

Desenvolvimento e implementação de um controlador de temperatura para um forno de aquecimento de materiais compósitos

Miguel Vázquez da Silva

Dissertação de Mestrado

Orientador: Professor Doutor João Falcão Carneiro

Coorientador no INEGI: Engenheiro MSc. Jhonny Rodrigues



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Setembro 2021

Ao meu Avô Pepe

Resumo

O principal objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um novo controlador de temperatura para um forno que aquece amostras fabricadas em materiais compósitos. Apesar de o forno em causa ser um dispositivo existente e funcional, o controlador implementado não conduz a um processo de aquecimento que obedeça aos requisitos pretendidos. Nomeadamente, não permite que o aquecimento dos materiais compósitos ocorra de forma homogénea ao longo das amostras e sem ultrapassar o valor desejado de temperatura.

Um segundo objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de um modelo do sistema que permita estimar a evolução de temperatura das amostras a aquecer. Para isso, foi desenvolvido um modelo do sistema utilizando métodos de diferenças finitas de temperatura. O modelo desenvolvido tem em conta os vários fenómenos de trocas de calor presentes. Estes fenómenos são a transferência de calor por condução ao longo das próprias amostras, o fornecimento de potência calorífica por parte de resistências cerâmicas às amostras e ainda as perdas de calor das amostras para o ambiente.

Foram desenvolvidos e implementados três controladores PID independentes que permitem controlar o funcionamento das várias filas de resistências cerâmicas existentes. A implementação destes controladores depende da malha de nós de temperatura considerada no método de diferenças finitas de temperatura.

Foram realizados diversos ensaios experimentais para comparação entre os resultados obtidos com o controlador original do forno e com o controlador desenvolvido ao longo deste trabalho. Os resultados desses ensaios permitem afirmar que a lei de controlo desenvolvida tem um desempenho superior à lei de controlo original, introduzindo assim bastantes melhorias no processo de aquecimento dos materiais compósitos.

Abstract

The main objective of this work is the development of a new temperature controller for an oven that heats parts made of composite materials. Although the oven in question is an existing and functional device, the implemented controller does not lead to a heating process that meets the intended requirements. In particular, it does not allow the heating of composite materials to occur homogeneously throughout the samples and without exceeding the desired temperature value.

A second objective of this work is the development of a model of the system allowing the estimation of the temperature evolution of the samples to be heated. For this end, finite temperature difference methods were used. The developed model takes into account the several heat exchange phenomena that are present in the heating process. These phenomena are the heat transfer by conduction along the samples themselves, the supply of heat power by ceramic resistances to the samples and also the heat losses of the samples to the environment.

Three independent PID controllers were developed and implemented to control the operation of the various rows of existing ceramic resistors. The implementation of these controllers was depends on the temperature node mesh considered in the finite temperature difference method.

Several experimental tests were carried out to compare the results obtained with the original oven controller against the controller developed throughout this work. The results of these tests show that the developed control law has a better performance than the original control law, thus introducing many improvements in the heating process of composite materials.

Agradecimentos

Ao Professor João Falcão Carneiro gostaria de endereçar as primeiras palavras de agradecimento, pois foi com o Professor que tudo começou no momento em que aceitou orientar a minha dissertação de Mestrado, e que tudo tomou um rumo, fruto do acompanhamento constante e atento, traduzido em inúmeras reuniões.

Ao meu supervisor, Jhonny Rodrigues, agradeço a presença constante em todas as etapas deste trabalho. Com o Jhonny entrei nas oficinas pela primeira vez, sem levar nada comigo, apenas a vontade de trabalhar e o desejo de aprender.

Agradeço o apoio dado pelo INEGI, em especial pelo UMEC que colocou à minha disposição o espaço e os meios necessários para o bom desenvolvimento da componente experimental da dissertação que agora apresento.

A todos os amigos o testemunho do meu apreço pela motivação que sempre me deram, ainda que permanentemente confinados.

À minha família, expresso o meu reconhecimento pelo carinho e o incentivo que me dispensaram. A todos muito obrigado pela confiança em mim depositada.

Não posso, contudo, deixar de mencionar de forma muito particular os meus Avós, por tudo o que fizeram por mim, por tudo o que me proporcionaram e, acima de tudo, pelos valores e princípios que me ensinaram.

A todos aqueles que, embora não mencione explicitamente, mas que de algum modo ajudaram a realizar o trabalho que agora apresento, o meu sincero obrigado.

Índice de Conteúdos

Resumo	v
Abstract	vii
Agradecimentos	ix
Índice de Figuras	xiii
Índice de Tabelas	xv
Siglas e Acrónimos	xvii
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento do projeto e motivação	1
1.2 Objetivos do projeto	2
1.3 Método seguido no projeto e estrutura da dissertação.....	3
2 Descrição do sistema	5
3 Sistemas de controlo de temperatura	15
3.1 Controlo ON/OFF	15
3.2 Controlo proporcional	17
3.3 Controlo proporcional e integrativo	17
3.4 Controlo proporcional, integrativo e derivativo.....	18
4 Desenvolvimento do modelo do sistema	21
4.1 Equações desenvolvidas no plano bidimensional	21
4.2 Fator de visão de radiação e potência das resistências	26
4.3 Equações desenvolvidas no plano tridimensional	28
4.4 Notação matricial	30
5 Implementação dos controladores propostos	33
5.1 Procedimentos de implementação	33
5.2 Controladores proporcionais	36
5.3 Controladores proporcionais e integrativos	38
5.4 Controladores PID.....	39
6 Resultados experimentais	41
6.1 Amostras utilizadas na validação do modelo.....	41
6.2 Equações no plano bidimensional	43
6.3 Fator de visão de radiação	46
6.4 Potência das resistências.....	49
6.5 Propriedades do material	50
6.6 Equações no plano tridimensional e formulação em espaço de estados	51
6.7 Validação do modelo.....	54
6.8 Resultados obtidos - controlador B	59
6.9 Resultados obtidos - controlador C	64
6.10 Comparação dos resultados obtidos– controlador B vs. controlador C.....	68
7 Conclusões e trabalhos futuros	71
Bibliografia	73
ANEXO A: Propriedades do material compósito utilizado	75

Índice de Figuras

Figura 2-1 - Forno de aquecimento	5
Figura 2-2 - Sistema de fixação do <i>Blank Holder</i>	6
Figura 2-3-Representação esquemática: posicionamento das resistências cerâmicas inferiores [dimensões em cm]	7
Figura 2-4 - Representação por cores dos 3 pares de filas de resistências considerados	7
Figura 2-5 - Estrutura de suporte dos sensores e localizações possíveis dos mesmos [dimensões em cm]	8
Figura 2-6 - Posicionamento dos sensores relativamente às resistências superiores (vista inferior)	9
Figura 2-7 - Interface HMI 1	9
Figura 2-8 - Quadro elétrico A	10
Figura 2-9 - Quadro elétrico B	12
Figura 2-10 - Esquema de comunicação entre os vários componentes do sistema	12
Figura 3-1 - Diagrama de blocos: Controlador ON/OFF	16
Figura 3-2 - Resposta típica de um controlador ON/OFF, (Silveira, 2016)	16
Figura 3-3 - Diagrama de blocos: Controlador proporcional	17
Figura 3-4 - Diagrama de blocos: Controlador proporcional e integrativo	18
Figura 3-5 - Diagrama de blocos: Controlador PID	19
Figura 4-1 - Sistema de eixos considerado	22
Figura 4-2 Malha de nós de temperatura (3x3x1)	23
Figura 4-3 - Hipóteses de nós de temperatura consideradas	25
Figura 4-4 Malha de nós de temperatura (7x4x1)	25
Figura 4-5 - Exemplos malhas de nós de temperatura simples	26
Figura 4-6 - Ângulos θ_i e θ_j (Incropera <i>et al.</i> , 2020)	27
Figura 5-1 - Controladores genéricos e PWM	34
Figura 5-2 - Diagrama de blocos: controladores genéricos, PWM e bloco de saturação	34
Figura 5-3 - Malha de nós de temperatura (1x3x1)	35
Figura 5-4 - Malha de nós de temperatura (2x3x1)	36
Figura 5-5 - Diagrama de blocos: Controladores proporcionais implementados	37
Figura 5-6 - Aquecimento até 100 °C - Controladores proporcionais	37
Figura 5-7 - Diagrama de blocos: controladores proporcionais e integrativos implementados	38
Figura 5-8 - Aquecimento até 100 °C - Controladores proporcionais e integrativos	38
Figura 5-9 - Diagrama de blocos: Controladores PID implementados	39
Figura 5-10 - Aquecimento até 100 °C - Controladores PID	40
Figura 6-1 - Amostra 1 utilizada e o seu posicionamento relativamente às resistências cerâmicas	41
Figura 6-2 - Posicionamento da amostra 1 utilizada relativamente aos sensores óticos de temperatura	42
Figura 6-3 - Amostra 2 utilizada e o seu posicionamento relativamente às resistências cerâmicas	42
Figura 6-4 - Posicionamento da amostra 2 utilizada relativamente aos sensores óticos de temperatura	43
Figura 6-5 - Malha de nós considerada (amostra 1)	43
Figura 6-6 - Malha de nós considerada (amostra 2)	44
Figura 6-7 - Evolução da temperatura das resistências cerâmicas na resposta ao degrau	50
Figura 6-8- Evolução de temperatura do nó $n_{0,0,0}$ (amostra 1)	55
Figura 6-9 - Evolução de temperatura do nó $n_{0,1,0}$ (amostra 1)	55
Figura 6-10 - Evolução de temperatura do nó $n_{0,2,0}$ (amostra 1)	56
Figura 6-11 - Evolução de temperatura do nó $n_{0,0,0}$ (amostra 2)	56
Figura 6-12 - Evolução de temperatura do nó $n_{1,0,0}$ (amostra 2)	57
Figura 6-13 - Evolução de temperatura do nó $n_{0,1,0}$ (amostra 2)	57
Figura 6-14 - Evolução de temperatura do nó $n_{1,1,0}$ (amostra 2)	58
Figura 6-15 - Evolução de temperatura do nó $n_{0,2,0}$ (amostra 2)	58
Figura 6-16 - Evolução de temperatura do nó $n_{1,2,0}$ (amostra 2)	59
Figura 6-17 - Aquecimento até 100 °C (Controlador B)	61
Figura 6-18 - Aquecimento até 120 °C (Controlador B)	61
Figura 6-19 - Aquecimento até 140 °C (Controlador B)	62
Figura 6-20 - Aquecimento até 160 °C (Controlador B)	62
Figura 6-21 - Aquecimento até 180 °C (Controlador B)	63
Figura 6-22 - Aquecimento até 200 °C (Controlador B)	63
Figura 6-23 - Aquecimento até 100 °C (Controlador C)	65
Figura 6-24 - Aquecimento até 120 °C (Controlador C)	65
Figura 6-25 - Aquecimento até 140 °C (Controlador C)	66
Figura 6-26 - Aquecimento até 160 °C (Controlador C)	66
Figura 6-27 - Aquecimento até 180 °C (Controlador C)	67
Figura 6-28 - Aquecimento até 200 °C (Controlador C)	67

