o tempo de simulação que seria impraticável. Para evitar este problema simplificaram-se os modelos utilizando apenas um dos corpos dos edifícios. A escolha recaiu naquele que incluía as zonas onde se encontram a maioria das salas de aula convencionais e que, como tal, pode ser considerado como representativo do desempenho do edifício.

A Figura 5.3 ilustra a geometria do modelo criado para a escola do tipo A.



a)



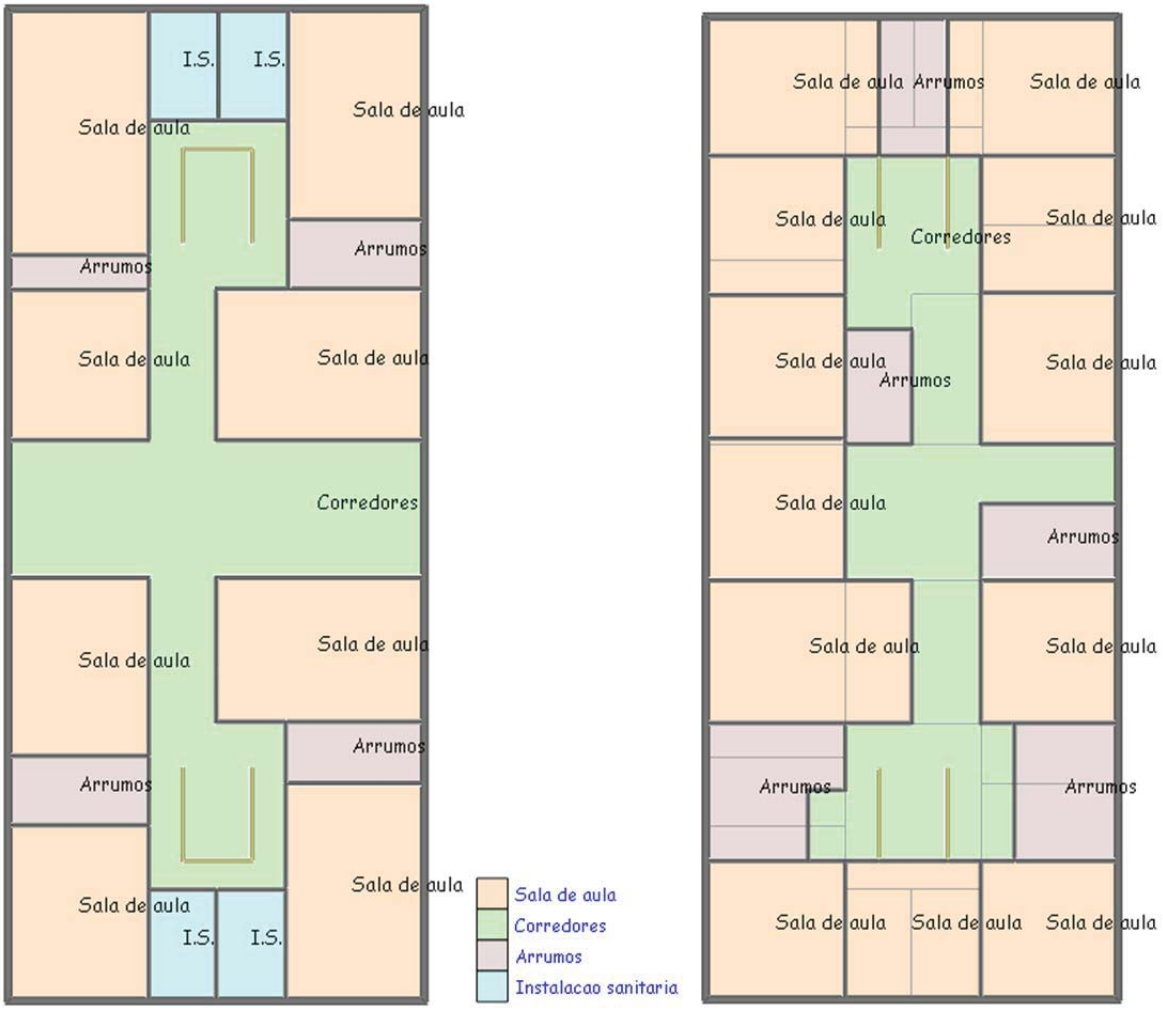
b) c)

Figura 5.3 – Modelo da escola A. a) vista geral; b) planta do r/c; c) planta do 1º piso

A Figura 5.4 ilustra a geometria do modelo criado para a escola do tipo B.



a)



b) c)

Figura 5.4 – Modelo da escola B. a) vista geral; b) planta do r/c; c) planta do 1º piso

5.2.2 Elementos construtivos

A modelação dos elementos construtivos foi pormenorizada, tendo-se caracterizado em detalhe as propriedades dos materiais que os constituem.

O programa *DesignBuilder* disponibiliza, em livrarias próprias, materiais e soluções construtivas tipo. Contudo, grande parte das soluções construtivas propostas não são correntes em Portugal, pelo que se efectou um trabalho minuncioso de criação de novas livrarias com as soluções construtivas tipicamente utilizadas nos edifícios em estudo.

As soluções construtivas de parede exterior e vãos envidraçados utilizadas nas duas escolas são idênticas, portanto foi criado um único elemento comum aos dois modelos. As coberturas dos dois edifícios são diferentes (§3.2.1.2).

A Tabela 5.1 sintetiza os elementos criados para a envolvente exterior opaca, incluindo os materiais que os constituem e as principais propriedades térmicas.

Tabela 5.1 – Elementos construtivos da envolvente exterior opaca dos modelos de simulação

	Material	Espessura e [m]	Condutibilidade térmica λ [W/(m.ºC)]	Resistência térmica R [(m^2.ºC)/W]	Massa volúmica ρ [kg/m^3]
PAREDE EXTERIOR	Reboco tradicional	0,015	1,50	-	2000
	Tijolo 15	0,15	-	0,39	1250
	Tijolo 11	0,11	-	0,27	1250
	Reboco tradicional	0,01	1,50	-	2000
COBERTURA A	Telha cerâmica*	0,015	0,92	-	2000
	Laje de betão armado	0,20	2,00	-	2500
	Revestimento à base de gesso	0,015	0,50	-	1000
COBERTURA B	Godo	0,03	2,00	-	1800
	Impermeabilização	0,01	0,70	-	2000
	Betonilha	0,04	1,65		2000
	Camada de forma	0,10	0,33		1000
	Laje de betão armado	0,20	2,00		2500

*não tem influência no cálculo do coeficiente de transmissão térmica do elemento

Os vãos envidraçados das duas escolas são constituídos por caixilharia de alumínio de correr, sem corte térmico e com vidro simples de 8 mm. As protecções solares são persianas exteriores de plástico. Para a sua modelação foram criados os materiais descritos na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Vãos envidraçados dos modelos de simulação

Material	Propriedades	Considerações
Vidro simples 8 mm	U = 5,80 W/(m^2.ºC) g = 0,82	
Caixilharia em alumínio sem corte térmico	U = 5,90 W/(m^2.ºC)	Considerou-se que a caixilharia de cada vão envidraçado dispõe de dois perfis horizontais e um vertical, com 5 cm de espessura cada.
Persiana exterior em plástico	-	Considerou-se que o funcionamento da protecção depende da radiação solar total incidente no vão envidraçado. A protecção está em funcionamento quando a radiação ultrapassa os 120 W/m^2.

5.2.3 Ganhos internos

Os ganhos internos são uma componente fundamental do balanço térmico de um edifício escolar pelo que a sua correcta contabilização é essencial para se obter um modelo com a fiabilidade necessária.

Os ganhos internos incluem as seguintes parcelas:

— Actividade metabólica;

— Iluminação;

— Equipamentos.

Uma característica diferenciadora dos edifícios escolares é a grande variabilidade no horário de funcionamento dos espaços e, consequentemente, do nível de ocupação e respectivos ganhos internos devido ao metabolismo.

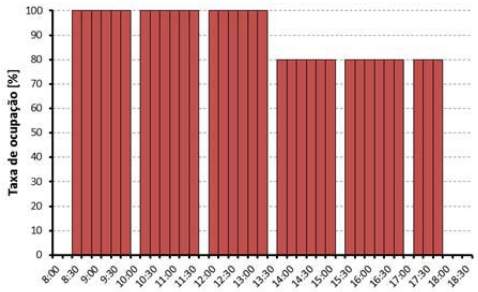
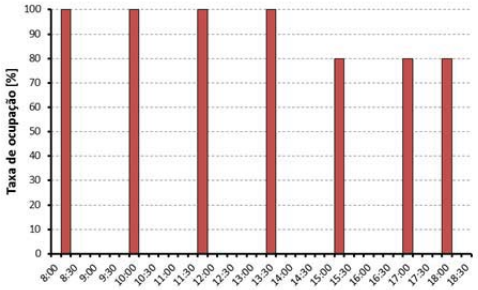
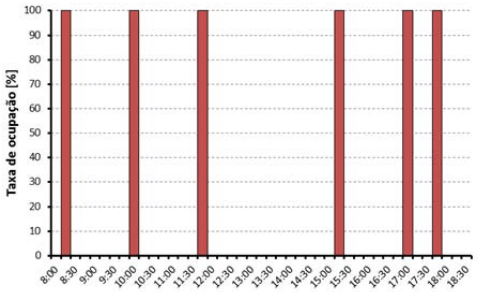
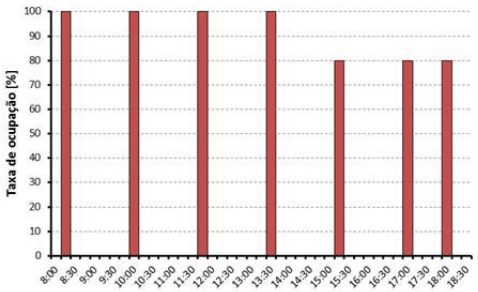
A partir de dados recolhidos junto dos responsáveis das escolas, procedeu-se à concepção de perfis diários de ocupação tipo para cada um dos espaços considerados no modelo. Adicionalmente, foi definida a densidade de ocupação desses espaços, tomando por base os valores de referência sugeridos pelas normas EN 15251 (CEN, 2007) e ASHRAE 62.1 (ASHRAE, 2004).

O RCESE (2006) também inclui padrões de referência de utilização dos edifícios para serem utilizados no cálculo das suas necessidades energéticas. Porém, considerou-se que a metodologia proposta era demasiado simplista para ser aplicada nos modelos em estudo.

O metabolismo foi definido a partir das normas ISO 7730 (ISO, 2005) e ASHRAE 55 (ASHRAE, 2010) que disponibilizam uma base de dados de valores de produção calorifica do corpo humano em função da actividade que esta a ser desenvolvida.

A Tabela 5.3 resume os dados adoptados na modelação da actividade metabólica nos diferentes espaços considerados nos modelos.

Tabela 5.3 – Dados para a contabilização da actividade metabólica

Espaço	Metabolismo [W/ocupante]	Densidade [ocupantes/m^2]	Perfil diário de ocupação (2ª a 6ª feira)
Sala de aula	94	0,40	
Corredores	112	0,60	
Arrumos	112	0,10	
Instalação Sanitária	112	0,60	

A carga térmica relativa à iluminação foi definida em função dos valores recomendados na bibliografia. De acordo com a REHVA (2010), a carga térmica devido à iluminação deve situar-se entre 20 e 25 W/m^2, para salas de aula, e 50 W/m^2, para auditórios. Já a norma ASHRAE 90.1 (2007) propõe 15 W/m^2 para salas de aula convencionais.

Neste trabalho optou-se por considerar a existência de carga térmica devido à ilumição apenas nas salas de aula, com um valor máximo de 25 W/m^2 e variável de acordo com o perfil diário apresentado na Figura 5.5. A este perfil corresponde um valor médio de, aproximadamente, 18 W/m^2.

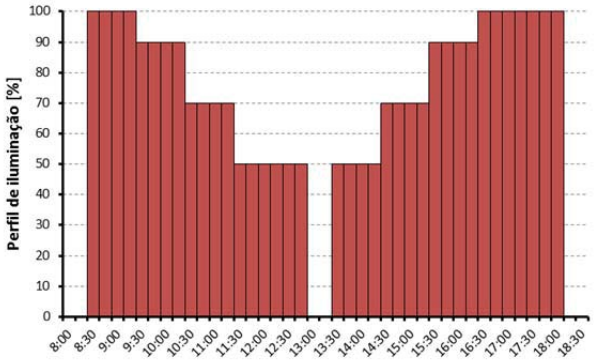


Figura 5.5 – Perfil de funcionamento da iluminação

Uma vez que nas zonas do edifício que foram modeladas apenas existiam salas de aula convencionais, sem equipamentos informáticos ou audio-visuais, não se considerou qualquer ganho térmico interno devido aos equipamentos.

Todos os ganhos internos referidos anteriormente foram considerados de segunda a sexta-feira, excepto períodos de férias. Foram definidos três períodos de férias: duas semanas no Natal, uma semana na Páscoa (admitida como sendo a primeira semana do mês de Abril) e dois meses no Verão (Julho e Agosto).

5.2.4 Ventilação e sistemas de aquecimento

As duas escolas monitorizadas no âmbito da campanha experimental exploratória descrita no capítulo 3 e que servem de base aos modelos de simulação aqui descritos não dispunham nem de sistemas de aquecimento, nem de ventilação. Assim, a admissão de ar novo é realizada exclusivamente através da abertura das janelas exteriores. No entanto, tendo em consideração as temperaturas registadas no interior das salas de aula dessas escolas, tal procedimento não deve ser muito corrente, pelo menos durante os meses mais frios.

Verificou-se ainda que o caudal de ar novo admitido nas salas de aula não é suficiente para garantir níveis aceitáveis de QAI, logo, uma intervenção de reabilitação nestes edifícios tem de, obrigatoriamente, contemplar alterações no sistema de ventilação.

Uma vez que os modelos criados, antes de serem utilizados na optimização das soluções construtivas, devem ser devidamente validados, foi necessário definir dois cenários distintos

para a caracterização do sistema de ventilação e dos equipamentos de aquecimento das salas de aula:

— Para a validação dos modelos de simulação, através da comparação com os dados registados nas medições, foi considerada a situação que mais se assemelha com a actual, ou seja, sem qualquer sistema de aquecimento e um caudal de ventilação definido em função dos resultados obtidos nas medições descritas no ponto §3.3.5.2. O valor adoptado foi de 0,25 h^{-1} (calculado através de uma média ponderada);

— Para o procedimento de optimização das soluções construtivas o cenário anterior já não se aplica. A optimização refere-se a uma situação de reabilitação dos edifícios e, como tal, outra estratégia deve ser considerada. Os resultados descritos no capítulo 4 desta Tese levaram a concluir que a aposta em equipamentos dispendiosos e complexos de AVAC, para o controlo das condições ambientais e de QAI, não se revelou adequada. Adicionalmente, a aplicação destes sistemas implica uma intervenção muito intrusiva, condicionando decisivamente a arquitectura dos edifícios (§2.2.2.3). Assim, apresenta-se neste trabalho uma estratégia alternativa que passa pela valorização da envolvente exterior dos edifícios e pela utilização preferencial de ventilação natural. Desta forma, os modelos utilizados na simulação foram concebidos de acordo com este princípio, pelo que se considerou que a admissão de ar novo do exterior se realiza por via natural e os sistemas de aquecimento utilizados são radiadores alimentados a água quente. Esta estratégia é idêntica à utilizada na reabilitação das escolas descritas no ponto §3.2.2.

5.3 VALIDAÇÃO DOS MODELOS

A validação dos modelos criados foi efectuada utilizando os dados das medições realizadas nas escolas durante a campanha experimental exploratória.

Apesar de se ter adoptado um nível de detalhe elevado na concepção dos modelos, não é expectável um ajuste perfeito entre os resultados obtidos na simulação e os das medições, uma vez que existem um elevado número de variáveis cuja contabilização nos modelos ou é mesmo impossível, ou tornaria o tempo de simulação de tal forma extenso que inviabilizaria a sua utilização prática.

Assim, destacam-se os seguintes factores como potenciais fontes de erro nos resultados obtidos na simulação computacional:

— O perfil de ocupação utilizado foi definido a partir da contabilização das presenças numa das salas de aula monitorizadas durante um dos dias da campanha experimental. A contabilização foi efectuada a partir dos dados registados nos livros de ponto das turmas que ocuparam essa sala. Esse mesmo perfil de ocupação foi adoptado nas restantes salas de aula e para todos os dias incluídos na simulação. Tal cenário não traduz a realidade destas escolas onde as turmas têm um número variável de alunos e a

ocupação das salas de aula é intermitente ao longo do dia, principalmente durante o período da tarde. Tendo em consideração que a parcela referente aos ganhos internos devido ao metabolismo é decisiva para o balanço térmico global destes espaços, fica claro que a aproximação/simplificação realizada terá, forçosamente, um impacto relevante nos resultados finais da simulação, sendo responsável por erros que podem ser significativos;

— Foi considerado um valor constante de admissão de ar novo nas salas de aula, obtido por ponderação dos resultados das medições dos caudais de ventilação através do Método do Gás Traçador e da Técnica do Declive. Este procedimento não prevê qualquer abertura pontual das janelas exteriores, situação que, provavelmente, durante a semana lectiva terá ocorrido com alguma frequência, mesmo tendo em consideração que as medições decorreram durante semanas de Inverno. No entanto, considerar caudais de ventilação variáveis, além de implicar o registo *in situ* da abertura das janelas e portas, aumentaria significativamente o tempo de simulação;

— Na colocação dos *data logger* nas salas de aula procurou-se evitar localizações que pudessem influenciar os resultados, tais como junto a portas, janelas, fontes de calor, entradas de ar, etc. No entanto, não se pode garantir que não tenha existido alguma interferência por parte dos ocupantes, nomeadamente devido à curiosidade dos alunos;

— As características dos *data logger* utilizados na campanha exploratória, nomeadamente o erro máximo e a resolução, podem conduzir a diferenças com alguma relevância;

— Os dados climáticos utilizados na simulação foram obtidos numa estação meteorológica próxima (cerca de 10 km). Embora globalmente os dados não devam diferir muito podem existir pequenas diferenças.

A definição dos dados climáticos obrigou à construção de um ficheiro de dados específico para cada modelo com os registos horários das diferentes variáveis meteorológicas. Apresentam-se na Figura 5.6 os dados climáticos para o modelo da escola A e na Figura 5.7 para o modelo da escola B. Os dados apresentados referem-se apenas à semana de medição, apesar de na simulação se ter incluído o mês anterior ao início das medições, com o objectivo de permitir a entrada em ciclo e respectiva estabilização do desempenho do edifício.

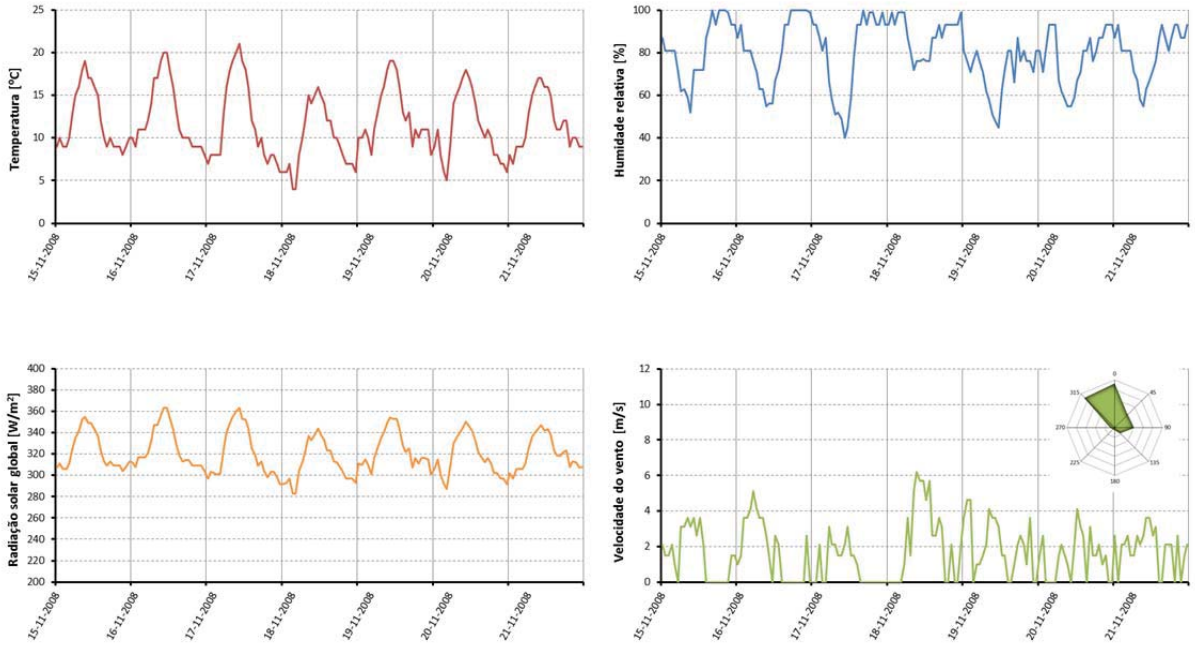


Figura 5.6 – Dados climáticos utilizados na validação do modelo da escola A

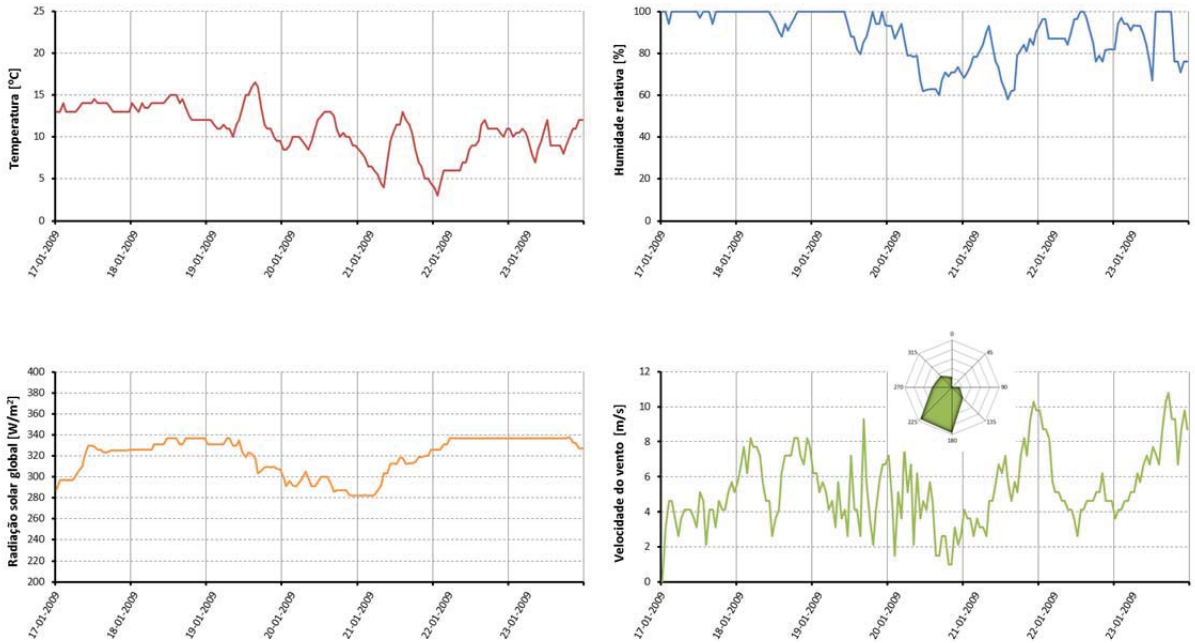


Figura 5.7 – Dados climáticos utilizados na validação do modelo da escola B

Os resultados obtidos revelaram que o modelo utilizado não é adequado para simular a humidade relativa nas salas de aula. O modelo evidenciou um enorme desajuste face às medições.

Estas dificuldades já eram expectáveis, uma vez que o programa *EnergyPlus* é claramente vocacionado para simulação energética dos edifícios, denotando algumas carências quando utilizado para a previsão da humidade relativa. De acordo com Liesen e Pedersen (1999) este

problema prende-se, essencialmente, com o facto de o programa recorrer a um algoritmo iterativo que não é o mais adequado para a previsão dinâmica da transferência de humidade, pois trata-se de um fenómeno não-linear (Rode & Grau, 2003).

No entanto, os resultados obtidos nas duas campanhas experimentais evidenciaram que a humidade relativa não é um factor de preocupação nos edifícios escolares. Considera-se que tal carência não é impeditiva da utilização do programa *EnergyPlus* para este estudo, uma vez que a simulação da humidade relativa não é determinante para os objectivos. Portanto, as funções de avaliação do desempenho, definidas para caracterizar os edifícios, não incluem a humidade relativa.

As Figuras 5.8 e 5.9 ilustram os resultados da comparação entre os valores obtidos na simulação e os registados nas medições, numa das salas de aula monitorizadas em cada escola.

Tal como referido anteriormente foi definido o perfil de ocupação tipo a partir dos registos reais das presenças dos alunos num dos dias de monitorização. Para esse dia é apresentado o detalhe da comparação dos resultados. Como seria de esperar os valores medidos e os resultados da simulação estão mais próximos do que nos outros dias.

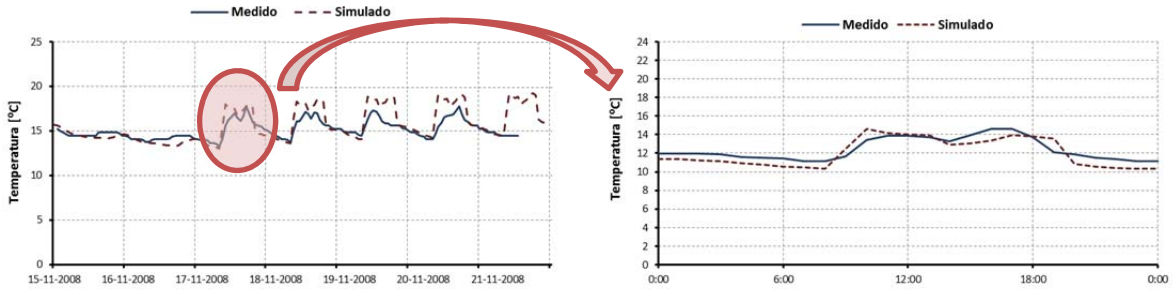


Figura 5.8 – Comparação entre a simulação e a medição para a escola A

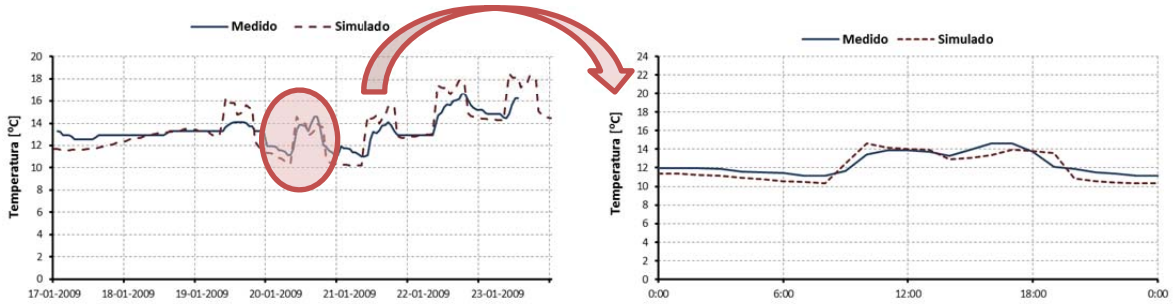


Figura 5.9 – Comparação entre a simulação e a medição para a escola B

Concluindo, o ajuste perfeito entre as medições e os valores da simulação só poderia ser conseguido com outro tipo de estratégia, nomeadamente:

— Um controlo e registo das alterações, ao longo do tempo, das variáveis dentro da escola, como as ocupações nas diferentes salas de aula e os períodos de abertura das janelas;

— Um registo das condições climáticas no local através da colocação para o efeito de uma estação meteorológica.

Este não era o objectivo deste trabalho pelo que se considera que os resultados obtidos são perfeitamente adequados.

5.4 MODELO DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO

5.4.1 Variáveis em estudo

A escolha das variáveis a incluir no estudo foi realizada após a definição da estratégia de reabilitação considerada mais adequada. Essa estratégia passa por apostar numa envolvente exterior isolada e de elevada inércia térmica. Assim, escolheram-se os elementos construtivos da envolvente exterior cujo peso é mais significativo para o balanço térmico e energético do edifício.

A escolha recaiu nas paredes exteriores, na cobertura e nos envidraçados. Para optimizar estes elementos construtivos foram seleccionadas as propriedades que melhor caracterizam o seu desempenho térmico.

Tendo em consideração o enorme peso da ventilação no balanço térmico e energético de um edifício foi ainda considerada como variável uma grandeza que a caracteriza, as renovações horárias.

As cinco variáveis em estudo são as seguintes:

— Coeficiente de transmissão térmica da parede exterior, U_{par} [W/(m^2.ºC)];

— Coeficiente de transmissão térmica da cobertura, U_{cob} [W/(m^2.ºC)];

— Coeficiente de transmissão térmica dos envidraçados, U_{vidro} [W/(m^2.ºC)];

— Factor solar dos envidraçados, g [-]

— Renovações horárias, RPH [h^{-1}].

Após a escolha das variáveis em estudo, procedeu-se à concretização da estratégia adoptada para a reabilitação, definindo-se as soluções construtivas a utilizar.

Os dois tipos de edifício escolar em estudo possuem paredes exteriores duplas, sem isolamento térmico. A proposta de reabilitação considerada neste trabalho passa pela utilização do sistema ETICS (*External Thermal Insulation Composite Systems*).

Do ponto de vista térmico, os sistemas do tipo ETICS garantem a continuidade do isolamento térmico e um aumento da inércia térmica, implicando uma melhoria do conforto térmico interior e da eficiência energética do edifício e facilitando a utilização de estratégias de ventilação nocturna para controlar o sobreaquecimento dos espaços.

Por outro lado, do ponto de vista construtivo, permitem a diminuição da espessura das paredes exteriores (apenas em construção nova) e uma maior durabilidade das fachadas. Estas vantagens estão associadas a dois aspectos muito relevantes: o baixo custo do sistema e a sua facilidade de aplicação, que é sobretudo importante em reabilitação de edifícios (Barreira, 2010). A Figura 5.10 mostra uma representação esquemática de um sistema do tipo ETICS.

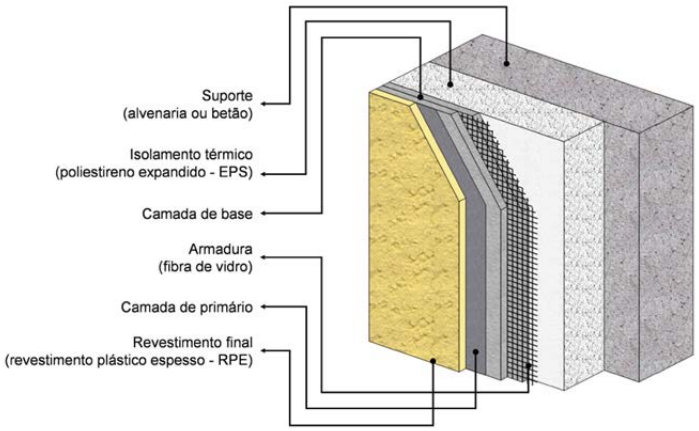
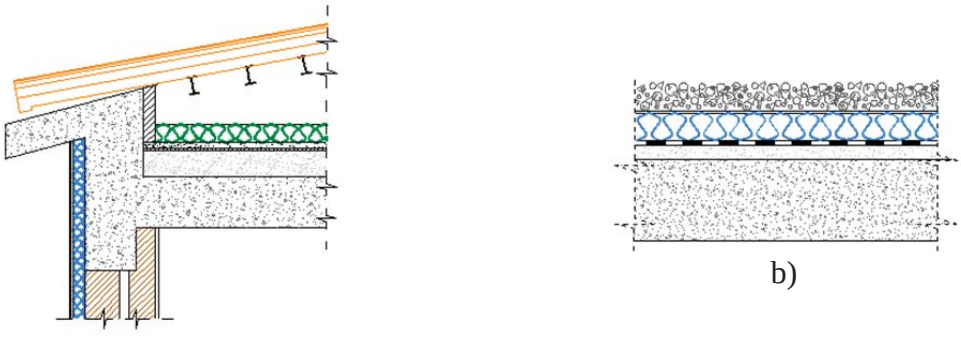


Figura 5.10 – Representação esquemática de um sistema do tipo ETICS (Freitas, 2002)

Contudo, deve referir-se que estes sistemas apresentam alguns inconvenientes, nomeadamente a degradação do seu aspecto devido à acção de agentes biológicos como algas e fungos, cujo impacto deve ser ponderado (Barreira, 2010).

A solução escolhida para a reabilitação das coberturas difere nos dois modelos uma vez que a escola tipo A apresenta uma cobertura inclinada com desvão não-útil e a escola tipo B uma cobertura plana.

Como solução de reabilitação, para a escola tipo A propõe-se a colocação de isolamento térmico sobre a laje horizontal e para a escola tipo B uma cobertura do tipo invertida. A Figura 5.11 ilustra as duas propostas.



a) b)

Figura 5.11 – Propostas de reabilitação das coberturas. a) escola A; b) escola B

Não se pretende dimensionar o sistema de ventilação natural, mas apenas contabilizar um determinado caudal de ar novo admitido nas salas de aula, considerado na simulação como sendo ar à temperatura exterior. No entanto, apresenta-se como proposta para a materialização desse caudal a inclusão de grelhas de admissão nas fachadas, do tipo auto-reguláveis, num sistema de ventilação natural que, em algumas situações pontuais, poderá ter o apoio de uma extracção mecânica individual ou centralizada. Todos os componentes devem ser devidamente dimensionados.

Para cada uma das variáveis em estudo foram definidos valores máximos e mínimos, limitando, por essa via, o seu intervalo de variação. Os limites escolhidos tiveram por base critérios relacionados com a realidade construtiva em Portugal, a situação actual das escolas e as exigências regulamentares, nomeadamente os limites limite referidos no RCCTE (2006).

A Tabela 5.4 mostra os limites utilizados bem como os valores actuais das variáveis nas escolas A e B.

Tabela 5.4 – Variáveis em estudo

		U_{par} [W/(m^2.ºC)]	U_{cob} [W/(m^2.ºC)]	U_{vidro} [W/(m^2.ºC)]	g [-]	RPH [h^{-1}]
Actual	Escola A	0,96	2,51	6,20	0,82	0,25
	Escola B	0,96	1,50	6,20	0,82	0,25
Máximo		1,80	3,00	6,20	0,90	5,00
Mínimo		0,25	0,25	1,0	0,20	0,10

O desempenho dos edifícios está decisivamente condicionado pelo clima exterior pelo que o processo de optimização conduzirá, obrigatoriamente, a diferentes soluções em função da sua localização. O RCCTE (2006) divide o território português em três regiões climáticas de Inverno e três de Verão.

Face à dimensão do plano de simulações definido neste trabalho, seria impossível, num período de tempo razoável, conseguir-se estudar todas as combinações de zonas climáticas. Desta forma, foram escolhidas três localizações, Porto, Lisboa e Bragança, uma em cada zona climática de Inverno.

A Figura 5.12 ilustra as localizações escolhidas e mostra as respectivas médias mensais de temperatura e humidade relativa. Os dados climáticos utilizados são os fornecidos pela *ASHRAE International Weather for Energy Calculations* (IWEC) disponíveis para utilização no programa *EnergyPlus.*

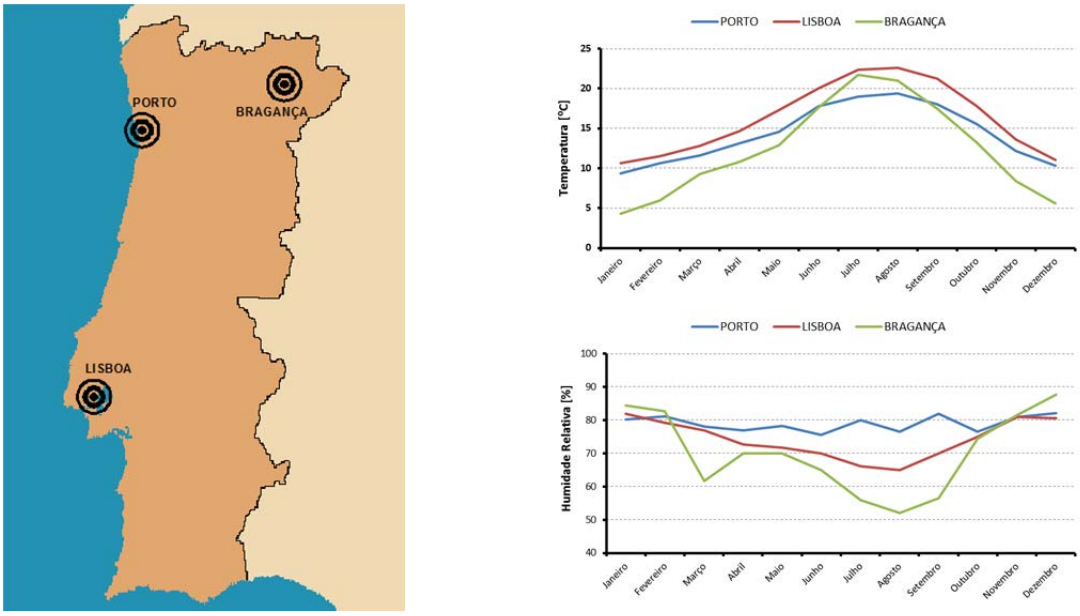


Figura 5.12 – Dados climáticos e localização das cidades escolhidas

5.4.2 Funções de avaliação do desempenho

A avaliação do desempenho dos edifícios foi conseguida através de duas funções matemáticas, que pretendem caracterizar a sua eficiência energética e o conforto térmico durante o período de arrefecimento.

A função relacionada com a energia foi definida como o somatório da carga térmica necessária para o aquecimento das salas de aula, considerando que os sistemas de aquecimento entram em funcionamento quando a temperatura baixa dos 20 ºC. Trata-se, portanto, de um somatório dos valores horários, ao longo do ano, e corresponde às necessidades anuais de energia para aquecimento de modo a garantir uma temperatura mínima de 20 ºC no interior das salas de aula.

Uma vez que no Inverno a temperatura será mantida dentro de limites de conforto adequados, através da utilização dos sistemas de aquecimento, a preocupação com o conforto térmico resume-se agora ao problema do sobreaquecimento das salas de aula durante os dias mais quentes. Assim, a função avaliadora do desempenho que pretende caracterizar este fenómeno foi definida como sendo o somatório das diferenças positivas entre a temperatura interior e a de referência regulamentar de 25 ºC. Também este somatório será realizado para os dados horários e ao longo de todo ano.

As duas funções são calculadas apenas para o período teórico de ocupação das salas de aula, definido entre as 8:00 e as 18:00.

Para cada escola, as funções foram calculadas separadamente para o r/c e para o 1º piso, permitindo, por esta via, a confrontação do desempenho dentro do próprio edifício. Para facilitar a comparação entre resultados os somatórios foram divididos pela respectiva área útil do edifício.

O valor das funções é dependente das cinco variáveis consideradas e o seu cálculo requer o recurso a uma simulação anual do desempenho dos edifícios. As equações (5.1) e (5.2) traduzem matematicamente as duas funções:

$$f_1\left(U_{par}, U_{cob}, U_{vidro}, g, RPH\right) = \frac{\sum Q_{aq}}{S} \quad \wedge \quad T_a \geq 20^{o}C \tag{5.1}$$

$$f_2\left(U_{par}, U_{cob}, U_{vidro}, g, RPH\right) = \frac{\sum \left(T_a - 25\right)}{S} \quad se \quad T_a > 25^{o}C \tag{5.2}$$

em que

Q_{aq}	[kWh]	Carga térmica de aquecimento
T_a	[ºC]	Temperatura do ar
S	[m^2]	Área

Para automatizar o procedimento de cálculo das funções de avaliação do desempenho foi desenvolvida uma aplicação em ambiente *Excel*. Esta aplicação calcula as funções a partir dos ficheiros de resultados *.eso do programa *EnergyPlus*.

5.5 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

5.5.1 Descrição e arquitectura

O cálculo das funções de avaliação do desempenho depende das cinco variáveis em estudo e, para cada combinação das variáveis, requer uma simulação anual do desempenho do edifício, com resultados horários. Estas simulações são procedimentos computacionais complexos e morosos. Utilizando um computador com um processador Intel Pentium I5 750 (8M Cache, 2.66 GHz) o cálculo das funções demora, aproximadamente, duas horas, para a escola tipo A, e três horas, para a escola tipo B.

Neste trabalho pretende-se optimizar as cinco variáveis em estudo através da minimização das duas funções de desempenho, recorrendo, para tal, a algoritmos evolucionários de optimização multi-objectivo. Na procura das soluções óptimas estes algoritmos necessitam de calcular as funções milhares de vezes, tornando o procedimento impraticável devido ao tempo que levaria a obter resultados.

O recurso a RNA surge como uma alternativa viável ao cálculo directo das funções. Assim, as RNA, depois de devidamente treinadas e validadas, podem ser utilizadas para estimar as funções avaliadoras do desempenho e entrarem no algoritmo de optimização, aligeirando o processo computacional e tornando-o exequível.

Desta forma, foram criadas 96 RNA, 48 para cada tipo de escola. Foram concebidas diferentes RNA para cada localização, orientação, piso e função de avaliação do desempenho. A Figura

5.13 ilustra as combinações utilizadas para estruturar as 48 RNA utilizadas na caracterização de cada escola tipo.

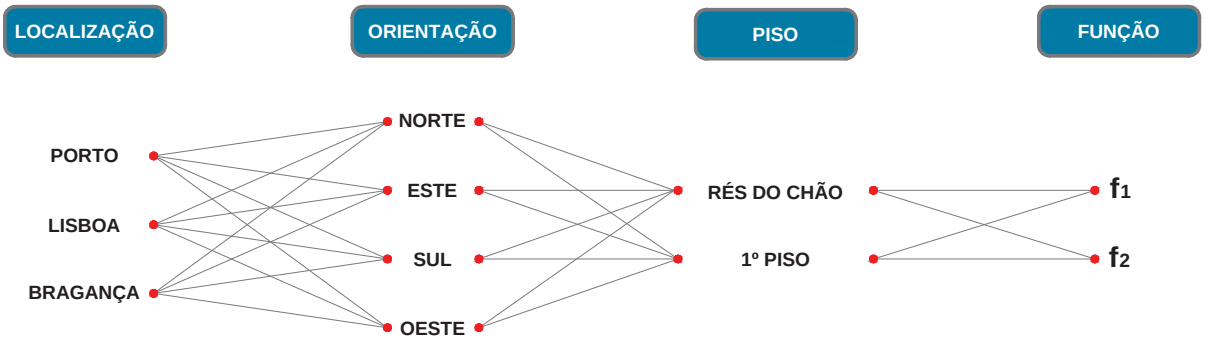


Figura 5.13 – Combinações das RNA

O conceito base de uma RNA é a aprendizagem. Depois da arquitectura interna da RNA estar definida ela vai iniciar um procedimento iterativo de auto-aprendizagem de uma determinada função por ajuste dos pesos. Este processo, designado por treino da RNA, requer a definição de uma conjunto de dados de *input* e dos respectivos *output*, em quantidade suficiente, e representativos dos intervalos de variação dos parâmetros que a RNA é suposto aproximar. A Figura 5.14 ilustra o algoritmo de treino da RNA.

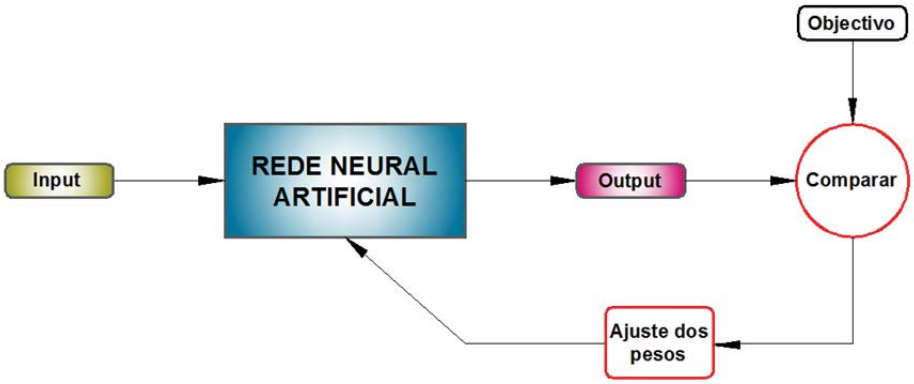


Figura 5.14 – Treino da RNA

Depois de treinada, a RNA deve ser validada com um novo conjunto de dados, diferente do inicial. Estes novos dados são processados pela RNA e os *outputs* comparados com os resultados da simulação computacional.

Neste trabalho definiram-se 150 casos para treino das RNA e 10 para posterior validação. Assim, cada RNA necessitou de 160 simulações anuais do edifício e posterior cálculo das funções de avaliação do desempenho. No total foram realizadas 3840 simulações anuais.

Face à grandeza e complexidade deste processo foram escritas algumas rotinas com o objectivo de automatizar procedimentos permitindo, por esta via, que os cálculos computacionais decorressem ininterruptamente. Mesmo em funcionamento contínuo, o processo de simulação dos 3840 casos e posterior cálculo das funções de avaliação de

desempenho para treino e validação das RNA desenvolveu-se ao longo de, aproximadamente, um ano.

A qualidade do conjunto de dados utilizado no treino de uma RNA é essencial para a sua exactidão. Portanto, estes dados devem ser definidos a partir do espaço das variáveis de decisão, tentando ser o mais abrangente possível. O espaço das variáveis de decisão para o problema em estudo está definido na Tabela 5.4.

Uma das metodologias mais correntes e recomendadas para a escolha de um conjunto de dados pequeno mas representativo de um determinado espaço é o método *Latin Hypercube Sampling* (LHS) (Lee, et al., 2006).

Este método é bastante simples e assenta no princípio de que existe apenas um ponto por cada linha e por cada coluna. A Figura 5.15 ilustra a aplicação deste método a uma situação de um espaço de decisão com duas variáveis e onde foram pedidos quatro pontos para caracterizar o espaço.

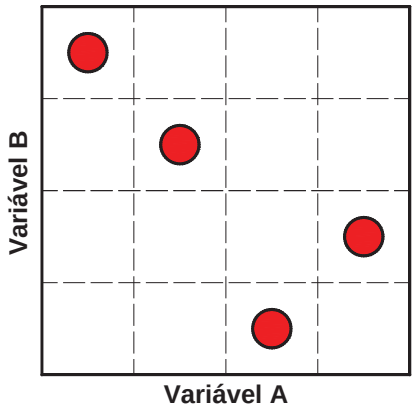


Figura 5.15 – *Latin Hypercube Sampling* (LHS)

O método de treino escolhido para as RNA foi o de *backpropagation*, com o algoritmo de *Levenberg-Marquardt* combinado com a estrutura de regularização *Bayesian*, que assume que todos os pesos dos neurónios da rede são variáveis aleatórias com uma distribuição específica e utiliza técnicas estatísticas para determinar os parâmetros de regularização (MATLAB, 2006).

Assim, a arquitectura definida para cada RNA assenta em 5 *inputs*, um *layer* com 20 neurónios com uma função de transferência do tipo *log-sigmoid* e um *layer* com uma função de transferência do tipo linear com 1 *output*.

Os valores dos *output* foram normalizados para o intervalo de 0 a 1 para tornar o algoritmo de criação das RNA mais eficiente.

A Figura 5.16 ilustra esquematicamente a arquitectura definida.

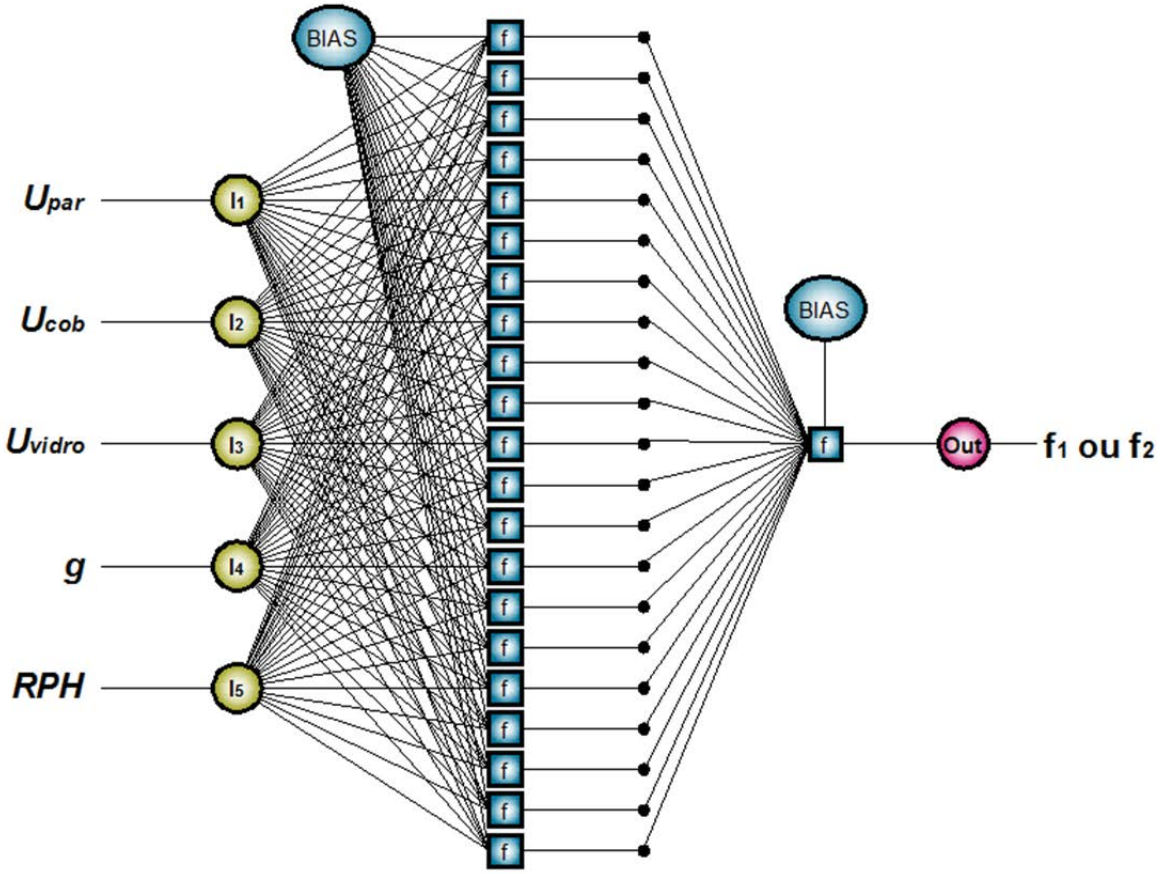


Figura 5.16 – Arquitectura das RNA

Existem actualmente no mercado diversos programas para criação e validação de RNA. Neste trabalho a escolha recaiu no programa MATLAB uma vez que este permite efectuar a escolha dos casos para treino e validação, através do método LHS, permite a criação das RNA e disponibiliza ainda algoritmos de optimização multi-objectivo adequados ao problema em estudo.

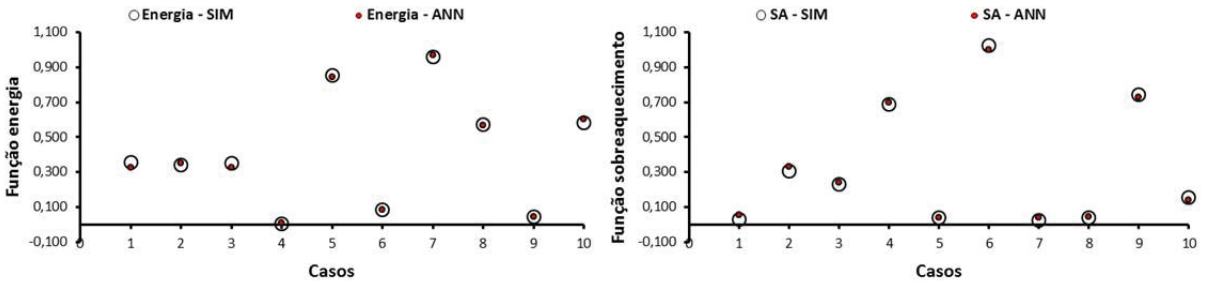
Desta forma, a automatização dos processos é conseguida de uma forma bastante simples e intuitiva. Este programa disponibiliza *ToolBoxs* específicas para estes fins, facilitando os procedimentos.

5.5.2 Validação

Como foi referido anteriormente cada RNA foi validada através de 10 casos definidos para o efeito através do método LHS. Esta validação complementa uma inicial que o próprio algoritmo utilizado pelo MATLAB já prevê. Assim, o total de casos disponibilizados como *inputs* da RNA (150 casos) é dividido pelo programa em três partes, utilizando 70% dos casos para treino, 15% para validação e 15% para teste.

Devido ao elevado número de RNA criadas neste trabalho apresenta-se neste texto, a título de exemplo, a validação de apenas duas das redes. Os resultados da validação das restantes redes estão expostos no Anexo IV.

A validação apresentada diz respeito ao primeiro piso, do modelo de escola do tipo A, localizada no Porto e orientada a Norte (código *ta_p_n_p1*). Mostram-se os resultados para a RNA de aproximação da função 1 (energia) e da função 2 (sobreaquecimento-SA). As funções foram normalizadas, entre 0 e 1, para facilitar os procedimentos matemáticos de auto-aprendizagem das redes neurais. A Figura 5.17 ilustra os resultados, obtidos através da simulação computacional do desempenho, em comparação com os valores aproximados pela RNA.



a) b)

Figura 5.17 – Validação das RNA, resultados absolutos. a) função 1 - energia; b) função 2 - sobreaquecimento

Para complementar a validação das RNA foi calculado o coeficiente de determinação, R^2, de cada rede, através da seguinte expressão:

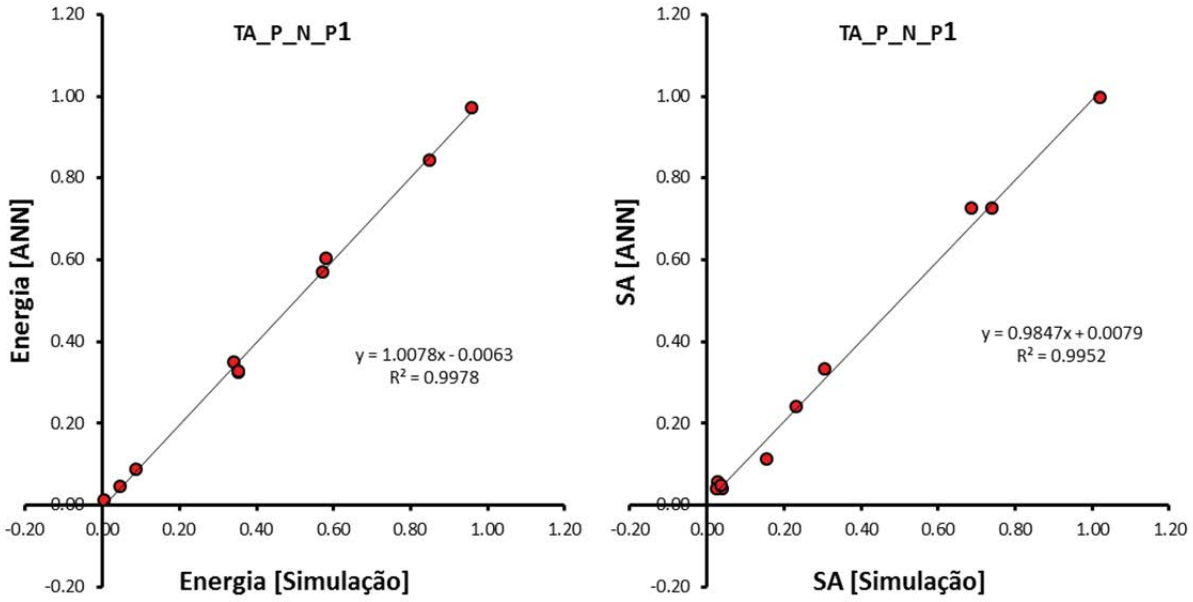
$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{10}(y_i - p_i)^2}{\sum_{i=1}^{10}(y_i - \bar{y})^2} \tag{2.3}$$

em que

R^2	[-]	Coeficiente de determinação
y_i	[-]	Valor da função obtido através da simulação computacional
p_i	[-]	Valor da função estimado pela RNA
$\bar{y}$	[-]	Média dos valores exactos da função

A Figura 5.18 representa graficamente a validação das duas redes anteriores através da determinação do respectivo coeficiente de determinação.

As Tabelas 5.5 e 5.6 reúnem os valores dos coeficientes de determinação, R^2, obtidos na validação de todas as redes, para os modelos de escola do tipo A e do tipo B, respectivamente. Apresentam-se ainda os respectivos valores médios.



a) b)

Figura 5.18 – Validação das RNA, coeficiente de determinação. a) função 1 - energia; b) função 2 – sobreaquecimento

Tabela 5.5 – Coeficientes de determinação para o modelo do tipo A

		PORTO		LISBOA		BRAGANÇA		MÉDIAS		
		f_1	f_2	f_1	f_2	f_1	f_2			
NORTE	r/c	0,9990	0,9727	0,9989	0,9800	0,9990	0,9252	0,9791	0,9860	0,9818
	1º piso	0,9978	0,9952	0,9969	0,9832	0,9983	0,9865	0,9929		
ESTE	r/c	0,9990	0,9766	0,9989	0,9784	0,9990	0,9045	0,9761	0,9841	
	1º piso	0,9979	0,9840	0,9969	0,9864	0,9979	0,9899	0,9922		
SUL	r/c	0,9990	0,9323	0,9988	0,9711	0,9990	0,9480	0,9580	0,9751	
	1º piso	0,9980	0,9871	0,9963	0,9865	0,9978	0,9872	0,9921		
OESTE	r/c	0,9990	0,9751	0,9988	0,9719	0,9989	0,9130	0,9761	0,9821	
	1º piso	0,9980	0,9886	0,9966	0,9670	0,9983	0,9796	0,9880		
MÉDIAS		0,9984	0,9764	0,9978	0,9781	0,9985	0,9417			
		0,9874		0,9879		0,9701				
		0,9818								

Tabela 5.6 – Coeficientes de determinação para o modelo do tipo B

		PORTO		LISBOA		BRAGANÇA		MÉDIAS		
		f_1	f_2	f_1	f_2	f_1	f_2			
NORTE	r/c	0,9953	0,9618	0,9939	0,9756	0,9973	0,9839	0,9846	0,9881	0,9892
	1º piso	0,9959	0,9876	0,9953	0,9839	0,9961	0,9912	0,9916		
ESTE	r/c	0,9956	0,9444	0,9949	0,9854	0,9971	0,9864	0,9840	0,9878	
	1º piso	0,9961	0,9767	0,9960	0,9955	0,9964	0,9892	0,9917		
SUL	r/c	0,9956	0,9790	0,9952	0,9907	0,9936	0,9899	0,9907	0,9923	
	1º piso	0,9960	0,9955	0,9943	0,9873	0,9968	0,9937	0,9939		
OESTE	r/c	0,9955	0,9772	0,9951	0,9823	0,9971	0,9759	0,9872	0,9884	
	1º piso	0,9954	0,9779	0,9949	0,9822	0,9967	0,9904	0,9896		
MÉDIAS		0,9957	0,9750	0,9949	0,9854	0,9964	0,9876			
		0,9853		0,9902		0,9920				
		0,9892								

Globalmente, os resultados obtidos são muito satisfatórios, com valores médios do coeficiente de determinação R^2 de 0,9818 e 0,9892, para os modelos de escola tipo A e tipo B, respectivamente.

Estes valores do coeficiente de determinação confirmam que as redes neurais garantem uma elevada precisão na previsão das funções de avaliação do desempenho e, consequentemente, na caracterização da performance dos edifícios em estudo.

No entanto devem ser tecidas algumas considerações:

— A capacidade de aproximação da função f_1 é superior à registada para a função f_2. Observou-se que a função f_2, relacionada com o sobreaquecimento das salas de aula, é altamente não linear, originando erros superiores por parte das redes neurais;

— Os maiores erros ocorreram na previsão da função f_2 no r/c. A razão para esta dificuldade prende-se com o facto dos valores da função serem muitíssimo diminutos (muito próximos de zero) comparativamente ao observado no 1º piso, pelo que o efeito prático deste erro é irrelevante no desempenho total do edifício;

— Não se observaram diferenças significativas em função das localizações e em função do tipo de edifício.

5.6 CARACTERIZAÇÃO DA SITUAÇÃO ACTUAL

5.6.1 Metodologia

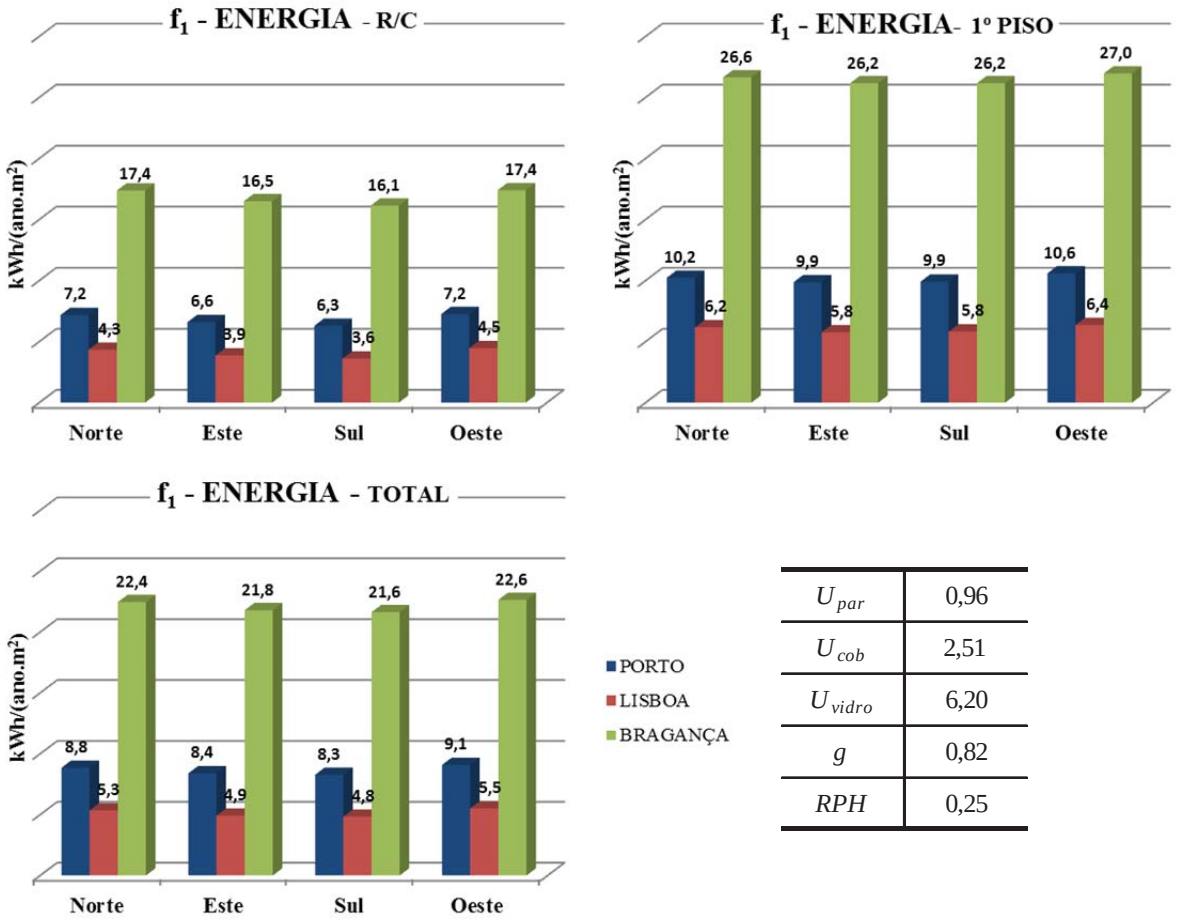
Após a validação das redes neurais, foi efectuada uma caracterização do desempenho actual destes edifícios escolares, tendo por base os valores das variáveis em estudo apresentados na Tabela 5.4 (situação actual).

Foram calculados os valores das funções de avaliação do desempenho, f_1 e f_2, para cada modelo de escola tipo (A e B), para cada piso (r/c e 1º piso), para cada orientação (Norte, Este, Sul e Oeste) e para cada localização (Porto, Lisboa e Bragança). Foi ainda determinado o valor das funções para o edifício na totalidade, somando as parcelas referentes a cada piso.

Este estudo permitiu avaliar a realidade actual das escolas para, posteriormente, se poder quantificar a melhoria de desempenho introduzida por alteração de uma ou mais variáveis e possibilitou, ainda, uma análise comparativa do desempenho do edifício com diferentes implantações, analisando-se, por esta via, o impacto da sua orientação.

5.6.2 Resultados

A Figura 5.19 ilustra os resultados obtidos para o modelo de escola do tipo A, para a função avaliadora do desempenho f_1 (energia).



U_{par}	0,96
U_{cob}	2,51
U_{vidro}	6,20
g	0,82
RPH	0,25

Figura 5.19 – Caracterização da situação actual, função f_1, escola tipo A

A análise dos resultados conduz às seguintes reflexões:

— Como era expectável, as necessidades energéticas para aquecimento estão fortemente relacionadas com o clima exterior. Esta situação é ainda mais vincada devido ao deficiente isolamento térmico da envolvente destes edifícios, permitindo elevados fluxos de calor através dos seus elementos. As maiores necessidades energéticas ocorrem em Bragança e as menores em Lisboa;

— As necessidades energéticas de aquecimento nas salas de aula do 1º piso são significativamente superiores às das salas do r/c. Em média as necessidades energéticas nas salas do 1º piso são superiores em 49%, no Porto e em Lisboa, e 57%, em Bragança. Estes resultados evidenciam que a cobertura destes edifícios não está devidamente isolada possibilitando elevadas perdas de calor para o exterior;

— A orientação do edifício é responsável por diferenças no seu desempenho energético. Como seria de esperar as menores necessidades de energia para aquecimento ocorrem quando a maioria das salas de aula estão orientadas a Sul. Seria previsível que as maiores necessidades ocorressem quando o edifício estivesse orientado a Norte, no entanto verificou-se que tal ocorreu para a orientação Oeste. A justificação para este facto prende-se com a existência de três salas de aula (uma no r/c e duas no 1º piso) na direcção oposta à definida como principal (Figura 5.3). Assim, quando se está a considerar a orientação Norte para o edifício, três das salas de aula estão na realidade orientadas a Sul.

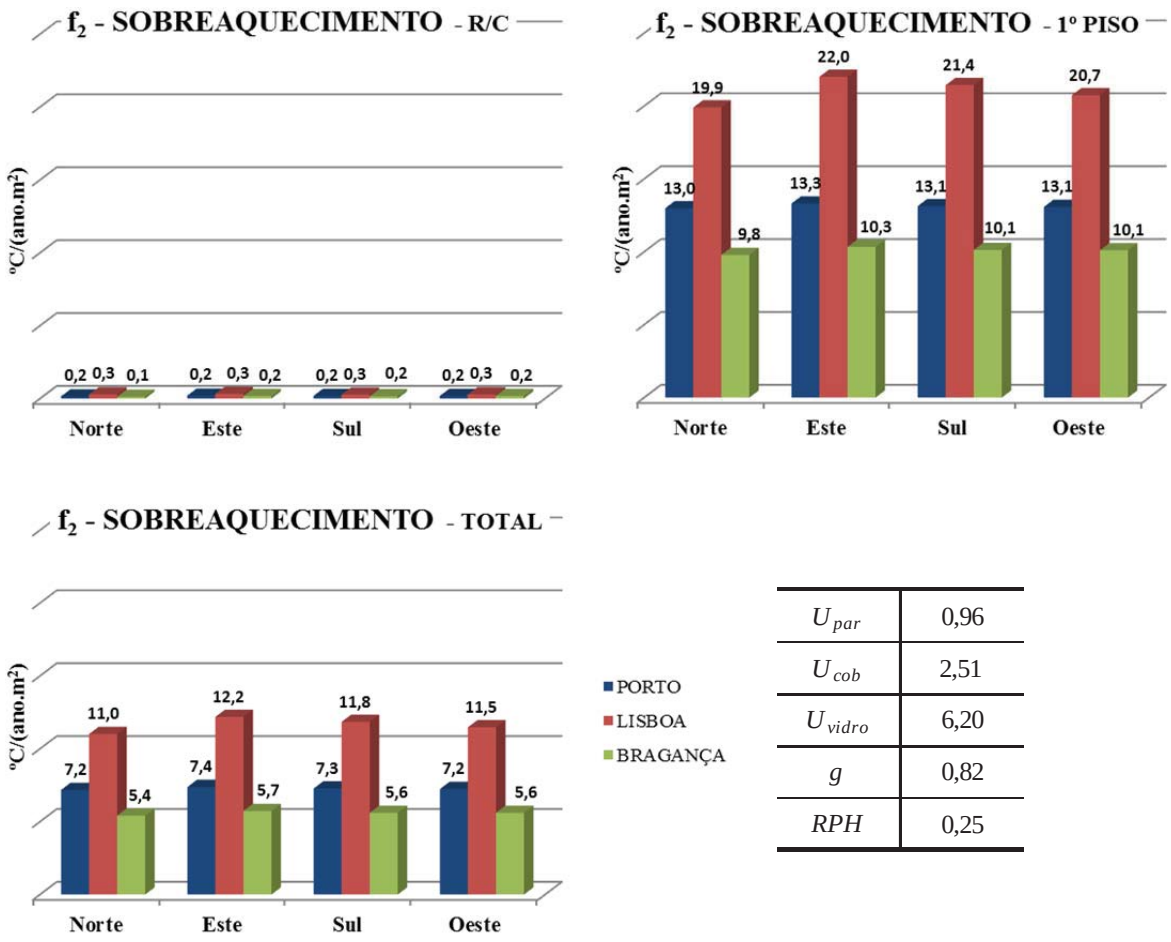
A Figura 5.20 ilustra os resultados obtidos para o modelo de escola do tipo A, para a função avaliadora do desempenho f_2 (sobreaquecimento).

A partir dos resultados obtidos podem ser tecidas algumas considerações:

— O problema do desconforto devido ao sobreaquecimento é exclusivo das salas de aula do 1º piso. As que estão situadas no r/c não apresentam temperaturas suficientemente elevadas. Este facto deve-se, essencialmente, ao deficiente isolamento térmico da cobertura que, por esta via, permite ganhos de calor muito significativos na estação mais quente;

— Embora nas três localizações estudadas se observem problemas de sobreaquecimento a situação é mais grave em Lisboa. Algo surpreendentemente, no Porto o resultado é superior ao registado em Bragança, apesar de na última o Verão ser mais quente. No entanto, este pico de calor coincide com o período de férias escolares e, como tal, não é contabilizado no cálculo da função de avaliação do desempenho;

— A análise dos resultados por orientação confirma as considerações efectuadas anteriormente referente à função relacionada com a energia. As salas de aula mais quentes são as orientadas a Sul e a Este.



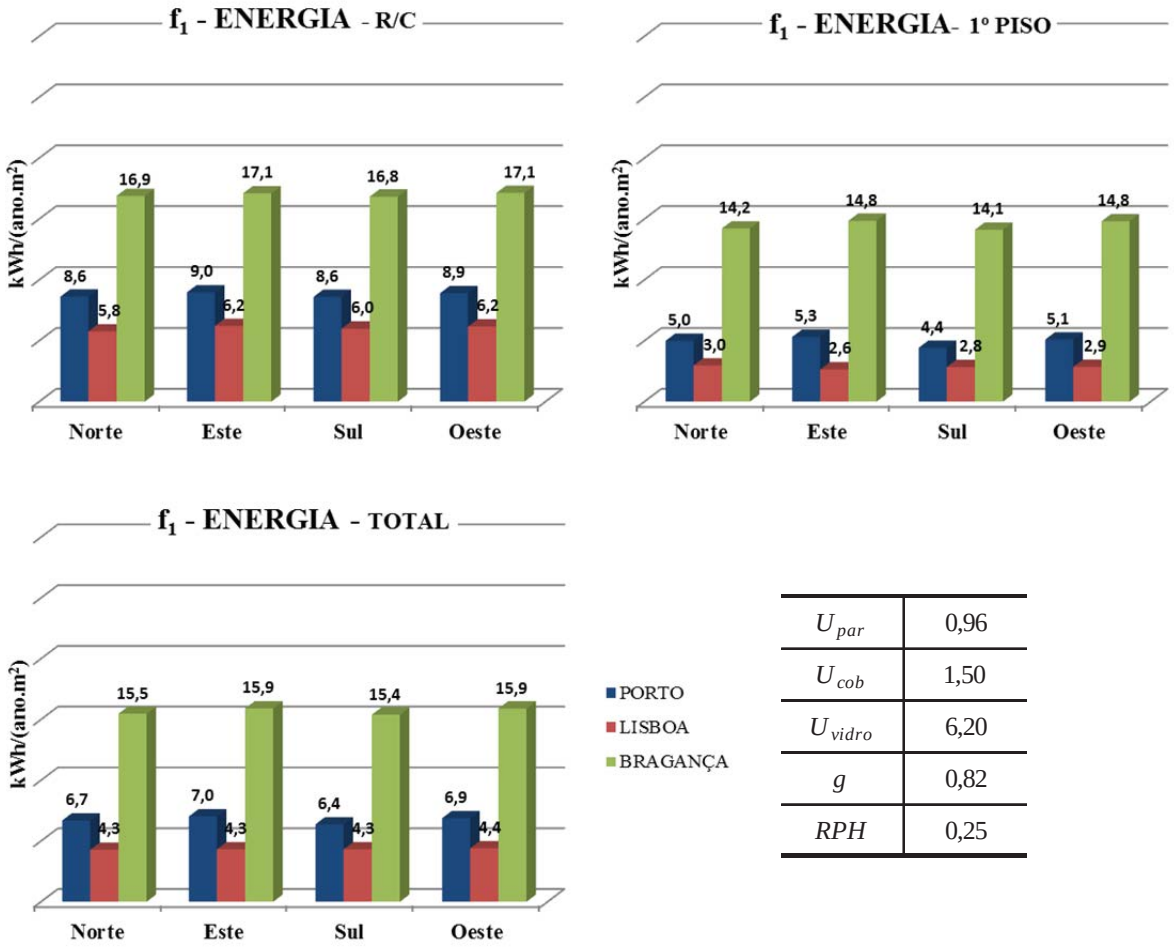
U_{par}	0,96
U_{cob}	2,51
U_{vidro}	6,20
g	0,82
RPH	0,25

Figura 5.20 – Caracterização da situação actual, função f_2, escola tipo A

O desempenho dos edifícios é fortemente condicionado pelos caudais de ventilação admitidos, pelo que os resultados aqui apresentados devem ser devidamente ponderados tendo em consideração que foi adoptada uma taxa de renovação de ar constante ao longo do ano com o valor de 0,25 h^{-1}. Este valor é substancialmente mais baixo do que o que seria desejável para garantir uma adequada QAI. Esta taxa é realista para caracterizar estes edifícios em condições de Inverno, no entanto, deverá estar bastante abaixo da realidade em cenários de meia-estação e Verão onde a abertura das janelas é uma prática corrente. Portanto, os valores globais das funções aqui apresentados são meramente indicativos.

A maior diferença entre os dois modelos de escola em estudo prende-se com o coeficiente de transmissão térmica da cobertura. Embora nenhuma das coberturas inclua isolamento térmico, a da escola do tipo B tem um desempenho térmico substancialmente superior ao apresentado pela cobertura da escola do tipo A. Este facto será responsável por algumas diferenças observadas no desempenho das duas escolas.

A Figura 5.21 ilustra os resultados obtidos para o modelo de escola do tipo B, para a função avaliadora do desempenho f_1 (energia).



U_{par}	0,96
U_{cob}	1,50
U_{vidro}	6,20
g	0,82
RPH	0,25

Figura 5.21 – Caracterização da situação actual, função f_1, escola tipo B

A partir destes resultados pode concluir-se:

— O clima exterior continua a ser decisivo no desempenho do edifício, observando-se grandes diferenças no valor das necessidades energéticas nas três localizações em estudo;

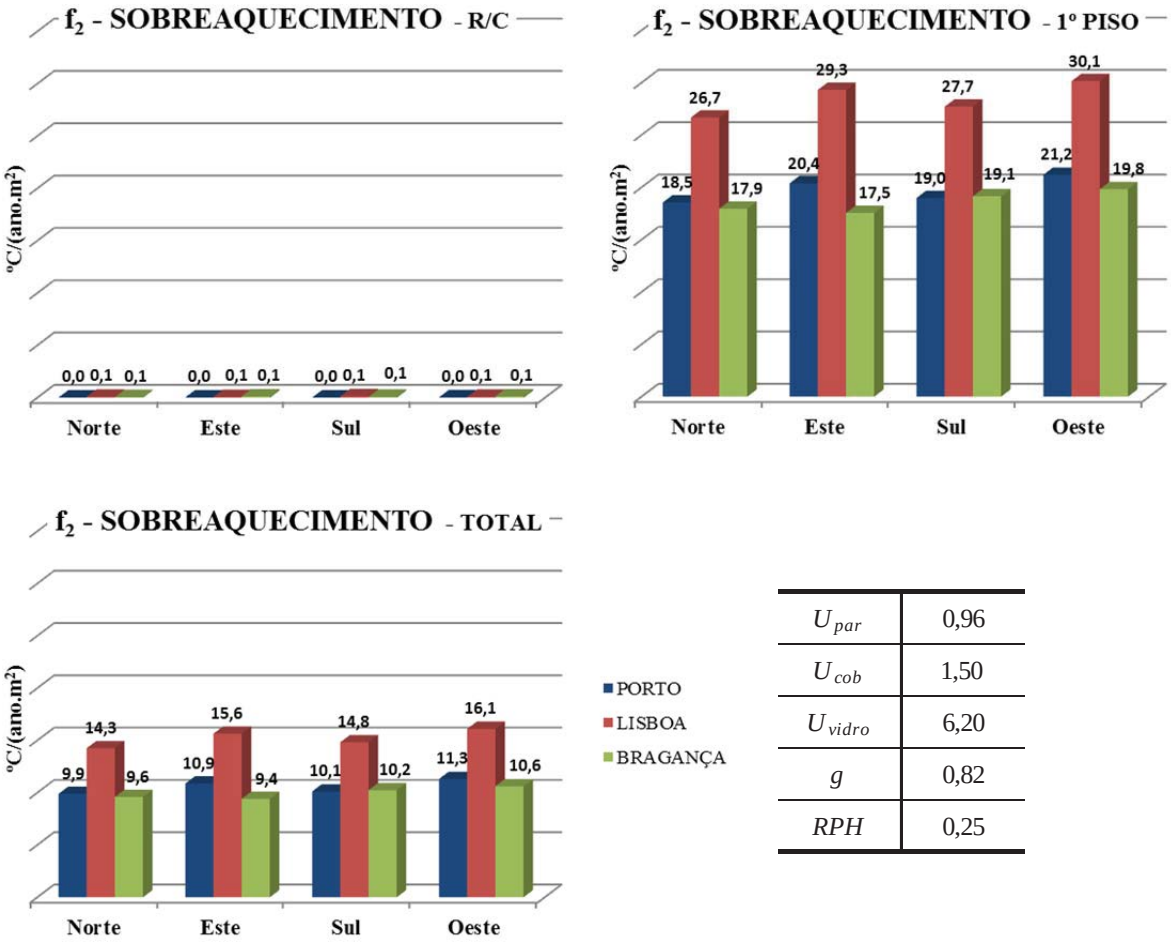
— Como seria de esperar, comparativamente com a escola do tipo A, as necessidades energéticas desta escola são substancialmente inferiores, ou seja, as qualidades térmicas da cobertura da escola tipo B permitem uma melhoria significativa do desempenho do edifício;

— A cobertura desta escola confere ainda um desempenho mais uniforme ao edifício. Deixa de existir uma enorme diferença entre as necessidades de energia das salas de aula do r/c e do 1º piso, observando-se mesmo uma inversão em relação ao modelo da escola tipo A, passando a haver maiores necessidades nas salas do r/c;

— O efeito da orientação no desempenho do edifício deixa de ser tão evidente, principalmente porque existe uma maior simetria na disposição das salas de aula, tornando-se praticamente impossível definir uma orientação predominante, sendo

expectável obter resultados semelhantes em orientações opostas, Norte/Sul e Este/Oeste.

O desempenho da escola tipo B no que se refere ao problema do sobreaquecimento das salas de aula também apresenta muitas semelhanças com a escola tipo A. A Figura 5.22 mostra os resultados para o modelo de escola do tipo B, para a função avaliadora do desempenho f_2 (sobreaquecimento).



U_{par}	0,96
U_{cob}	1,50
U_{vidro}	6,20
g	0,82
RPH	0,25

Figura 5.22 – Caracterização da situação actual, função f_2, escola tipo B

Analisando estes valores destacam-se os seguintes aspectos:

— O desconforto das salas de aula continua a ser um problema exclusivo do 1º piso. Os valores obtidos foram até superiores aos registados na escola tipo A. Aparentemente a diminuição do coeficiente de transmissão térmica da cobertura não é suficiente para melhorar o desempenho do edifício. Este resultado é condizente com o obtido na análise paramétrica de sensibilidade da variação do parâmetro coeficiente de transmissão térmica da cobertura da escola tipo A, apresentado na Figura 5.29. Este estudo mostrou que a diminuição do coeficiente de transmissão térmica só é benéfica para o desempenho relacionado com o sobreaquecimento em algumas localizações e a partir de determinado valor, abaixo de 1,5 W/(m^2.ºC). De facto, pequenas reduções do

valor do coeficiente, como acontece na escola tipo B (2,51 W/(m^2.ºC) na escola A e 1,50 W/(m^2.ºC) na escola B), podem mesmo ser prejudiciais;

— A localização onde o sobreaquecimento é mais significativo continua a ser Lisboa, observando-se nesta escola uma ligeira aproximação entre os valores registados no Porto e em Bragança;

— Tal como referido na análise da função f_1 (energia) o impacto da orientação não é claro neste modelo.

5.7 ANÁLISE PARAMÉTRICA DE SENSIBILIDADE

5.7.1 Metodologia

A procura de soluções construtivas que garantam um desempenho optimizado, no que se refere quer às necessidades energéticas para aquecimento quer ao desconforto térmico devido ao sobreaquecimento das salas de aula, corresponde a um problema de optimização multi-objectivo, pois trata-se de dois objectivos conflituosos entre si. A solução matemática deste tipo de problemas corresponde a um conjunto de soluções óptimas, designadas por frente de Pareto, e o seu cálculo requer a utilização de algoritmos evolucionários, como os algoritmos genéticos.

Esta metodologia foi aplicada no capítulo 6 desta Tese. No entanto, face ao elevado número de variáveis que estão a ser estudadas, facto que conduz a uma elevada complexidade de todo o procedimento matemático e computacional, optou-se por realizar uma análise preliminar de sensibilidade das cinco variáveis em estudo.

Procurou-se avaliar o impacto individual da alteração de cada uma das variáveis no desempenho dos edifícios. Para tal, foi calculado o valor das funções de avaliação do desempenho, f_1 e f_2, para os intervalos de variação de cada variável, de acordo com os limites apresentados na Tabela 5.4, mantendo-se as restantes quatro constantes.

O estudo foi realizado para o edifício completo utilizando-se, para tal, as redes neurais do r/c e do 1º piso, e somando-se o seu efeito. Este procedimento foi automatizado através de uma aplicação escrita em MATLAB.

Através deste estudo analisou-se qual o peso relativo de cada variável no desempenho dos edifícios, quer no que se refere às necessidades de energia para aquecimento durante o período de aquecimento, quer para o controlo do sobreaquecimento nas salas de aula durante o período de arrefecimento, permitindo, por esta via, retirar algumas ilações preliminares sobre as variáveis em que deve ser focada maior atenção aquando da optimização das soluções construtivas.

5.7.2 Resultados

O estudo foi realizado para os dois modelos de escola tipo, A e B, e considerando as diferentes orientações para os edifícios.

Como se verificou em §5.6.2 a orientação predominante do edifício pode ser responsável por diferenças nas funções de avaliação do desempenho. Contudo, em termos relativos o seu impacto em cada uma das variáveis em estudo é semelhante. Logo, apesar de se ter efectuado a análise paramétrica para todas as orientações e para as duas escolas, apresentam-se neste texto apenas parte dos resultados, considerados como representativos do total, incluindo-se os restantes no Anexo V. Desta forma, para a escola tipo A são mostrados todos os resultados referentes a uma das orientações e pontualmente são apresentados e comentados os resultados da escola tipo B que evidenciaram diferenças significativas.

Os resultados seguintes referem-se ao modelo de escola tipo A com orientação Sul. Para cada variável mostra-se num gráfico o valor global da função de avaliação do desempenho e no outro a sua variação relativa percentual face à situação actual do edifício. As variações relativas percentuais permitem indirectamente aferir o peso de cada variável no desempenho global do edifício. Nesta análise consideraram-se variações percentuais positivas as que correspondem a uma melhoria no desempenho do edifício, ou seja, uma redução no valor global da função de avaliação de desempenho.

Os resultados obtidos para a função f_1 foram os apresentados nas Figuras 5.23, 5.24 e 5.25.

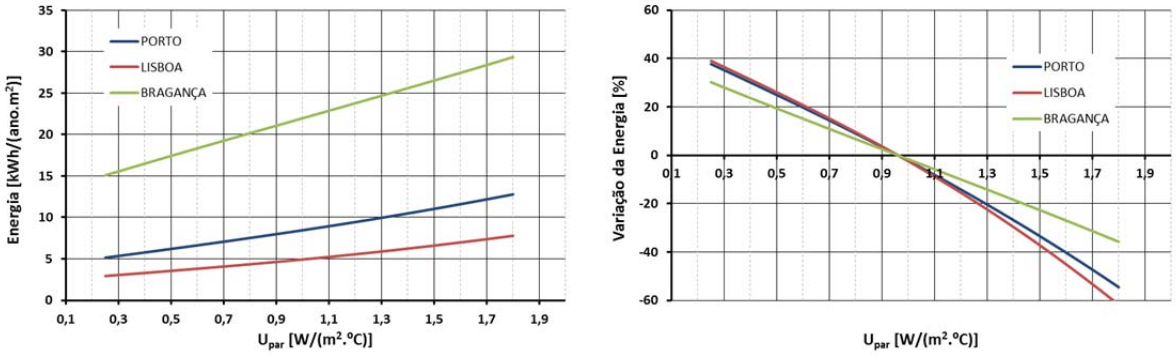


Figura 5.23 – Estudo paramétrico, função energia vs. U_{par}, escola tipo A

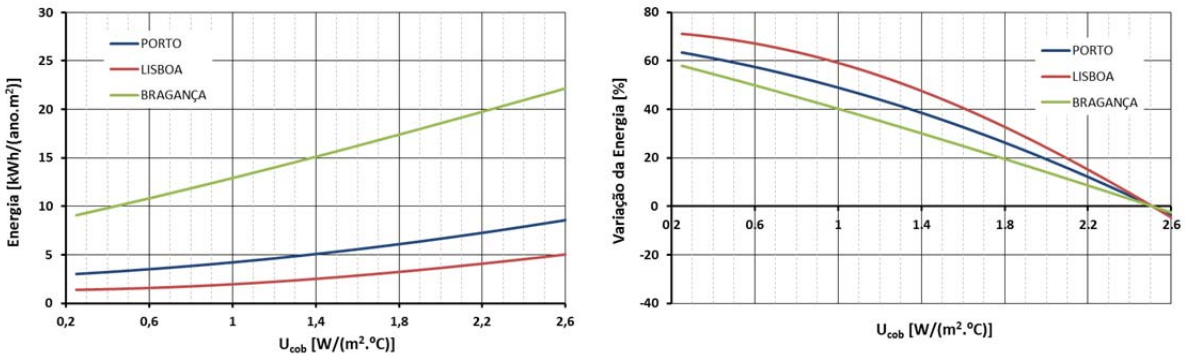


Figura 5.24 – Estudo paramétrico, função energia vs. U_{cob}, escola tipo A

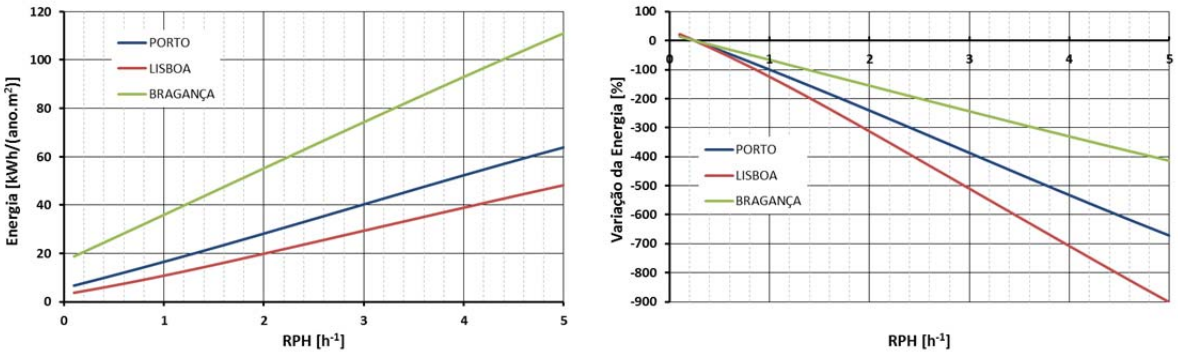
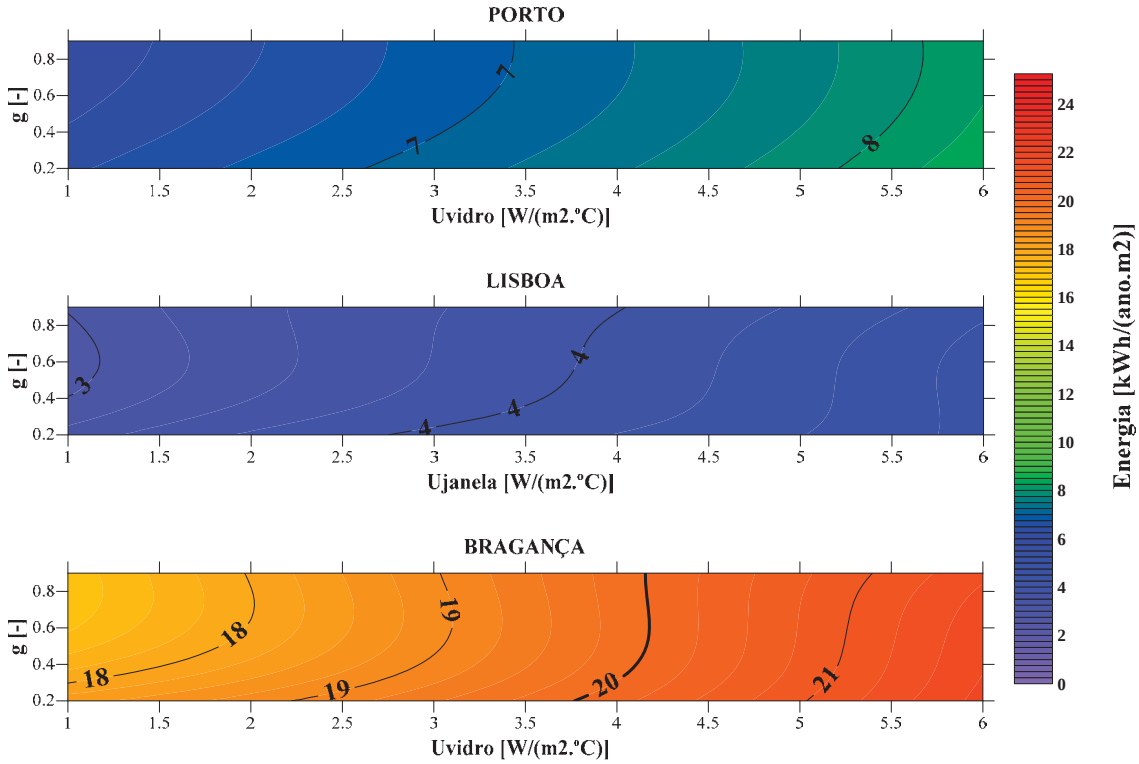


Figura 5.25 – Estudo paramétrico, função energia vs. *RPH*, escola tipo A

As duas variáveis relacionadas com os envidraçados, U_{vidro} e g, foram estudadas através de uma abordagem ligeiramente diferente, sendo analisadas em conjunto. Uma vez que cada envidraçado é caracterizado por um par U_{vidro}, g, optou-se por uma estratégia que incluísse o efeito da sua variação em conjunto.

Foram introduzidas as duas variáveis como dados de entrada e obteve-se o valor da respectiva função de avaliação do desempenho. Deste procedimento resultaram representações gráficas tridimensionais do valor das funções de avaliação do desempenho em função das duas variáveis. A Figura 5.26 mostra os resultados para a função f_1, globais e variações percentuais.



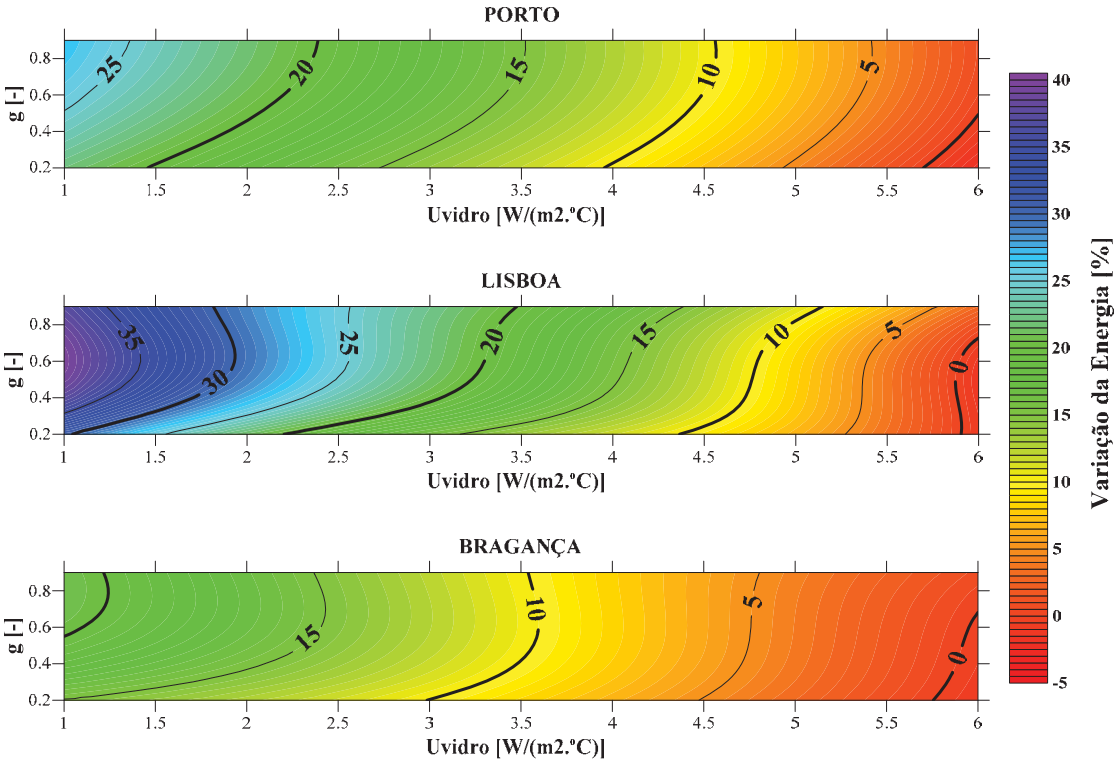


Figura 5.26 – Estudo paramétrico, função energia vs. U_{vidro} e g, escola tipo A

No modelo de escola tipo B os resultados foram muito semelhantes. Salienta-se apenas a diferença registada na análise da variável U_{cob}, onde se obteve uma margem de melhoria inferior à registada na escola tipo A. Esta diferença resulta, exclusivamente, do facto do valor inicial da variável ser inferior na escola tipo B. Portanto, o resultado obtido na escola tipo B pode ser interpretado como uma translação do gráfico da Figura 5.24 até ao ponto correspondente à nova situação inicial. A Figura 5.27 mostra o resultado para a escola tipo B, com orientação Sul.

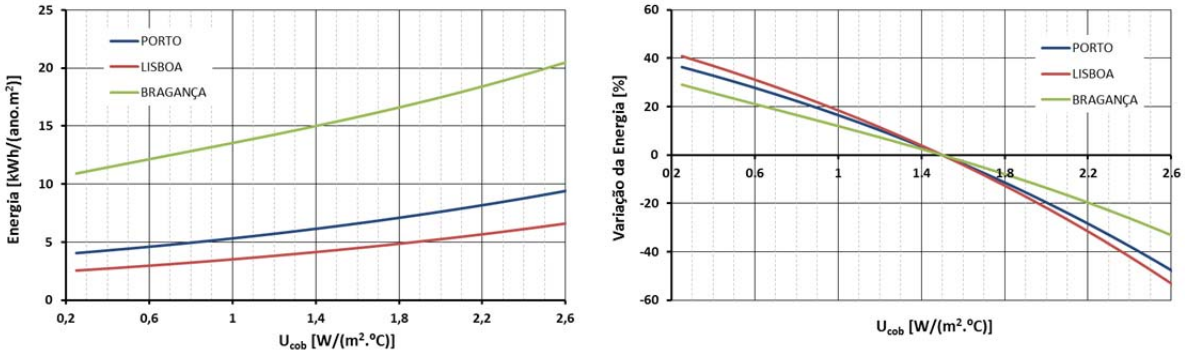


Figura 5.27 – Estudo paramétrico, função energia vs. U_{cob}, escola tipo B

As Figuras 5.28, 5.29, 5.30 e 5.31 mostram os resultados obtidos no estudo paramétrico da função f_2, para a escola tipo A.

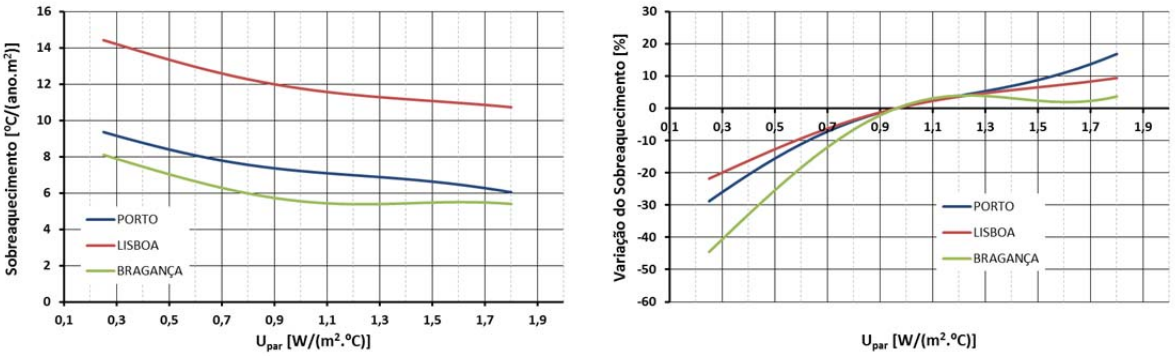


Figura 5.28 – Estudo paramétrico, função sobreaquecimento vs. U_{par}, escola tipo A

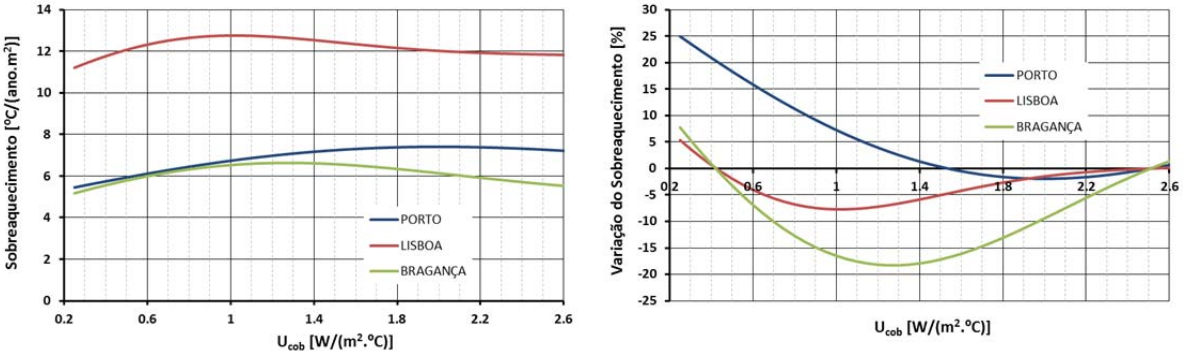


Figura 5.29 – Estudo paramétrico, função sobreaquecimento vs. U_{cob}, escola tipo A

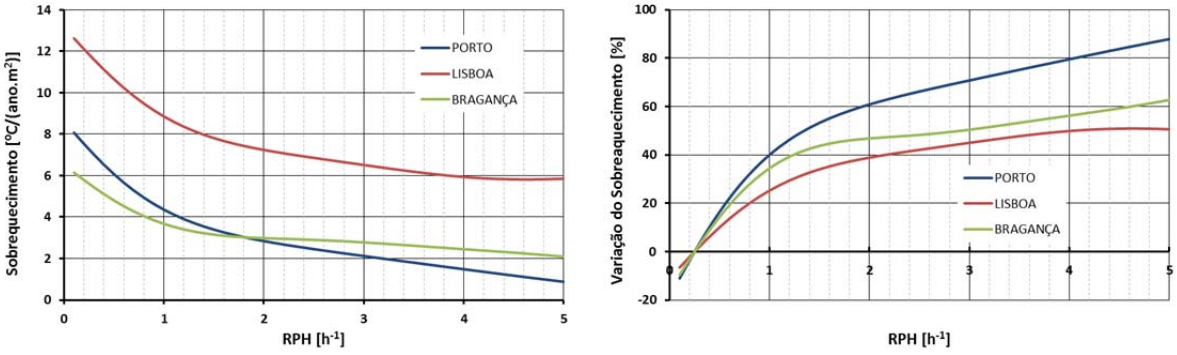


Figura 5.30 – Estudo paramétrico, função sobreaquecimento vs. *RPH*, escola tipo A

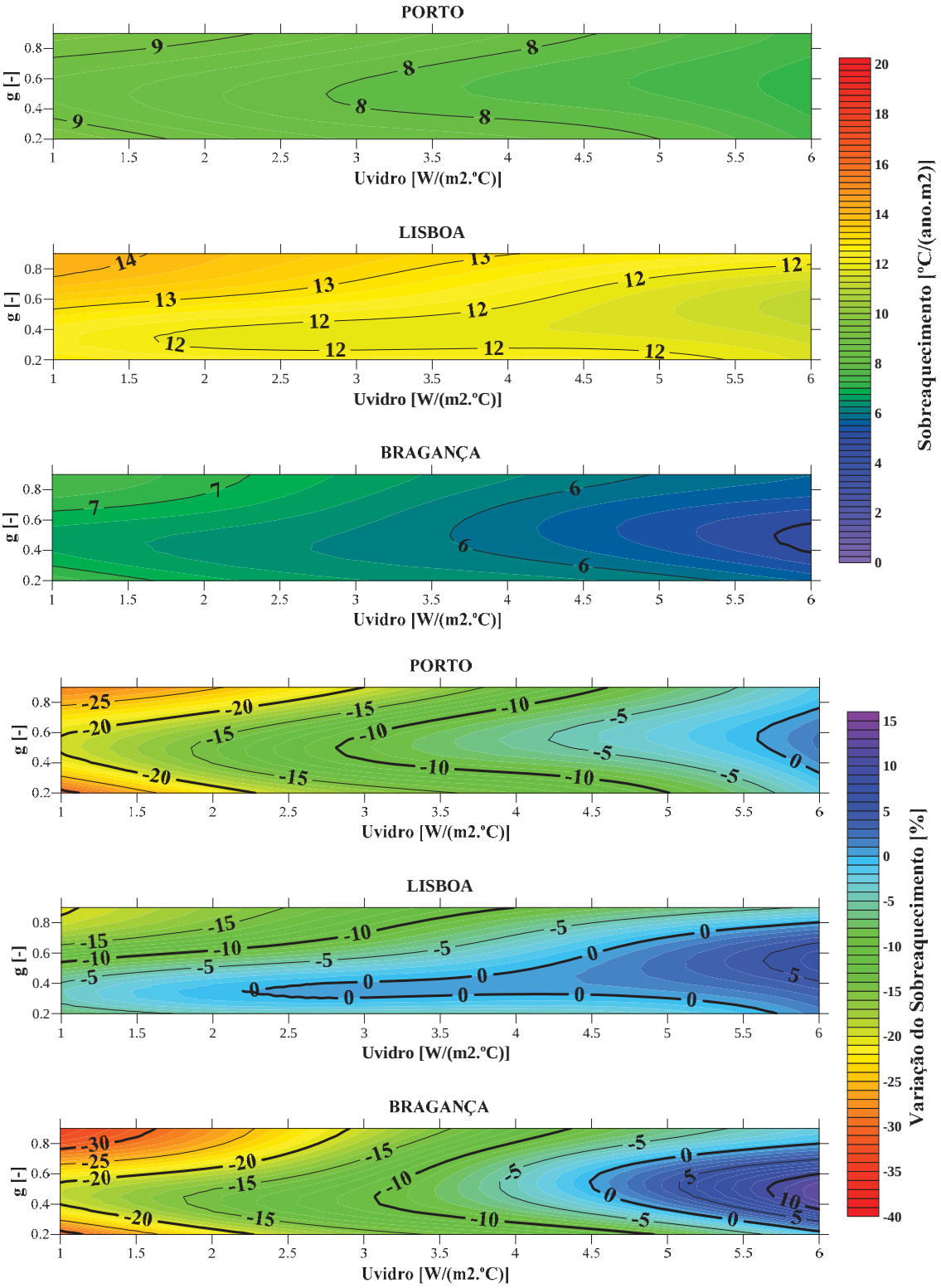


Figura 5.31 – Estudo paramétrico, função sobreaquecimento vs. U_{vidro} e g, escola tipo A

Também no estudo da função f_2 se observou um comportamento semelhante nos dois modelos de escola em estudo. No entanto, ficou claro que esta função apresenta um comportamento altamente não-linear e, consequentemente, a sua interpretação torna-se mais complexa do que a função f_1. Este facto já estava patente nos resultados do coeficiente de determinação, R^2, obtido na validação das redes neurais.

No caso da escola tipo B os resultados obtidos nas diferentes orientações mostraram um padrão de comportamento mais regular do que o observado na escola tipo A. Como discutido anteriormente, o efeito da orientação não é tão claro neste modelo de escola, pelo que este facto evidencia uma clara coerência com as análises anteriores.

5.7.3 Discussão dos resultados

Este estudo permitiu confirmar alguns pressupostos de base relacionados com o desempenho destes edifícios, bem como retirar algumas ilações iniciais referentes à sua possível melhoria, através de uma intervenção eficaz e focada nas propriedades e variáveis em estudo cujo impacto se revela mais sensível.

Todavia, a análise dos resultados deve ter em consideração algumas limitações inerentes à própria metodologia adoptada. Consideraram-se constantes as restantes variáveis que não estão a ser estudadas. Esta limitação é decisiva no que se refere às renovações horárias, *RPH*, cujo efeito se confirmou ser o mais importante para o desempenho do edifício.

Uma vez que no estudo paramétrico das outras quatro variáveis a renovação horária foi considerada constante, com o valor de $0{,}25\ h^{-1}$, não se pode considerar como solução admissível alterar apenas uma das variáveis, pois este valor é muito abaixo do que pode ser considerado adequado em termos de QAI. Logo, os resultados globais obtidos para a função f_1 não são realistas, pois correspondem a um cenário que não pode ser considerado válido. Assim, seria necessário aumentar as *RPH* e, desta forma, os resultados obtidos seriam certamente de outra ordem de grandeza, correspondendo a um aumento significativo das necessidades de energia para aquecimento.

O efeito conjunto da alteração das variáveis é implicitamente avaliado no capítulo seguinte através da procura de soluções óptimas de minimização simultânea das duas funções de avaliação do desempenho.

Desta forma, as principais conclusões retiradas deste estudo paramétrico de sensibilidade foram as seguintes:

— A variável *RPH* é a mais importante para o desempenho do edifício. O seu peso é indiscutivelmente mais relevante do que o das restantes, quer na função relacionada com as necessidades de energia para aquecimento quer na de avaliação do desconforto térmico devido ao sobreaquecimento das salas de aula. Considerando os requisitos regulamentares de ar novo para as salas de aula actualmente em vigor, a sua implementação nestes edifícios de uma forma isolada, sem melhoria da envolvente exterior, traduzir-se-ia num aumento das necessidades energéticas entre 300 e 700%. Obviamente que o seu impacto no problema do sobreaquecimento das salas de aula seria positivo, originando uma diminuição também muito significativa do valor da função f_2;

— O elemento construtivo da envolvente exterior com maior relevância no desempenho energético é a cobertura, seguindo-se as paredes exteriores e, por fim, os envidraçados.

Os dois últimos apresentaram resultados da mesma ordem de grandeza. Logo, a medida mais eficaz para a minimização das necessidades energéticas é o isolamento da cobertura;

— O peso dos envidraçados está fortemente condicionado pela estratégia utilizada na modelação do edifício. Assim, considerar-se que as protecções solares actuam sempre que a radiação solar total incidente no vão ultrapassa os 120 W/m^2 (Tabela 5.2) implica que o factor solar do vidro seja quase irrelevante, pois o vão funciona durante grandes períodos com a protecção solar exterior activada;

— A quantificação e interpretação da função definidora do sobreaquecimento revelaram-se mais complexas. A função f_2 mostrou ser altamente não-linear, implicando algumas dificuldades em tipificar o comportamento destes edifícios.

5.8 SÍNTESE CRÍTICA E CONCLUSÕES

A simulação numérica do desempenho anual de edifícios é um procedimento complexo que requer a criação de modelos detalhados que permitam a caracterização completa do edifício mas necessário quando se procura compreender a sua performance global. Para tal, após a definição da geometria do modelo, é necessário definir as propriedades dos elementos construtivos, quantificar os ganhos internos e especificar os sistemas de aquecimento e modelos de ventilação. Os programas de simulação computacional, nomeadamente o *EnergyPlus* utilizado nesta Tese, permitem um elevado grau de discretização e detalhe dos modelos, com custos óbvios e significativos no tempo de análise requerido.

Os dois modelos criados (escola tipo A e escola tipo B) foram validados com os resultados da campanha experimental descrita no capítulo 3 desta Tese. A validação revelou-se uma tarefa complicada uma vez que seriam necessários dados mais precisos para se conseguir um ajuste melhor entre as medições e os resultados da simulação numérica.

Definiram-se duas funções de avaliação do desempenho dos edifícios, uma relacionada com as necessidades energéticas para aquecimento e outra com o desconforto devido ao sobreaquecimento das salas de aula. Estas funções requerem como dados de entrada os valores das cinco variáveis a optimizar, que caracterizam os elementos construtivos da envolvente exterior e a ventilação dos edifícios.

Uma vez que se pretende implementar um procedimento de optimização multi-objectivo baseado em algoritmos evolucionários, que requerem um elevado número de resultados de simulações anuais, foi necessário recorrer a métodos matemáticos de aproximação das funções de avaliação do desempenho que substituíssem as simulações. Optou-se por recorrer a RNA.

Verificou-se que as RNA são um instrumento adequado e útil para estimar funções complexas e podem ser utilizadas para substituir as simulações anuais de desempenho. No entanto,

requerem um elevado número de dados de entrada para o seu treino, de modo a conseguir-se uma boa aproximação.

Neste estudo foram criadas 96 RNA que foram testadas e validadas com 10 casos tendo-se, para cada uma, calculado o respectivo coeficiente de determinação R^2. Verificou-se que, embora reduzido, o erro associado à função f_2 (sobreaquecimento) é maior do que o da função f_1 (energia). A precisão das RNA foi idêntica nos dois modelos de escola e independente da localização e orientação consideradas. Globalmente obtiveram-se coeficientes R^2 de 0,9818 e 0,9892, respectivamente para o modelo de escola tipo A e tipo B.

Depois de devidamente treinadas e validadas, as RNA foram utilizadas para caracterizar o desempenho actual destes edifícios, calculando-se o valor das funções de avaliação do desempenho individualmente para cada piso e para o edifício total. Foi ainda estudado o efeito da orientação.

A caracterização do desempenho actual destes edifícios permitiu retirar as seguintes conclusões:

— O desempenho dos edifícios é claramente dependente do clima exterior observando-se valores muito diferentes consoante a localização escolhida;

— O isolamento das coberturas, e consequente redução do seu coeficiente de transmissão térmica, é essencial para diminuir as perdas de calor para o exterior. Na escola tipo A o valor da função f_1 (energia) é claramente superior no 1º piso do que no r/c, observando-se uma aproximação dos valores na escola tipo B. Este facto indicia que esta deve ser uma medida eficaz de melhoria do desempenho;

— A orientação principal do edifício pode ser responsável por diferenças com algum significado;

— O problema do sobreaquecimento é exclusivo das salas de aula do 1º piso.

Por fim, foi realizada uma análise paramétrica de sensibilidade, com o objectivo de avaliar o peso relativo de cada uma das variáveis em estudo no desempenho do edifício e, a partir daí, aferir sobre as medidas mais eficazes a implementar na sua reabilitação. Este estudo conduziu às seguintes conclusões principais:

— As renovações horárias são a variável com mais peso na performance do edifício, quer para as necessidades energéticas, quer para o controlo do sobreaquecimento;

— O isolamento das coberturas é a medida de reabilitação mais eficaz, conduzindo a uma significativa diminuição das necessidades energéticas para aquecimento e, em algumas circunstâncias, a uma melhoria das condições de conforto das salas de aula no período de Verão;

— O isolamento das paredes exteriores pode garantir uma diminuição de até 45% das necessidades energéticas, no entanto, implica um aumento do desconforto devido ao sobreaquecimento;

— A alteração das propriedades dos envidraçados é a medida menos eficaz embora com resultados da mesma ordem de grandeza dos obtidos para as paredes exteriores. Podem conseguir-se reduções das necessidades de energia de até 40% mas, tal como no caso das paredes exteriores, com deterioração do conforto nos dias mais quentes.

6 OPTIMIZAÇÃO E ANÁLISE TÉCNICO-ECONÓMICA DE SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS

6.1 OBJECTIVOS E METODOLOGIA

No capítulo anterior desta Tese foi descrito o procedimento de criação e validação de dois modelos geométricos de simulação computacional de edifícios escolares tipo. Foram ainda definidas duas funções matemáticas de avaliação do seu desempenho, dependentes das cinco variáveis em estudo, que caracterizam a ventilação do edifício e o comportamento térmico dos elementos construtivos da sua envolvente exterior.

Realizou-se também uma análise paramétrica que permitiu concluir que os elementos da envolvente exterior com mais peso no desempenho do edifício são a cobertura e as paredes. Verificou-se ainda que as renovações horárias são decisivas para o valor final das funções de avaliação do desempenho.

Assim, qualquer optimização e análise técnico-económica das soluções construtivas a aplicar na reabilitação da envolvente destes edifícios deve ser realizada considerando diferentes possibilidades de caudais de ar novo, de modo a que os resultados obtidos possam ser aplicáveis mesmo que existam alterações regulamentares neste domínio.

De acordo com os resultados das medições realizadas nas duas campanhas experimentais, mostrados e discutidos nos capítulos 3 e 4 desta Tese, concluiu-se que os requisitos actualmente em vigor, no que diz respeito ao valor máximo da concentração de dióxido de carbono (CO_2) e, consequentemente, o valor mínimo de ar novo, são demasiado restritivos, impondo, por esta via, o recurso a soluções de AVAC com um custo muito elevado de aquisição, manutenção e exploração o que, claramente, não se coaduna com a realidade económica do País.

Deste modo, nos modelos computacionais desenvolvidos optou-se por soluções de ventilação natural para estes edifícios, mesmo tendo em conta que a realidade legal actual limita fortemente os caudais de ventilação mínimos nas salas de aula dos edifícios escolares, já que se trata de uma questão que, como foi referido, permanece em discussão e, como tal, sempre passível de ajustes. Assim, a expectativa é que, na revisão da legislação, estes requisitos sejam alterados no sentido de permitir abordagens e soluções mais flexíveis e sustentáveis no domínio da ventilação dos edifícios escolares.

Portanto, o objectivo final de definir soluções construtivas optimizadas consiste em procurar valores ideais das quatro variáveis em estudo associadas aos elementos construtivos da envolvente exterior, para diferentes cenários de renovações horárias.

O cumprimento deste objectivo central revelou-se uma tarefa complexa, obrigando a alguns ajustes ao longo do percurso em relação à estratégia inicialmente delineada. Os modelos matemáticos de optimização multi-objectivo, baseados em algoritmos evolucionários, que

foram utilizados, embora aplicáveis ao problema em estudo, conduziram a algumas dificuldades. Face ao elevado número de resultados obtidos em cada optimização, verificou-se alguma complexidade em definir critérios de decisão com vista à escolha final da solução construtiva óptima.

Para colmatar este problema foi criado um procedimento indirecto de introduzir as soluções optimizadas por via dos algoritmos evolucionários num estudo económico de soluções construtivas, baseado na análise de custos de ciclo de vida (*Life Cycle Cost*). Até se atingir esta metodologia final foram realizados vários estudos, que podem ser agrupados em duas fases.

Numa primeira fase não foi considerado qualquer aspecto económico relacionado com as variáveis em estudo e a optimização multi-objectivo do desempenho dos edifícios incluiu as seguintes etapas:

— O primeiro passo consistiu em obter as soluções óptimas, que minimizam as duas funções de avaliação do desempenho descritas no ponto §5.4.2. Estas soluções foram obtidas com recurso a algoritmos evolucionários e o resultado consiste num conjunto designado por frente de Pareto. Foi determinada a frente de Pareto correspondente a cada escola tipo, em cada uma das localizações e para cada orientação. No cálculo destas soluções não foi imposta qualquer restrição aos limites das variáveis para lá dos apresentados na Tabela 5.4, pelo que também estão incluídas soluções correspondentes a renovações horárias abaixo do que pode ser considerado como aceitável;

— De seguida, foi realizada uma análise paramétrica das variáveis em estudo, permitindo visualizar graficamente o seu impacto comparativamente às soluções óptimas de Pareto;

— Por fim, também recorrendo a algoritmos evolucionários, foi utilizada uma abordagem mais simples em que as duas funções são agrupadas numa só, que, posteriormente, será minimizada, obtendo-se uma única solução. Este procedimento é designado por Método dos Pesos. A solução obtida foi então comparada com a correspondente frente de Pareto.

A segunda fase correspondeu a uma análise técnico-económica das soluções construtivas. Tendo em consideração os resultados obtidos nas análises paramétricas optou-se por incluir neste estudo apenas as soluções construtivas correspondentes às coberturas e às paredes exteriores.

A análise técnico-económica das soluções construtivas foi efectuada considerando duas abordagens distintas:

— Inicialmente foi definida uma terceira função matemática a juntar às duas anteriores, que traduz o custo associado às soluções construtivas. Esta função é dependente do valor dos coeficientes de transmissão térmica pretendidos para as paredes exteriores e

para as coberturas uma vez que varia com a espessura do isolante térmico e, portanto, pode ser incorporada directamente na optimização multi-objectivo, resultando num problema mais complexo que o anterior, uma vez que são agora minimizadas três funções. Este procedimento conduziu a soluções óptimas de Pareto. Porém, uma vez mais, a escolha final de uma única solução óptima mostrou ser algo complexa e subjectiva;

— A segunda abordagem passou por considerar unicamente a função f_1 (energia) na optimização, realizada através da aplicação de uma análise de custos de ciclo de vida das soluções a utilizar na reabilitação das paredes exteriores e das coberturas. Da aplicação desta metodologia resultou o desenvolvimento de uma folha de cálculo, para apoio ao decisor, que optimiza as espessuras de isolante térmico das soluções construtivas para os dois tipos de edifício em estudo (A e B), em função da sua localização (Porto, Lisboa e Bragança), da sua orientação principal, das renovações horárias pretendidas e dos dados económicos, tais como, taxas de juro, inflação, variação do custo da energia e período de análise. Após a optimização, esta ferramenta admite ainda a visualização da solução obtida na correspondente frente de Pareto, permitindo assim, de uma forma indirecta, avaliar o seu impacto na função que caracteriza o sobreaquecimento das salas de aula.

6.2 Optimização Multi-objectivo do Desempenho

6.2.1 Optimização multi-objectivo – frente de Pareto – 2 funções

A primeira tentativa de optimização multi-objectivo consistiu em minimizar as duas funções de avaliação do desempenho, f_1 (energia) e f_2 (sobreaquecimento), descritas no capítulo anterior, através da metodologia apresentada no ponto §2.3.2.3, ou seja, com recurso a algoritmos evolucionários, mais propriamente o algoritmo genético NSGAII (Deb, et al., 2000).

Nesta optimização não foi considerada qualquer restrição adicional ao valor das variáveis, mantendo-se, para cada uma delas, o limite máximo e mínimo indicado na Tabela 5.4.

Desta forma, o problema pode ser formulado matematicamente através das seguintes condições:

$$\text{Minimizar} \quad \begin{cases} f_1\left(U_{par}, U_{cob}, U_{vidro}, g, RPH\right) = \dfrac{\sum Q_{aq}}{S} \quad \wedge \quad T_a \geq 20^{o}C \\ f_2\left(U_{par}, U_{cob}, U_{vidro}, g, RPH\right) = \dfrac{\sum \left(T_a - 25\right)}{S} \quad se \quad T_a > 25^{o}C \end{cases} \tag{6.1}$$

$$\text{sujeito a} \quad \begin{cases} 0{,}25 \le U_{par} \le 1{,}80 \\ 0{,}25 \le U_{cob} \le 3{,}00 \\ 1{,}00 \le U_{vidro} \le 6{,}20 \\ 0{,}20 \le g \le 0{,}90 \\ 0{,}10 \le RPH \le 5{,}00 \end{cases}$$

Esta optimização foi desenvolvida para os dois modelos de escola tipo, para cada localização e para cada orientação, num total de 24 optimizações multi-objectivo, obtendo-se as correspondentes frentes de Pareto, ou seja, o conjunto de soluções óptimas. Este procedimento foi automatizado através da criação de uma rotina escrita em MATLAB.

A frente de Pareto corresponde a soluções de compromisso entre as duas funções a minimizar, ou seja, soluções indiferentes entre si, no sentido de não existir qualquer relação de dominância entre elas.

Este método pressupõe que o decisor terá de, após efectuar a optimização, definir o critério de escolha da solução a adoptar e aplicá-lo ao conjunto disponível.

Uma vez que neste problema apenas se pretende minimizar duas funções, a frente de Pareto resultante de cada optimização pode ser facilmente representada num gráfico bidimensional, em que cada eixo corresponde a uma das funções em estudo, tornando-se mais simples a compreensão e interpretação das soluções obtidas.

Para tornar mais completa a caracterização do edifício e ajudar na compreensão do impacto da optimização no seu desempenho optou-se por representar, juntamente com a frente de Pareto, o ponto correspondente à situação actual do edifício.

Tal como foi descrito no capítulo anterior, o desempenho actual foi obtido tendo por base os valores das cinco variáveis indicados na Tabela 5.4.

Uma vez que os resultados obtidos para as diferentes orientações do edifício são bastante semelhantes não se apresentam todos neste texto, incluindo-se apenas, a título de exemplo, um resultado que pode ser considerado como representativo.

Nesse resultado incluiu-se a representação gráfica das frentes de Pareto obtidas para as três localizações, simplificando, desta forma, a comparação do desempenho do edifício bem como a análise do seu potencial de melhoria.

A Figura 6.1 mostra a frente de Pareto para o modelo de escola tipo A, orientada a Este, e os pontos correspondentes à situação actual nas três localizações.

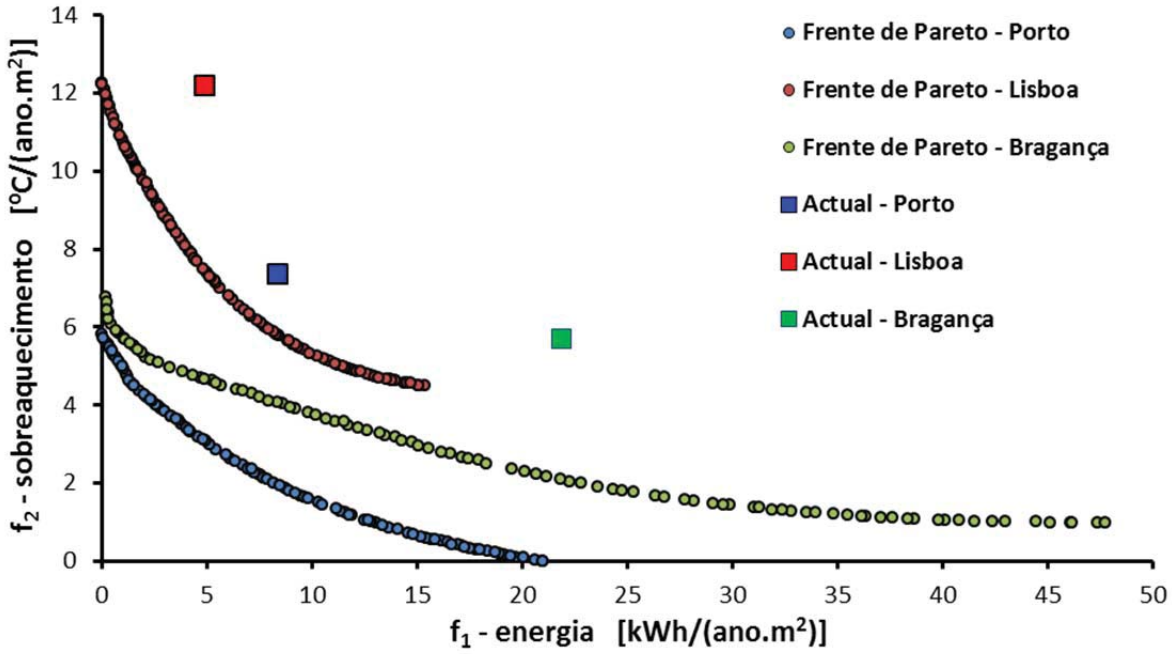


Figura 6.1 – Frente de Pareto, escola tipo A, 2 funções, orientação Este

A análise dos resultados permite retirar algumas ilações:

— Nas três localizações existe um grande potencial de melhoria do desempenho destes edifícios, quer em relação às necessidades energéticas quer ao sobreaquecimento das salas de aula;

— A optimização do edifício localizado em Bragança é fortemente condicionada pela função f_1, referente às necessidades energéticas. Esta função apresenta um enorme potencial de variação, e consequentemente de melhoria, comparativamente com a função f_2;

— Em relação ao edifício localizado em Lisboa a situação é inversa, a função que mais condiciona é a do sobreaquecimento, embora não de uma forma tão clara como no caso de Bragança;

— O edifício localizado no Porto, fruto do clima exterior mais ameno, encontra-se numa posição intermédia, em que as duas funções aparentam ter potenciais de variação semelhantes;

— Assim, a potencialidade de melhoria no desempenho destes edifícios está muito condicionada pela sua localização devido às diferenças existentes no respectivo clima exterior.

A mesma análise realizada no modelo de escola tipo B conduziu a resultados idênticos aos anteriores.

No entanto, constata-se que os resultados obtidos são fortemente condicionados pelos limites mínimos e máximos impostos às variáveis. De facto, observa-se que grande parte das soluções óptimas correspondem a cenários construtivos irrealistas, principalmente no que se refere às renovações horárias, pois trata-se de situações extremas, com valores muito baixos, e que não podem ser consideradas válidas, uma vez que não conduziriam a adequadas condições de qualidade do ar interior (QAI).

Para confirmar o impacto no desempenho do edifício da alteração de cada variável, representaram-se na frente de Pareto os resultados da análise paramétrica descrita no ponto §5.7. A Figura 6.2 mostra o resultado para o edifício escolar tipo A, localizado em Bragança e com orientação Este.

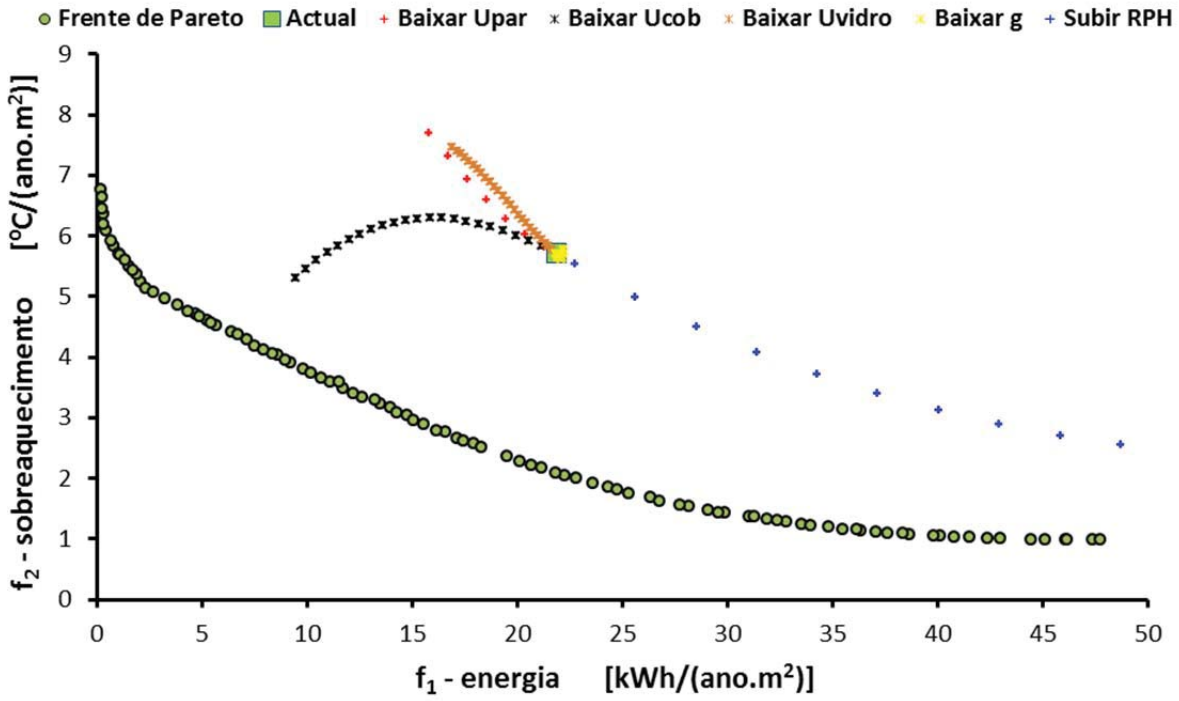


Figura 6.2 – Representação da análise paramétrica na frente de Pareto

As considerações referidas no capítulo anterior referentes ao estudo paramétrico são claramente confirmadas nesta representação. As renovações horárias são as grandes responsáveis pelas alterações no desempenho do edifício e, consequentemente, pela variabilidade de soluções óptimas.

De entre as variáveis relacionadas com as propriedades dos elementos construtivos, as coberturas confirmam-se como sendo as que dispõem de maior potencial de melhoria no desempenho energético. O factor solar dos envidraçados não tem significado no desempenho do edifício, neste tipo de modelo em que se considera a existência de protecções solares exteriores a actuar sempre que a radiação ultrapassa os 120 W/m^2.

Face ao exposto optou-se por não avançar com estes resultados, realizando-se uma nova optimização multi-objectivo com limites de variação mais apertados que correspondam a soluções adequadas. Os limites considerados foram os seguintes:

$$\begin{cases} 0{,}25 \le U_{par} \le 0{,}96 \\ 0{,}25 \le U_{cob} \le 2{,}51 \quad (\textit{escola tipo A}) \qquad e \qquad 0{,}25 \le U_{cob} \le 1{,}50 \quad (\textit{escola tipo B}) \\ 1{,}00 \le U_{vidro} \le 6{,}20 \\ 0{,}20 \le g \le 0{,}82 \\ 1{,}50 \le RPH \le 5{,}00 \end{cases}$$

Desta optimização resultaram novas frentes de Pareto, para cada edifício tipo e para cada orientação.

A título de exemplo apresenta-se na Figura 6.3 as novas frentes de Pareto obtidas para a mesma escola tipo A, com orientação Este e nas três localizações.

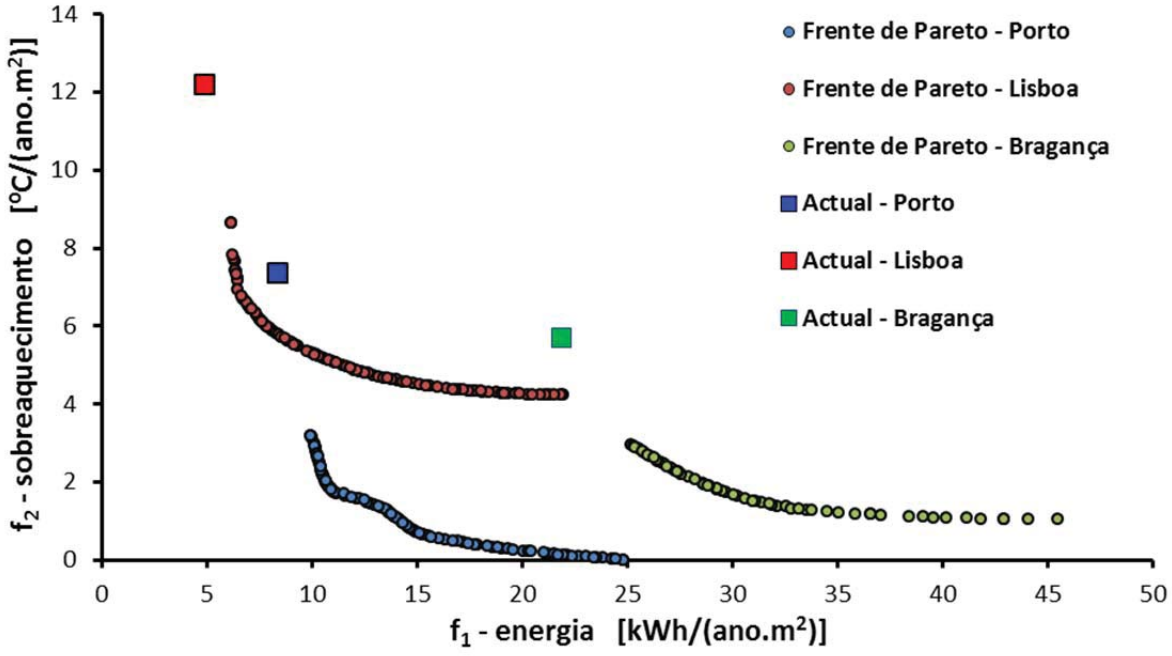


Figura 6.3 – Frente de Pareto com limites, escola tipo A, 2 funções, orientação Este

Os resultados são significativamente diferentes dos obtidos com os intervalos de variação considerados inicialmente. As frentes de Pareto são agora muito mais curtas, verificando-se que o potencial de variação do desempenho é bastante inferior.

De facto, a variabilidade inicial advinha em grande parte da possibilidade de considerar valores muito baixos para as renovações horárias permitindo assim cenários irrealistas de necessidades energéticas para aquecimento muito reduzidas.

Outro aspecto importante, que resulta da imposição dos limites mais apertados, é o facto de ficar claro que a solução de reabilitação a adoptar vai sempre conduzir a um aumento das necessidades de energia para aquecimento, devido ao necessário acréscimo do caudal de ventilação.

Tal como foi descrito nas campanhas experimentais desenvolvidas, os edifícios actuais não garantem condições adequadas de QAI, pois o caudal de ar novo é muito baixo, permitindo, por esta via, uma minimização muito significativa das necessidades energéticas para aquecimento. Resumindo, o custo associado à necessária melhoria das condições de QAI das salas de aula será um aumento das suas necessidades energéticas para aquecimento. Logo, o incremento dos caudais de ventilação deve ser apenas o estritamente necessário.

6.2.2 Optimização multi-objectivo – Método dos Pesos – 2 funções

Uma forma alternativa de optimização multi-objectivo passa por agrupar as funções a optimizar numa só e, posteriormente, minimizar essa função. Esta metodologia simplifica muito o cálculo das soluções óptimas, pois trata-se de encontrar o mínimo de uma única função.

Este procedimento é designado por Método dos Pesos e pressupõe que o decisor defina antes da optimização a importância relativa de cada função objectivo, através da escolha do respectivo peso.

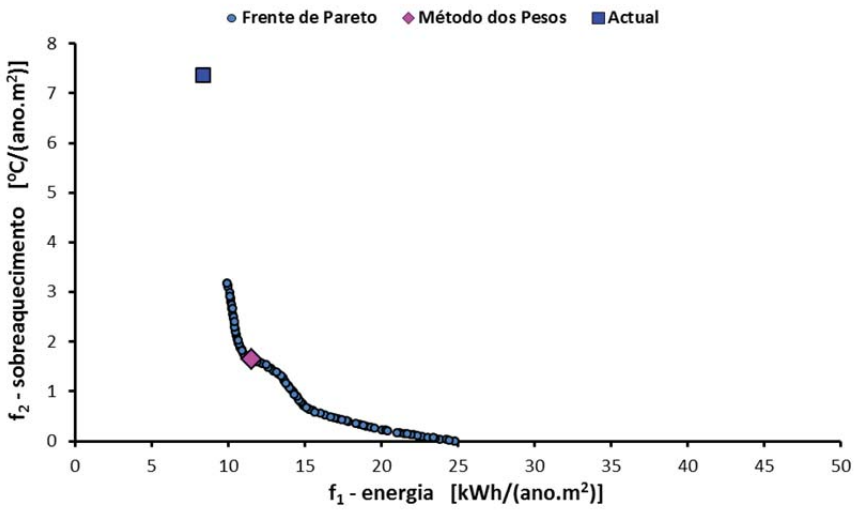
Esta metodologia foi aplicada ao problema em estudo considerando-se inicialmente a mesma importância para cada uma dos objectivos em análise. Assim, a formulação matemática do problema é a seguinte:

$$\text{Minimizar} \quad F(X) = (0{,}5 \times f_1) + (0{,}5 \times f_2) \tag{6.2}$$

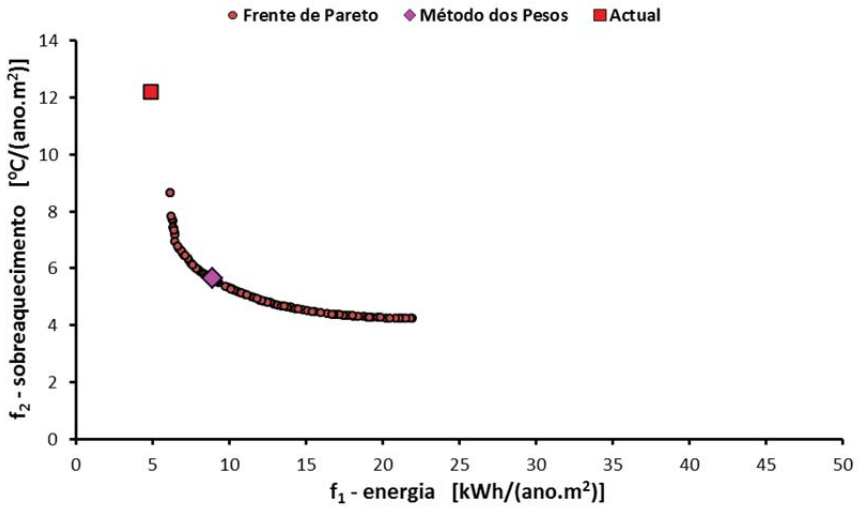
$$\text{sujeito a} \quad \begin{cases} 0{,}25 \le U_{par} \le 0{,}96 \\ 0{,}25 \le U_{cob} \le 2{,}51 \quad (\textit{escola tipo A}) \quad \textit{ou} \quad 0{,}25 \le U_{cob} \le 1{,}50 \quad (\textit{escola tipo B}) \\ 1{,}00 \le U_{vidro} \le 6{,}20 \\ 0{,}20 \le g \le 0{,}82 \\ 1{,}50 \le RPH \le 5{,}00 \end{cases}$$

A solução obtida por aplicação do Método dos Pesos corresponde a um dos pontos óptimos da frente de Pareto. A alteração dos pesos atribuídos a cada uma das funções conduziria a outras soluções óptimas de Pareto: aumentando o peso da função f_1 (energia) a solução movimentar-se-ia ao longo da frente de Pareto da direita para a esquerda; aumentando o peso da função f_2 (sobreaquecimento) a solução movimentar-se-ia ao longo da frente de Pareto de cima para baixo.

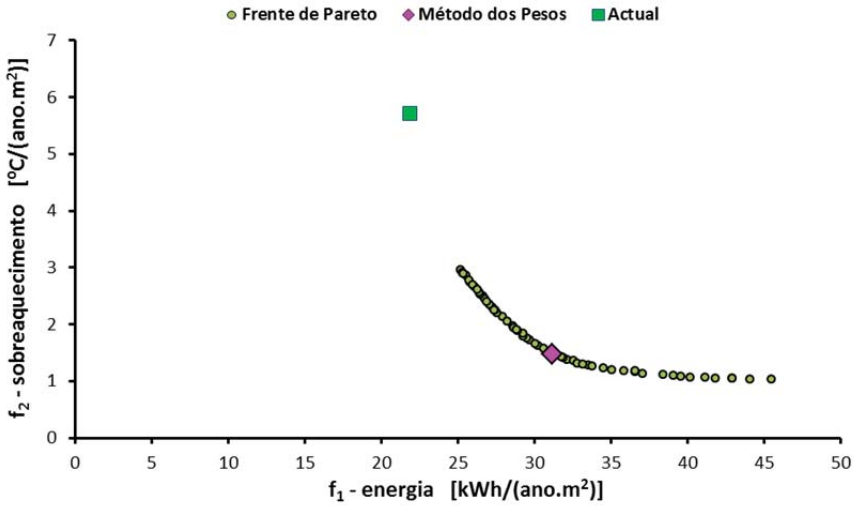
A Figura 6.4 mostra os resultados obtidos com o Método dos Pesos na escola tipo A, orientada a Este, nas três localizações.



a)



b)



c)

Figura 6.4 – Método dos Pesos, escola tipo A, 2 funções, orientação Este. a) Porto; b) Lisboa; c) Bragança

O Método dos Pesos é um procedimento matemático simples cuja implementação computacional não requer grandes complexidades e que pode, em determinadas circunstâncias, substituir a verdadeira optimização multi-objectivo. No entanto, a solução obtida é fortemente condicionada pelo peso atribuído às funções objectivo. A Figura 6.5 ilustra a variabilidade das soluções obtidas, considerando três cenários de diferente importância relativa dada às funções objectivo, na escola tipo A, localizada em Lisboa e orientada a Este.

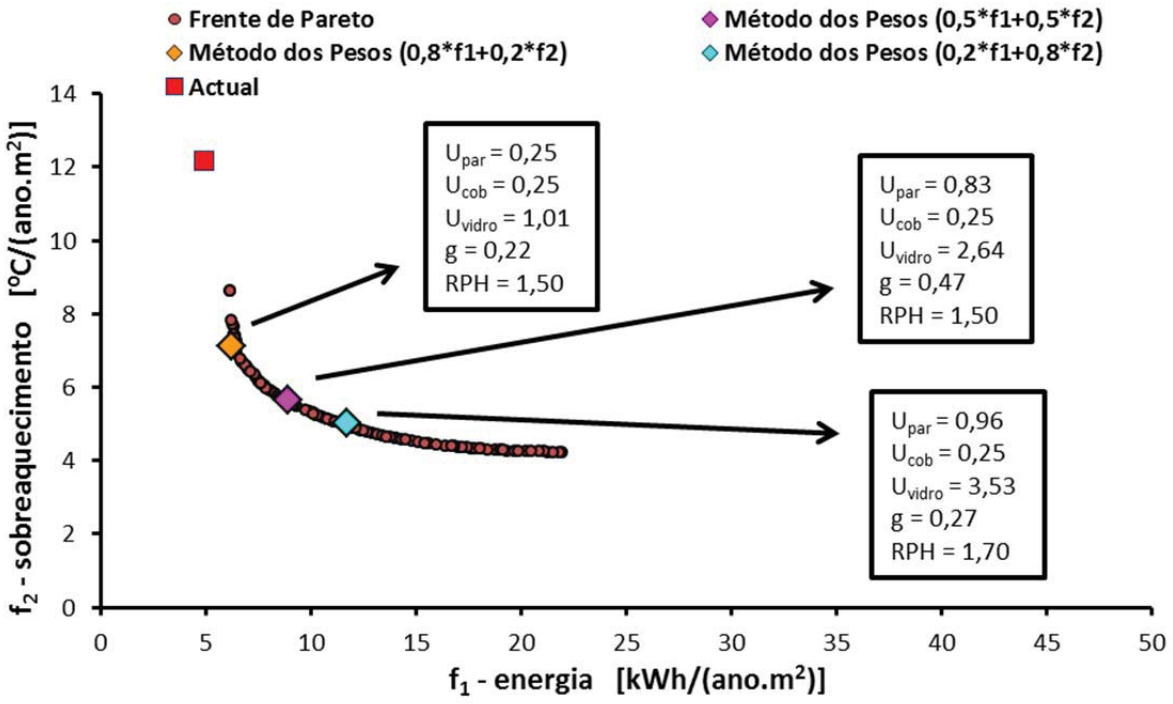


Figura 6.5 – Variabilidade das soluções obtidas através do Método dos Pesos

Portanto, assumir uma solução construtiva como sendo óptima apenas por aplicação desta metodologia será excessivo. Porém, este método, quando utilizado como complemento, pode ajudar a compreender o comportamento do edifício, permitindo a validação das escolhas efectuadas.

6.2.3 Análise crítica

As várias análises efectuadas e descritas nos pontos anteriores não permitiram chegar a nenhuma conclusão definitiva quanto às soluções construtivas a adoptar. Apesar disso foi possível retirar algumas ilações importantes e que serviram de suporte às opções que foram tomadas nas análises seguintes, nomeadamente:

— Os limites adoptados para as variáveis em estudo condicionam de uma forma decisiva os resultados das optimizações. No caso em estudo, este facto é particularmente importante na definição do limite mínimo admissível para as renovações horárias;

— A frente de Pareto obtida numa optimização multi-objectivo constitui um conjunto de soluções óptimas correspondentes a diferentes níveis de compromisso entre as funções objectivo consideradas. Trata-se de um conjunto de resultados importante mas cuja aplicação prática na escolha de uma única solução requer a definição de um critério de selecção, o que nem sempre é simples. Esta situação é bem evidente no caso em estudo. Contudo, a frente de Pareto pode servir como um excelente instrumento de visualização da qualidade relativa de uma determinada solução construtiva, comparando-a com as soluções óptimas. Obviamente esta característica só pode ser aproveitada em situações de duas ou três funções objectivo, já que para mais não é possível a representação gráfica da frente de Pareto. Na análise técnico-económica desenvolvida foram utilizadas as frentes de Pareto para verificar o impacto das soluções que resultaram da análise de custos de ciclo de vida;

— O Método dos Pesos mostrou ser uma ferramenta de optimização muito simples e rápida. Permite obter uma única solução para o problema mas pressupõe a definição de um critério de escolha antes da optimização, através da definição de pesos para as funções objectivo. Verificou-se que a solução obtida é muito dependente do peso atribuído às funções e, como tal, a sua aplicabilidade ao problema em estudo é muito discutível. Porém, pode ser testado no futuro, num zonamento do País, atribuindo-se pesos em função do clima exterior, tentando, por esta via, reproduzir as realidades de cada localização.

6.3 Análise Técnico-Económica de Soluções Construtivas Tipo

6.3.1 Introdução

Independentemente da metodologia de optimização adoptada, a escolha de uma determinada solução construtiva, para aplicar na reabilitação de um edifício escolar, depende sempre dos critérios definidos pelo decisor. Um dos critérios mais importantes deve ser o económico. Portanto, qualquer tentativa de optimizar soluções construtivas deve incorporar o impacto económico associado a cada escolha.

A análise técnico-económica desenvolvida incidiu apenas nas soluções construtivas associadas à reabilitação das paredes exteriores e das coberturas, ou seja, na definição da respectiva espessura óptima de isolante térmico. As razões que fundamentaram essa opção foram as seguintes:

— O dimensionamento e escolha do sistema de ventilação estão fora do âmbito deste trabalho, pelo que apenas quatro das cinco variáveis em estudo estão a ser interpretadas como soluções construtivas;

— Os resultados descritos anteriormente, referentes ao estudo paramétrico, mostraram que a alteração dos envidraçados é a menos eficiente na melhoria do desempenho do edifício;

— É praticamente impossível definir uma função matemática contínua que caracterize o custo dos envidraçados em função das duas variáveis em estudo, coeficiente de transmissão térmica e factor solar. A contabilização do seu custo teria de ser realizada considerando uma função discreta, o que dificultaria muito significativamente a sua incorporação nos procedimentos de optimização multi-objectivo e na análise de custos de ciclo de vida.

6.3.2 Optimização multi-objectivo – frente de Pareto – 3 funções

A primeira abordagem utilizada passou por tentar incorporar de uma forma directa os custos associados às intervenções de reabilitação correspondentes às duas variáveis em estudo. Para tal definiu-se uma nova função, f_3, que para cada um dos elementos construtivos contabilizasse o investimento necessário para atingir um determinado valor de coeficiente de transmissão térmica.

As soluções de reabilitação propostas para as paredes exteriores e para a cobertura correspondem em termos de desempenho térmico, aproximadamente, à inclusão de uma nova camada de isolamento térmico, pelo que o problema se resume à escolha da espessura óptima de isolante.

O coeficiente de transmissão térmica do elemento reabilitado pode ser obtido a partir do seu valor inicial através da seguinte expressão:

$$U_{reab} = \frac{1}{\frac{1}{U_{ini}} + \frac{e}{\lambda_{iso}}} \tag{6.3}$$

em que

U_{reab}	[W/(m^2.ºC)]	Coeficiente de transmissão térmica do elemento reabilitado
U_{ini}	[W/(m^2.ºC)]	Coeficiente de transmissão térmica do elemento antes da reabilitação
e	[m]	Espessura do isolante térmico
λ_{iso}	[W/(m.ºC)]	Condutibilidade térmica do isolante térmico

O investimento total associado à intervenção de reabilitação em cada um dos elementos construtivos não é relevante para o problema em estudo. Uma vez que todas as soluções pressupõem a existência de uma intervenção de reabilitação, o que varia de solução para solução é o diferencial de investimento, resultante da contabilização de diferentes espessuras de isolamento. Assim, na optimização, é suficiente considerar este diferencial, simplificando significativamente o procedimento.

O diferencial de investimento pode ser contabilizado assumindo um custo unitário para o isolante térmico, resultando a seguinte função a incluir na optimização:

$$f_3\left(U_{par}, U_{cob}\right) = C_{iso} \times \lambda_{iso} \times \left[\left(\frac{1}{U_{par}} - \frac{1}{U_{ini\,par}} \right) \times A_{par} + \left(\frac{1}{U_{cob}} - \frac{1}{U_{ini\,cob}} \right) \times A_{cob} \right] \tag{6.4}$$

em que

U_{par}	[W/(m^2.ºC)]	Coeficiente de transmissão térmica da parede exterior
U_{cob}	[W/(m^2.ºC)]	Coeficiente de transmissão térmica da cobertura
C_{iso}	[€/m^3]	Custo do isolante térmico
λ_{iso}	[W/(m.ºC)]	Condutibilidade térmica do isolante
$U_{ini\,par}$	[W/(m^2.ºC)]	Coeficiente de transmissão térmica da parede exterior antes da reabilitação
A_{par}	[m^2]	Área de parede exterior
$U_{ini\,cob}$	[W/(m^2.ºC)]	Coeficiente de transmissão térmica da cobertura antes da reabilitação
A_{cob}	[m^2]	Área de cobertura

A inclusão desta função na optimização multi-objectivo requer a caracterização do material isolante térmico, ou seja, o seu custo e a sua condutibilidade térmica, a definição do valor do coeficiente de transmissão térmica inicial de cada elemento construtivo, parede exterior e cobertura, e das respectivas áreas intervencionadas. Os valores utilizados estão indicados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Parâmetros da função f_3

C_{iso} [€/m^3]	λ_{iso} [W/(m.ºC)]	$U_{ini\,par}$ [W/(m^2.ºC)]	$U_{ini\,cob}$ [W/(m^2.ºC)]
200*	0,037	0,96	2,51 (escola tipo A) 1,50 (escola tipo B)

*este valor corresponde a um acréscimo de 2 € por cada cm de espessura de placas de 1 m^2 de isolante térmico

O novo problema de optimização multi-objectivo pode agora ser formulado matematicamente através das seguintes condições:

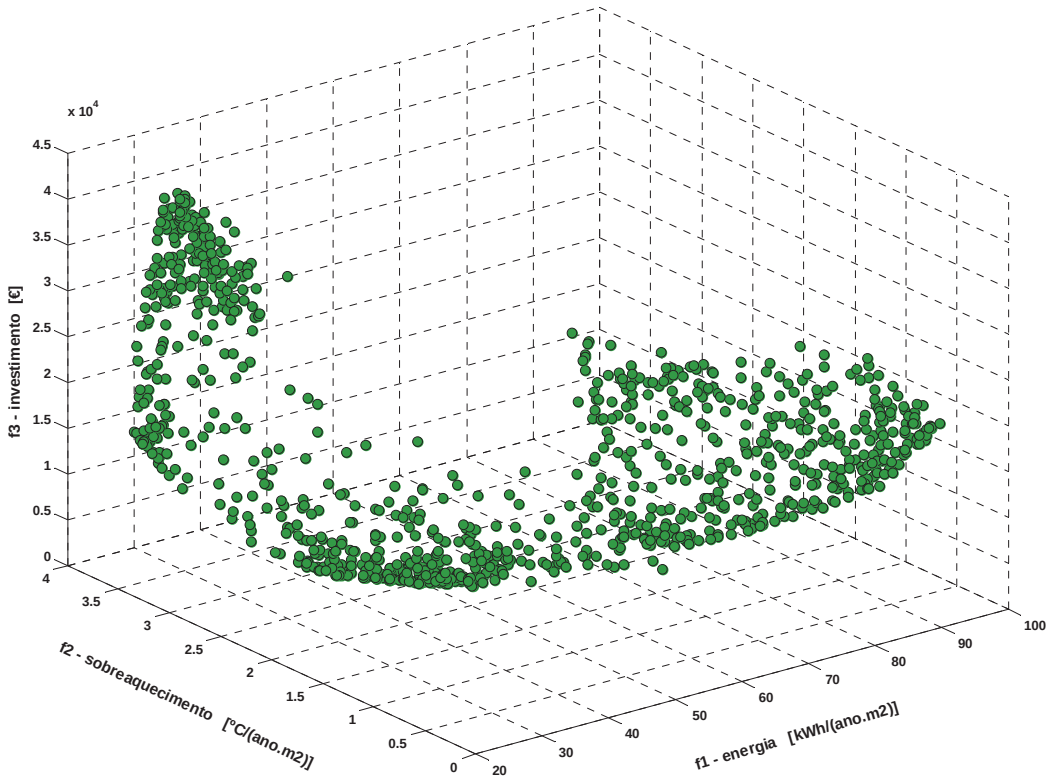
Minimizar

$$\begin{cases} f_1\left(U_{par}, U_{cob}, U_{vidro}, g, RPH\right) = \dfrac{\sum Q_{aq}}{S} \quad \wedge \quad T_a \geq 20^{\circ} C \\ f_2\left(U_{par}, U_{cob}, U_{vidro}, g, RPH\right) = \dfrac{\sum \left(T_a - 25\right)}{S} \quad \wedge \quad T_a > 25^{\circ} C \\ f_3\left(U_{par}, U_{cob}\right) = C_{iso} \times \lambda_{iso} \times \left[\left(\dfrac{1}{U_{par}} - \dfrac{1}{U_{ini\,par}} \right) \times A_{par} + \left(\dfrac{1}{U_{cob}} - \dfrac{1}{U_{ini\,cob}} \right) \times A_{cob} \right] \end{cases} \tag{6.5}$$

$$\text{sujeito a} \quad \begin{cases} 0{,}25 \le U_{par} \le 0{,}96 \\ 0{,}25 \le U_{cob} \le 2{,}51 \quad (\textit{escola tipo A}) \quad \textit{ou} \quad 0{,}25 \le U_{cob} \le 1{,}50 \quad (\textit{escola tipo B}) \\ 1{,}00 \le U_{vidro} \le 6{,}20 \\ 0{,}20 \le g \le 0{,}82 \\ 1{,}50 \le RPH \le 5{,}00 \\ C_{iso} = 200 \\ \lambda_{iso} = 0{,}037 \\ U_{ini\,par} = 0{,}96 \\ U_{ini\,cob} = 2{,}51 \quad (\textit{escola tipo A}) \quad \textit{ou} \quad U_{ini\,cob} = 1{,}50 \quad (\textit{escola tipo B}) \\ A_{par} = 455{,}8 \quad (\textit{escola tipo A}) \quad \textit{ou} \quad A_{par} = 613{,}3 \quad (\textit{escola tipo B}) \\ A_{cob} = 486{,}1 \quad (\textit{escola tipo A}) \quad \textit{ou} \quad A_{cob} = 964{,}8 \quad (\textit{escola tipo B}) \end{cases}$$

Uma vez que se trata da optimização de três funções matemáticas, a representação gráfica da frente de Pareto contínua a ser possível num espaço tridimensional. Para tentar tornar a visualização dos resultados mais clara optou-se por impor que o número de indivíduos por geração do algoritmo evolucionário fosse de 1000 e que a frente de Pareto mantivesse o mesmo número de indivíduos. Esta imposição implicou um aumento significativo do tempo de cálculo computacional.

A Figura 6.6 mostra os resultados obtidos na optimização do edifício tipo A, localizado em Bragança e orientado a Este. Para ajudar na visualização da representação tridimensional da frente de Pareto, apresentam-se também as respectivas projecções bidimensionais, incluindo o ponto representativo da situação actual.



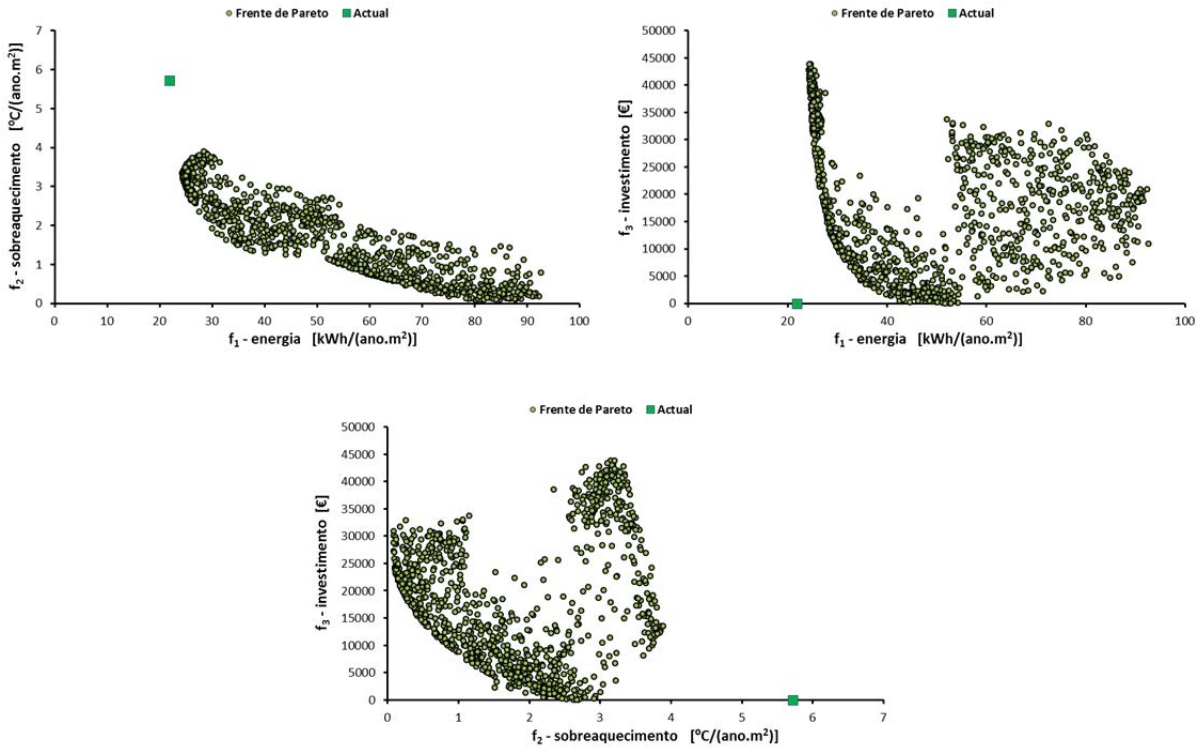


Figura 6.6 – Frente de Pareto, escola tipo A, 3 funções, localizada em Bragança com orientação Este

A aplicação deste método revelou, não só os problemas descritos anteriormente associados aos critérios de decisão para a escolha final de uma solução única, como a sua abordagem económica é muito simplista. A função definida não inclui vários aspectos económicos decisivos e que deveriam ser incorporados, tais como o conceito de valor actual do dinheiro, o período de análise e a variação do custo da energia.

Este método também não permite avaliar e optimizar separadamente as soluções construtivas associadas às paredes exteriores e à cobertura, pois a função de custo engloba sempre os dois elementos.

Estes foram os pressupostos que sustentaram a opção de realizar uma outra abordagem ao problema, economicamente mais completa, através da análise de custos de ciclo de vida de cada um dos elementos construtivos intervencionados.

6.3.3 Análise de custos de ciclo de vida

6.3.3.1 Introdução

O objectivo da avaliação económica de diferentes cenários de reabilitação é de apoiar o decisor na escolha entre diferentes alternativas, optando pelas mais rentáveis do ponto de vista custo/benefício. Dado que os investimentos em causa são realizados numa perspectiva de longo prazo, a avaliação económica deve considerar os custos e benefícios durante todo o

ciclo de vida do elemento construtivo. Assim, deve ser contabilizado o efeito temporal do dinheiro, convertendo todos os custos no seu valor actual.

A análise de custos de ciclo de vida é uma metodologia que tem como propósito optimizar os custos totais de um determinado produto através da identificação e quantificação de todos os custos incorridos durante a sua vida útil (White, et al., 2010).

Este tipo de análise é especialmente adequada para apoiar a escolha entre diferentes investimentos de reabilitação com o intuito de melhorar o desempenho energético dos edifícios (Gustafsson, 2000; Hasan, et al., 2008).

A Figura 6.7 ilustra graficamente o princípio desta metodologia.

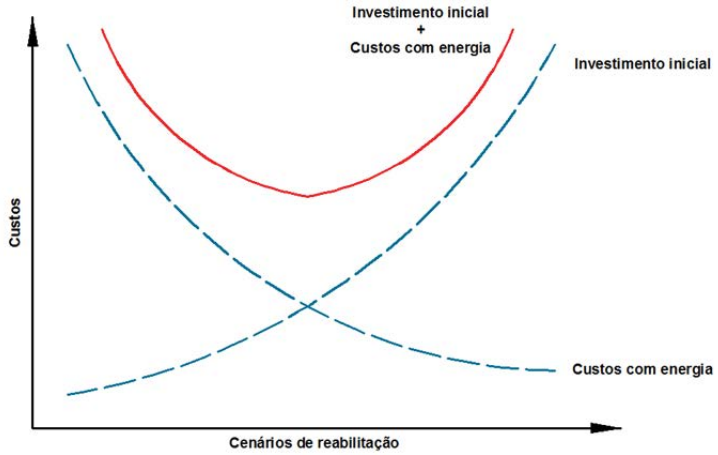


Figura 6.7 – Análise de custos de ciclo de vida (adaptado de Kreith & Goswami, 2007)

Portanto, os custos de ciclo de vida correspondem à soma do valor actual do investimento e dos custos de operação do edifício e sistemas, incluindo os relacionados com a manutenção e substituição, durante um determinado período escolhido para a análise. A equação (6.6) traduz este conceito aplicado ao cenário de investimento *i*:

$$(CCV)_i = (C_{inv})_i + (C_{en})_i + (C_{man})_i + (C_{sub})_i \tag{6.6}$$

em que

CCV	[€]	Custo de ciclo de vida
C_{inv}	[€]	Valor actual do investimento
C_{en}	[€]	Valor actual do custo com energia
C_{man}	[€]	Valor actual do custo de manutenção
C_{sub}	[€]	Valor actual do custo de substituição

6.3.3.2 Aplicação ao caso em estudo

A metodologia apresentada foi implementada separadamente para a análise das soluções de reabilitação das paredes exteriores e para as das coberturas.

O caso em estudo inclui especificidades que permitem realizar algumas simplificações à equação (6.6) uma vez que os custos de manutenção e substituição não são aplicáveis.

Tal como foi referido anteriormente o valor actual do investimento pode ser substituído pelo diferencial de investimento entre soluções, dC_{inv}, que é função do coeficiente de transmissão térmica e, consequentemente, da espessura do isolamento térmico, podendo ser determinado pela seguinte equação:

$$dC_{inv} = C_{iso} \times \lambda_{iso} \times S \times \left(\frac{1}{U_{reab}} - \frac{1}{U_{ini}} \right) \tag{6.7}$$

em que

dC_{inv}	[€]	Valor actual do diferencial de investimento
C_{iso}	[€/m^3]	Custo do isolante térmico
λ_{iso}	[W/(m.ºC)]	Condutibilidade térmica do isolante térmico
S	[m^2]	Área do elemento construtivo
U_{reab}	[W/(m^2.ºC)]	Coeficiente de transmissão térmica do elemento reabilitado
U_{ini}	[W/(m^2.ºC)]	Coeficiente de transmissão térmica do elemento antes da reabilitação

Para o objectivo deste trabalho o cálculo do valor actual do custo com energia de um determinado cenário de reabilitação não é relevante, o essencial é contabilizar a variação dos custos em relação à situação inicial. Assim, a parcela referente ao custo com energia pode ser substituída pela variação dos custos, dC_{en}, definida como:

$$dC_{en} = C_{en\ reab} - C_{en\ ini} \tag{6.8}$$

em que

dC_{en}	[€]	Valor actual da variação do custo com energia
$C_{en\ reab}$	[€]	Valor actual do custo com energia após a reabilitação
$C_{en\ ini}$	[€]	Valor actual do custo com energia antes da reabilitação

A análise de custos de ciclo de vida inclui a contabilização do valor temporal do dinheiro. Este efeito é considerado recorrendo ao conceito de taxa de actualização. Esta taxa será responsável pela conversão dos ganhos económicos esperados no futuro para o seu valor actual.

Numa análise com as características da que está a ser desenvolvida a taxa de actualização deve incluir as seguintes variáveis:

— Taxa de juro nominal;

— Taxa de inflação;

— Variação do custo da energia.

Portanto, a determinação da taxa de actualização a utilizar numa análise de custos de ciclo de vida implica a previsão da evolução económica durante o período de análise, estando, assim, fortemente condicionada por questões políticas e pelo cenário económico proposto.

A taxa de actualização é utilizada para converter os benefícios económicos futuros, esperados pela redução do coeficiente de transmissão térmica dos elementos, para o seu valor actual. Desta forma, o valor actual do benefício económico futuro pode ser obtido através da seguinte expressão:

$$dC_{en} = TA \times c_e \times \left(N_{en} - N_{en\,ini}\right) \tag{6.9}$$

em que

TA	[-]	Taxa de actualização
c_e	[€/kWh]	Custo actual do kWh
N_{en}	[kWh]	Necessidades anuais de energia para aquecimento após reabilitação
$N_{en\,ini}$	[kWh]	Necessidades anuais de energia para aquecimento antes da reabilitação

As necessidades anuais de energia podem ser obtidas a partir da função avaliadora do desempenho f_1, definida no ponto §5.4.2. Portanto, o seu cálculo em função do coeficiente de transmissão térmica dos elementos construtivos é directo, recorrendo às redes neurais descritas no capítulo anterior desta Tese.

A taxa de actualização pode ser calculada através da seguinte equação:

$$TA = \frac{1 - \left(1 + TRE\right)^{-n}}{TRE} \tag{6.10}$$

em que

TRE	[-]	Taxa de juro real incluindo o efeito da variação do custo da energia
n	[anos]	Período de análise

A taxa de juro real incluindo o efeito da variação do custo da energia é calculada a partir da taxa de juro real pela expressão:

$$TRE = \frac{TR - e}{1 + e} \tag{6.11}$$

em que

TR	[-]	Taxa de juro real
e	[-]	Taxa para a variação do custo da energia

Finalmente, a taxa de juro real é função da taxa de juro nominal afectada do efeito da inflação:

$$TR = \frac{r - i}{1 + i} \tag{6.12}$$

em que

r	[-]	Taxa de juro nominal
i	[-]	Taxa de inflação

Concluindo, o custo de ciclo de vida associado a um determinado cenário de reabilitação i pode ser calculado através da seguinte equação:

$$(CCV)_i = \left[C_{iso} \times \lambda_{iso} \times S \times \left(\frac{1}{U} - \frac{1}{U_{ini}} \right) \right]_i + \left[TA \times c_e \times \left(N_{en} - N_{en\,ini} \right) \right]_i \tag{6.13}$$

6.3.4 Ferramenta de cálculo

6.3.4.1 Apresentação

A metodologia descrita no ponto anterior foi implementada para optimização dos níveis de isolamento a utilizar na reabilitação das paredes exteriores e coberturas dos dois modelos de escola em estudo.

Para tal, foi criada uma ferramenta informática, desenvolvida em ambiente *Excel*, intitulada: *Análise de Custos de Ciclo de Vida (CCV) na Reabilitação de Edifícios Escolares*. A Figura 6.8 mostra o seu *layout* principal.

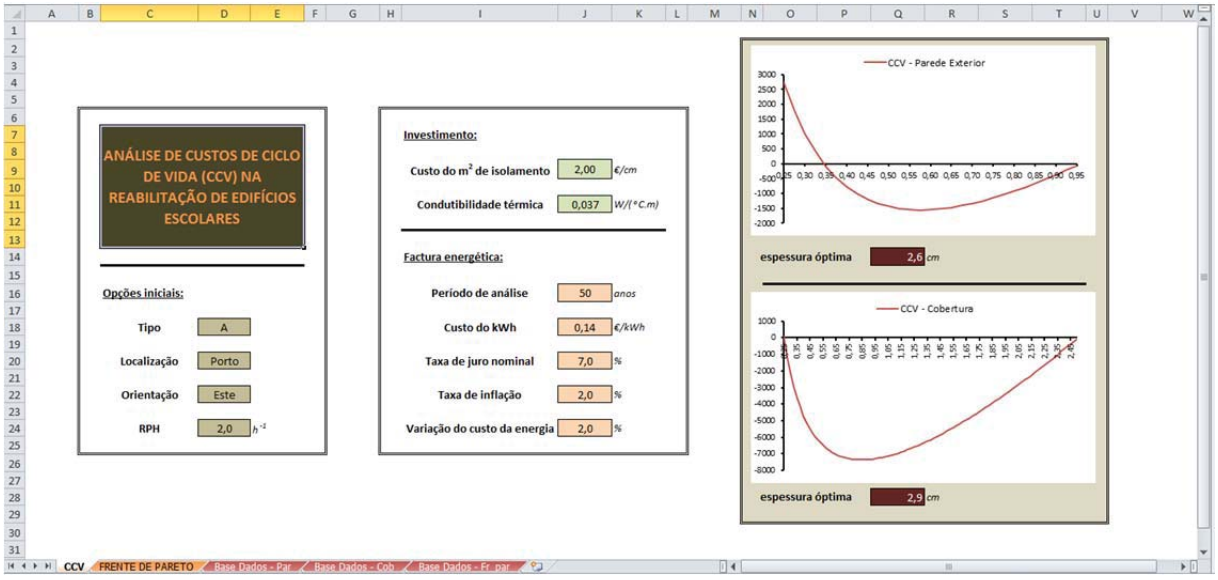


Figura 6.8 – *Layout* principal da aplicação desenvolvida

Esta aplicação permite optimizar, do ponto de vista da análise custo/benefício, os níveis de isolamento térmico, a partir da definição, pelo utilizador, do cenário económico e respectivo período de análise.

Uma vez que nesta análise não se inclui a questão do conforto térmico relacionado com o sobreaquecimento das salas de aula, foi necessário introduzir um procedimento adicional de contabilização indirecta do impacto da solução escolhida.

Assim, é possível aceder à representação gráfica do ponto correspondente a essa solução e compará-lo quer com o a situação actual do edifício, quer com a respectiva frente de Pareto de soluções óptimas, permitindo-se, por esta via, contabilizar a alteração introduzida na função f_2, que avalia o desconforto devido ao sobreaquecimento.

6.3.4.2 Dados de entrada

Para tornar a aplicação mais flexível optou-se por permitir ao utilizador a definição de todas as variáveis necessárias à caracterização do problema. Os dados de entrada podem ser reunidos em três grupos:

- Opções iniciais;
- Investimento;
- Factura energética.

As opções iniciais correspondem à caracterização do edifício quanto ao tipo, à localização e à orientação. É ainda requerida a definição das renovações horárias pretendidas. Optou-se por permitir a alteração deste parâmetro uma vez que se trata de uma questão complexa e em permanente discussão, pelo que deixando esta variável em aberto, a ferramenta ganha flexibilidade para se ajustar a situações futuras.

A Figura 6.9 mostra as escolhas à disposição do utilizador associadas a cada uma das variáveis incluídas no grupo das opções iniciais.

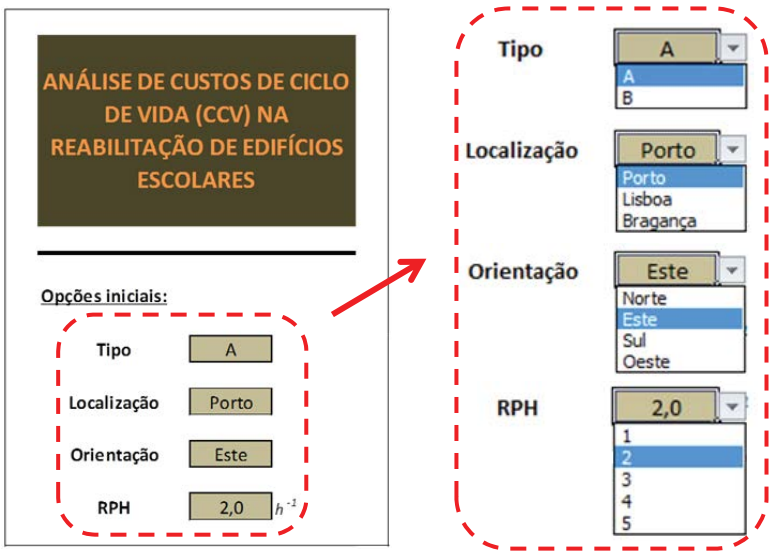


Figura 6.9 – Dados de entrada, opções iniciais

No que se refere ao investimento, os dados de entrada incluem a definição do custo do m^2 de isolante térmico, em euros por centímetro de espessura, e do respectivo valor da condutibilidade térmica.

As opções do grupo factura energética correspondem à definição do cenário económico que servirá de suporte à análise. Estas variáveis são fundamentais para o resultado final e a sua manipulação permite obter resultados muito distintos (§6.3.5), pelo que se salienta o cuidado e a ponderação que deve ser aplicada na escolha do valor destas grandezas. A aplicação permite a definição das seguintes variáveis:

— Período de análise [anos];

— Custo do kWh [€/kWh];

— Taxa de juro nominal [%];

— Taxa de inflação [%];

— Variação do custo da energia [%].

6.3.4.3 Resultados

A ferramenta permite visualizar graficamente a variação do custo de ciclo de vida de uma determinada solução de reabilitação em função do respectivo coeficiente de transmissão térmica.

Estão disponíveis dois gráficos, um para a reabilitação das paredes exteriores e outro para as coberturas. É ainda apresentado o valor da espessura óptima de isolamento térmico, que corresponde ao mínimo da função de custos. Estes gráficos estão inseridos na parte direita do *layout* principal da ferramenta, representado na Figura 6.8.

Numa outra folha de cálculo está disponível a representação da solução óptima, entretanto calculada, na respectiva frente de Pareto, que foi obtida através da optimização multi-objectivo, realizada de acordo com a metodologia descrita no ponto §6.2.1.

Como se verificou anteriormente, estas optimizações são fortemente influenciadas pelos limites impostos para as renovações horárias. Assim, só é possível comparar a solução obtida na análise de custos de ciclo de vida com as soluções óptimas de Pareto se existir concordância entre o valor definido para as renovações horárias nas duas metodologias.

Portanto, foi necessário determinar as frentes de Pareto correspondentes aos cinco valores de renovações horárias propostos na análise de custos de ciclo de vida. Este facto obrigou a realizar 120 optimizações, tendo-se automatizado o procedimento através da criação de uma aplicação em ambiente MATLAB.

O mesmo princípio foi adoptado para a representação no referido gráfico da situação actual do edifício. Este ponto corresponde à realidade construtiva do edifício, sem intervenção de

reabilitação, considerando o mesmo valor de renovações horárias que foi adoptado na análise económica. Só assim pode ser comparado com as soluções óptimas resultantes da análise de custos de ciclo de vida.

A Figura 6.10 ilustra o *layout* dos resultados referentes à representação das soluções na respectiva frente de Pareto.

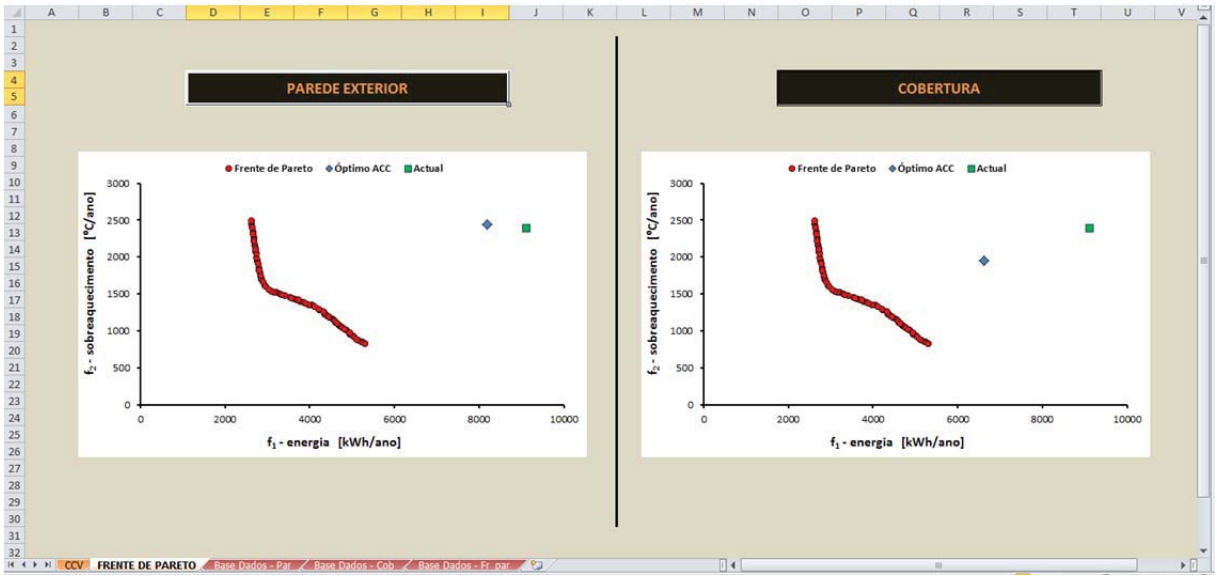


Figura 6.10 – *Layout* dos resultados na frente de Pareto

Esta representação permite não só avaliar o efeito da solução adoptada no desempenho do edifício em termos de conforto térmico associado ao sobreaquecimento das salas de aula, como também visualizar o potencial de melhoria que ainda existe por alteração das restantes variáveis.

No entanto, a aplicação não permite visualizar o efeito conjunto das duas soluções, a adoptada para a parede exterior e a adoptada para a cobertura.

6.3.5 Estudos de sensibilidade

Testando a aplicação com alguns exemplos genéricos rapidamente se conclui que o cenário económico criado é decisivo para o resultado final. Manipulando estas variáveis consegue-se obter uma enorme variedade de soluções. Portanto, a sua definição, por parte do decisor, deve ser assente em critérios muito bem estabelecidos, caso contrário a solução obtida não terá qualquer suporte técnico.

Para evidenciar este facto foram realizados alguns estudos de sensibilidade dos parâmetros económicos procurando compreender qual o seu impacto na solução final.

Estes estudos foram desenvolvidos para a escola tipo A, orientada a Este e considerando um valor de renovações horárias de 2,0 h^{-1}.

A Figura 6.11 mostra a análise referente à variação da taxa de juro. Os outros parâmetros económicos foram mantidos constantes com os valores indicados na Figura 6.11.

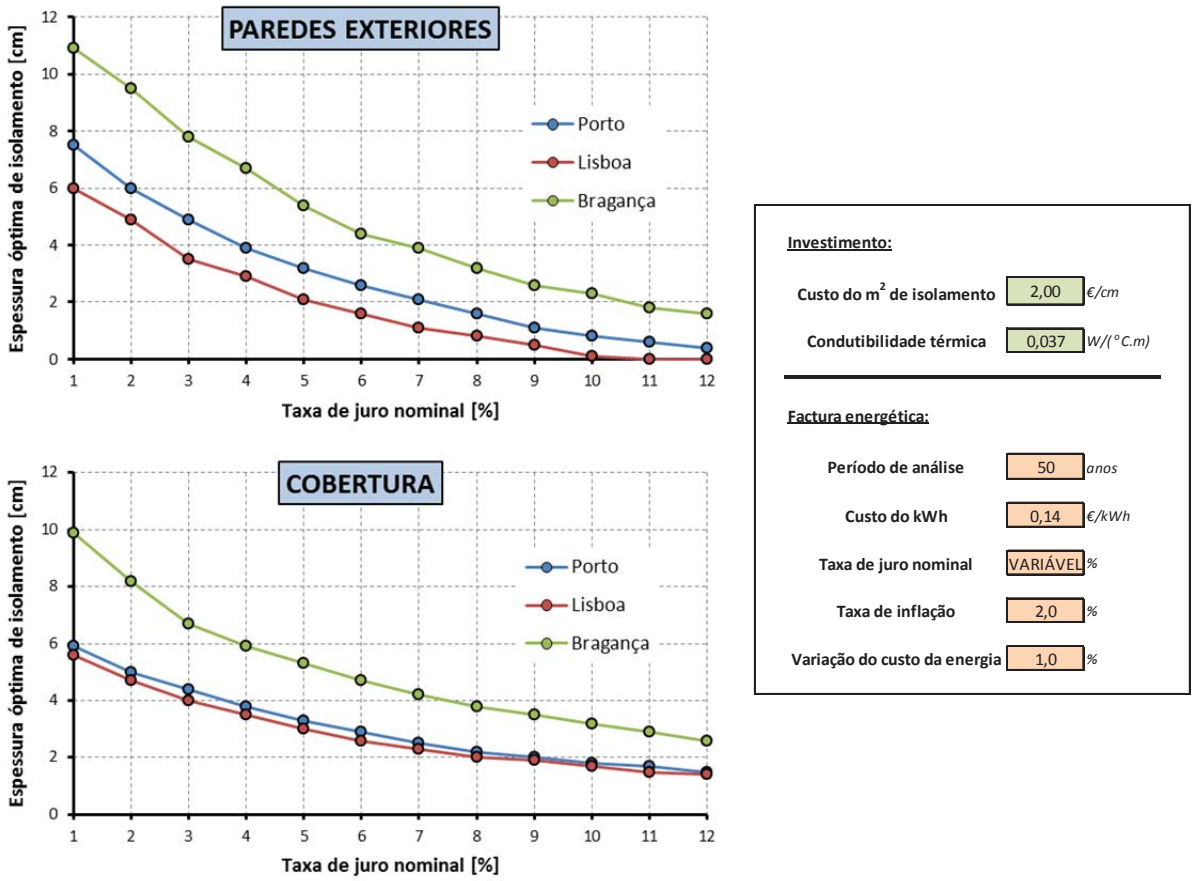
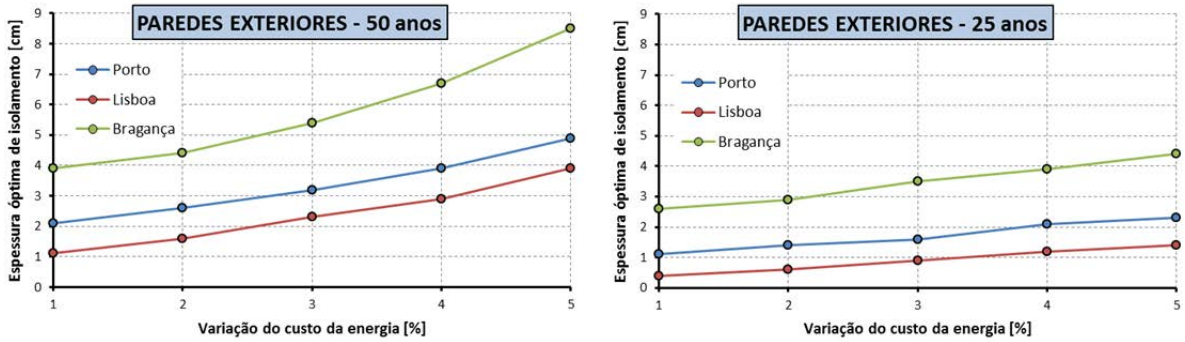


Figura 6.11 – Análise de sensibilidade da taxa de juro

Os resultados mostram que a taxa de juro nominal é decisiva para o resultado final, sendo que valores baixos levam a níveis de isolamento mais elevados, enquanto valores altos sugerem que existem investimentos mais rentáveis do que a aposta na reabilitação energética dos edifícios.

Na análise de sensibilidade relativa à variação dos custos com a energia consideraram-se ainda dois períodos de análise distintos, de 25 e de 50 anos. A taxa de juro admitida foi de 7% e os restantes parâmetros mantiveram-se constantes. Os resultados obtidos estão ilustrados na Figura 6.12.



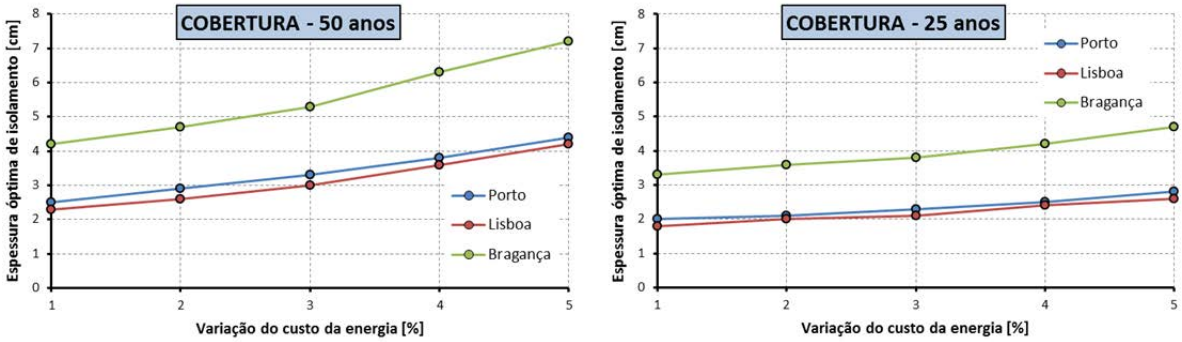


Figura 6.12 – Análise de sensibilidade da variação do custo da energia

Os resultados mostram que a consideração de um período de análise mais curto dilui o impacto da taxa referente à variação do custo da energia.

Globalmente, fica claro que existe uma enorme variabilidade nas soluções, em função dos valores definidos para os parâmetros de entrada.

6.3.6 Exemplo

Para ilustrar a aplicabilidade da ferramenta desenvolvida apresenta-se de seguida um exemplo prático.

Irá proceder-se à optimização das espessuras de isolante térmico de uma escola do tipo A, orientada a Este e considerando as três localizações. Foram admitidas duas renovações horárias.

A caracterização do isolante térmico e do cenário económico para este estudo estão representados na Figura 6.13.

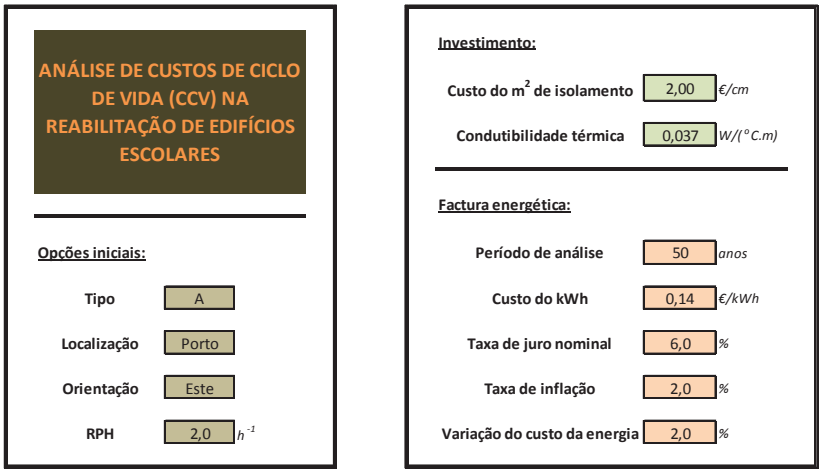


Figura 6.13 – Dados de entrada do exemplo

Para cada localização foi obtido o valor da espessura óptima do isolamento a aplicar nas paredes exteriores e nas coberturas. A Figura 6.14 mostra os resultados para o edifício localizado no Porto.

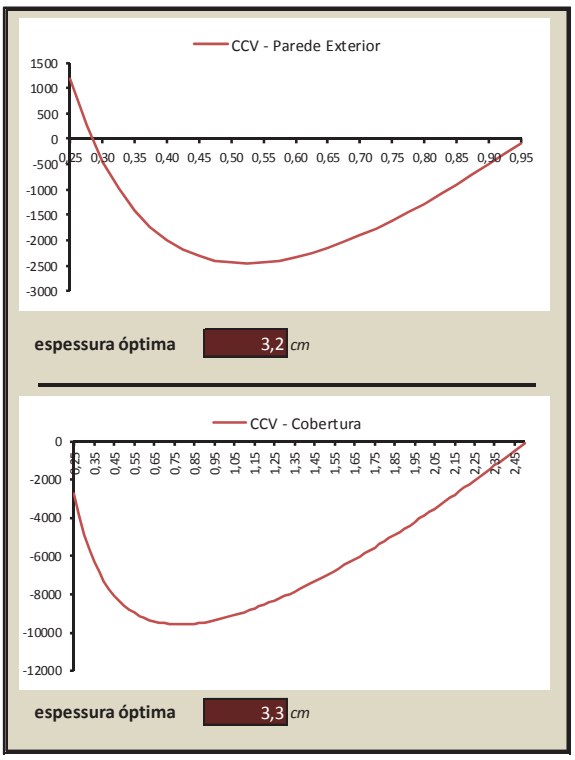


Figura 6.14 – Resultados do exemplo

De seguida a aplicação determina os valores das funções f_1 e f_2, descritas no ponto §5.4.2, correspondentes a estas soluções e representa-os graficamente. Nessa representação é ainda incluída a correspondente frente de Pareto e o ponto relativo à situação actual do edifício. A Figura 6.15 mostra o resultado para este exemplo.

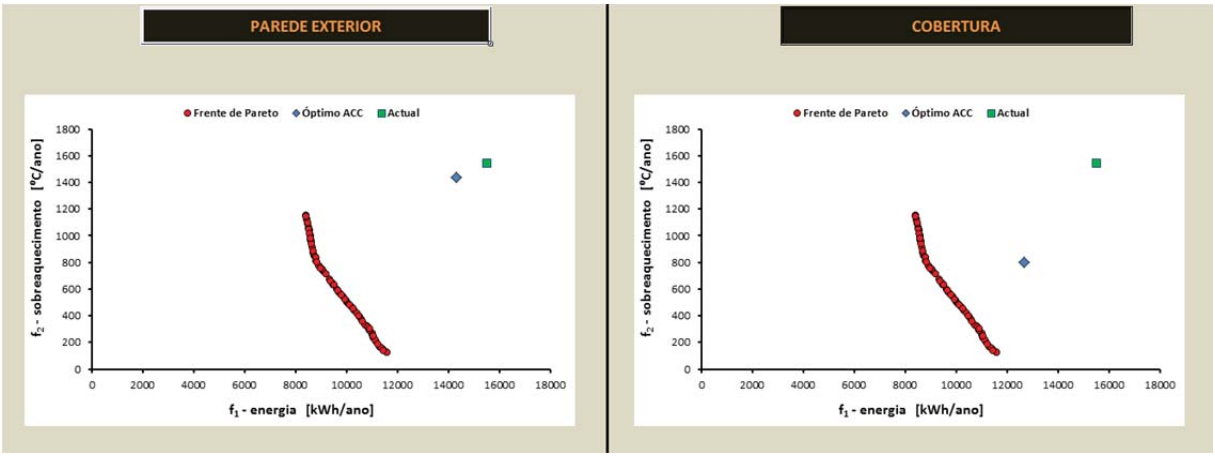


Figura 6.15 – Representação das soluções do exemplo na frente de Pareto

Esta visualização permite concluir que o isolamento da cobertura comparativamente ao das paredes exteriores é uma medida claramente mais eficaz.

O ponto correspondente à solução de isolamento da cobertura permite não só uma considerável poupança de energia, claramente superior ao obtido com as paredes exteriores,

como também conduz a uma melhoria no desempenho em termos de conforto térmico devido ao sobreaquecimento das salas de aula.

A Tabela 6.2 aglutina os resultados obtidos neste exemplo, para as três localizações em estudo, indicando os valores das espessuras óptimas de isolante térmico a adoptar na reabilitação dos dois elementos construtivos.