Figura A-1 – Calor específico em função da temperatura do material compósito	75
Figura A-2 - Condutividade térmica como função da temperatura no sentido das fibras de carbono do material compósito.....	77

Índice de Tabelas

Tabela 2-1 - Elementos do quadro elétrico e suas funções.....	11
Tabela 6-1 - Aplicação da equação (4.3) aos nós considerados na Figura 6-5.....	44
Tabela 6-2 - Aplicação da equação (4.3) aos nós considerados na Figura 6-6.....	45
Tabela 6-3 - Fatores de visão entre as resistências superiores/inferiores e os nós de temperatura considerados (amostra 1).....	47
Tabela 6-4 - Fatores de visão entre as resistências superiores/inferiores e os nós de temperatura considerados (amostra 2).....	48
Tabela 6-5 - Somatório dos fatores de visão entre as resistências e os nós considerados (amostra 1).....	48
Tabela 6-6 - Somatório dos fatores de visão entre as resistências e os nós considerados (amostra 2).....	49
Tabela 6-7 - Propriedades da fibra de carbono.....	50
Tabela 6-8 - Parâmetros de avaliação - aquecimento até 100 °C – controlador B.....	61
Tabela 6-9 - Parâmetros de avaliação - aquecimento até 120 °C – controlador B.....	61
Tabela 6-10 - Parâmetros de avaliação - aquecimento até 140 °C – controlador B.....	62
Tabela 6-11 - Parâmetros de avaliação - aquecimento até 160 °C – controlador B.....	62
Tabela 6-12 - Parâmetros de avaliação - aquecimento até 180 °C – controlador B.....	63
Tabela 6-13 - Parâmetros de avaliação - aquecimento até 200 °C – controlador B.....	63
Tabela 6-14 - Parâmetros de avaliação - aquecimento até 100 °C – controlador C.....	65
Tabela 6-15 - Parâmetros de avaliação - aquecimento até 120 °C – controlador C.....	65
Tabela 6-16 - Parâmetros de avaliação - aquecimento até 140 °C – controlador C.....	66
Tabela 6-17 - Parâmetros de avaliação - aquecimento até 160 °C – controlador C.....	66
Tabela 6-18 - Parâmetros de avaliação - aquecimento até 180 °C – controlador C.....	67
Tabela 6-19 - Parâmetros de avaliação - aquecimento até 200 °C – controlador C.....	67
Tabela 6-20 - Parâmetros de avaliação: aquecimento até 100 °C – Controlador B vs. Controlador C.....	68
Tabela 6-21 - Parâmetros de avaliação: aquecimento até 120 °C – Controlador B vs. Controlador C.....	68
Tabela 6-22 - Parâmetros de avaliação: aquecimento até 140 °C – Controlador B vs. Controlador C.....	69
Tabela 6-23 - Parâmetros de avaliação: aquecimento até 160 °C – Controlador B vs. Controlador C.....	69
Tabela 6-24 - Parâmetros de avaliação: aquecimento até 180 °C – Controlador B vs. Controlador C.....	69
Tabela 6-25 - Parâmetros de avaliação: aquecimento até 200 °C – Controlador B vs. Controlador C.....	69
Tabela A-1 - Resultados obtidos no cálculo do teor de fibras do material compósito.....	76
Tabela A-2 - Densidade do material compósito.....	77

Siglas e Acrónimos

DC - *Duty Cycle*

FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

FRP - *Fiber reinforced polymer*

HMI - *Human-Machine Interface*

I&D - Investigação e Desenvolvimento

INEGI - Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial

LQR - *Linear Quadratic Regulator*

MIEM - Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

MPC - *Model predictive control*

PI – Proporcional e Integrativo

PID - Proporcional, Integrativo e Derivativo

PLC - *Programmable Logic Controller*

PWM - *Pulse-width modulation*

RMSE - *Root Mean Square Error*

SISO - *Single Input - Single Output*

UMEC - Unidade de Materiais e Estruturas Compósitas

1 Introdução

1.1 Enquadramento do projeto e motivação

A Dissertação de Mestrado apresentada neste documento é o resultado dos trabalhos desenvolvidos na unidade curricular com o mesmo nome e que é o culminar do plano de estudos do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica (MIEM), da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). Este projeto foi desenvolvido nas instalações do Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial (INEGI), em particular nos laboratórios afetos à Unidade de Materiais e Estruturas Compósitas (UMEC).

A orientação dos trabalhos foi da responsabilidade do Professor Doutor João Falcão Carneiro, docente na FEUP, e do Engenheiro MSc. Jhonny Rodrigues, investigador no INEGI.

O título da Dissertação é “Desenvolvimento e implementação de um controlador de temperatura para um forno de aquecimento de materiais compósitos”, trabalho que decorre no projeto europeu “LAY2FORM - Hibridização eficiente de materiais por acondicionamento não convencional e formação de metais e compostos para fabricação de estruturas multifuncionais” (H2020, *Project ID 768710*), em cujo consórcio o INEGI está inserido, sendo o principal responsável.

O controlo de temperatura a nível industrial é essencial em diversos processos de fabrico. Se a temperatura variar para além dos limites ideais definidos para um determinado processo e um determinado material, compromete-se a qualidade do produto final. Assim, um controlador de temperatura aplicado a um sistema cuja função é promover o aquecimento de amostras de materiais compósitos, tem como função regular o processo de aquecimento de modo que a temperatura das amostras se encontre dentro de uma gama de valores adequados.

Conforme mencionado anteriormente, o desenvolvimento dos trabalhos ocorreu nas instalações da UMEC cuja missão é “Constituir uma base alargada de conhecimento relacionada com o Projecto, Fabrico e Ensaio de Sistemas Compósitos, contribuindo com Investigação e Desenvolvimento (I&D), Transferência de Tecnologia e Formação Avançada para a sua difusão e promoção nas áreas dos Transportes (aeronáutico, rodoviário, ferroviário, marítimo), Aeroespacial, Defesa, Energia, Infra-estruturas de Engenharia Civil, Construção Civil, Lazer, Indústria Petroquímica” (Neves, 2021).

A tendência para combinar polímeros reforçados com fibras (FRP) com materiais convencionais, como metais, é cada vez mais prevalente numa variedade de indústrias. A plena substituição por este tipo de materiais, denominados de compósitos, é cada vez mais frequente, especialmente nos sectores aeronáutico e automóvel, em que a elevada resistência específica, rigidez e o baixo peso são características determinantes na escolha do material a utilizar nas diferentes estruturas (Y.H. Mugahed Amran *et al*, 2018), (Gomes, 2021).

Nas instalações do INEGI estão disponíveis diversos equipamentos destinados à investigação, desenvolvimento e experimentação de técnicas de produção de materiais compósitos. Entre esses equipamentos, existe um forno cuja função é promover o aquecimento

de amostras de materiais compósitos para serem sujeitas, posteriormente, a um processo de estampagem. As especificações e qualidade do produto final são, em grande medida, condicionadas pela distribuição de temperaturas na amostra durante o aquecimento.

No processo de estampagem a quente, o aquecimento prévio das amostras promove uma maior deformabilidade das mesmas, reduzindo os esforços necessários para se dar a sua conformação plástica. Isto torna possível a obtenção de produtos finais com geometrias complexas.

Paralelamente, é importante que a temperatura das amostras seja idêntica em toda a sua extensão, na medida em que só assim se garante que o produto final terá propriedades mecânicas uniformes.

Ainda que funcional, o atual sistema de controlo de temperatura não responde cabalmente aos requisitos do processo. Neste sentido, o INEGI, através da Dissertação que aqui se apresenta, pretendeu promover o estudo, desenvolvimento e implementação de um novo sistema de controlo de temperatura, que garanta uma distribuição uniforme de temperaturas nas amostras e sem ultrapassar o valor pretendido.

1.2 Objetivos do projeto

O objetivo geral deste trabalho prendeu-se com o desenvolvimento e a implementação de um controlador de temperatura para um forno de aquecimento de materiais compósitos obedecendo a determinados requisitos, designadamente no que diz respeito a valores limites de temperatura e à homogeneidade dessa temperatura nas diferentes zonas de aquecimento.

A persecução deste objetivo passa por melhorar o processo de aquecimento das amostras. Este aquecimento, embora funcional no estado original do equipamento, não garante uma distribuição uniforme da temperatura em toda a extensão da amostra, na medida em que, havendo uma exposição nas partes laterais do sistema ao ambiente, ocorrem perdas de calor não controladas. Estas perdas, naturalmente, têm impacto direto na distribuição de temperatura ao longo da amostra, fazendo com que existam zonas com temperaturas diferentes.

Para além da exposição do sistema ao ambiente, há também que ter em consideração a forma como está a ser feito o controlo da temperatura. O controlador implementado tem em consideração o valor registado por apenas um dos sensores óticos disponíveis. Isto é, o aquecimento ocorre até se atingir a temperatura definida, temperatura essa que é medida, apenas e só, num ponto central da amostra, não sendo, como tal, representativa da temperatura ao longo dessa mesma amostra.

Neste contexto, o objetivo principal deste trabalho foi o desenvolvimento, implementação e teste de um sistema de controlo da temperatura que promova um aquecimento que permite obter uma homogeneização do perfil de temperaturas ao longo das amostras, bem como uma redução do *overshoot* em relação ao valor de temperatura de aquecimento pretendido, característico do controlador original do forno.

O segundo objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de um modelo matemático do forno de aquecimento que permita estimar a evolução das temperaturas ao longo das amostras a aquecer. De facto, após o aquecimento da amostra no forno, ocorre a sua transferência para a zona de estampagem, donde resulta que, cumulativamente com as perdas de calor que ocorrem na zona de aquecimento, há ainda que considerar as perdas de calor que ocorrem aquando do transporte, a “céu aberto”, da amostra desde o forno até à zona de estampagem. Esta situação origina uma redução de temperatura da amostra à medida que vai saindo do forno, redução não controlada nem uniforme. Neste sentido, recorrendo ao modelo do sistema desenvolvido, é

possível obter a evolução da temperatura das amostras no movimento até à zona de estampagem. Através de técnicas de controlo avançadas será assim possível, em trabalhos futuros, compensar as perdas de calor existentes.

O segundo objetivo deste trabalho diz assim respeito apenas ao desenvolvimento do modelo do sistema, não incluindo o desenvolvimento e implementação das referidas técnicas de controlo avançadas.

1.3 Método seguido no projeto e estrutura da dissertação

Numa primeira fase, fez-se um estudo sobre o estado inicial (à data do início dos trabalhos) do equipamento, nomeadamente em termos de *software*, *hardware* e controlo de temperatura, descrito com detalhe no capítulo 2. Este estudo foi essencial para compreender a forma como os vários elementos se encontram implementados e a forma como comunicam entre si. Permiteu também compreender quais as limitações existentes a nível de possíveis alterações de *software* e *hardware*. Foram realizados testes experimentais preliminares, com o controlador do forno implementado de origem, de forma a avaliar-se melhor a dimensão do problema.

De seguida, realizou-se um breve estudo quanto aos tipos de controladores mais frequentemente utilizados em aplicações industriais semelhantes. Este estudo é descrito no Capítulo 3, onde são apresentadas e discutidas as vantagens e desvantagens de cada tipo de controlador bem como as características e o modo de implementação de cada um. Por fim, conhecendo o estado inicial do sistema e as suas limitações de *hardware*, foi escolhido o tipo de controlador mais adequado.

No capítulo 4 é apresentado o desenvolvimento do modelo do sistema. Através de métodos de diferenças finitas de temperatura foi possível obter as equações matemáticas que permitem modelar a interação do forno de aquecimento com as amostras a aquecer. Estas equações permitem formular o modelo do sistema em espaço de estados, sendo que neste capítulo se apresenta uma formulação genérica.

Posteriormente, no capítulo 5, apresenta-se a implementação do controlador escolhido. Foram realizados vários testes que permitiram fazer um ajuste experimental dos parâmetros do controlador. Por fim, após implementado o controlador com os parâmetros finais encontrados, repetiram-se os testes para verificar a reprodutibilidade dos mesmos.

No capítulo 6 são apresentados os resultados relativos à validação modelo matemático desenvolvido. Além destes, são também apresentados os resultados obtidos com o controlador desenvolvido no contexto deste trabalho e a comparação com o controlador de temperatura implementado inicialmente no sistema. Esta comparação permite fazer uma avaliação da qualidade do trabalho realizado e das melhorias introduzidas no sistema.

Por fim, fez-se uma análise global ao trabalho que foi desenvolvido, designadamente ao nível de aspetos com potencial para serem melhorados em trabalhos futuros. Esta análise é efetuada no Capítulo 7, o último desta Dissertação.

2 Descrição do sistema

O forno de aquecimento é um sistema existente num dos laboratórios da UMEC, ilustrado na Figura 2-1, e constituído por um carro “*Blank Holder*”, um conjunto de 42 resistências cerâmicas, 9 sensores óticos de temperatura e 2 quadros elétricos, um com os elementos de controlo original do forno – controlador A – e outro com interfaces HMI implementadas pela UMEC, juntamente com outro controlador de temperatura – controlador B. Na saída do forno, existe uma prensa para a qual o *Blank Holder* transporta as amostras após o processo de aquecimento.

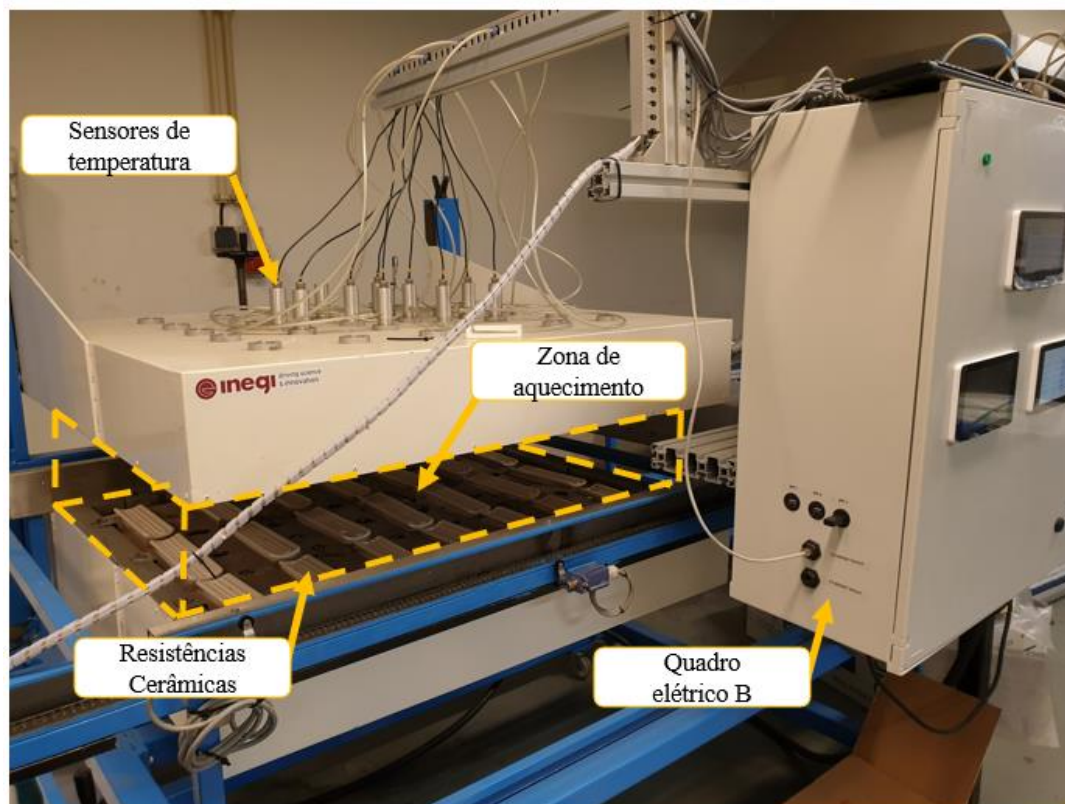


Figura 2-1 - Forno de aquecimento

O *Blank Holder* é um dispositivo móvel que se movimenta ao longo de carris e tem como função fixar e transportar as amostras até estas chegarem à prensa. As amostras são fixadas através do sistema representado na Figura 2-2, já existente e que permite posicionar as amostras conforme pretendido, alterando a posição das molas e parafusos de fixação.