Tabela 6.2 – Resultados da análise de custos de ciclo de vida

Isolamento das paredes exteriores [cm]			Isolamento da cobertura [cm]		
Porto	Lisboa	Bragança	Porto	Lisboa	Bragança
3,2	2,3	5,4	3,3	3,0	5,3

Salienta-se que estes resultados correspondem a um determinado cenário económico não devendo ser interpretados como uma sugestão de solução a adoptar.

6.4 CONCLUSÕES

O segundo objectivo central desta Tese consiste em propor uma metodologia de optimização de soluções construtivas para utilização na reabilitação de edifícios escolares. Uma vez que se trata de um problema de optimização multi-objectivo foi necessário recorrer a ferramentas matemáticas avançadas. Do trabalho desenvolvido é possível tecer as seguintes conclusões principais:

— As frentes de Pareto, ou seja, o conjunto de soluções óptimas, obtidas através da utilização de algoritmos evolucionários, para os dois edifícios tipo, são altamente dependentes dos limites impostos para as variáveis. O resultado obtido é substancialmente diferente consoante os intervalos permitidos para a sua flutuação. Esta situação é particularmente importante no que se refere ao limite mínimo imposto para as renovações horárias no edifício;

— A interpretação das frentes de Pareto e posterior escolha de uma solução única é muito complicada em problemas do tipo do aqui apresentado, impondo um carácter quase aleatório à escolha;

— Uma forma de simplificar os procedimentos de optimização multi-objectivo e de obter uma solução única é através da utilização do Método dos Pesos. No entanto, o carácter aleatório associado à escolha é, neste caso, transportado para a definição dos pesos que irão afectar cada função, obtendo-se assim soluções completamente diferentes para cada conjunto de pesos;

— Assim, estes modelos matemáticos revelaram-se desadequados para utilização directa na optimização das soluções construtivas.

Para colmatar este problema optou-se por acoplar à optimização multi-objectivo uma análise de custos de ciclo de vida das soluções de reabilitação escolhidas para as paredes exteriores e para as coberturas. A utilização deste método mostrou-se eficaz e permitiu concluir que a análise de custos de ciclo de vida é um procedimento simples e adequado a este tipo de problemas.

A sua implementação foi conseguida através de uma ferramenta informática desenvolvida em ambiente *Excel* e que permite optimizar do ponto de vista do custo e do benefício as espessuras de isolante térmico a utilizar na reabilitação das paredes exteriores e das coberturas destes edifícios. Para avaliar o impacto da solução escolhida no conforto térmico de Verão, é possível visualizar a sua representação na respectiva frente de Pareto.

No entanto, a metodologia proposta e a ferramenta desenvolvida apresentam algumas limitações:

— A solução óptima é muito dependente do cenário económico criado. A sua definição deve ser rigorosa o que na conjuntura actual se adivinha uma tarefa muitíssimo complicada;

— A reabilitação das paredes exteriores e das coberturas é abordada em separado, não sendo possível visualizar na frente de Pareto o ponto representativo da solução correspondente à reabilitação conjunta dos dois elementos construtivos;

— Não se inclui a possibilidade de reabilitação dos envidraçados, o que poderia complementar as soluções adoptadas para as paredes exteriores e coberturas, levando a uma solução final mais próxima da respectiva frente de Pareto.

7 CONCLUSÕES

7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A qualidade do ambiente interior nos edifícios escolares, principalmente as suas componentes ligadas ao conforto térmico e à qualidade do ar interior (QAI), é uma preocupação actual, quer na comunidade científica, quer na sociedade em geral. Para lá do efeito das condições ambientais interiores na performance dos alunos, as crescentes preocupações com a eficiência energética dos edifícios dão ainda mais enfâse a este tema.

O estado Português decidiu lançar um programa de grande dimensão para a reabilitação de um número muito significativo de edifícios escolares, com o objectivo de os modernizar e adequar às exigências actuais, tornando-os num espaço mais atractivo e aberto à comunidade.

Em 2006 foi publicado em Portugal o Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios que impõe a aplicação dos novos regulamentos no domínio da eficiência energética e QAI. Um dos principais objectivos é o de melhorar o desempenho energético dos edifícios.

No entanto, as exigências incluídas na nova regulamentação no domínio da QAI são de tal forma restritivas que a consequência foi a necessidade de recorrer a sistemas mecânicos altamente dispendiosos, quer em termos de investimento inicial, quer na sua manutenção e exploração. Desta imposição estão a resultar edifícios escolares com custos de reabilitação muitíssimo elevados e que serão economicamente insustentáveis no futuro tendo em consideração os orçamentos disponíveis nas escolas portuguesas.

Este foi o ponto de partida para esta Tese. Perante esta realidade procurou-se desenvolver um trabalho que permitisse atingir dois objectivos principais:

— Caracterizar o desempenho em serviço dos edifícios escolares;

— Definir uma metodologia de optimização de soluções construtivas.

7.2 SÍNTESE DAS CONCLUSÕES OBTIDAS

O trabalho desenvolvido permitiu compreender a realidade dos edifícios escolares em termos de desempenho higrotérmico em condições de serviço, quer dos recentemente reabilitados quer dos não-reabilitados. As medições levadas a cabo conduziram a uma análise crítica da legislação em vigor no domínio da higrotérmica, eficiência energética e QAI. A partir dessa caracterização experimental, definiu-se um modelo de reabilitação tipo, assente no princípio de envolventes exteriores isoladas, com elevada inércia térmica, associadas a sistemas de ventilação preferencialmente natural e equipamentos de aquecimento simples. O desempenho

desse modelo foi simulado computacionalmente em diferentes localizações e foram identificadas as medidas de reabilitação mais eficazes. Posteriormente, procedeu-se à sua optimização baseada em critérios técnicos e económicos.

As conclusões mais significativas retiradas dos estudos efectuados são as seguintes:

— A campanha experimental exploratória permitiu verificar que a qualidade do ambiente interior das salas de aula dos edifícios escolares não-reabilitados não é adequada. As medições mostraram que as salas são termicamente desconfortáveis, com temperaturas muito baixas. As medições da concentração de dióxido de carbono (CO_2) e dos caudais de ventilação revelaram que a QAI nestas escolas é um problema, com a admissão de ar novo em níveis muito abaixo do desejável;

— As medições efectuadas nas escolas reabilitadas durante a campanha exploratória evidenciaram diferenças substanciais de desempenho em relação às escolas não-reabilitadas. O efeito da intervenção de reabilitação na qualidade do ambiente interior foi evidente, quer em termos da melhoria das condições de conforto térmico quer da QAI;

— Porém, quer os resultados relativos ao conforto térmico quer os relativos à QAI estiveram fora dos limites regulamentares, apesar de os ocupantes terem controlo sobre os sistemas. Este facto denota algum desajuste entre as exigências regulamentares e a realidade. No que se refere ao conforto térmico a adopção de modelos adaptativos pode ser uma solução a prever na futura legislação;

— A campanha experimental realizada em cinco escolas recentemente reabilitadas mostrou que, apesar das intervenções que os edifícios sofreram, a orientação das salas de aula, bem com a sua localização em diferentes pisos do edifício, continuam a ser responsáveis por diferenças na temperatura interior. Tais diferenças foram bastante significativas quando comparadas salas orientadas a Norte com salas orientadas a Sul e salas situadas no r/c com salas situadas no último piso;

— Apesar de a amostra estudada pertencer a uma região limitada do País, verificaram-se diferenças no desempenho entre as escolas mais próximas do litoral e as escolas mais no interior;

— Os ganhos internos devido à ocupação, iluminação, equipamentos, etc., associados a uma envolvente exterior devidamente isolada, parecem ser suficientes para, num clima moderado como o das escolas estudadas, garantir temperaturas próximas das de conforto durante o período de aquecimento;

— No entanto, os mesmos ganhos, associados a ganhos solares mais significativos, podem conduzir estas escolas a situações de sobreaquecimento em períodos mais quentes. O sobreaquecimento das salas de aula poderá ser controlado e minimizado através de envolventes exteriores de elevada inércia térmica, associadas a estratégias de ventilação nocturna;

— As medições efectuadas mostraram que a humidade relativa nas salas de aula flutua dentro de intervalos adequados, apenas se registaram, pontualmente, valores baixos em alguns instantes das medições que decorreram no período de aquecimento. Assim, considerou-se que a humidade relativa não é um factor determinante e condicionante na escolha de soluções de reabilitação;

— O registo da concentração de CO_2 mostrou que os sistemas de AVAC não estão a ser colocados em funcionamento, provavelmente por questões económicas, e, como tal, apesar do avultado investimento efectuado nestas escolas a legislação continua a não ser cumprida. No entanto, a concentração de CO_2 foi, na maioria das medições, próxima de níveis considerados adequados noutras regulamentações manifestamente menos exigentes do que a portuguesa;

— A regulamentação actualmente em vigor deve ser revista tornando-a mais ajustada à realidade e à conjuntura económica, através da diminuição das exigências de ar novo nas salas de aula. Esta alteração permitirá uma poupança muito significativa nos custos com os sistemas de AVAC. A imposição de um valor limite máximo para a concentração de CO_2 é uma forma muito restritiva de legislar esta matéria, não dando abertura a alguma flexibilidade como acontece noutras regulamentações que adoptam critérios probabilísticos de exposição a concentrações máximas. Adicionalmente, as exigências actuais conduzem a soluções de envolventes perfeitamente estanques, em que o ambiente interior fica exclusivamente controlado pelos sistemas mecânicos. Tendo em consideração o clima português, esta estratégia parece claramente desajustada, não se aproveitando o facto de durante grande parte do ano as condições climáticas permitirem um aproveitamento directo do ar exterior através de soluções de ventilação natural das salas de aula;

— Como conclusão final das duas campanhas de medições realizadas destaca-se a profunda convicção de que a estratégia de reabilitação de um edifício escolar deve assentar na aposta em envolventes adequadas, isoladas e com elevada inércia térmica, protecções solares exteriores, sistemas simples de ventilação, que incluam grelhas de admissão nas fachadas e, possivelmente, extracção mecânica, e sistemas de aquecimento adequados face ao clima da região;

— Os modelos de simulação desenvolvidos permitiram confirmar o impacto da orientação e da localização dos edifícios no seu desempenho;

— A análise de sensibilidade mostrou que as renovações horárias são a variável com mais peso na performance do edifício, quer para as necessidades energéticas quer para o controlo do sobreaquecimento. O isolamento das coberturas é a medida de reabilitação mais eficaz. O isolamento das paredes exteriores pode garantir uma diminuição até 45% das necessidades energéticas, no entanto, implica um aumento do desconforto devido ao sobreaquecimento. A alteração das propriedades dos envidraçados conduz a resultados idênticos;

— A utilização directa de modelos matemáticos de optimização multi-objectivo, assentes em algoritmos evolucionários, em problemas como o da reabilitação de edifícios escolares revelou-se uma tarefa muito complexa. A definição de critérios de selecção de uma solução única é uma escolha muito subjectiva e, como tal, sempre passível de ser criticada. Este facto conduziu a uma estratégia de optimização que combinasse estes métodos juntamente com outros mais tradicionais, como a análise de custos de ciclo de vida;

— A metodologia proposta para a optimização das soluções construtivas passou pela realização de uma análise de custos de ciclo de vida que permite obter as espessuras óptimas de isolante térmico a aplicar na reabilitação das paredes exteriores e das coberturas. Este método foi implementado numa folha de cálculo programada para o efeito. Concluiu-se que estas análises são fortemente condicionadas pelo cenário económico criado, o que na conjuntura actual se revela uma tarefa muito complexa.

7.3 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A contribuição dos resultados obtidos neste trabalho não esgota o vasto campo de investigação no domínio da qualidade do ambiente interior, associada à reabilitação de edifícios escolares. Por esse motivo, salientam-se alguns aspectos que se considera serem da maior relevância no acompanhamento futuro do desempenho dos edifícios que estão a ser reabilitados:

— Nas escolas que estão a ser intervencionadas e que entretanto vão sendo concluídas deve continuar a existir uma monitorização das suas condições ambientais interiores. Só através da contínua avaliação do seu desempenho em condições de serviço será possível compreender as falhas, aprender e corrigir;

— Esta monitorização pode e deve ser acompanhada de inquéritos a disponibilizar à comunidade escolar para aferir qual o seu nível de satisfação;

— Deve ser realizado um levantamento dos novos custos de operação dos edifícios reabilitados avaliando, assim, o impacto da aplicação dos sistemas mecânicos no orçamento das escolas. No entanto, este levantamento só terá significado real se as escolas colocarem os sistemas em funcionamento, situação que parece não ser a mais corrente.

Também em relação ao procedimento de optimização de soluções construtivas o trabalho não está concluído, outros aspectos devem ser estudados no futuro:

— A ferramenta desenvolvida deve ser preparada para considerar o efeito conjunto das soluções de reabilitação na respectiva frente de Pareto;

— A substituição dos envidraçados deve ser incluída na análise de custos de ciclo de vida, através da criação de uma base de dados de soluções tipo e respectivos custos;

— Para complementar a metodologia proposta, deve ser estudado e dimensionado o sistema de ventilação a adoptar nas salas de aula, incluindo a ventilação nocturna para controlo do sobreaquecimento;

— Podem ser incorporadas novas funções de avaliação do desempenho, aumentando o número de objectivos a optimizar, permitindo uma caracterização mais rigorosa do edifício.

Por fim, destaca-se o elevado número de simulações anuais do desempenho que foram realizadas. Daqui resultaram inúmeros dados que podem e devem ser utilizados na validação de modelos simplificados.

Portanto, propõe-se que sejam estudadas metodologias simplificadas de avaliação do desempenho dos edifícios, que substituam as simulações anuais, reduzindo de forma significativa o tempo de cálculo e facilitando assim a sua utilização prática em outras situações. A enorme quantidade de dados que resultaram da campanha de simulações desenvolvida nesta Tese ajudará na validação desses métodos.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADENE – AGÊNCIA PARA A ENERGIA, 2009. NT-SCE-02 - Metodologia para auditorias periódicas de QAI em edifícios de serviços existentes no âmbito do RSECE. *Nota Técnica da ADENE*.

ALEGRE, N.A., 2010. Arquitectura para o edifício secundário em Portugal: princípios e evolução ao longo do século XX. In: *Escolas secundárias: reabilitação*. Caleidoscópio – edições e artes gráficas, SA, ed. 2010. pp. 5-14.

ALMEIDA, M. & SILVA, S., 2007. Climatização e instalações das construções II. Térmica de Edifícios. *Universidade do Minho*: Apontamentos para a unidade curricular.

ALMEIDA, R. & FREITAS, V.P., 2011. Evaluation and Parametric Optimization of the Heating Load and Comfort Conditions in a School Building. In: *Proceedings of the 9th Nordic Symposium on Building Physics in the Nordic Countries*. Tampere, Finland 29 de Maio a 2 Junho de 2011.

AMARAL, M.A.P.S., 2008. Sistemas de ventilação Natural e Mistos em Edifícios de Habitação. Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

ARSLAN, M.H., 2010. An evaluation of effective design parameters on earthquake performance of RC buildings using neural networks. *Engineering Structures*, 32 (7), pp. 1888-1898.

ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, 2001. Ansi/Ashrae Standard 140-2001. Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs. *ASHRAE*, Atlanta, USA.

ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, 2004. Ansi/Ashrae Standard 62.1-2004. Ventilation for acceptable indoor air quality. *ASHRAE*, Atlanta, USA.

ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, 2007. Ansi/Ashrae Standard 90.1-2007. Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. *ASHRAE*, Atlanta, USA.

ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, 2008. Advanced Energy Design Guide for K-12 School Buildings. *ASHRAE*, Atlanta, USA.

ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, 2009. 2009 ASHRAE Handbook - Fundamentals. *ASHRAE*, Atlanta, USA.

ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, 2010. Ansi/Ashrae Standard 55-2010. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. *ASHRAE*, Atlanta, USA.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, 2000. E 741-00 - Standard Test Method for Determining Air Change in a Single Zone by Means of a Tracer Gas Dilution. *ASTM*, West Conshohocken, USA.

ASTRAND, P. & RODAHL, K., 1986. *Textbook of Work Psysiology*. 3rd edition, New York: McGraw-Hill Book Company.

AWBI, H., 2003. *Ventilation of Buildings*. 2nd Ed., New York, USA: E & FN Spon.

AYATA, T., ARCAKHOGLU, E. & YILDIZ, O., 2007. Application of ANN to explore the potential use of natural ventilation in buildings in Turkey. *Applied Thermal Engineering*, 27 (1), pp. 12-20.

BAKÓ-BIRÓ, ZS., KOCHHAR, N., CLEMENTS-CROOME, D.J., AWBI, H.B. & WILLIAMS, M., 2007. Ventilation rates in schools and learning performance. In: *Proceedings of Clima 2007 WeelBeing Indoors*. Helsínquia, Finlândia, 10-14 de Junho de 2007.

BARREIRA, E., 2010. Degradação biológica de fachadas com sistemas de isolamento térmico pelo exterior devida ao desempenho higrotérmico. Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

BEJA, F., SERRA, J., MACHÁS, E. & SALDANHA, I., 1990. *Muitos anos de escolas. Vol. I e II*. Lisboa: Ministério da Educação.

BRAGER, G. & DE DEAR, R., 1998. Thermal adaptation in the built environment: a literature review. *Energy and Buildings*, 27 (1), pp. 83-96.

BRAGER, G., FOUNTAIN, M, BENTON, C., ARENS, E. & BAUMAN, A., 1994. A comparison of methods for assessing thermal sensation and acceptability in the field. In: Oseland, N. & Humphreys M., *Proceedings of a conference held at the Building Research Establishment - Thermal comfort: Present, Past and Future*, Garston, U.K. 9-10 de Junho de 1993.

BRAGER, G., PALIAGA, G. & DE DEAR, R., 2004. The Effect of Personal Control and Thermal Variability on Comfort and Acceptability. ASHRAE – RP-1161 - Final Report, *ASHRAE*, Atlanta, USA.

BUILDING BULLETIN 87, 2003. Guidelines for Environmental Design in Schools. *Department for Education and Skills*, 2nd edition, London, 2003.

BUILDING BULLETIN 101, 2006. Building Bulletin 101 - Ventilation of School Buildings. Regulations, Standards and Design Guidance. *Department for Education and Skills*, Version 1.4, London, 2006.

CEN - COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, 2007. EN 15251:2007 – Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings-addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. *CEN*, Brussels, Belgium.

CENA K., 1994. Thermal and non-thermal aspects of comfort surveys in homes and offices. In: Oseland, N. & Humphreys M., *Proceedings of a conference held at the Building Research Establishment - Thermal comfort: Present, Past and Future*, Garston, U.K. 9-10 de Junho de 1993.

CHATELET, A., FERNANDEZ, P. & LAVIGNE, P., 1998. *Architecture climatique, une contribution au développement durable. Tome 2: Concepts et dispositifs*. Aix-en Provence: EDISUD.

CLASSCOOL, 2006. Building Bulletin 101 – Ventilation of school buildings – ClassCool v1.02. Disponível em <URL: http://www.teachernet.gov.uk/docbank/index.cfm?id=9954 > (Consulta em Março de 2011).

CLARKE, J.A., 2001. *Energy Simulation in Building Design*. 2nd edition. Oxford, England: Butterworth-Heinemann.

COLEY, D. & BEISTEINER, A., 2002. Carbon Dioxide Levels and Ventilation Rates in Schools. *International Journal of Ventilation*, 1 (1), pp. 45-52.

CONCEIÇÃO, E.Z.E. & LÚCIO, M.M.J.R., 2008. Thermal study of school buildings in winter conditions. Building and Environment, 43 (5), pp. 782-792.

CONCEIÇÃO, E.Z.E. & LÚCIO, M.M.J.R., 2010. Numerical Study of the Influence of Opaque External Trees with Pyramidal Shape on the Thermal Behaviour of a School Building in Summer Conditions. *Indoor and Built Environment*, 19 (6), pp. 657-667.

CORSI, R.L., TORRES, V.M., SANDERS, M. & KINNEY, K.A., 2002. Carbon dioxide levels and dynamics in elementary schools: results of the TESIAS study. In: *Proceedings of the 9th International Conference on Indoor Air Quality and Climate - Indoor Air 2002*. Monterey, USA 30 de Junho a 5 de Julho de 2002.

COSTA, L., 2003. Algoritmos Evolucionários em Optimização Uni e Multi-objectivo. Dissertação para a obtenção do grau de Doutor no Ramo de Engenharia de Produção e Sistemas, Área de Métodos Numéricos e Estatísticos, U.M. – Universidade do Minho.

CRAWLEY, D., LAWRIE, L., PEDERSEN, C., LIESEN, R., FISHER, D., STRAND, R., TAYLOR, R., WINKELMANN, F., BUHL, W., HUANG, Y. & ERDEM, A., 1999. EnergyPlus: A New-Generation Building Energy Simulation Program. In: *Proceedings of the Renewable and Advanced Energy Systems for the 21st Century*, Maui, Hawaii .11-15 de Abril de 1999.

CRAWLEY, D., LAWRIE, L., PEDERSEN, C. & WINKELMANN, F., 2000. EnergyPlus: Energy Simulation Program, *ASHRAE Journal*, 42, pp 49-56.

CRAWLEY, D.B., HAND, J.W., KUMMERT, M. & GRIFFITH, B.T., 2005. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. *Building Energy Tools Directory Report*. Disponível em <URL: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/pdfs/contrasting_the_capabilities_of_building_energy_performance_simulation_programs_v1.0.pdf > (Consulta em Janeiro de 2011).

DASCALAKI, E. & SERMPETZOGLOU, V., 2011. Energy performance and indoor environmental quality in Hellenic schools. Energy and Buildings, 43 (3), pp. 718-727.

DEB, K., 2001. *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*. Chichester, England: John Wiley & Sons, Ltd.

DEB, K., AGRAWAL, S., PRATAP, A. & MEYARIVAN, T., 2000. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGAII. Technical Report 200001, Indian Institute of Technology, Kanpur: Kanpur Genetic Algorithms Laboratory (KanGAL).

DE DEAR, R.J. & BRAGGER, G.S., 1998. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. *ASHRAE Transactions*, 104 (1), pp. 145-162.

DE DEAR, R., BRAGER, G. & COOPER, D., 1997. Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference. ASHRAE - RP-884 – Final Report, *ASHRAE*, Atlanta, USA.

DELGADO, J.M.P.Q., FREITAS, V.P., RAMOS, N.M.M. & BARREIRA, E., 2010. Numerical Simulation of Exterior Condensations on Façades: The Undercooling Phenomenon. In: *Proceedings of the Thermal Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings XI International Conference*, Clearwater Beach, USA 5-9 de Dezembro de 2010.

DESIGNBUILDER, 2009. *DesignBuilder Simulation + CFD Training Guide*, DesignBuilder Software Ltd., U.K..

DGEG, 2008. DIRECÇÃO GERAL DE ENERGIA E GEOLOGIA – Eficiência energética – Estatísticas, Indicadores Energéticos. Disponível em <URL: http://www.dgge.pt> (Consulta em Janeiro de 2011).

Dutton, S., Shao, L. & Riffat, S., 2008. Validation and parametric analysis of energyplus: airflow network model using contam. In: *Proceedings of SimBuild 2008 - Third National Conference of IBPSA*. Berkeley, USA 30 de Julho a 1 de Agosto de 2008.

ENERGYPLUS, 2010. EnergyPlus Engineering Reference. Disponível em <URL: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_documentation.cfm> (Consulta em Janeiro de 2011).

EPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1991. *Indoor Air Facts No. 4 – Sick Building Syndrome, Air and Radiation*. Research and Development (MD-56), USA.

EPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2011. *IAQ Design Tools for Schools*. Disponível em <URL: http://www.epa.gov/iaq/schooldesign> (Consulta em Janeiro de 2011).

ERHORN-KLUTTIG, H., ERHORN, H. & WÖSSNER, S., 2005. Exemplary retrofit concepts in Europe. Enegy-efficient public buildings (results from IEA/EU-projects). In: *Proceedings of the 7th Nordic Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, Vol. 1*. Reiquiavique, Islândia 13-15 de Junho de 2005.

ETHERIDGE, D. & SANDBERG, M., 1996. *Building Ventilation. Theory and Measurement*. Chichester, England: John Wiley & Sons.

FANGER, P.O., 1970. *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering*. Denmark: McGraw-Hill.

FEUSTEL, H., 1998. COMIS - An International Multizone Airflow and Contaminant Transport Model. *Report LBNL-42182*, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, USA.

FLORIDES, G.A., TASSOU, S.A., KALOGIROU, S.A. & WROBEL, L.C., 2002. Review of solar and low energy cooling technologies for buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6 (6), pp. 557-572.

FONSECA, C.M. & FLEMING, P.J., 1993. Genetic algorithms for multiobjective optimization: Formulation, discussion, and generalization. In: *Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms*. Urbana-Champaign, USA 17-21 de Juno de 1993.

FRANCHIMON, F., VAN DIJKEN, F., PERNOT, C.E.E. & VAN BRONSWIJK, J.E.M.H., 2009. Air-exchange rate under debate. In: *Proceedings of Healthy Buildings 2009*. Syracuse, NY, USA 13-17 de Setembro de 2009.

FREITAS, V.P., 2002. Isolamento térmico de fachadas pelo exterior. Reboco armado delgado sobre poliestireno expandido - ETICS. *Prof. Eng. Vasco Peixoto de Freitas, Lda.. Relatório HT 191A/02*, Porto, Portugal.

FREITAS, V.P. & ALMEIDA, R., 2009. Reabilitação de Edifícios Escolares: Avaliação do Desempenho Higrotérmico em Serviço e Exigências Regulamentares. *Construção Magazine*, 34, pp. 10-14.

GAITANI, N., MIHALAKAKOU, G., SANTAMOURIS, M., PAPAGLASTRA, M., ASSIMAKOPOULOS, M., SFAKIANAKI, K., PAVLOU, K., DOUKAS, P. & KORRES, D., 2006. Energy audit certification and environmental evaluation of school buildings. In: *International Workshop on Energy Performance and Environmental Quality of Buildings*. Milos island, Greece 6-7 de Julho de 2006.

GRIFFITHS, M. & EFTEKHARI, M., 2008. Control of CO2 in a naturally ventilated classroom. Energy and Buildings, 40 (4), pp. 556-560.

GUSTAFSSON, S., 2000. Optimisation of insulation measures on existing buildings. *Energy and Buildings*, 33 (1), 2000, pp. 45-55.

HAGAN, M.T., DEMUTH, H.B. & BEALE, M.H., 1996. *Neural Network Design*. PWS Publishing Company, ISBN 0534943322.

HASAN, A., VUOLLE, M. & SIRÉN, K., 2008. Minimization of life cycle cost of a detached house using combined simulation and optimization. *Building and Environment*, 43 (12), pp. 2022-2034.

HEITOR, T.V., 2010. Modernizar as escolas do ensino secundário. In: *Escolas secundárias: reabilitação*. Caleidoscópio – edições e artes gráficas, SA, ed. 2010. pp. 17-21.

HENNINGER, R.H. & WITTE, M.J., 2004. EnergyPlus Testing with ANSI/ASHRAE Standard 140-2001 (BESTEST). *Report of the Lawrence Berkeley National Laboratory to the U.S. Department of Energy*. Illinois, USA.

HENS, H., 2007. *Building physics - Heat, air and moisture. Fundamentals and engineering methods with examples and exercises*. Leuven, Belgium: Ernst & Sohn – Wiley.

HEUDORF, U., NEITZERT, V. & SPARK, J., 2009. Particulate matter and carbon dioxide in classrooms – the impact of cleaning and ventilation. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 212 (1), pp. 45-55.

HOLM, A., HELLWIG, R. & SEDLBAUER, K., 2008. Retrofitting of a school with an integral aspect. In: *Proceedings of the 8th Nordic Symposium on Building Physics in the Nordic Countries*, Vol. 3. Copenhagen, Dinamarca 16-18 de Junho de 2008.

Horn, J., Nafploitis, N. & Goldberg, D., 1994. A niched Pareto genetic algorithm for multi-objective optimization. In: *Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation*. Orlando, USA 27-29 de Junho de 1994.

HUANG, J., WINKELMANN, F., BUHL, F., PEDERSEN, C., FISHER, D., LIESEN, R., TAYLOR, R., STRAND, R., CRAWLEY, D. & LAWRIE, L., 1999. Linking the COMIS multi-zone airflow model with the EnergyPlus building energy simulation program. In: *Proceedings of Building Simulation '99*, Volume II. Kyoto, Japan 13-15 de Setembro de 1999.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1998. ISO 7726 - Ergonomics of the Thermal Environment, Instruments for measuring physical quantities. *ISO*, Genève, Switzerland.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2000.ISO 12569 - Thermal Performance of Buildings, Determination of Air Change in Buildings - Tracer Gas Dilution Method. *ISO*, Genève, Switzerland.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2005. ISO 7730 - Ergonomics of the Thermal Environment, Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria. *ISO*, Genève, Switzerland.

JAIN, L.C., GOLDBERG, R., & AJITH, A., 2005. *Evolutionary multiobjective optimization: theoretical advances and applications*. New York: Springer.

KALOGIROU, S., 1999. Applications of artificial neural networks in energy systems: a review. *Energy Conversion & Management*, 40 (10), pp. 1073-1087.

KALOGIROU, S., EFTEKHARI, M. & MARJANOVIC, L., 2003. Predicting the pressure coefficients in a naturally ventilated test room using artificial neural networks, *Building and Environment*, 38 (3), pp. 399-407.

KAWASHIMA, M., DORGAN, C.E. & MITCHELL, J., 1995. Hourly Thermal Load Prediction for the Next 24 Hours by ARIMA, EWMA, LR, and an ANN. *ASHRAE Transactions*, 101 (1), pp.186-200.

KAZANASMAZ, T., GÜNAYDIN, M. & BINOL, S., 2009. Artificial neural networks to predict daylight illuminance in office buildings. *Building and Environment*, 44 (8), pp. 1751-1757.

KREIDER, J.F. & RABL, A., 1994. *Heating and cooling of buildings - Design for efficiency*. Singapore: McGraw-Hill, Book Co, Chapter 1, pp. 1-21.

KREITH, F & GOSWAMI, D.Y., 2007. *Handbook of Energy Efficiency and renewable Energy*. Boca Raton, USA: CRC Press, Taylor & Francis Group.

KURNITSKI, J., 2007. Indoor climate and ventilation in Finnish schools – air distribution and temperature control in classrooms. *REHVA Journal*, June 2007, pp. 15-22.

LFC – LABORATÓRIO DE FÍSICA DAS CONSTRUÇÕES, 2008. Consultoria à Reabilitação de Escolas Básicas do 2.º e 3.º Ciclo. Escola EB 2,3 da Areosa. *Relatório CMP/LFC-IC – 197.01.2008*.

LFC – LABORATÓRIO DE FÍSICA DAS CONSTRUÇÕES, 2009. Consultoria à Reabilitação de Escolas Básicas do 2.º e 3.º Ciclo. Escola EB 2,3 Manoel de Oliveira. *Relatório CMP/LFC-IC – 197.05.2009*.

LAMBERTS, R., 2005. *Desempenho térmico de edificações*. Relatório do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.

LAMBERTS, R., DUTRA, L. & PEREIRA, F., 1997. *Eficiência energética na arquitectura*. São Paulo: PW Editores.

LEE, J.H., KO, Y.D., HAN, K. & YUN, I., 2006. Comparison of Latin Hypercube Sampling and Simple Random Sampling applied to Neural Network modeling of HfO2 thin film fabrication. *Transactions on Electrical and Electronic Materials*, 7 (4), pp. 210-214.

LIESEN, R.J. & PEDERSON, C.O., 1999. Modeling the energy effects of combined heat and mass transfer in building elements. Part 1, Theory. *ASHRAE Transactions 105 (2)*, pp. 941-953.

LIN, M., TSAI, K. & SU, B., 2009. Estimating the sound absorption coefficients of perforated wooden panels by using artificial neural networks. *Applied Acoustics*, 70 (1), pp. 31-40.

LNEC – LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, 2010a. Net Zero Energy School – Reaching the community. Escola Secundária de Vergílio Ferreira. Condições ambientes no período de Inverno de 2010. *Relatório 180/2010 – ES/LNEC*.

LNEC – LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, 2010b. Net Zero Energy School – Reaching the community. Escola Secundária de Vergílio Ferreira. Condições ambientais no período de meia-estação de 2010. *Relatório 269/2010 – ES/LNEC*.

MADUREIRA, J., ALVIM-FERRAZ, M.C.M., RODRIGUES, S., GONÇALVES, C., AZEVEDO, M.C., PINTO, E. & MAYAN, O., 2009. Indoor Air Quality in Schools and Health Symptoms among Portuguese Teachers. *Human and Ecological Risk Assessment*, 15 (1), pp. 159-169.

MAGNIER, L. & HAGHIGHAT, F., 2010. Multiobjective optimization of buildings design using TRNSYS simulations, genetic algorithm, and Artificial Neural Networks. *Building and Environment*, 45 (3), pp. 739-746.

MALINA, R., BOUCHARD, C. & BAR-OR, O., 2004. *Growth, Maturation, and Physical Activity*. 2nd ed., Champaign, USA: Human Kinectics.

MATIAS, L., 2010. *Desenvolvimento de um modelo adaptativo para definição das condições de conforto térmico em Portugal*. Dissertação elaborada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa.

MATIAS, L., PINA SANTOS, C. & CORREIA GUEDES, C., 2006. Condições de Conforto Térmico em edifícios em Portugal - Modelo adaptativo. In: *Actas do Encontro Nacional de Qualidade e Inovação (QIC2006)*, LNEC, Lisboa 21-24 de Novembro de 2006.

MATLAB, 2006. Neural Network Toolbox 6 – User's Guide. *The MathWorks*.

MCCULLOCH, W. & PITTS, W., 1943. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5, pp. 115-133.

MCCULLOUGH, E. & OLESEN, B., 1994. Thermal insulation provided by chairs. *ASHRAE Transactions*, 100 (1), pp. 795-802.

MELO, A., LAMBERTS, R., VERSAGE, R. & SORGATO, M., 2008. *Manual de simulação computacional de edifícios naturalmente ventilados no programa EnergyPlus*. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações – LabEEE, Florianópolis, Brasil.

MENDELL, M.J. & HEATH, G.A., 2005. Do indoor pollutants and thermal conditions in schools influence student performance? A critical review of the literature. *Indoor Air*, 15 (1), pp. 27-52.

MILNE, G., 1995. The energy implications of a climate-based indoor air temperature standard. In: Nicol, F., Humphreys, M., Sykes, O. & Roaf, S., *Standards for thermal comfort*, London, U.K.: E and FN Spon, pp. 182-189.

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO, 2010. *Educação em números – Portugal 2010*. Lisboa: Gabinete de Estatística e Planeamento da Educação (GEPE) – Ministério da Educação, Lisboa, Setembro 2010.

MORSE, R., HAAS, P., LATTANZIO, S., ZEHNTE, D. & DIVINE, M., 2009. A cross-sectional study of schools for compliance to ventilation rate requirements. *Journal of Chemical Health and Safety*, 16 (6), pp. 4-10.

MROZ, T. & ERHORN, H., 2003. State of the Art Overview: Questionnaire Evaluations. *IEA Annex 36: Retrofitting of Educational Buildings, Subtask A Report*.

MUMOVIC, D., PALMER, J., DAVIES, M., ORME, M., RIDLEY, I., ORESZCZYN, T., JUDD, C., CRITCHLOW, R., MEDINA, H.A., PILMOOR, G., PEARSON, C. & WAY, P., 2009. Winter indoor air quality, thermal comfort and acoustic performance of newly built secondary schools in England. *Building and Environment*, 44 (7), pp. 1466-1477.

MUSTAFANAJ, G., CHEN, J. & LOWRY, G., 2010. Thermal behavior prediction utilizing artificial neural networks for an open office. *Applied Mathematical Modelling*, 34 (11), pp. 3216-3230.

NILSSON, H., 2004. *Comfort Climate Evaluation with Thermal Manikin Methods and Computer Simulation Models*. Sweden: University of Gavle.

PALA, M., CAGLAR, N., ELMAS, M., CEVIK, A. & M. SARIBIYIK, 2008. Dynamic soil–structure interaction analysis of buildings by neural networks. *Construction and Building Materials*, 22 (3), pp. 330–342.

PARQUE ESCOLAR, 2009. *Relatório de sustentabilidade_2008 – Parque Escolar*, Lisboa: Parque Escolar.

PARQUE ESCOLAR, 2010a. Enquadramento, objectivos, metodologias de intervenção e sustentabilidade. In: *10as Jornadas de Climatização*. Lisboa, Portugal 14 de Outubro de 2010.

PARQUE ESCOLAR, 2010b. Implicações do RSECE nos projectos – custo inicial, de manutenção e exploração. In: *10as Jornadas de Climatização*. Lisboa, Portugal 14 de Outubro de 2010.

PATTERSON, D.W., 1996. *Artificial Neural Networks: Theory and Applications.* Prentice Hall, ISBN 0132953536.

PEDERSEN, C.O., FISHER, D.E. & LIESEN, R.J., 1997. Development of a Heat Balance Procedure for Calculating Cooling Loads. *ASHRAE Transactions,* 103 (2), pp. 459-468.

PERSILY, A.K., 1996. Relationship Between Indoor Air Quality and Carbon Dioxide. In: *Proceedings of the 7th International Conference in Indoor Air Quality and Climate - Indoor Air '96*. Nagoya, Japão 21-26 de Julho de 1996.

PIEDADE, A.C., RODRIGUES. A.M & RORIZ, L., 2000. *Climatização em edifícios. Envolvente e comportamento térmico*. 1ª ed. Alfragide: Edições Orion,

RAMOS, N., 2007. A importância da inércia higroscópica no comportamento higrotérmico dos edifícios. Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

RCCTE, 2006. Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios. *Diário da República*, I Série - A, Decreto-lei nº 80/2006, Abril, Lisboa, 2006.

REHVA – FEDERATION OF EUROPEAN HEATING AND AIR-CONDITIONING ASSOCIATIONS, 2010. Ambiente Interior e Eficiência Energética nas Escolas. *Ingenium Edições, Lda.*, Manual REHVA nº13, Lisboa.

RESOLUÇÃO DO CONSELHO DE MINISTROS, 2007. Programa de Modernização das Escolas de Ensino Secundário. *Resolução do Conselho de Ministros nº 1/2007*.

RODE, C. & GRAU, K., 2003. Whole building hygrothermal simulation model. *ASHRAE Transactions 109 (1)*, pp. 572-582.

RODRIGUES, A.M., PIEDADE, A.C. & BRAGA, A.M., 2009. *Térmica de Edifícios*. 1ª ed. Alfragide: Edições Orion.

ROSENBLATT, F., 1958. The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain. *Psychological Review,* 65, pp. 386-408.

ROULET, C., 2001. Indoor environment quality in buildings and its impact on outdoor environment. *Energy and Buildings,* 33 (3), pp. 183-191.

RSECE, 2006. Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização nos Edifícios. *Diário da República*, I Série - A, Decreto-lei nº 79/2006, Abril, Lisboa, 2006.

RUANO, A., CRISPIM, E., CONCEIÇÃO, E. & LÚCIO, M., 2006. Prediction of buildings temperature using neural networks models. *Energy and Buildings*, 38 (6), pp. 682-694.

RUDD, P., REED, F. & SMITH, P., 2008. The effects of the school environment on young people's attitudes towards education and learning. *Summary Report - National Foundation for Educational Research*, Berkshire, Reino Unido.

SANTAMOURIS, M., SYNNEFA, A., ASSIMAKOPOULOS, M., LIVADA, I., PAVLOU, K., PAPAGLASTRA, M., GAITANI, N., KOLOKOTSA, D. & ASSIMAKOPOULOS, V., (2008). Experimental investigation of the air flow and indoor carbon dioxide concentration in classrooms with intermittent natural ventilation. *Energy and Buildings*, 40 (10), pp. 1833-1843.

SCE, 2006. Sistema de Certificação Energética. *Diário da República*, I Série - A, Decreto-lei nº 78/2006, Abril, Lisboa, 2006.

SCHAFFER, J.D., 1985. Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms. In: *Proceedings of the First International Conference on Genetic Algorithms*. Pittsburgh, USA 24-26 de Julho de 1985.

SCHMIDT, F., WOSSNER, S., PIETILAINEN, J., CANTIN, R., GUARRACINO, G. & MROZ, T., (2004). Calculation Tools for the Energy Concept Adviser. *IEA Annex 36: Retrofitting of Educational Buildings, Subtask C Report*.

SHAUGHNESSY, R.J., HAVERINEN-SHAUGHNESSY. U., NEVALAINEN, A & MOSCHANDREAS, D., 2006. A preliminary study on the association between ventilation rates in classrooms and student performance. *Indoor Air*, 16 (6), pp. 465-468.

SHENDELL, D.G., PRILL, R., FISK, W.J., APTE, M.G., BLAKE, D. & FAULKNER, D., 2004. Associations between classroom CO_2 concentrations and student attendance in Washington and Idaho. *Indoor Air*, 14 (5), pp. 333-341.

SILVA, A.L.M., 1884. Relatório sobre as Condições Hygienicas da Escola. In: Raposo, J.A.S., 1884, *Conferencias Pedagógicas*. *Relatório das Conferencias de Lisboa em 1883*. A. Ferreira Machado & C.ª Editores, Lisboa, pp. 73-88.

SILVA, J.C., 1971. As construções escolares do ensino técnico profissional. In: *Escolas Técnicas – Boletim de Pedagogia e Didáctica, nº 43*. Direcção Geral do Ensino Técnico Profissional, Ministério da Educação Nacional, Lisboa, pp. 291-301.

SILVA, C.M., 2005. A ideia de "casa da escola" no século XIX português. *Revista da Faculdade de Letras – HISTÓRIA*, III Série, vol. 6, pp. 291-312.

SILVA, M.G., 2006. Folhas de Cálculo para Determinação dos Índices de Conforto Térmico PMV e PPD. In: *Proceedings of Climamed Congress*. Lyon, France 20-21 de Novembro de 2006.

SILVA, S.M., 2009. A Sustentabilidade e o Conforto das Construções. Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil / Processos de Construção, U.M. – Universidade do Minho.

SMEDJE, G., NORBÄCK, D. & EDLING, C., 1997. Asthma among secondary schoolchildren in relation to the school environment. *Clinical & Experimental Allergy*, 27 (11), pp. 1270-1278.

SRINIVAS, N. & DEB, K., 1994. Multi-objective function optimization using non-dominated sorting genetic algorithms. *Evolutionary Computational Journal*, 2 (3), pp. 221-248.

STRAND, R.K., PEDERSEN, C.O. & CRAWLEY, D.B., 2001.Modularization and simulation techniques for heat balance based energy and load calculation programs: the experience of the ASHRAE loads toolkit and EnergyPlus. In: *Proceedings of the 7th International Conference Building Performance Simulation*. Rio de Janeiro, Brasil 13-15 de Agosto de 2001.

UNIÃO EUROPEIA, 2002. 2002/91/CE - Directive on the Energy Performance of Buildings. *E.U. Official Journal*, Janeiro de 2003.

VAZ, D.O., 2008. *Avaliação de desempenho de edifícios complexos: o edifício escolar dos anos 40 e 50 do século XX em Portugal*. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Construção, Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa.

VIEGAS, J., 2000. Contribuição da Ventilação para a Qualidade do Ar Interior em Edifícios. In: *Seminário Ambiente em Edifícios Urbanos*, Lisboa, Portugal.

WARGOCKI, P., 2009. Ventilation, thermal comfort, health and productivity. In: Mumovic, D. & Santamouris, M., ed. 2009. A Handbook of Sustainable Building Design & Engineering – an integrated approach to energy, health and operational performance. London: Earthscan. Ch. 14.

WARGOCKI, P., WYON, D., MATYSIAK, B. & IRGENS, S., 2005. The effects of classroom air temperature and outdoor air supply rate on performance of school work by children. In: *Proceedings of Indoor Air 2005, the 10th International Conference on Indoor Air Quality and Climate*. Beijing, China 4-9 de Setembro de 2005.

WHITE, J., CASE, K. & PRATT, D., 2010. *Principles of Engineering Economic Analysis*. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Ltd (5th ed).

WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION, 1984. Indoor Air. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Indoor Air Quality and Climate*, Stockholm, Sweden 20-24 de Agosto de 1984.

YANG, J., RIVARD, H. & ZMEUREANU, R., 2005. Building energy prediction with adaptive artificial neural networks. In: *Proccedings of the Building Simulation 2005*, Montréal, Canada, 15-18 de Agosto de 2005.

ZITZLER, E., DEB, K. & THIELER, L., 2000. Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: empirical results. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 8, pp. 173-195.

ZITZLER, E., LAUMANNS, M. & THIELE, L., 2001. SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm. Technical Report 103, Computer Engineering and Networks Laboratory (TIK), Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich, Switzerland.

ANEXO I RESULTADOS DO ESTUDO EXPERIMENTAL PRELIMINAR

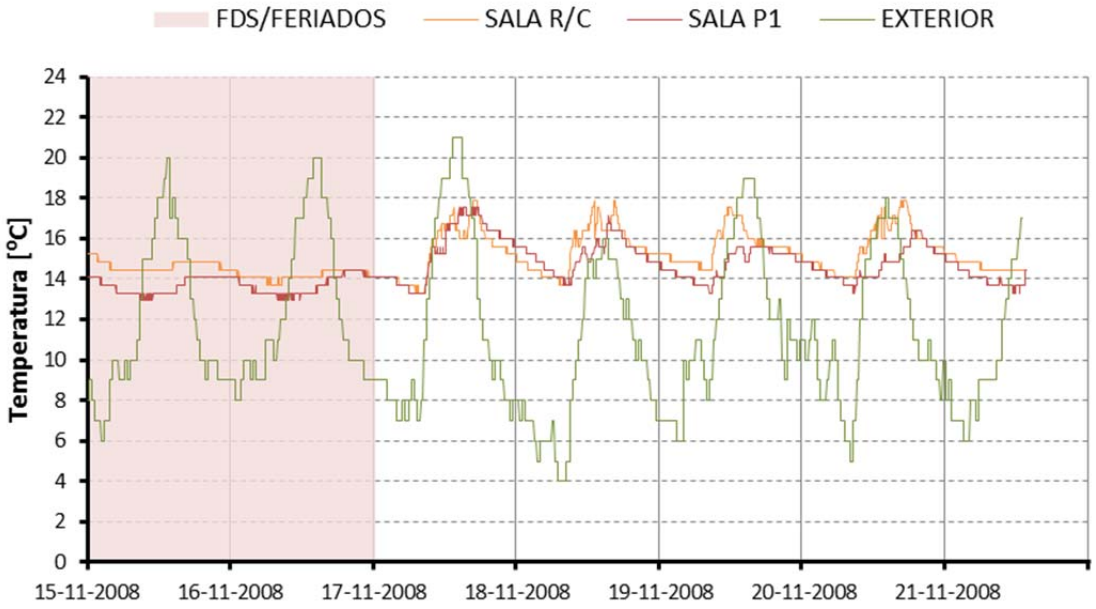
AI.1 TEMPERATURA

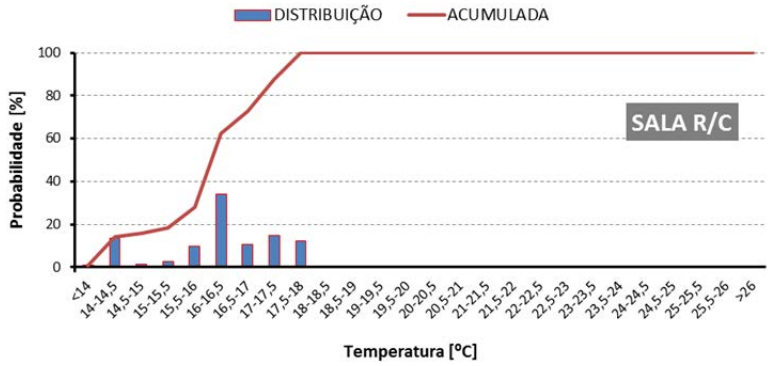
AI.2 HUMIDADE RELATIVA

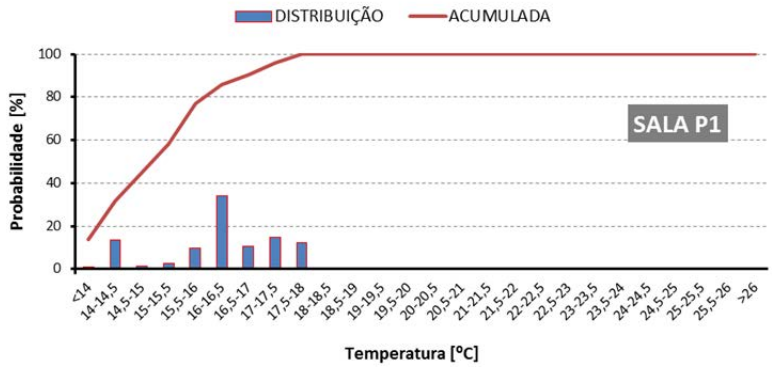
AI.3 CONCENTRAÇÃO DE CO_2

AI.1 TEMPERATURA

- Escola NR1

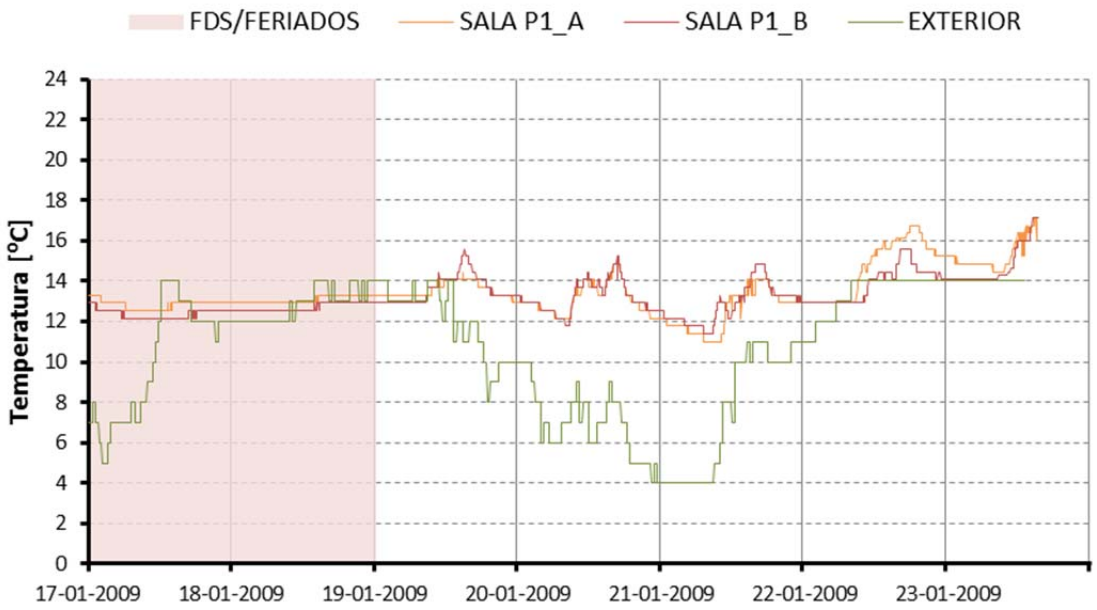


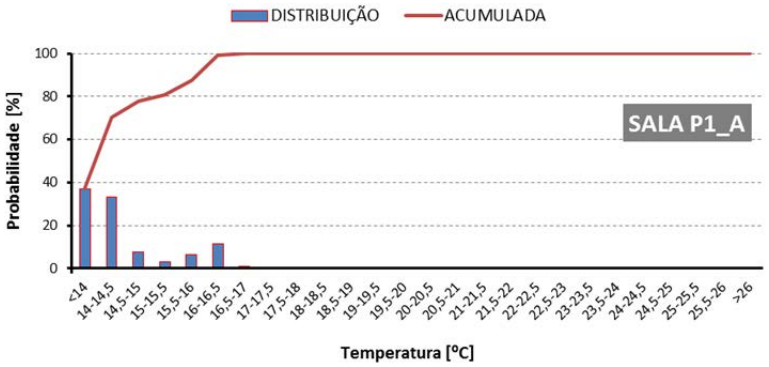


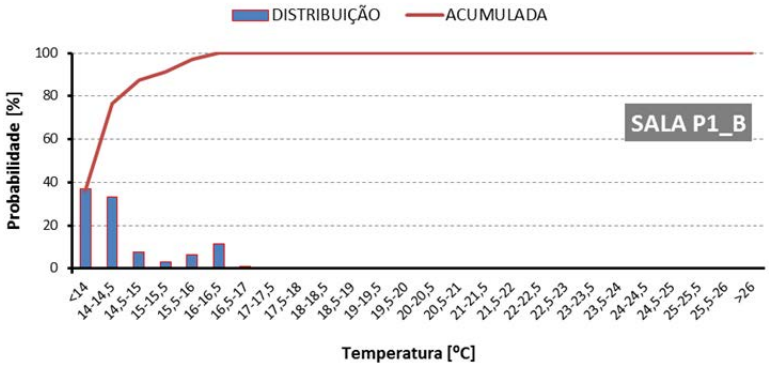


	SALA R/C	SALA P1	ESCOLA - TOTAIS
média	16,22	15,20	15,71
máximo	17,90	17,52	17,90
mínimo	13,32	13,32	13,32
desvio padrão	1,00	1,11	1,17

- Escola NR2

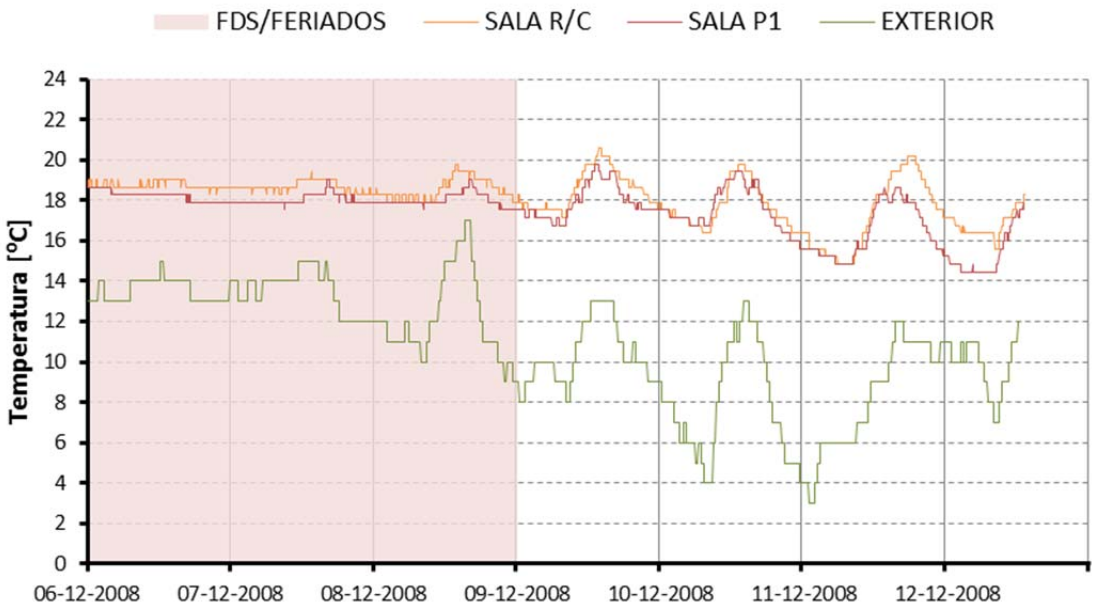


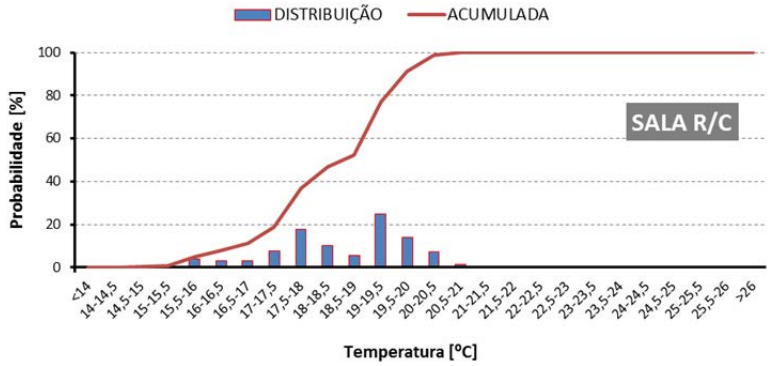


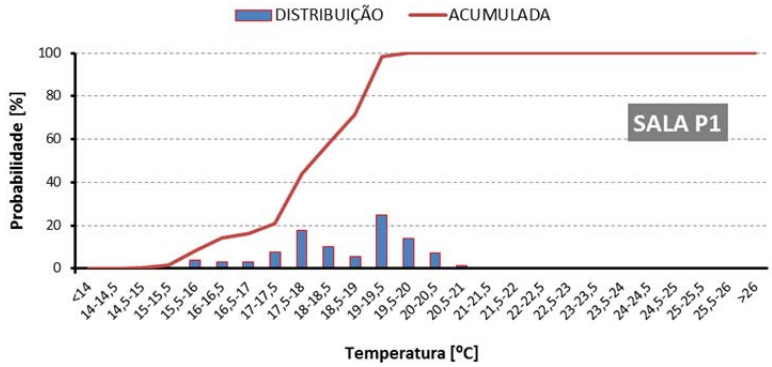


	SALA P1_A	SALA P1_B	ESCOLA - TOTAIS
média	14,18	14,08	14,13
máximo	16,76	16,01	16,76
mínimo	10,99	11,38	10,99
desvio padrão	1,21	0,90	1,07

- Escola R1

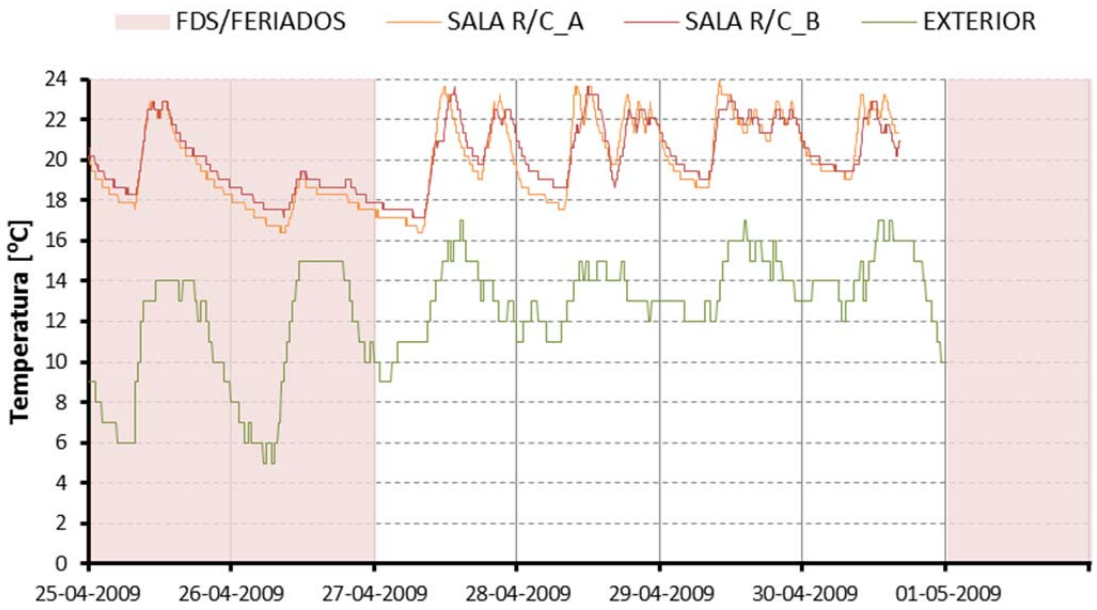


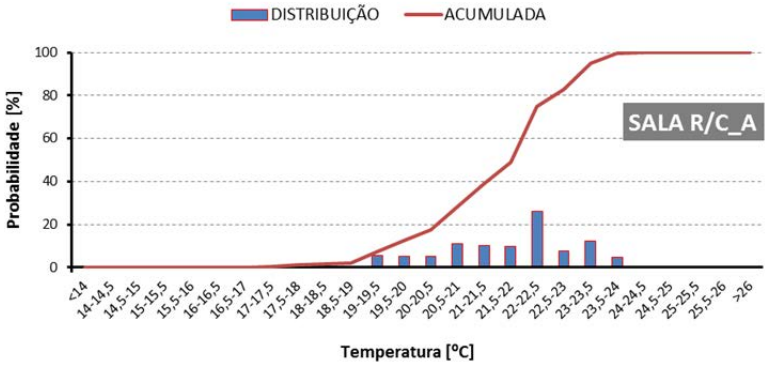


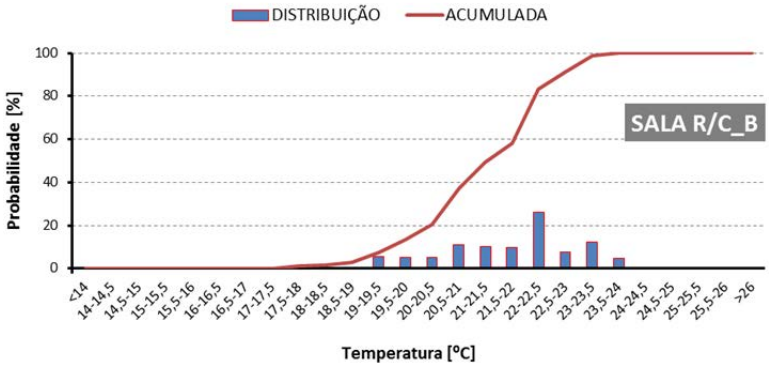


	SALA R/C	SALA P1	ESCOLA - TOTAIS
média	18,53	18,04	18,29
máximo	20,57	19,81	20,57
mínimo	14,85	14,85	14,85
desvio padrão	1,26	1,14	1,22

- Escola R2



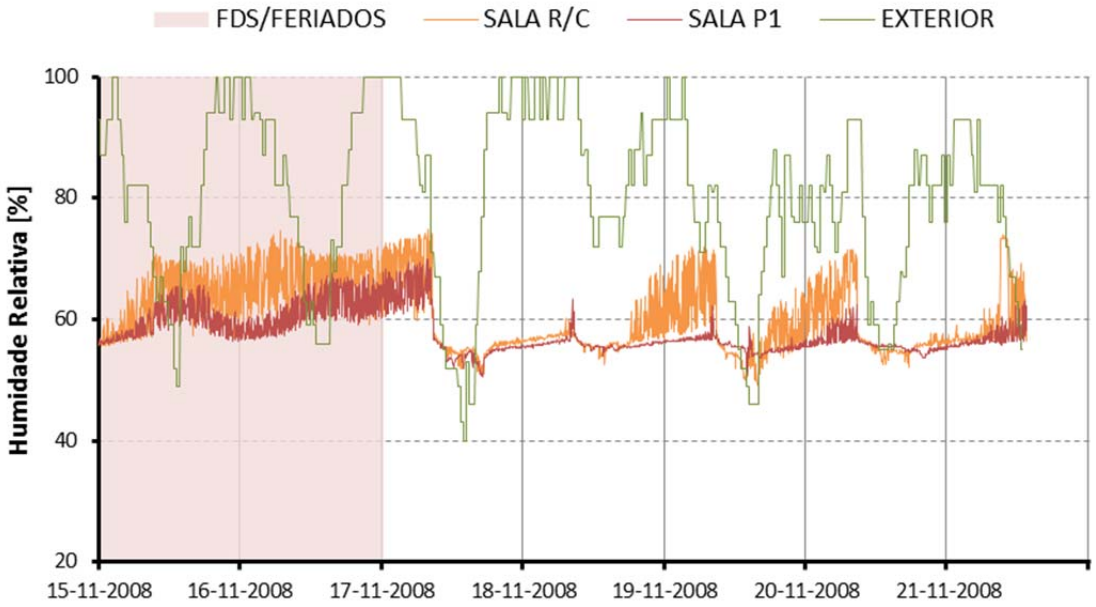




	SALA R/C_A	SALA R/C_B	ESCOLA - TOTAIS
média	21,71	21,47	21,59
máximo	24,01	23,63	24,01
mínimo	17,14	17,52	17,14
desvio padrão	1,31	1,24	1,28

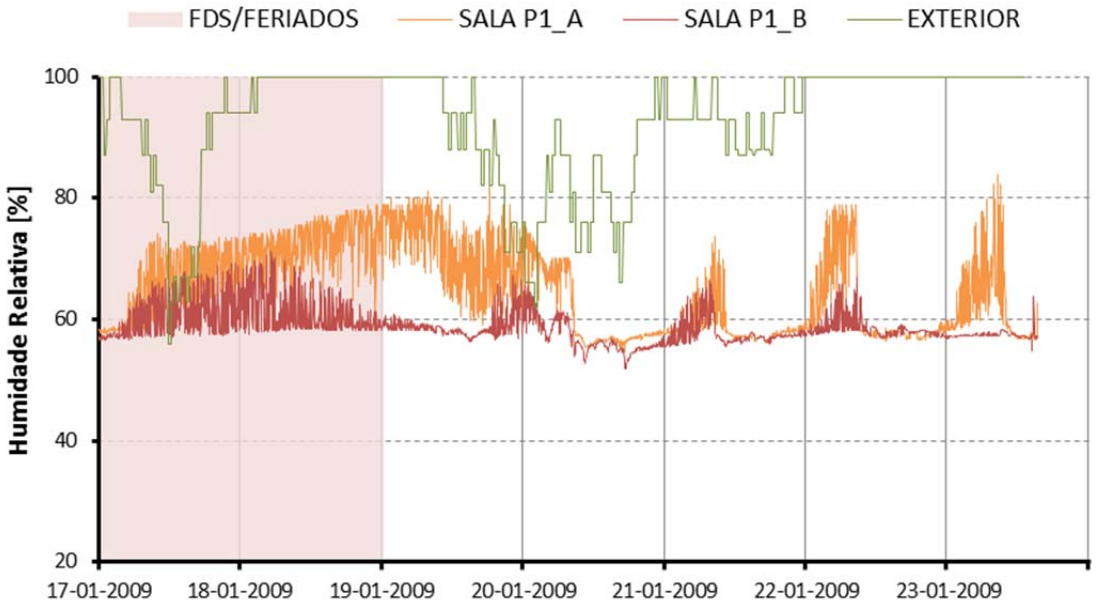
AI.2 HUMIDADE RELATIVA

- Escola NR1



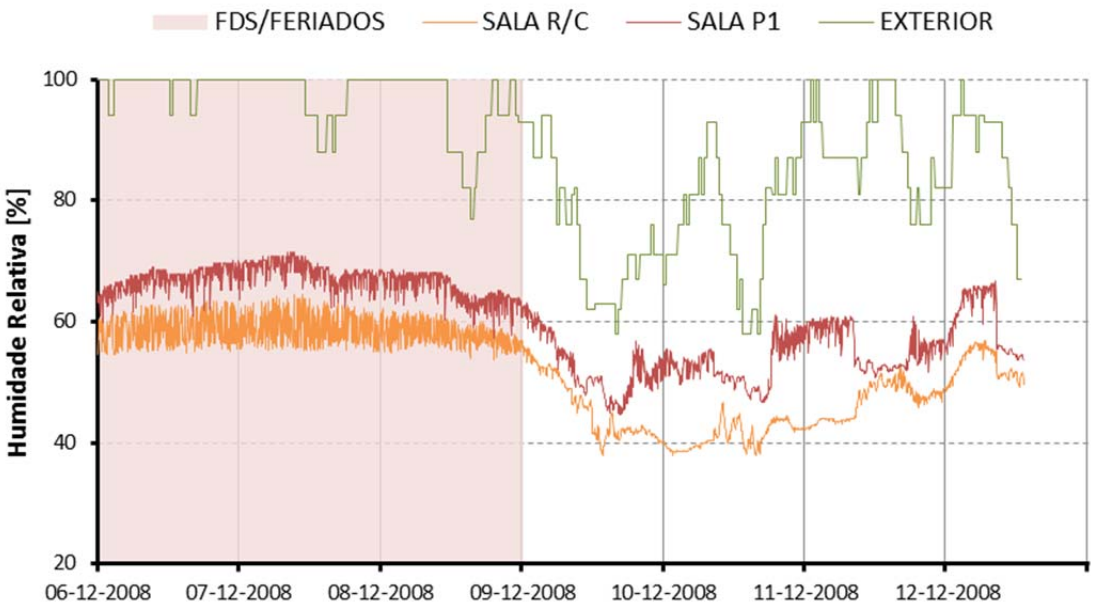
	SALA R/C	SALA P1	ESCOLA - TOTAIS
média	56,18	55,47	55,82
máximo	74,10	63,10	74,10
mínimo	49,10	50,40	49,10
desvio padrão	4,32	1,63	3,28

- Escola NR2



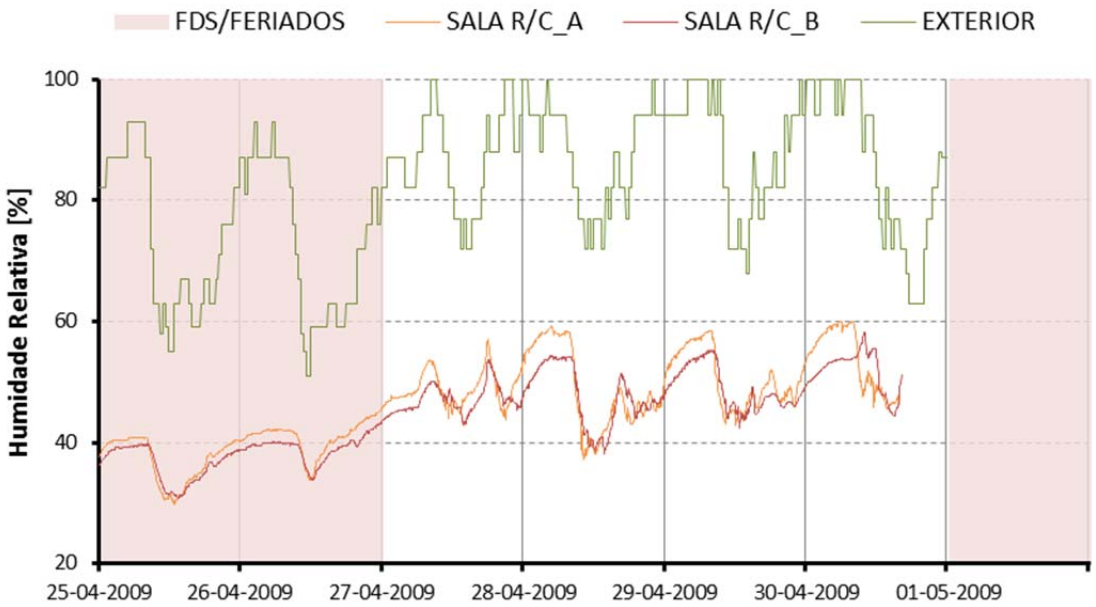
	SALA P1_A	SALA P1_B	ESCOLA - TOTAIS
média	60,50	57,07	58,78
máximo	82,40	63,90	82,40
mínimo	54,60	52,00	52,00
desvio padrão	6,08	1,36	4,73

- Escola R1



	SALA R/C	SALA P1	ESCOLA - TOTAIS
média	45,60	50,90	48,25
máximo	52,60	57,80	57,80
mínimo	37,90	44,60	37,90
desvio padrão	4,27	2,77	4,47

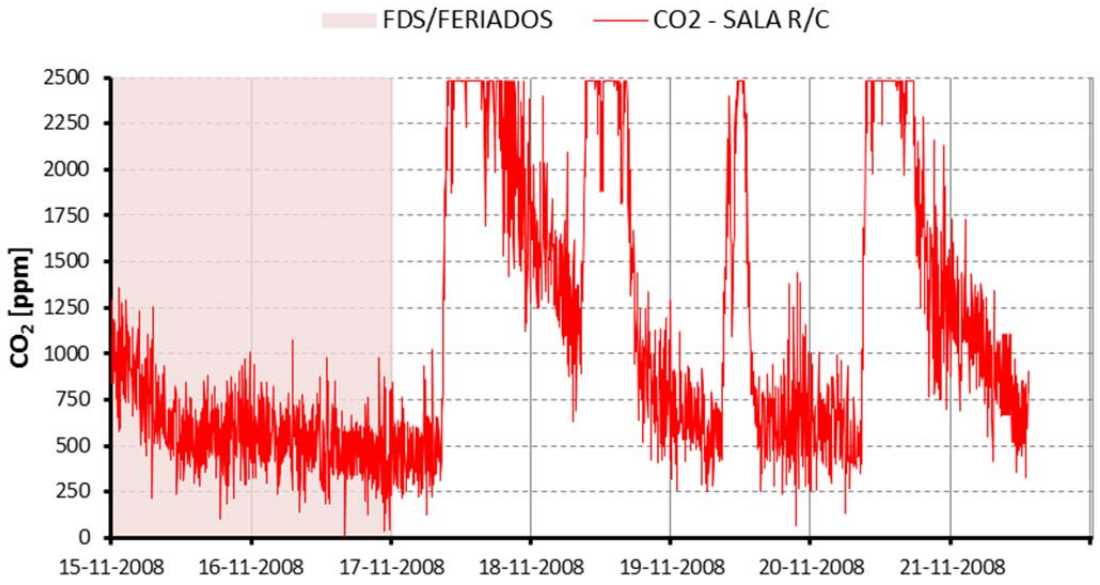
- Escola R2

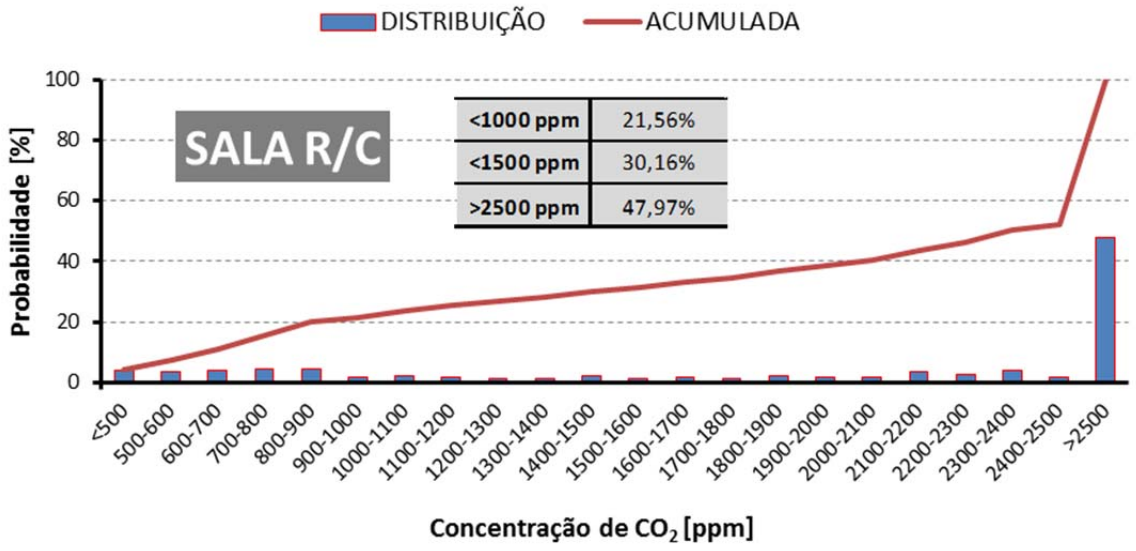


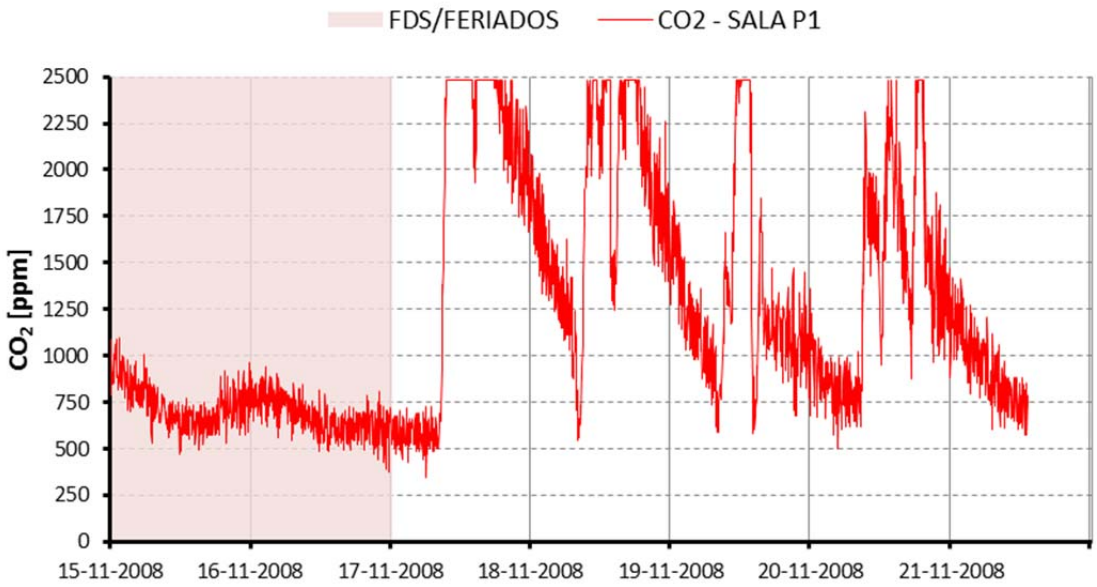
	SALA R/C_A	SALA R/C_B	ESCOLA - TOTAIS
média	46,68	47,02	46,85
máximo	57,00	58,30	58,30
mínimo	37,30	38,10	37,30
desvio padrão	3,61	4,25	3,95

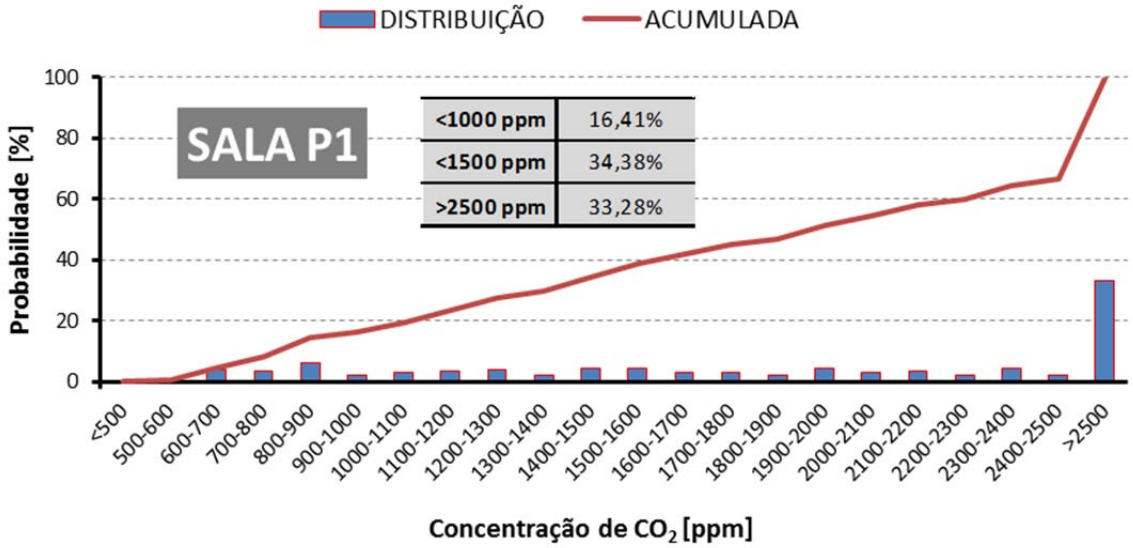
AI.3 CONCENTRAÇÃO DE CO_2

- Escola NR1

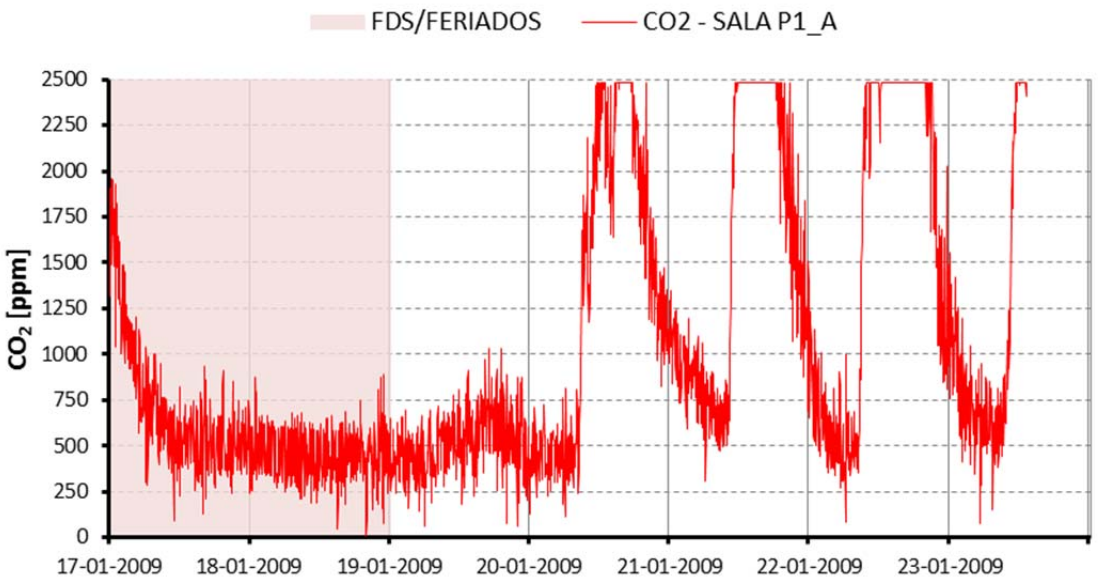


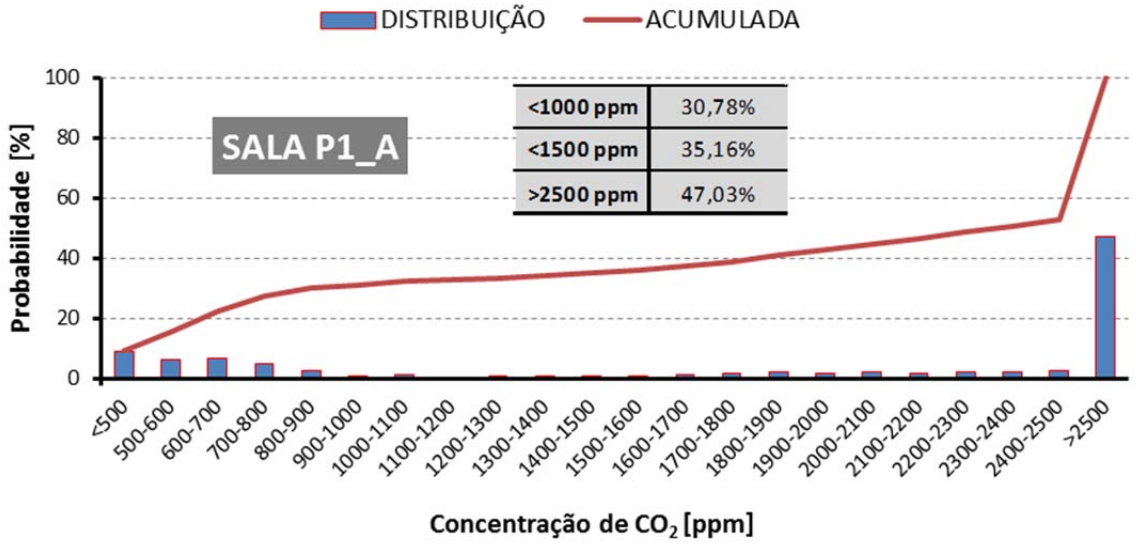


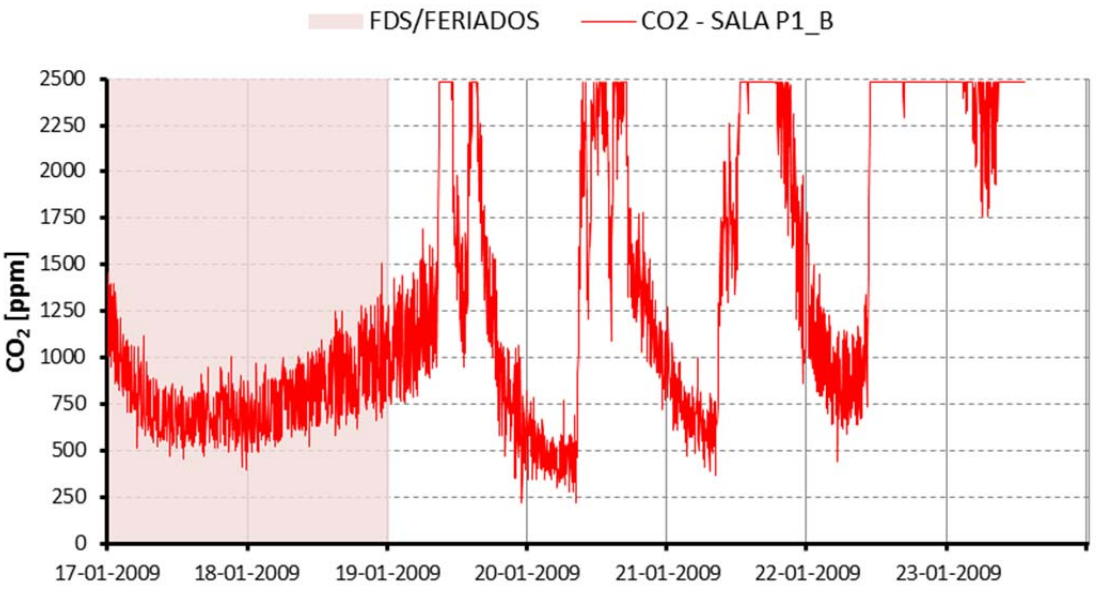

FDS/FERIADOS
CO2 - SALA P1
2500
2250
2000
1750
1500
1250
1000
750
500
250
0
CO2 [ppm]
15-11-2008
16-11-2008
17-11-2008
18-11-2008
19-11-2008
20-11-2008
21-11-2008

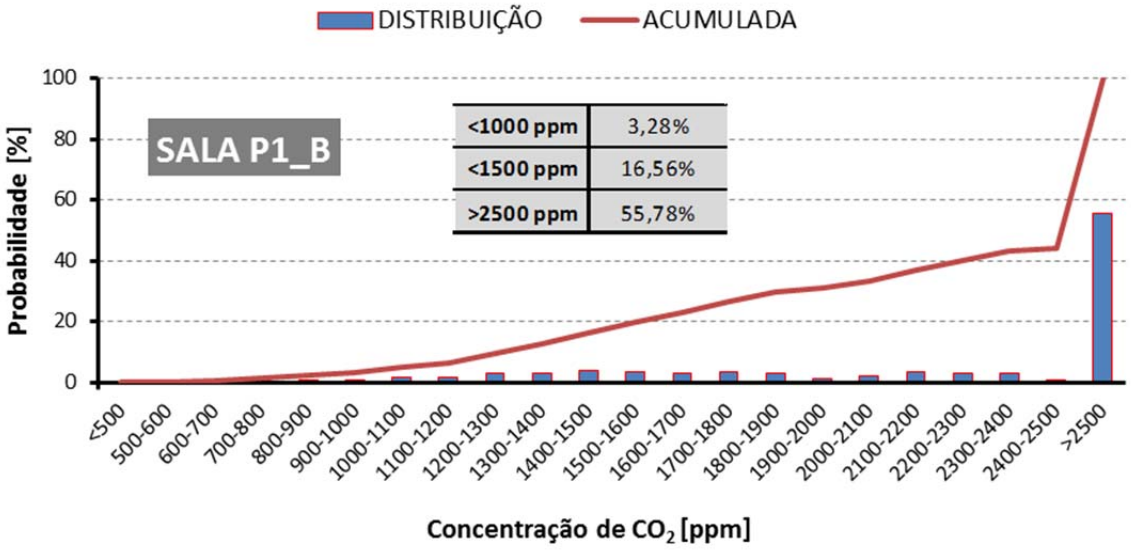

DISTRIBUIÇÃO
ACUMULADA
SALA P1
<1000 ppm 16,41%
<1500 ppm 34,38%
>2500 ppm 33,28%
100
80
60
40
20
0
Probabilidade [%]
<500
500-600
600-700
700-800
800-900
900-1000
1000-1100
1100-1200
1200-1300
1300-1400
1400-1500
1500-1600
1600-1700
1700-1800
1800-1900
1900-2000
2000-2100
2100-2200
2200-2300
2300-2400
2400-2500
>2500
Concentração de CO2 [ppm]

- Escola NR2

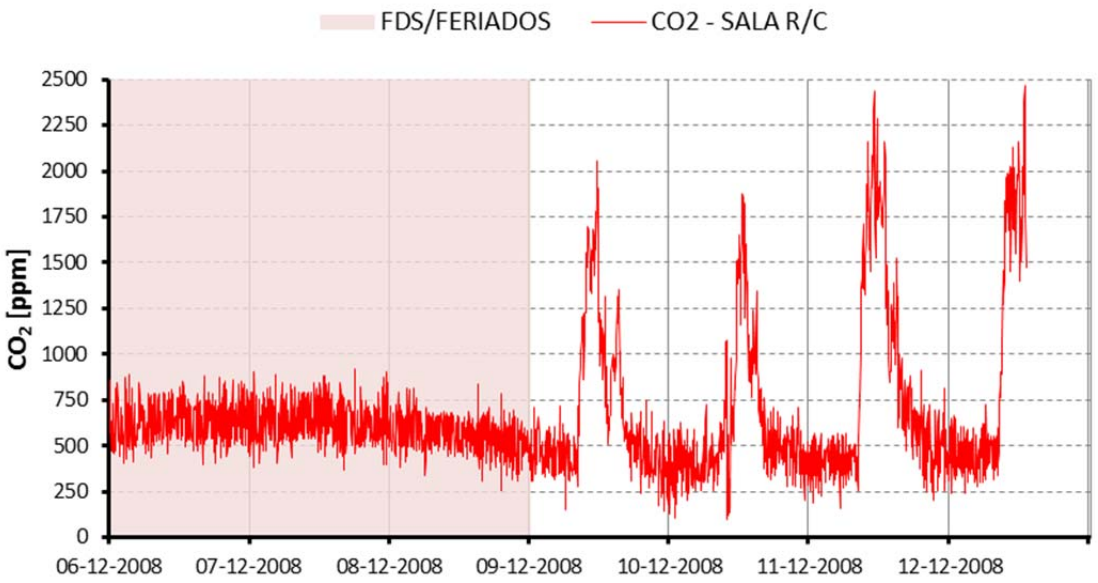

FDS/FERIADOS
CO2 - SALA P1_A
2500
2250
2000
1750
1500
1250
1000
750
500
250
0
CO2 [ppm]
17-01-2009
18-01-2009
19-01-2009
20-01-2009
21-01-2009
22-01-2009
23-01-2009

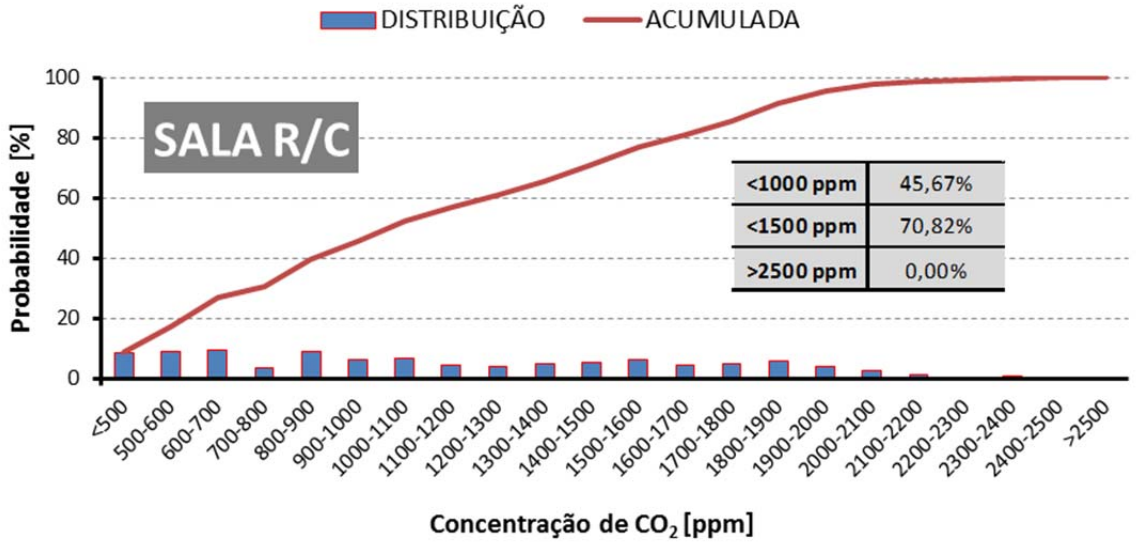

DISTRIBUIÇÃO
ACUMULADA
SALA P1_A
<1000 ppm 30,78%
<1500 ppm 35,16%
>2500 ppm 47,03%
Probabilidade [%]
100
80
60
40
20
0
<500
500-600
600-700
700-800
800-900
900-1000
1000-1100
1100-1200
1200-1300
1300-1400
1400-1500
1500-1600
1600-1700
1700-1800
1800-1900
1900-2000
2000-2100
2100-2200
2200-2300
2300-2400
2400-2500
>2500
Concentração de CO2 [ppm]

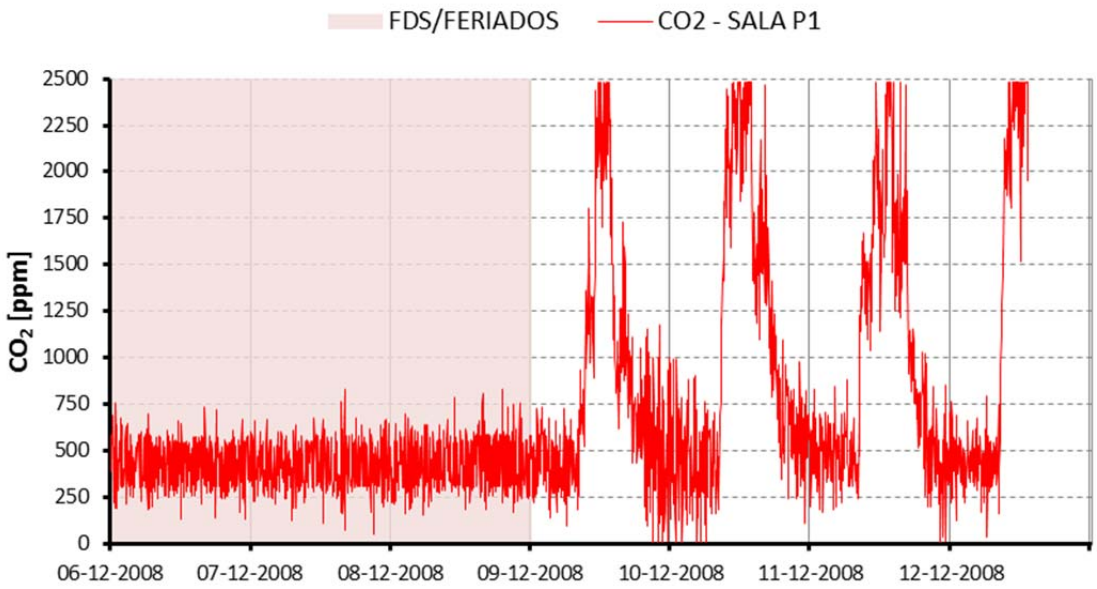

FDS/FERIADOS
CO2 - SALA P1_B
2500
2250
2000
1750
1500
1250
1000
750
500
250
0
CO2 [ppm]
17-01-2009
18-01-2009
19-01-2009
20-01-2009
21-01-2009
22-01-2009
23-01-2009

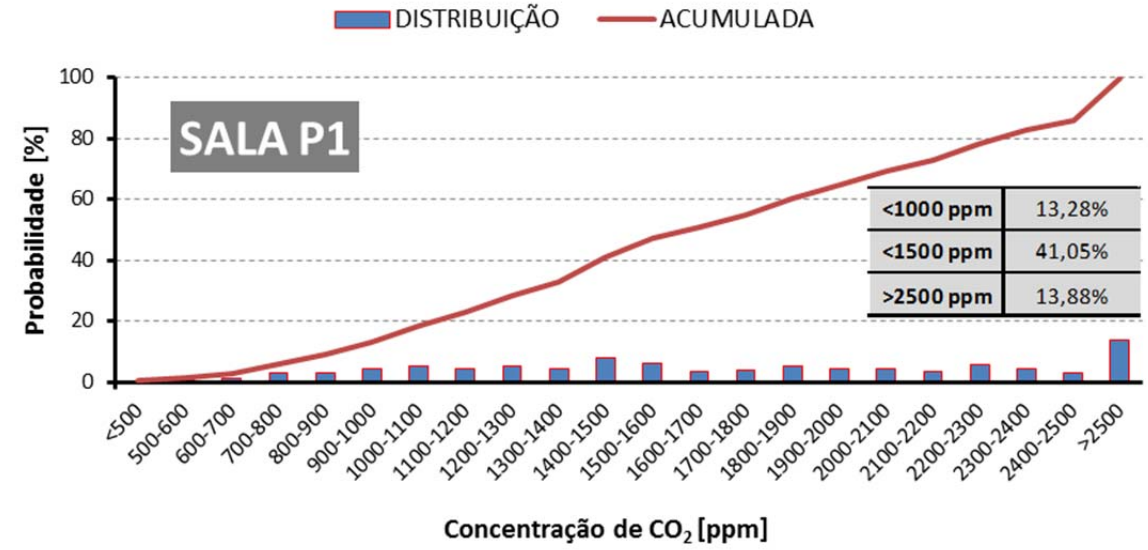

DISTRIBUIÇÃO
ACUMULADA
SALA P1_B
<1000 ppm 3,28%
<1500 ppm 16,56%
>2500 ppm 55,78%
Probabilidade [%]
100
80
60
40
20
0
<500
500-600
600-700
700-800
800-900
900-1000
1000-1100
1100-1200
1200-1300
1300-1400
1400-1500
1500-1600
1600-1700
1700-1800
1800-1900
1900-2000
2000-2100
2100-2200
2200-2300
2300-2400
2400-2500
>2500
Concentração de CO2 [ppm]