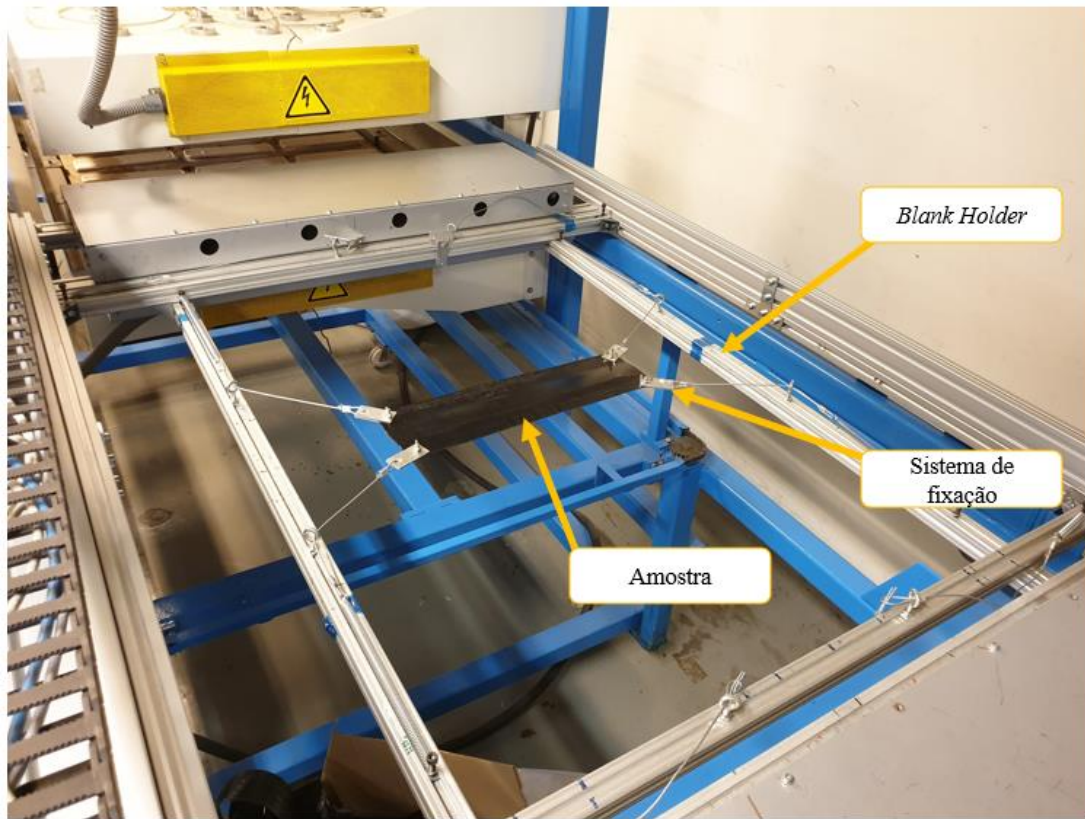


Figura 2-2 - Sistema de fixação do *Blank Holder*

As resistências cerâmicas são os elementos do sistema que permitem, através da emissão de radiação infravermelha, promover o aquecimento da amostra que se encontra na zona de aquecimento.

As resistências encontram-se distribuídas igualmente por cima e por baixo da zona de aquecimento, perfazendo um total de 6 filas com 7 resistências cada uma. Funcionam “em espelho”, isto é, só é permitido ligar pares de filas de 7 resistências (a fila superior e a fila inferior). Na Figura 2-3 encontra-se representado o posicionamento das resistências inferiores, sendo que para as resistências superiores o posicionamento é semelhante.

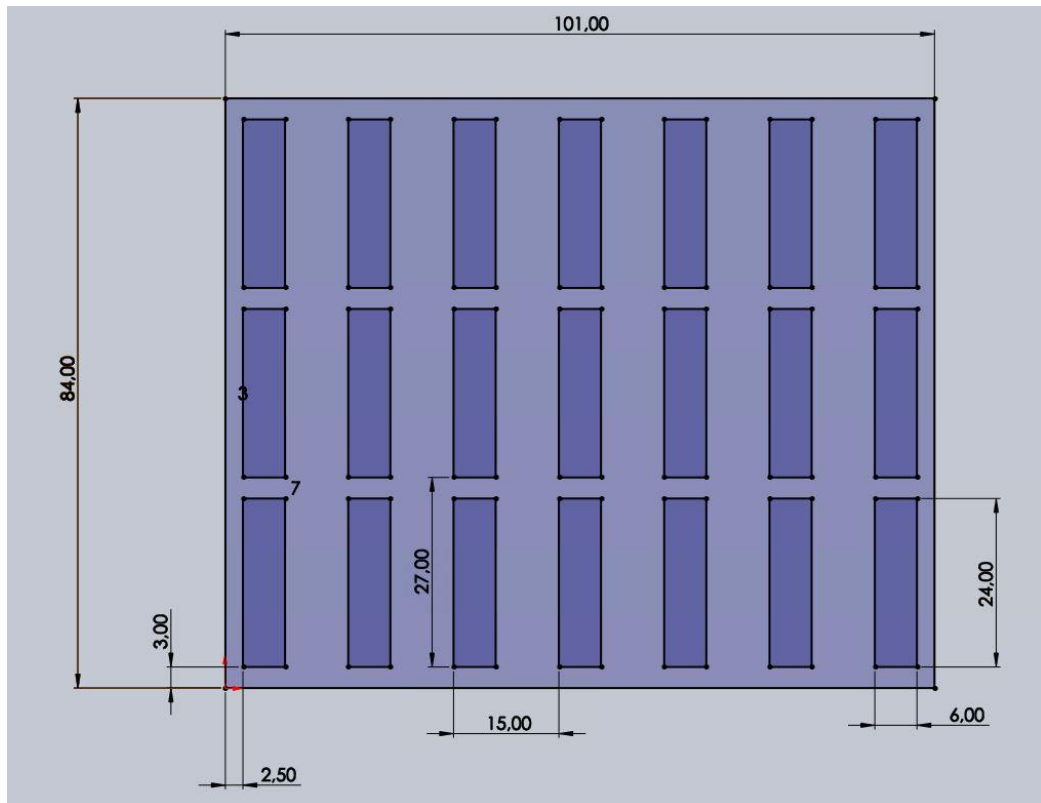


Figura 2-3-Representação esquemática: posicionamento das resistências cerâmicas inferiores [dimensões em cm]

Como já referido anteriormente, cada par de filas de resistências, fila superior à zona de aquecimento e a sua correspondente inferior à zona de aquecimento, é controlado individualmente por um relé de estado sólido, não sendo possível, com o *hardware* disponível, controlar as resistências de forma individual nem por colunas. Na Figura 2-4 encontra-se uma representação esquemática por cores dos 3 pares de filas de resistências existentes. A preto encontram-se representadas as resistências 1-14, a azul as resistências 15-28 e a vermelho as resistências 29-42.

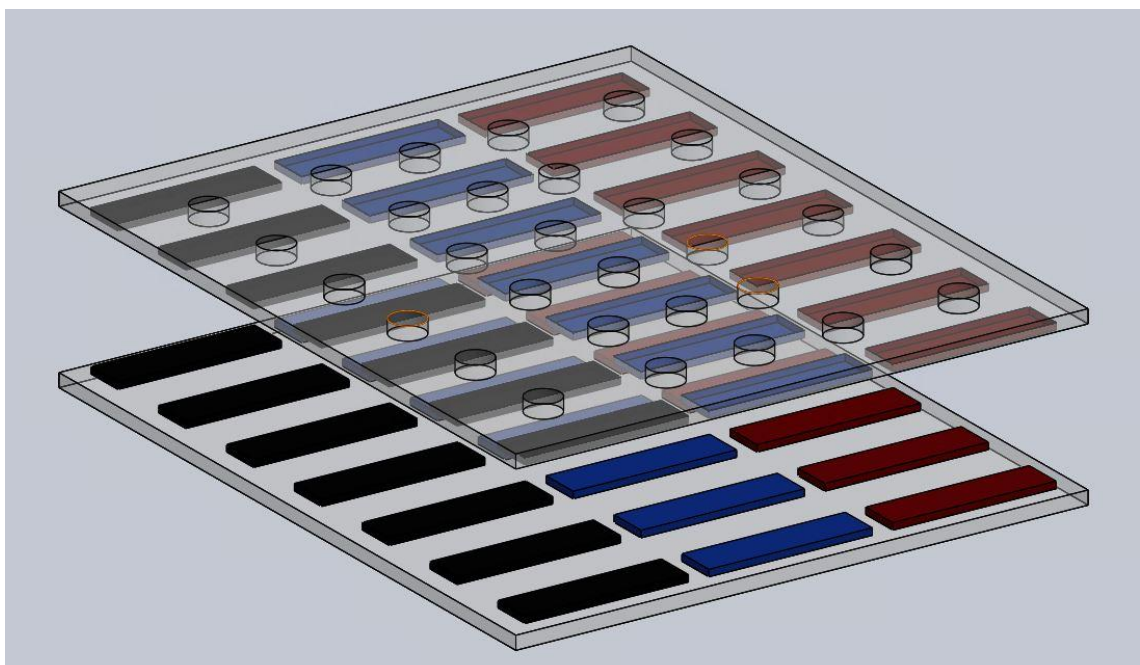


Figura 2-4 - Representação por cores dos 3 pares de filas de resistências considerados

Os sensores óticos de temperatura efetuam a medição da temperatura nas amostras e encontram-se todos numa estrutura por cima da zona de aquecimento. Estes sensores registam o valor de temperatura da superfície superior das amostras. A localização destes pode ser ajustada se tal for pretendido, dentro dos limites físicos da estrutura. Na Figura 2-5 encontra-se representada a estrutura que suporta os sensores óticos de temperatura bem como as várias localizações possíveis dos mesmos. Na Figura 2-6 encontra-se representada a vista inferior da zona de aquecimento, sendo possível observar o posicionamento dos 9 sensores em relação às resistências cerâmicas da zona superior.