- Escola R1

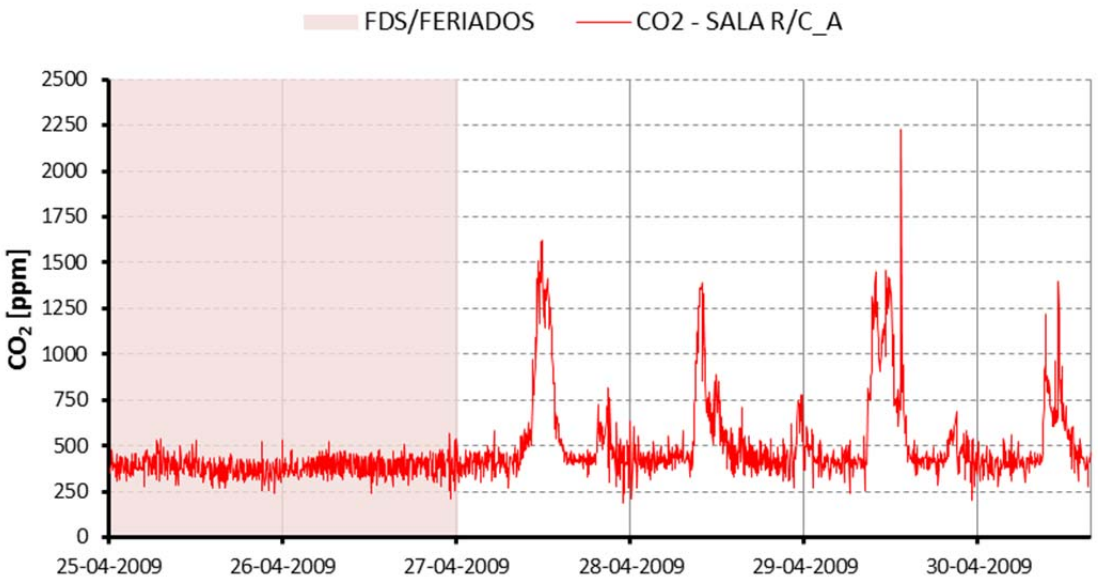

FDS/FERIADOS
CO2 - SALA R/C
CO2 [ppm]
2500
2250
2000
1750
1500
1250
1000
750
500
250
0
06-12-2008
07-12-2008
08-12-2008
09-12-2008
10-12-2008
11-12-2008
12-12-2008

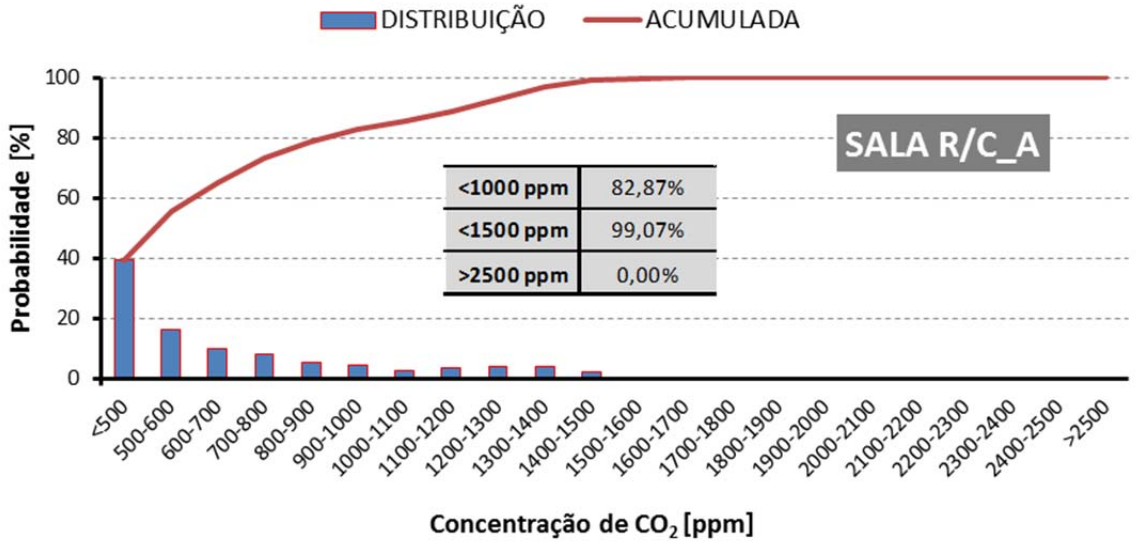

DISTRIBUIÇÃO
ACUMULADA
SALA R/C
Probabilidade [%]
100
80
60
40
20
0
<1000 ppm
45,67%
<1500 ppm
70,82%
>2500 ppm
0,00%
<500
500-600
600-700
700-800
800-900
900-1000
1000-1100
1100-1200
1200-1300
1300-1400
1400-1500
1500-1600
1600-1700
1700-1800
1800-1900
1900-2000
2000-2100
2100-2200
2200-2300
2300-2400
2400-2500
>2500
Concentração de CO2 [ppm]

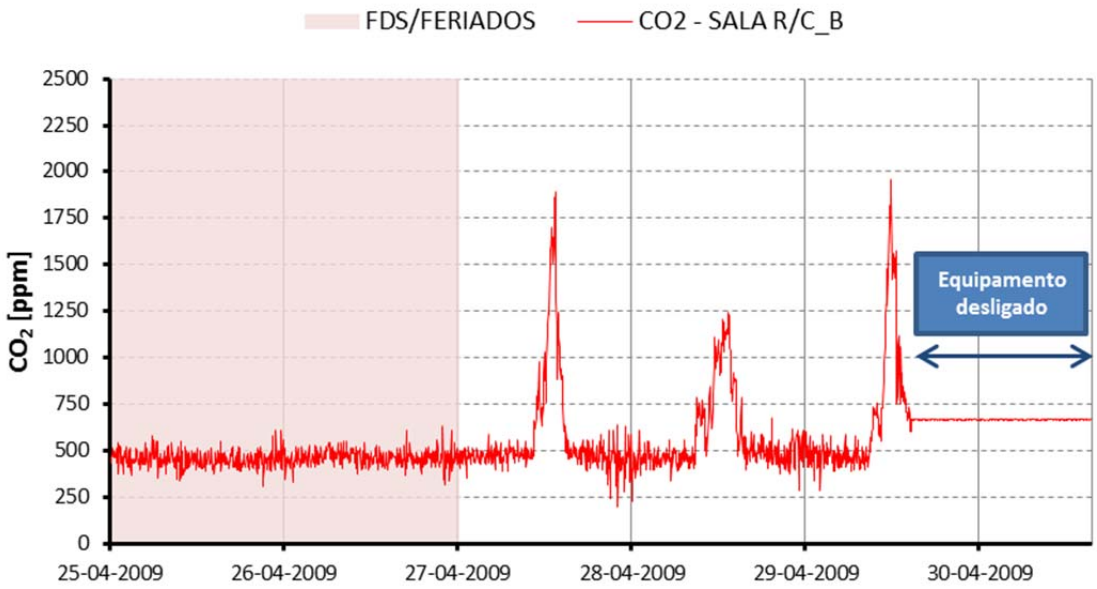

FDS/FERIADOS
CO2 - SALA P1
2500
2250
2000
1750
1500
1250
1000
750
500
250
0
CO2 [ppm]
06-12-2008
07-12-2008
08-12-2008
09-12-2008
10-12-2008
11-12-2008
12-12-2008

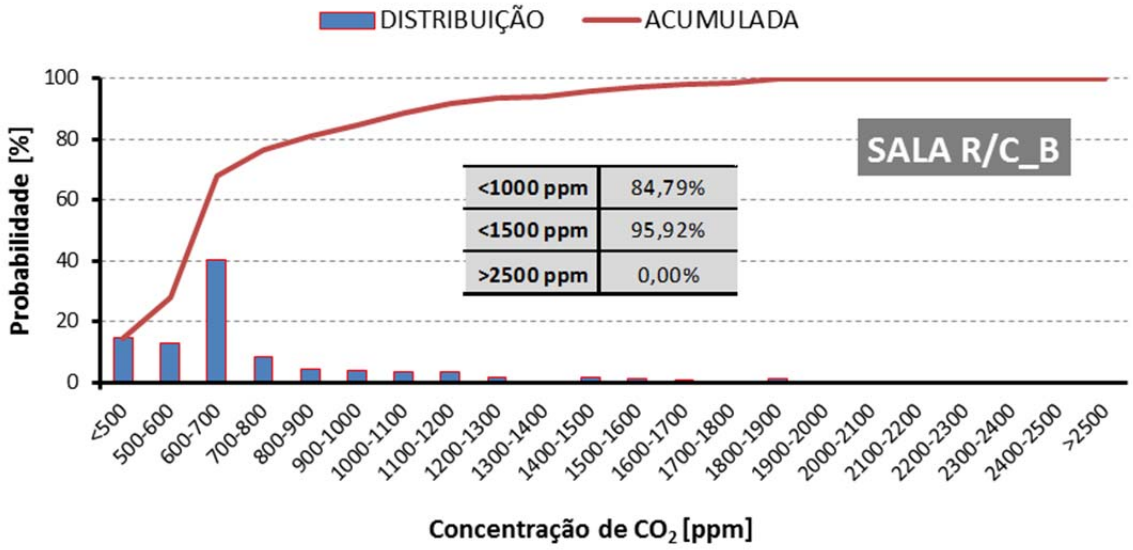

DISTRIBUIÇÃO
ACUMULADA
SALA P1
<1000 ppm
13,28%
<1500 ppm
41,05%
>2500 ppm
13,88%
100
80
60
40
20
0
Probabilidade [%]
<500
500-600
600-700
700-800
800-900
900-1000
1000-1100
1100-1200
1200-1300
1300-1400
1400-1500
1500-1600
1600-1700
1700-1800
1800-1900
1900-2000
2000-2100
2100-2200
2200-2300
2300-2400
2400-2500
>2500
Concentração de CO2 [ppm]

- Escola R2


FDS/FERIADOS
CO2 - SALA R/C_A
2500
2250
2000
1750
1500
1250
1000
750
500
250
0
CO2 [ppm]
25-04-2009
26-04-2009
27-04-2009
28-04-2009
29-04-2009
30-04-2009


DISTRIBUIÇÃO
ACUMULADA
100
80
60
40
20
0
Probabilidade [%]
SALA R/C_A
<1000 ppm
82,87%
<1500 ppm
99,07%
>2500 ppm
0,00%
<500
500-600
600-700
700-800
800-900
900-1000
1000-1100
1100-1200
1200-1300
1300-1400
1400-1500
1500-1600
1600-1700
1700-1800
1800-1900
1900-2000
2000-2100
2100-2200
2200-2300
2300-2400
2400-2500
>2500
Concentração de CO2 [ppm]


FDS/FERIADOS
CO2 - SALA R/C_B
2500
2250
2000
1750
1500
1250
1000
750
500
250
0
CO2 [ppm]
Equipamento desligado
25-04-2009
26-04-2009
27-04-2009
28-04-2009
29-04-2009
30-04-2009


DISTRIBUIÇÃO
ACUMULADA
100
80
60
40
20
0
Probabilidade [%]
SALA R/C_B
<1000 ppm 84,79%
<1500 ppm 95,92%
>2500 ppm 0,00%
<500
500-600
600-700
700-800
800-900
900-1000
1000-1100
1100-1200
1200-1300
1300-1400
1400-1500
1500-1600
1600-1700
1700-1800
1800-1900
1900-2000
2000-2100
2100-2200
2200-2300
2300-2400
2400-2500
>2500
Concentração de CO2 [ppm]

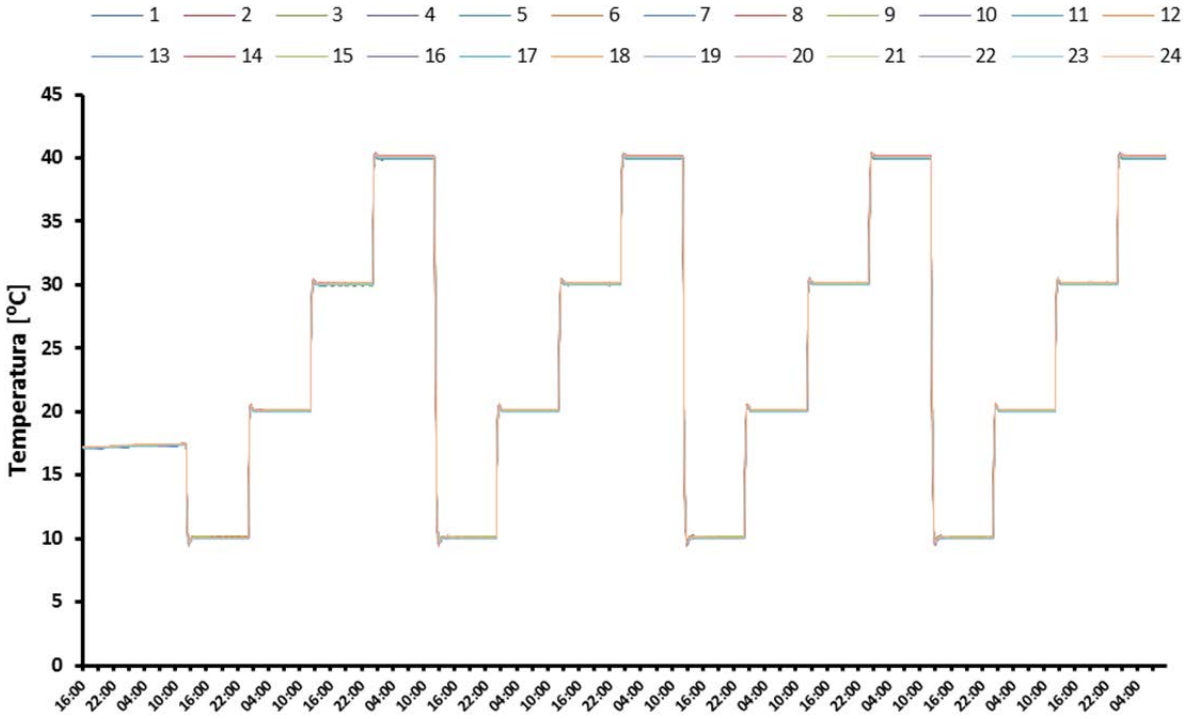
ANEXO II CALIBRAÇÃO DOS *DATA LOGGERS*

AII.1 TEMPERATURA

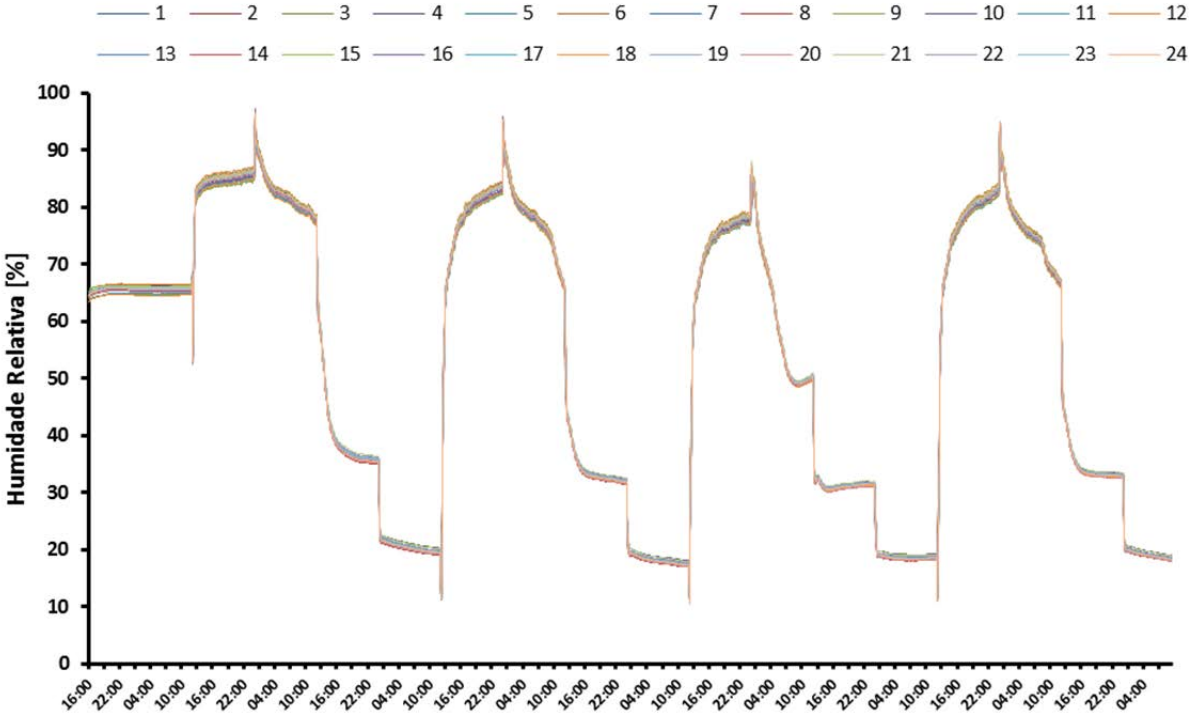
AII.2 HUMIDADE RELATIVA

A calibração dos *data loggers* foi realizada na câmara climática do Laboratório de Física das Construções – LFC – da FEUP.

AII.1 TEMPERATURA



AII.2 HUMIDADE RELATIVA



ANEXO III RESULTADOS DA AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO

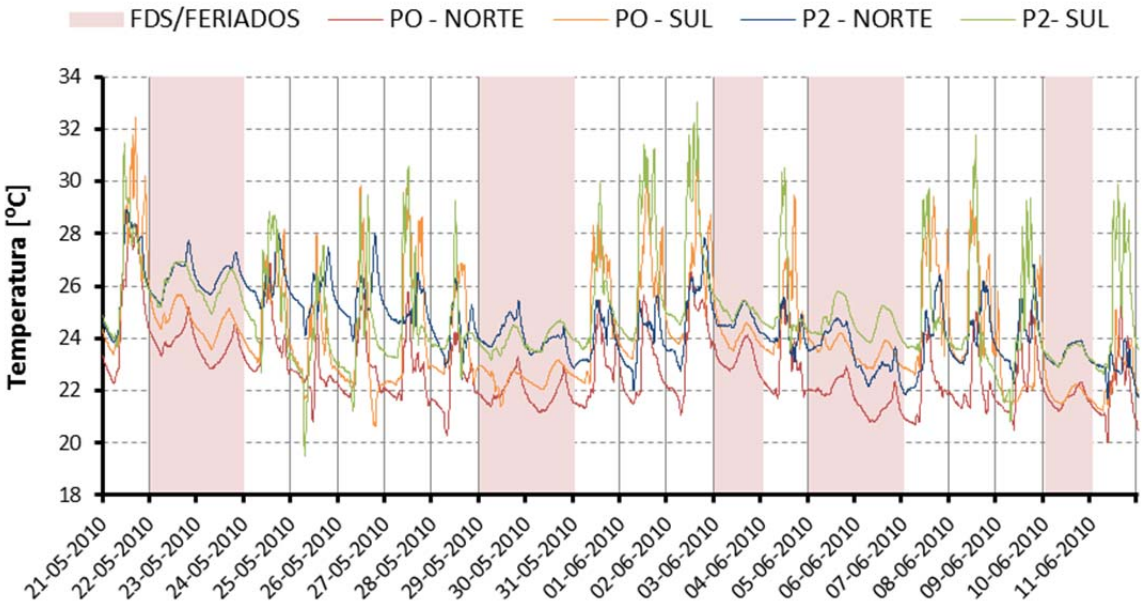
AIII.1 ESTAÇÃO DE ARREFECIMENTO (MAIO/JUNHO)

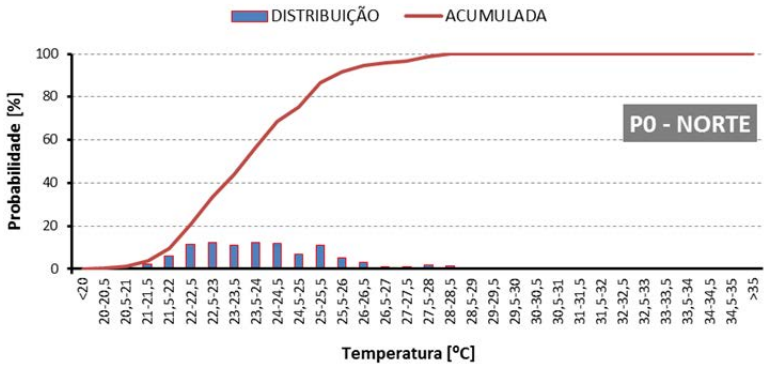
AIII.2 MEIA-ESTAÇÃO (OUTUBRO)

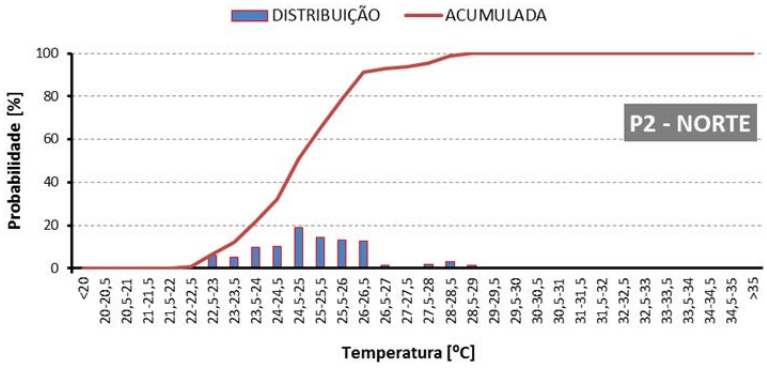
AIII.3 ESTAÇÃO DE AQUECIMENTO (JANEIRO/FEVEREIRO)

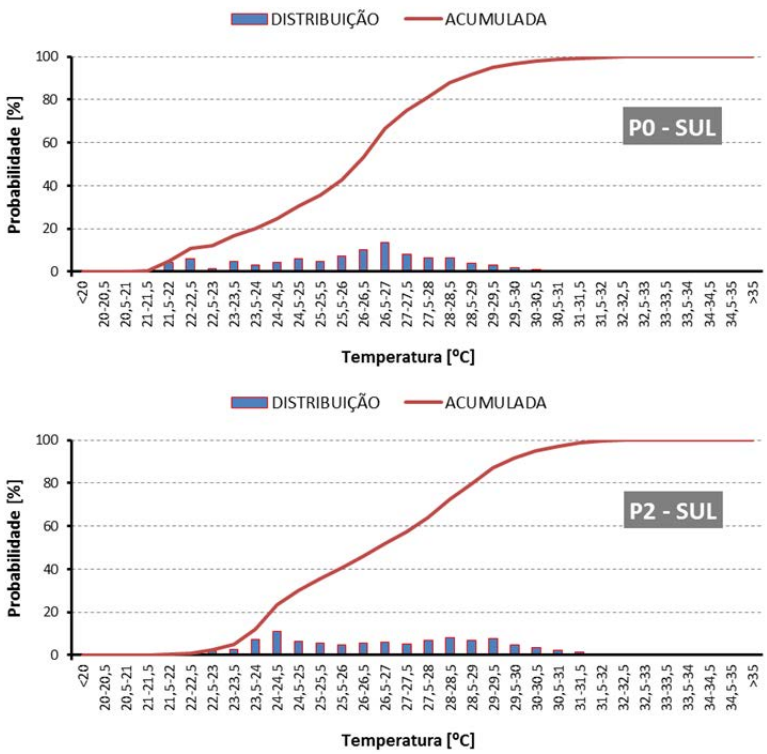
AIII.1 ESTAÇÃO DE ARREFECIMENTO (MAIO/JUNHO)

- Escola II-A

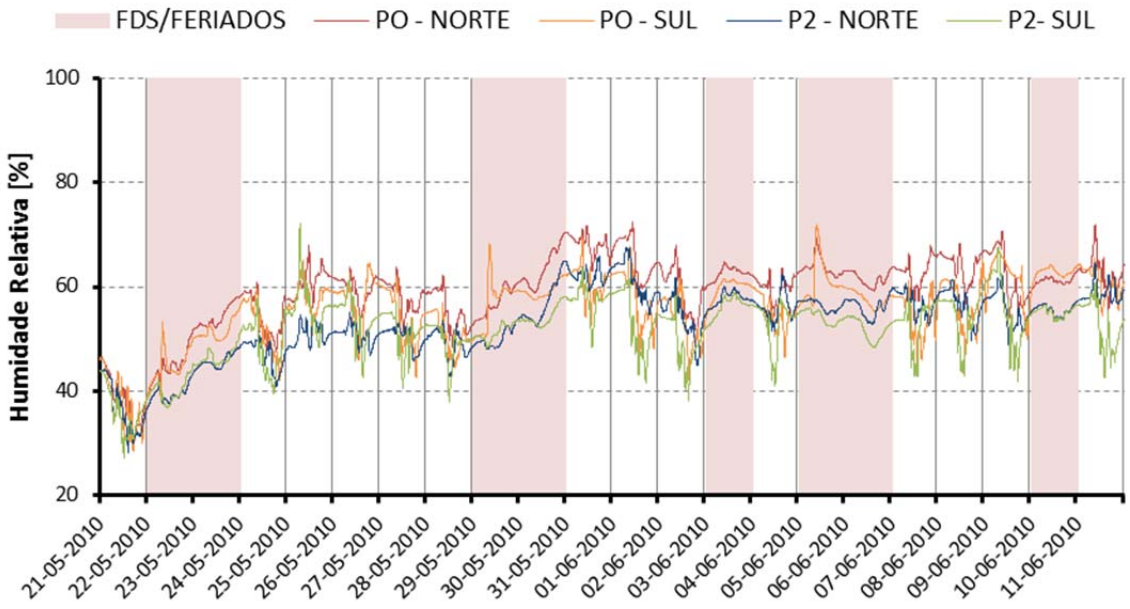




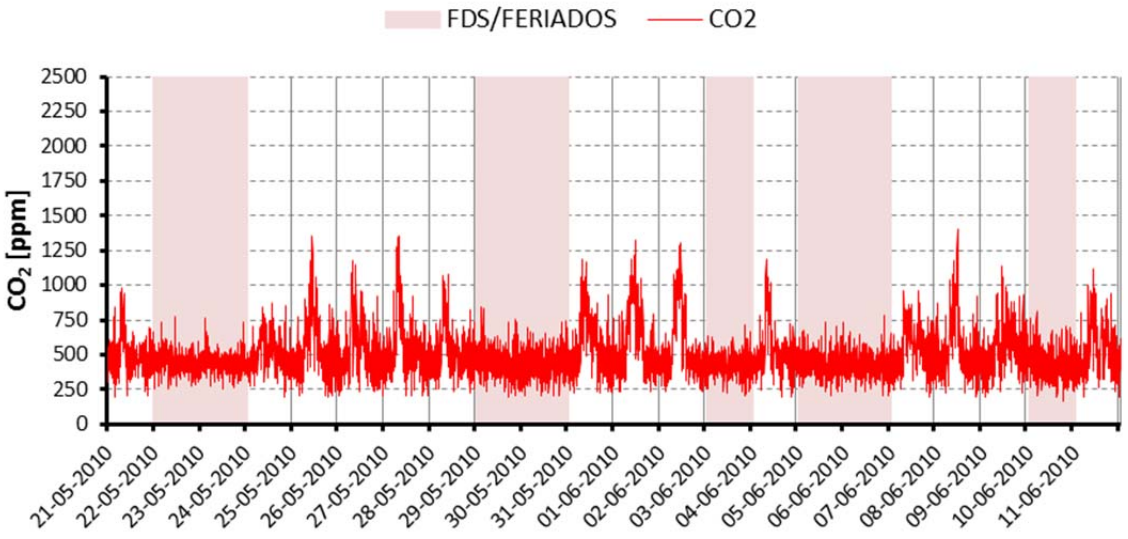


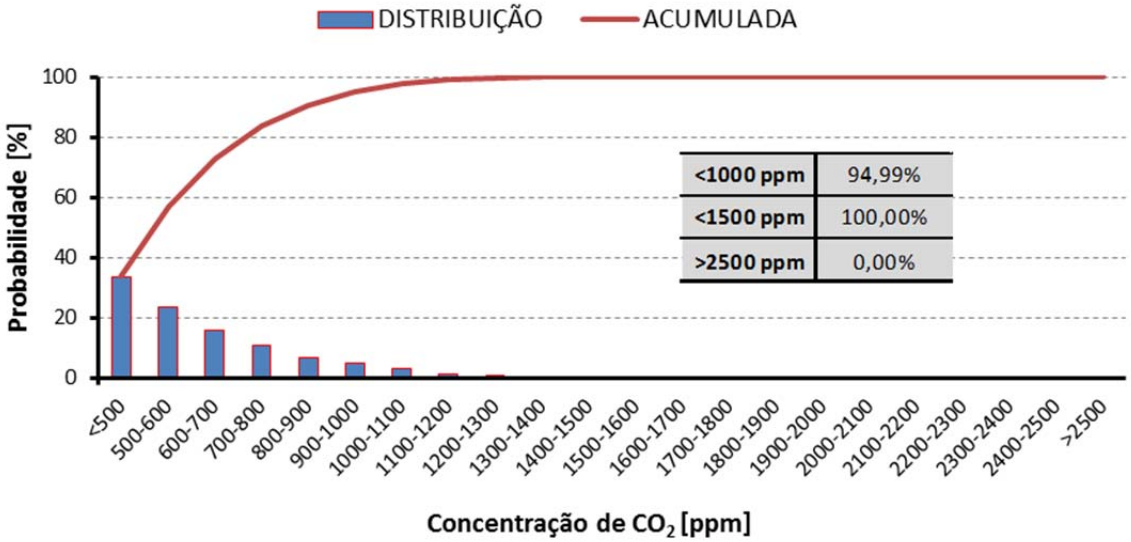


	P0-NORTE	P0-SUL	P0	P2-NORTE	P2-SUL	P2	ESCOLA TOTAIS
média	23,85	25,98	24,91	25,01	26,81	25,91	25,41
máximo	28,39	32,48	32,48	28,92	33,03	33,03	33,03
mínimo	20,15	21,01	20,15	21,84	21,70	21,70	20,15
desvio padrão	1,54	2,28	2,22	1,34	2,31	2,09	2,21

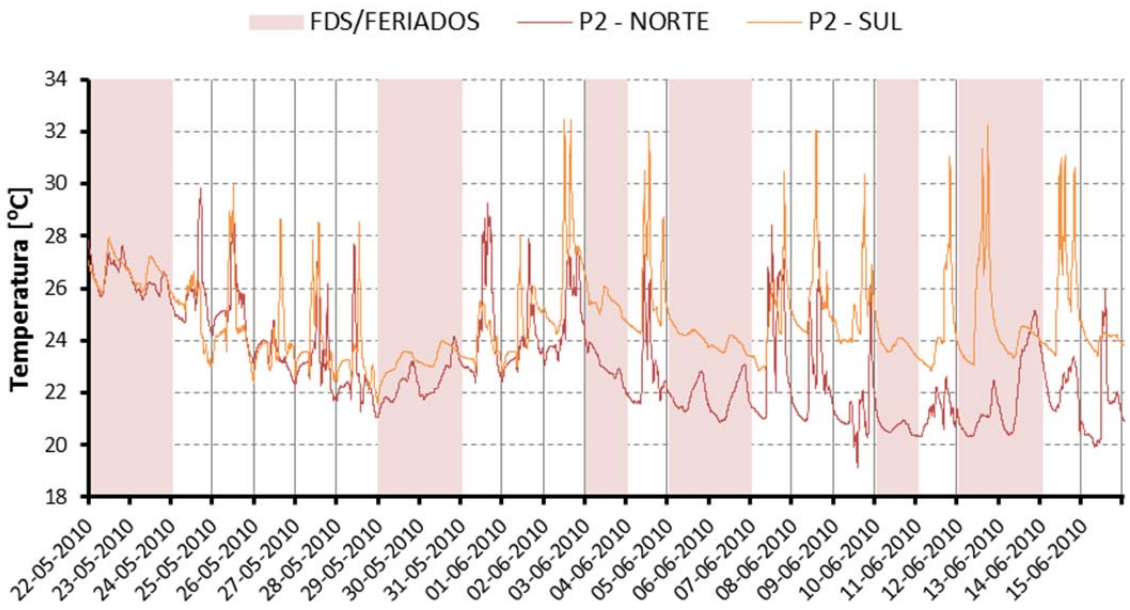


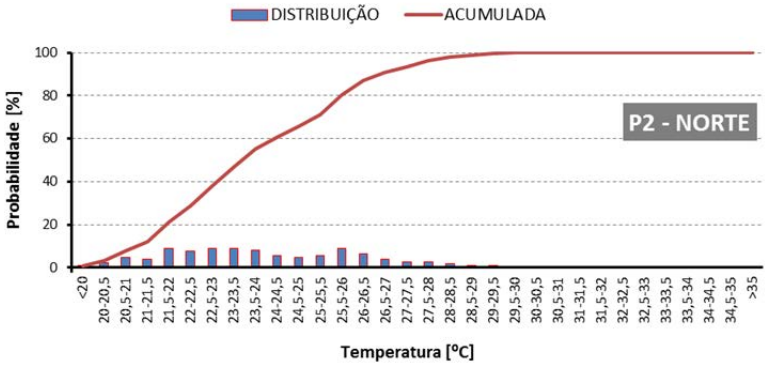
	P0-NORTE	P0-SUL	P0	P2-NORTE	P2-SUL	P2	ESCOLA TOTAIS
média	58,26	53,76	56,01	53,11	49,07	51,09	53,55
máximo	72,39	69,57	72,39	67,37	63,90	67,37	72,39
mínimo	30,23	28,49	28,49	28,33	27,30	27,30	27,30
desvio padrão	7,65	7,25	7,79	7,08	6,94	7,30	7,93

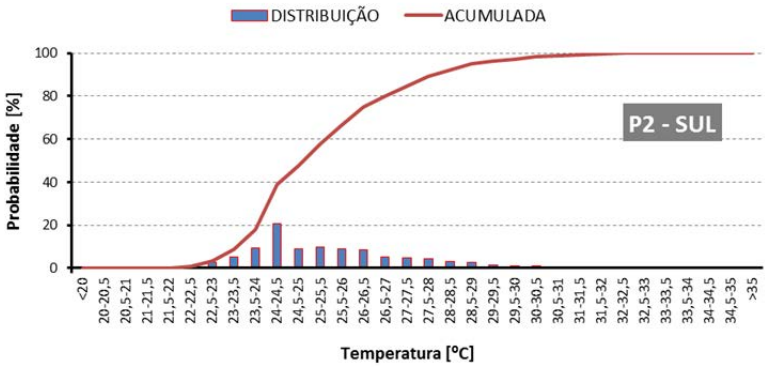




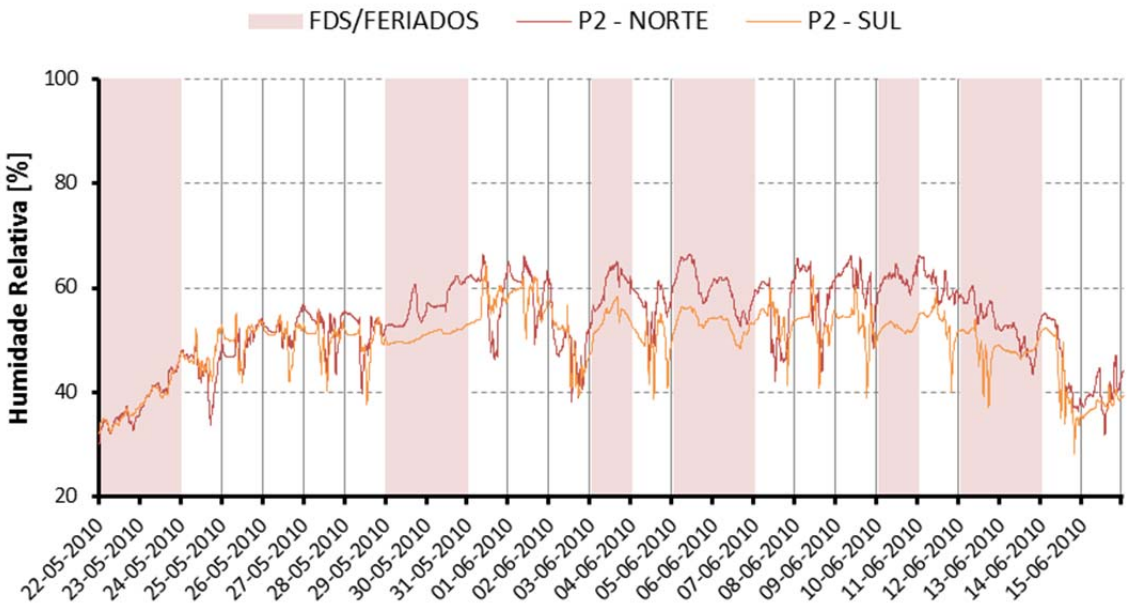
- Escola II-B



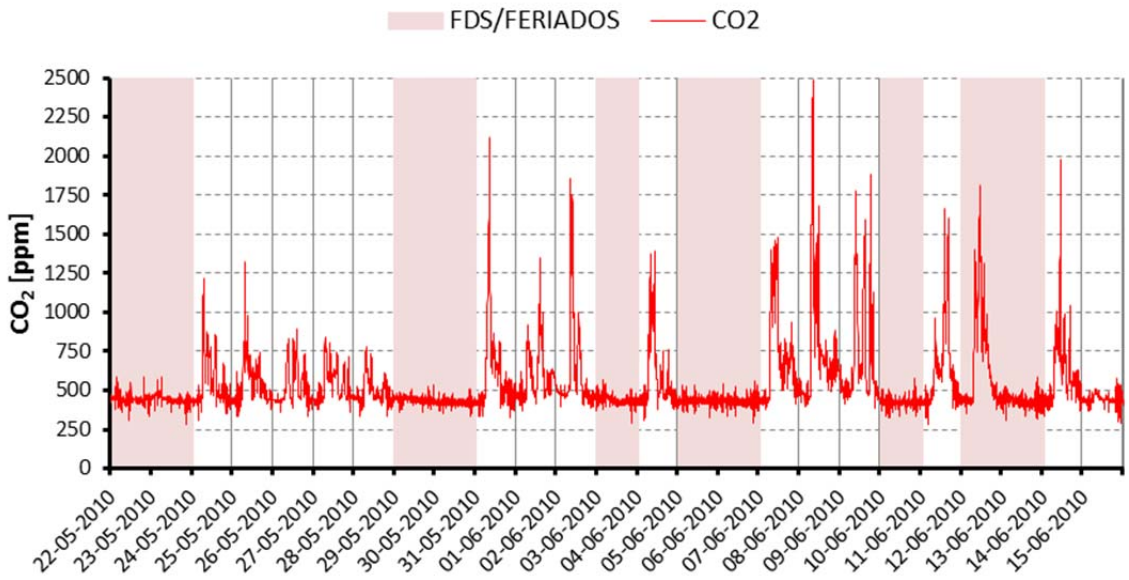


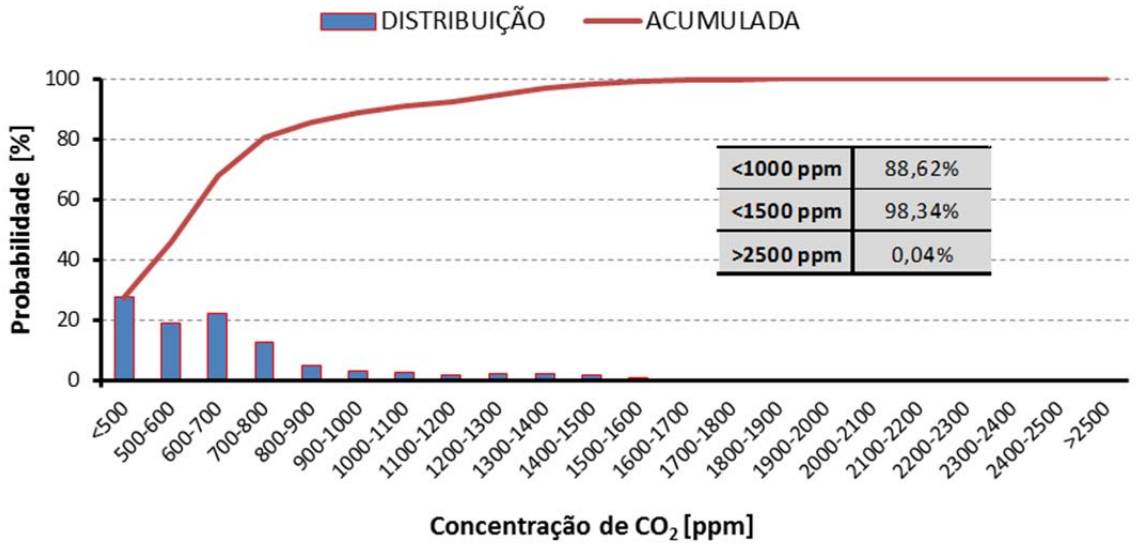


	P2-NORTE	P2-SUL	ESCOLA TOTAIS
média	24,07	25,56	24,82
máximo	29,87	32,48	32,48
mínimo	19,13	22,27	19,13
desvio padrão	2,14	1,86	2,14

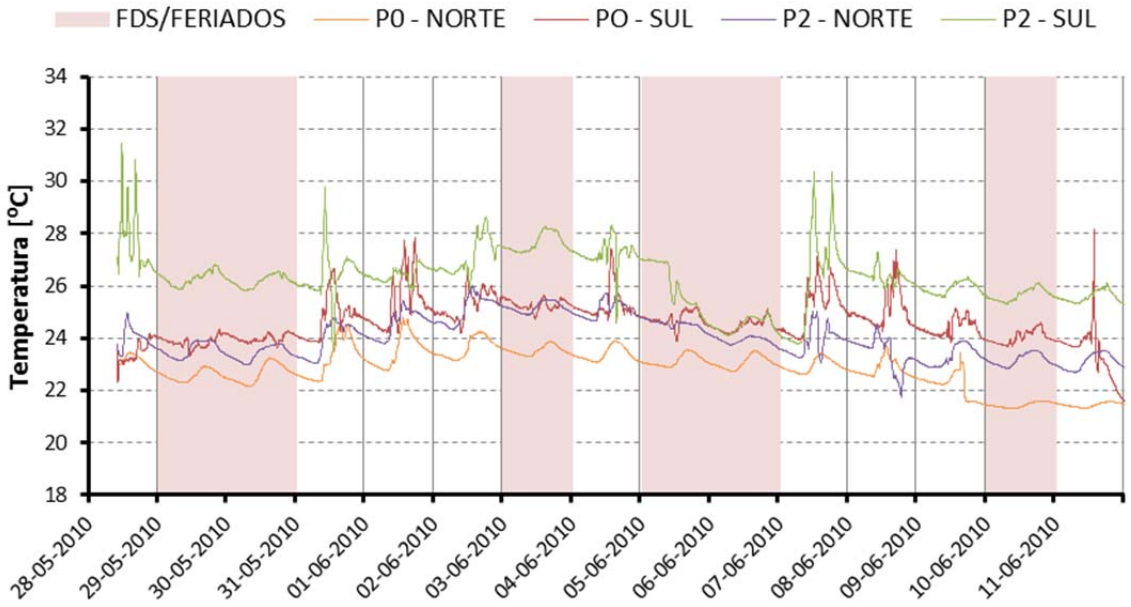


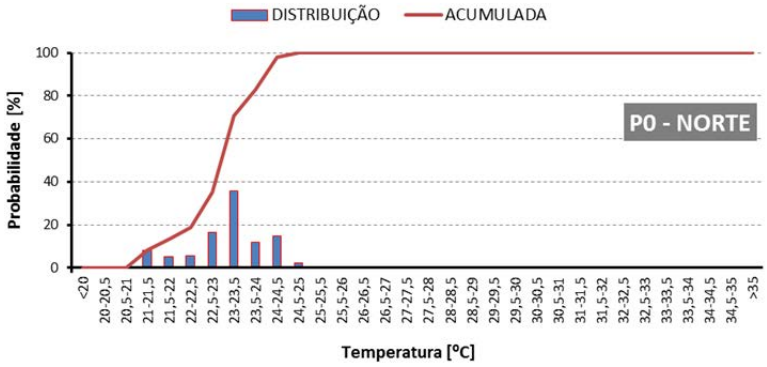
	P2-NORTE	P2-SUL	ESCOLA TOTAIS
média	51,15	49,75	50,45
máximo	66,41	64,49	66,41
mínimo	31,76	33,97	31,76
desvio padrão	7,43	6,73	7,12

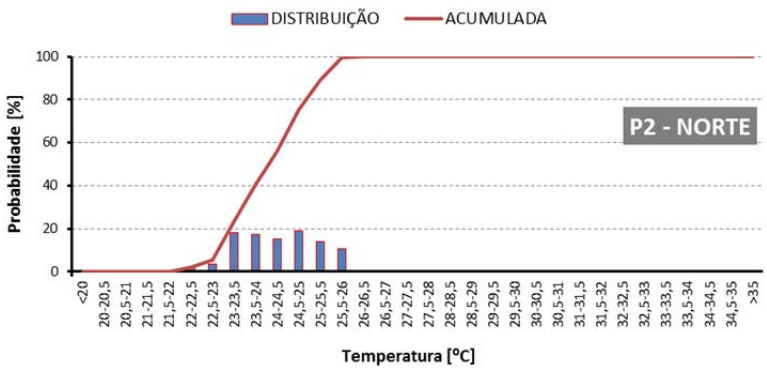


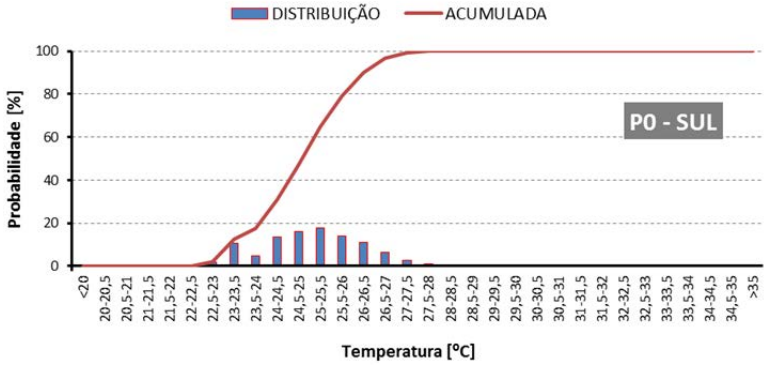

DISTRIBUIÇÃO
ACUMULADA
Probabilidade [%]
100
80
60
40
20
0
<1000 ppm 88,62%
<1500 ppm 98,34%
>2500 ppm 0,04%
<500
500-600
600-700
700-800
800-900
900-1000
1000-1100
1100-1200
1200-1300
1300-1400
1400-1500
1500-1600
1600-1700
1700-1800
1800-1900
1900-2000
2000-2100
2100-2200
2200-2300
2300-2400
2400-2500
>2500
Concentração de CO2 [ppm]

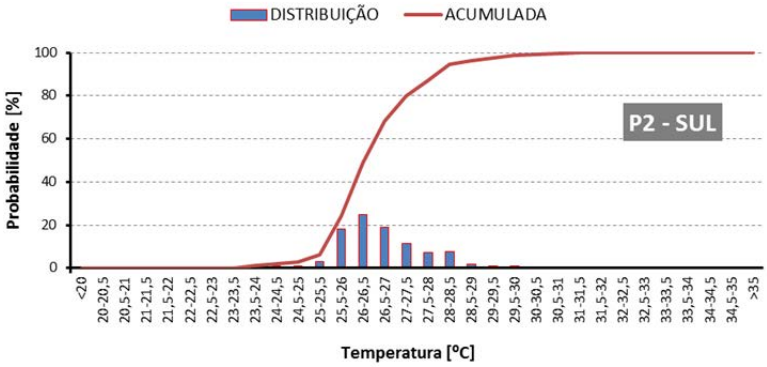
- Escola III-A


FDS/FERIADOS
P0 - NORTE
PO - SUL
P2 - NORTE
P2 - SUL
Temperatura [ºC]
34
32
30
28
26
24
22
20
18
28-05-2010
29-05-2010
30-05-2010
31-05-2010
01-06-2010
02-06-2010
03-06-2010
04-06-2010
05-06-2010
06-06-2010
07-06-2010
08-06-2010
09-06-2010
10-06-2010
11-06-2010

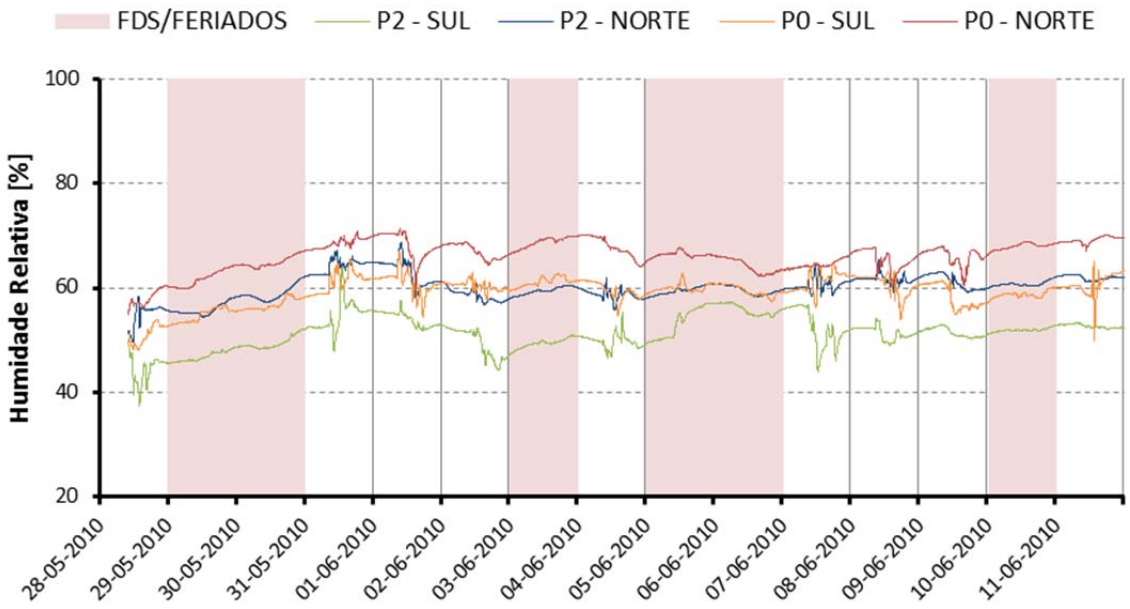

DISTRIBUIÇÃO
ACUMULADA
Probabilidade [%]
100
80
60
40
20
0
P0 - NORTE
<20
20-20,5
20,5-21
21-21,5
21,5-22
22-22,5
22,5-23
23-23,5
23,5-24
24-24,5
24,5-25
25-25,5
25,5-26
26-26,5
26,5-27
27-27,5
27,5-28
28-28,5
28,5-29
29-29,5
29,5-30
30-30,5
30,5-31
31-31,5
31,5-32
32-32,5
32,5-33
33-33,5
33,5-34
34-34,5
34,5-35
>35
Temperatura [ºC]



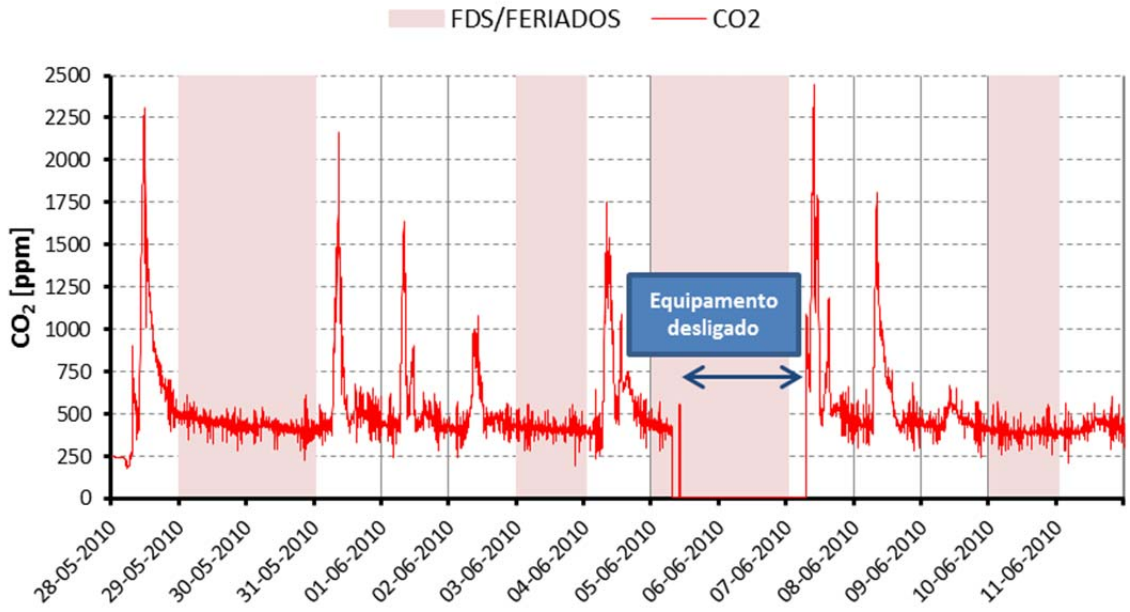


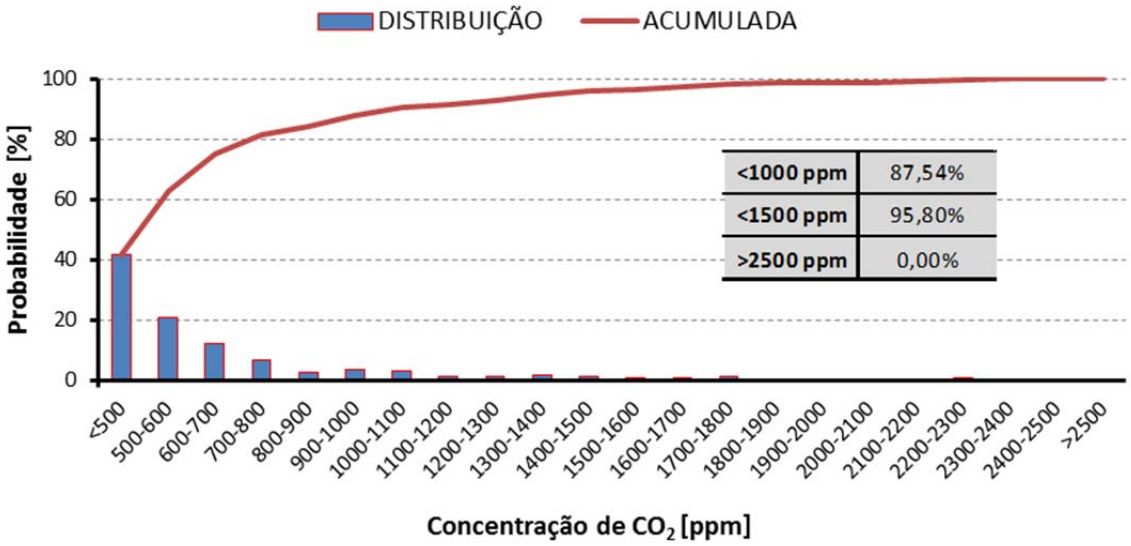


	P0-NORTE	P0-SUL	P0	P2-NORTE	P2-SUL	P2	ESCOLA TOTAIS
média	23,12	25,04	24,08	24,30	26,72	24,78	24,79
máximo	24,82	28,17	28,17	26,04	31,48	31,48	31,48
mínimo	21,32	22,32	21,32	22,08	23,47	22,08	21,32
desvio padrão	0,85	1,12	1,38	0,87	1,10	1,29	1,64

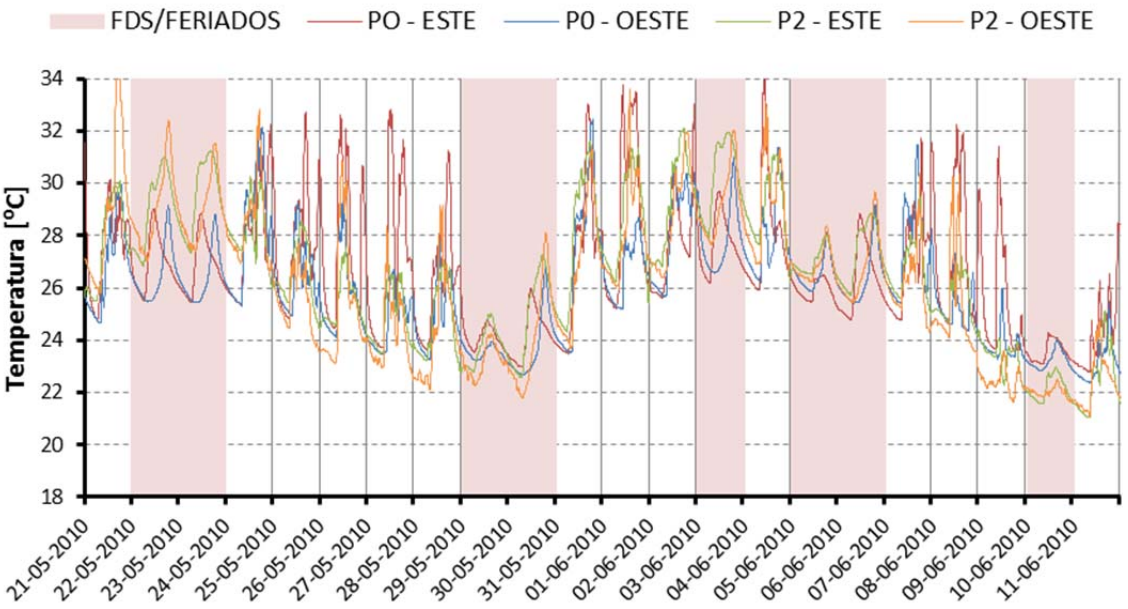


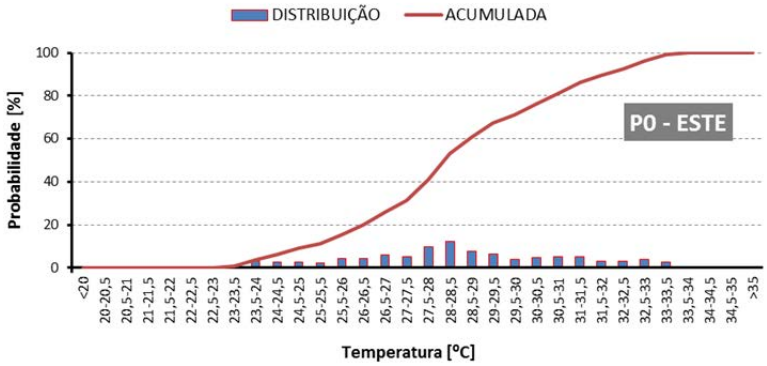
	P0-NORTE	P0-SUL	P0	P2-NORTE	P2-SUL	P2	ESCOLA TOTAIS
média	65,60	59,16	62,38	60,61	51,00	55,81	59,09
máximo	71,29	66,96	71,29	68,66	64,33	68,66	71,29
mínimo	54,79	48,15	48,15	49,73	37,37	37,37	37,37
desvio padrão	3,61	3,95	4,97	3,21	3,87	5,98	6,41

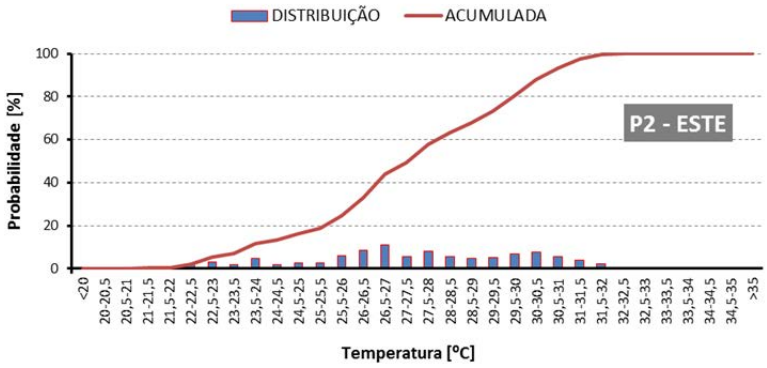


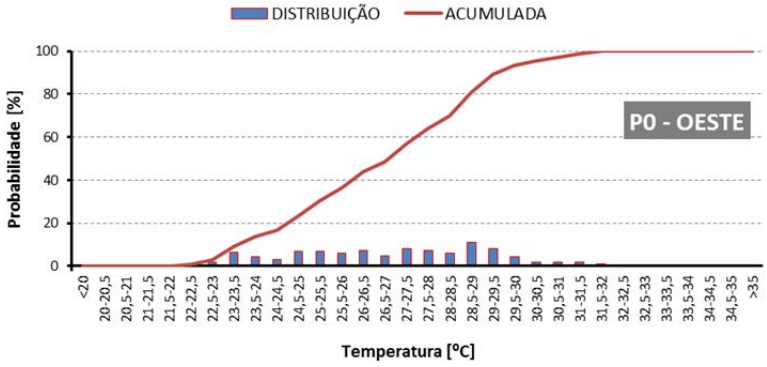

DISTRIBUIÇÃO
ACUMULADA
Probabilidade [%]
100
80
60
40
20
0
<1000 ppm 87,54%
<1500 ppm 95,80%
>2500 ppm 0,00%
<500
500-600
600-700
700-800
800-900
900-1000
1000-1100
1100-1200
1200-1300
1300-1400
1400-1500
1500-1600
1600-1700
1700-1800
1800-1900
1900-2000
2000-2100
2100-2200
2200-2300
2300-2400
2400-2500
>2500
Concentração de CO2 [ppm]

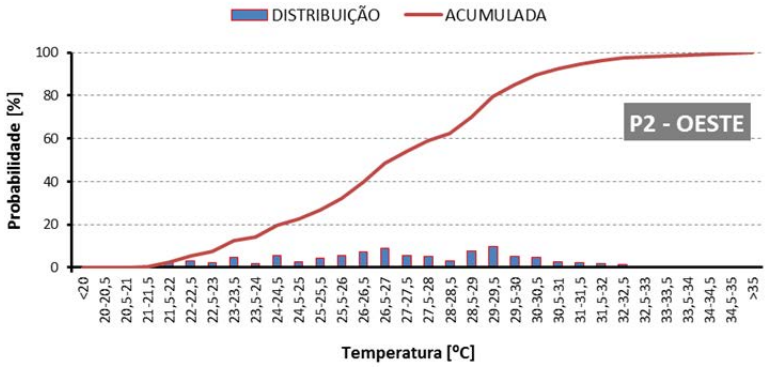
- Escola III-B


FDS/FERIADOS
PO - ESTE
P0 - OESTE
P2 - ESTE
P2 - OESTE
Temperatura [ºC]
34
32
30
28
26
24
22
20
18
21-05-2010
22-05-2010
23-05-2010
24-05-2010
25-05-2010
26-05-2010
27-05-2010
28-05-2010
29-05-2010
30-05-2010
31-05-2010
01-06-2010
02-06-2010
03-06-2010
04-06-2010
05-06-2010
06-06-2010
07-06-2010
08-06-2010
09-06-2010
10-06-2010
11-06-2010

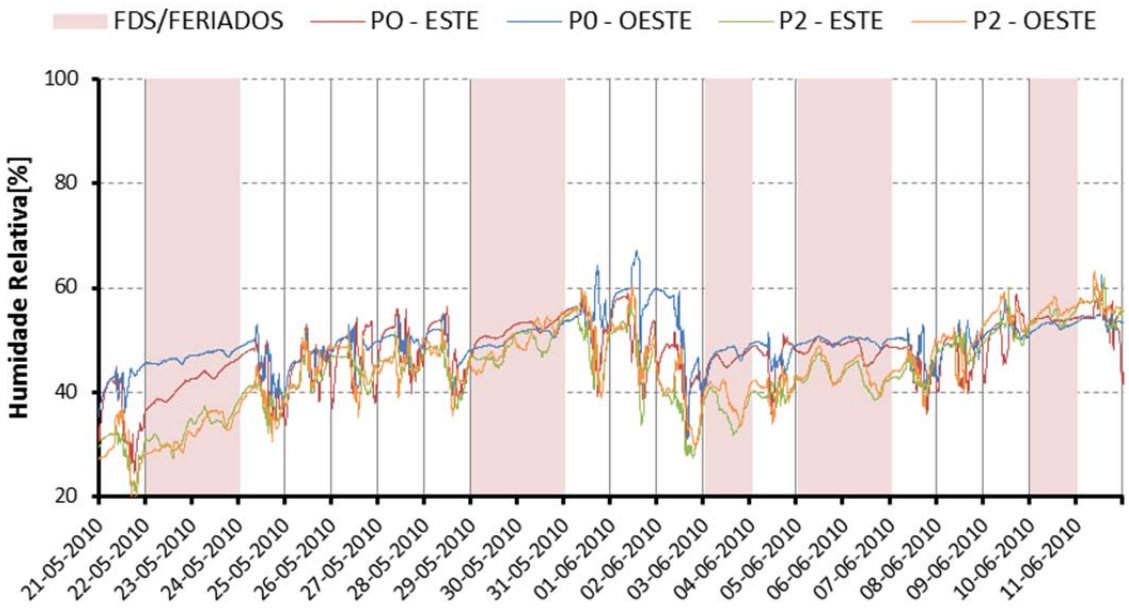

DISTRIBUIÇÃO
ACUMULADA
Probabilidade [%]
100
80
60
40
20
0
P0 - ESTE
<20
20-20,5
20,5-21
21-21,5
21,5-22
22-22,5
22,5-23
23-23,5
23,5-24
24-24,5
24,5-25
25-25,5
25,5-26
26-26,5
26,5-27
27-27,5
27,5-28
28-28,5
28,5-29
29-29,5
29,5-30
30-30,5
30,5-31
31-31,5
31,5-32
32-32,5
32,5-33
33-33,5
33,5-34
34-34,5
34,5-35
>35
Temperatura [ºC]



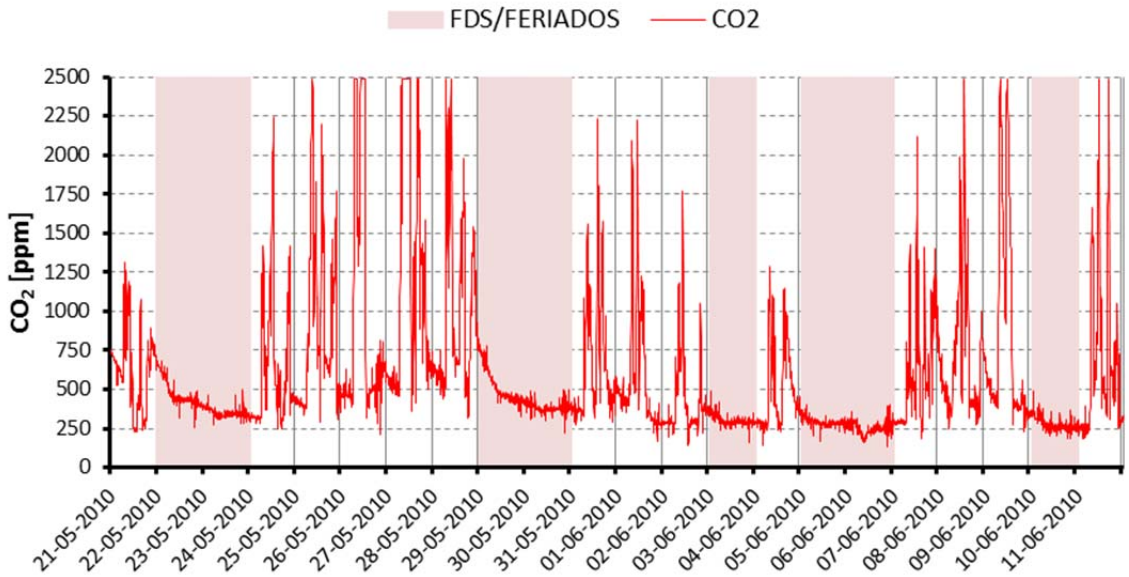


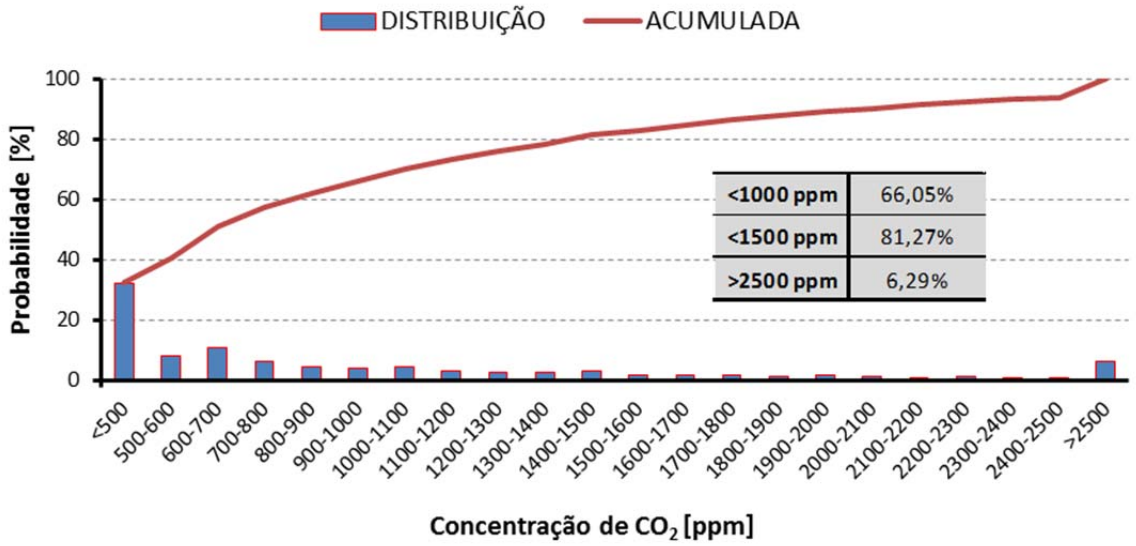


	P0-ESTE	P0-OESTE	P0	P2-ESTE	P2-OESTE	P2	ESCOLA TOTAIS
média	28,49	26,85	27,67	27,44	27,15	27,30	27,48
máximo	34,02	32,10	34,02	32,10	36,91	36,91	36,91
mínimo	22,92	22,37	22,37	21,10	21,15	21,10	21,10
desvio padrão	2,49	2,25	2,51	2,49	2,84	2,68	2,60

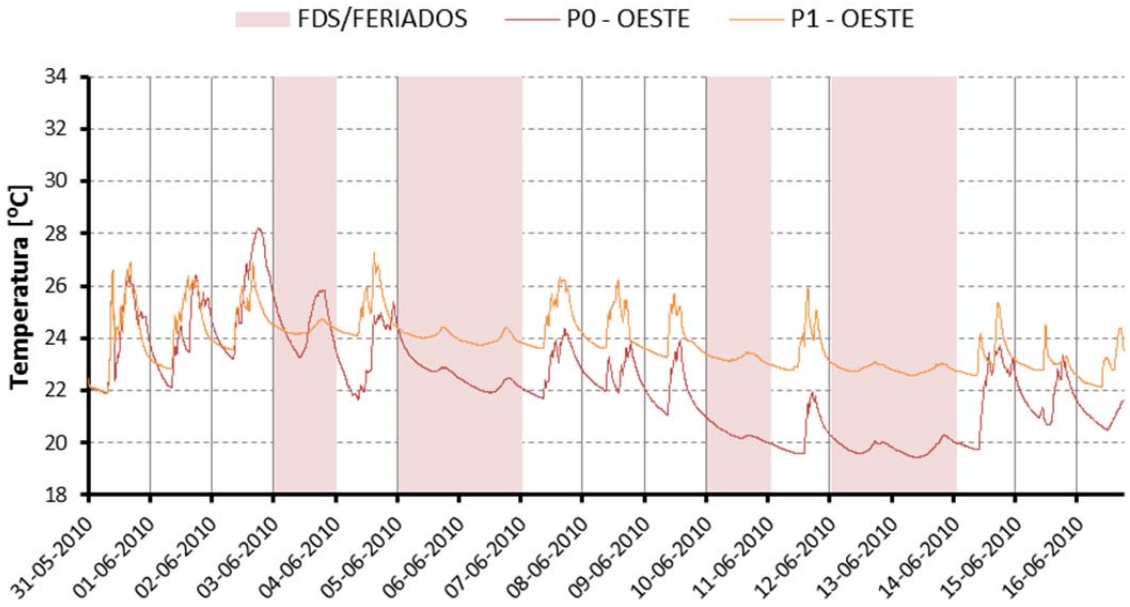


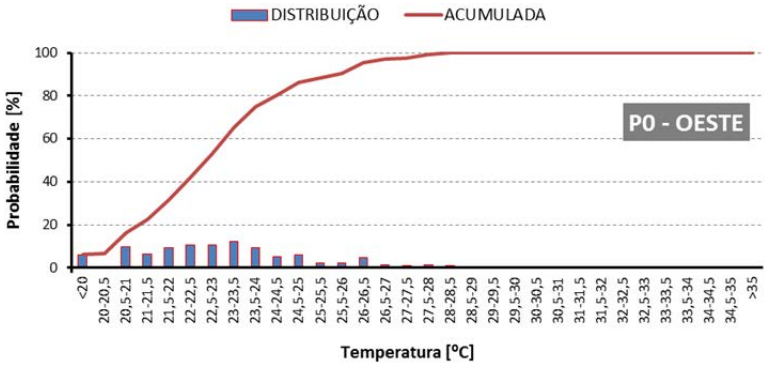
	P0-ESTE	P0-OESTE	P0	P2-ESTE	P2-OESTE	P2	ESCOLA TOTAIS
média	46,61	49,72	48,16	44,15	45,55	44,85	46,51
máximo	59,63	67,10	67,10	61,92	63,18	63,18	67,10
mínimo	26,37	31,22	26,37	21,01	17,94	17,94	17,94
desvio padrão	6,60	6,07	6,53	7,81	8,02	7,94	7,46

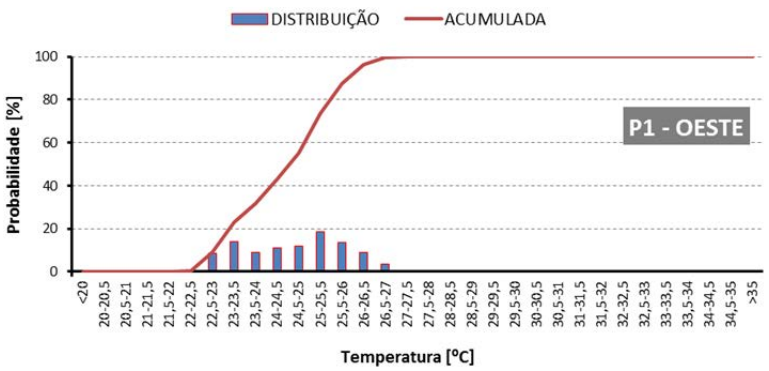



DISTRIBUIÇÃO
ACUMULADA
Probabilidade [%]
100
80
60
40
20
0
<1000 ppm 66,05%
<1500 ppm 81,27%
>2500 ppm 6,29%
<500
500-600
600-700
700-800
800-900
900-1000
1000-1100
1100-1200
1200-1300
1300-1400
1400-1500
1500-1600
1600-1700
1700-1800
1800-1900
1900-2000
2000-2100
2100-2200
2200-2300
2300-2400
2400-2500
>2500
Concentração de CO2 [ppm]

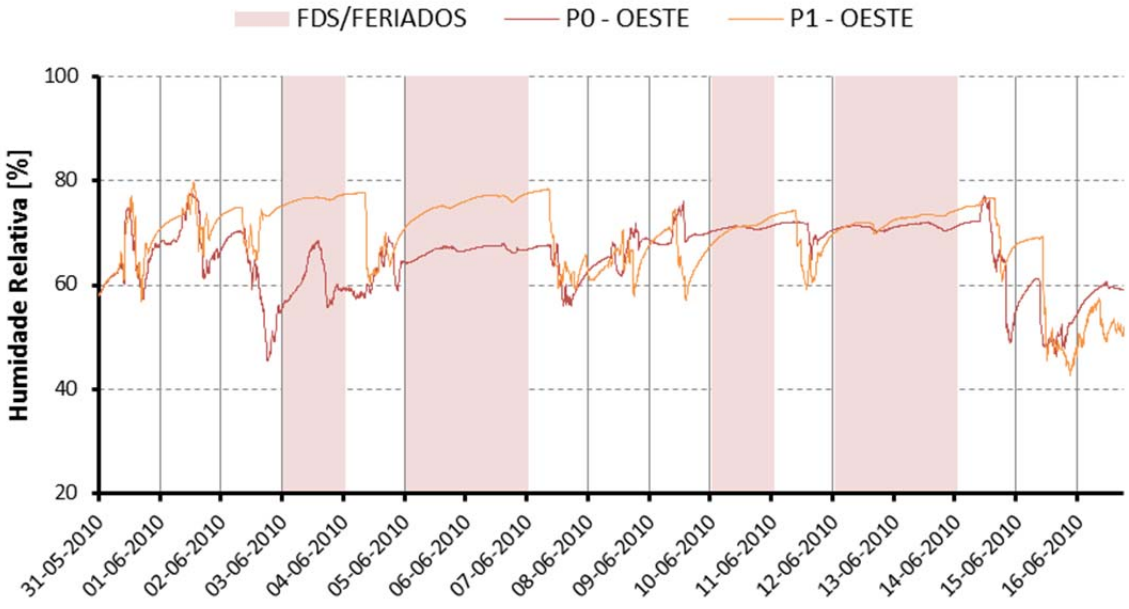
- Escola III-C


FDS/FERIADOS
P0 - OESTE
P1 - OESTE
Temperatura [ºC]
34
32
30
28
26
24
22
20
18
31-05-2010
01-06-2010
02-06-2010
03-06-2010
04-06-2010
05-06-2010
06-06-2010
07-06-2010
08-06-2010
09-06-2010
10-06-2010
11-06-2010
12-06-2010
13-06-2010
14-06-2010
15-06-2010
16-06-2010

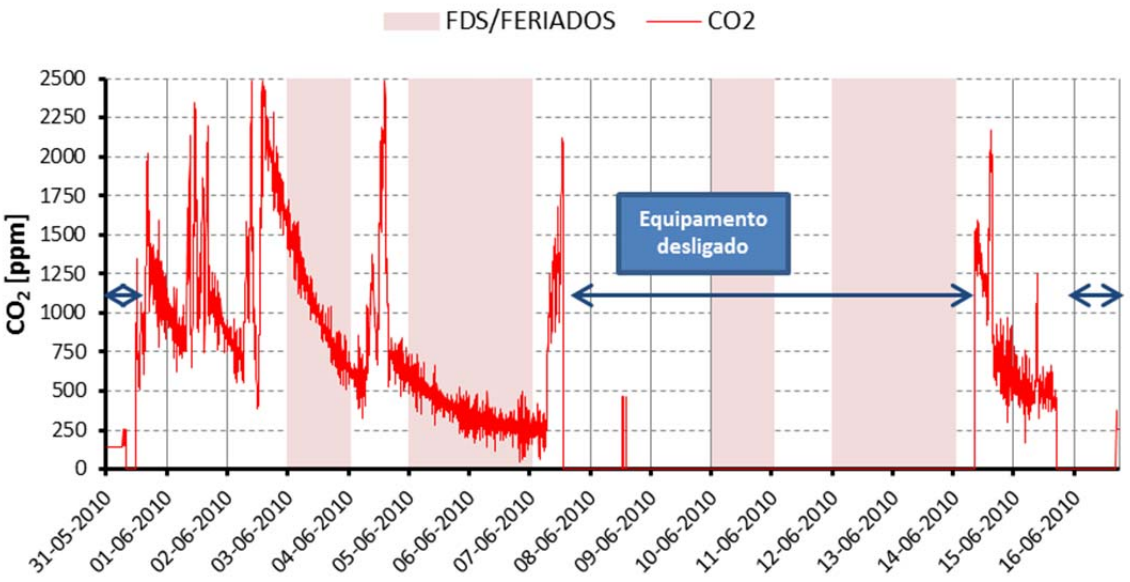

DISTRIBUIÇÃO
ACUMULADA
Probabilidade [%]
100
80
60
40
20
0
P0 - OESTE
<20
20-20,5
20,5-21
21-21,5
21,5-22
22-22,5
22,5-23
23-23,5
23,5-24
24-24,5
24,5-25
25-25,5
25,5-26
26-26,5
26,5-27
27-27,5
27,5-28
28-28,5
28,5-29
29-29,5
29,5-30
30-30,5
30,5-31
31-31,5
31,5-32
32-32,5
32,5-33
33-33,5
33,5-34
34-34,5
34,5-35
>35
Temperatura [ºC]

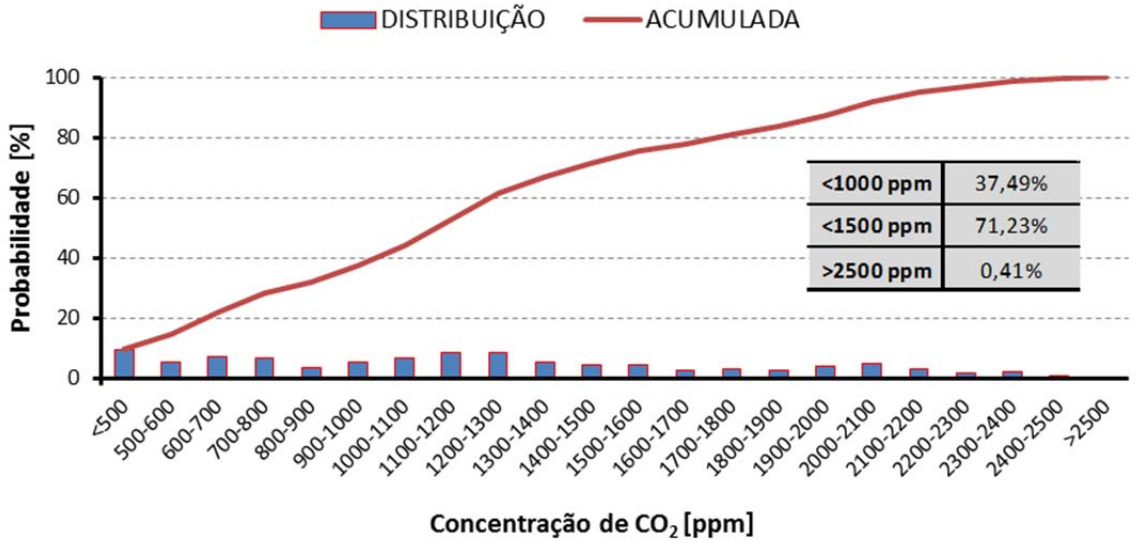


	P0-OESTE	P1-OESTE	ESCOLA TOTAIS
média	22,96	24,65	23,80
máximo	28,25	27,28	28,25
mínimo	19,58	22,11	19,58
desvio padrão	1,91	1,15	1,79



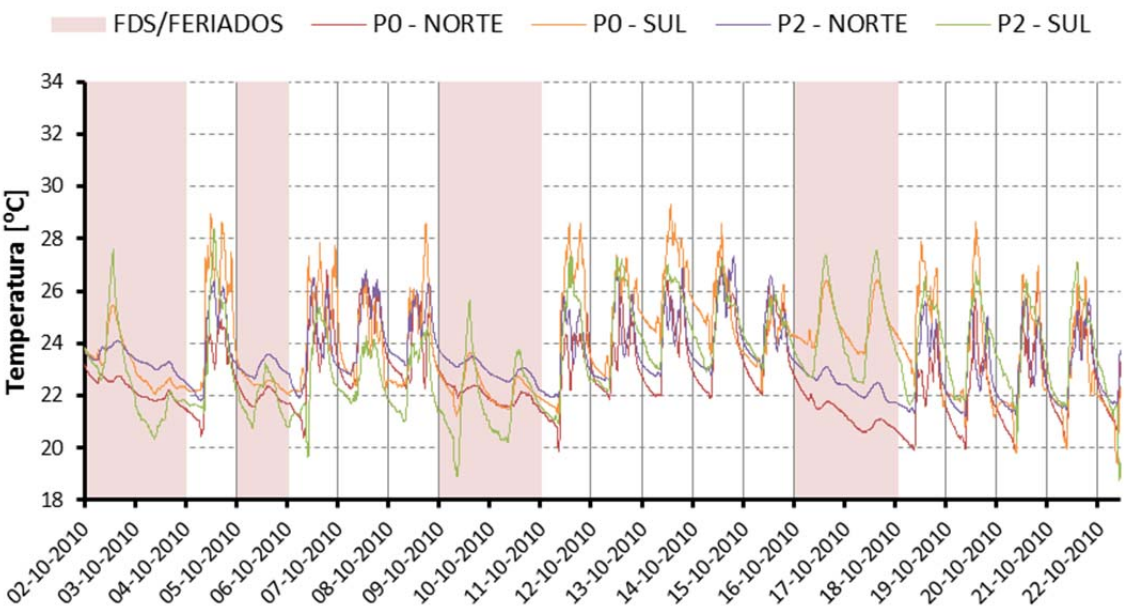
	P0-OESTE	P1-OESTE	ESCOLA TOTAIS
média	64,56	64,64	64,60
máximo	77,52	79,74	79,74
mínimo	45,42	45,57	45,42
desvio padrão	7,59	8,15	7,87

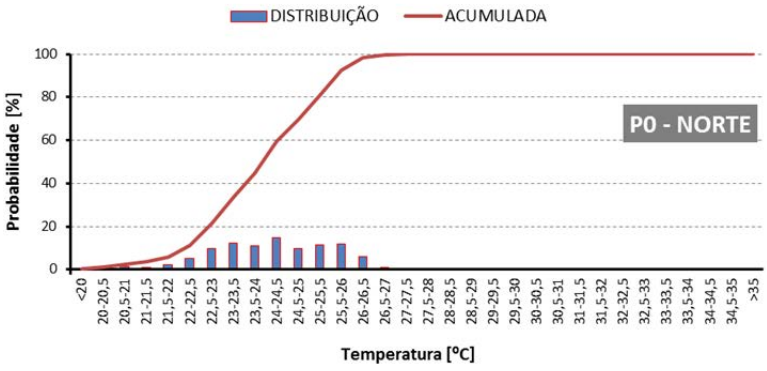

FDS/FERIADOS
CO2
CO_2 [ppm]
2500
2250
2000
1750
1500
1250
1000
750
500
250
0
Equipamento desligado
31-05-2010
01-06-2010
02-06-2010
03-06-2010
04-06-2010
05-06-2010
06-06-2010
07-06-2010
08-06-2010
09-06-2010
10-06-2010
11-06-2010
12-06-2010
13-06-2010
14-06-2010
15-06-2010
16-06-2010

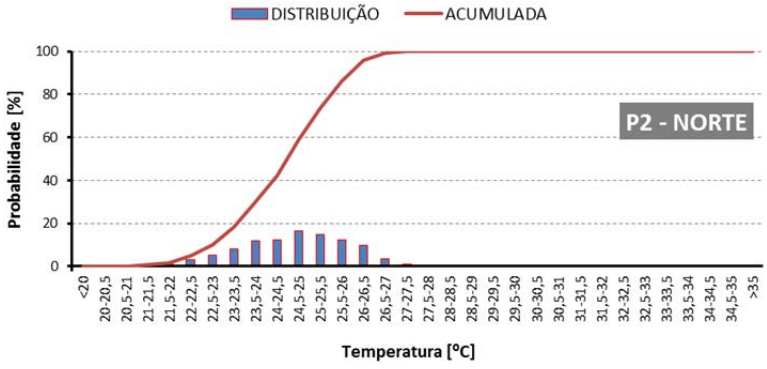

DISTRIBUIÇÃO
ACUMULADA
Probabilidade [%]
100
80
60
40
20
0
<1000 ppm 37,49%
<1500 ppm 71,23%
>2500 ppm 0,41%
<500
500-600
600-700
700-800
800-900
900-1000
1000-1100
1100-1200
1200-1300
1300-1400
1400-1500
1500-1600
1600-1700
1700-1800
1800-1900
1900-2000
2000-2100
2100-2200
2200-2300
2300-2400
2400-2500
>2500
Concentração de CO_2 [ppm]

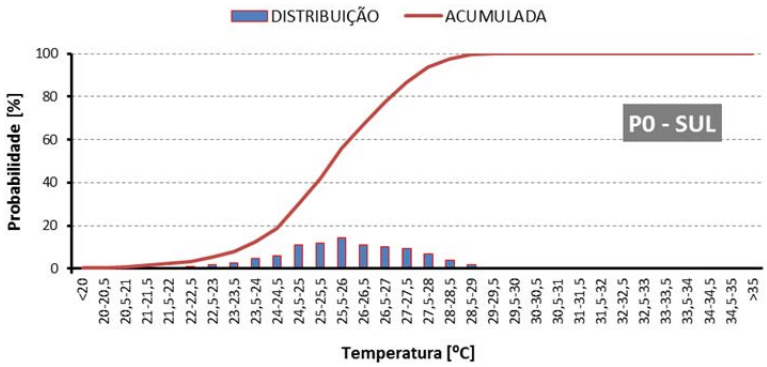
AIII.2 MEIA-ESTAÇÃO (OUTUBRO)

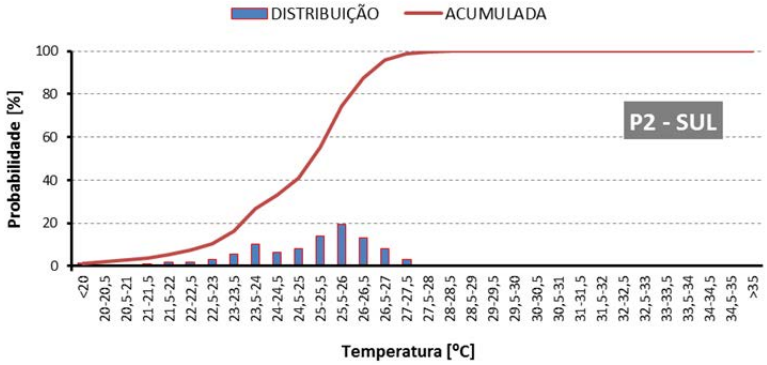
- Escola II-A



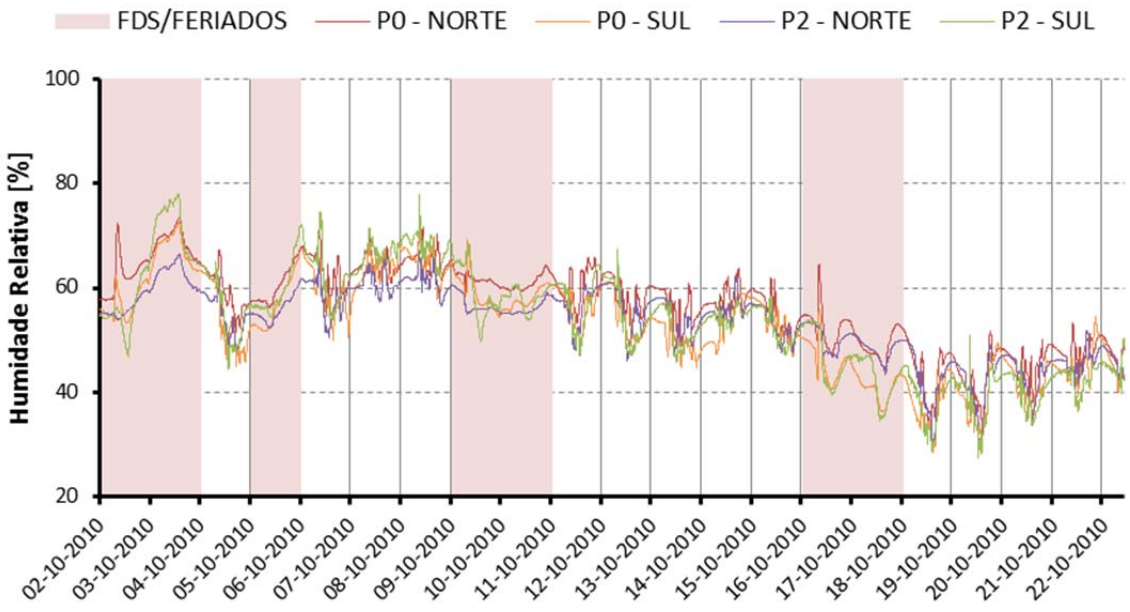




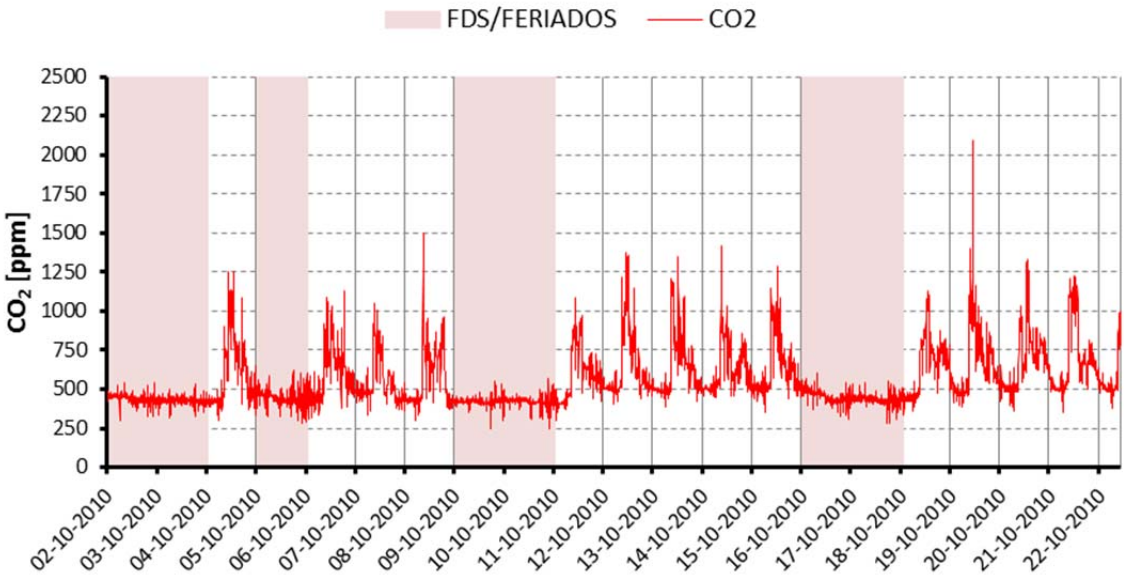


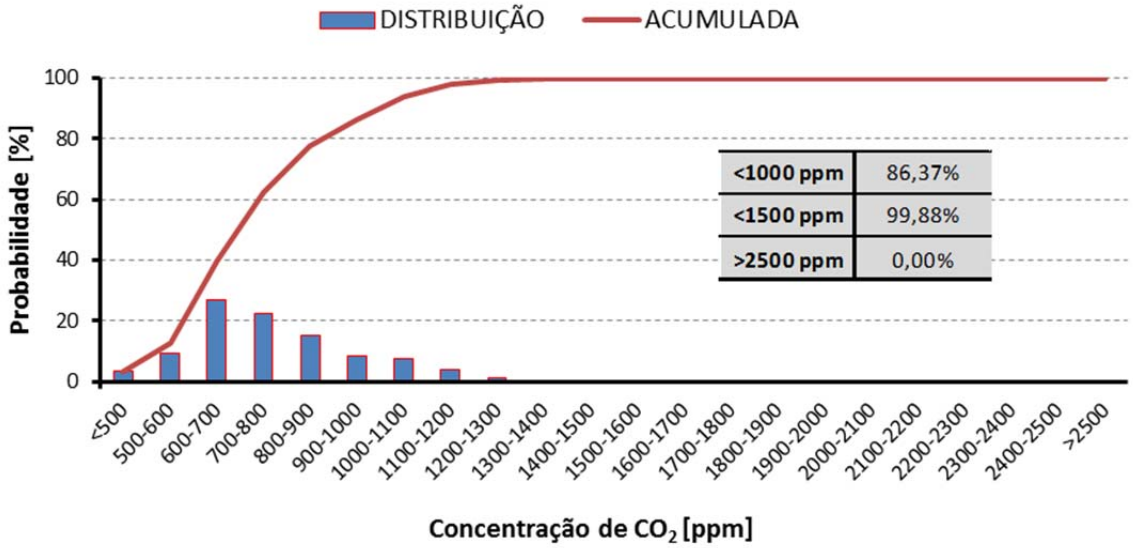


	P0-NORTE	P0-SUL	P0	P2-NORTE	P2-SUL	P2	ESCOLA TOTAIS
média	24,13	25,73	24,93	24,64	24,94	24,79	24,86
máximo	27,28	29,34	29,34	27,19	28,39	28,39	29,34
mínimo	19,84	19,51	19,51	21,22	18,77	18,77	18,77
desvio padrão	1,38	1,60	1,69	1,20	1,60	1,42	1,57

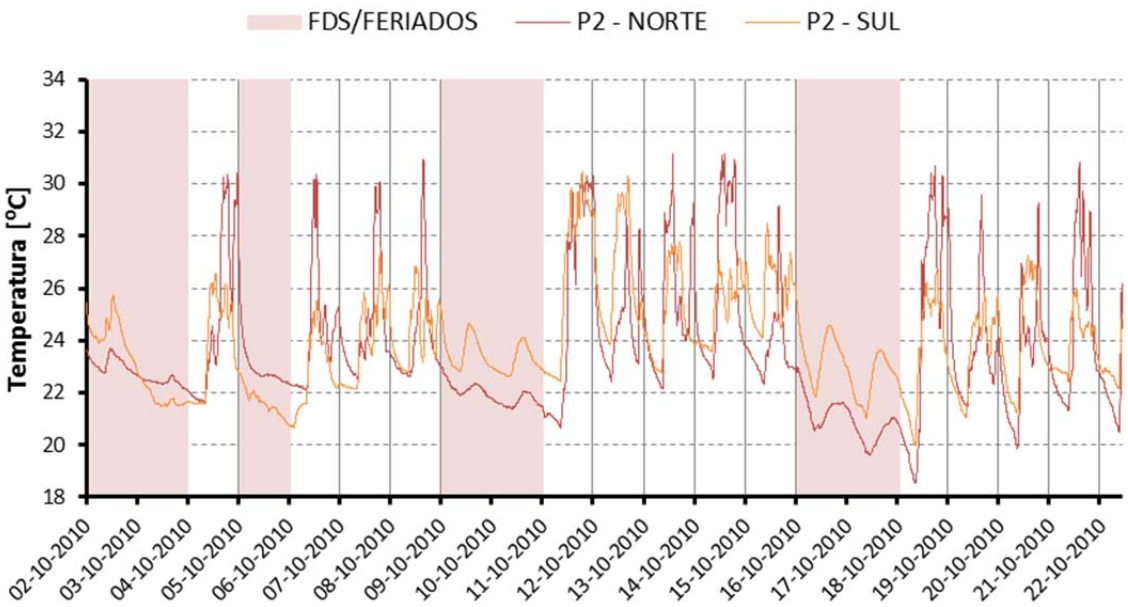


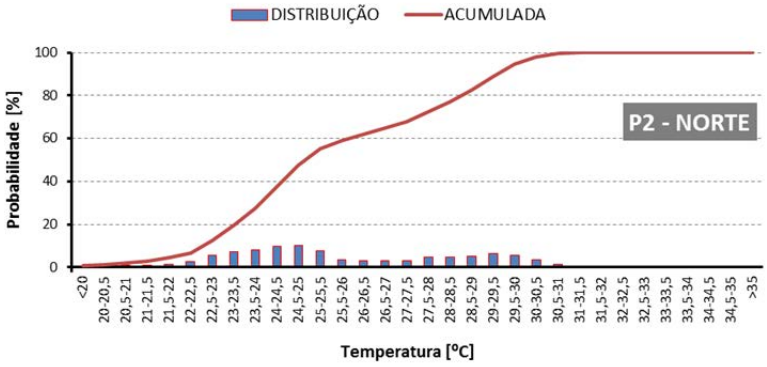
	P0-NORTE	P0-SUL	P0	P2-NORTE	P2-SUL	P2	ESCOLA TOTAIS
média	54,66	50,39	52,53	50,98	50,10	50,54	51,53
máximo	71,83	71,67	71,83	67,26	77,91	77,91	77,91
mínimo	33,60	28,52	28,52	30,59	27,36	27,36	27,36
desvio padrão	9,24	9,74	9,73	8,56	11,13	9,94	9,88

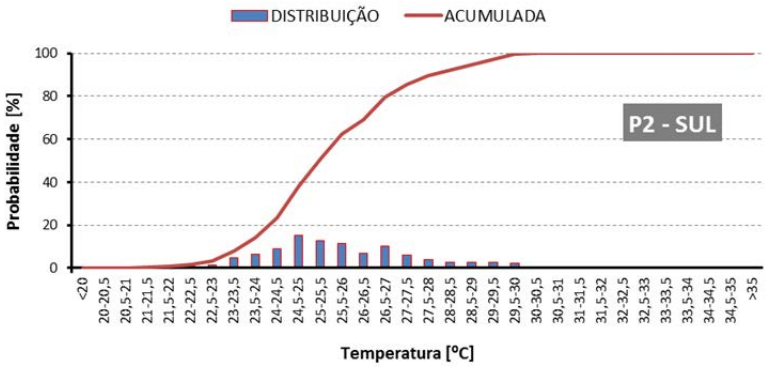




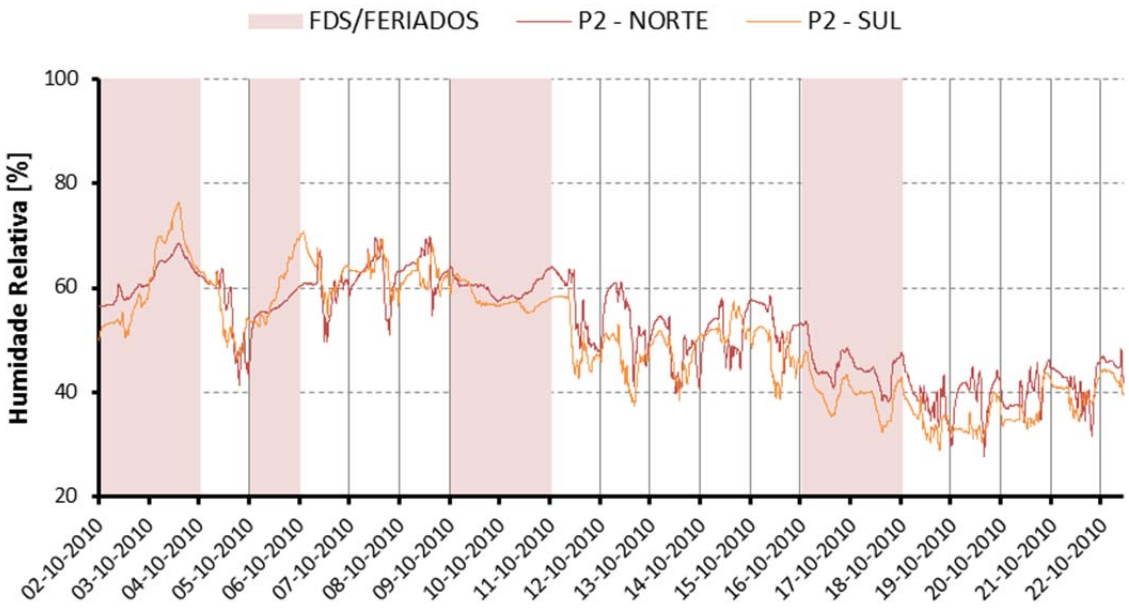
- Escola II-B



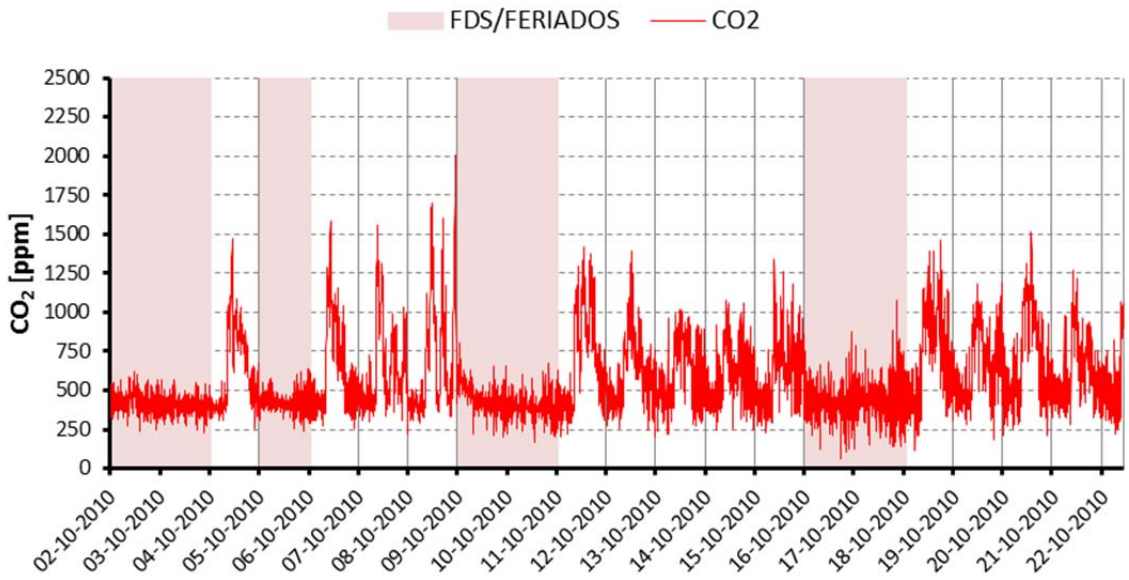


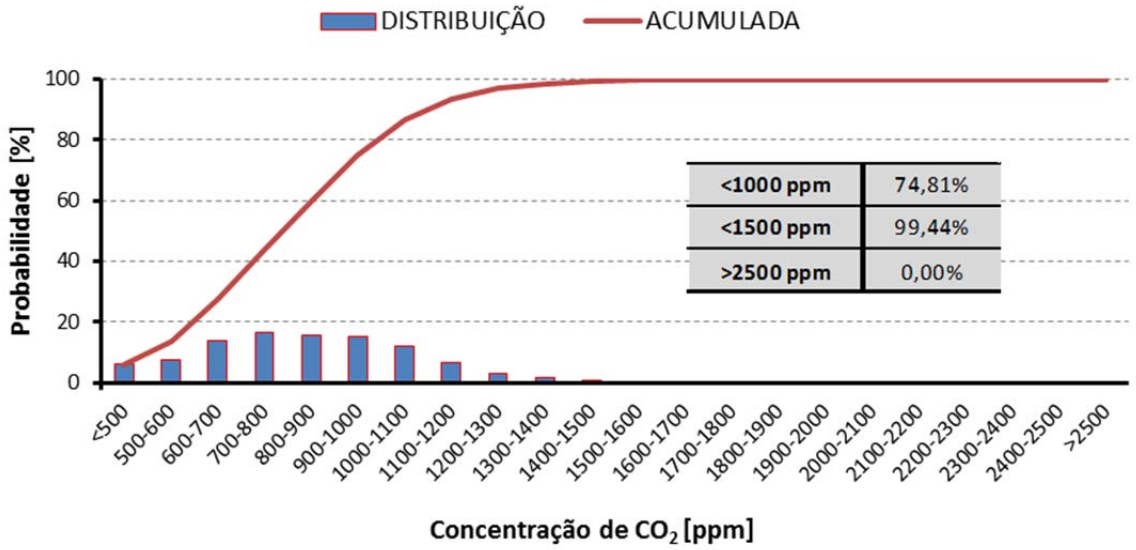


	P2-NORTE	P2-SUL	ESCOLA TOTAIS
média	25,82	25,71	25,77
máximo	31,18	30,29	31,18
mínimo	18,82	20,84	18,82
desvio padrão	2,64	1,69	2,22

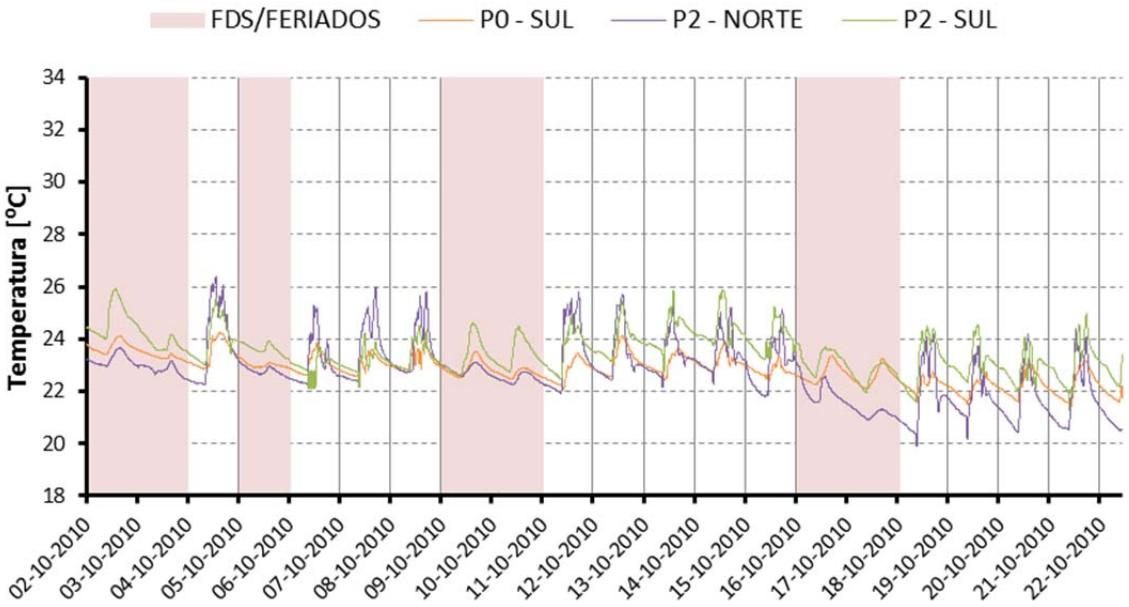


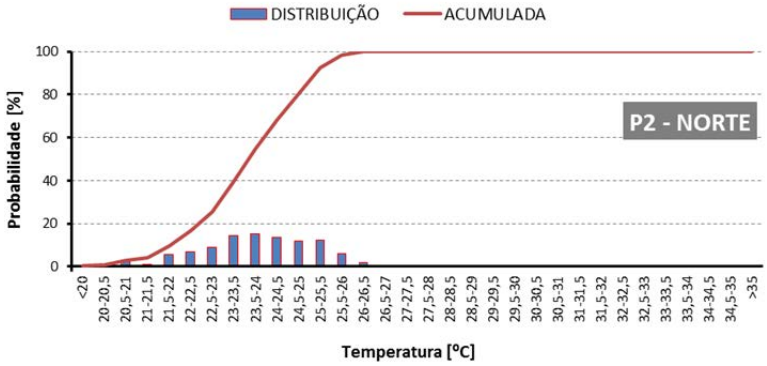
	P2-NORTE	P2-SUL	ESCOLA TOTAIS
média	50,37	47,02	48,69
máximo	69,92	69,36	69,92
mínimo	27,58	28,98	27,58
desvio padrão	10,04	11,04	10,68

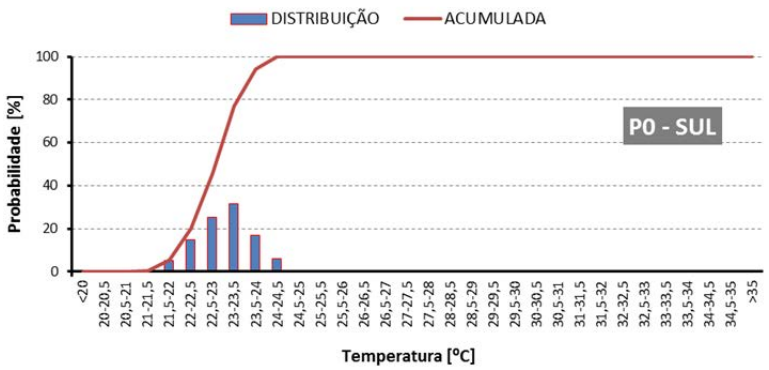


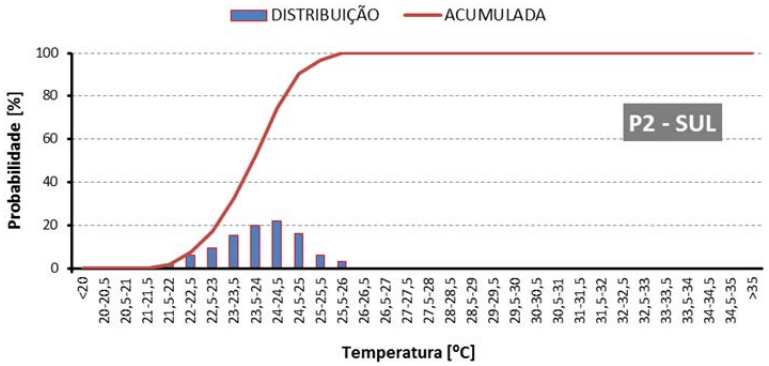

DISTRIBUIÇÃO
ACUMULADA
Probabilidade [%]
100
80
60
40
20
0
<1000 ppm
74,81%
<1500 ppm
99,44%
>2500 ppm
0,00%
<500
500-600
600-700
700-800
800-900
900-1000
1000-1100
1100-1200
1200-1300
1300-1400
1400-1500
1500-1600
1600-1700
1700-1800
1800-1900
1900-2000
2000-2100
2100-2200
2200-2300
2300-2400
2400-2500
>2500
Concentração de CO2 [ppm]

- Escola III-A

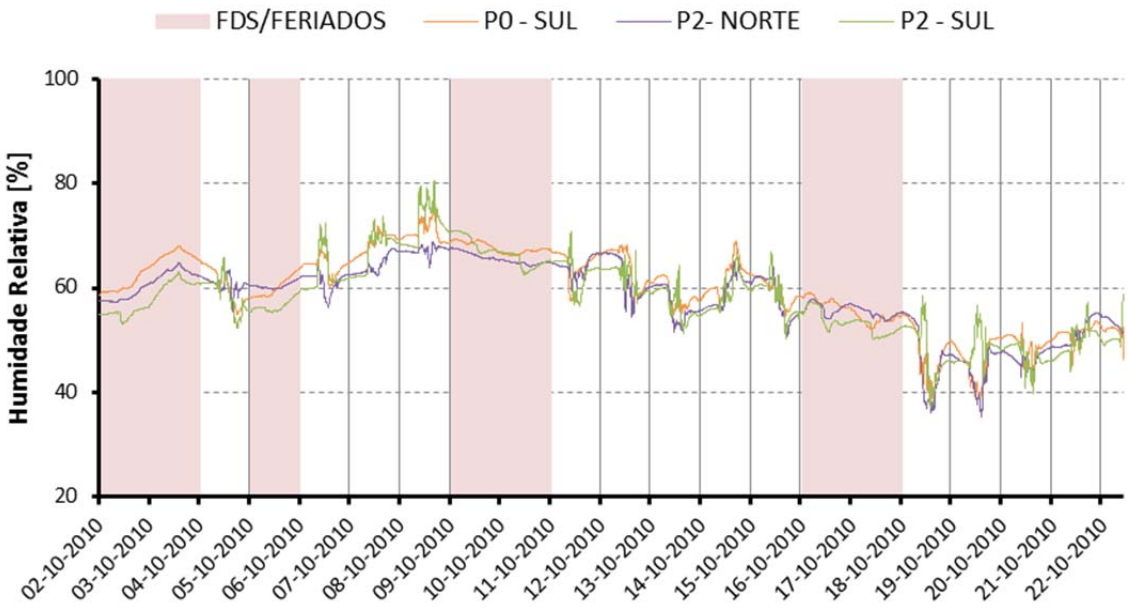

FDS/FERIADOS
P0 - SUL
P2 - NORTE
P2 - SUL
Temperatura [ºC]
34
32
30
28
26
24
22
20
18
02-10-2010
03-10-2010
04-10-2010
05-10-2010
06-10-2010
07-10-2010
08-10-2010
09-10-2010
10-10-2010
11-10-2010
12-10-2010
13-10-2010
14-10-2010
15-10-2010
16-10-2010
17-10-2010
18-10-2010
19-10-2010
20-10-2010
21-10-2010
22-10-2010


DISTRIBUIÇÃO
ACUMULADA
Probabilidade [%]
100
80
60
40
20
0
P2 - NORTE
<20
20-20,5
20,5-21
21-21,5
21,5-22
22-22,5
22,5-23
23-23,5
23,5-24
24-24,5
24,5-25
25-25,5
25,5-26
26-26,5
26,5-27
27-27,5
27,5-28
28-28,5
28,5-29
29-29,5
29,5-30
30-30,5
30,5-31
31-31,5
31,5-32
32-32,5
32,5-33
33-33,5
33,5-34
34-34,5
34,5-35
>35
Temperatura [ºC]

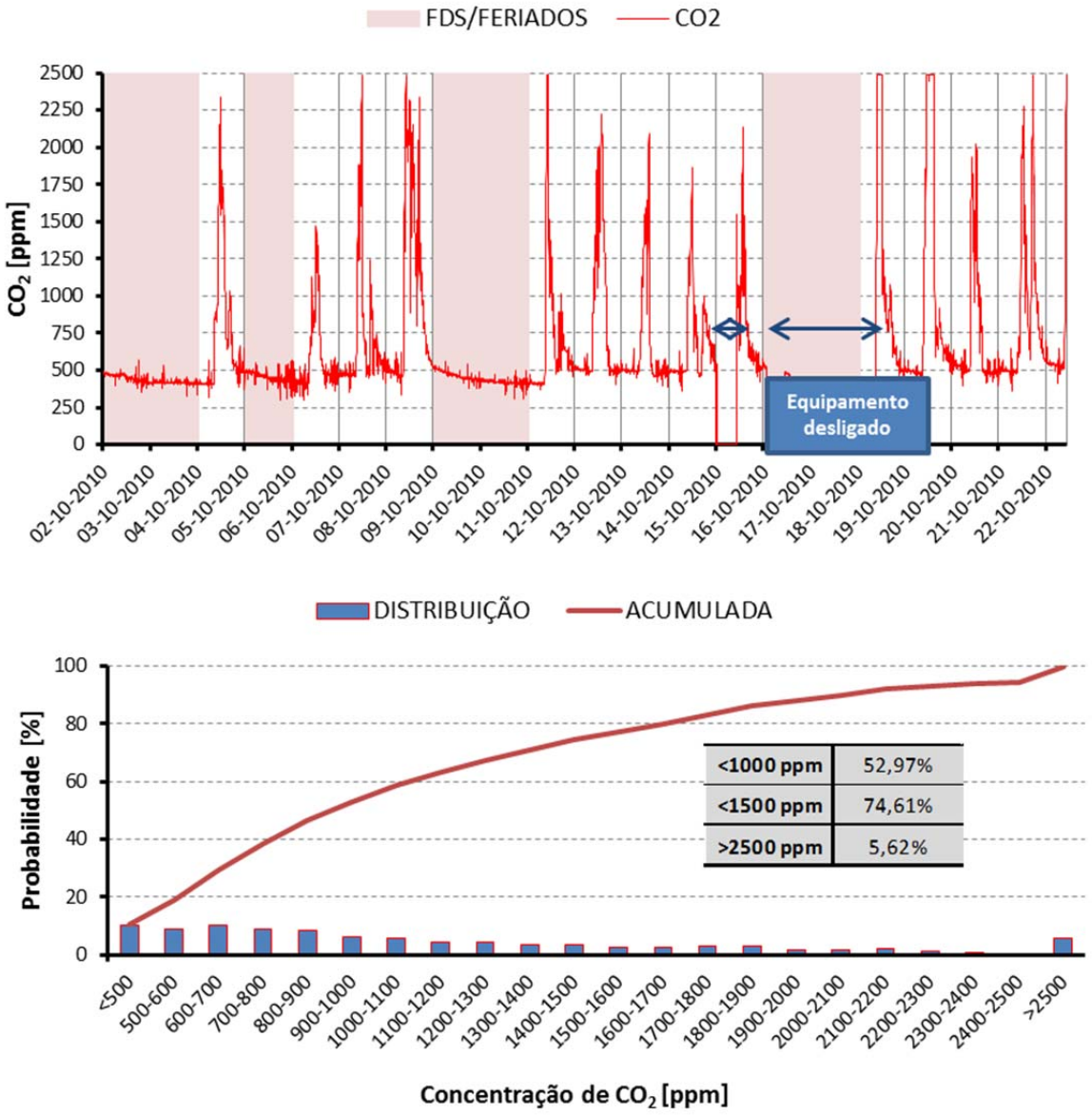




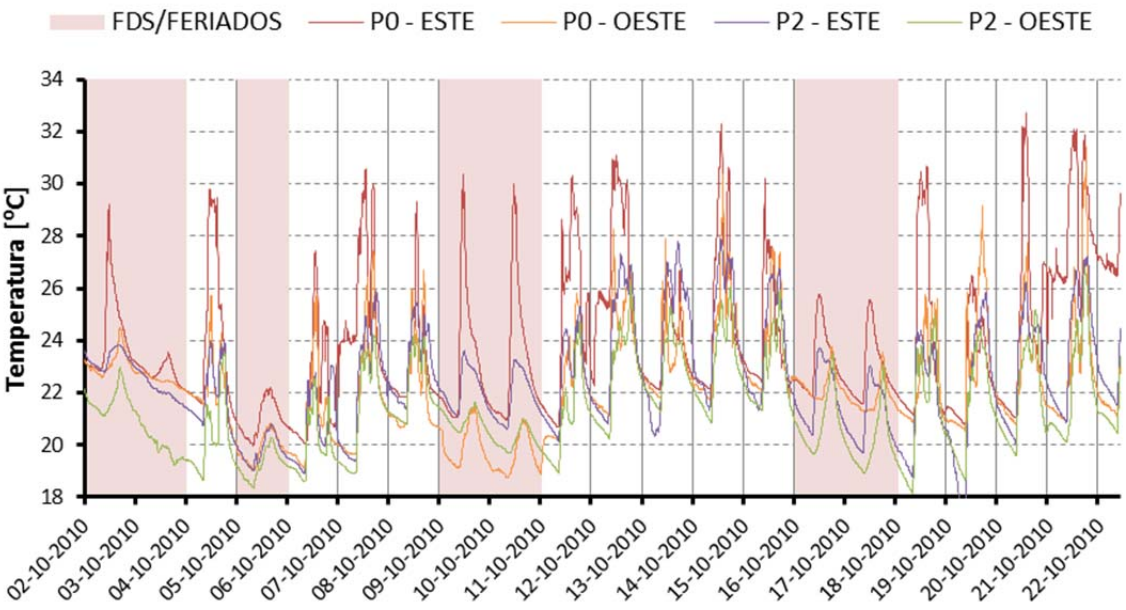
	P0-SUL	P2-NORTE	P2-SUL	P2	ESCOLA TOTAIS
média	23,04	23,78	23,89	23,84	23,57
máximo	24,27	26,38	25,89	26,38	26,38
mínimo	21,44	19,89	21,25	19,89	19,89
desvio padrão	0,61	1,27	0,88	1,09	1,03

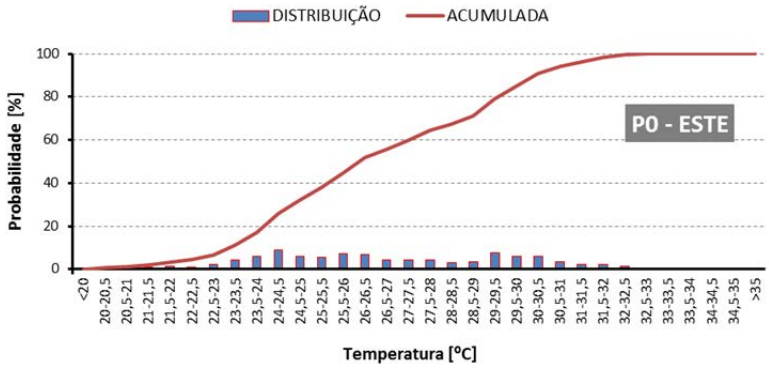


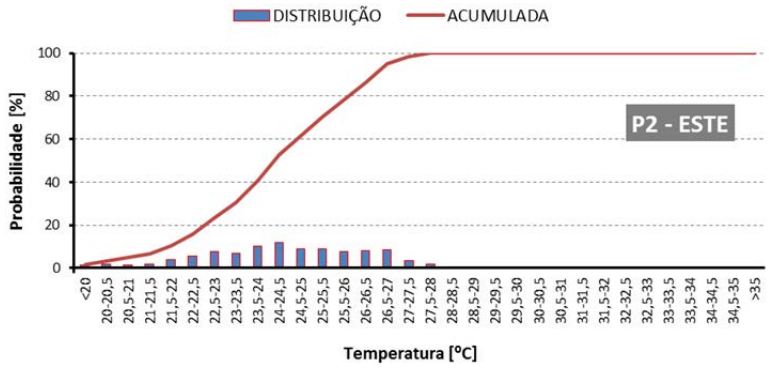
	P0-SUL	P2-NORTE	P2-SUL	P2	ESCOLA TOTAIS
média	57,93	55,66	58,51	57,09	57,37
máximo	75,08	68,73	80,44	80,44	80,44
mínimo	36,65	35,31	37,24	35,31	35,31
desvio padrão	9,49	8,65	9,25	9,06	9,22

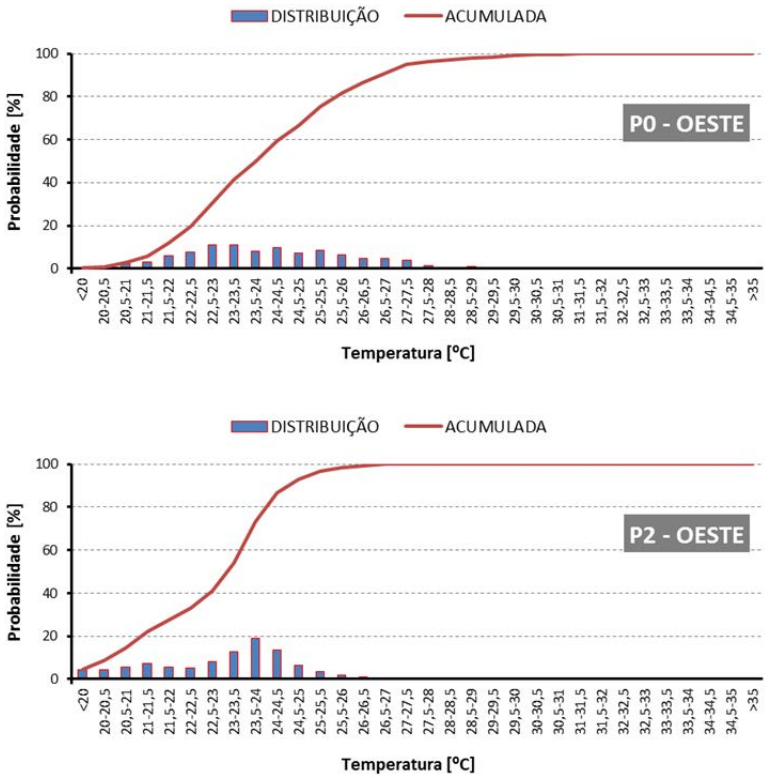


- Escola III-B

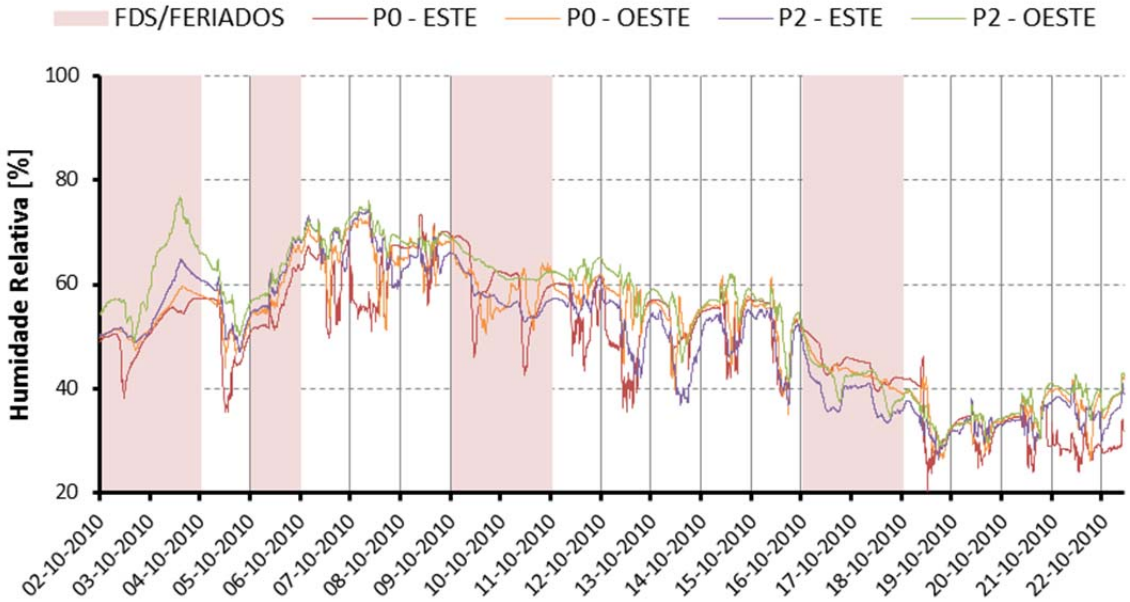

FDS/FERIADOS
P0 - ESTE
P0 - OESTE
P2 - ESTE
P2 - OESTE
Temperatura [ºC]
34
32
30
28
26
24
22
20
18
02-10-2010
03-10-2010
04-10-2010
05-10-2010
06-10-2010
07-10-2010
08-10-2010
09-10-2010
10-10-2010
11-10-2010
12-10-2010
13-10-2010
14-10-2010
15-10-2010
16-10-2010
17-10-2010
18-10-2010
19-10-2010
20-10-2010
21-10-2010
22-10-2010


DISTRIBUIÇÃO
ACUMULADA
Probabilidade [%]
100
80
60
40
20
0
P0 - ESTE
<20
20-20,5
20,5-21
21-21,5
21,5-22
22-22,5
22,5-23
23-23,5
23,5-24
24-24,5
24,5-25
25-25,5
25,5-26
26-26,5
26,5-27
27-27,5
27,5-28
28-28,5
28,5-29
29-29,5
29,5-30
30-30,5
30,5-31
31-31,5
31,5-32
32-32,5
32,5-33
33-33,5
33,5-34
34-34,5
34,5-35
>35
Temperatura [ºC]

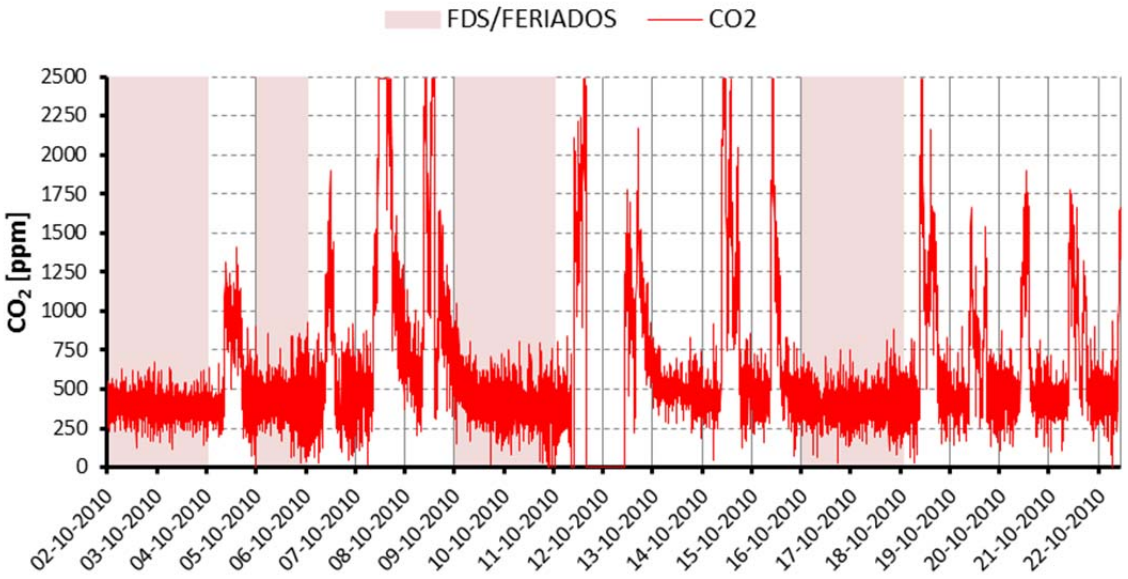

DISTRIBUIÇÃO
ACUMULADA
Probabilidade [%]
100
80
60
40
20
0
P2 - ESTE
<20
20-20,5
20,5-21
21-21,5
21,5-22
22-22,5
22,5-23
23-23,5
23,5-24
24-24,5
24,5-25
25-25,5
25,5-26
26-26,5
26,5-27
27-27,5
27,5-28
28-28,5
28,5-29
29-29,5
29,5-30
30-30,5
30,5-31
31-31,5
31,5-32
32-32,5
32,5-33
33-33,5
33,5-34
34-34,5
34,5-35
>35
Temperatura [ºC]

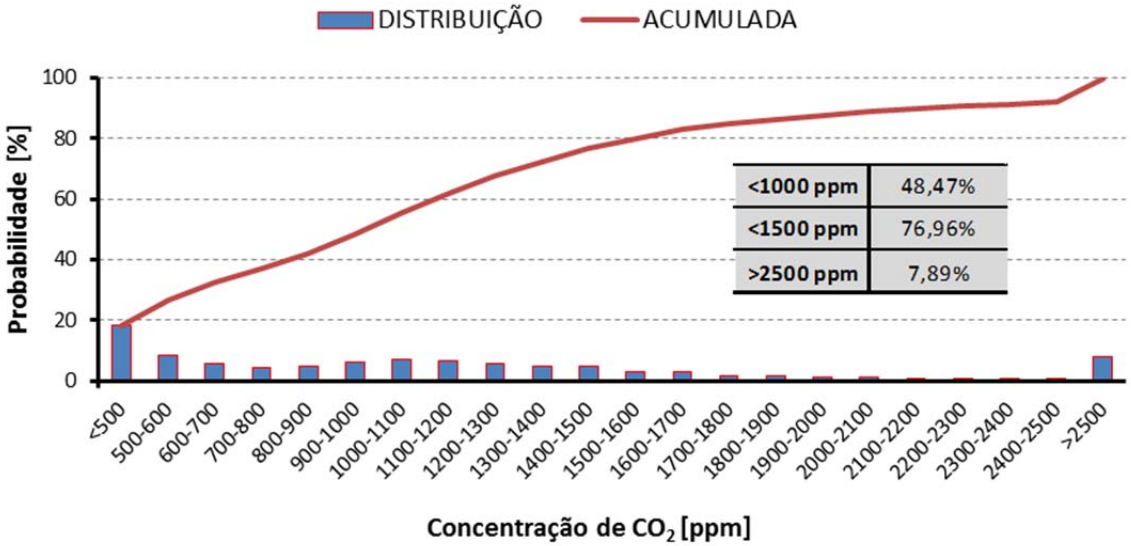


	P0-ESTE	P0-OESTE	P0	P2-ESTE	P2-OESTE	P2	ESCOLA TOTAIS
média	26,74	24,21	25,47	24,35	22,97	23,66	24,57
máximo	32,72	31,43	32,72	27,92	26,82	27,92	32,72
mínimo	20,08	19,29	19,29	17,75	18,58	17,75	17,75
desvio padrão	2,79	1,98	2,73	1,83	1,59	1,85	2,50

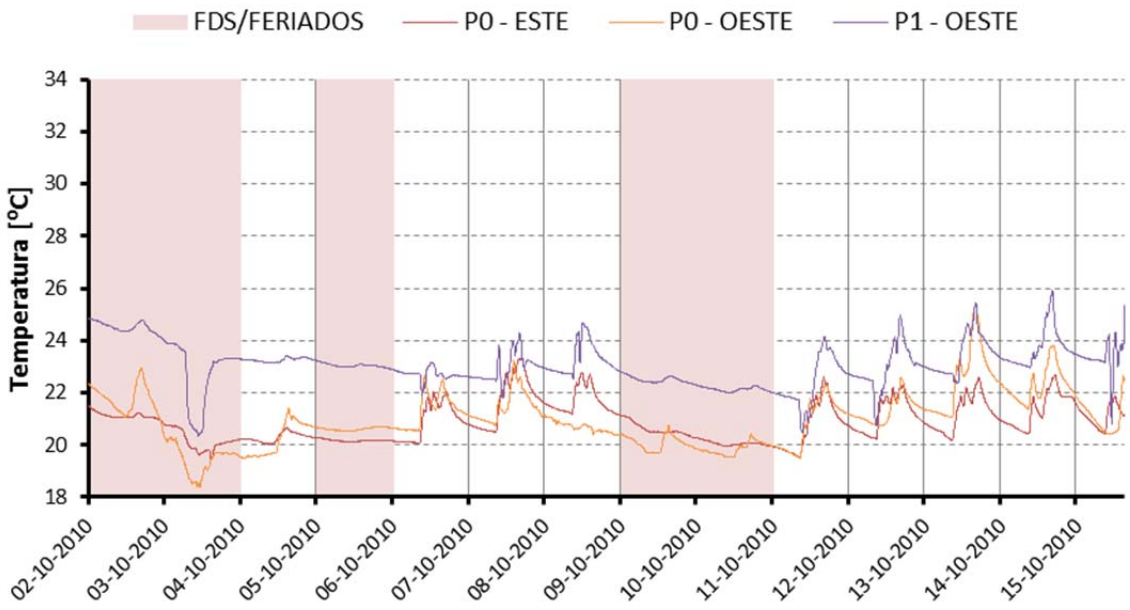


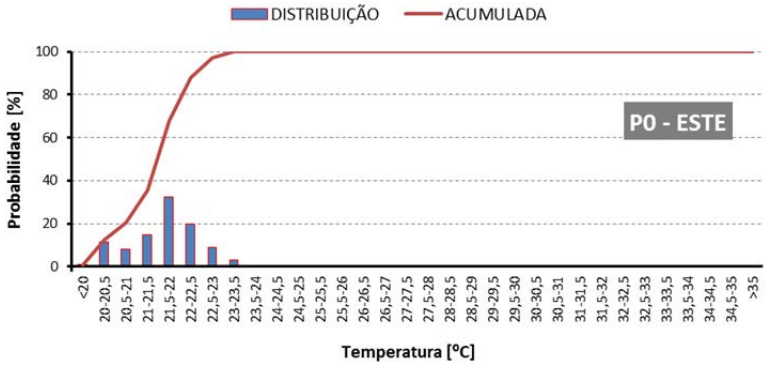
	P0-ESTE	P0-OESTE	P0	P2-ESTE	P2-OESTE	P2	ESCOLA TOTAIS
média	44,53	49,27	46,90	47,91	53,01	50,46	48,68
máximo	73,51	73,25	73,51	75,72	75,97	75,97	75,97
mínimo	20,25	26,11	20,25	26,42	29,00	26,42	20,25
desvio padrão	12,72	12,28	12,72	13,20	13,25	13,47	13,22

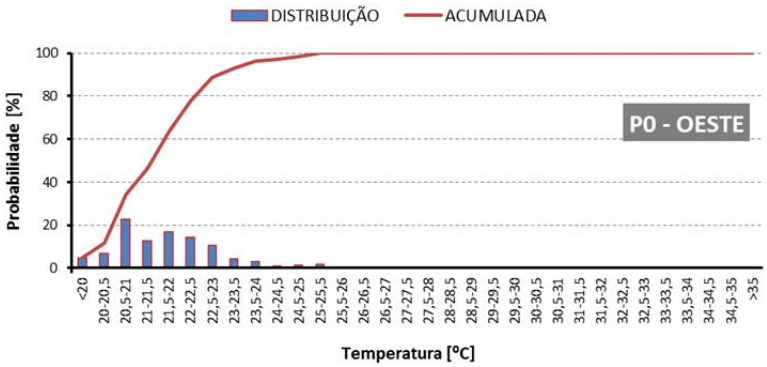


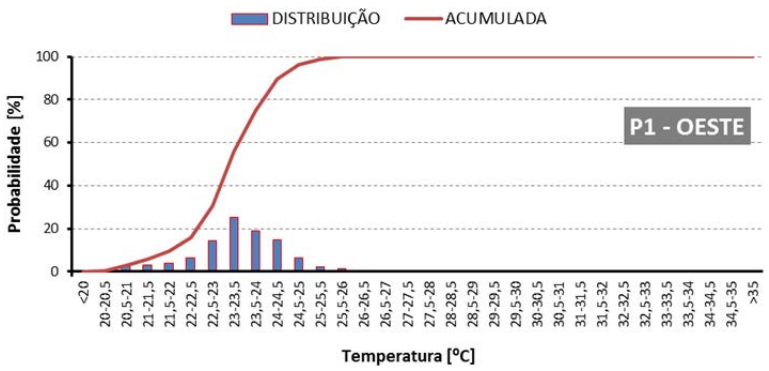


- Escola III-C

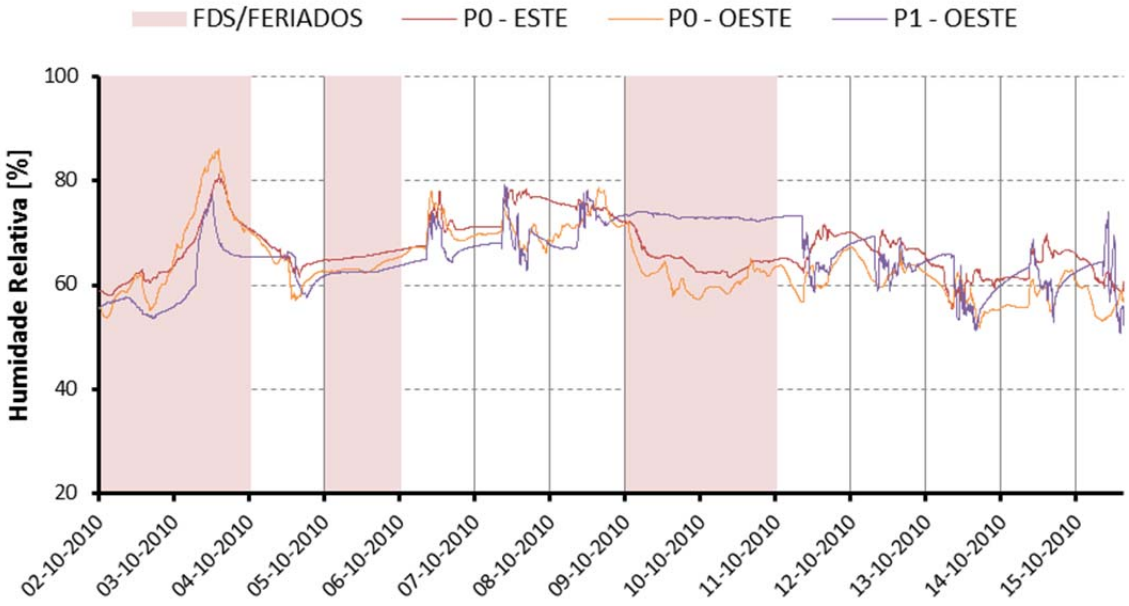

FDS/FERIADOS
P0 - ESTE
P0 - OESTE
P1 - OESTE
Temperatura [ºC]
34
32
30
28
26
24
22
20
18
02-10-2010
03-10-2010
04-10-2010
05-10-2010
06-10-2010
07-10-2010
08-10-2010
09-10-2010
10-10-2010
11-10-2010
12-10-2010
13-10-2010
14-10-2010
15-10-2010


DISTRIBUIÇÃO
ACUMULADA
Probabilidade [%]
100
80
60
40
20
0
P0 - ESTE
<20
20-20,5
20,5-21
21-21,5
21,5-22
22-22,5
22,5-23
23-23,5
23,5-24
24-24,5
24,5-25
25-25,5
25,5-26
26-26,5
26,5-27
27-27,5
27,5-28
28-28,5
28,5-29
29-29,5
29,5-30
30-30,5
30,5-31
31-31,5
31,5-32
32-32,5
32,5-33
33-33,5
33,5-34
34-34,5
34,5-35
>35
Temperatura [ºC]

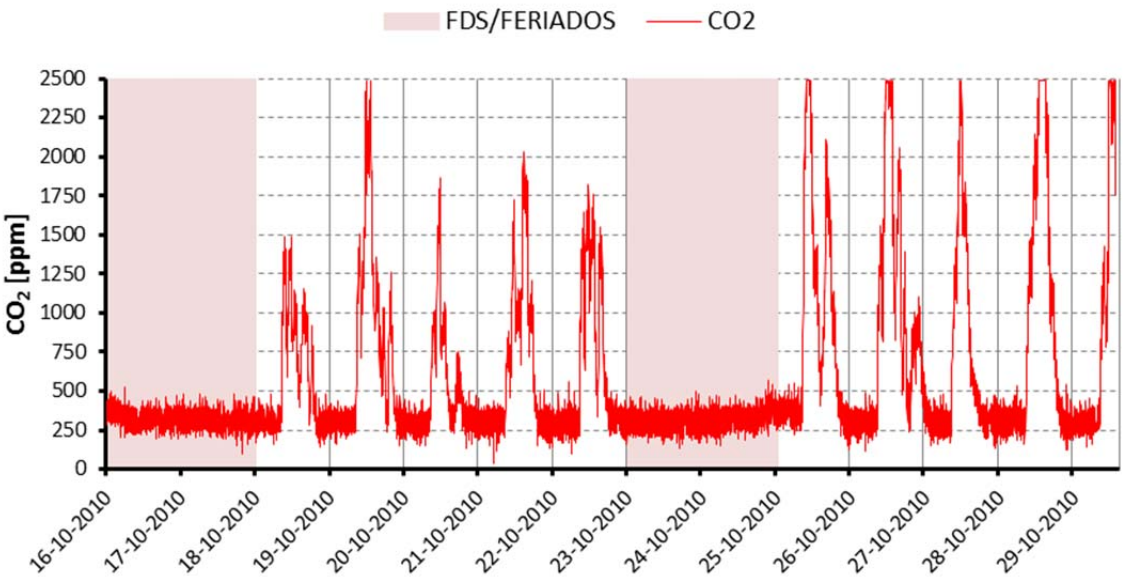

DISTRIBUIÇÃO
ACUMULADA
Probabilidade [%]
100
80
60
40
20
0
P0 - OESTE
<20
20-20,5
20,5-21
21-21,5
21,5-22
22-22,5
22,5-23
23-23,5
23,5-24
24-24,5
24,5-25
25-25,5
25,5-26
26-26,5
26,5-27
27-27,5
27,5-28
28-28,5
28,5-29
29-29,5
29,5-30
30-30,5
30,5-31
31-31,5
31,5-32
32-32,5
32,5-33
33-33,5
33,5-34
34-34,5
34,5-35
>35
Temperatura [ºC]

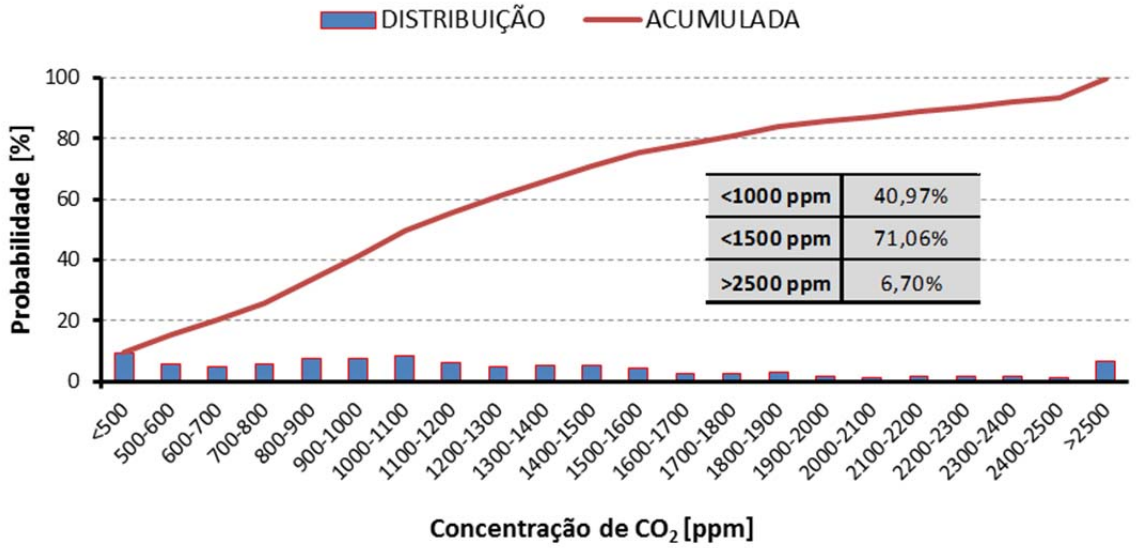


	P0-ESTE	P0-OESTE	P0	P1-OESTE	ESCOLA TOTAIS
média	21,63	21,69	21,66	23,35	22,22
máximo	23,33	25,40	25,40	25,91	25,91
mínimo	19,53	19,51	19,51	20,46	19,51
desvio padrão	0,78	1,16	0,99	0,99	1,27



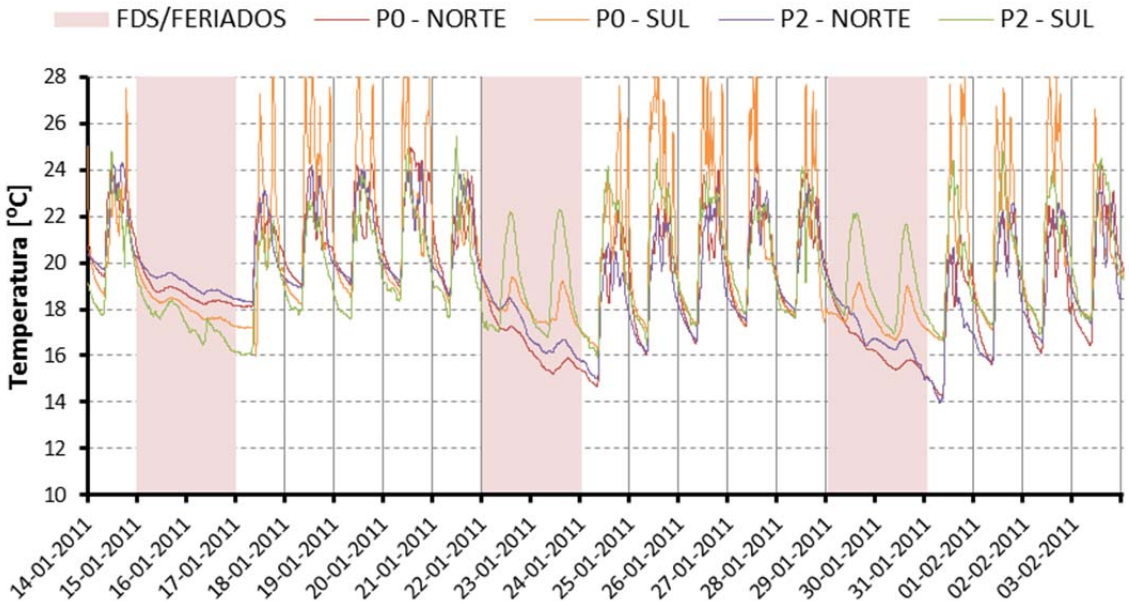
	P0-ESTE	P0-OESTE	P0	P1-OESTE	ESCOLA TOTAIS
média	68,23	64,06	66,14	64,68	65,65
máximo	78,45	78,59	78,59	79,26	79,26
mínimo	55,16	51,84	51,84	50,65	50,65
desvio padrão	5,80	6,99	6,75	6,14	6,59

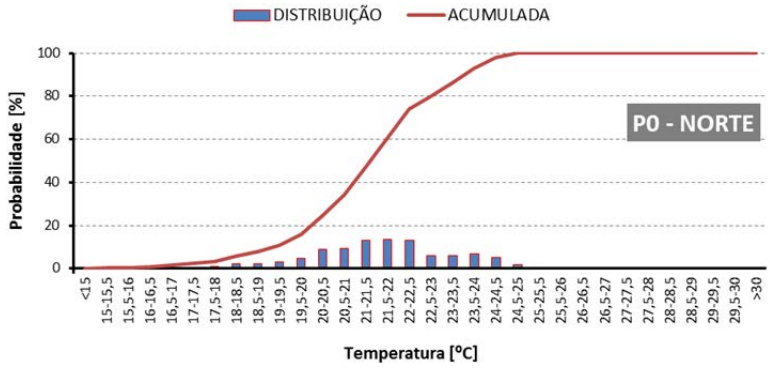

FDS/FERIADOS
CO2
CO2 [ppm]
2500
2250
2000
1750
1500
1250
1000
750
500
250
0
16-10-2010
17-10-2010
18-10-2010
19-10-2010
20-10-2010
21-10-2010
22-10-2010
23-10-2010
24-10-2010
25-10-2010
26-10-2010
27-10-2010
28-10-2010
29-10-2010

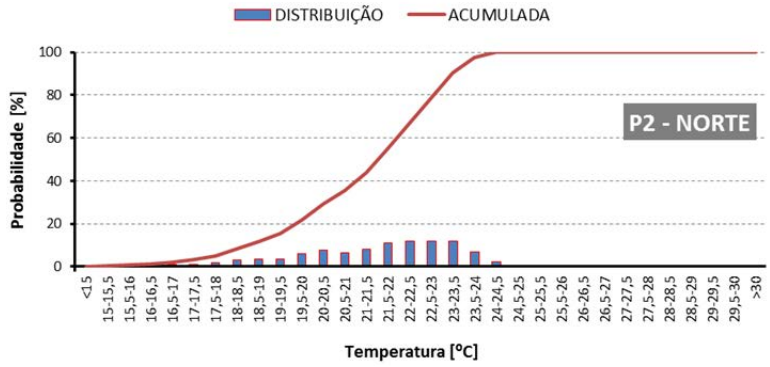

DISTRIBUIÇÃO
ACUMULADA
Probabilidade [%]
100
80
60
40
20
0
<1000 ppm
40,97%
<1500 ppm
71,06%
>2500 ppm
6,70%
<500
500-600
600-700
700-800
800-900
900-1000
1000-1100
1100-1200
1200-1300
1300-1400
1400-1500
1500-1600
1600-1700
1700-1800
1800-1900
1900-2000
2000-2100
2100-2200
2200-2300
2300-2400
2400-2500
>2500
Concentração de CO2 [ppm]

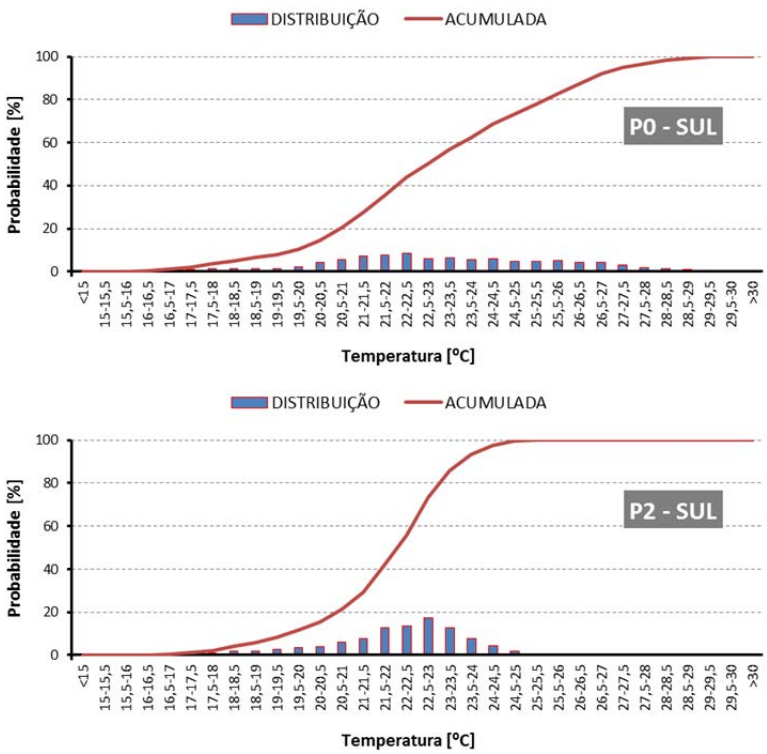
AIII.3 ESTAÇÃO DE ARREFECIMENTO (JANEIRO/FEVEREIRO)

- Escola II-A

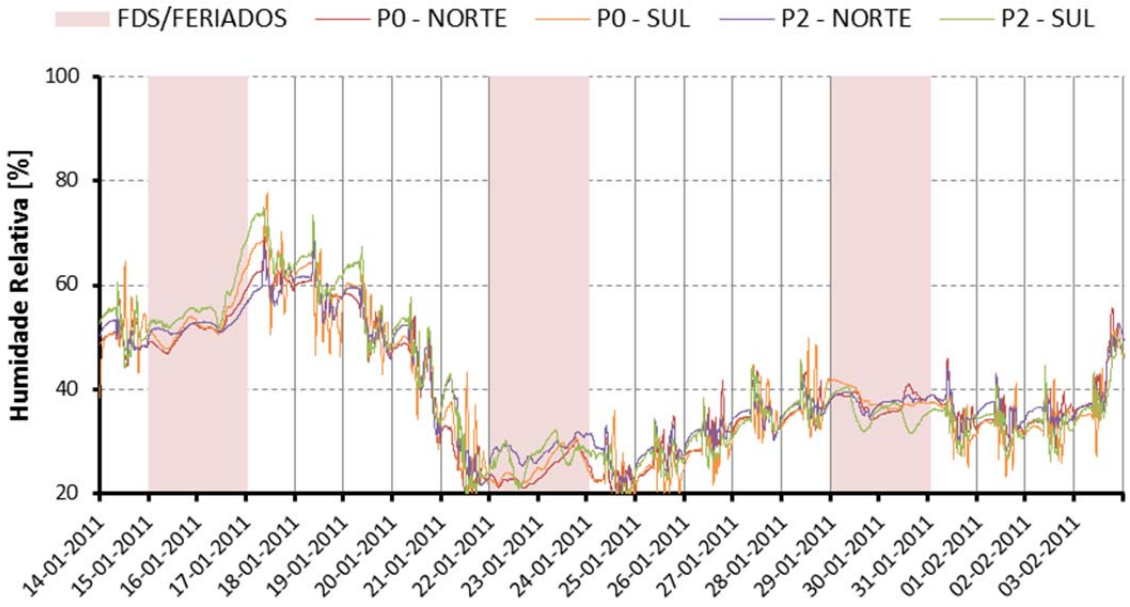




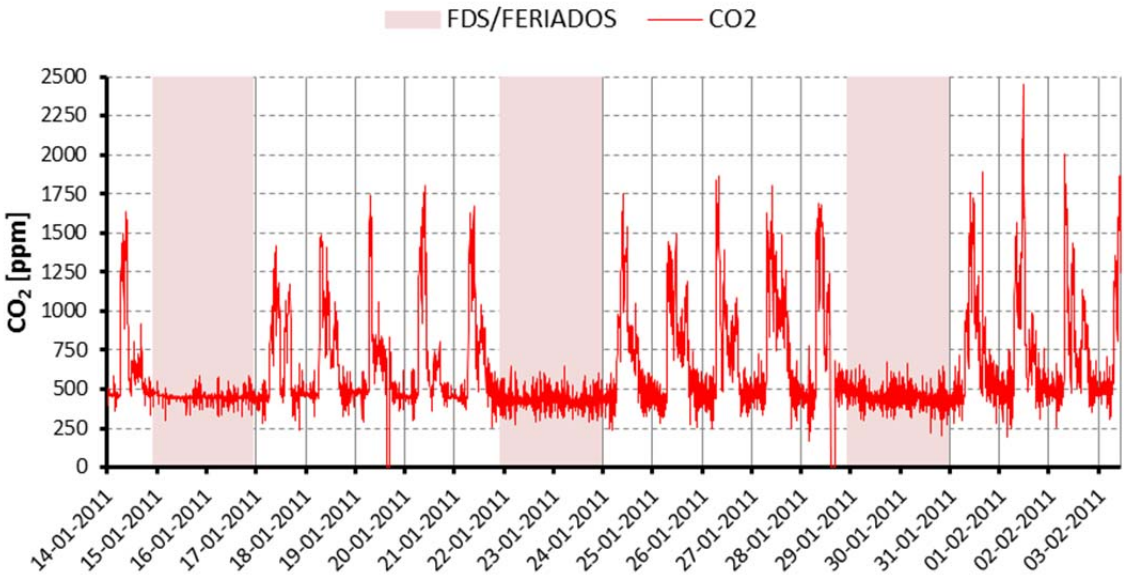


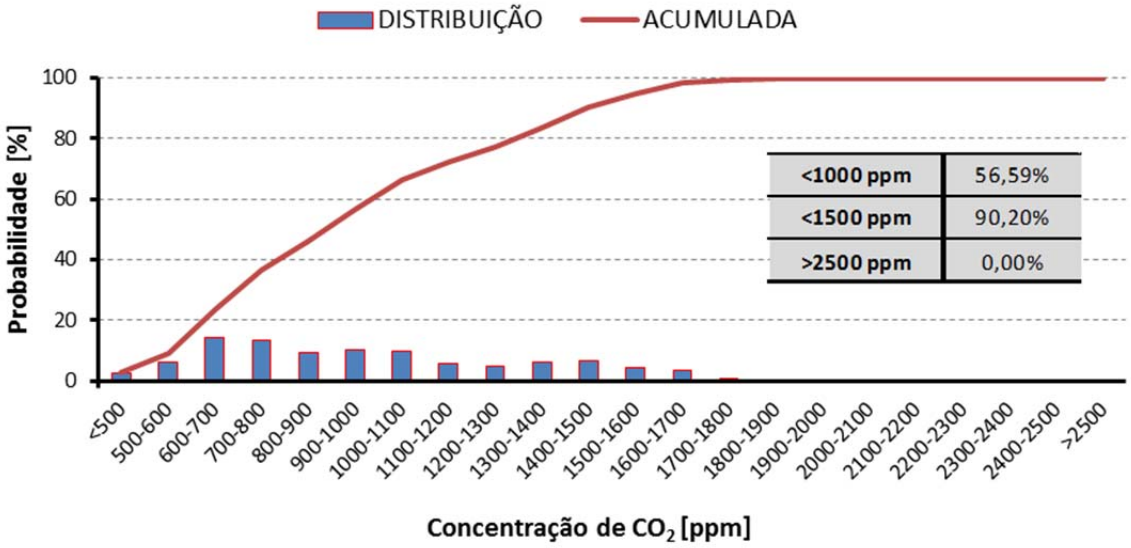


	P0-NORTE	P0-SUL	P0	P2-NORTE	P2-SUL	P2	ESCOLA TOTAIS
média	21,50	23,14	22,32	21,40	22,02	21,71	22,02
máximo	24,97	29,44	29,44	24,34	25,43	25,43	29,44
mínimo	14,51	15,96	14,51	14,60	16,34	14,60	14,51
desvio padrão	1,71	2,69	2,40	1,82	1,58	1,73	2,11

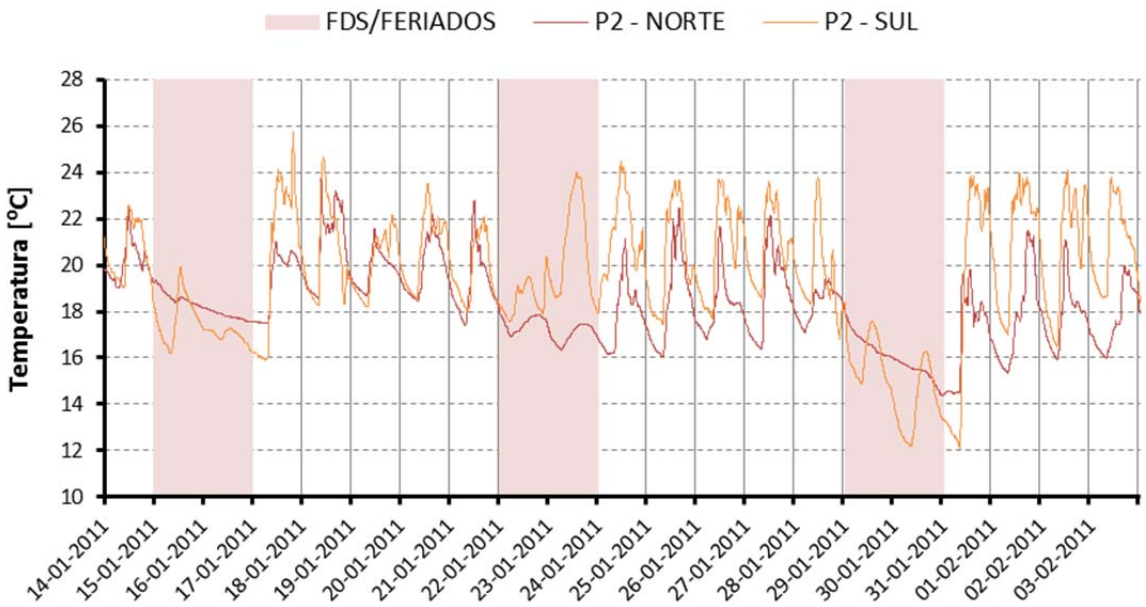


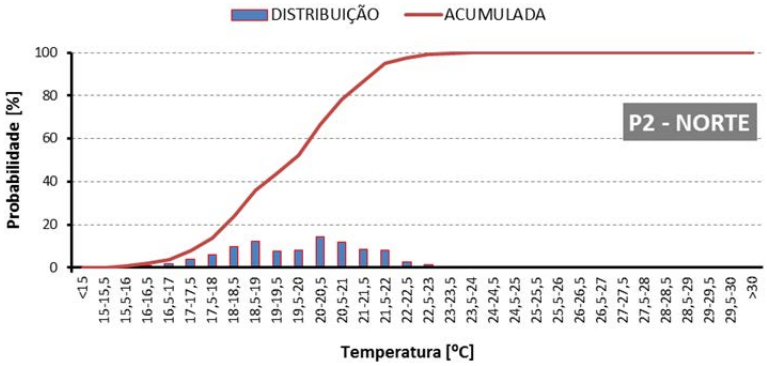
	P0-NORTE	P0-SUL	P0	P2-NORTE	P2-SUL	P2	ESCOLA TOTAIS
média	40,59	39,42	40,01	40,11	39,47	39,79	39,90
máximo	69,66	77,76	77,76	69,37	75,07	75,07	77,76
mínimo	17,50	20,02	17,50	19,01	17,39	17,39	17,39
desvio padrão	11,98	12,65	12,33	11,17	13,38	12,33	12,33

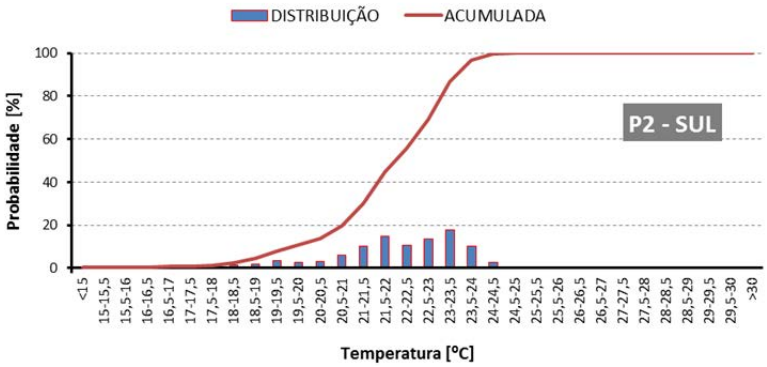




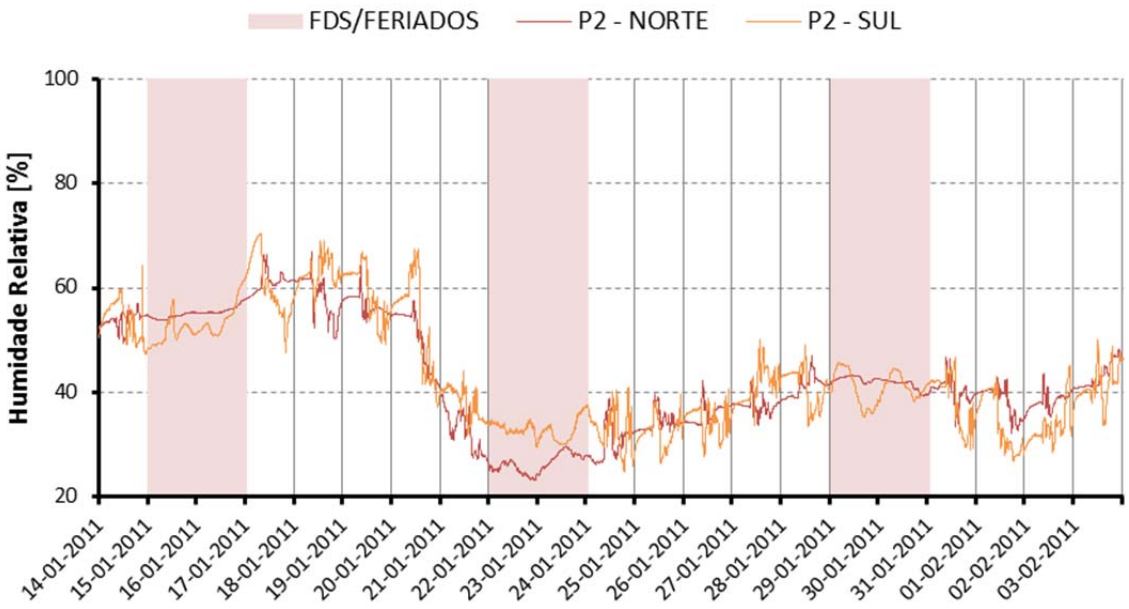
- Escola II-B



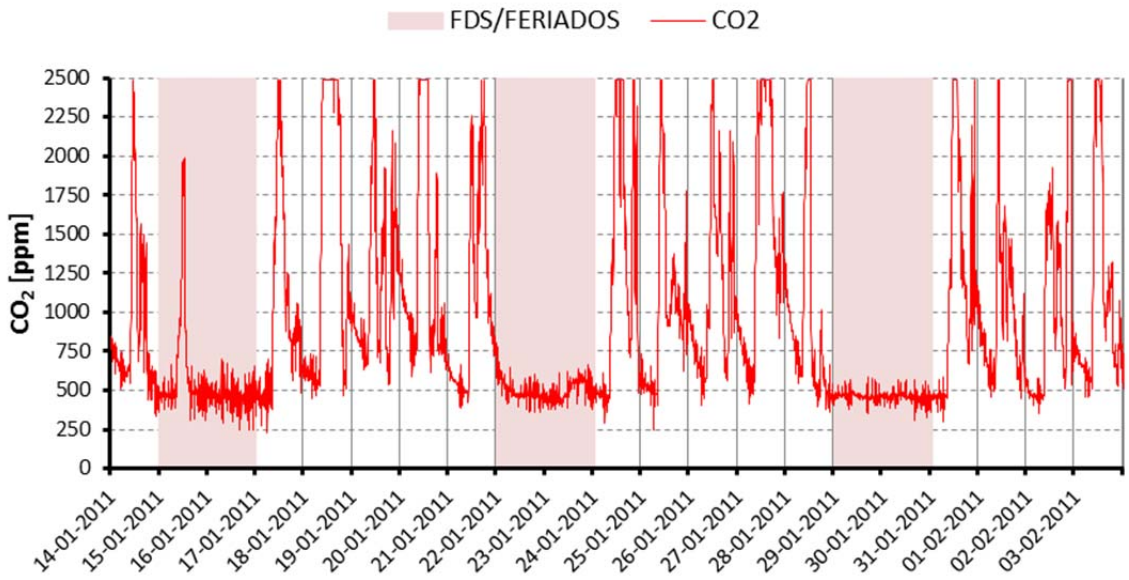


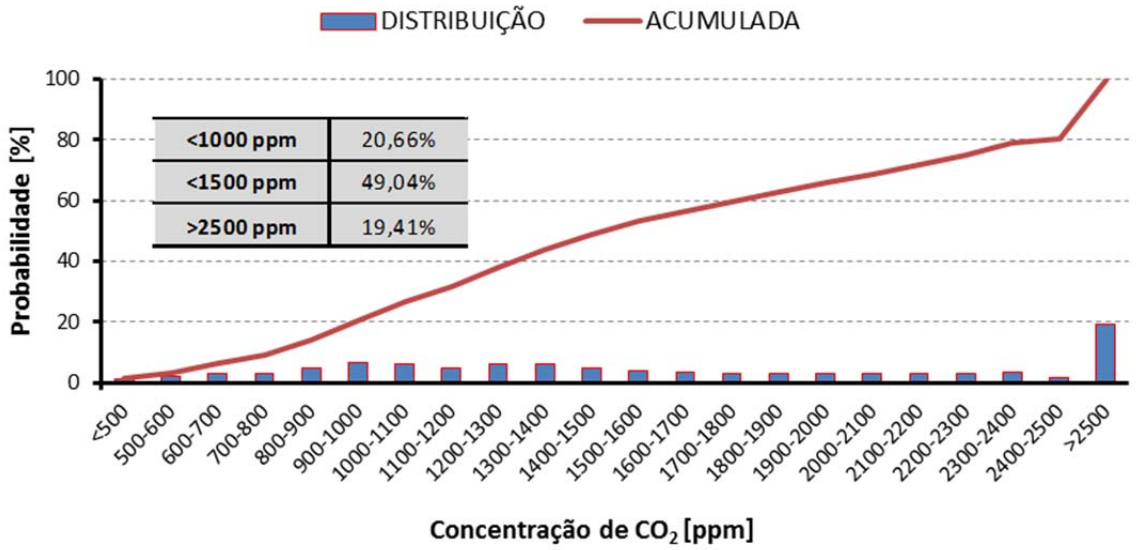


	P2-NORTE	P2-SUL	ESCOLA TOTAIS
média	19,72	22,01	20,87
máximo	23,74	24,70	24,70
mínimo	15,34	12,63	12,63
desvio padrão	1,54	1,53	1,91

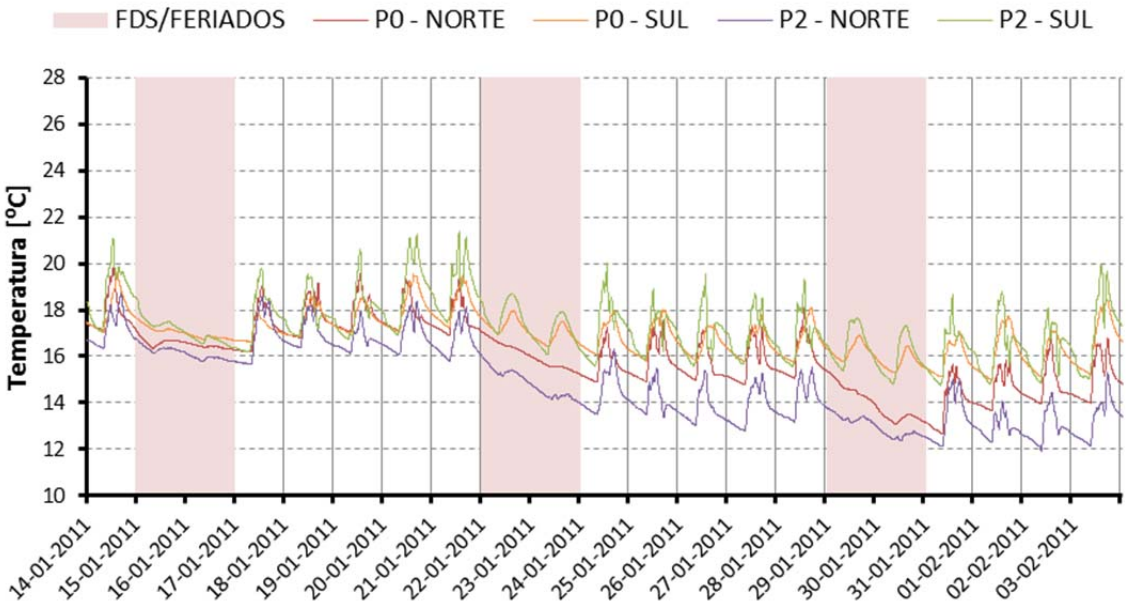


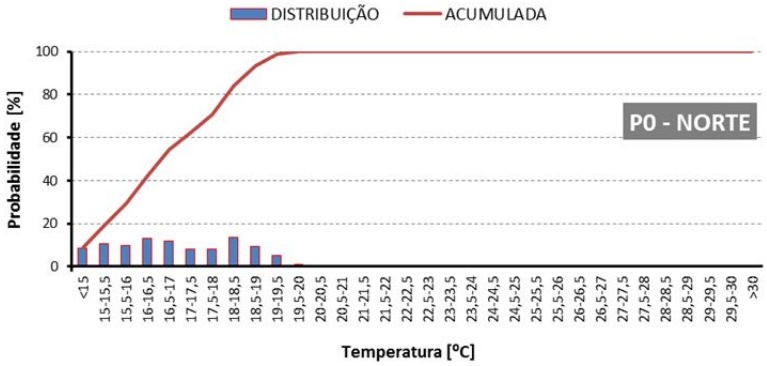
	P2-NORTE	P2-SUL	ESCOLA TOTAIS
média	43,99	43,80	43,89
máximo	66,97	69,05	69,05
mínimo	27,17	26,09	26,09
desvio padrão	9,74	11,85	10,85

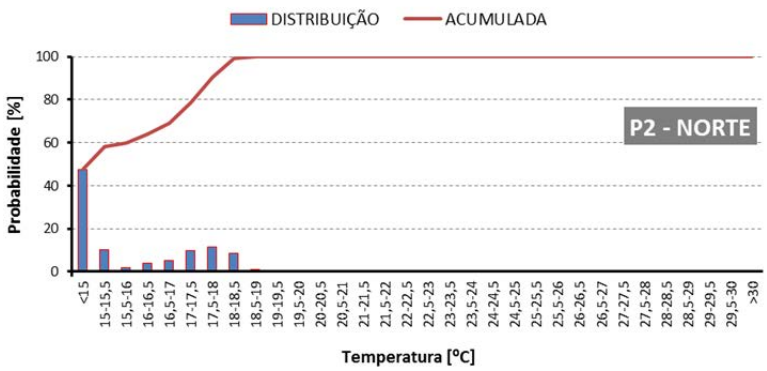


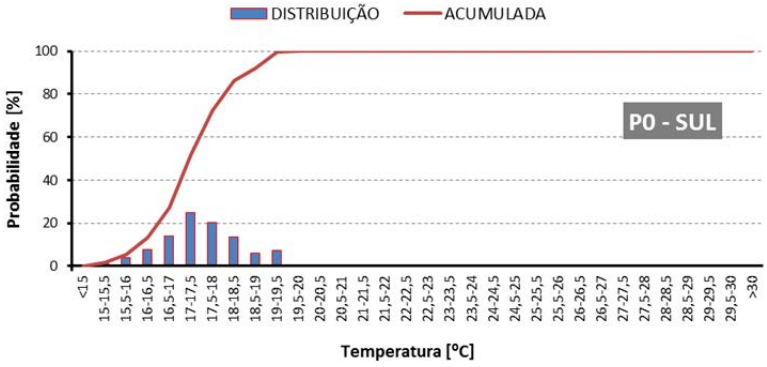

DISTRIBUIÇÃO
ACUMULADA
<1000 ppm 20,66%
<1500 ppm 49,04%
>2500 ppm 19,41%
Probabilidade [%]
Concentração de CO2 [ppm]

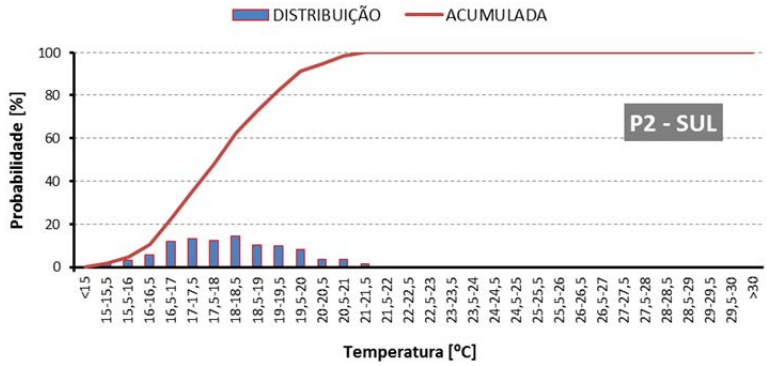
- Escola III-A


FDS/FERIADOS
P0 - NORTE
P0 - SUL
P2 - NORTE
P2 - SUL
Temperatura [ºC]

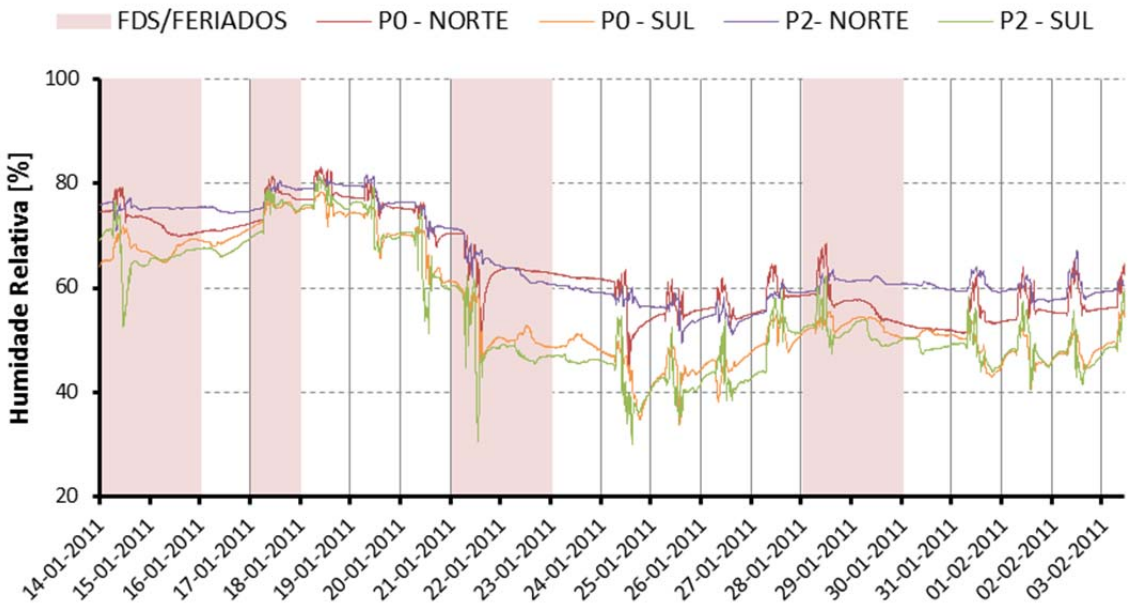

DISTRIBUIÇÃO
ACUMULADA
P0 - NORTE
Probabilidade [%]
Temperatura [ºC]



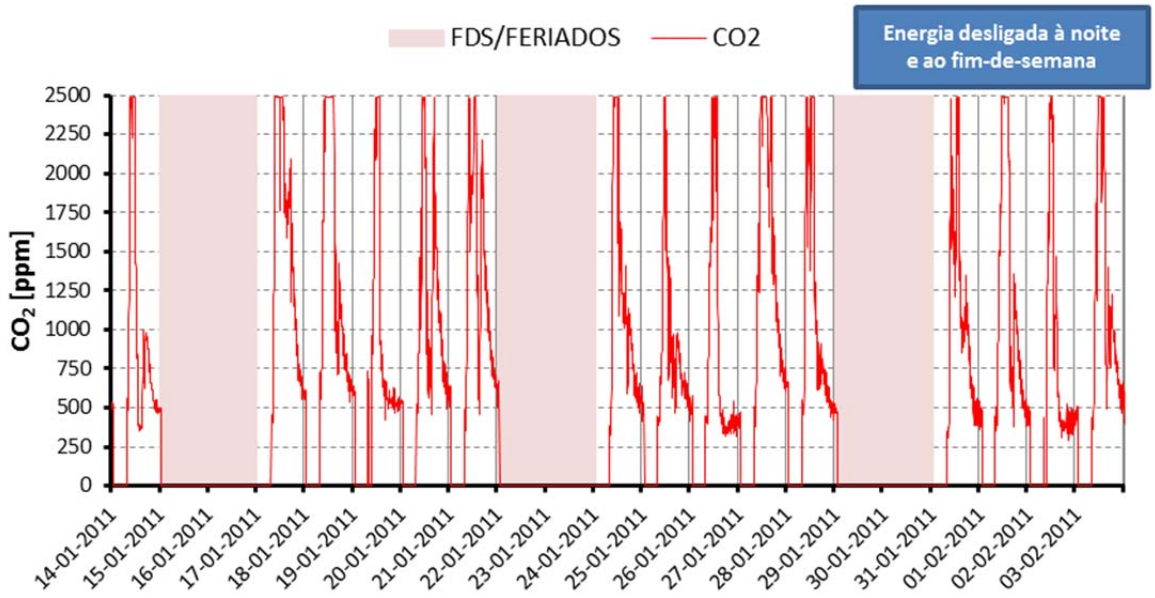


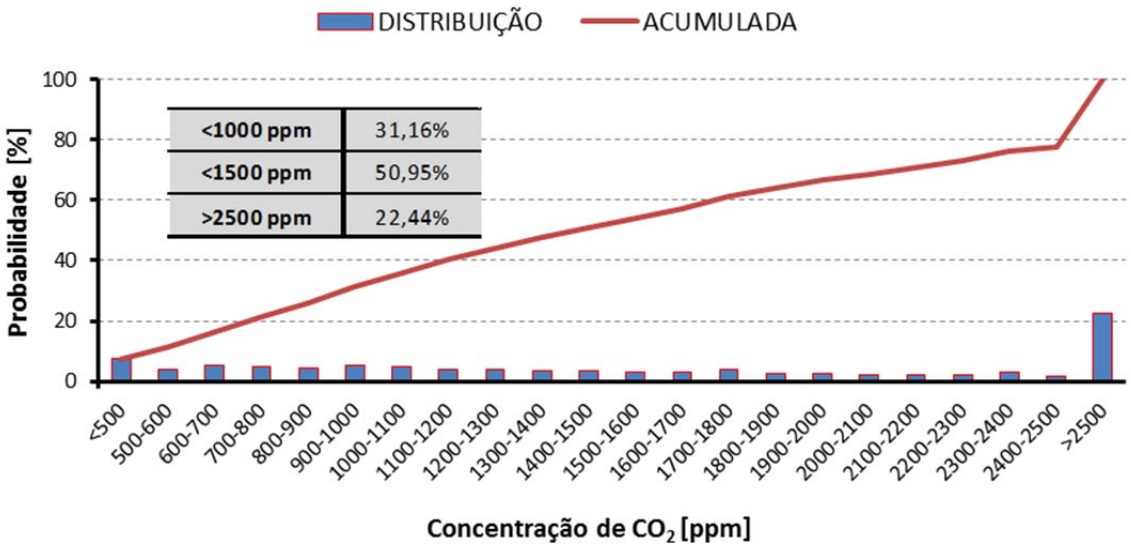


	P0-NORTE	P0-SUL	P0	P2-NORTE	P2-SUL	P2	ESCOLA TOTAIS
média	16,90	17,50	17,20	15,51	18,13	16,82	17,01
máximo	19,87	19,60	19,87	18,72	21,37	21,37	21,37
mínimo	12,68	14,96	12,68	11,90	14,89	11,90	11,90
desvio padrão	1,42	0,92	1,23	1,78	1,34	2,05	1,70

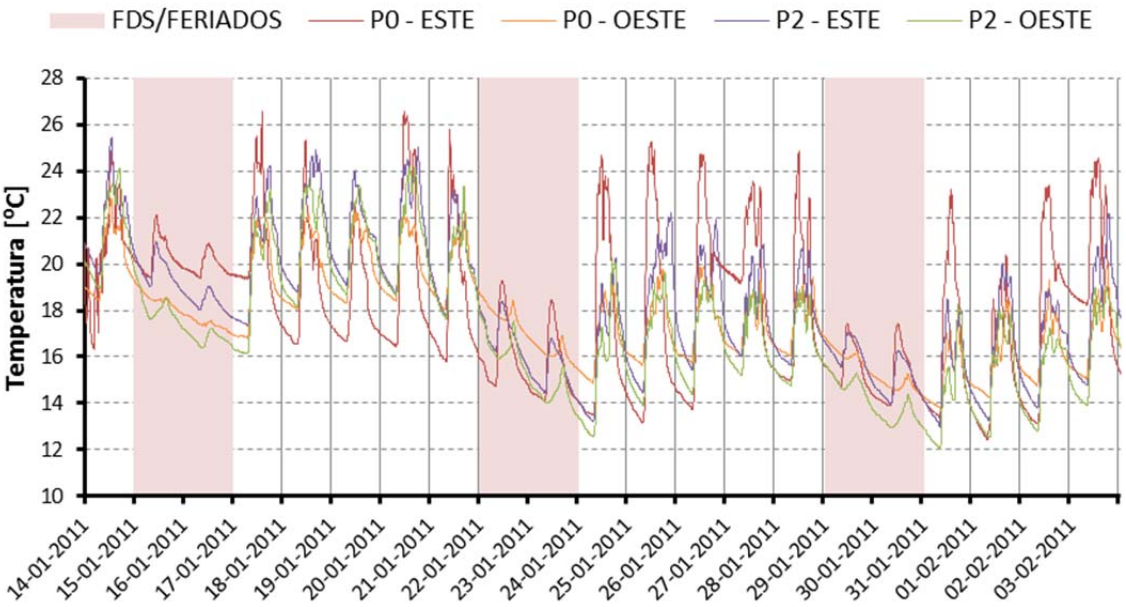


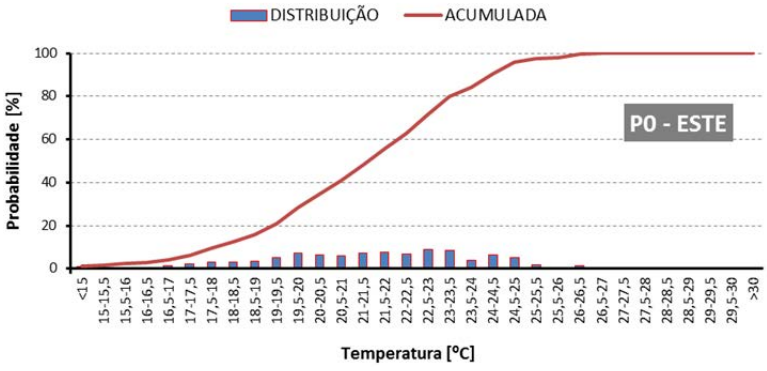
	P0-NORTE	P0-SUL	P0	P2-NORTE	P2-SUL	P2	ESCOLA TOTAIS
média	65,42	57,24	61,33	65,85	56,46	61,16	61,24
máximo	83,20	78,46	83,20	81,50	81,37	81,50	83,20
mínimo	44,97	33,82	33,82	49,40	30,01	30,01	30,01
desvio padrão	9,24	11,63	11,27	8,80	12,67	11,87	11,58

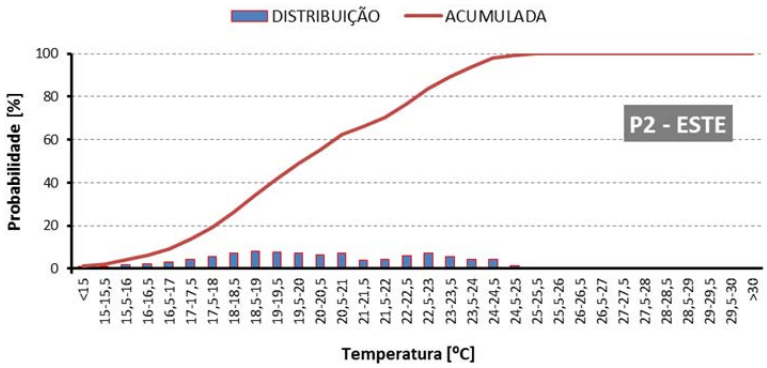


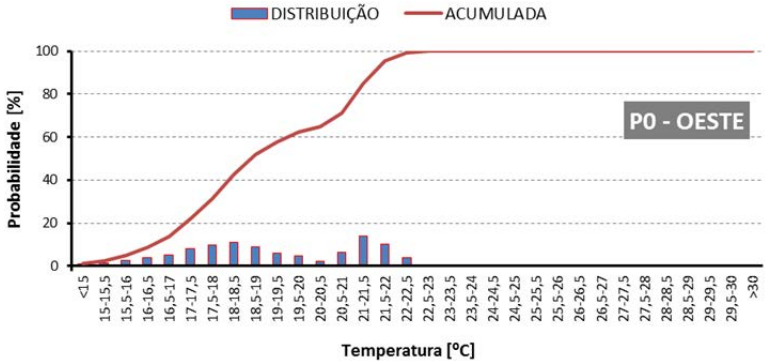

DISTRIBUIÇÃO
ACUMULADA
<1000 ppm
31,16%
<1500 ppm
50,95%
>2500 ppm
22,44%
Probabilidade [%]
Concentração de CO2 [ppm]