Estes sensores funcionam numa gama de 0 a 500 °C e possuem um sistema de arrefecimento por ar comprimido que garante que a sua estrutura não sofre um aumento de temperatura demasiado elevado, evitando assim que se danifiquem.

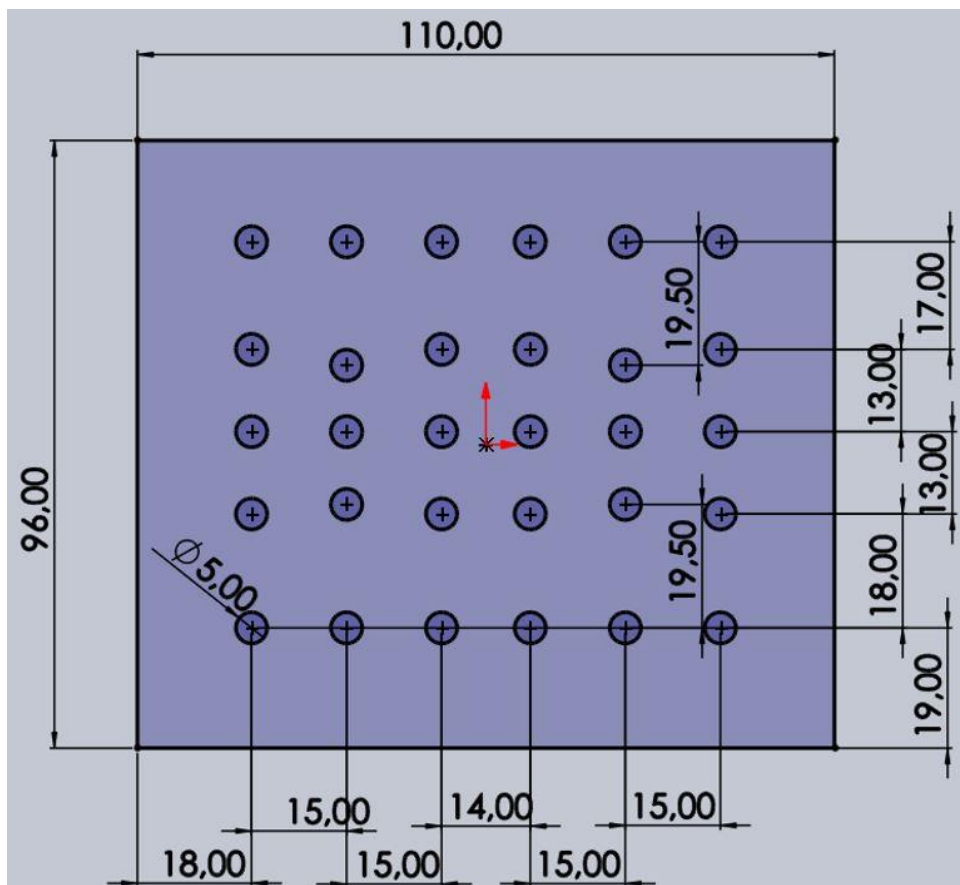


Figura 2-5 - Estrutura de suporte dos sensores e localizações possíveis dos mesmos [dimensões em cm]

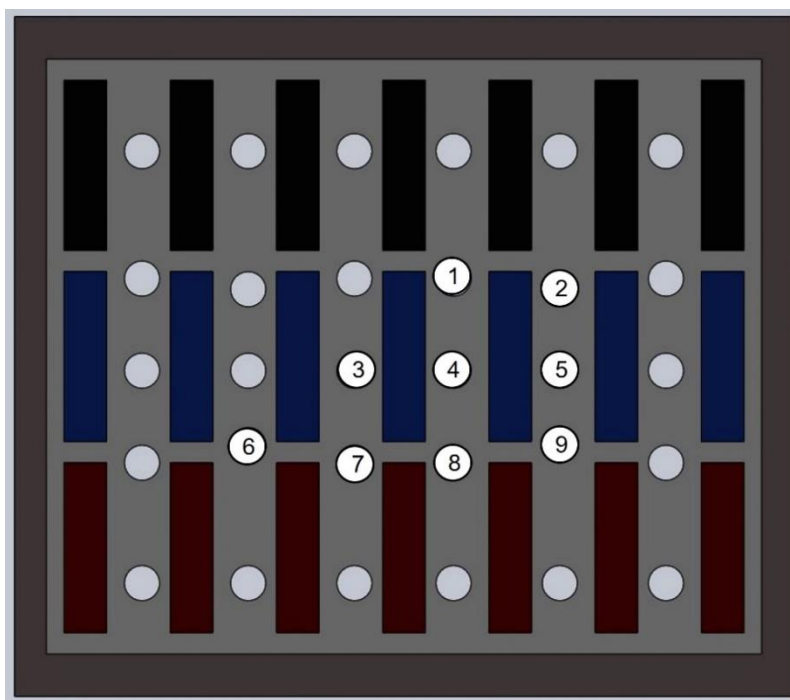


Figura 2-6 - Posicionamento dos sensores relativamente às resistências superiores (vista inferior)

Relativamente às Interfaces Humano Máquina (HMI), existem três, sendo que apenas uma será utilizada ao longo do presente trabalho, para observar os vários estados do sistema. As restantes duas interfaces são utilizadas para o controlo do sistema de fixação das amostras, que não faz parte dos objetivos propostos.

A interface principal deste trabalho, na sua versão original, representada na Figura 2-7, permite declarar a posição dos sensores escolhida, observar as temperaturas registadas, definir uma temperatura de aquecimento pretendida e o sensor que regista esse mesmo valor, e permite ainda observar o estado das resistências (se estas se encontram ligadas ou desligadas) bem como a posição do *Blank Holder*. É na placa *RaspberryPi* ligada a esta interface que se encontra implementado o controlador B, que será abordado mais adiante, e onde será implementado o novo controlador de temperatura desenvolvido ao longo deste trabalho – controlador C.

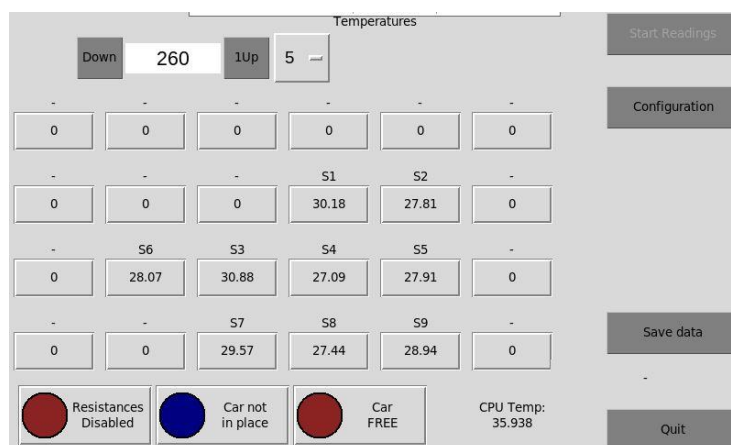


Figura 2-7 - Interface HMI 1

A nível de funcionamento, conforme já foi referido, o forno possui dois tipos de controlo, o controlo original do equipamento (controlador A) e um controlador de temperatura (controlador B) que foi implementado posteriormente na UMEC.

No controlador A, define-se apenas um tempo de aquecimento (tempo de estágio). De seguida, dando ordem de início ao processo através das botoneiras que se encontram no quadro elétrico A (Figura 2-8), o *Blank Holder* desloca-se com a amostra para a zona de aquecimento. Neste momento, ligam-se todas as filas de resistências cerâmicas e promove-se o aquecimento da amostra durante o tempo definido. Depois de decorrido este tempo, desligam-se as resistências e o *Blank Holder* desloca-se com a amostra em direção à zona de estampagem.

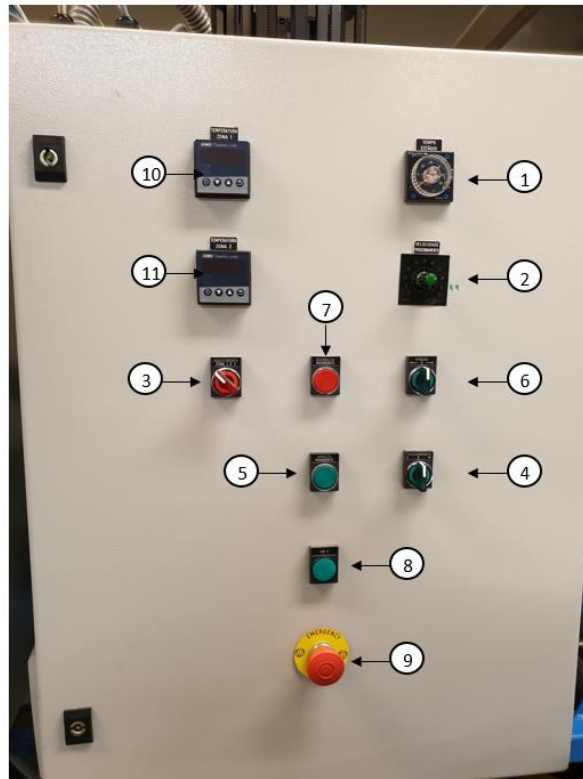


Figura 2-8 - Quadro elétrico A

Na Tabela 2-1, encontram-se os vários elementos do quadro elétrico A bem como a sua função.

Tabela 2-1 - Elementos do quadro elétrico e suas funções

Elemento do quadro elétrico	Função
1 - Potenciômetro - Tempo de estágio	Definição do tempo de estágio/aquecimento
2 - Potenciômetro - Velocidade de deslocamento	Definição da velocidade de deslocamento do <i>Blank Holder</i>
3 - Ativação das resistências	Ativação do funcionamento das resistências
4 - Seletor de tipo de movimento	Seleção do tipo de movimento (automático/manual)
5 - Ativação do movimento	Ativação do movimento do <i>Blank Holder</i>
6 - Seletor do sentido do movimento	Seleção do sentido do movimento do <i>Blank Holder</i> , se em modo manual
7 - Desativação do movimento	Paragem do movimento do <i>Blank Holder</i>
8 - 230V	Estado da alimentação da máquina
9 - Botão de emergência	Botão de emergência
10 - Termopar “Zona 1”	Medição de temperatura do ar (“Zona 1”)
11 - Termopar “Zona 2”	Medição de temperatura do ar (“Zona 2”)

O controlador B faz um *bypass* do controlo original do forno, fazendo com que o aquecimento da amostra se dê até se atingir uma temperatura definida (em vez de ocorrer durante um tempo de aquecimento definido). No que toca a *hardware*, este controlador utiliza as mesmas botoneiras que o anterior com a diferença que, neste caso, a definição da temperatura de aquecimento pretendida é feita na interface HMI 1 (Figura 2-7) que se encontra no quadro elétrico B, representado na Figura 2-9.

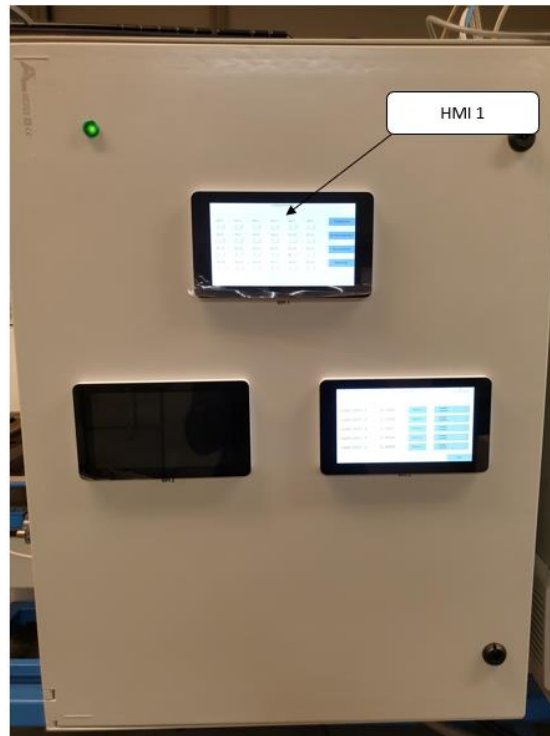


Figura 2-9 - Quadro elétrico B

Neste caso, dando ordem de início ao processo através das botoneiras, tal como no controlador A, o *Blank Holder* desloca-se com a amostra até à zona de aquecimento. De seguida, dá-se o aquecimento até à temperatura pretendida que é registada apenas por um dos sensores de temperatura disponíveis, sensor este que é definido na HMI1. Quando o sensor atinge o valor de temperatura pretendido, as resistências desligam-se e o *Blank Holder* desloca-se com a amostra em direção à prensa.

Este controlador liga todas as resistências até se atingir a temperatura pretendida e desliga todas as resistências quando se atinge essa mesma temperatura.

A implementação deste controlador e a comunicação entre os vários elementos do sistema é feita através de uma placa *RaspberryPi*, onde se implementa o algoritmo de controlo em linguagem de programação *Python*, que permite a apresentação das interfaces gráficas e controlar o funcionamento dos vários elementos do sistema, sendo que é aqui que se encontra a lógica e a programação do funcionamento do controlador. Existem ainda placas de expansão que fazem a aquisição dos valores de temperatura registados pelos sensores e cujos sinais digitais de saída permitem atuar os relés de estado sólido que, por sua vez, atuam as resistências cerâmicas.

Na Figura 2-10 encontra-se um esquema simplificado desta comunicação entre os vários elementos do sistema.

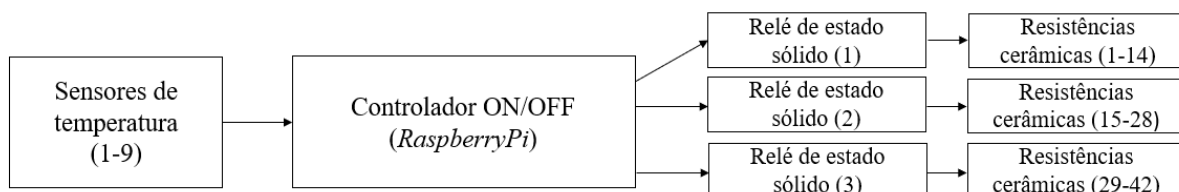


Figura 2-10 - Esquema de comunicação entre os vários componentes do sistema

Durante o estudo sobre o estado inicial do sistema, foram também realizados testes experimentais para comprovar e analisar melhor o problema em causa. Estes resultados permitiram observar que o controlador B implementado na UMEC promove um aquecimento que, para além de não ser homogéneo, apresenta valores de *overshoot* muito elevados. A descrição dos procedimentos destes ensaios experimentais bem como a análise dos resultados é realizada com detalhe no capítulo 6.

3 Sistemas de controlo de temperatura

O controlo automático de equipamentos é essencial em qualquer área de engenharia, sendo um aspeto importante e integrante de qualquer processo industrial. A função do controlador é a imposição a um mecanismo, processo ou sistema, de um comportamento previamente definido, atuando de forma automática e de acordo com as especificações pretendidas.

Cada aplicação e cada equipamento exigem requisitos de controlo diferentes, pelo que existem tipos de sistema de controlo com características distintas em função dos objetivos a atingir. Os controladores de temperatura, tal como o próprio nome indica, têm como função controlar de forma automática a temperatura de um determinado sistema. Assim, o controlador de temperatura deve ser projetado e implementado de forma que se obtenha uma evolução de temperatura que cumpra com os requisitos pretendidos.

Ao longo deste capítulo serão apresentadas algumas técnicas de controlo de temperatura, utilizadas em aplicações semelhantes à do forno de aquecimento em análise, designadamente:

- Controlo ON/OFF
- Controlo proporcional
- Controlo proporcional e integrativo
- Controlo proporcional, integrativo e derivativo

Cada controlador apresenta características diferentes, que condicionam a evolução de temperatura do sistema a controlar. Através da análise dos controladores anteriormente referidos e estabelecendo a ligação com o forno de aquecimento, escolheu-se qual o tipo de controlador mais adequado que permite cumprir com os objetivos do presente trabalho.

3.1 Controlo ON/OFF

Este tipo de controlo é a forma mais simples de controlo de temperatura. A saída do controlador comuta os relés de estado sólido determinando o funcionamento das resistências cerâmicas que estão ligadas ou desligadas, não existindo um estado intermédio.

Na Figura 3-1 encontra-se o diagrama de blocos relativo à implementação de um controlador ON/OFF no forno de aquecimento.