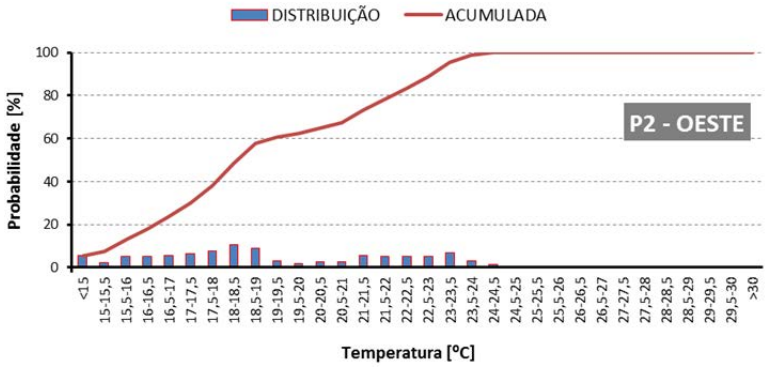
- Escola III-B


FDS/FERIADOS
P0 - ESTE
P0 - OESTE
P2 - ESTE
P2 - OESTE
Temperatura [°C]

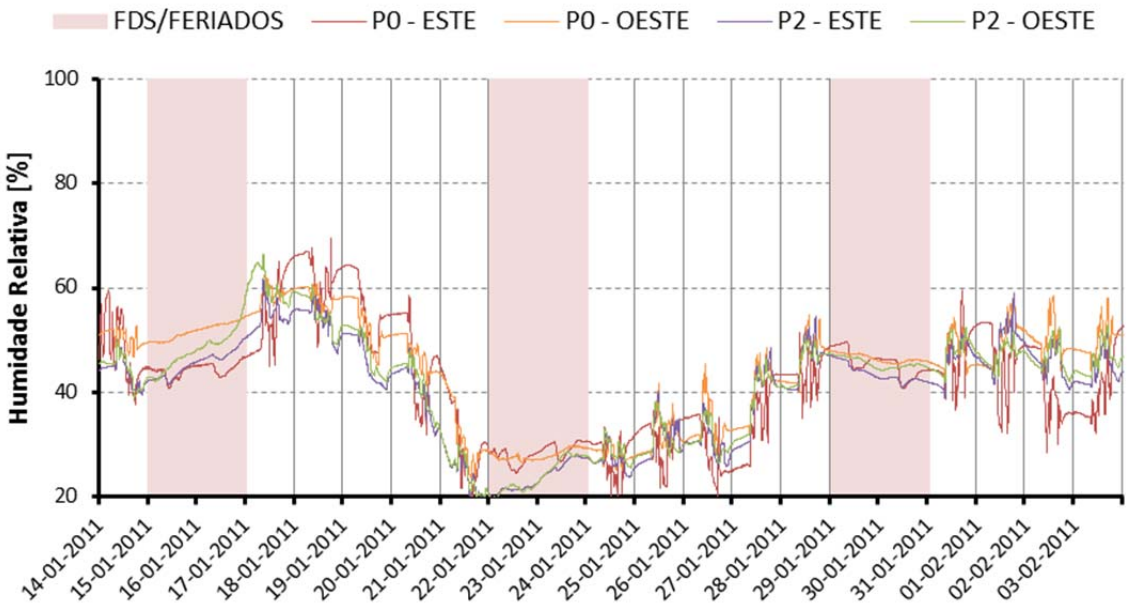

DISTRIBUIÇÃO
ACUMULADA
P0 - ESTE
Probabilidade [%]
Temperatura [°C]



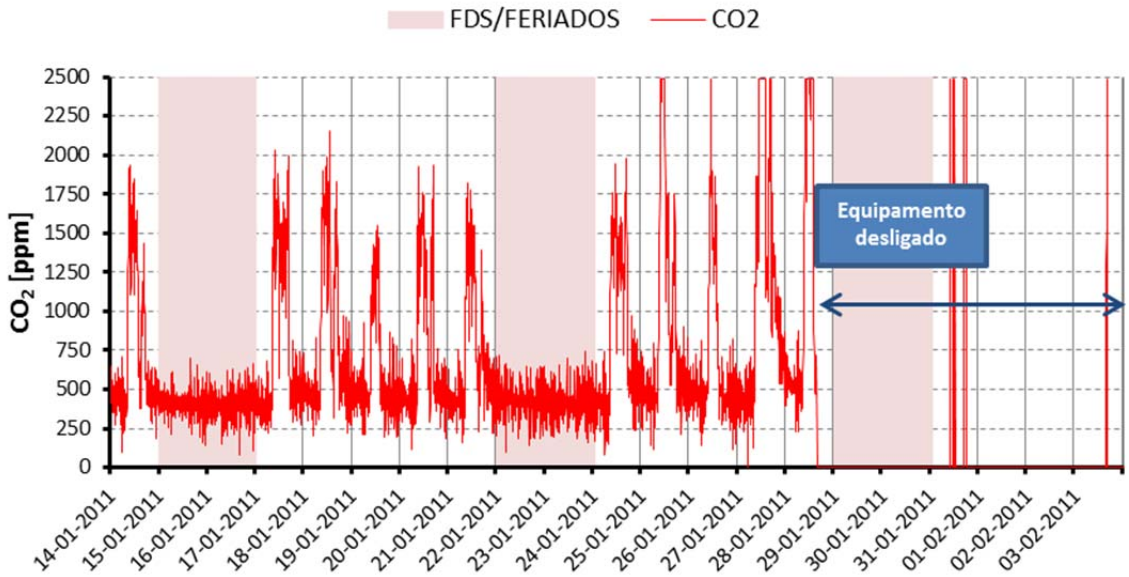


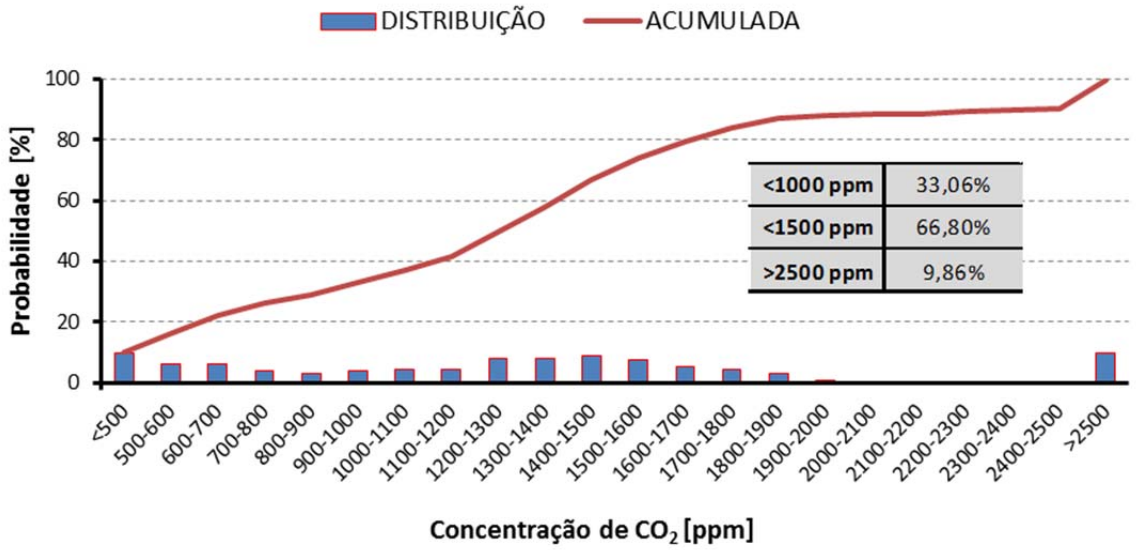


	P0-ESTE	P0-OESTE	P0	P2-ESTE	P2-OESTE	P2	ESCOLA TOTAIS
média	21,42	19,17	20,30	20,23	19,14	19,69	19,99
máximo	26,55	22,78	26,55	25,43	24,20	25,43	26,55
mínimo	13,21	13,76	13,21	13,28	12,05	12,05	12,05
desvio padrão	2,44	1,98	2,49	2,46	2,75	2,67	2,60

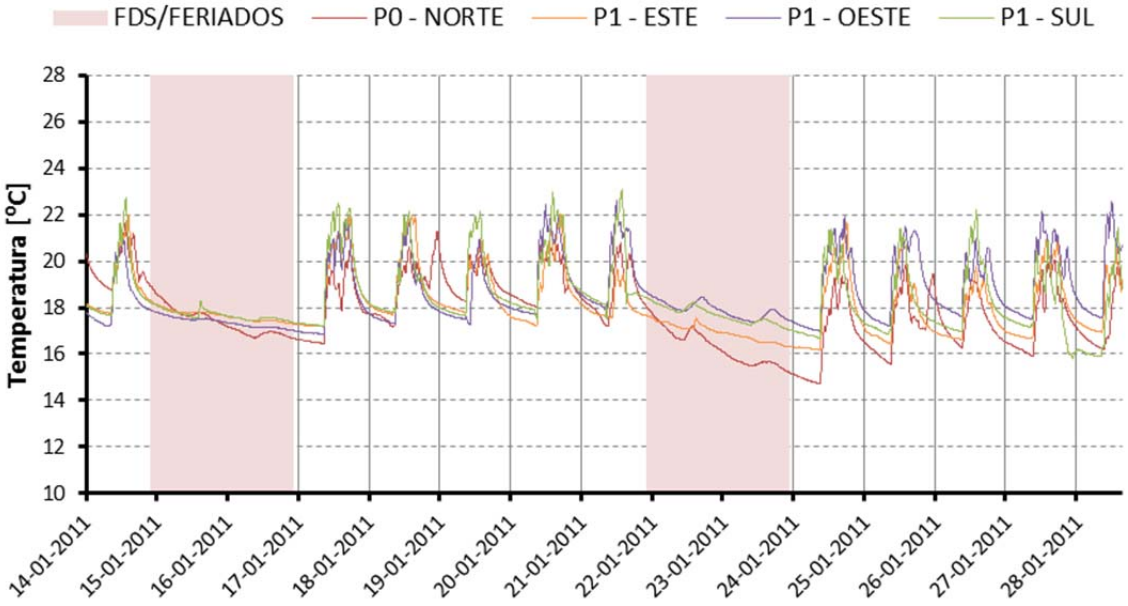


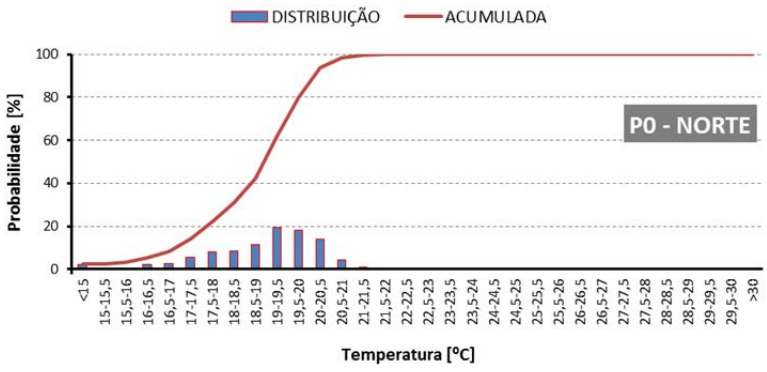
	P0-ESTE	P0-OESTE	P0	P2-ESTE	P2-OESTE	P2	ESCOLA TOTAIS
média	40,53	45,78	43,15	43,08	43,69	43,38	43,27
máximo	67,73	62,47	67,73	61,77	66,48	66,48	67,73
mínimo	17,02	23,83	17,02	19,76	19,65	19,65	17,02
desvio padrão	11,23	10,04	10,97	9,60	9,64	9,62	10,32

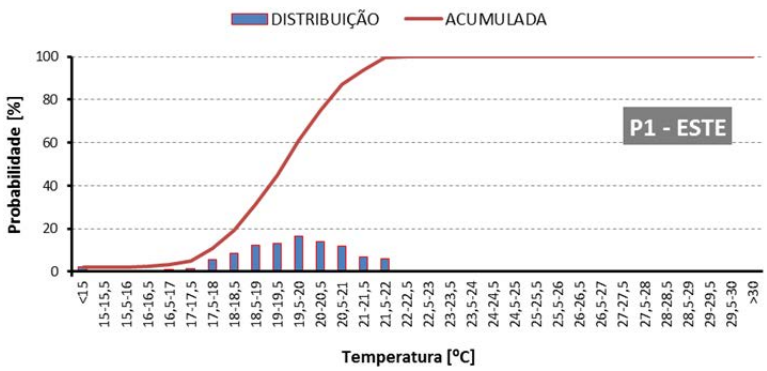


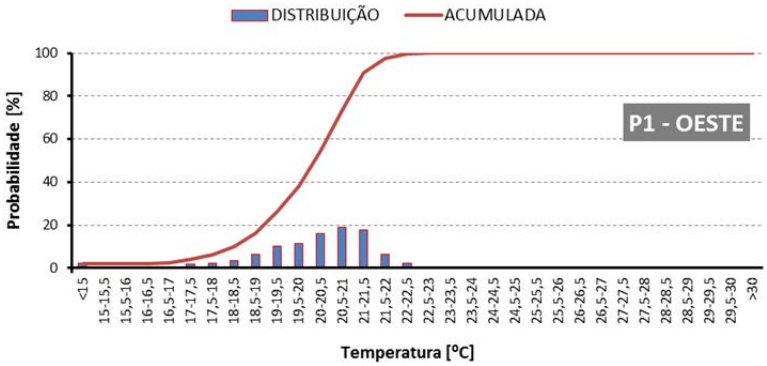

DISTRIBUIÇÃO
ACUMULADA
Probabilidade [%]
<1000 ppm 33,06%
<1500 ppm 66,80%
>2500 ppm 9,86%
Concentração de CO2 [ppm]

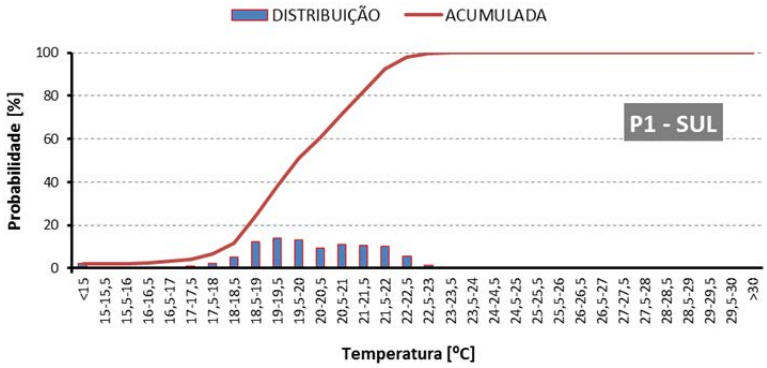
- Escola III-C


FDS/FERIADOS
P0 - NORTE
P1 - ESTE
P1 - OESTE
P1 - SUL
Temperatura [ºC]

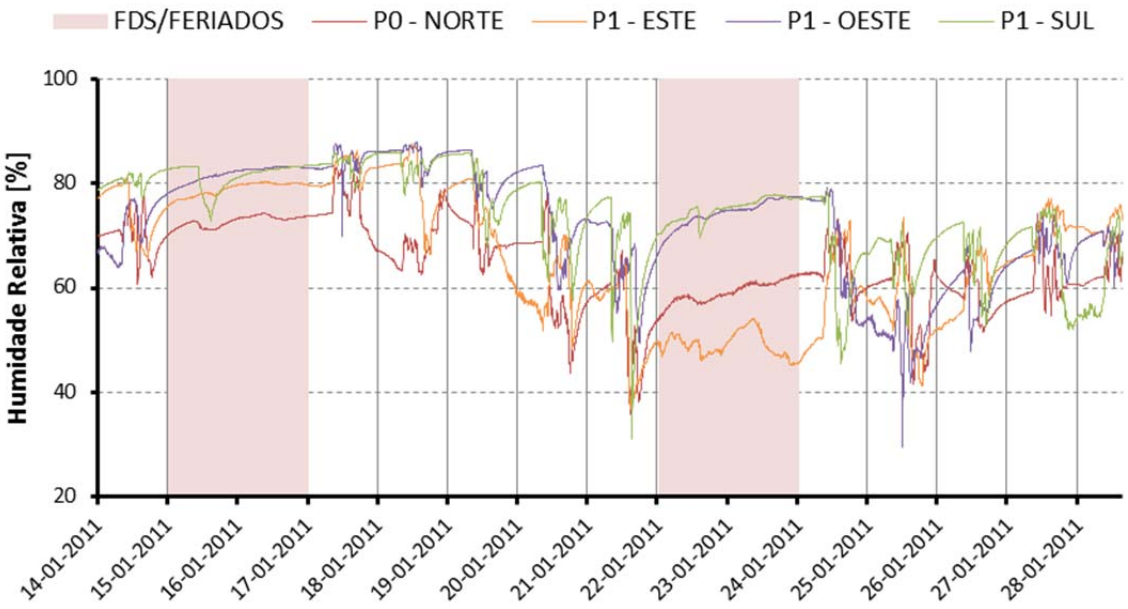

DISTRIBUIÇÃO
ACUMULADA
Probabilidade [%]
P0 - NORTE
Temperatura [ºC]



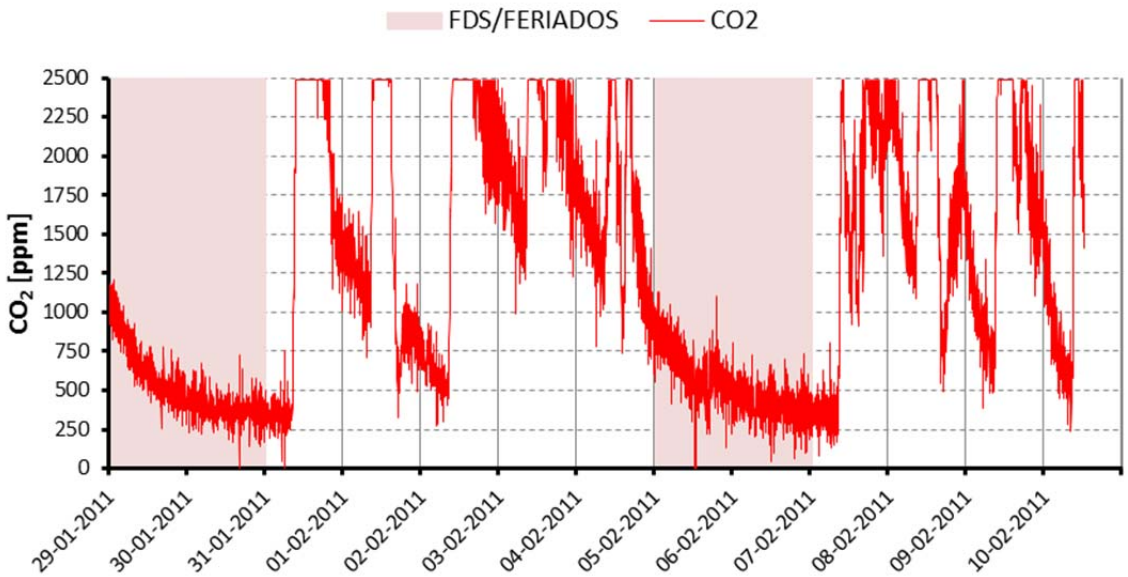


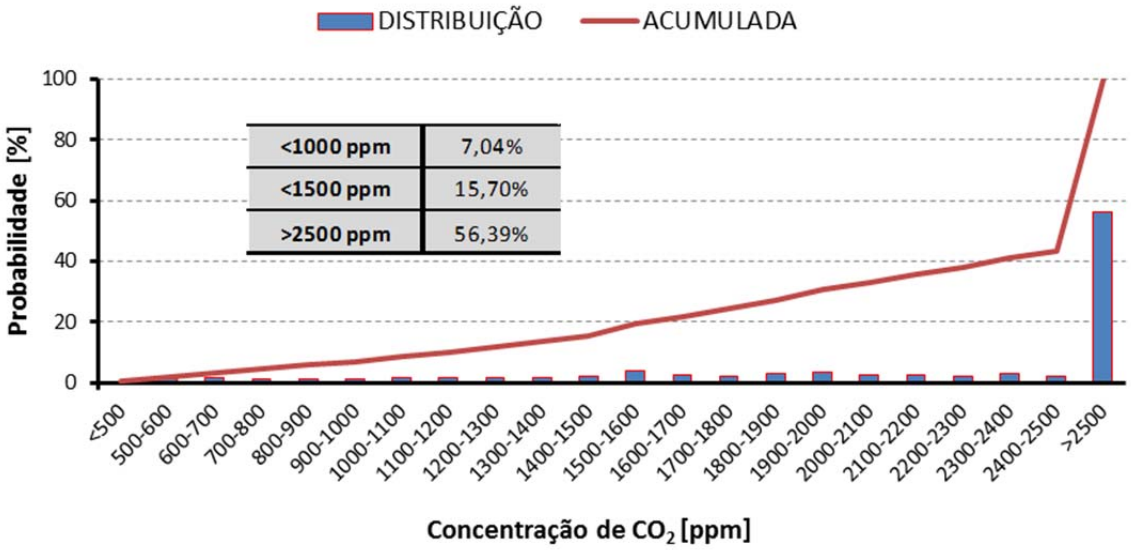


	P0-NORTE	P1-ESTE	P1-OESTE	P1-SUL	P1	ESCOLA TOTAIS
média	19,01	19,65	20,23	20,11	20,00	19,75
máximo	21,72	22,03	22,63	23,06	23,06	23,06
mínimo	14,75	16,18	16,87	16,34	16,18	14,75
desvio padrão	1,18	1,17	1,11	1,33	1,23	1,29



	P0-NORTE	P1-ESTE	P1-OESTE	P1-SUL	P1	ESCOLA TOTAIS
média	64,75	68,56	69,65	71,36	69,86	68,58
máximo	83,20	87,52	87,88	85,88	87,88	87,88
mínimo	35,86	36,84	29,52	31,09	29,52	29,52
desvio padrão	9,10	10,98	11,59	10,02	10,94	10,74




DISTRIBUIÇÃO
ACUMULADA
Probabilidade [%]
100
80
60
40
20
0
<1000 ppm
7,04%
<1500 ppm
15,70%
>2500 ppm
56,39%
<500
500-600
600-700
700-800
800-900
900-1000
1000-1100
1100-1200
1200-1300
1300-1400
1400-1500
1500-1600
1600-1700
1700-1800
1800-1900
1900-2000
2000-2100
2100-2200
2200-2300
2300-2400
2400-2500
>2500
Concentração de CO_2 [ppm]

ANEXO IV REDES NEURAIS ARTIFICIAS

AIV.1 CONJUNTO DE DADOS DE *INPUT – LATIN HYPERCUBE SAMPLING*

AIV.2 VALIDAÇÃO

AIV.1 CONJUNTO DE DADOS DE *INPUT – LATIN HYPERCUBE SAMPLING*

- Criação das RNA

CASO	U_{par}	U_{cob}	U_{vidro}	g	RPH
1	1.488	1.475	5.795	0.858	3.400
2	0.971	2.005	6.132	0.295	2.700
3	0.345	2.565	5.671	0.633	3.400
4	0.466	0.959	5.840	0.665	3.000
5	0.358	2.844	5.899	0.335	1.000
6	0.719	1.948	3.742	0.753	3.800
7	0.280	1.662	3.108	0.729	0.600
8	1.517	2.868	4.276	0.541	2.800
9	0.749	0.987	5.221	0.285	0.700
10	0.910	0.636	1.565	0.858	0.400
11	0.860	1.894	1.423	0.659	1.500
12	0.673	2.352	2.852	0.586	4.400
13	0.893	0.582	3.047	0.407	4.300
14	1.031	1.048	2.344	0.469	3.200
15	1.031	2.066	5.602	0.523	1.500
16	0.983	1.419	3.413	0.245	0.900
17	1.666	1.437	4.501	0.814	4.200
18	0.935	1.120	4.501	0.705	3.700
19	0.440	1.310	4.211	0.647	2.400
20	1.205	1.721	2.406	0.793	1.800
21	0.783	0.973	4.738	0.348	2.800
22	0.640	1.048	4.847	0.674	2.600
23	1.464	1.704	3.176	0.689	1.000
24	1.501	0.335	3.838	0.234	0.100
25	1.230	0.250	4.436	0.789	4.800
26	1.100	1.285	2.096	0.331	2.100
27	1.560	2.730	3.357	0.285	3.900
28	1.636	0.562	2.741	0.257	4.900
29	0.812	2.066	1.349	0.706	4.500
30	1.587	0.393	2.539	0.846	4.600
31	0.730	2.820	3.981	0.293	4.600
32	1.724	2.352	5.219	0.706	2.200
33	1.288	2.066	2.495	0.782	3.500
34	0.700	1.585	2.425	0.345	1.100
35	0.315	0.602	5.937	0.314	0.300

CASO	U_{par}	U_{cob}	U_{vidro}	g	RPH
36	1.784	1.336	6.056	0.310	4.000
37	1.270	0.674	5.313	0.672	2.200
38	0.506	2.774	5.048	0.565	3.500
39	0.255	2.508	1.934	0.440	1.300
40	0.866	0.840	3.839	0.217	4.900
41	0.595	0.884	5.219	0.601	0.400
42	0.654	2.508	5.019	0.630	2.500
43	1.563	0.801	3.529	0.817	3.100
44	1.807	0.765	3.186	0.493	1.900
45	0.633	2.687	5.391	0.539	1.800
46	0.383	1.662	1.761	0.624	3.100
47	1.344	2.943	4.956	0.592	4.300
48	1.533	1.081	5.391	0.565	0.200
49	1.142	2.131	3.368	0.696	3.900
50	1.462	0.280	3.803	0.539	3.700
51	0.637	2.943	3.368	0.577	1.400
52	0.955	1.116	3.803	0.360	1.200
53	0.518	2.131	1.844	0.524	5.000
54	0.668	0.305	2.144	0.462	0.800
55	1.626	1.654	5.391	0.454	2.000
56	1.455	0.497	1.761	0.537	3.300
57	0.276	2.454	4.065	0.595	3.200
58	0.423	2.419	4.073	0.266	2.000
59	1.394	0.748	1.999	0.466	2.600
60	1.437	2.336	1.676	0.474	4.700
61	1.158	2.369	1.085	0.832	0.300
62	1.797	0.730	5.076	0.655	3.800
63	1.599	0.444	2.279	0.559	1.600
64	0.766	2.527	1.652	0.412	2.900
65	0.299	1.863	1.041	0.748	1.100
66	1.715	2.625	1.041	0.748	4.800
67	1.380	1.662	4.614	0.722	4.000
68	0.758	1.154	4.614	0.288	1.600
69	0.318	0.908	1.864	0.414	2.900
70	1.342	0.445	3.472	0.896	0.500
71	0.448	2.868	4.654	0.287	0.500
72	1.242	1.216	5.187	0.403	0.600
73	0.412	2.752	4.484	0.815	0.200

CASO	U_{par}	U_{cob}	U_{vidro}	g	RPH
74	0.480	0.528	3.703	0.821	1.200
75	0.971	1.970	5.198	0.855	3.000
76	0.824	2.943	2.626	0.369	0.400
77	0.550	2.917	2.875	0.891	5.000
78	0.572	1.514	3.931	0.443	4.100
79	1.418	2.186	2.269	0.411	2.500
80	1.270	2.289	2.319	0.717	2.300
81	0.837	1.514	4.799	0.281	3.300
82	1.589	1.937	3.025	0.473	2.700
83	1.176	2.158	2.269	0.439	1.400
84	0.396	1.813	2.937	0.357	0.900
85	1.008	1.842	3.556	0.841	4.200
86	1.070	1.195	1.652	0.554	3.600
87	1.003	2.214	4.654	0.590	1.900
88	1.173	2.730	4.283	0.713	0.800
89	1.367	0.862	4.414	0.508	0.800
90	1.144	1.390	5.209	0.367	3.600
91	1.136	2.687	5.215	0.263	4.700
92	1.250	2.274	1.652	0.853	4.400
93	0.529	0.352	3.025	0.576	2.300
94	1.743	1.577	3.931	0.379	4.500
95	1.370	1.373	3.378	0.369	1.300
96	1.645	0.423	1.237	0.745	4.000
97	1.592	2.274	1.283	0.446	2.000
98	1.705	0.687	1.328	0.445	1.700
99	1.047	1.225	1.190	0.829	2.400
100	0.570	1.775	1.747	0.385	1.700
101	0.989	2.402	4.474	0.679	3.900
102	1.118	2.943	4.540	0.458	0.600
103	1.386	1.615	4.540	0.248	0.800
104	1.375	2.708	5.019	0.768	1.000
105	0.799	0.659	3.186	0.378	0.900
106	1.661	0.862	3.443	0.264	2.000
107	1.749	1.154	4.331	0.331	3.300
108	0.537	1.894	5.295	0.773	0.700
109	0.261	2.625	3.874	0.614	5.000
110	0.820	1.064	2.080	0.267	4.700
111	1.754	1.863	1.274	0.361	1.300

CASO	U_{par}	U_{cob}	U_{vidro}	g	RPH
112	1.392	2.797	3.297	0.552	3.200
113	1.368	1.450	4.501	0.437	2.500
114	1.051	0.300	2.344	0.720	2.700
115	1.556	0.987	2.791	0.696	1.400
116	0.571	1.948	1.437	0.342	1.500
117	0.424	1.098	2.741	0.725	1.100
118	1.770	0.915	2.466	0.662	4.800
119	0.549	1.757	4.211	0.506	2.300
120	0.460	2.017	2.318	0.239	4.900
121	0.935	1.238	2.549	0.213	3.500
122	0.609	2.892	3.118	0.232	2.100
123	0.789	0.352	1.097	0.651	1.700
124	1.162	0.463	1.300	0.765	2.900
125	0.907	0.792	1.185	0.584	0.500
126	1.113	2.527	6.019	0.547	4.600
127	0.873	2.752	5.225	0.331	2.200
128	1.270	2.868	5.888	0.429	3.400
129	1.453	0.417	3.498	0.799	3.000
130	1.038	2.029	5.391	0.887	1.600
131	1.585	1.285	2.791	0.502	0.200
132	1.533	1.501	3.022	0.588	2.800
133	0.284	2.320	4.367	0.459	0.300
134	1.664	2.005	4.211	0.373	4.000
135	1.580	1.238	5.602	0.824	3.600
136	0.502	2.352	4.717	0.450	3.700
137	1.040	2.917	4.668	0.389	2.400
138	0.672	1.679	2.466	0.679	2.500
139	0.636	0.564	3.529	0.588	1.900
140	0.309	1.385	5.983	0.738	3.800
141	1.251	2.304	5.771	0.864	0.400
142	1.786	0.636	3.467	0.539	0.100
143	1.575	1.295	2.251	0.273	4.400
144	0.365	2.092	2.887	0.764	1.800
145	0.380	2.385	3.803	0.858	3.100
146	1.200	2.565	4.956	0.816	4.200
147	0.741	0.592	2.438	0.323	4.100
148	0.571	1.577	1.605	0.885	4.300
149	0.977	0.251	1.399	0.676	4.500

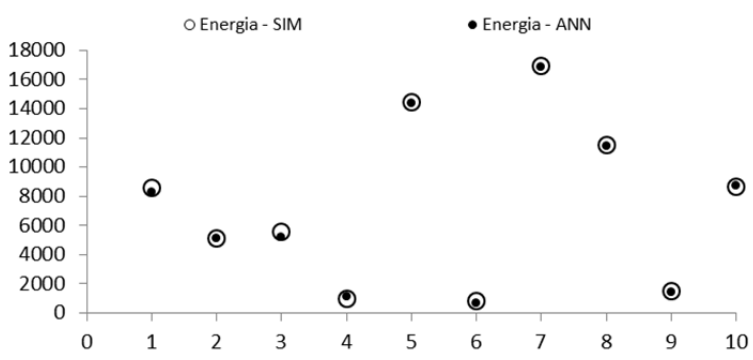
CASO	U_{par}	U_{cob}	U_{vidro}	g	RPH
150	1.083	0.824	1.844	0.446	1.200

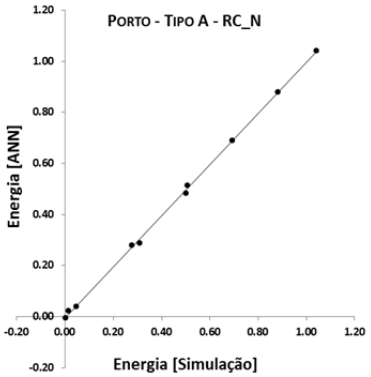
- Validação das RNA

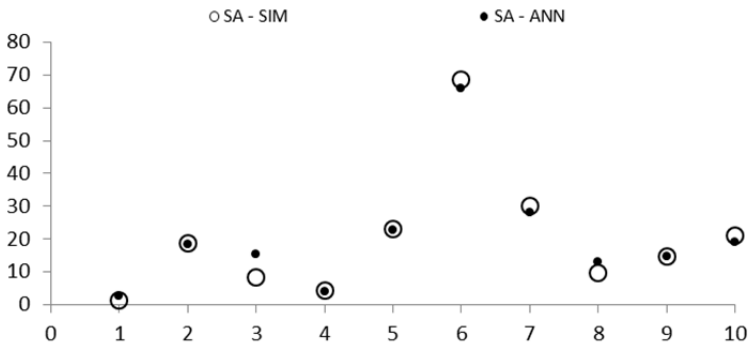
CASO	U_{par}	U_{cob}	U_{vidro}	g	RPH
1	0.278	0.256	4.956	0.882	2.800
2	1.429	2.613	5.391	0.704	1.200
3	0.625	2.367	3.529	0.664	1.700
4	0.315	0.588	5.911	0.315	0.400
5	1.026	2.104	2.466	0.538	4.500
6	0.436	2.672	4.283	0.816	0.200
7	1.481	1.712	6.019	0.292	5.000
8	1.228	0.898	3.803	0.437	3.400
9	1.550	1.207	2.581	0.507	0.100
10	1.770	2.996	2.409	0.394	2.300