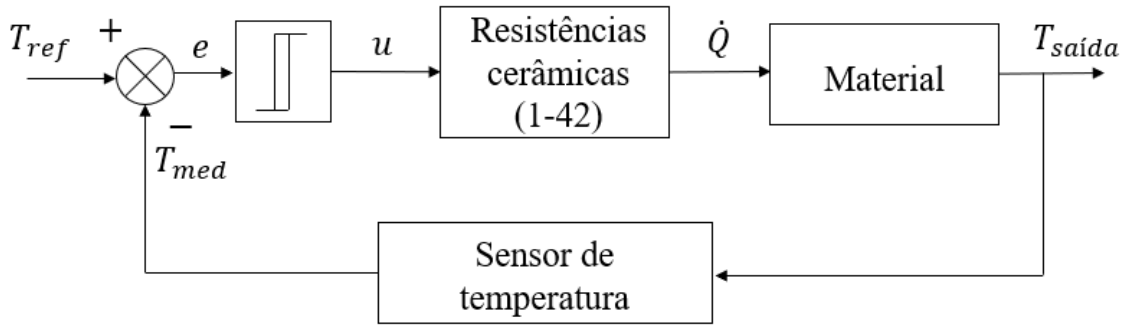


Figura 3-1 - Diagrama de blocos: Controlador ON/OFF

Neste tipo de controladores, introduz-se uma histerese que diminui a frequência de comutação dos elementos atuadores, neste caso das resistências cerâmicas, com o objetivo de prolongar a durabilidade dos mesmos. Assim, os relés de estado sólido atuam, ligando as resistências, se a temperatura está abaixo do valor pretendido (menos o valor de metade da histerese). De seguida, quando se atinge a temperatura pretendida (mais o valor de metade da histerese) os relés de estado sólido deixam de estar atuados, desligando as resistências. O sistema permanece neste ciclo liga-desliga das resistências cerâmicas, o que faz com que a temperatura oscile permanentemente em torno do valor pretendido.

Esta evolução é típica dos controladores ON/OFF e encontra-se representada na Figura 3-2, para um sistema de controlo com histerese nula. O desfasamento temporal entre o ligar/desligar das resistências cerâmicas e o conseqüente aumento/redução da temperatura das amostras ocorre devido à dinâmica do sistema, nomeadamente da inércia térmica das próprias resistências cerâmicas e da amostra.

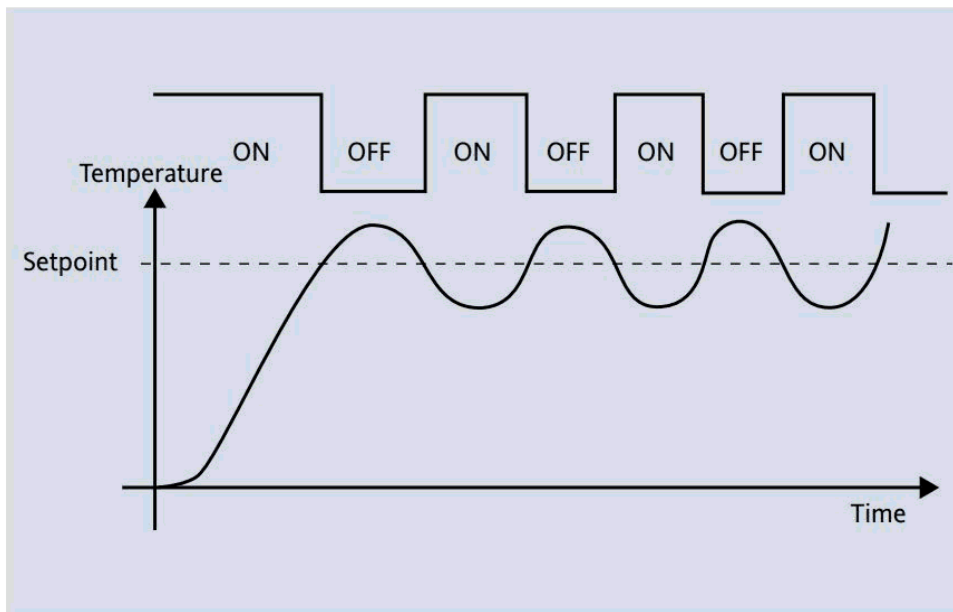


Figura 3-2 - Resposta típica de um controlador ON/OFF, (Silveira, 2016)

3.2 Controlo proporcional

Os controladores proporcionais são desenvolvidos de forma a eliminar o ciclo de oscilação em torno da temperatura pretendida que ocorre no caso dos controladores ON/OFF.

Este tipo de controlo tem em conta o erro de temperatura em cada instante que é obtido através da diferença entre o valor pretendido e o valor registado pelos sensores de temperatura. Introduce-se assim um ganho proporcional, K_p , que é multiplicado pelo erro de temperatura.

Na Figura 3-3 encontra-se um diagrama de blocos representativo da implementação de um controlador proporcional no forno de aquecimento.

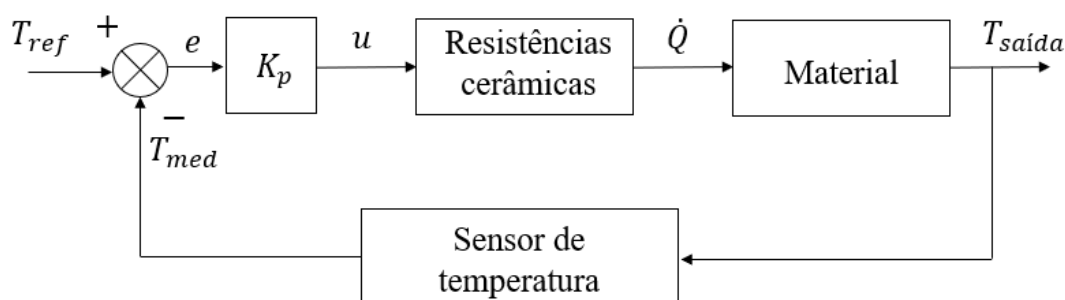


Figura 3-3 - Diagrama de blocos: Controlador proporcional

Novamente, na aplicação deste tipo de controlador ao forno de aquecimento, o sensor de temperatura que regista a temperatura de interesse deve ser definido pelo utilizador, tal como no controlador ON/OFF.

A introdução do ganho K_p permite ao controlador reagir instantaneamente ao valor do erro, diminuindo a potência fornecida aos elementos aquecedores à medida que o sistema se aproxima da temperatura pretendida.

Assim, há uma aproximação contínua ao valor de temperatura definido, evitando assim o constante ligar e desligar dos vários elementos do sistema. No entanto, com este controlador a temperatura de regime permanente não atinge o valor pretendido, não sendo possível obter erro nulo a referências constantes. De facto, quando o erro de controlo de temperatura é nulo, a ação de controlo é também nula, pelo que devido às perdas de calor a temperatura tenderá a descer. Desta forma, em regime permanente atinge-se um valor de temperatura inferior ao valor pretendido.

3.3 Controlo proporcional e integrativo

Os controladores proporcionais e integrativos (PI) incluem adicionalmente um ganho integral, K_i , em relação aos controladores proporcionais. Este ganho é diretamente proporcional ao integral do erro de temperatura. Na Figura 3-4 representa-se um diagrama de blocos da implementação de um controlador proporcional e integrativo no forno de aquecimento.

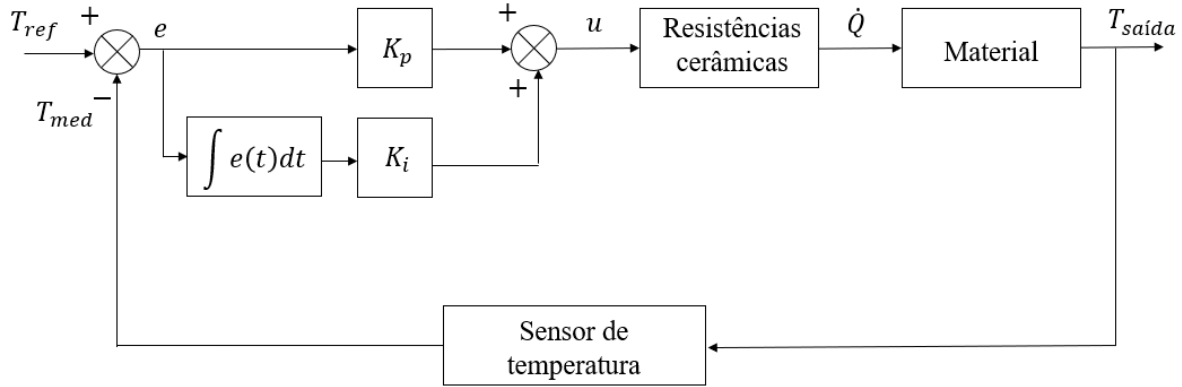


Figura 3-4 - Diagrama de blocos: Controlador proporcional e integrativo

A introdução da ação de controlo integral permite obter uma ação de controlo global que, para além do valor do erro presente em cada instante de tempo (devido à ação proporcional), tem em conta o valor do erro ao longo do tempo. Deste modo, mesmo quando o erro é nulo, a ação de controlo global pode ser não nula, permitindo assim compensar as perdas por transferência de calor e obter erro nulo a referências constantes. Este aspeto é bastante importante na medida em que se pretende desenvolver e implementar um controlador de temperatura que permita a estabilização da temperatura das amostras num valor pretendido em regime permanente.

O controlador proporcional e integrativo, apesar de eliminar o erro estacionário a referências constantes, torna o sistema mais lento, desvantagem bastante relevante em determinadas aplicações. No entanto, no presente trabalho, o desempenho temporal do sistema não é considerado crítico. Isto é, o objetivo do desenvolvimento e implementação de um novo controlador de temperatura é obter uma homogeneização da temperatura ao longo das amostras num valor pretendido sem que ocorra *overshoot*, independentemente da velocidade de resposta do sistema.