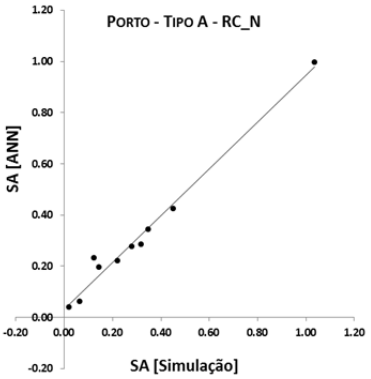
AIV.2 VALIDAÇÃO

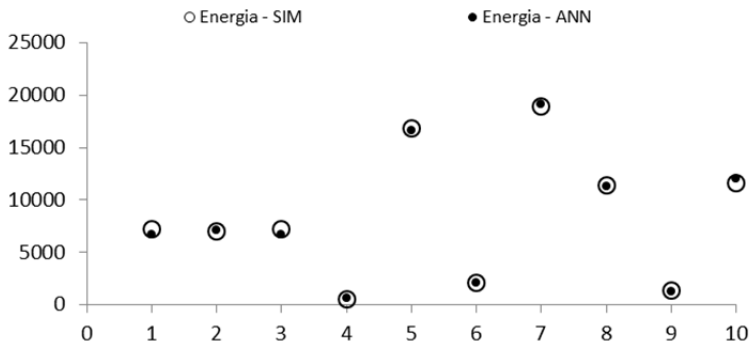
- Tipo A, Porto, Norte

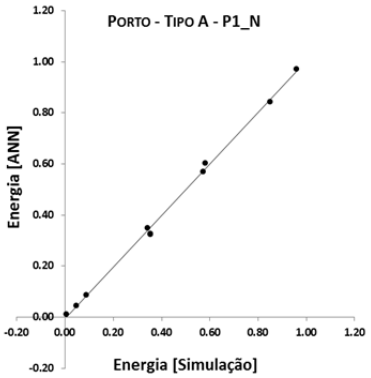


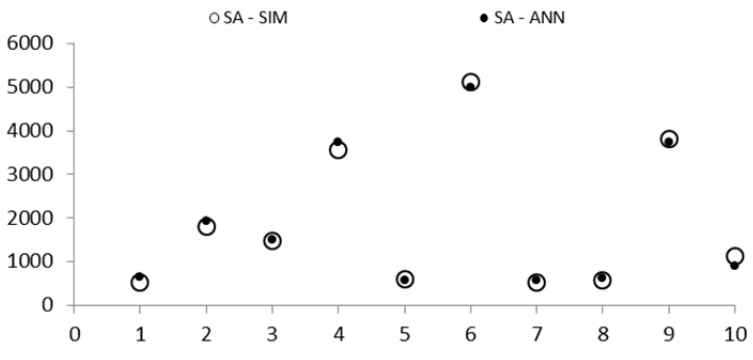


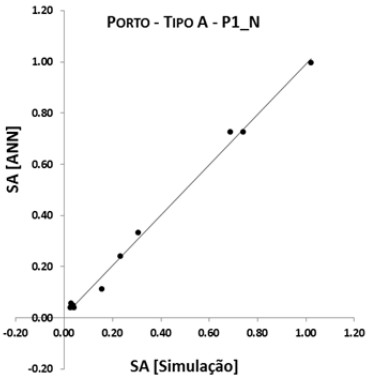




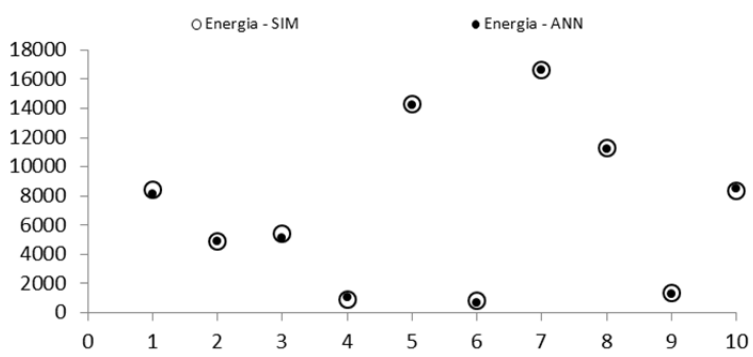


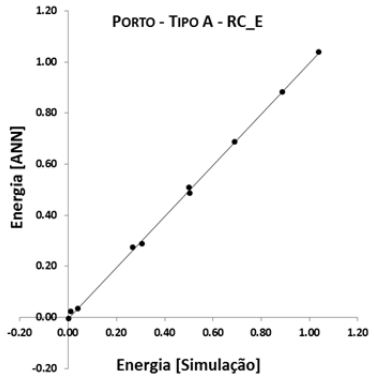


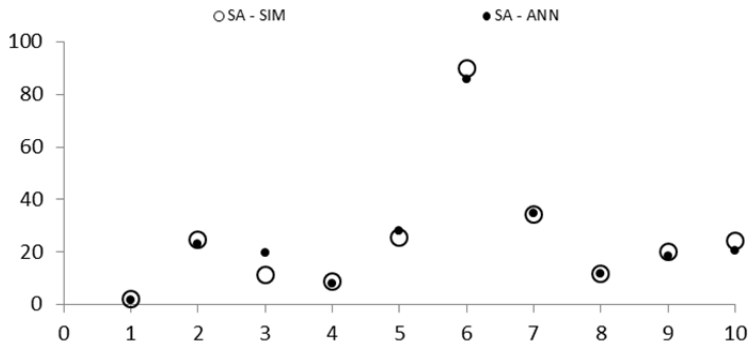


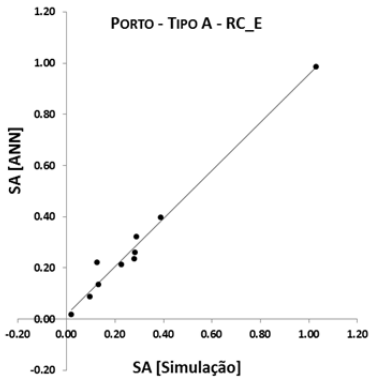


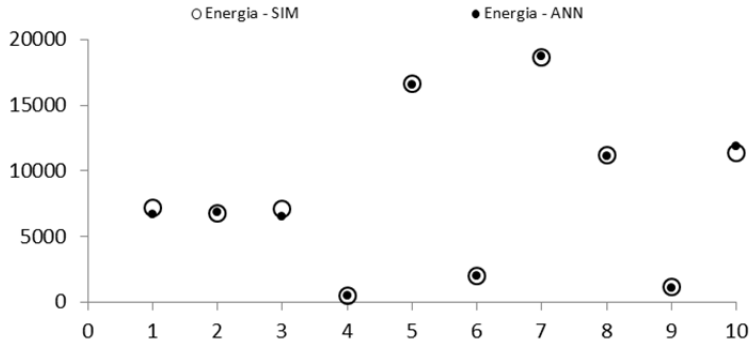
- Tipo A, Porto, Este

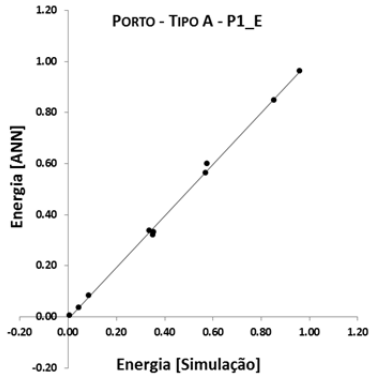


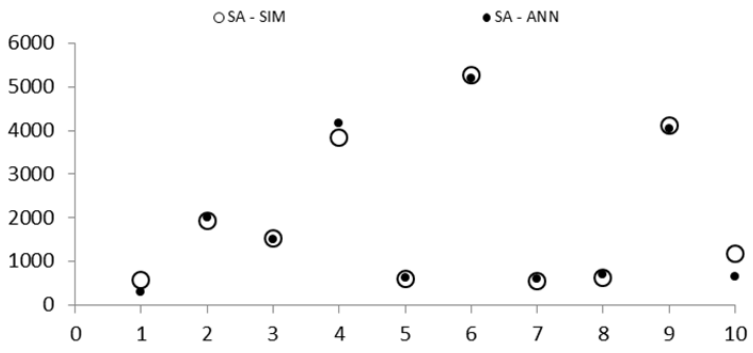


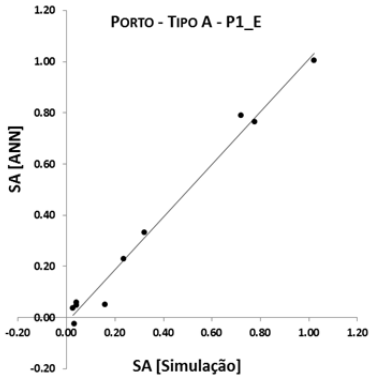




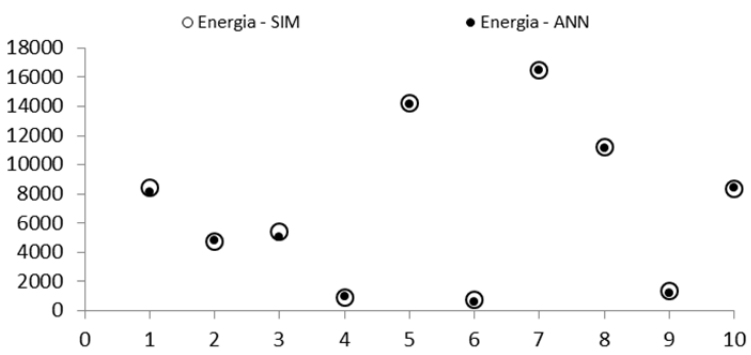


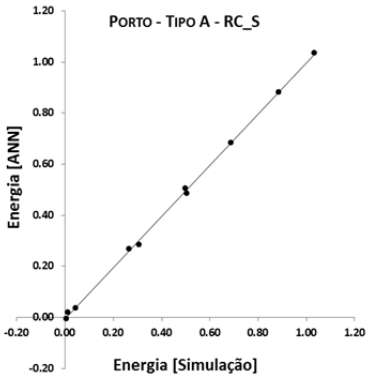


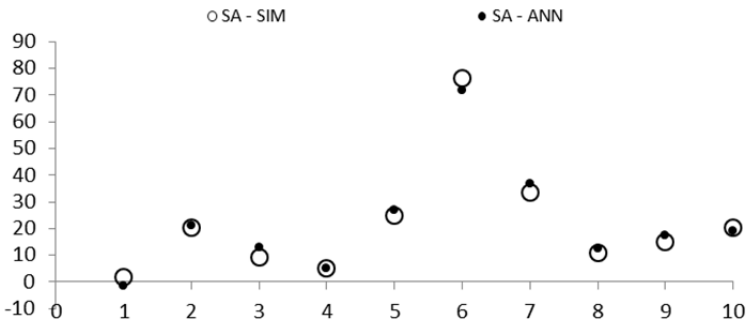


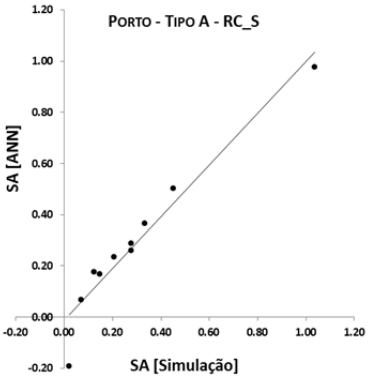


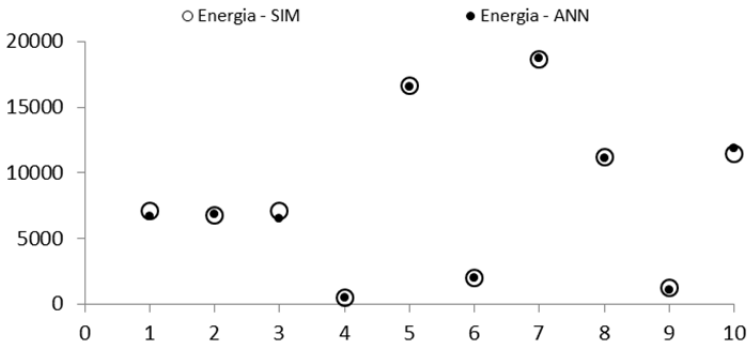
- Tipo A, Porto, Sul

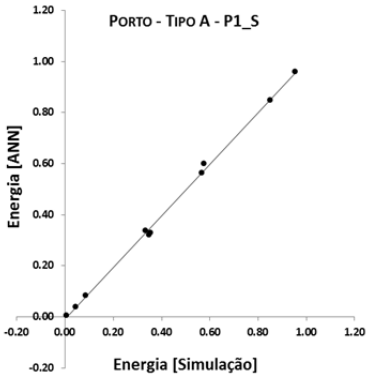


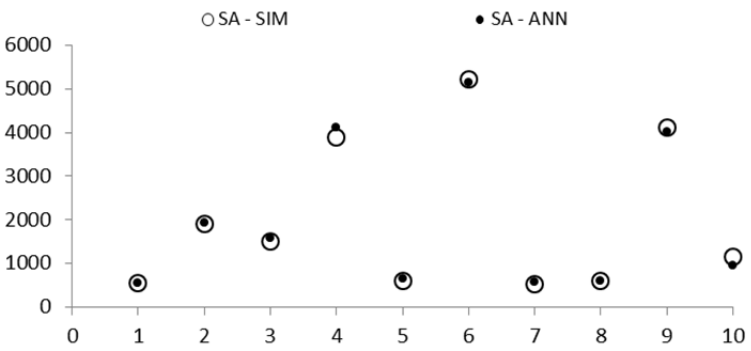


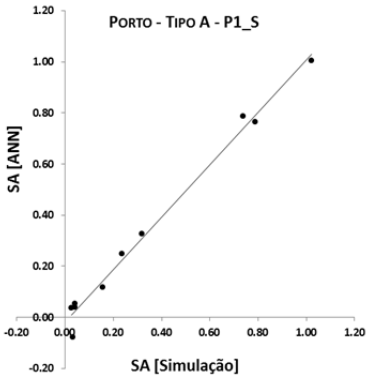




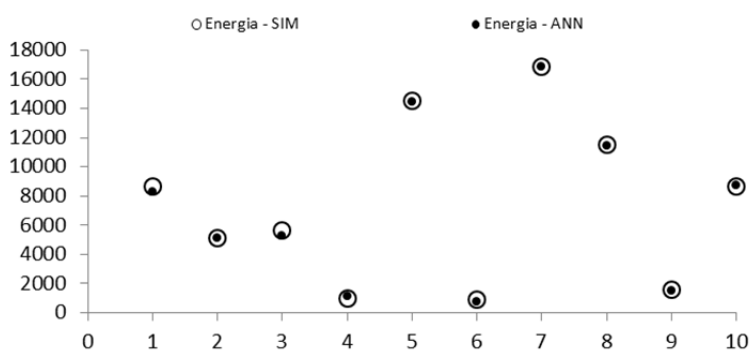


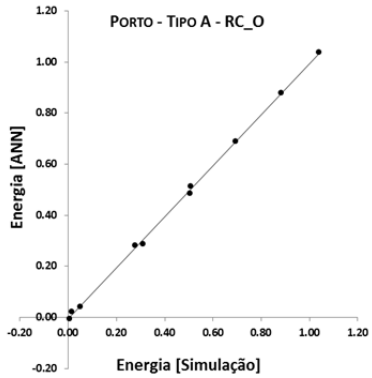


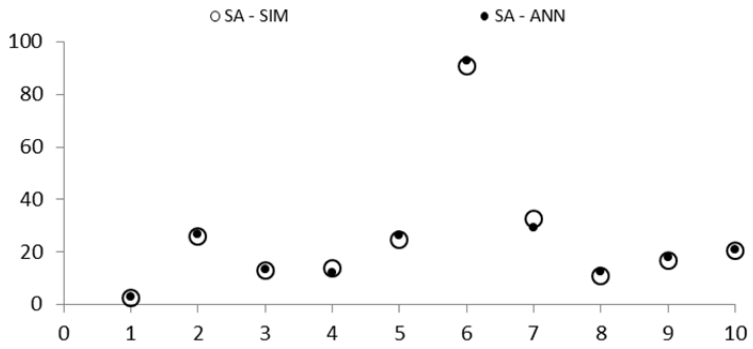


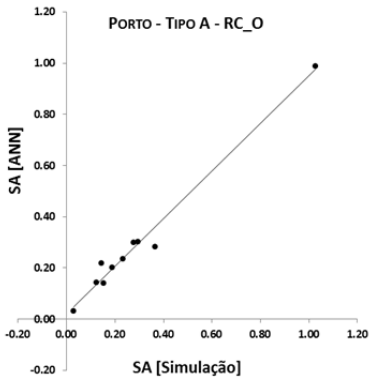


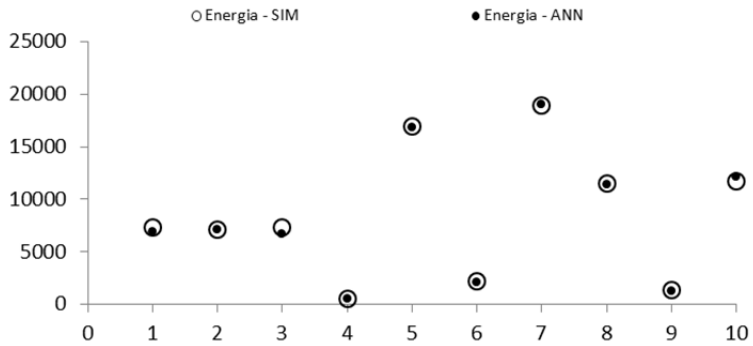
- Tipo A, Porto, Oeste

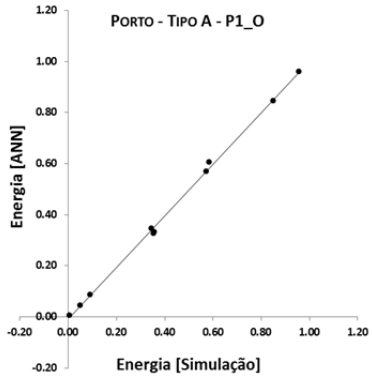


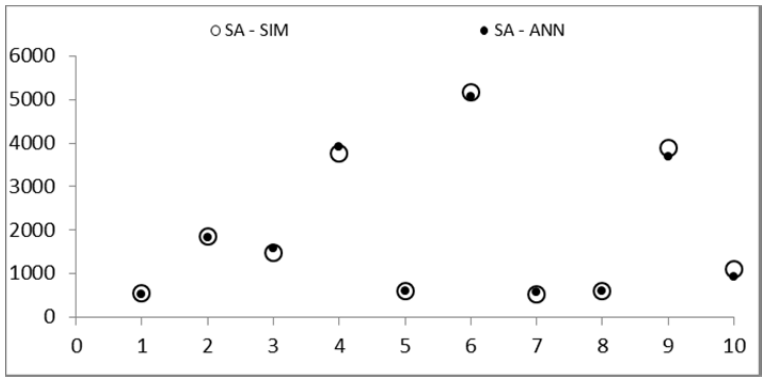


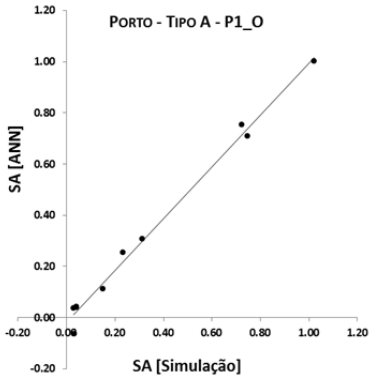




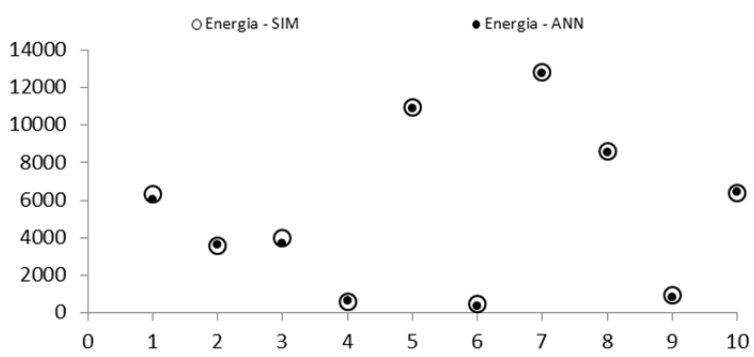


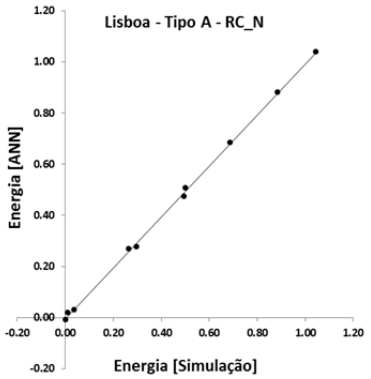


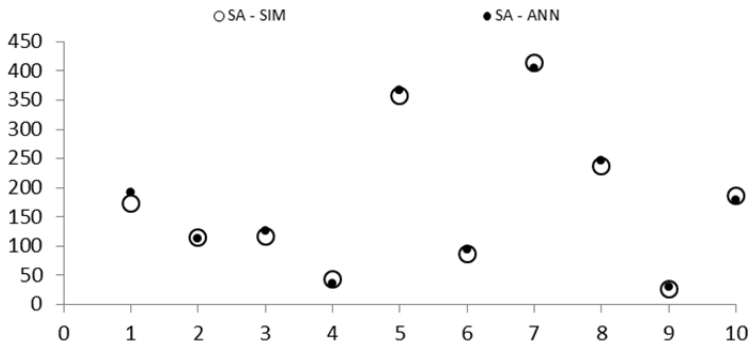


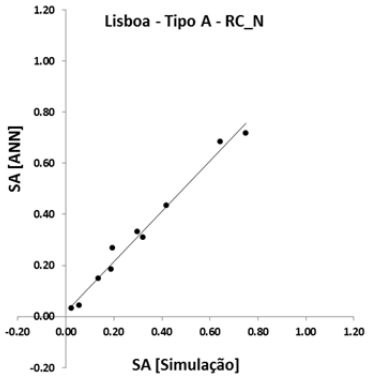


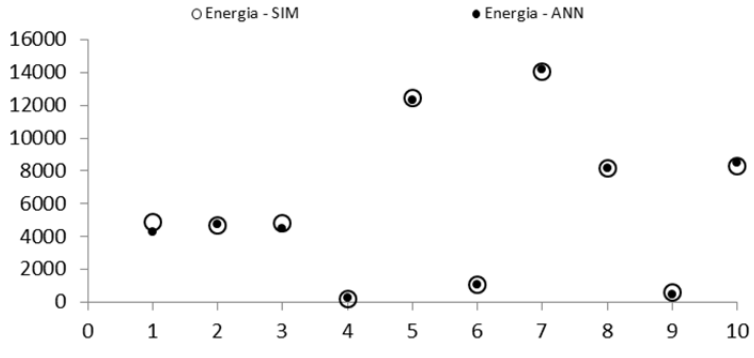
- Tipo A, Lisboa, Norte

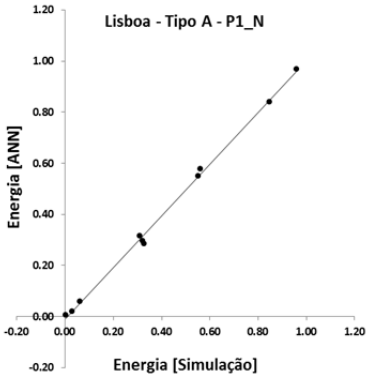


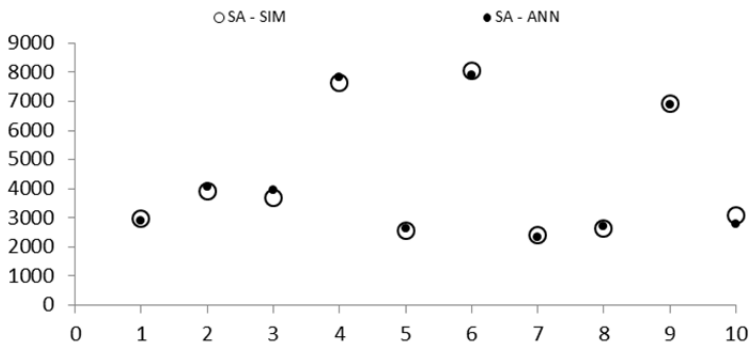


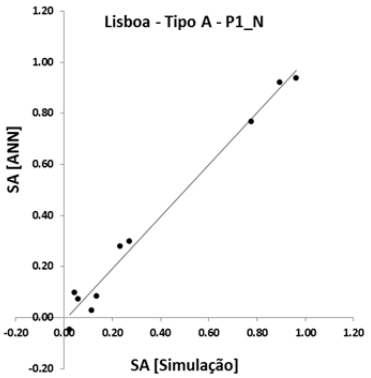




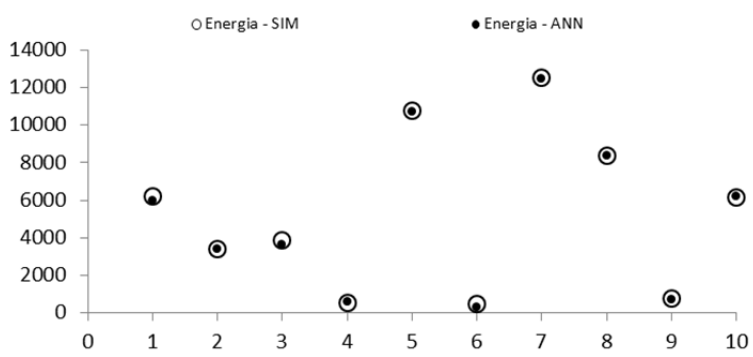


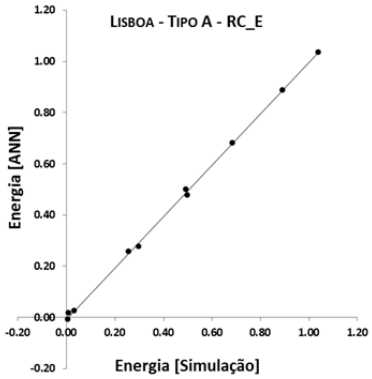


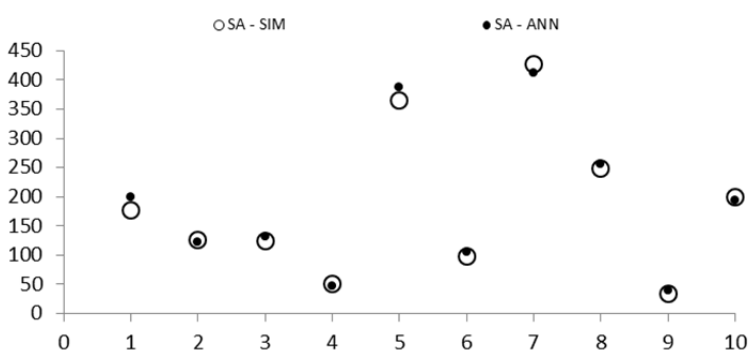


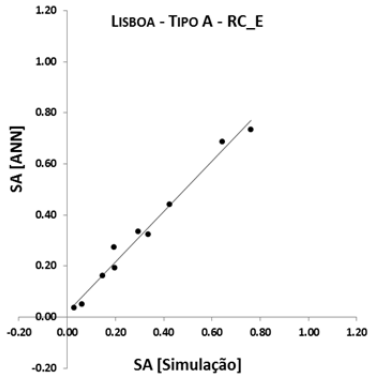


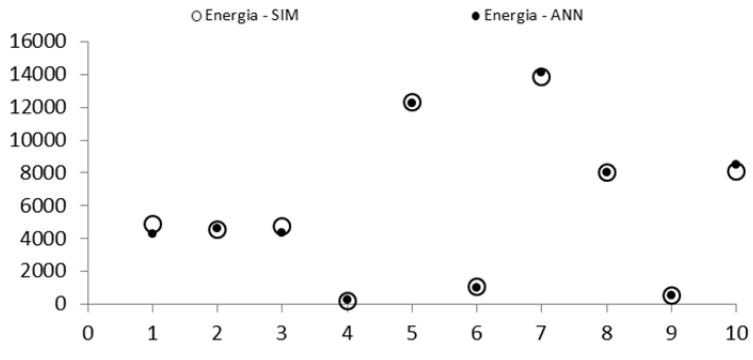
- Tipo A, Lisboa, Este

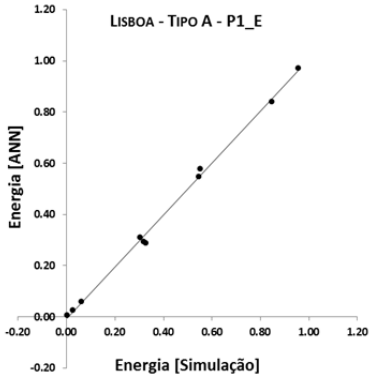


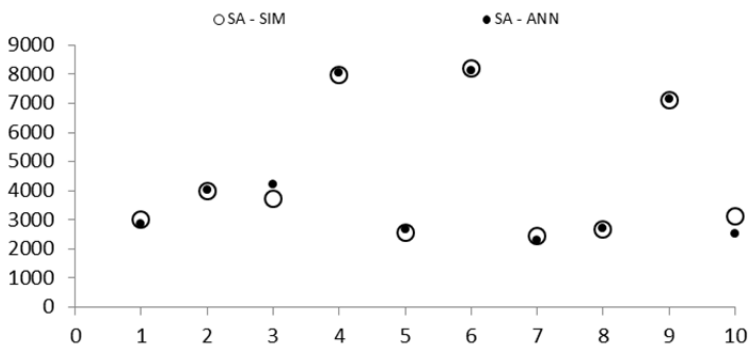


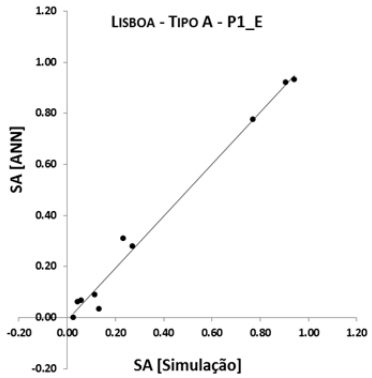




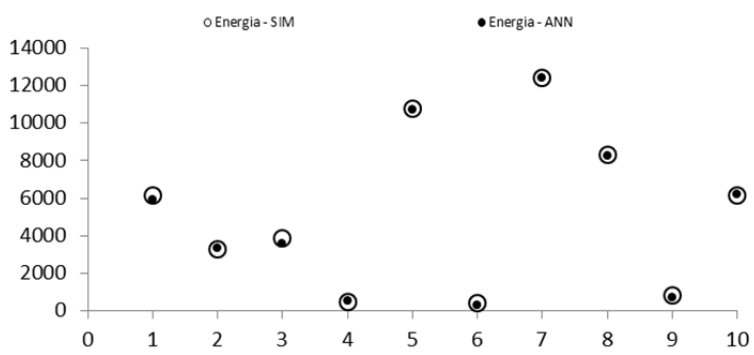


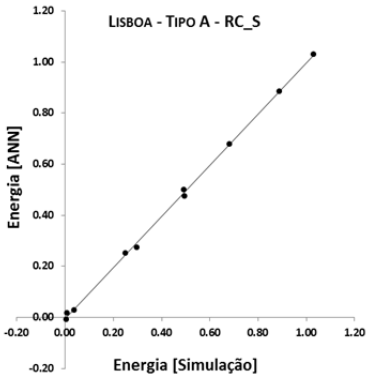


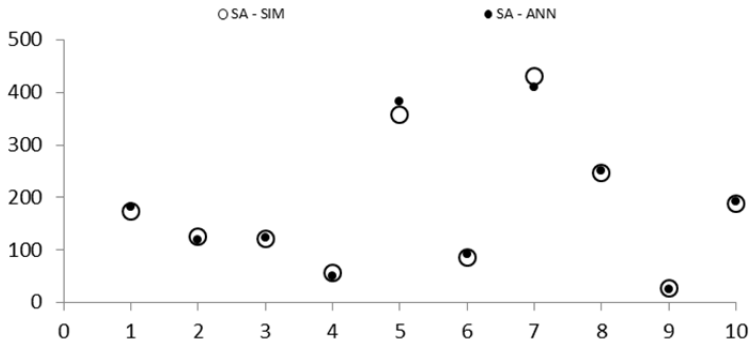


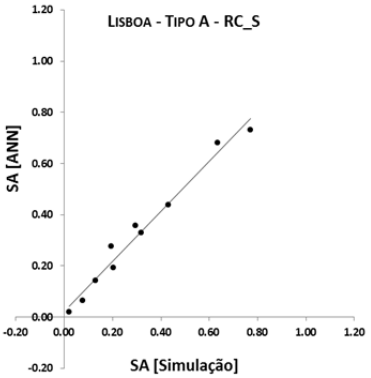


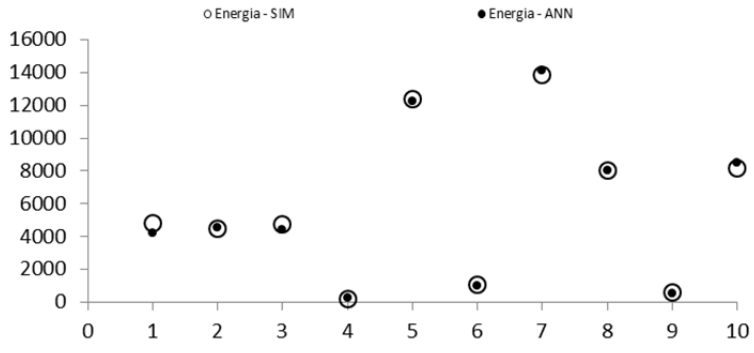
- Tipo A, Lisboa, Sul

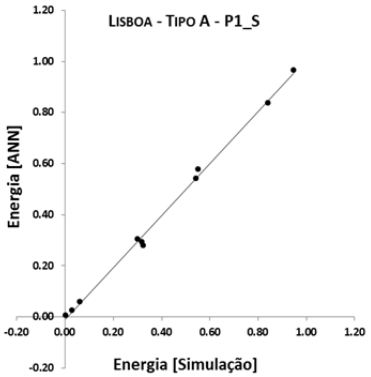


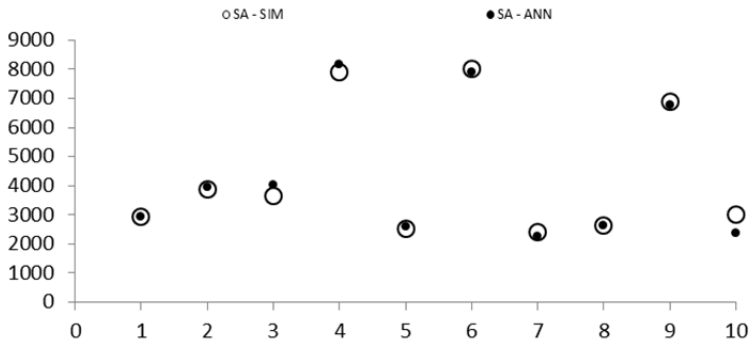


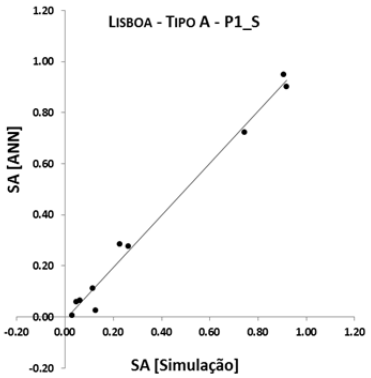




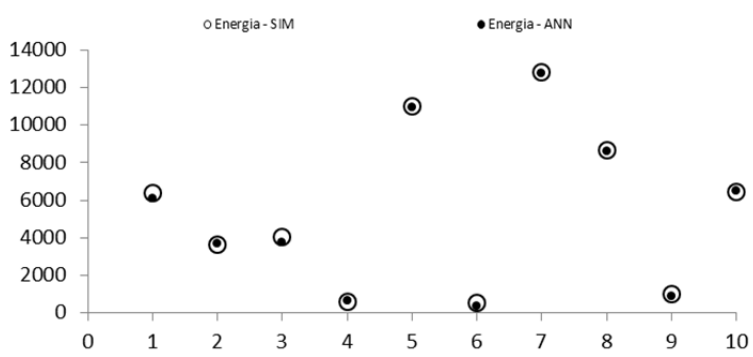


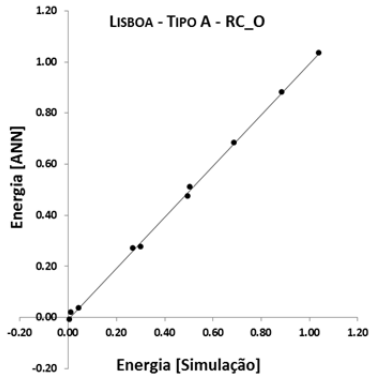


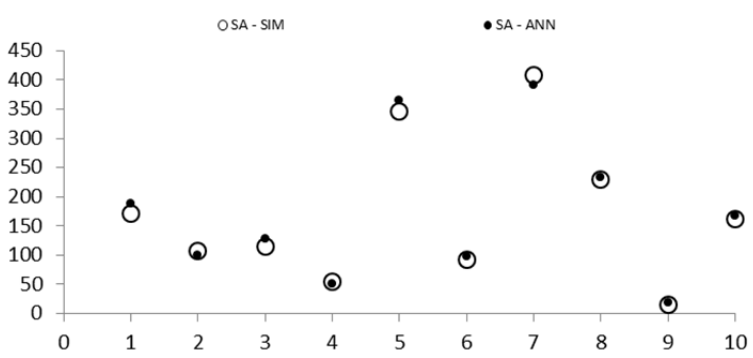


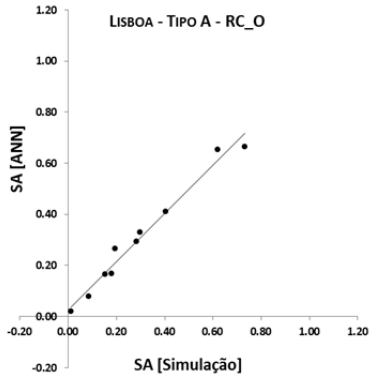


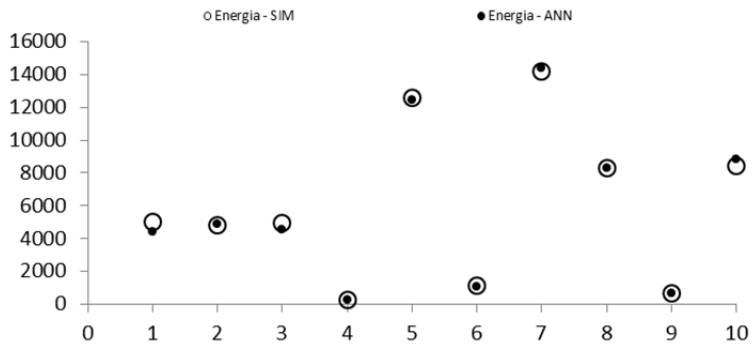
- Tipo A, Lisboa, Oeste

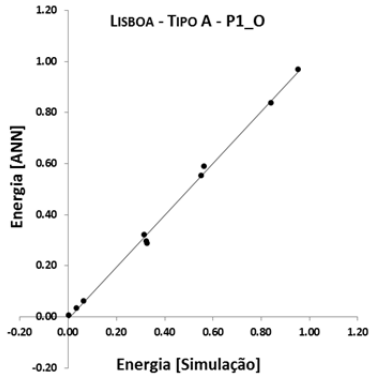


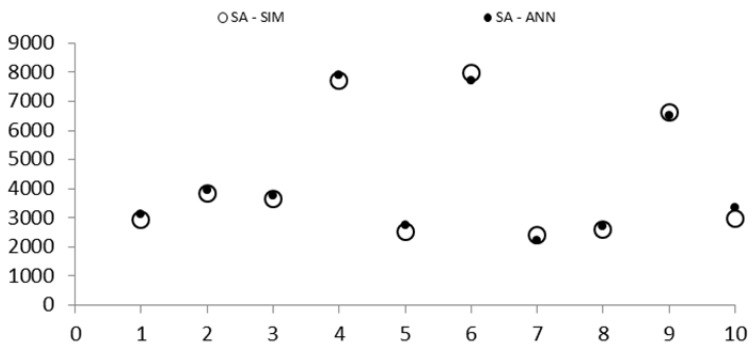


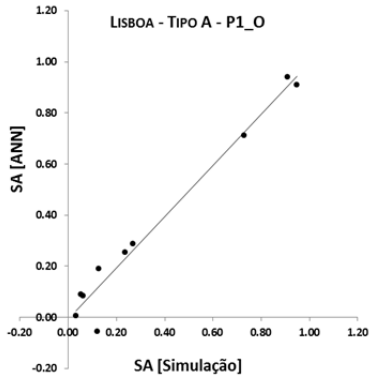




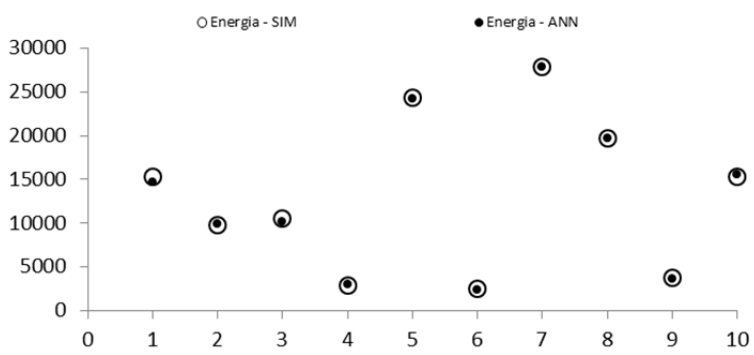


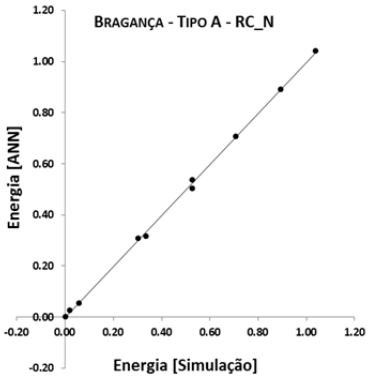


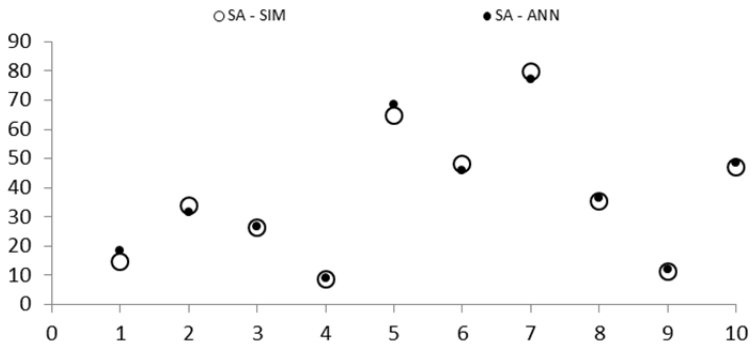


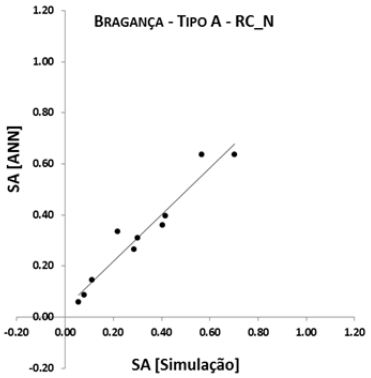


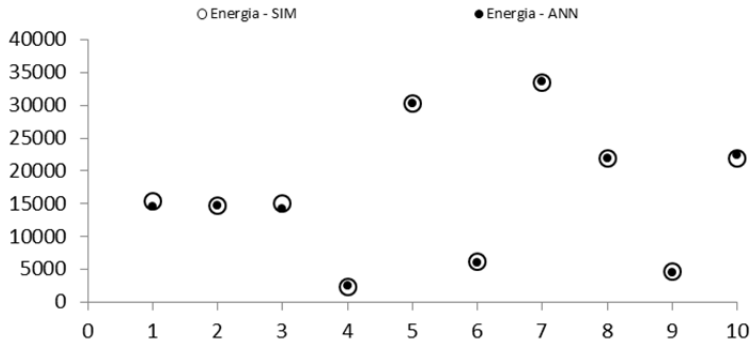
- Tipo A, Bragança, Norte

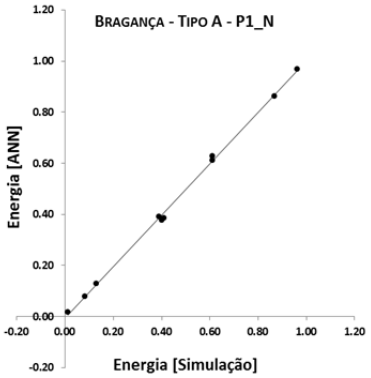


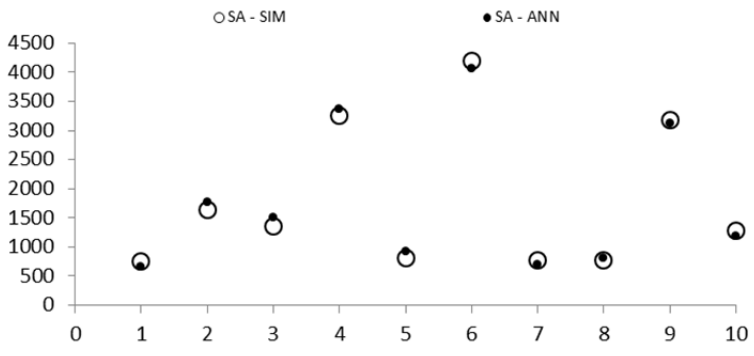


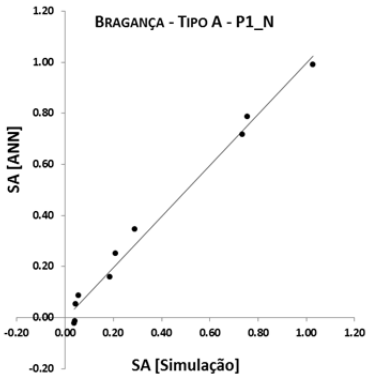




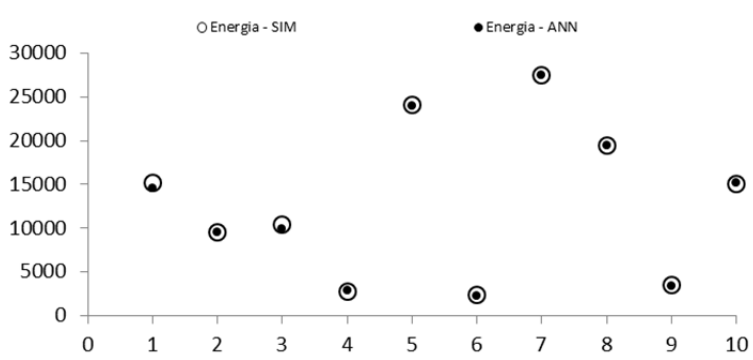


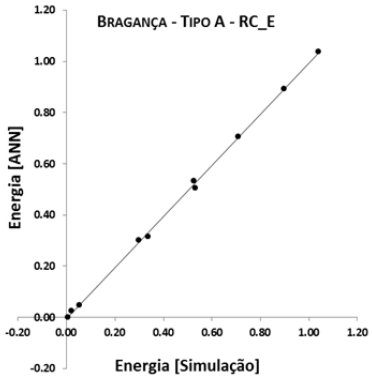


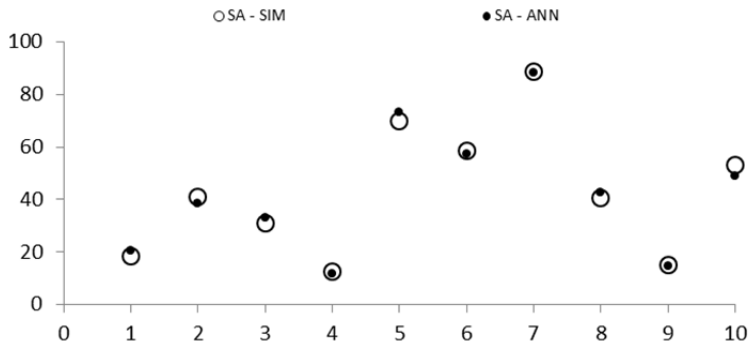


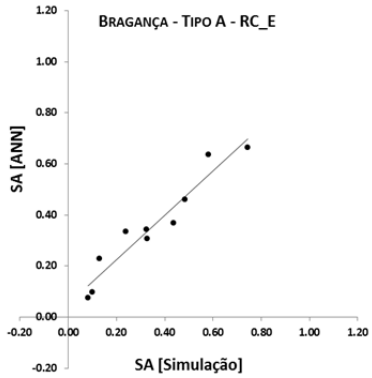


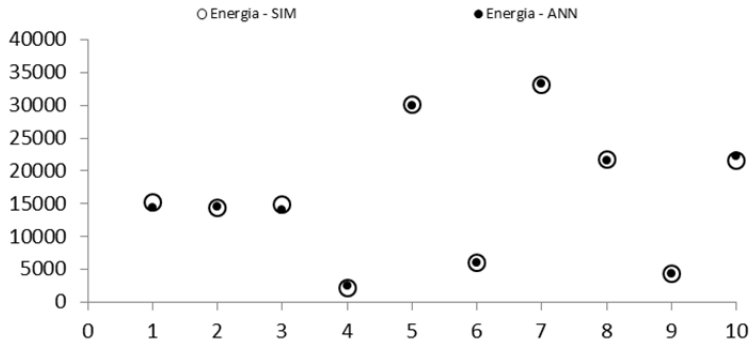
- Tipo A, Bragança, Este

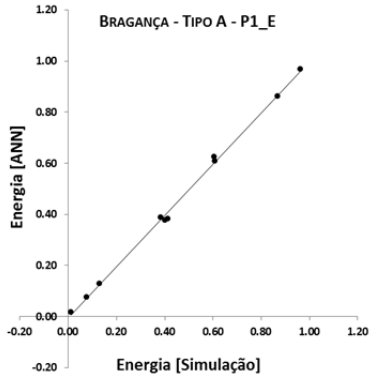


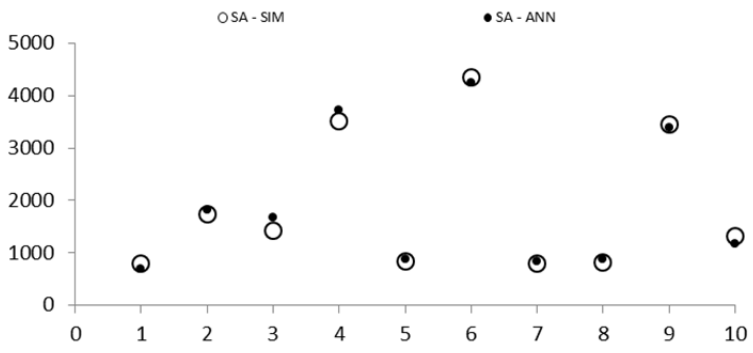


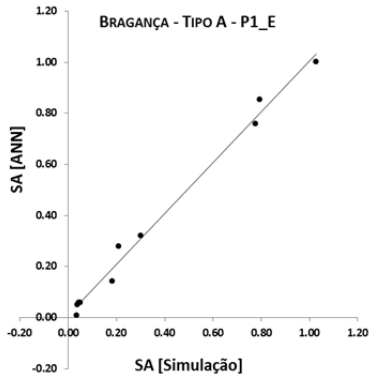




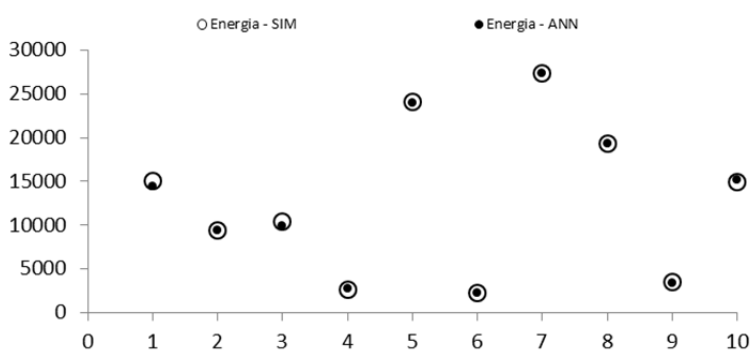


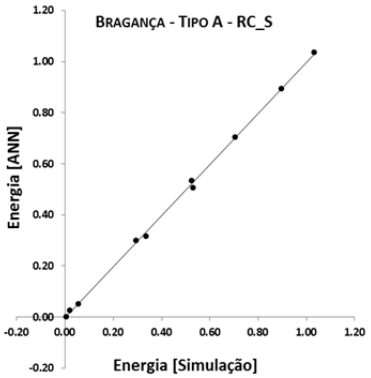


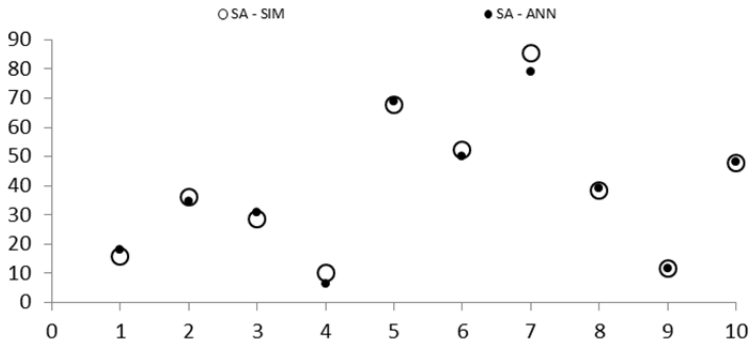


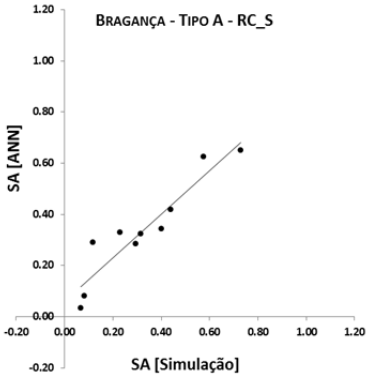


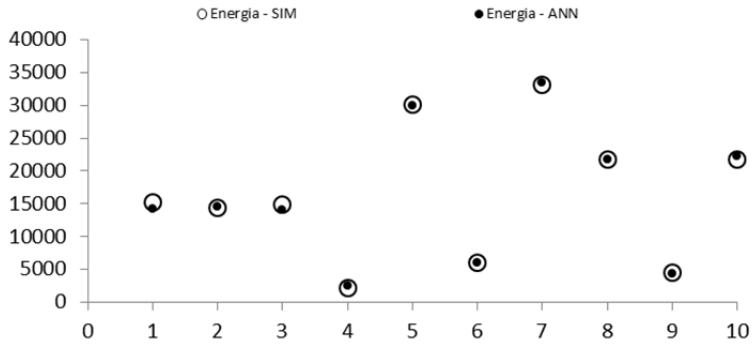
- Tipo A, Bragança, Sul

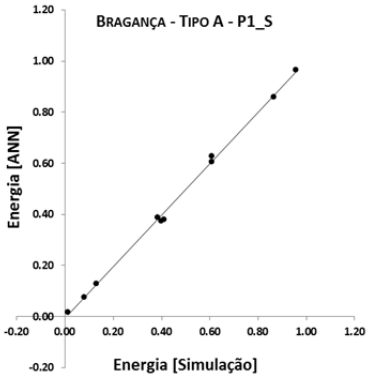


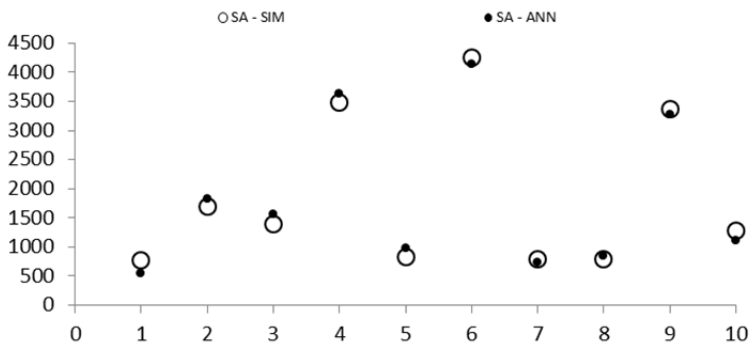


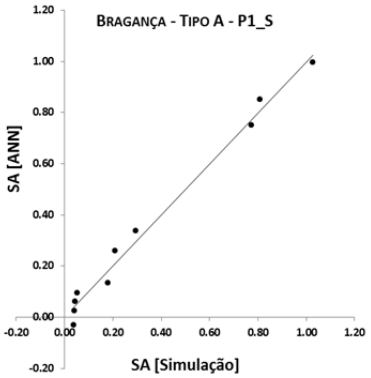




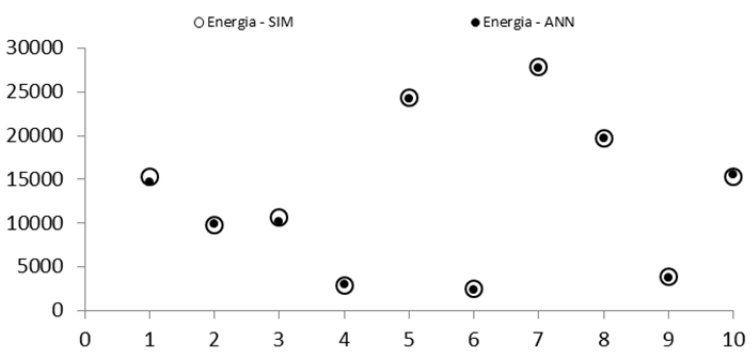


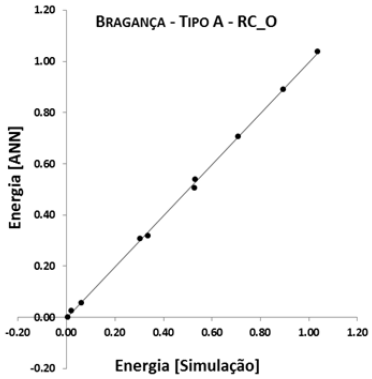


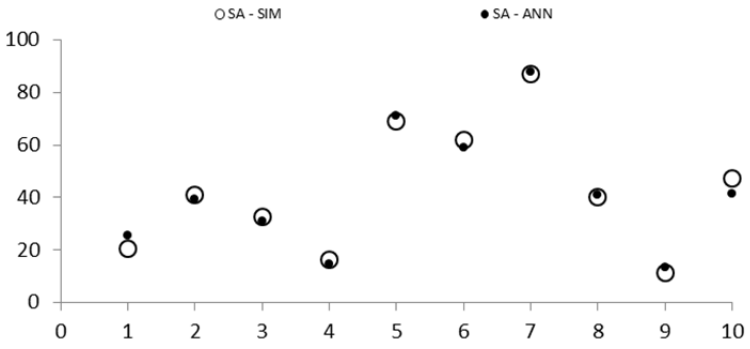


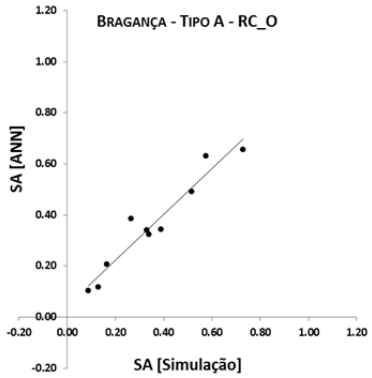


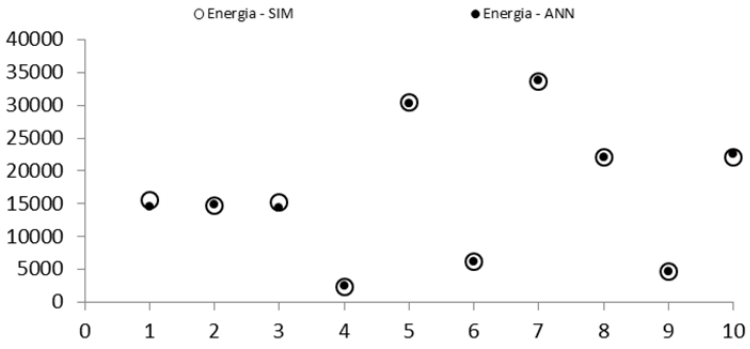
- Tipo A, Bragança, Oeste

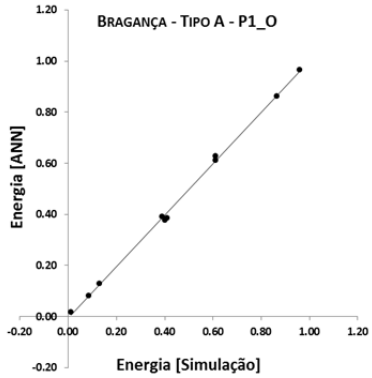


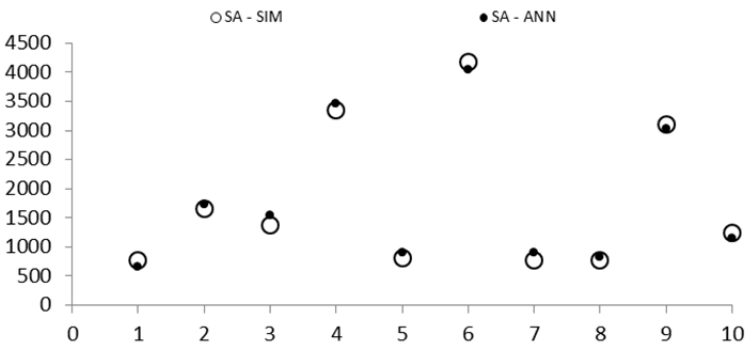


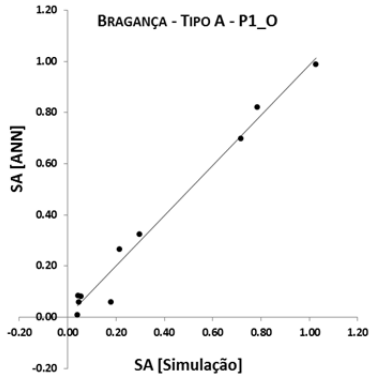




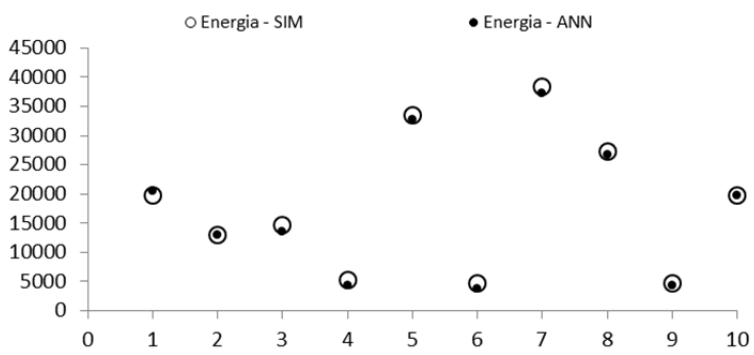


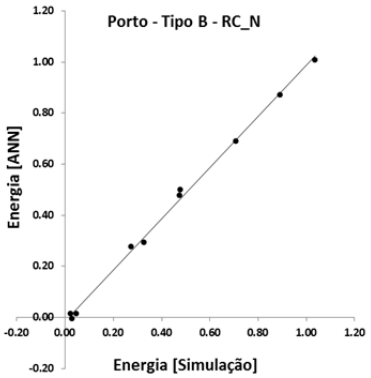


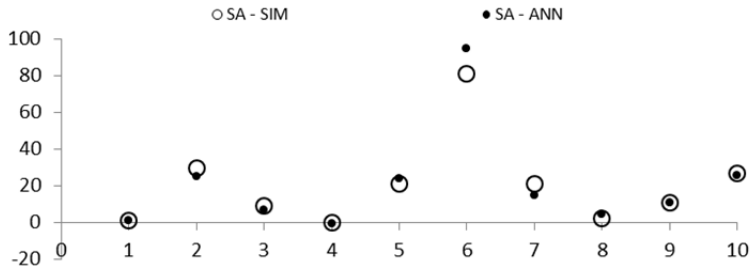


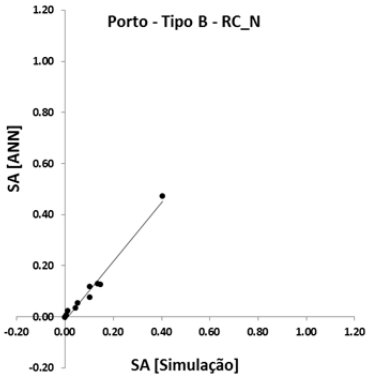


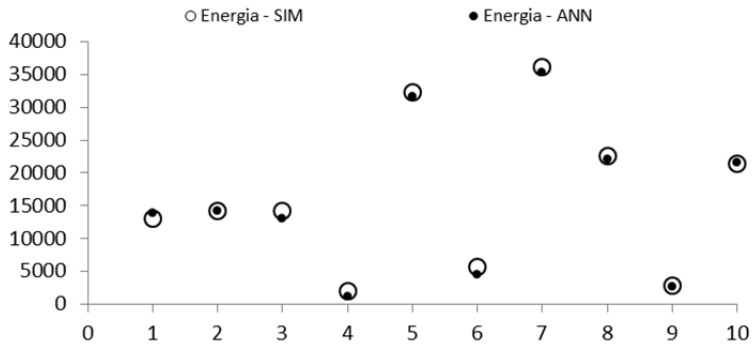
- Tipo B, Porto, Norte

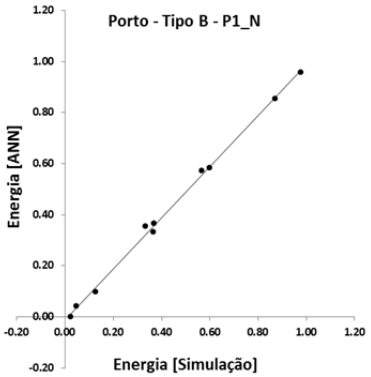


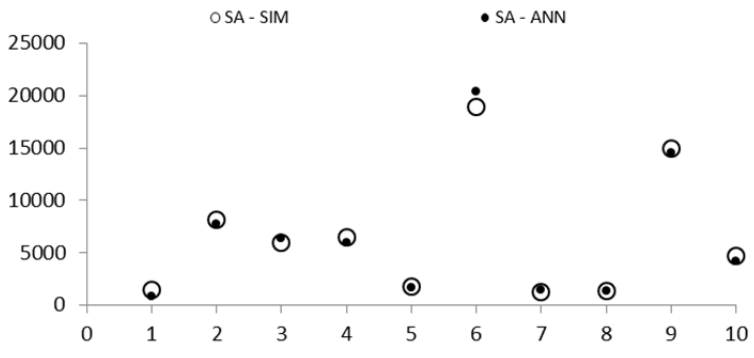


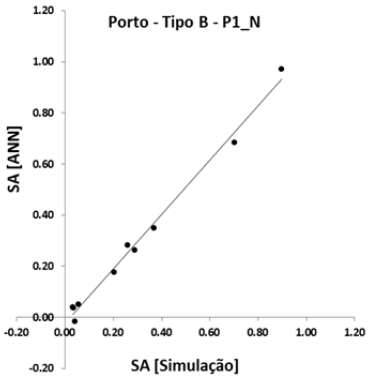




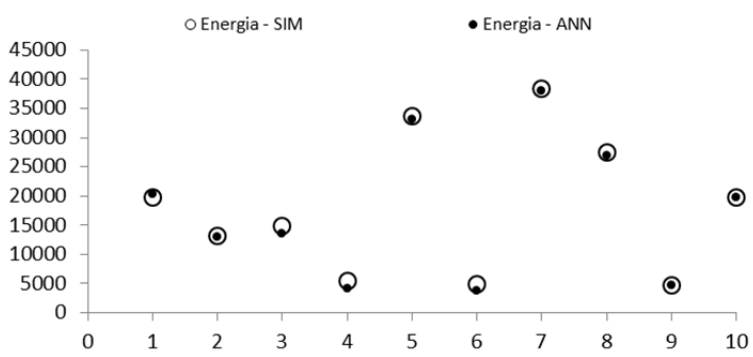


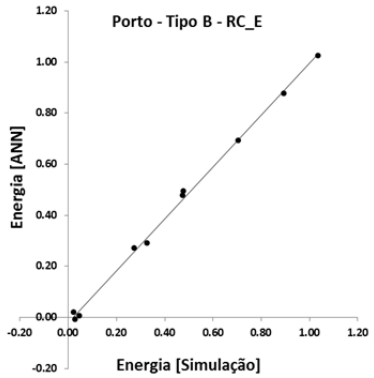


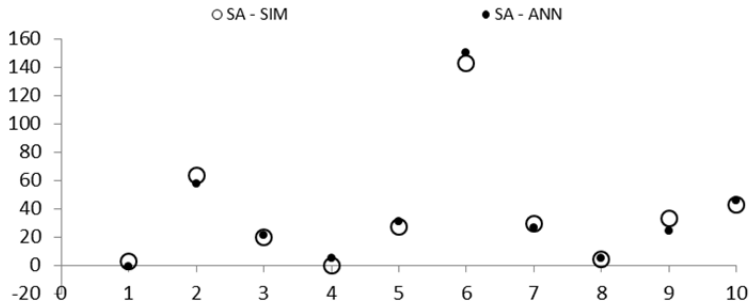


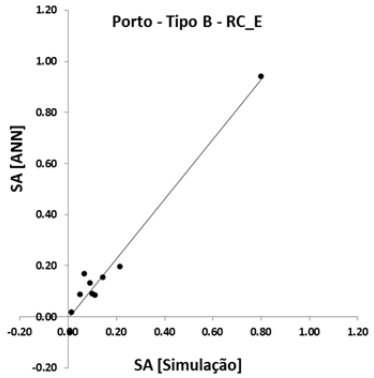


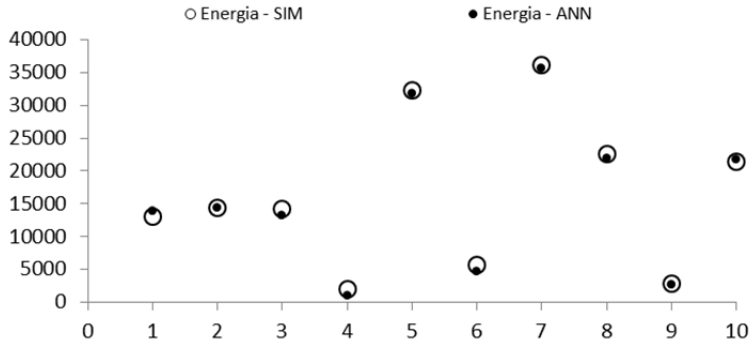
- Tipo B, Porto, Este

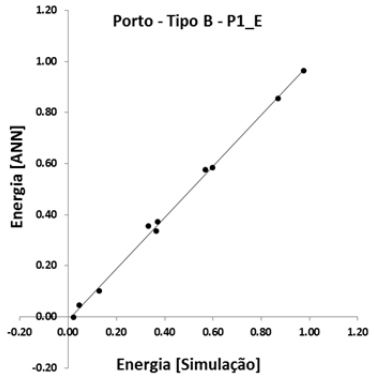


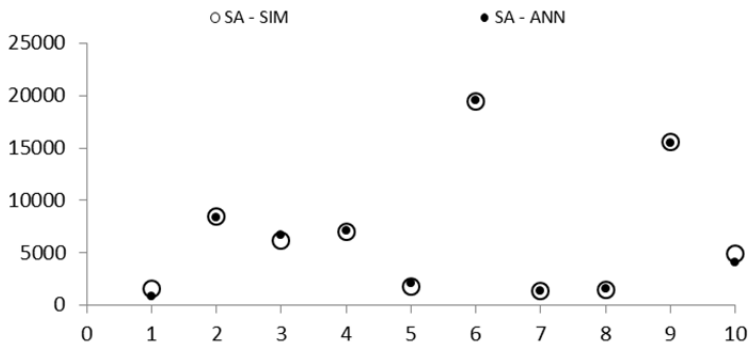


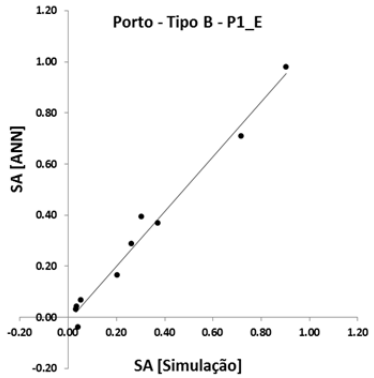




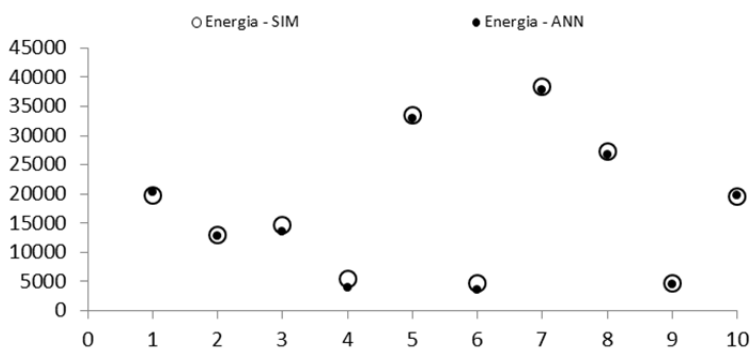


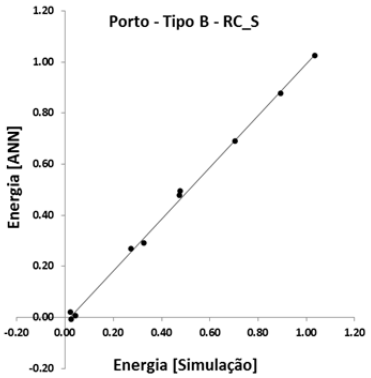


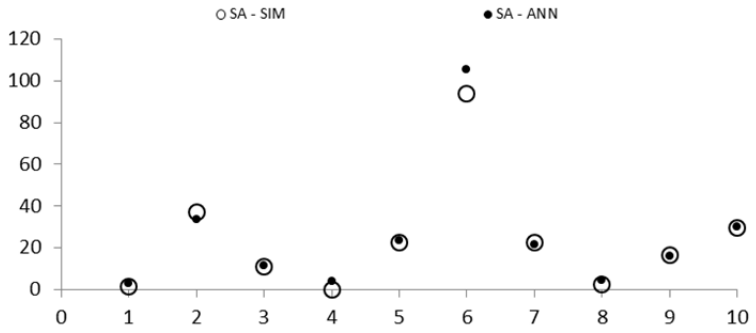


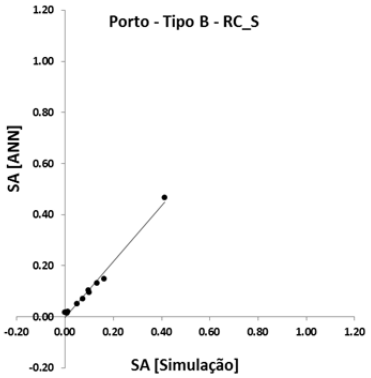


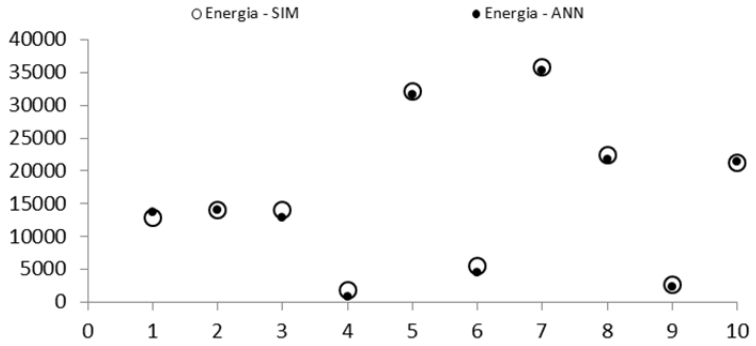
- Tipo B, Porto, Sul

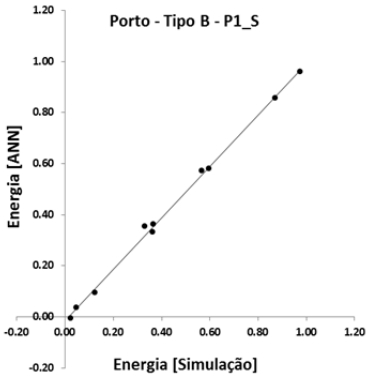


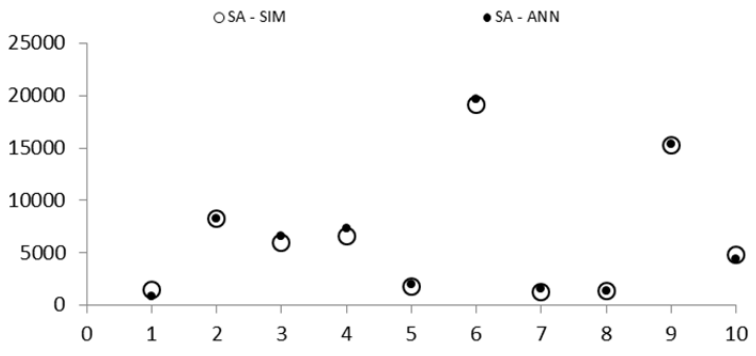


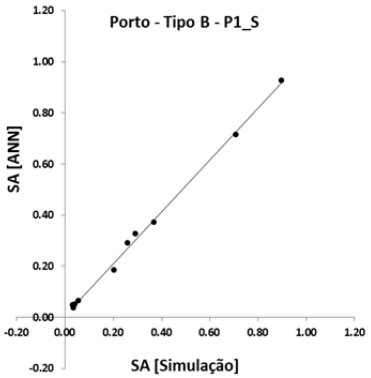




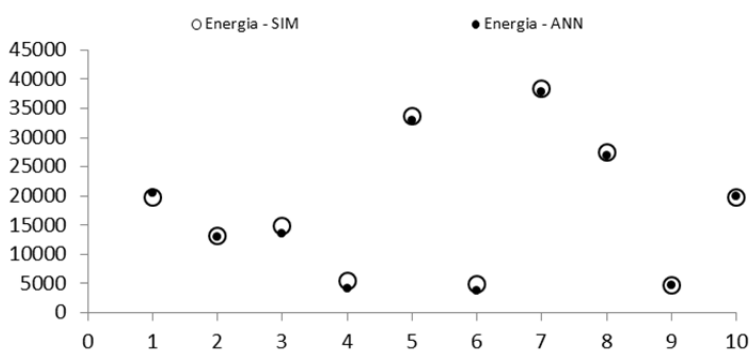


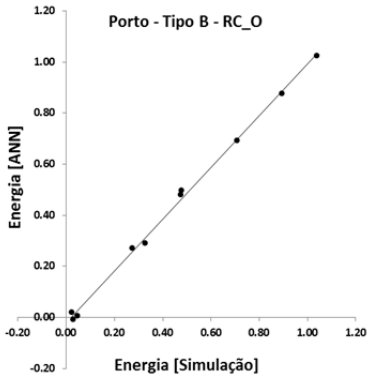


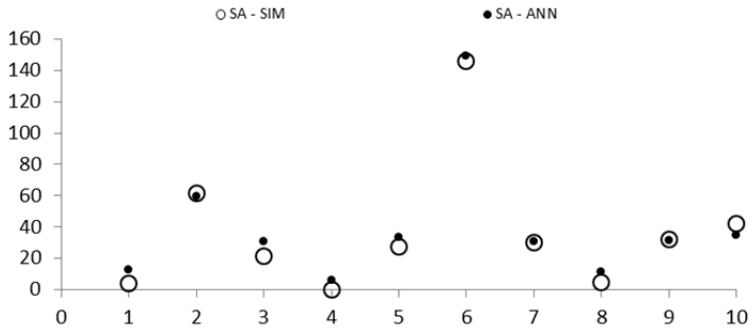


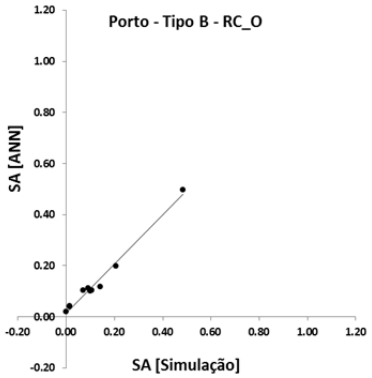


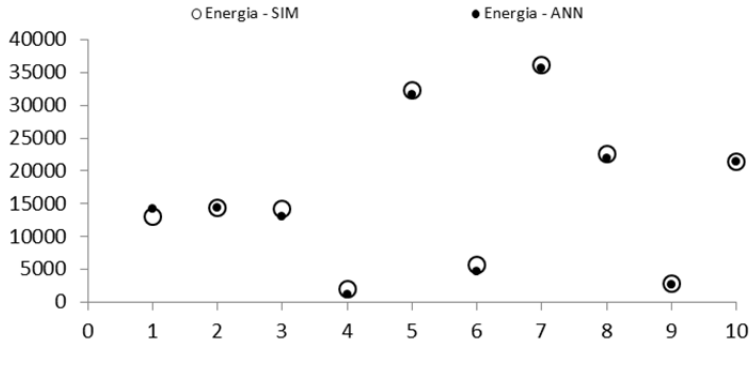
- Tipo B, Porto, Oeste

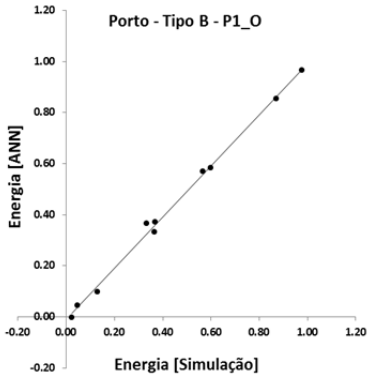


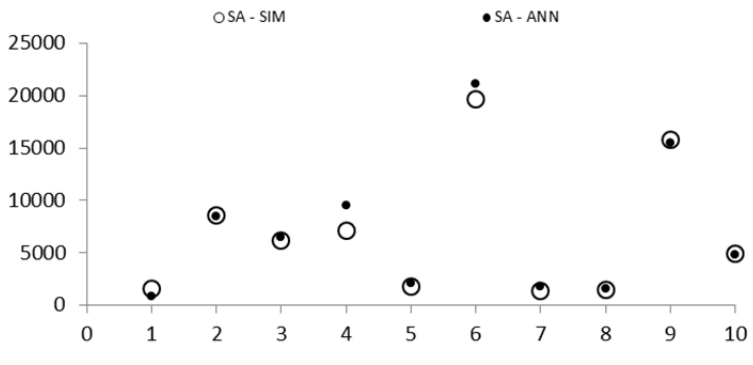


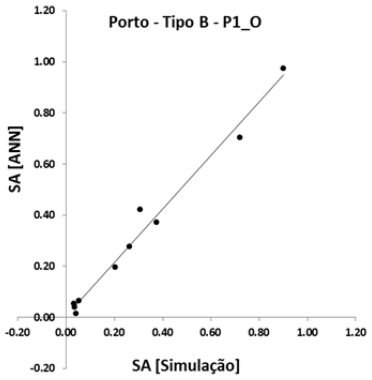




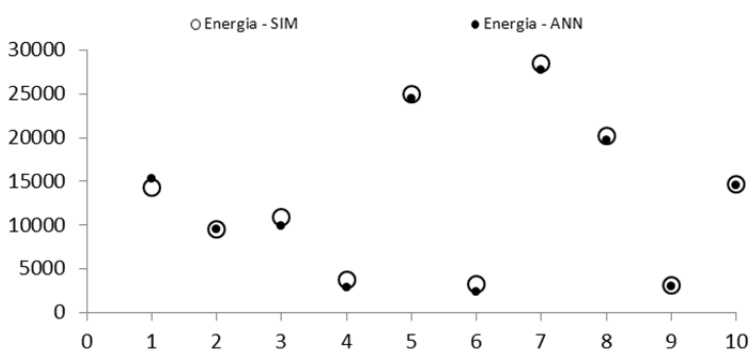


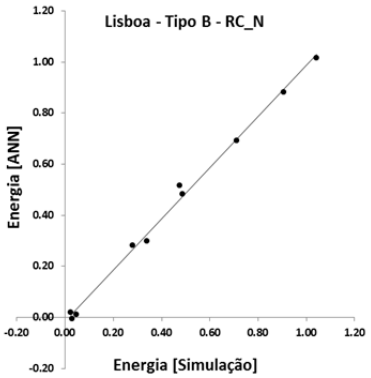


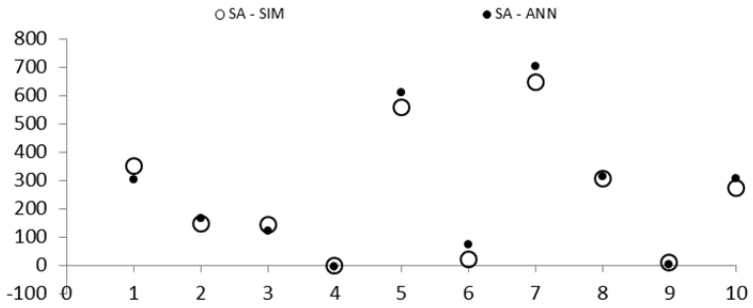


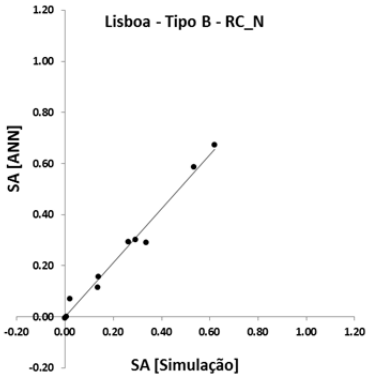


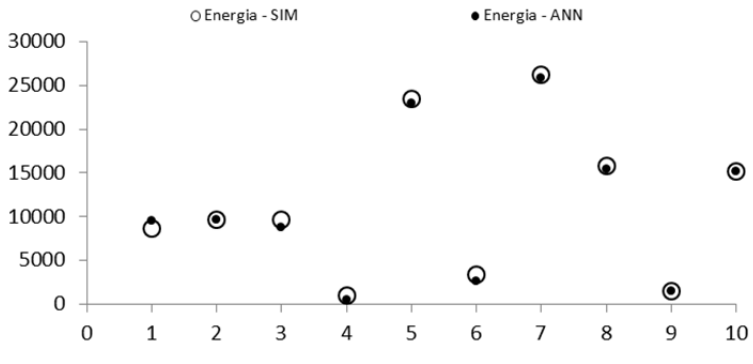
- Tipo B, Lisboa, Norte

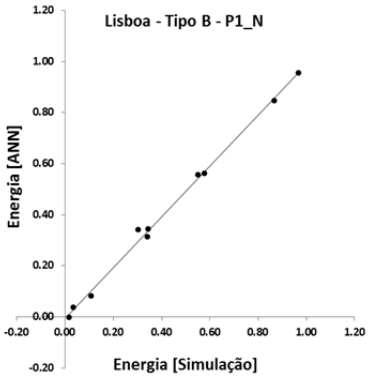


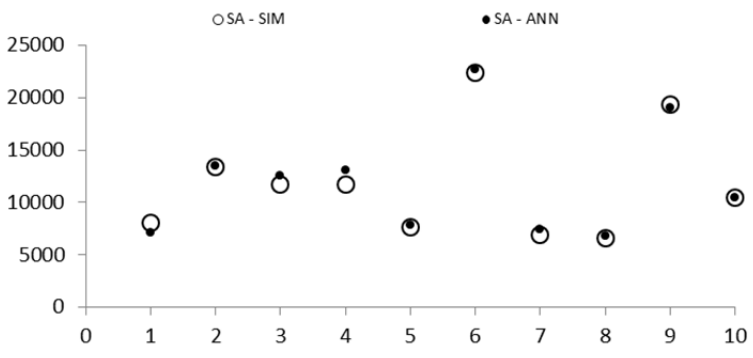


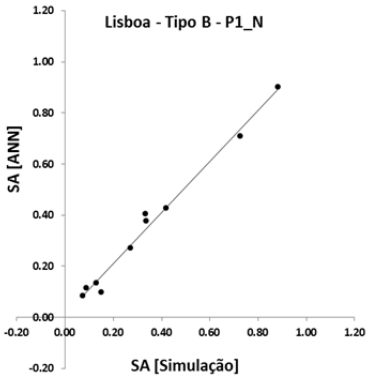




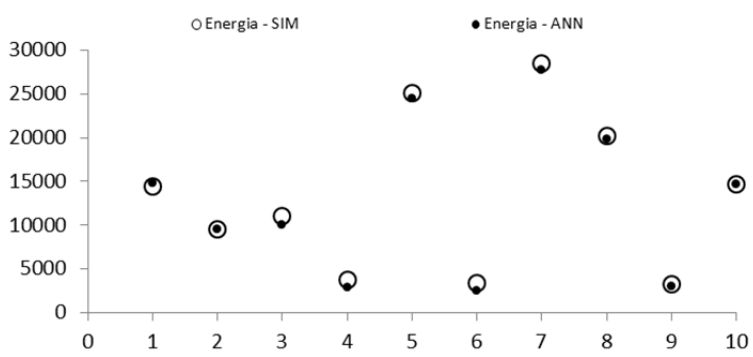


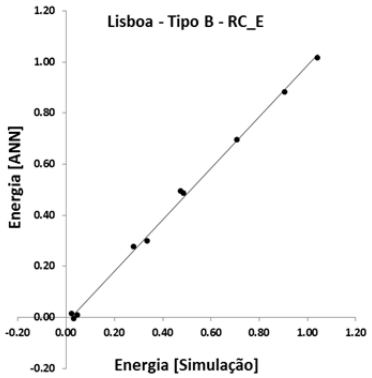


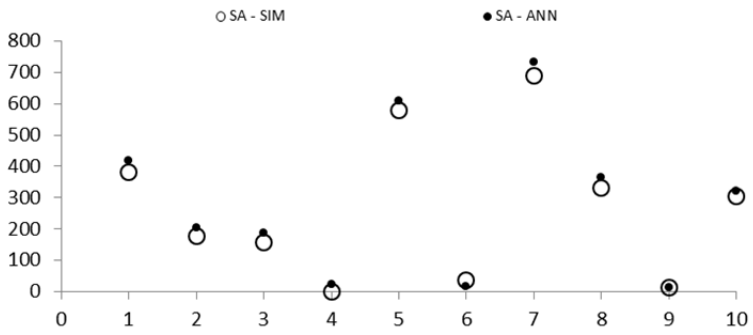


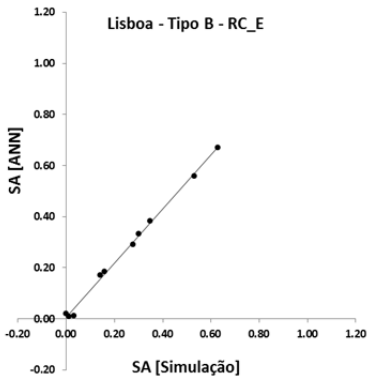


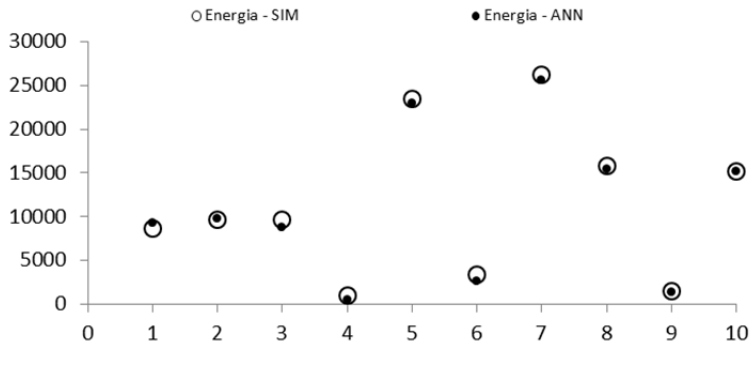
- Tipo B, Lisboa, Este

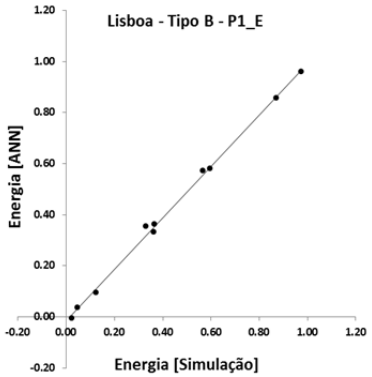


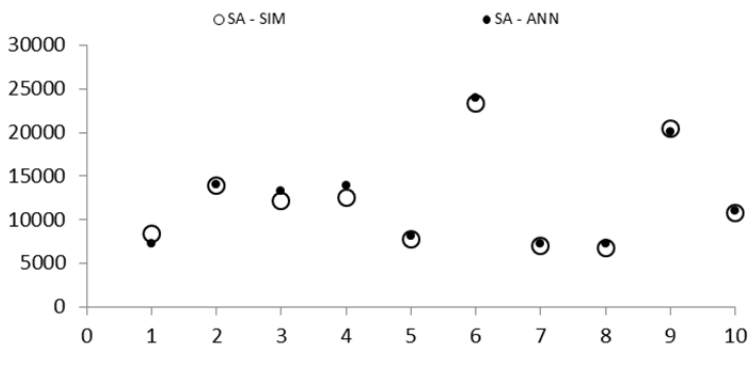


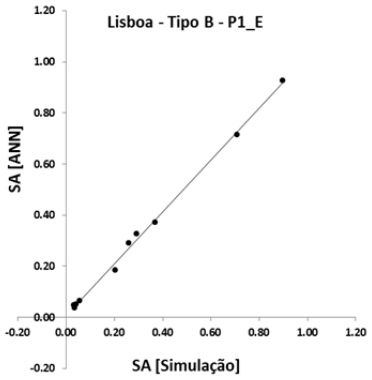




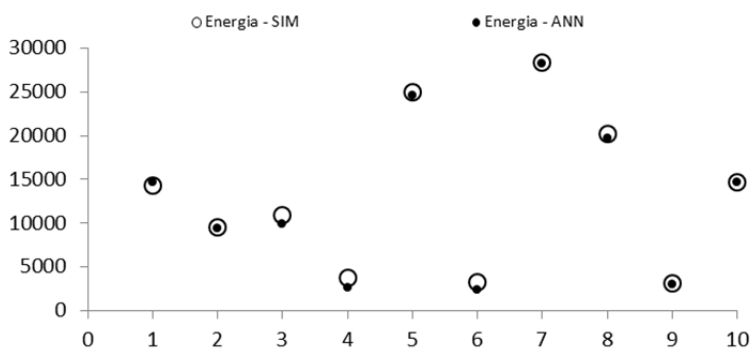


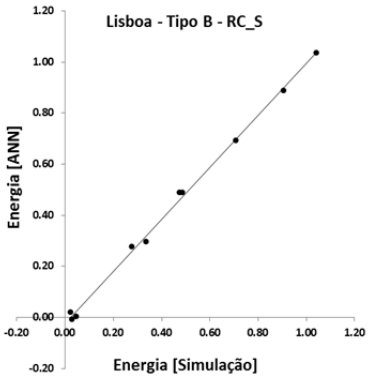


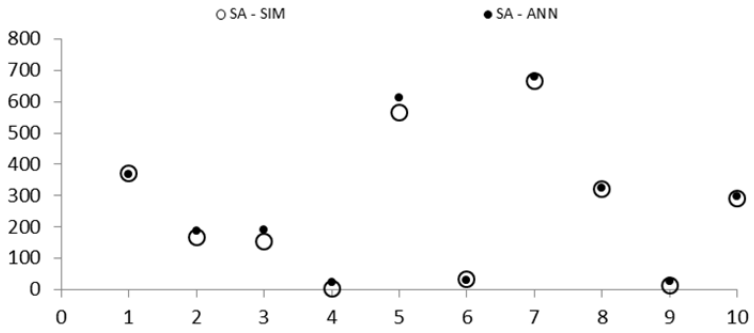


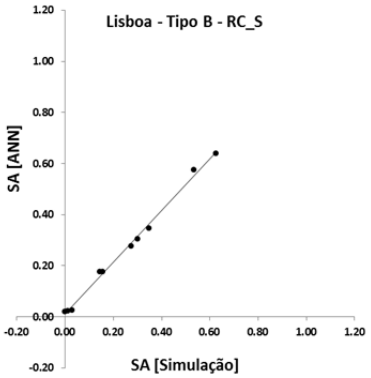


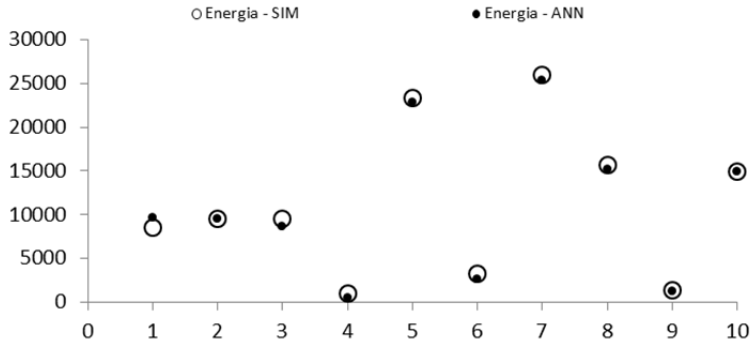
- Tipo B, Lisboa, Sul

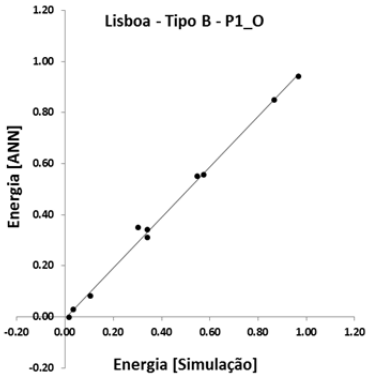


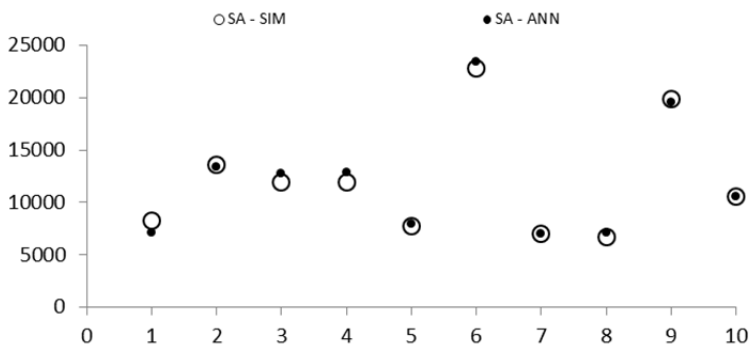


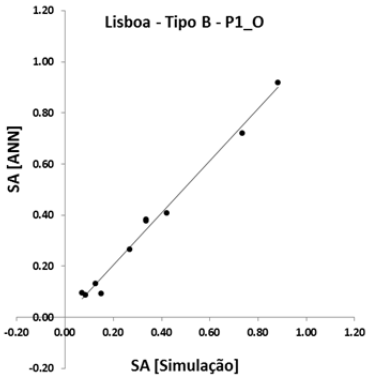




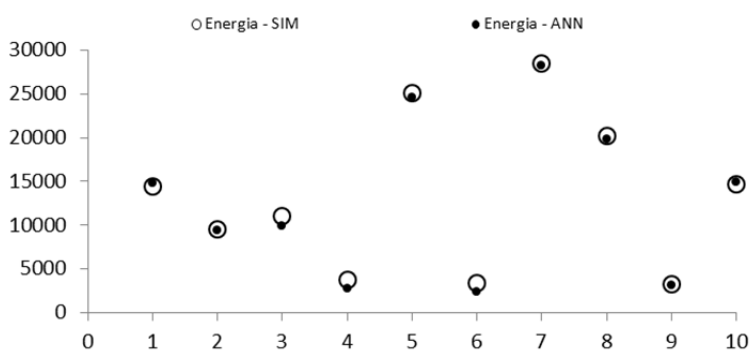


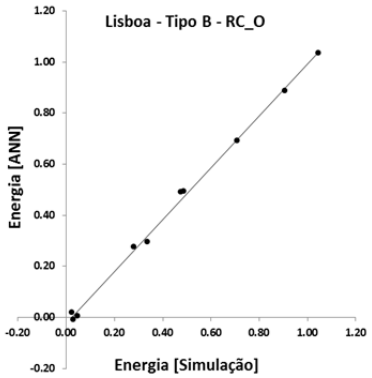


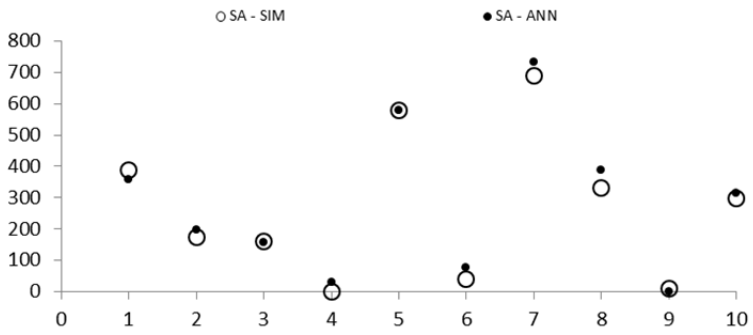


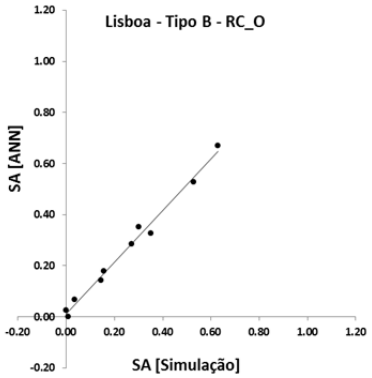


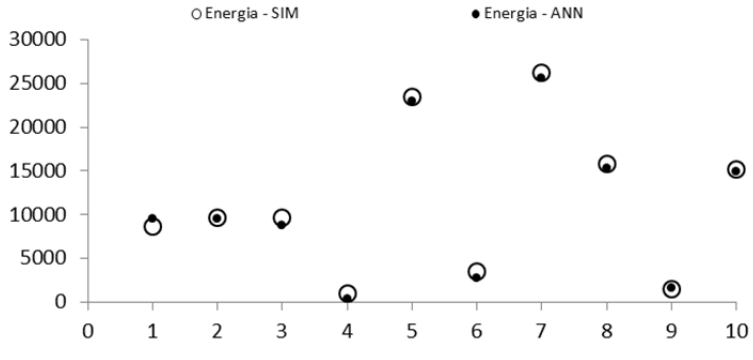
- Tipo B, Lisboa, Oeste

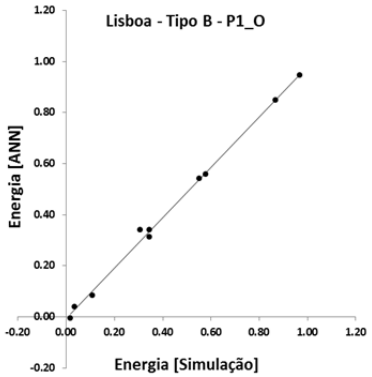


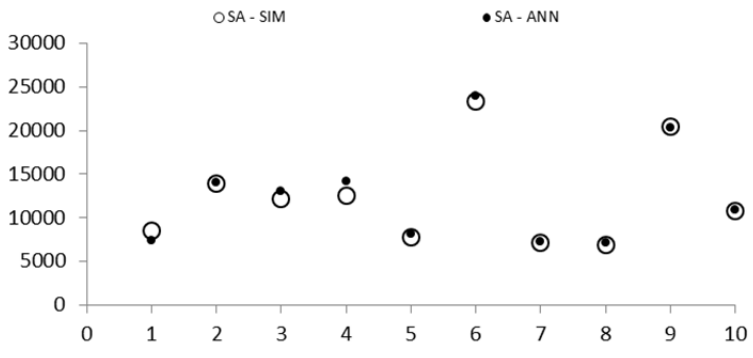


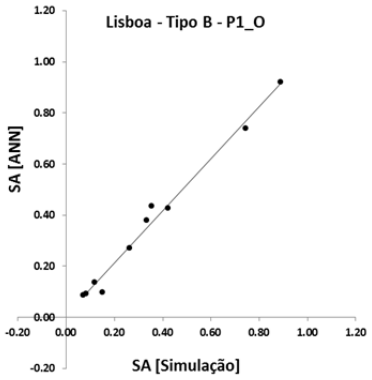




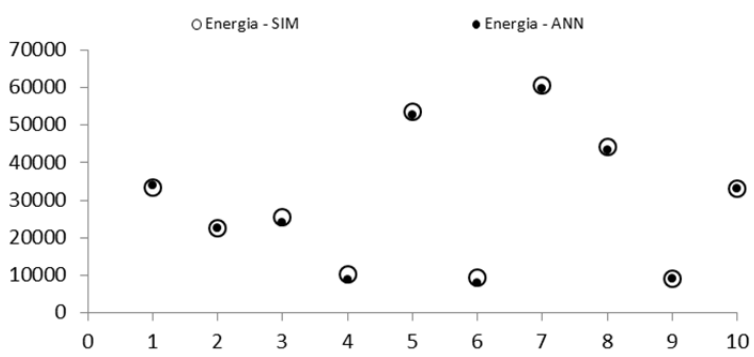


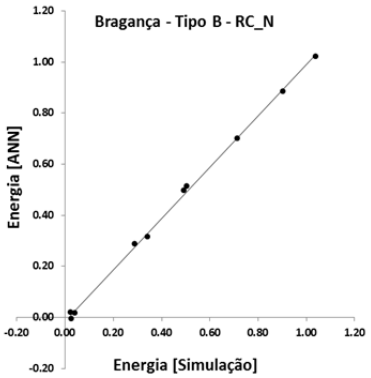


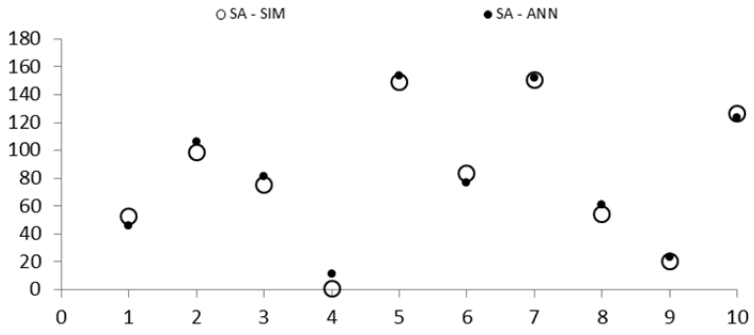


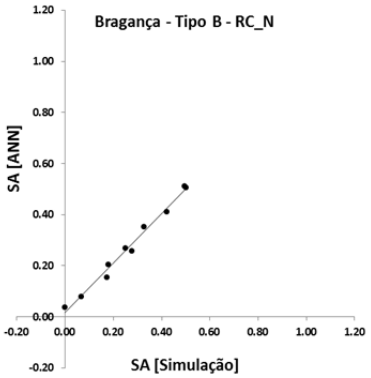


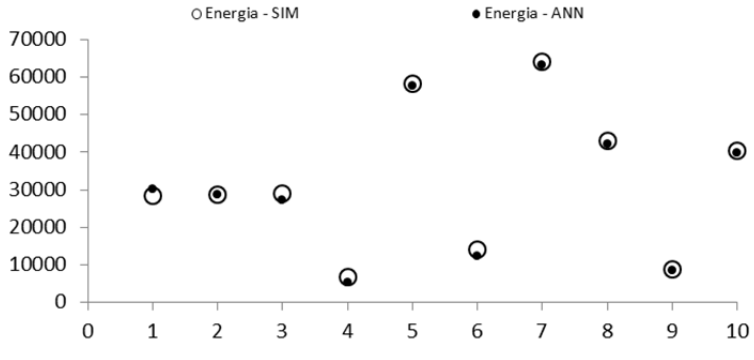
- Tipo B, Bragança, Norte

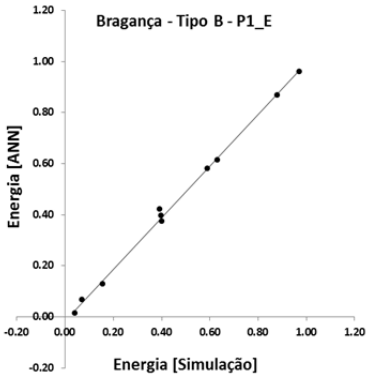


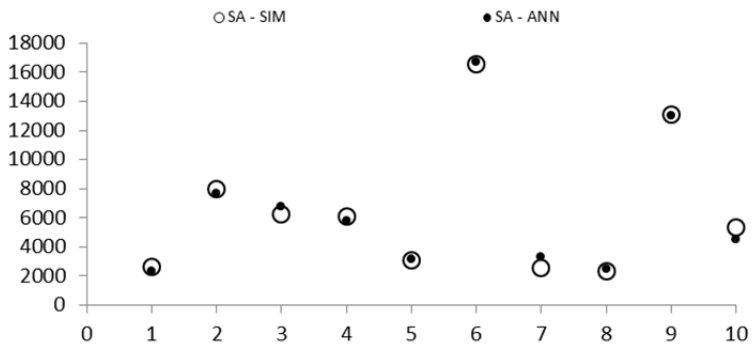


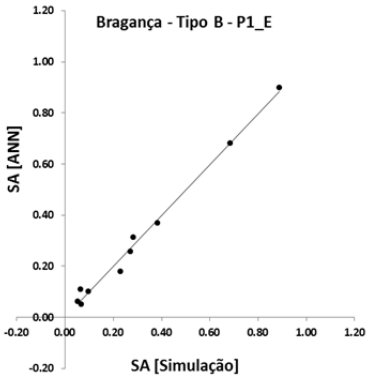




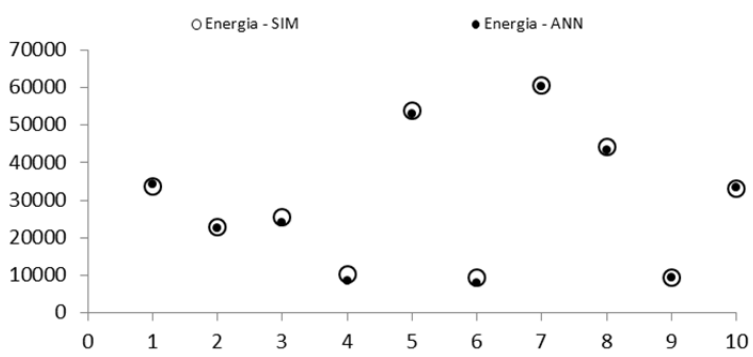


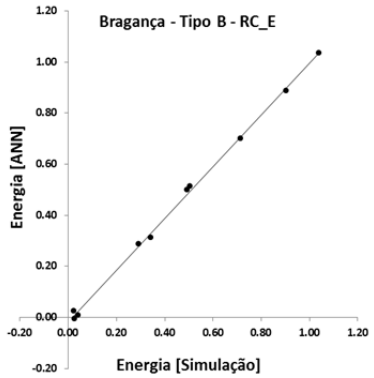


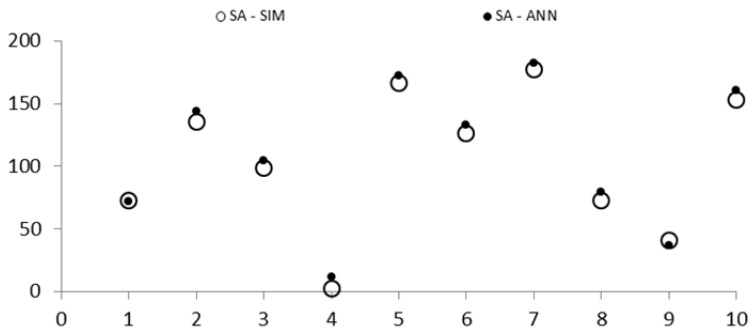


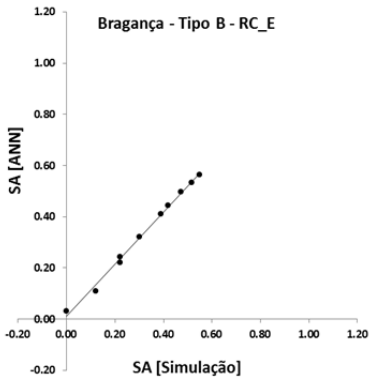


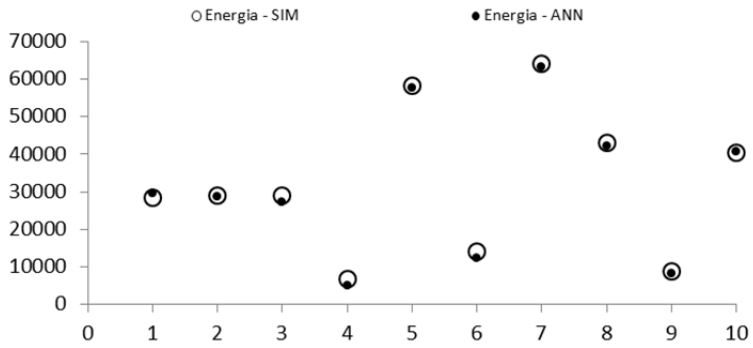
- Tipo B, Bragança, Este

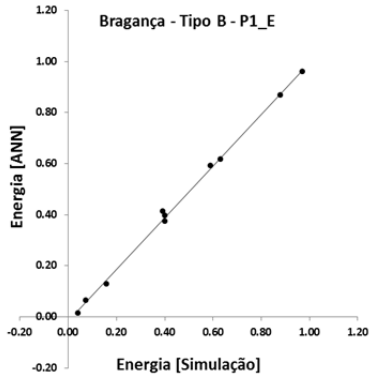


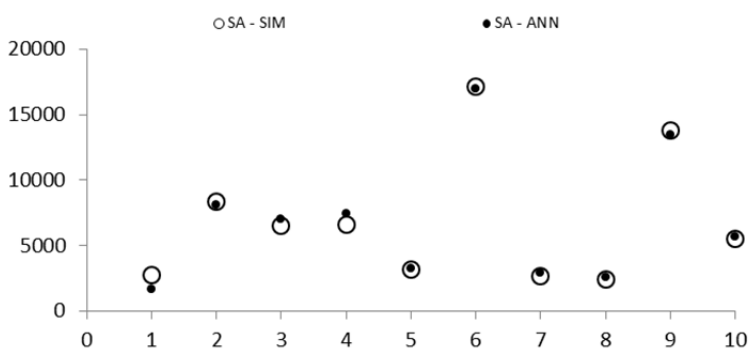


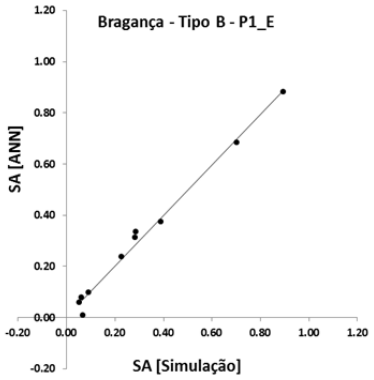




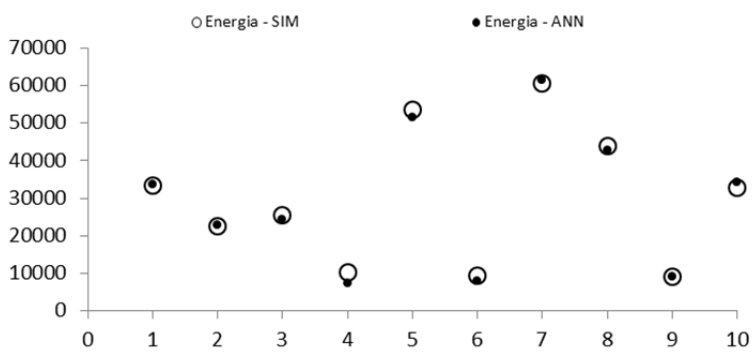


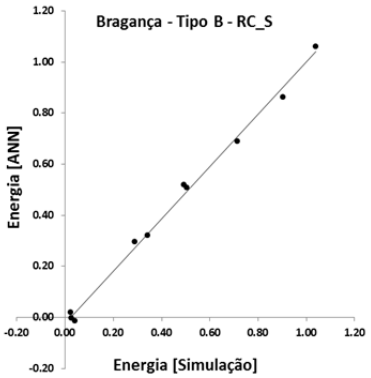


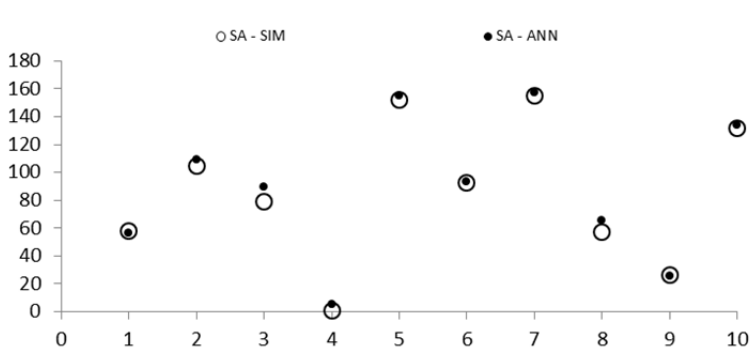


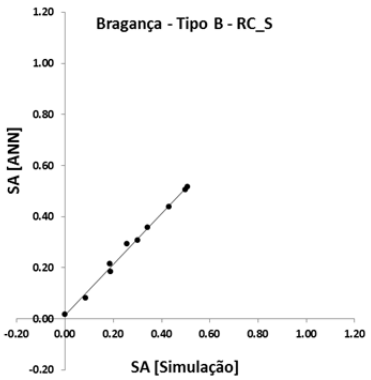


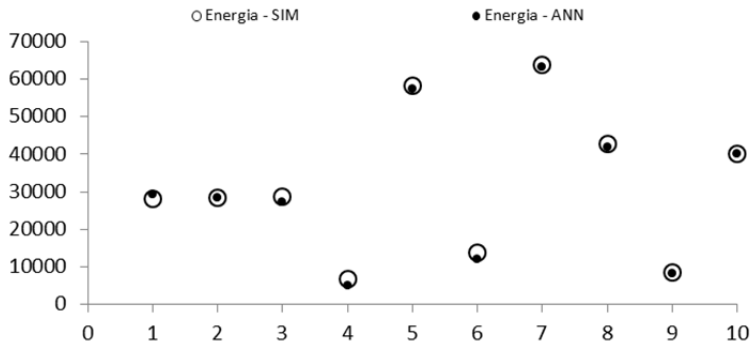
- Tipo B, Bragança, Sul

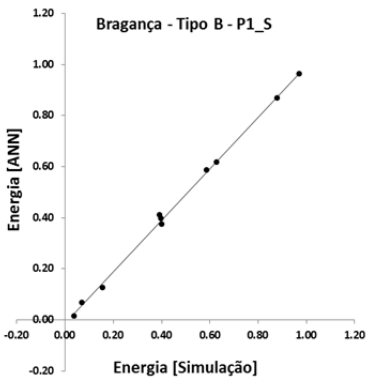


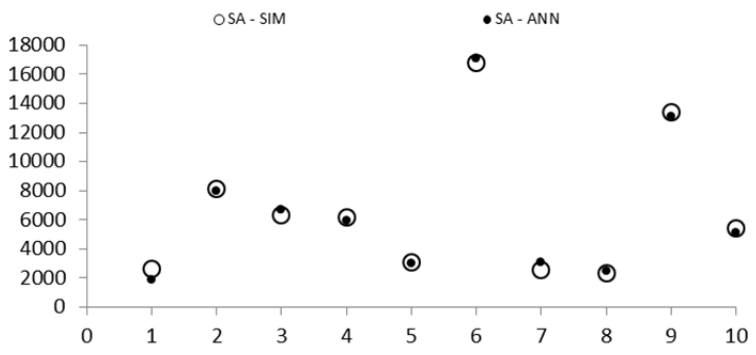


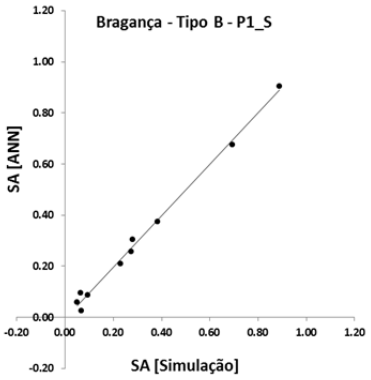




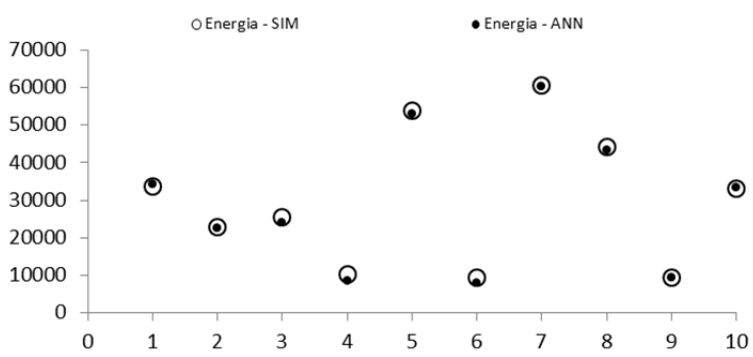


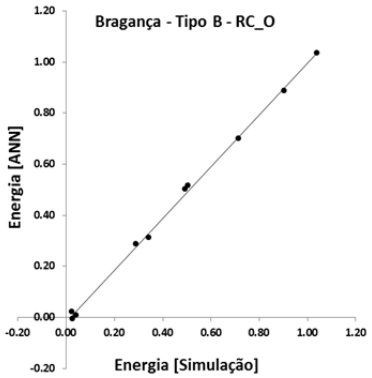


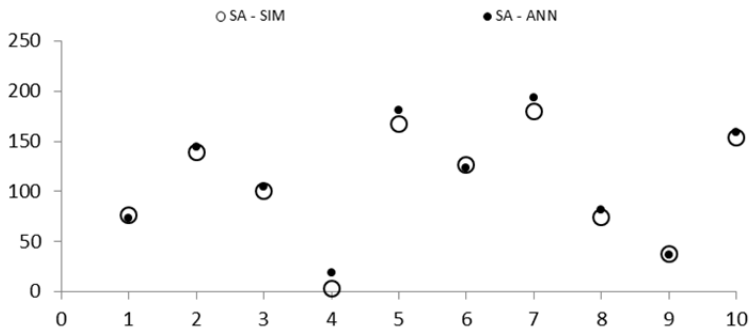


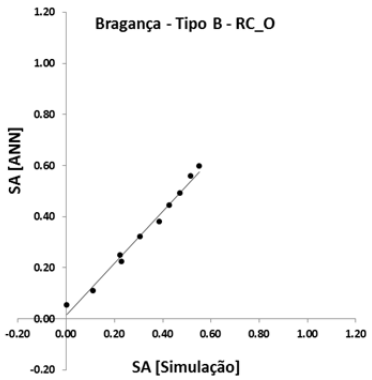


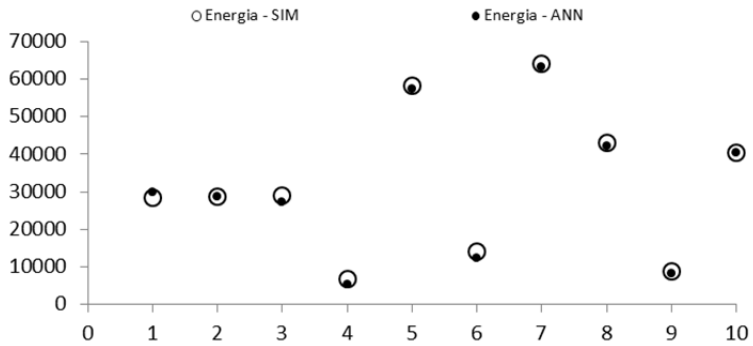
- Tipo B, Bragança, Oeste

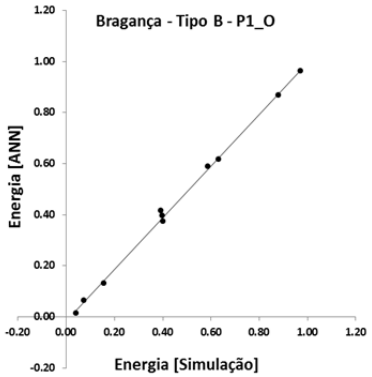


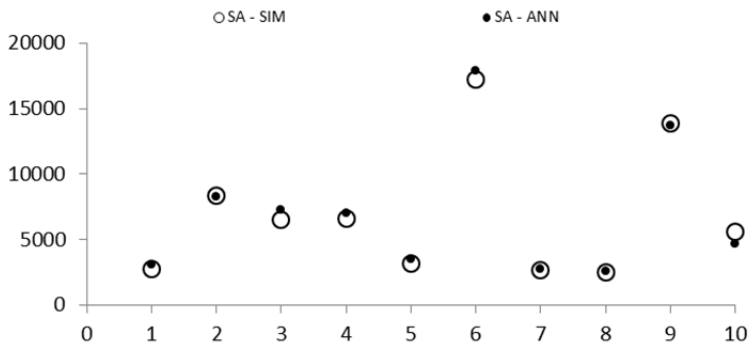


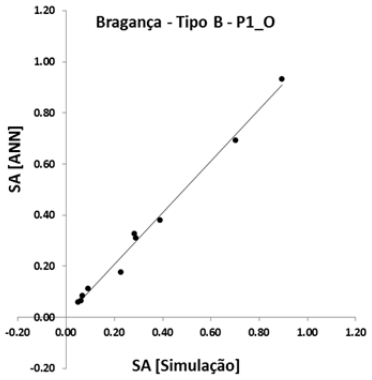












ANEXO V ANÁLISE PARAMÉTRICA DE SENSIBILIDADE

AV.1 FUNÇÃO F_1 - ENERGIA

AV.2 FUNÇÃO F_1 - SOBREAQUECIMENTO

AV.1 FUNÇÃO F_1 – ENERGIA

- Tipo A, Norte

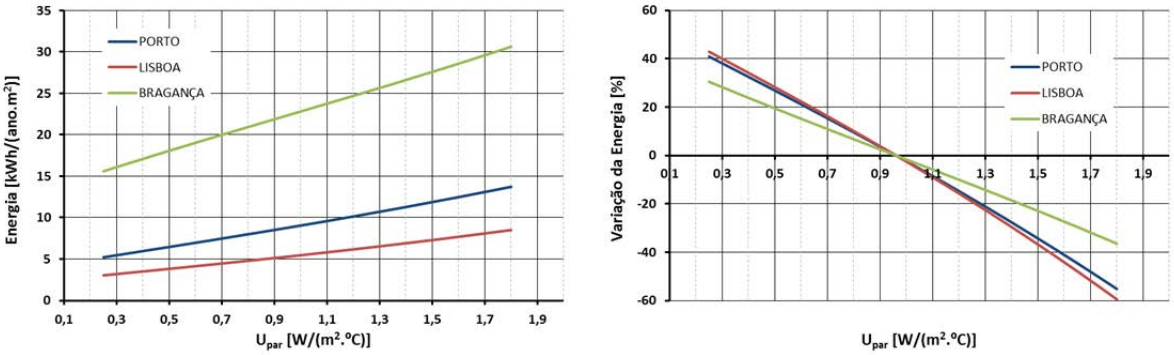


Figura AV.1 – Estudo paramétrico, função energia vs. U_{par}, escola tipo A, Norte

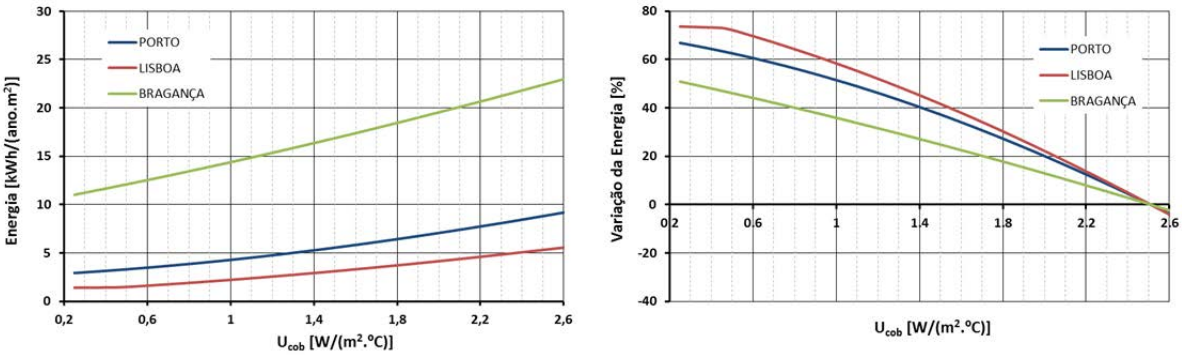


Figura AV.2 – Estudo paramétrico, função energia vs. U_{cob}, escola tipo A, Norte

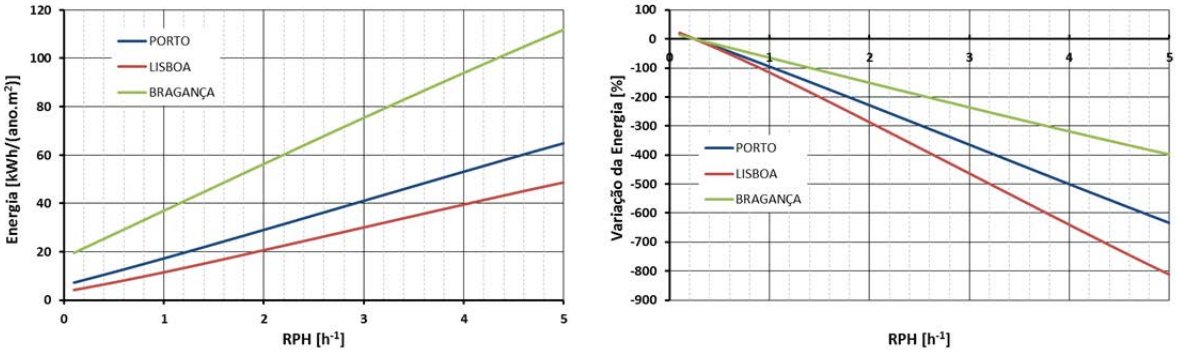


Figura AV.3 – Estudo paramétrico, função energia vs. *RPH*, escola tipo A, Norte

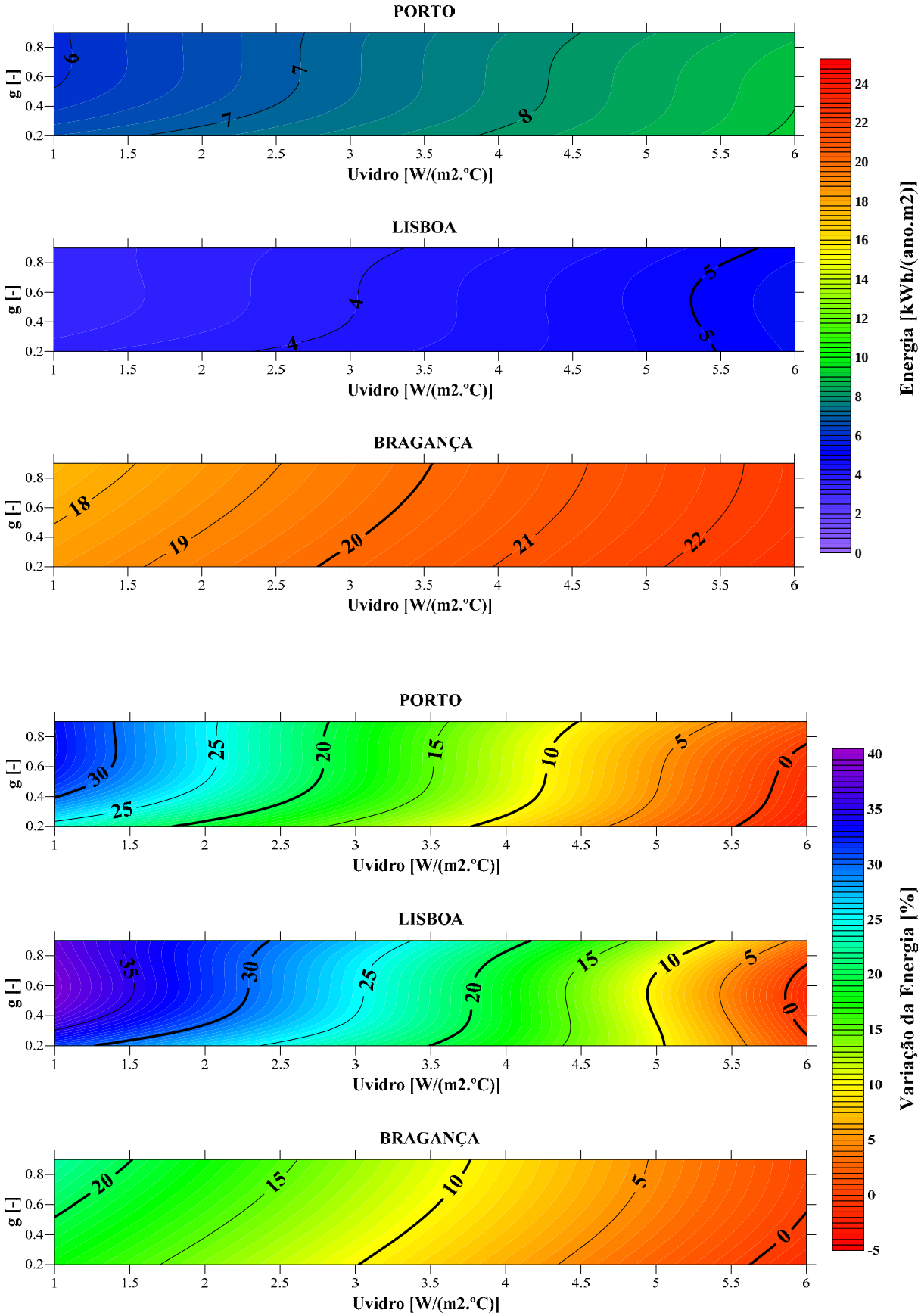


Figura AV.4 – Estudo paramétrico, função energia vs. U_{vidro} e g, escola tipo A, Norte

- Tipo A, Este

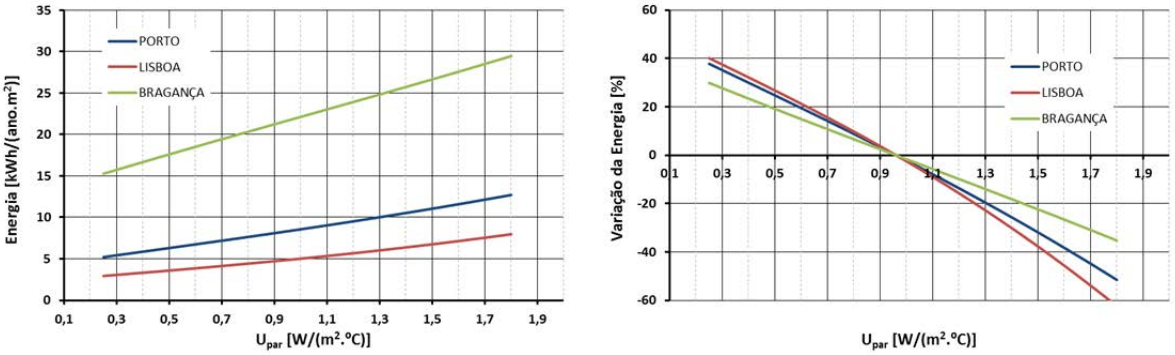


Figura AV.5 – Estudo paramétrico, função energia vs. U_{par}, escola tipo A, Este

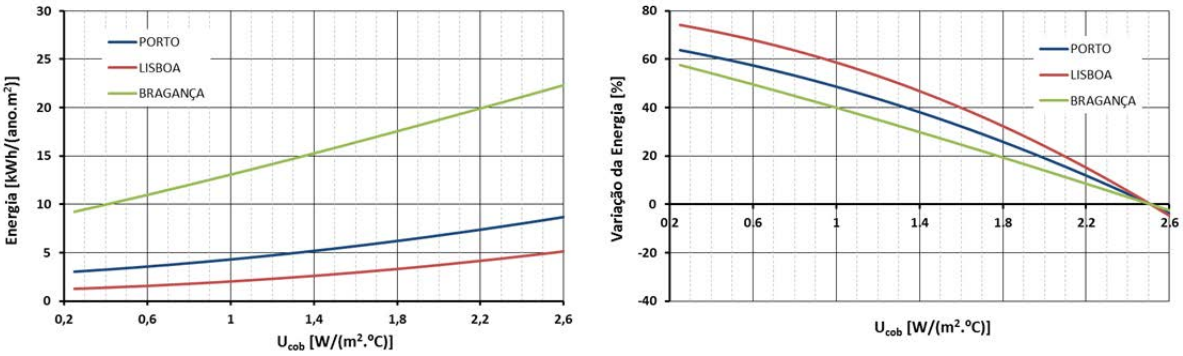


Figura AV.6 – Estudo paramétrico, função energia vs. U_{cob}, escola tipo A, Este

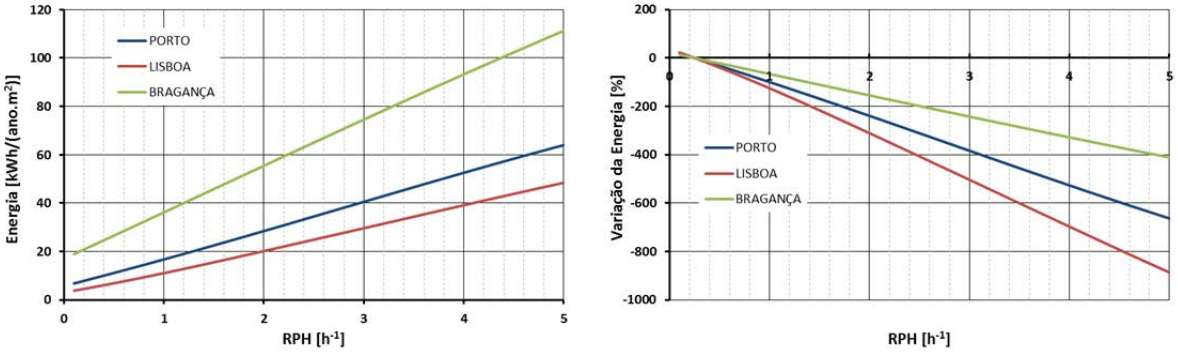


Figura AV.7 – Estudo paramétrico, função energia vs. *RPH*, escola tipo A, Este

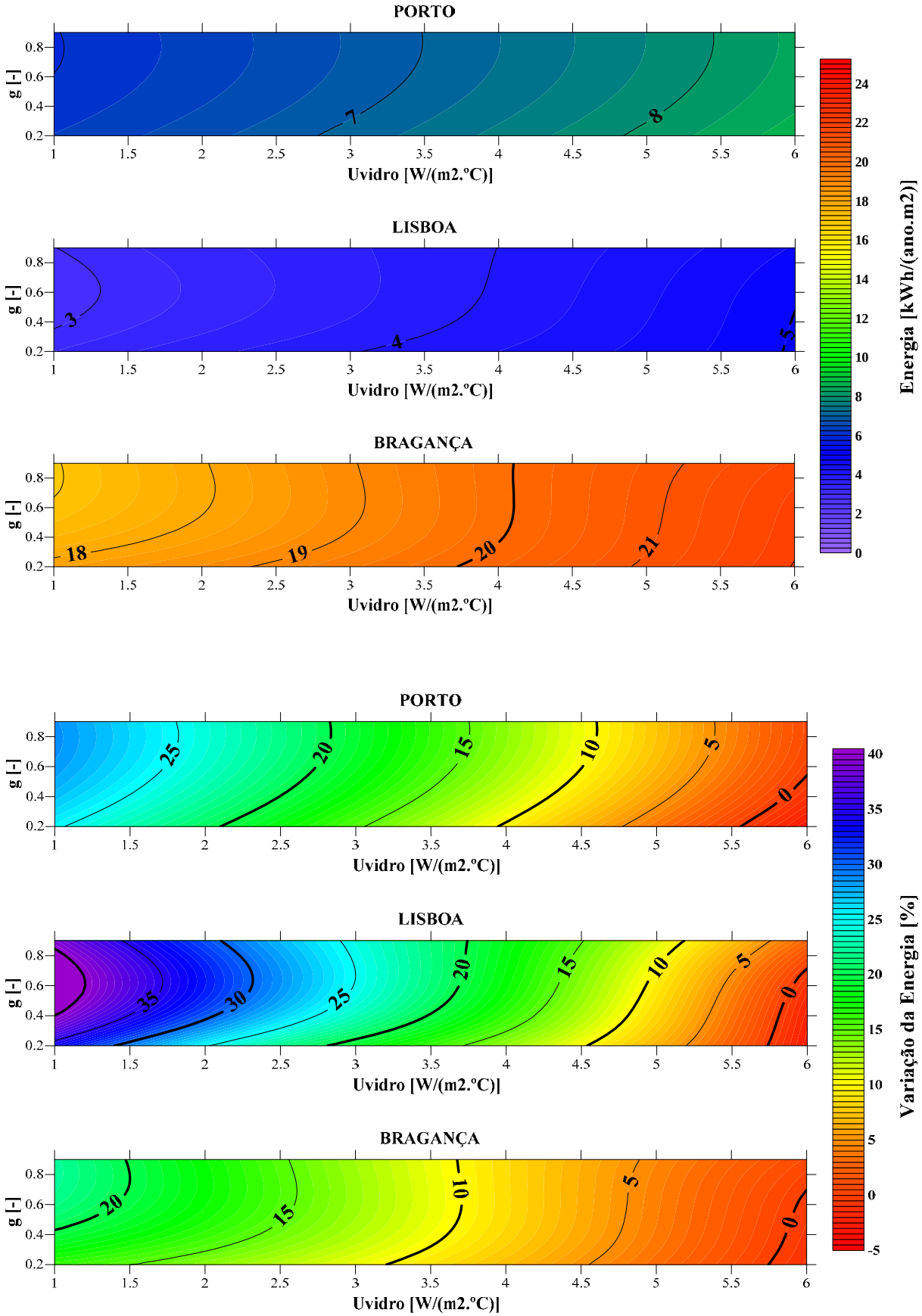


Figura AV.8 – Estudo paramétrico, função energia vs. U_{vidro} e g, escola tipo A, Este

- Tipo A, Sul

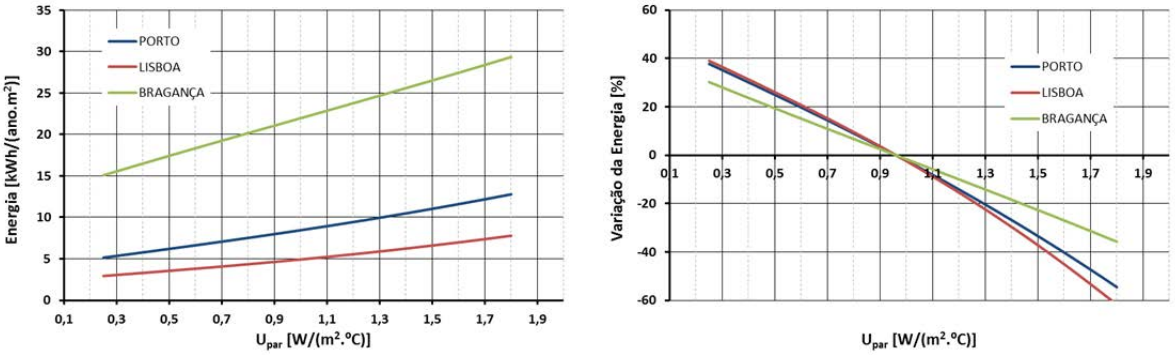


Figura AV.9 – Estudo paramétrico, função energia vs. U_{par}, escola tipo A, Sul

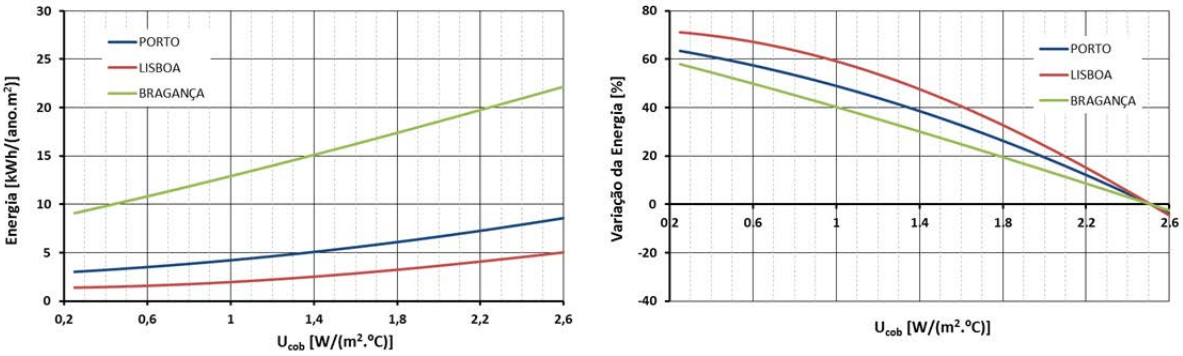


Figura AV.10 – Estudo paramétrico, função energia vs. U_{cob}, escola tipo A, Sul

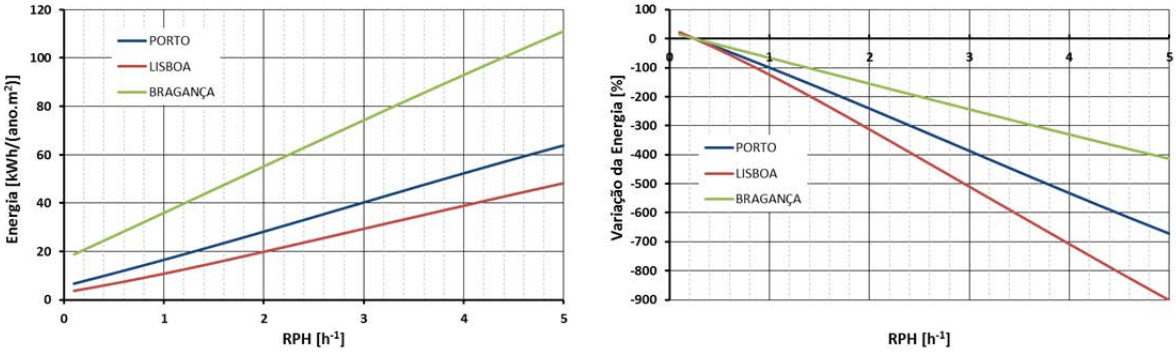


Figura AV.11 – Estudo paramétrico, função energia vs. *RPH*, escola tipo A, Sul

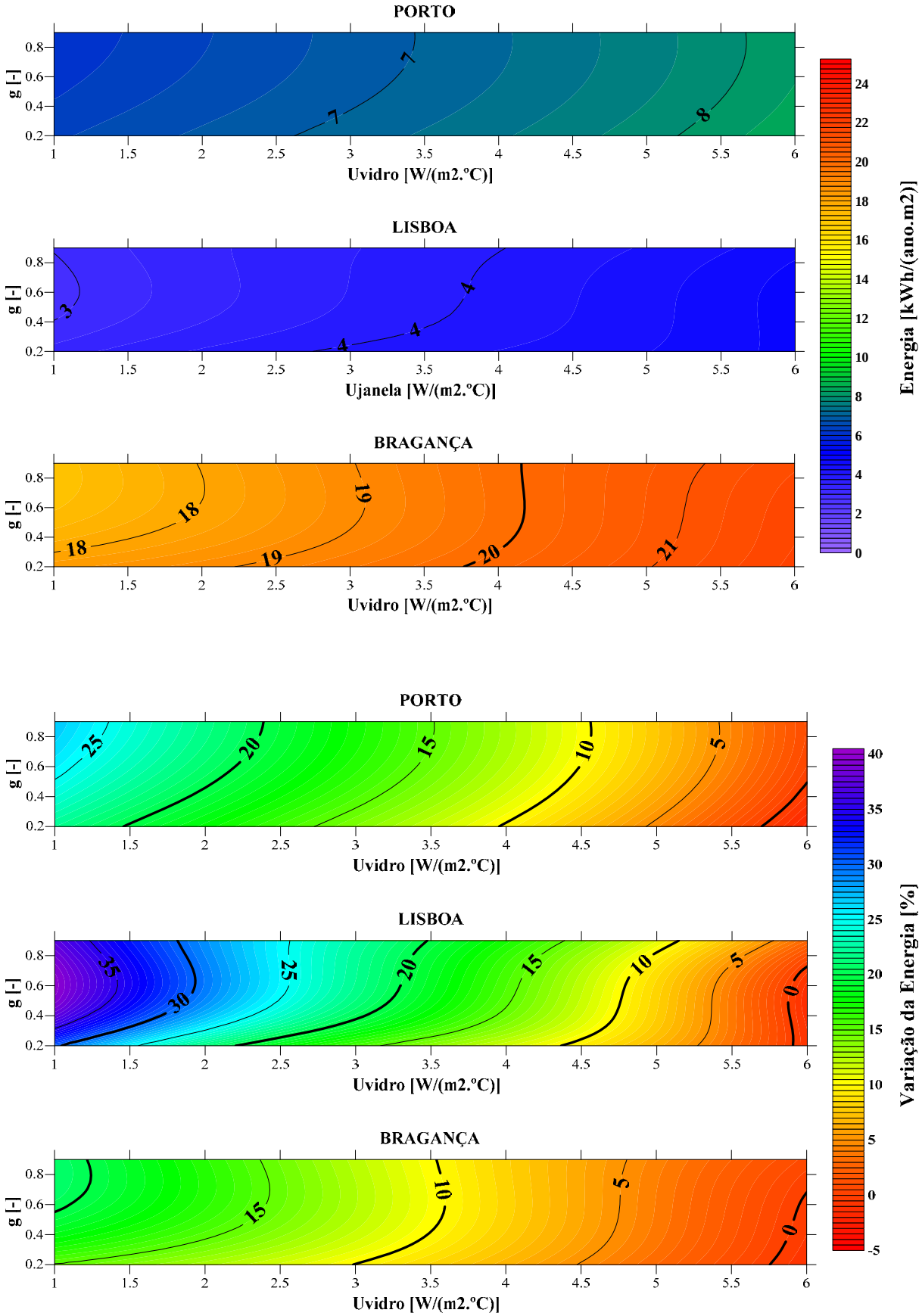


Figura AV.12 – Estudo paramétrico, função energia vs. U_{vidro} e g, escola tipo A, Sul

- Tipo A, Oeste

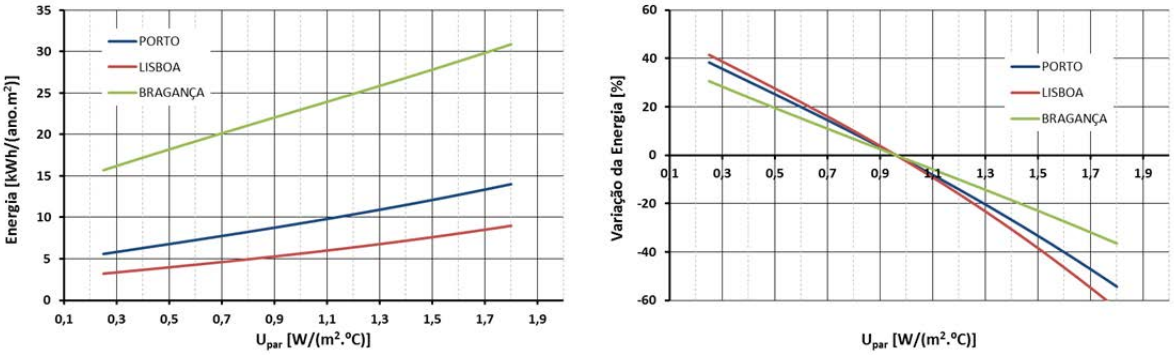


Figura AV.13 – Estudo paramétrico, função energia vs. U_{par}, escola tipo A, Oeste

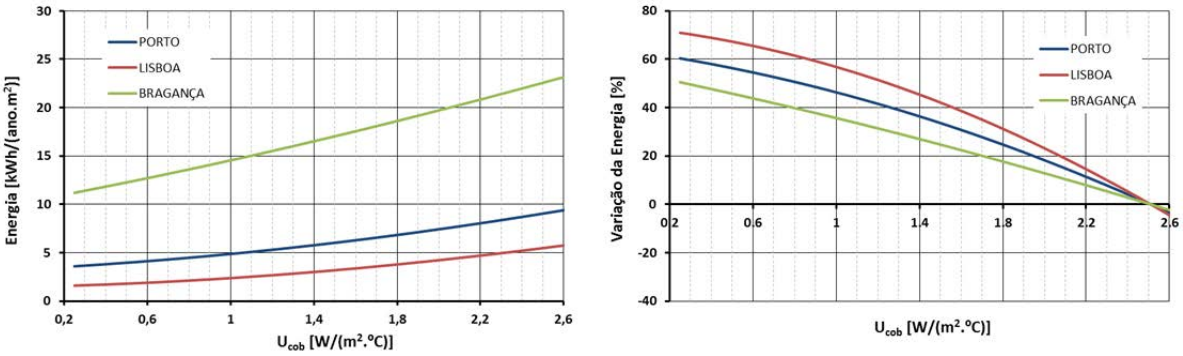


Figura AV.14 – Estudo paramétrico, função energia vs. U_{cob}, escola tipo A, Oeste

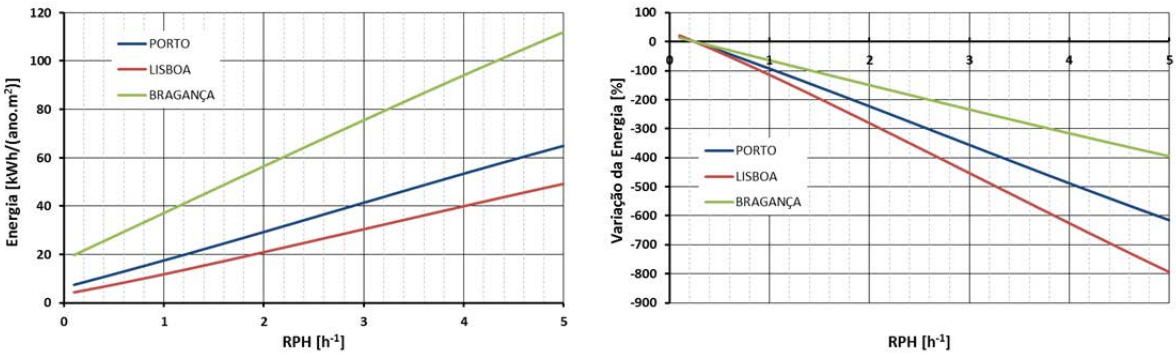


Figura AV.15 – Estudo paramétrico, função energia vs. *RPH*, escola tipo A, Oeste

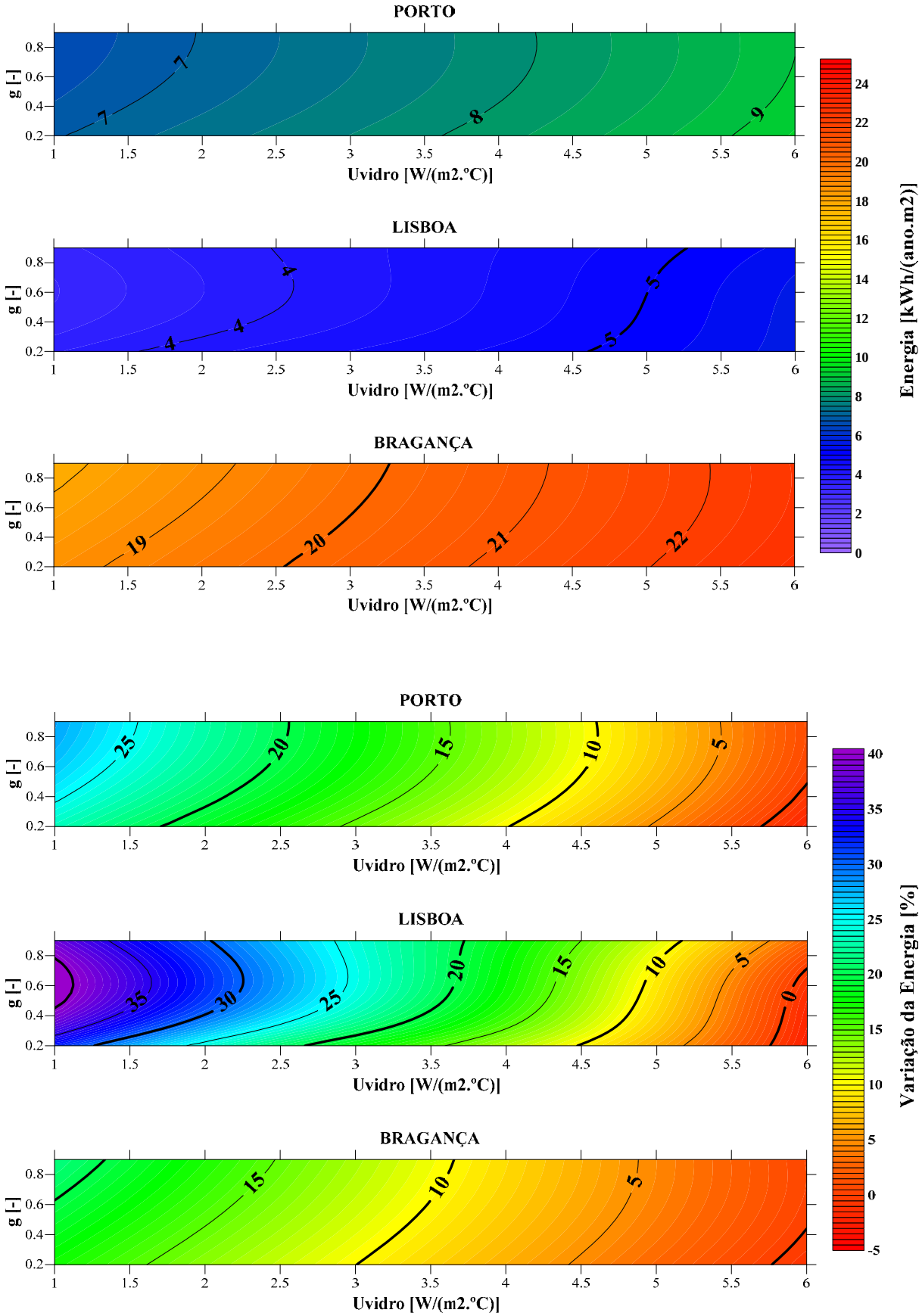


Figura AV.16 – Estudo paramétrico, função energia vs. U_{vidro} e g, escola tipo A, Oeste

- Tipo B, Norte

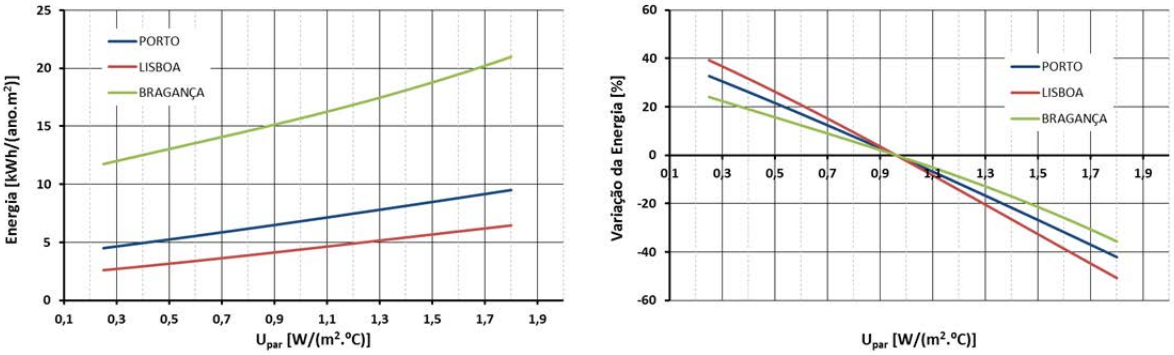


Figura AV.17 – Estudo paramétrico, função energia vs. U_{par}, escola tipo B, Norte

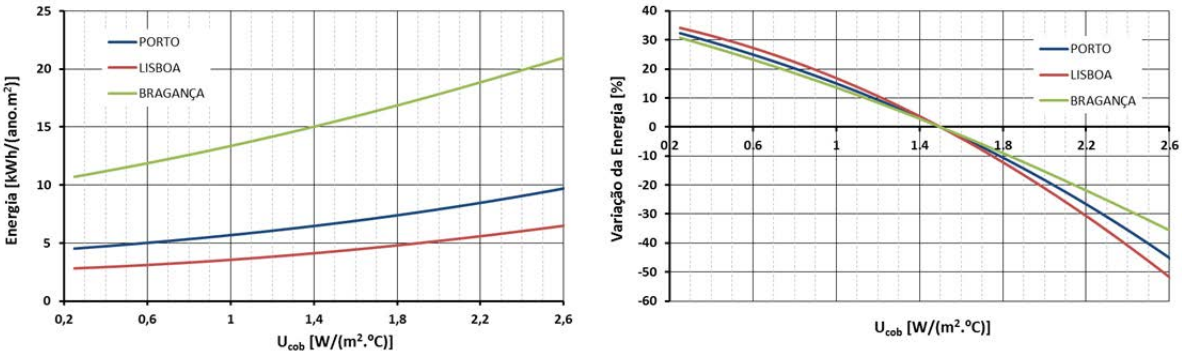


Figura AV.18 – Estudo paramétrico, função energia vs. U_{cob}, escola tipo B, Norte

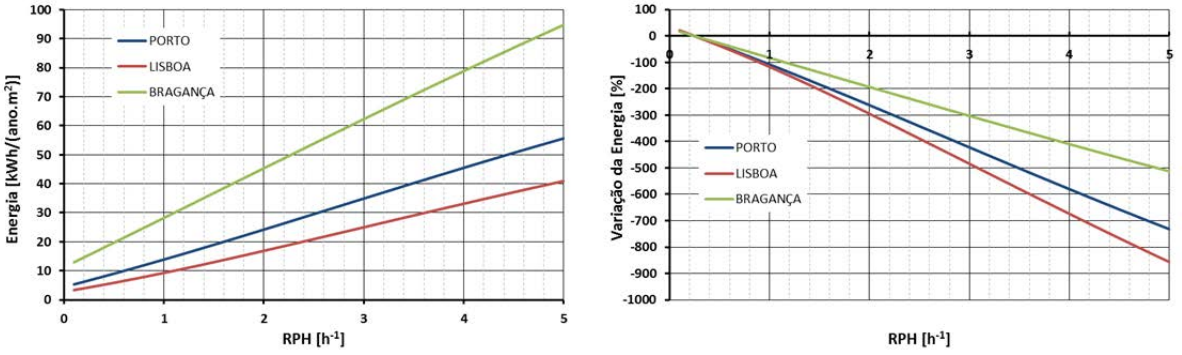


Figura AV.19 – Estudo paramétrico, função energia vs. *RPH*, escola tipo B, Norte

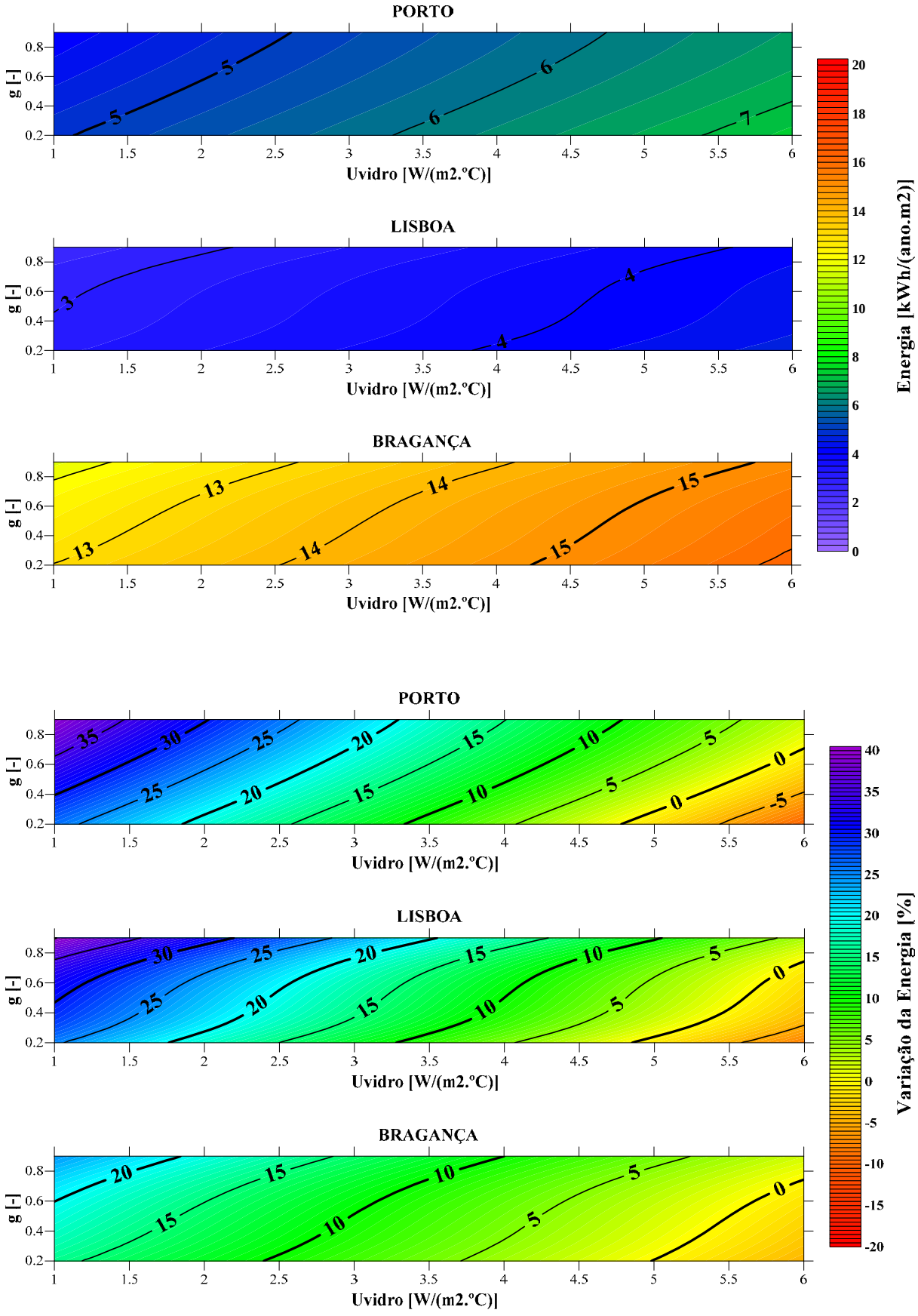


Figura AV.20 – Estudo paramétrico, função energia vs. U_{vidro} e g, escola tipo B, Norte

- Tipo B, Este

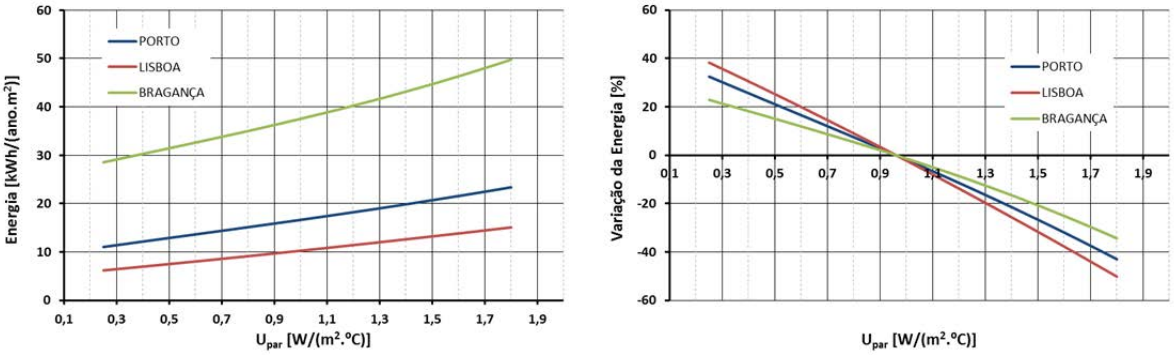


Figura AV.21 – Estudo paramétrico, função energia vs. U_{par}, escola tipo B, Este

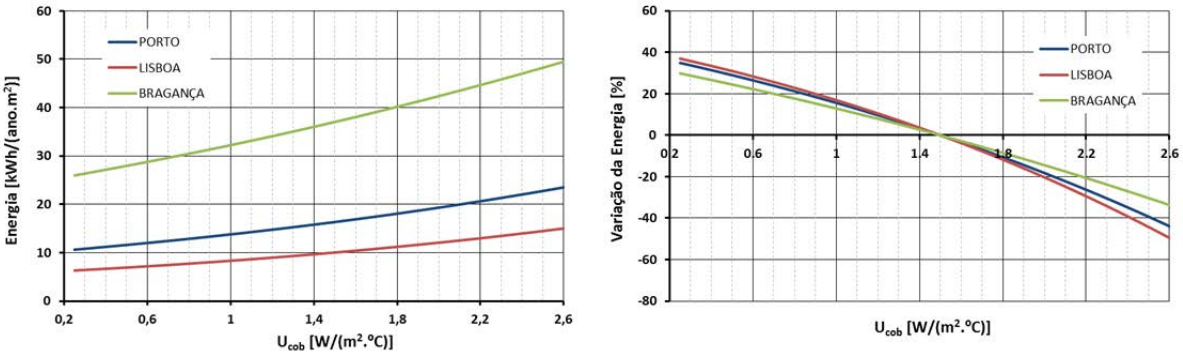


Figura AV.22 – Estudo paramétrico, função energia vs. U_{cob}, escola tipo B, Este

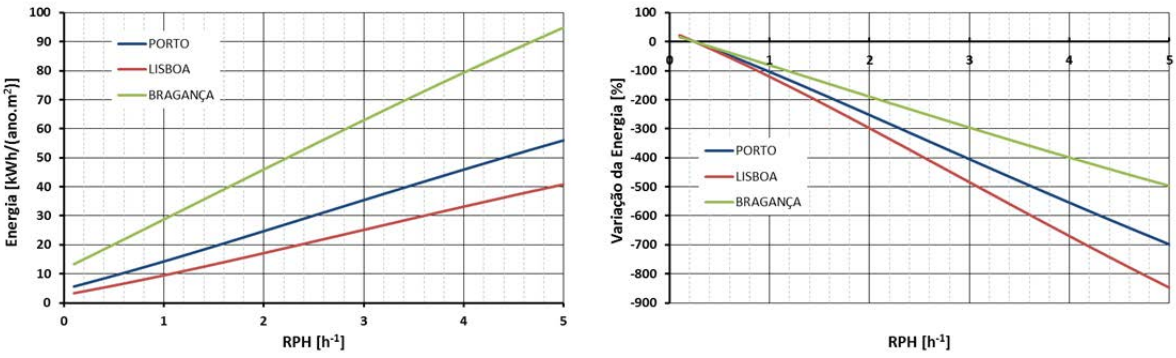


Figura AV.23 – Estudo paramétrico, função energia vs. *RPH*, escola tipo B, Este

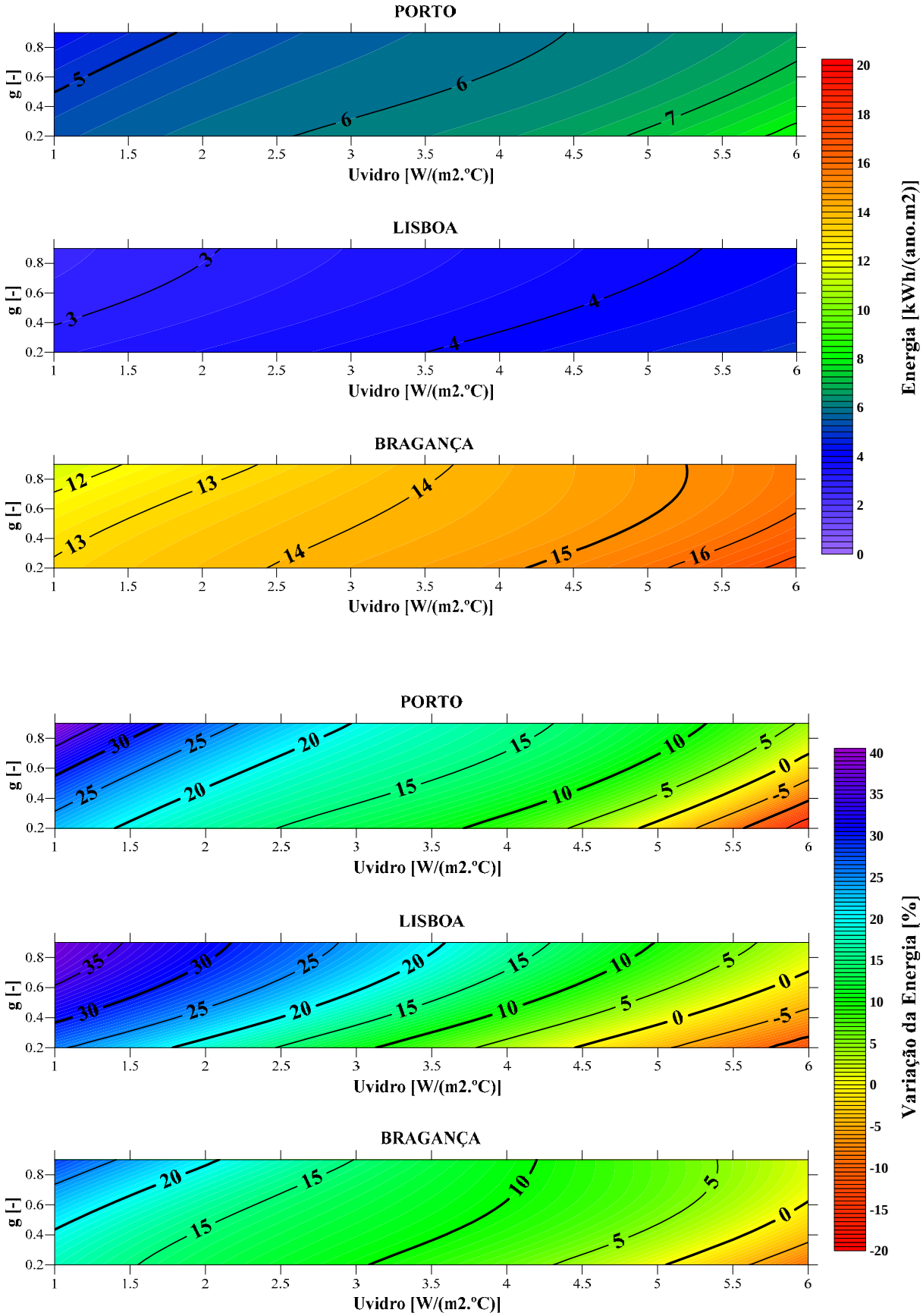


Figura AV.24 – Estudo paramétrico, função energia vs. U_{vidro} e g, escola tipo B, Este

- Tipo B, Sul

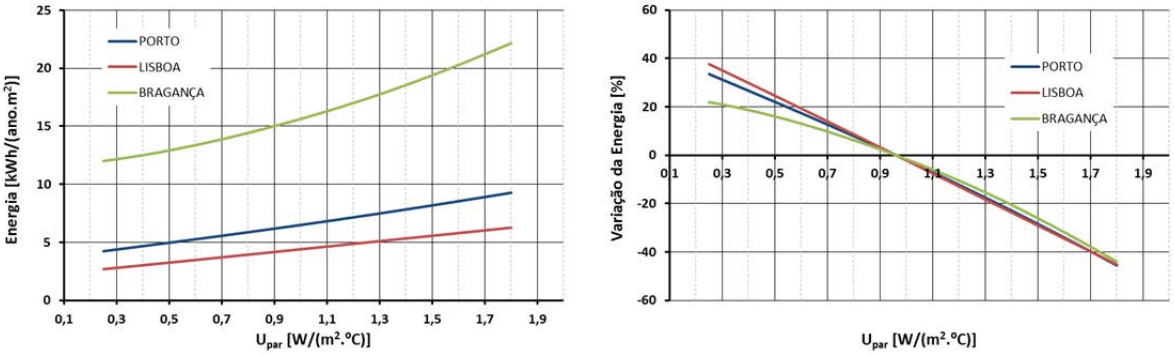


Figura AV.25 – Estudo paramétrico, função energia vs. U_{par}, escola tipo B, Sul

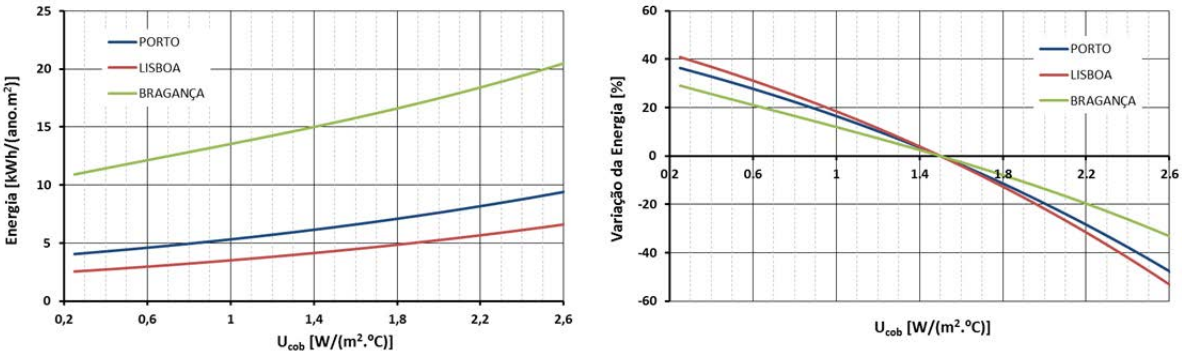


Figura AV.26 – Estudo paramétrico, função energia vs. U_{cob}, escola tipo B, Sul

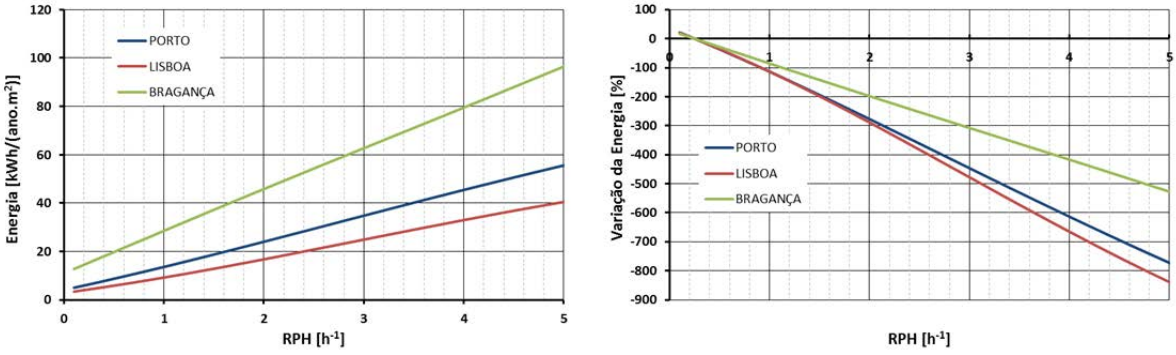


Figura AV.27 – Estudo paramétrico, função energia vs. *RPH*, escola tipo B, Sul

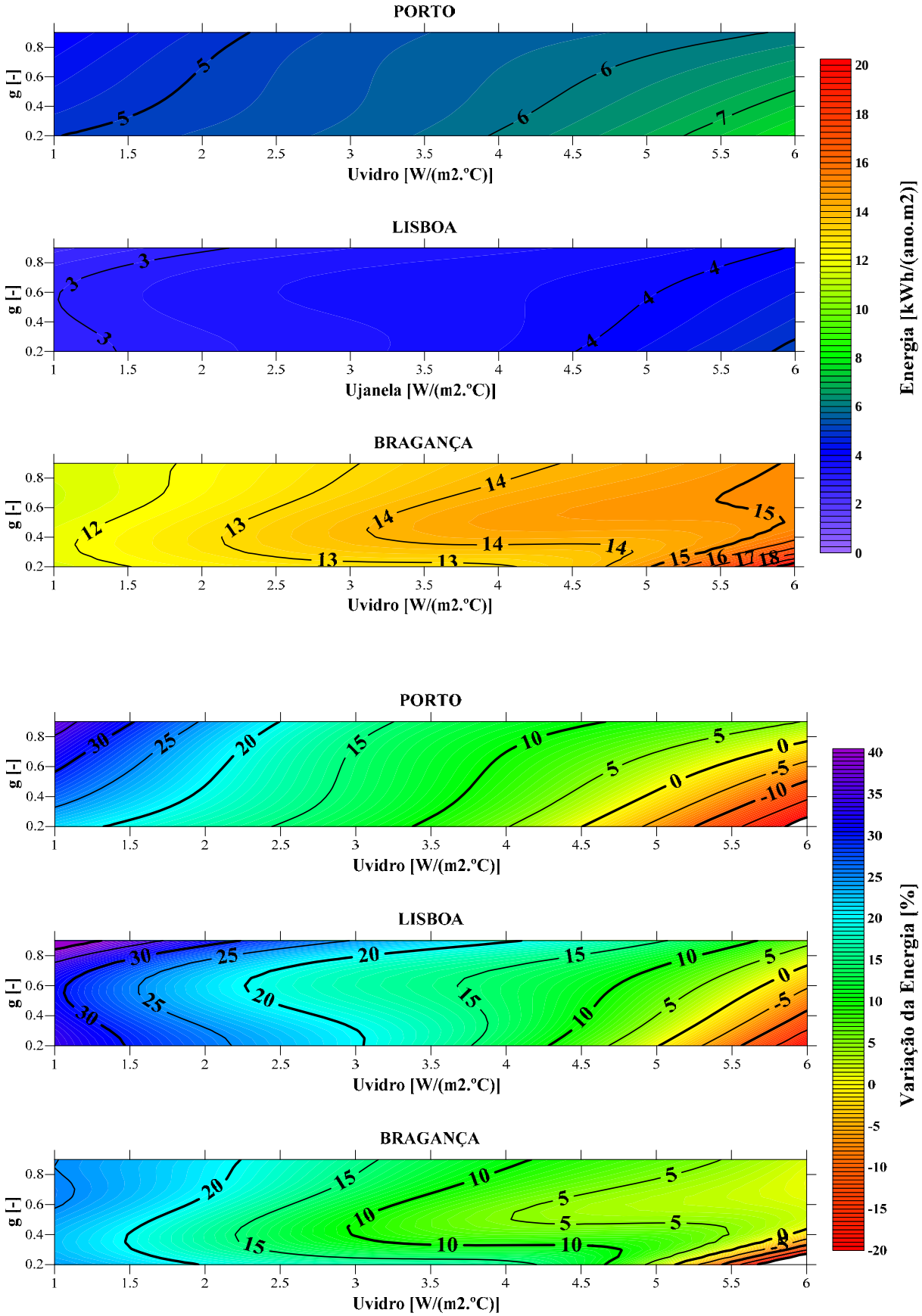


Figura AV.28 – Estudo paramétrico, função energia vs. U_{vidro} e g, escola tipo B, Sul

- Tipo B, Oeste

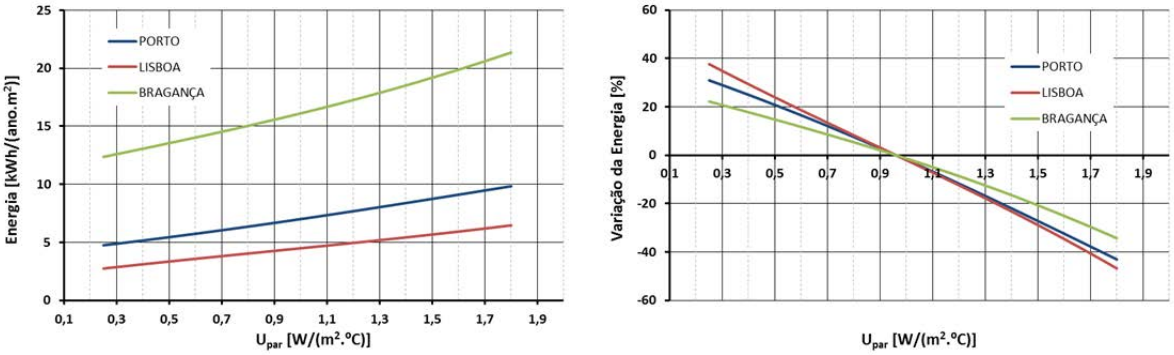


Figura AV.29 – Estudo paramétrico, função energia vs. U_{par}, escola tipo B, Oeste

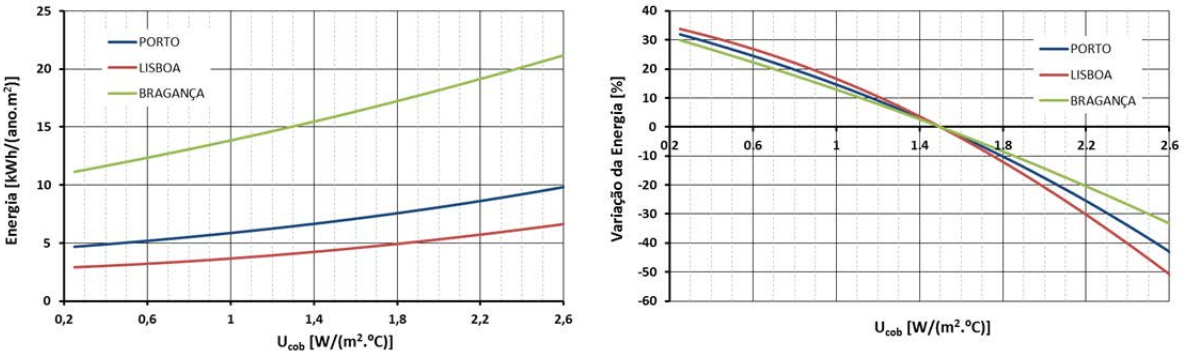


Figura AV.30 – Estudo paramétrico, função energia vs. U_{cob}, escola tipo B, Oeste

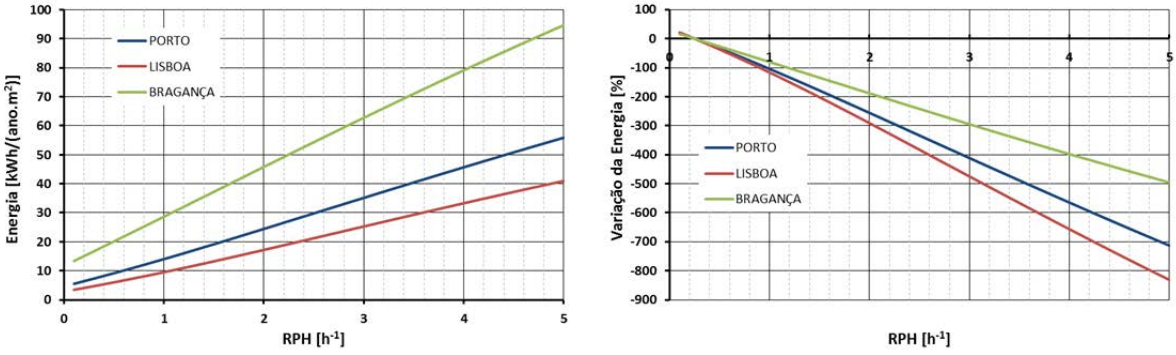


Figura AV.31 – Estudo paramétrico, função energia vs. *RPH*, escola tipo B, Oeste

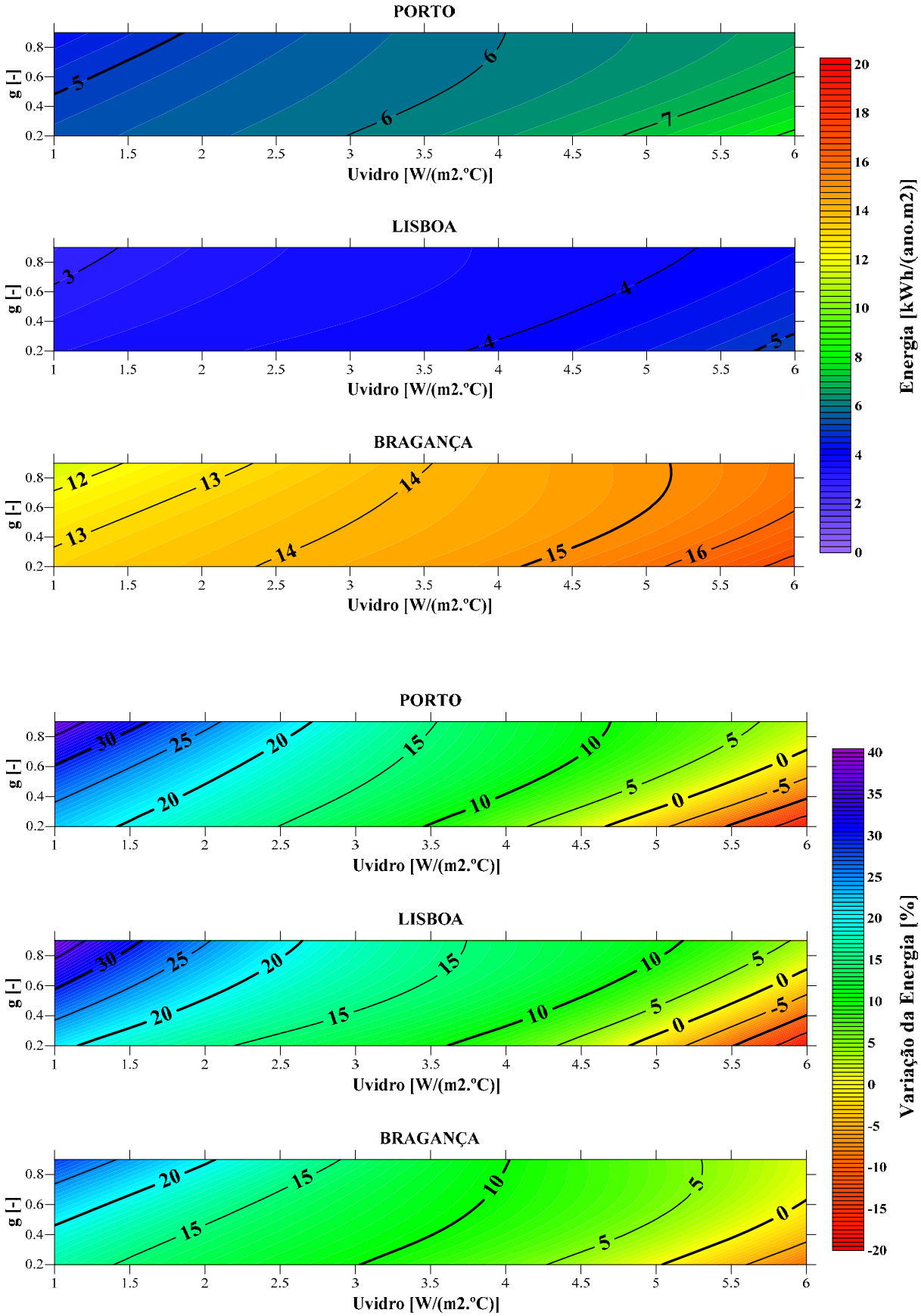


Figura AV.32 – Estudo paramétrico, função energia vs. U_{vidro} e g, escola tipo B, Oeste

AV.2 FUNÇÃO F_2 – SOBREAQUECIMENTO

- Tipo A, Norte

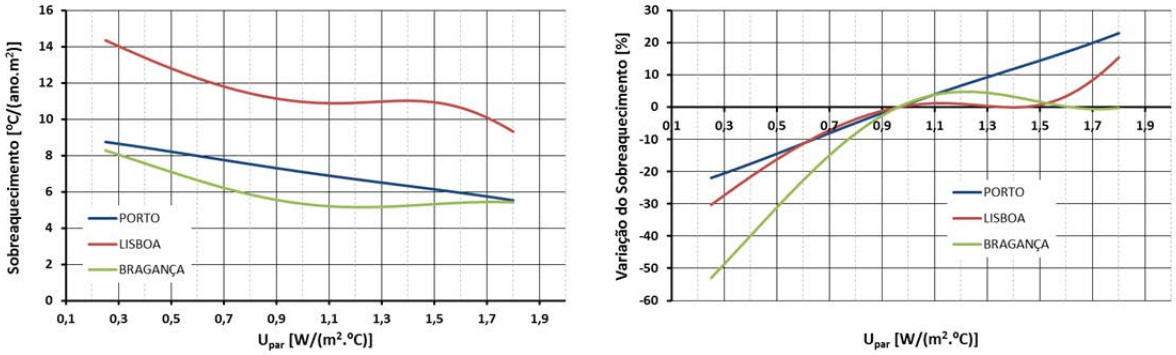


Figura AV.33 – Estudo paramétrico, função sobreaquecimento vs. U_{par}, escola tipo A, Norte

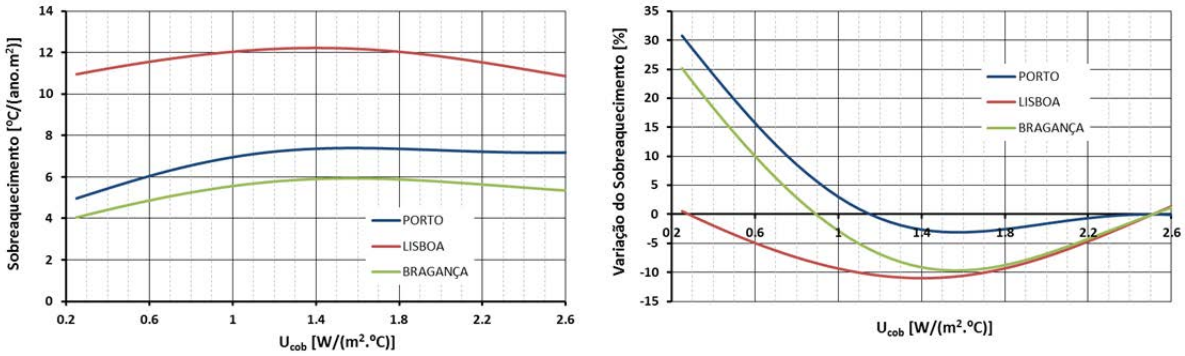


Figura AV.34 – Estudo paramétrico, função sobreaquecimento vs. U_{cob}, escola tipo A, Norte

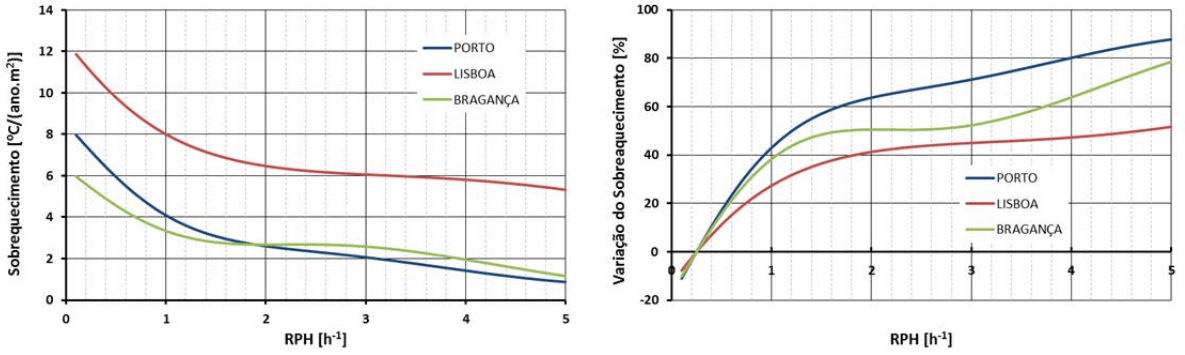


Figura AV.35 – Estudo paramétrico, função sobreaquecimento vs. *RPH*, escola tipo A, Norte

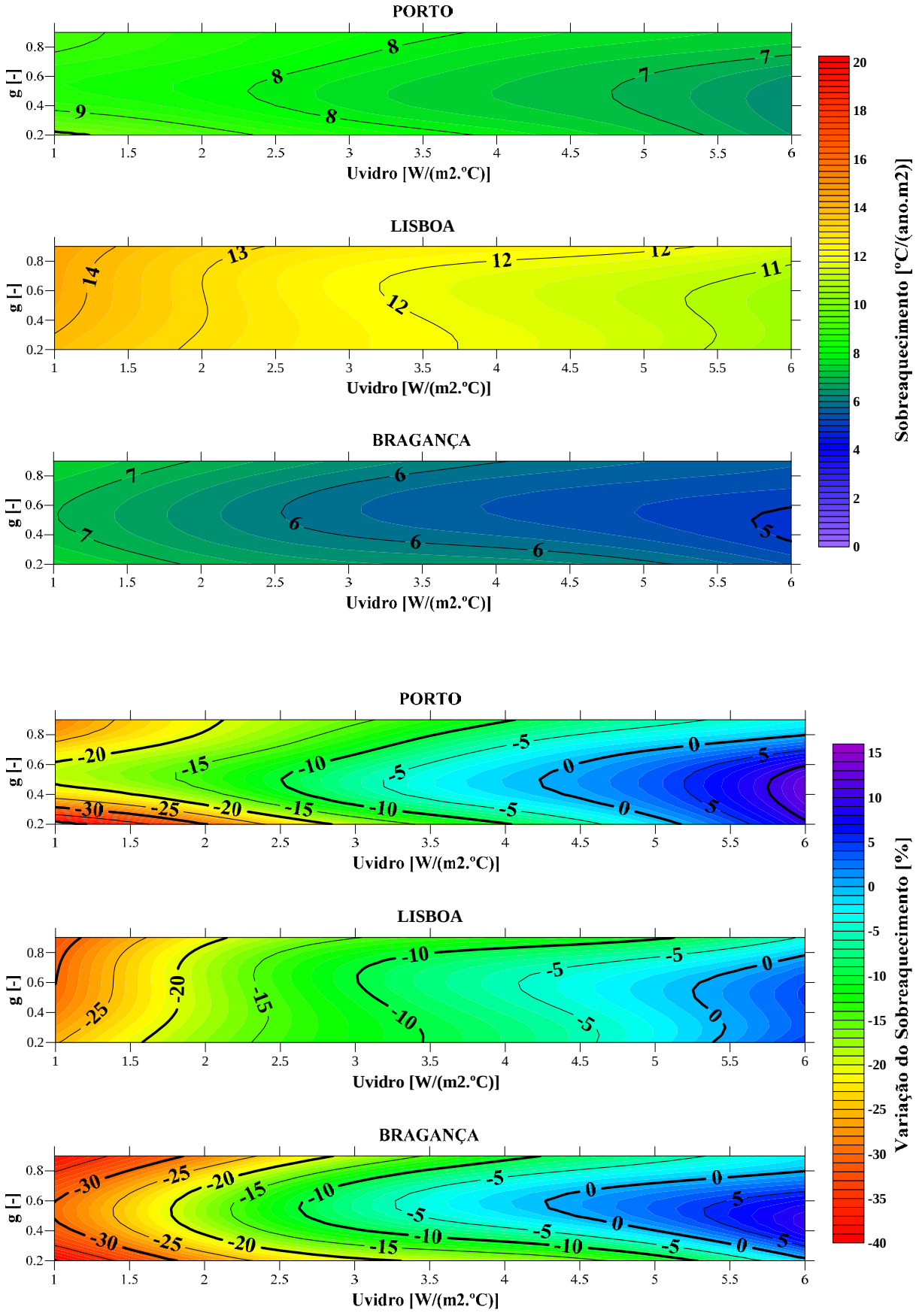


Figura AV.36 – Estudo paramétrico, função sobreaquecimento vs. U_{vidro} e g, escola tipo A, Norte

- Tipo A, Este

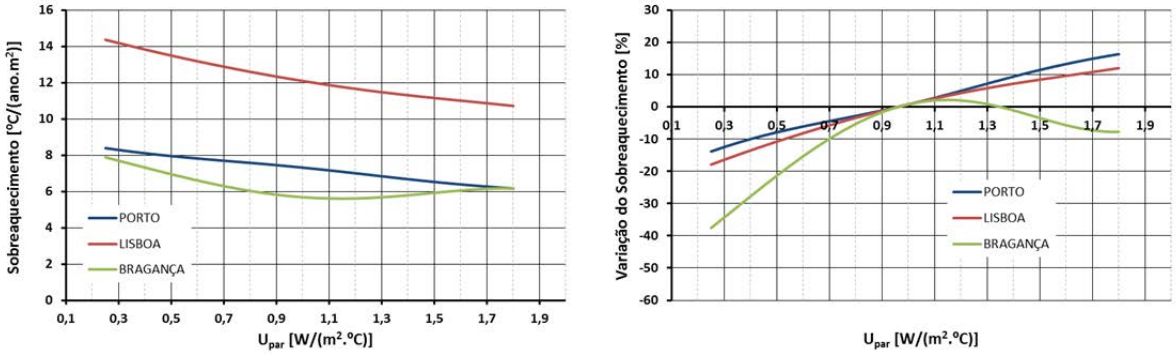


Figura AV.37 – Estudo paramétrico, função sobreaquecimento vs. U_{par}, escola tipo A, Este

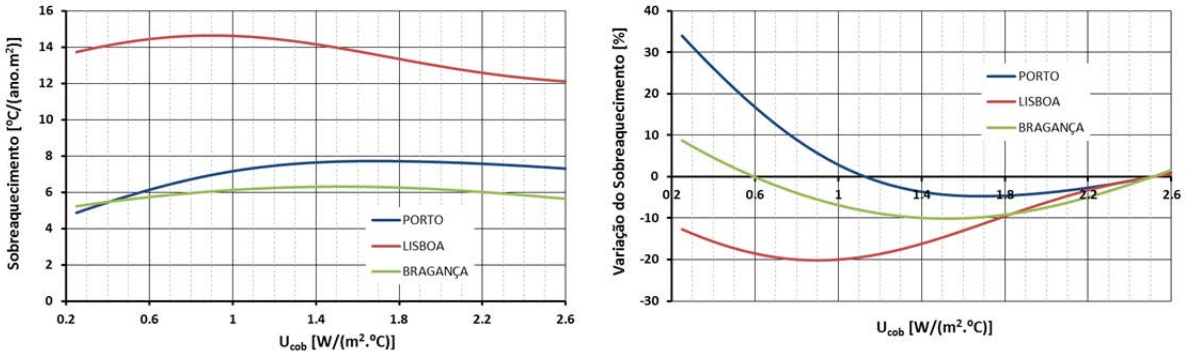


Figura AV.38 – Estudo paramétrico, função sobreaquecimento vs. U_{cob}, escola tipo A, Este

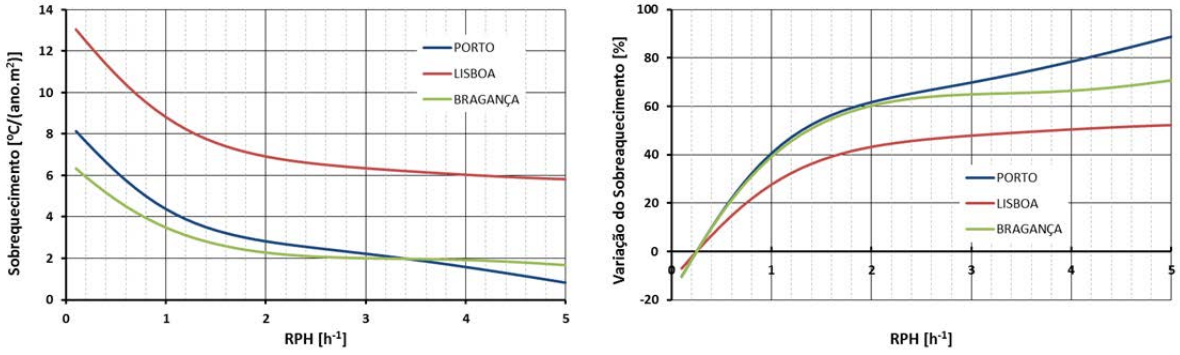


Figura AV.39 – Estudo paramétrico, função sobreaquecimento vs. *RPH*, escola tipo A, Este

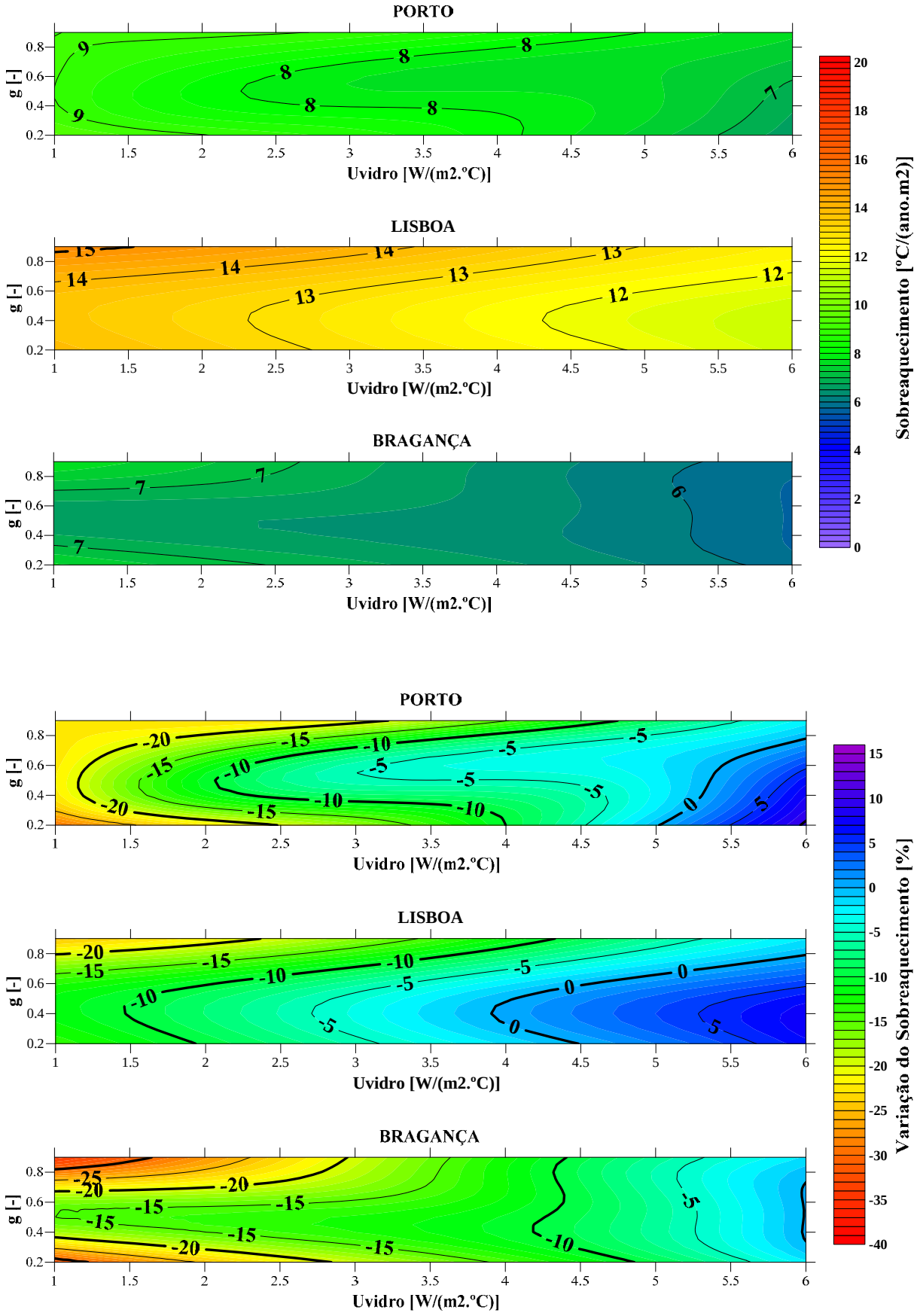


Figura AV.40 – Estudo paramétrico, função sobreaquecimento vs. U_{vidro} e g, escola tipo A, Este

- Tipo A, Sul

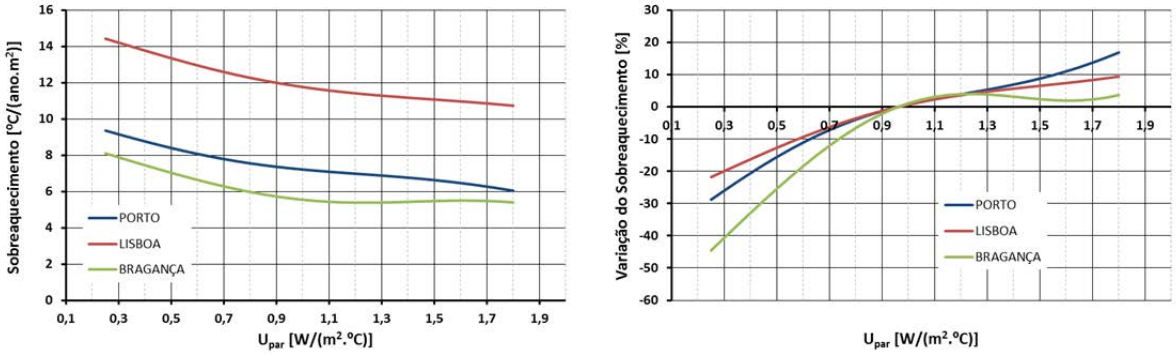


Figura AV.41 – Estudo paramétrico, função sobreaquecimento vs. U_{par}, escola tipo A, Sul

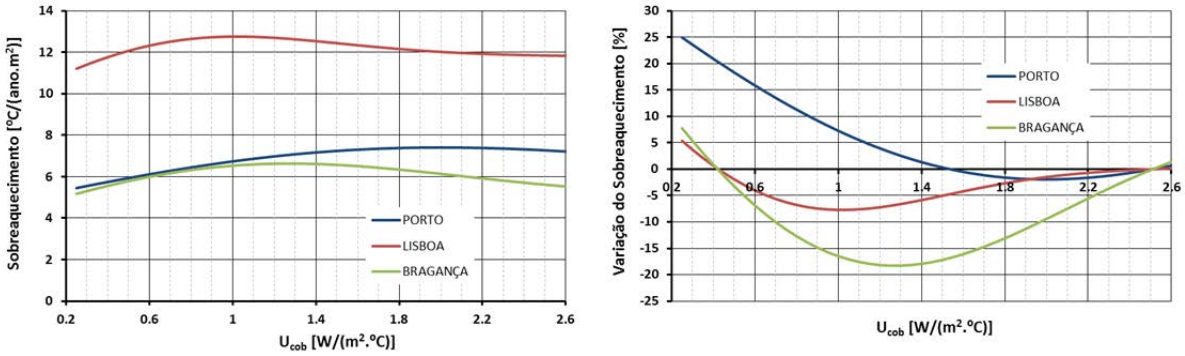


Figura AV.42 – Estudo paramétrico, função sobreaquecimento vs. U_{cob}, escola tipo A, Sul

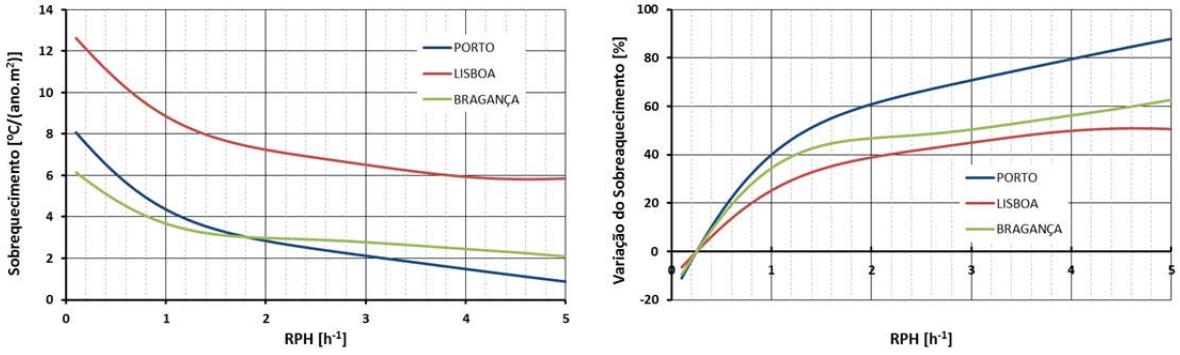


Figura AV.43 – Estudo paramétrico, função sobreaquecimento vs. *RPH*, escola tipo A, Sul

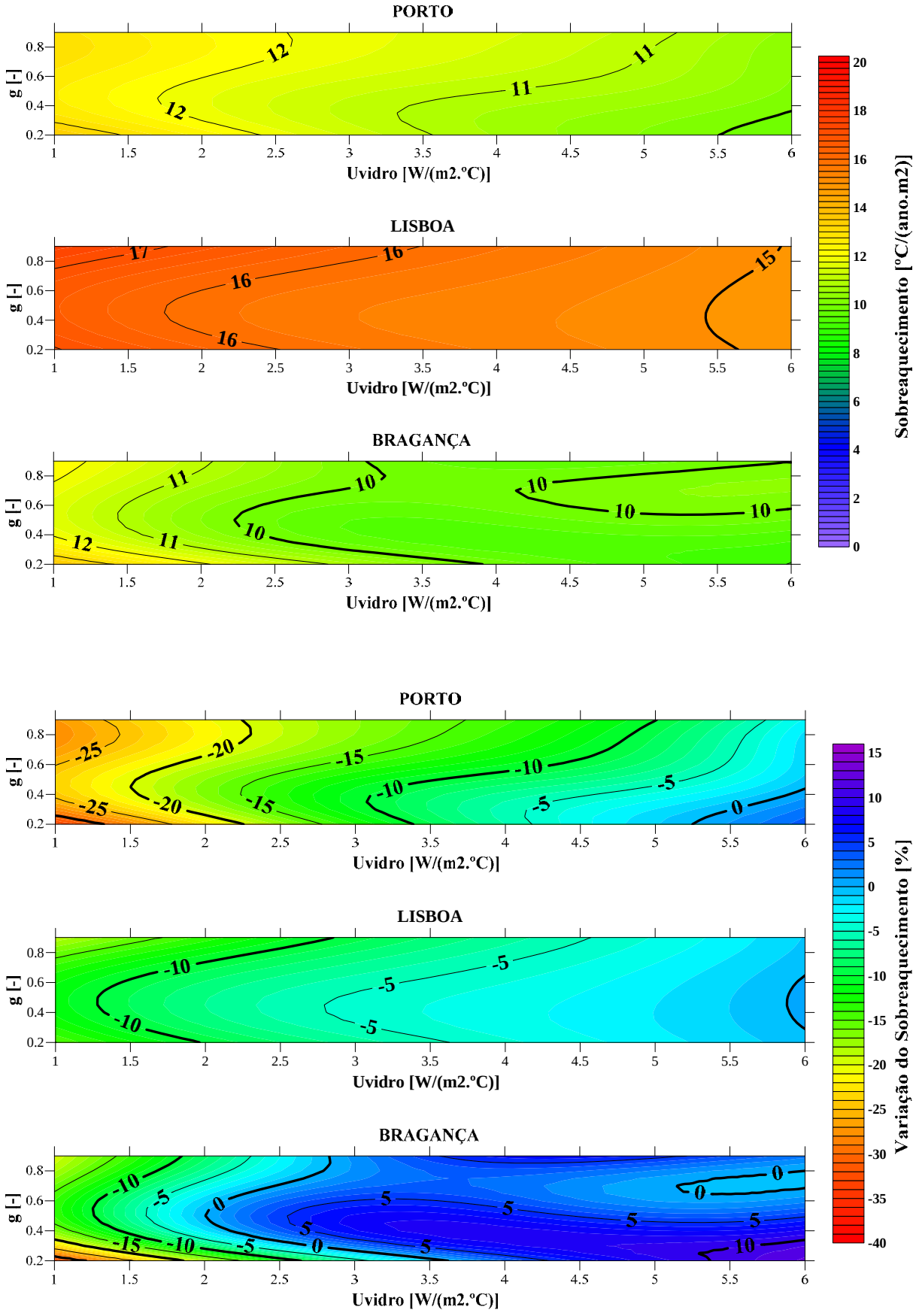


Figura AV.44 – Estudo paramétrico, função sobreaquecimento vs. U_{vidro} e g, escola tipo A, Sul

- Tipo A, Oeste

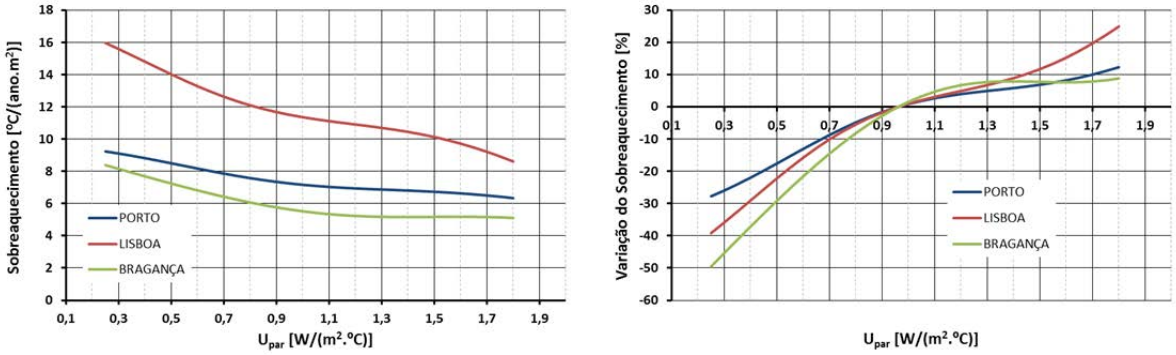


Figura AV.45 – Estudo paramétrico, função sobreaquecimento vs. U_{par}, escola tipo A, Oeste

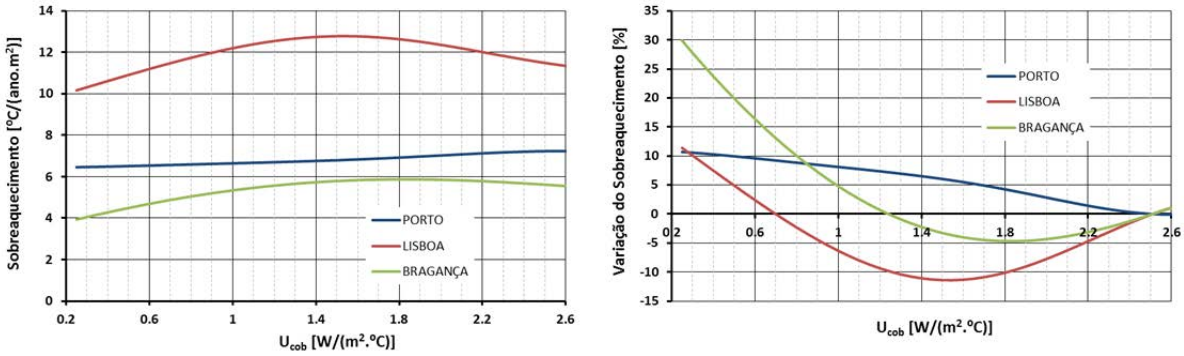


Figura AV.46 – Estudo paramétrico, função sobreaquecimento vs. U_{cob}, escola tipo A, Oeste

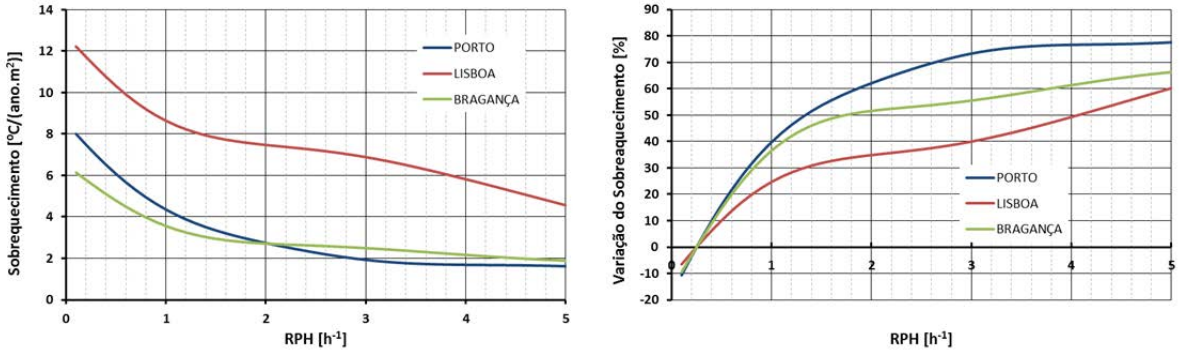


Figura AV.47 – Estudo paramétrico, função sobreaquecimento vs. *RPH*, escola tipo A, Oeste

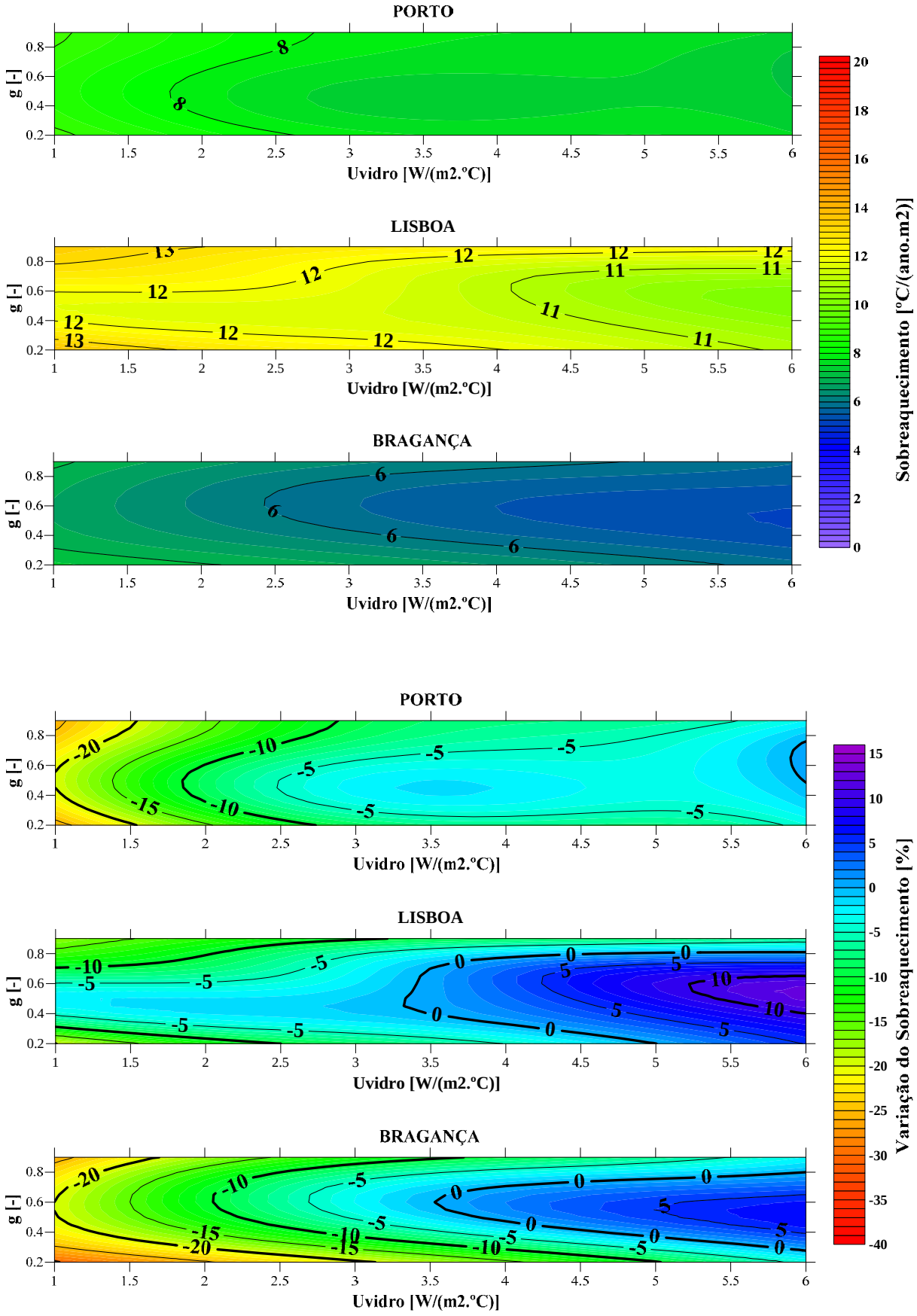


Figura AV.48 – Estudo paramétrico, função sobreaquecimento vs. U_{vidro} e g, escola tipo A, Oeste

- Tipo B, Norte

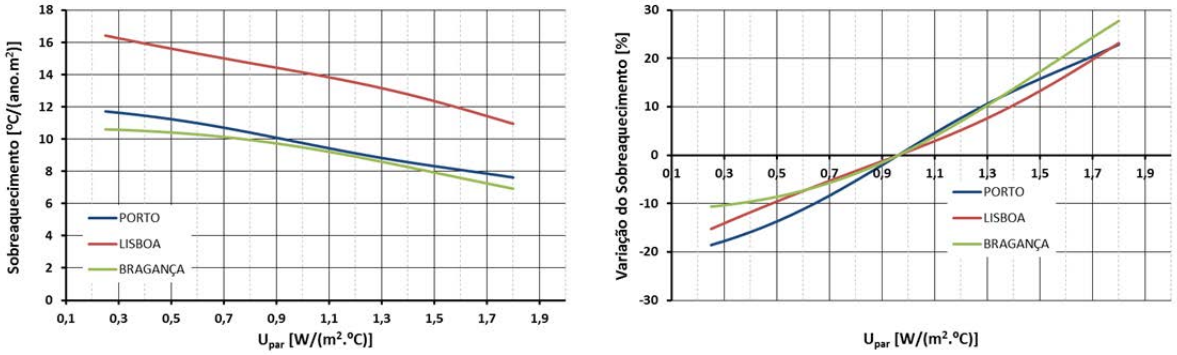


Figura AV.49 – Estudo paramétrico, função sobreaquecimento vs. U_{par}, escola tipo B, Norte

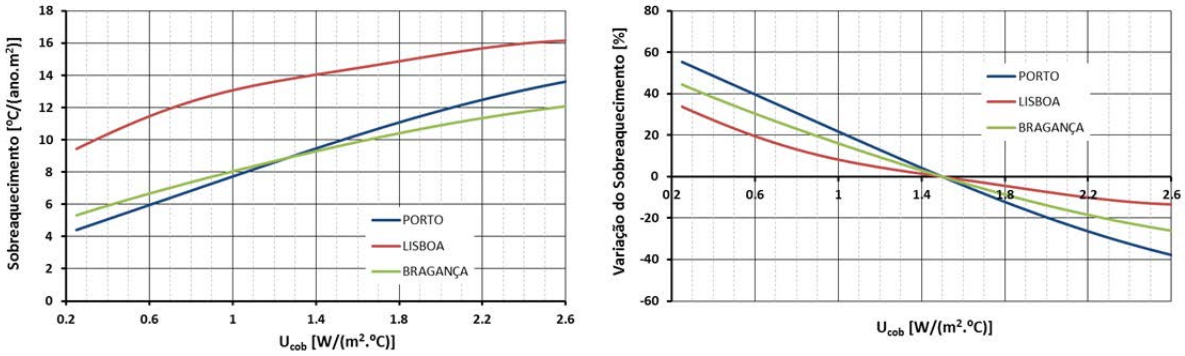


Figura AV.50 – Estudo paramétrico, função sobreaquecimento vs. U_{cob}, escola tipo B, Norte

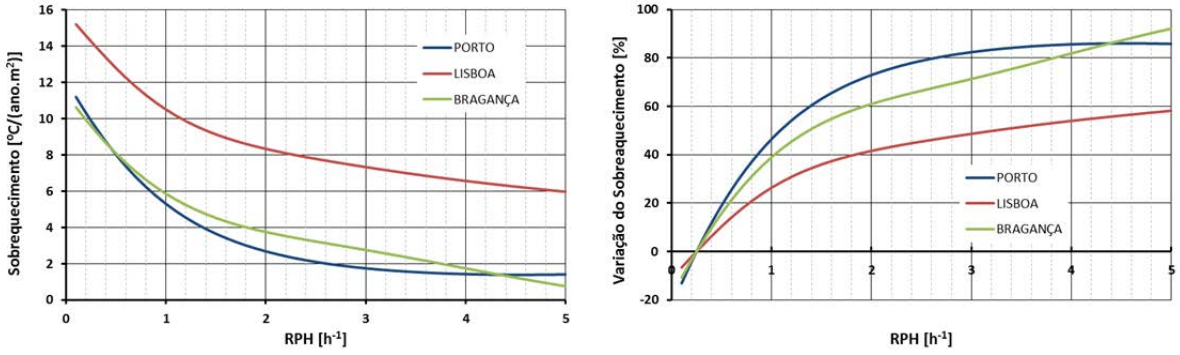


Figura AV.51 – Estudo paramétrico, função sobreaquecimento vs. *RPH*, escola tipo B, Norte

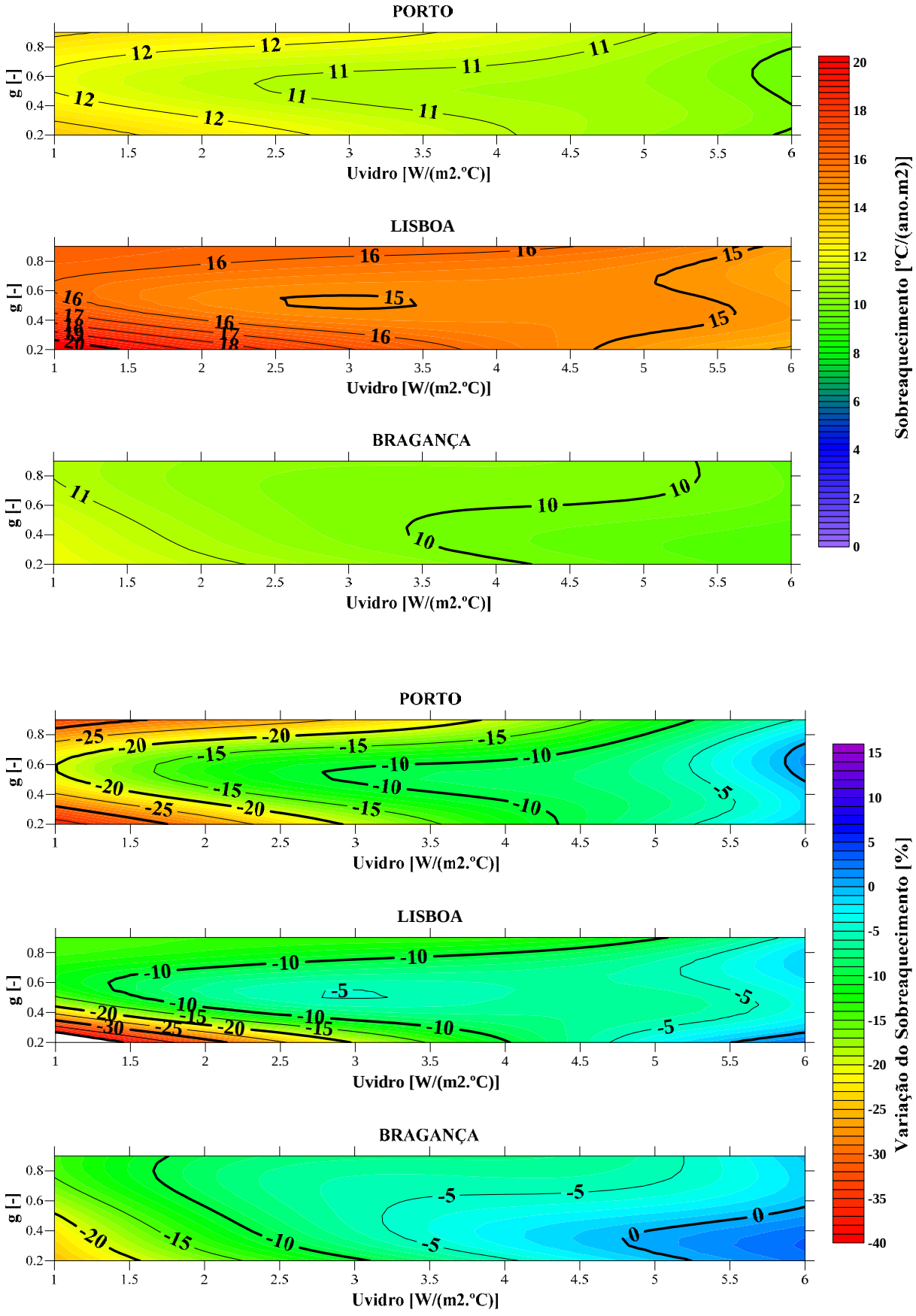


Figura AV.52 – Estudo paramétrico, função sobreaquecimento vs. U_{vidro} e g, escola tipo B, Norte

- Tipo B, Este

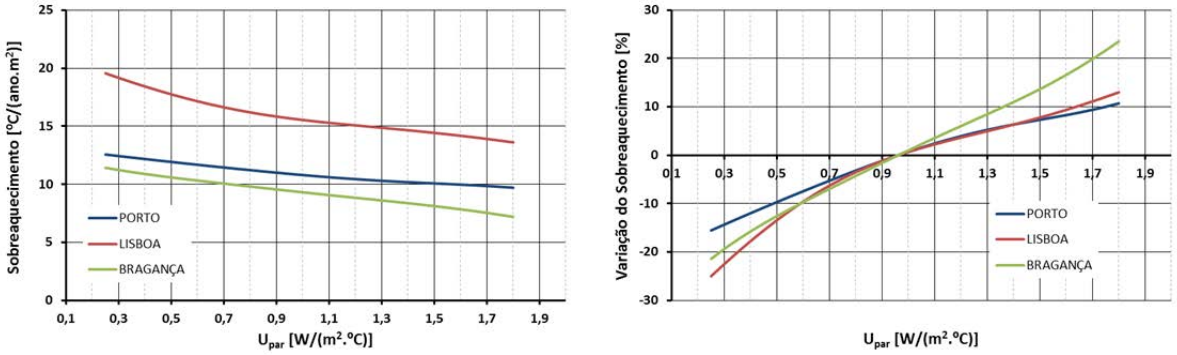


Figura AV.53 – Estudo paramétrico, função sobreaquecimento vs. U_{par}, escola tipo B, Este

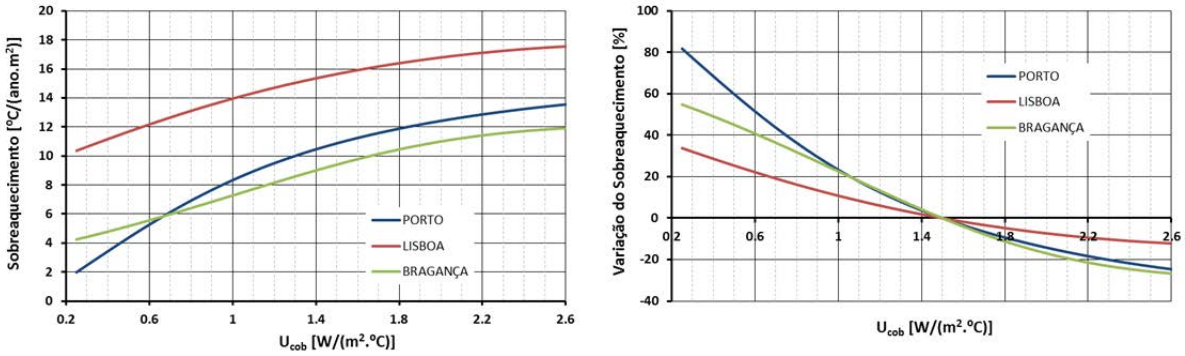


Figura AV.54 – Estudo paramétrico, função sobreaquecimento vs. U_{cob}, escola tipo B, Este

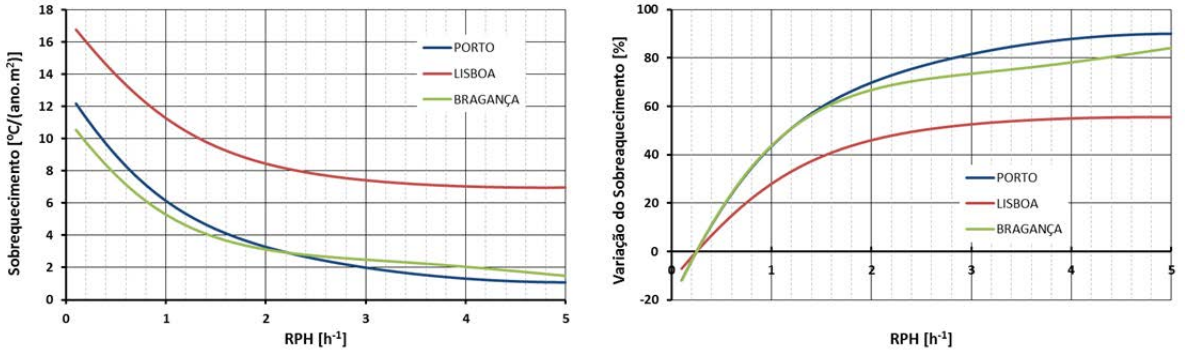


Figura AV.55 – Estudo paramétrico, função sobreaquecimento vs. *RPH*, escola tipo B, Este

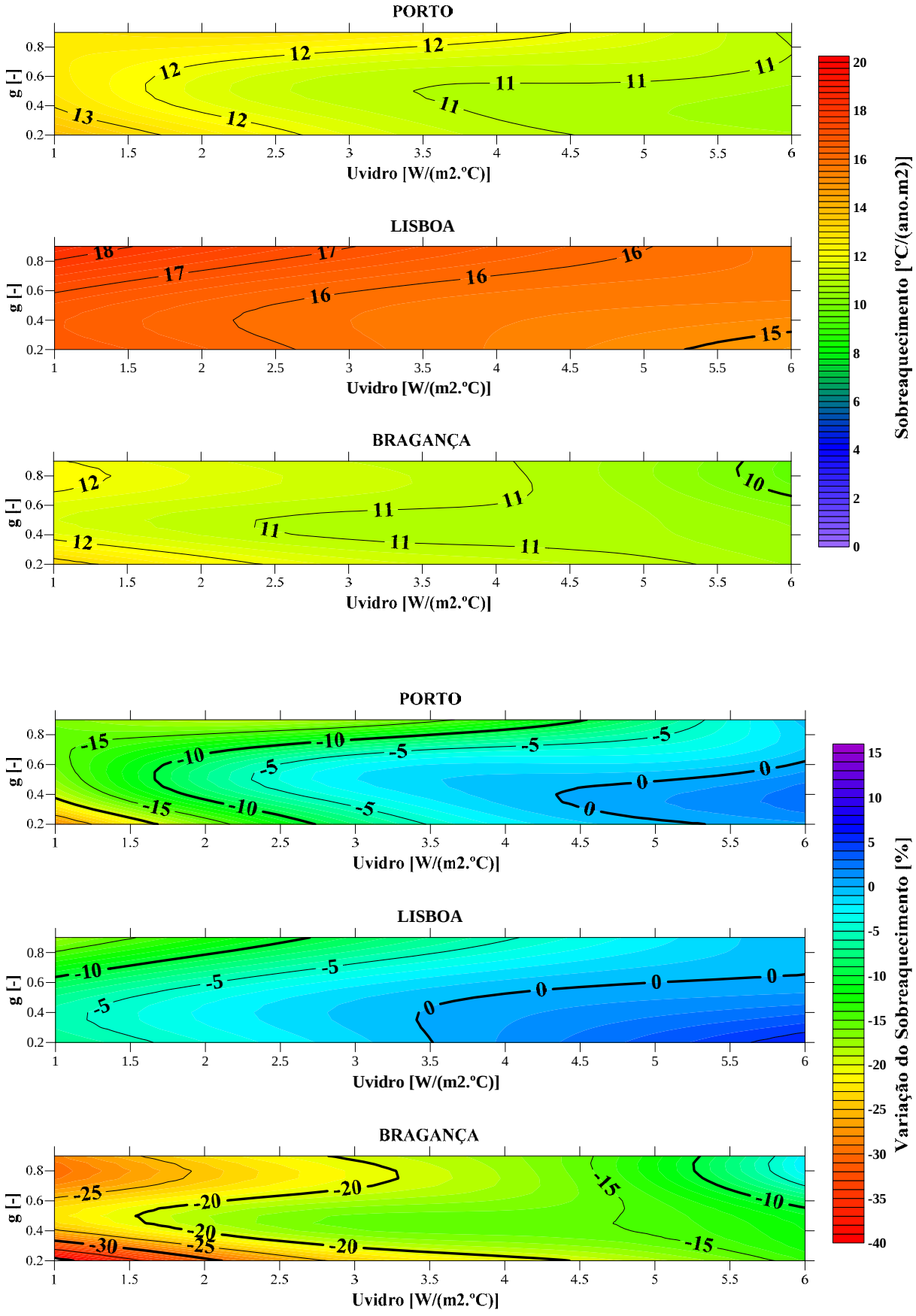


Figura AV.56 – Estudo paramétrico, função sobreaquecimento vs. U_{vidro} e g, escola tipo B, Este

- Tipo B, Sul

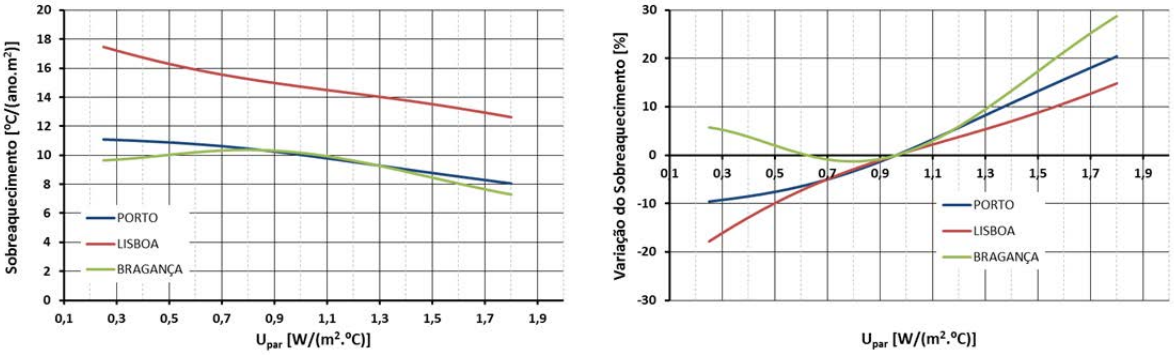


Figura AV.57 – Estudo paramétrico, função sobreaquecimento vs. U_{par}, escola tipo B, Sul

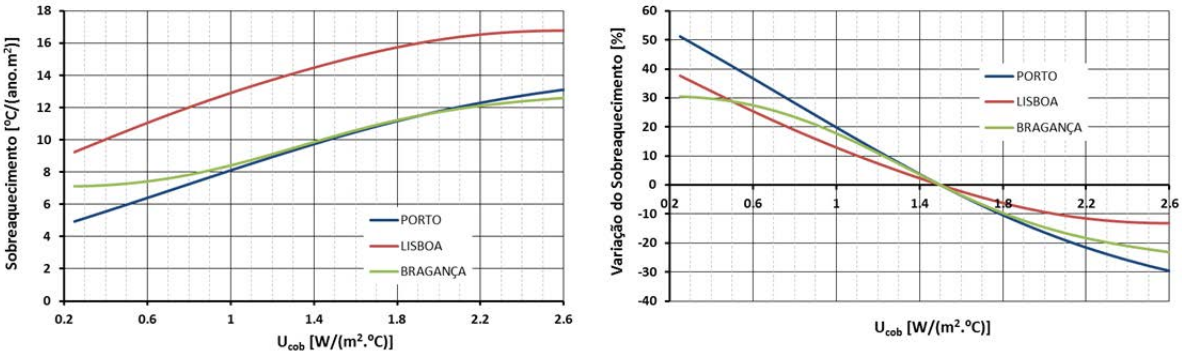


Figura AV.58 – Estudo paramétrico, função sobreaquecimento vs. U_{cob}, escola tipo B, Sul

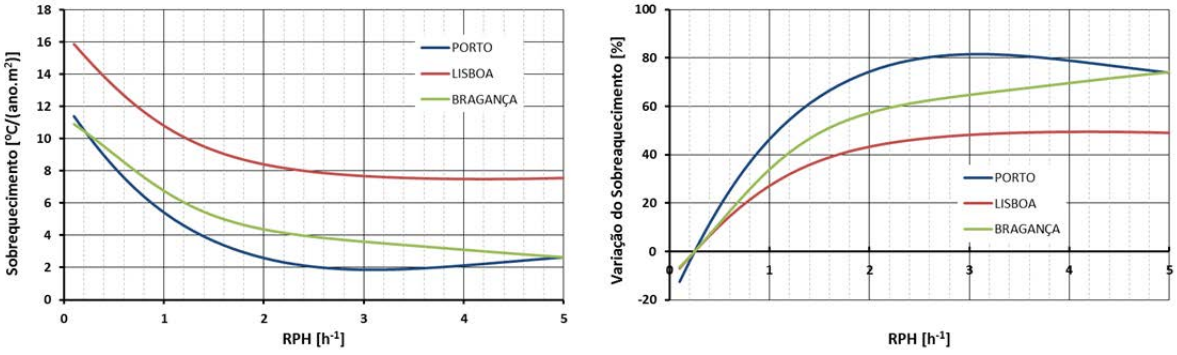


Figura AV.59 – Estudo paramétrico, função sobreaquecimento vs. *RPH*, escola tipo B, Sul

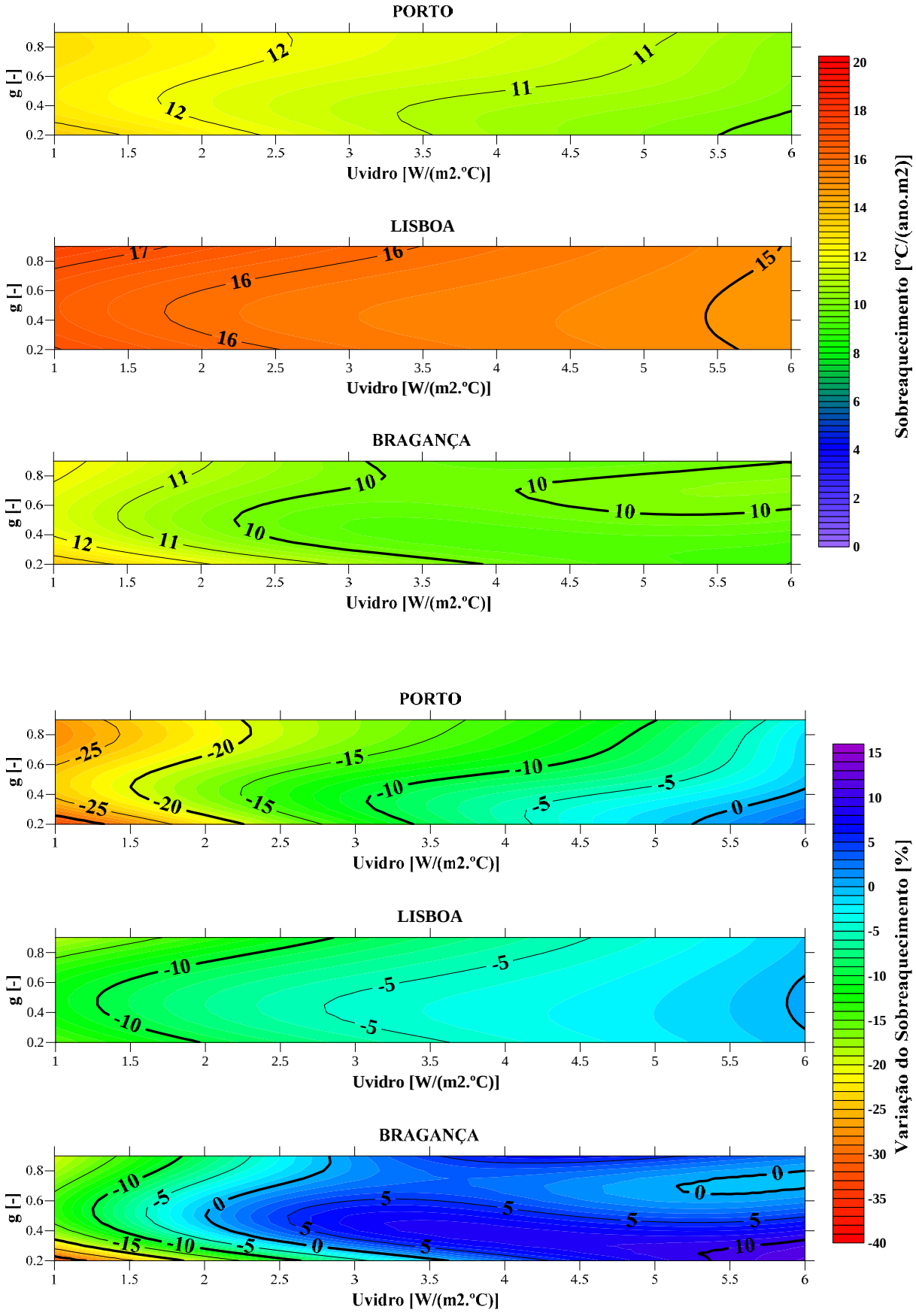


Figura AV.60 – Estudo paramétrico, função sobreaquecimento vs. U_{vidro} e g, escola tipo B, Sul

- Tipo B, Oeste

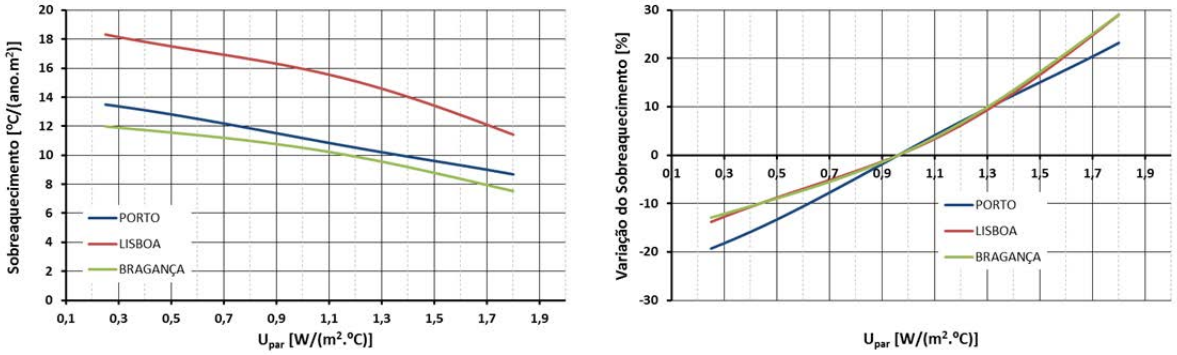


Figura AV.61 – Estudo paramétrico, função sobreaquecimento vs. U_{par}, escola tipo B, Oeste

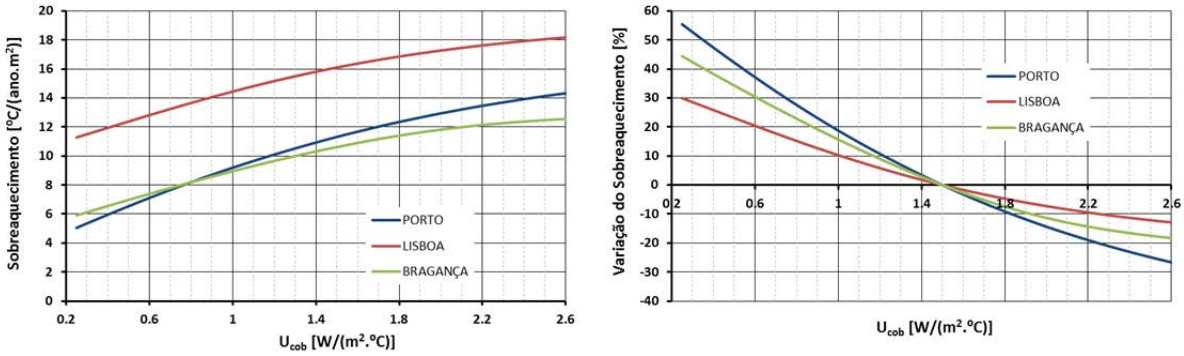


Figura AV.62 – Estudo paramétrico, função sobreaquecimento vs. U_{cob}, escola tipo B, Oeste

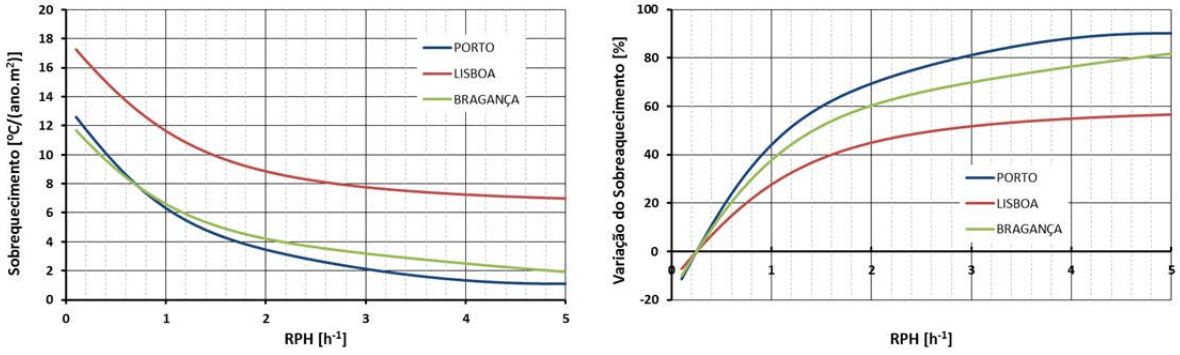


Figura AV.63 – Estudo paramétrico, função sobreaquecimento vs. *RPH*, escola tipo B, Oeste

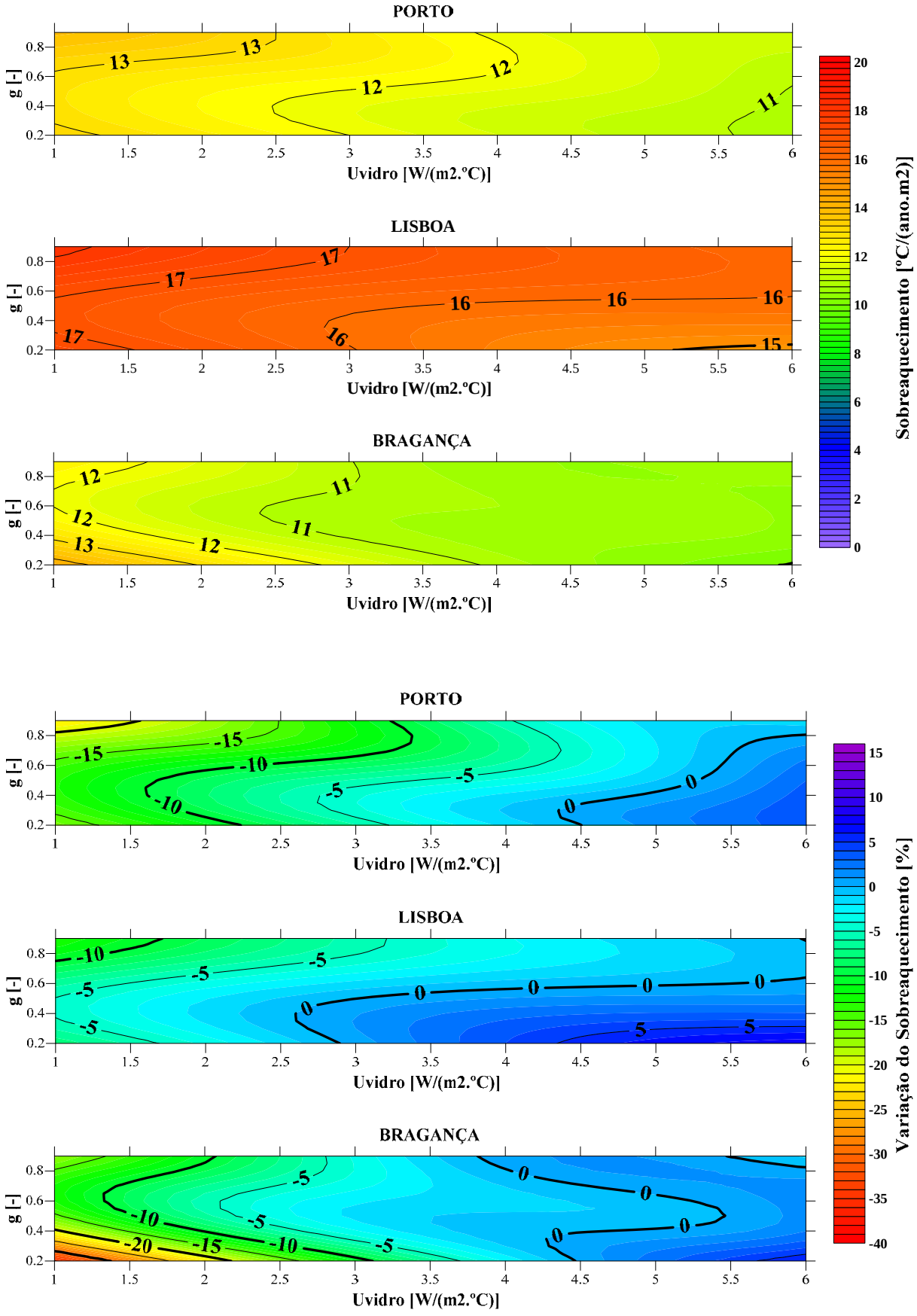


Figura AV.64 – Estudo paramétrico, função sobreaquecimento vs. U_{vidro} e g, escola tipo B, Oeste