Além de tornar o sistema mais lento, o controlador PI introduz um zero no sistema, o que pode provocar um aumento de temperatura além do valor pretendido na resposta ao degrau, verificando-se assim fenómenos indesejáveis de *overshoot* (Almeida, 2019).

3.4 Controlo proporcional, integrativo e derivativo

Os controladores proporcionais, integrativos e derivativos, denominados PID, introduzem uma ação derivativa em relação ao caso anterior. Assim, para além de uma ação de controlo que é proporcional ao erro de temperatura atual em cada instante e uma ação integral que tem em conta a história do erro ao longo do tempo, tem-se uma ação de controlo derivativa que é proporcional à taxa de variação do erro de temperatura.

A ação derivativa consiste num ganho derivativo K_d que é multiplicado pela derivada do erro de temperatura em cada instante. O diagrama de blocos representativo da implementação de um controlador PID no forno de aquecimento encontra-se representado na Figura 3-5.

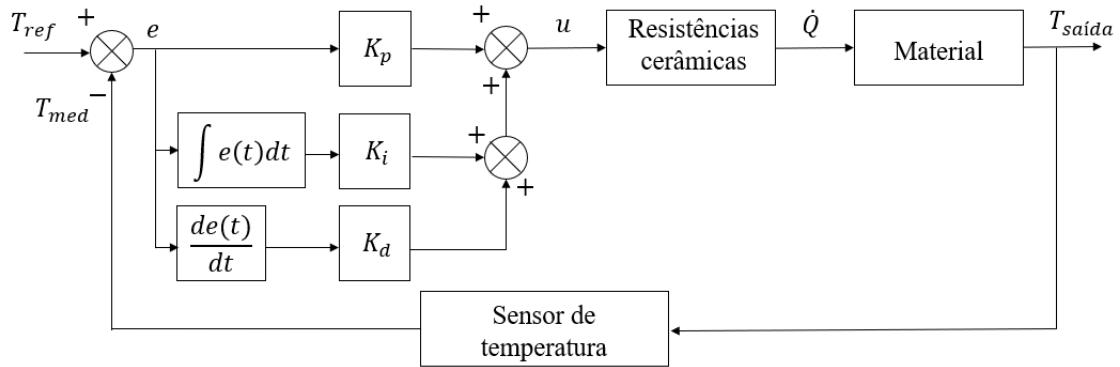


Figura 3-5 - Diagrama de blocos: Controlador PID

A ação derivativa só produz ação de controle não nula quando se verifica uma variação do erro de temperatura, não podendo ser usada isoladamente. Como esta ação reage à tendência do erro, antecipa a correção do mesmo antes que o seu valor seja demasiado elevado, promovendo uma redução do *overshoot* característico dos controladores PI, diminuindo o tempo de resposta do sistema e aumentando a sua estabilidade.

Assim, o controlador PID apresenta-se com uma solução promissora pois é um tipo de controlador cujas características permitem potencialmente obter uma evolução de temperatura que cumpra com os objetivos definidos.

Como já foi referido no capítulo 2, existem três relés de estado sólido que permitem controlar independentemente os três pares de filas de resistências cerâmicas existentes. Existem também vários sensores de temperatura que podem ser associados aos vários pares de filas de resistências, sendo possível definir diferentes malhas de controlo. Assim, em vez de se desenvolver e implementar um controlador PID que define um comportamento igual para os três pares de filas de resistências, procedeu-se ao desenvolvimento e implementação de três controladores PID independentes, cada um determinando o funcionamento de um par de filas de resistências cerâmicas.

Os procedimentos de implementação dos três controladores PID são descritos e analisados em detalhe no Capítulo 5.

4 Desenvolvimento do modelo do sistema

Um dos objetivos do presente trabalho é obter a distribuição espacial e temporal das temperaturas das amostras a aquecer. Para tal, é necessário proceder ao desenvolvimento de um modelo do sistema que permita obter a referida evolução de temperatura. O modelo desenvolvido e apresentado neste capítulo assenta numa representação em espaço de estados da temperatura do forno de aquecimento, no qual os estados são as diversas temperaturas ao longo das amostras. É de realçar que este capítulo se foca no desenvolvimento do modelo genérico do sistema. O modelo detalhado, aplicado a uma determinada amostra, bem como os respetivos resultados experimentais, que permitem a validação do modelo, são analisados com detalhe no capítulo 6.

4.1 Equações desenvolvidas no plano bidimensional

Para problemas simples como problemas unidimensionais e um número reduzido de condições de fronteira, a distribuição de temperaturas no espaço e no tempo pode ser obtida facilmente por via analítica. No entanto, para problemas bidimensionais e tridimensionais com um maior número de condições de fronteira e para geometrias mais complexas, a obtenção por via analítica da distribuição de temperaturas é demasiado complexa.

O problema a analisar neste trabalho é um sistema tridimensional com diversas equações de fronteira e no qual a geometria das amostras é variável. Assim, optou-se por recorrer a métodos de diferenças finitas que permitiram obter as equações necessárias para a obtenção do modelo matemático do sistema (Incropera *et al*, 2020).

Primeiramente, será analisado o desenvolvimento do modelo no plano bidimensional e, posteriormente, na secção 4.3 será analisado o modelo no plano tridimensional.

O sistema de eixos considerado ao longo deste capítulo encontra-se representado na Figura 4-1.

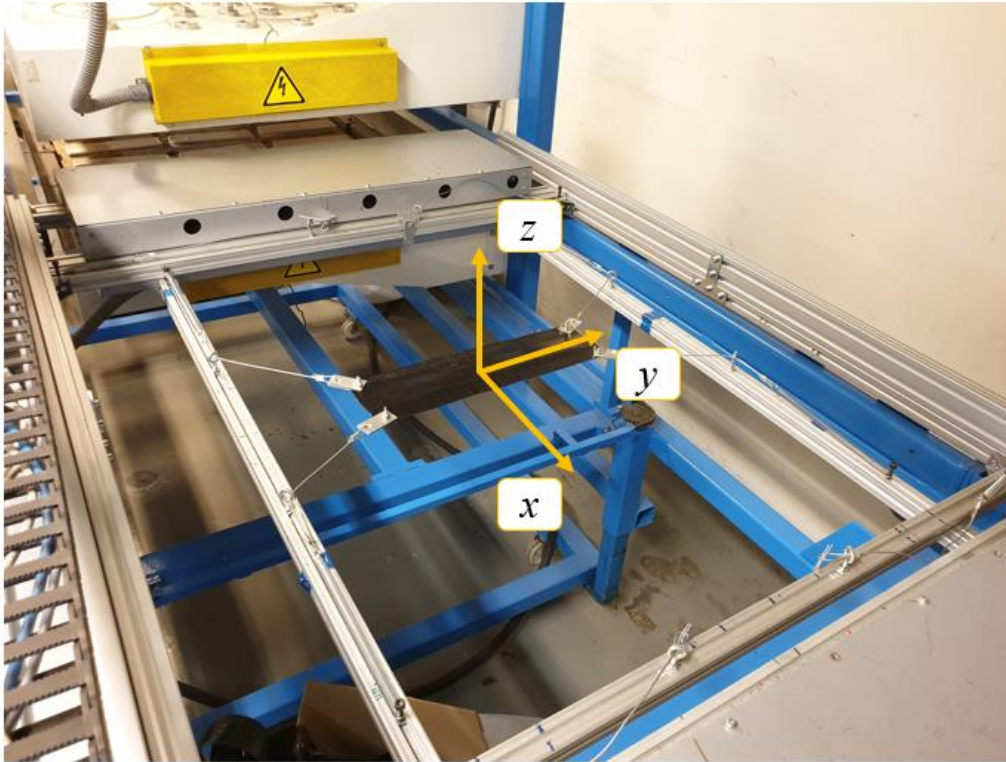


Figura 4-1 - Sistema de eixos considerado

Considerando um sistema bidimensional em regime transitório, propriedades constantes e sem geração interna de calor, com deslocamento apenas na direção do eixo x (direção do movimento do *Blank Holder*), a equação de difusão de calor é definida por (4.1), (Incropera *et al*, 2020).

$$\frac{1}{\alpha} \cdot \frac{dT}{dt} + u_x \cdot \frac{dT}{dx} = \frac{d^2T}{dx^2} + \frac{d^2T}{dy^2} \quad (4.1)$$

Em que $\alpha_{x,y} = \frac{k_{x,y}}{\rho \cdot c_p}$, constitui um parâmetro relativo às propriedades físicas e térmicas do material, nomeadamente, condutividade térmica na direção dos eixos cartesianos x e y ($k_{x,y}$), densidade (ρ) e calor específico (c_p); u_x representa a velocidade de deslocamento do *Blank Holder*.

O método das diferenças finitas utiliza o conceito de malha de nós discretos, que divide o volume de controlo de interesse em pequenas regiões, atribuindo a cada uma um ponto de referência que está no seu centro – nó. A configuração destas malhas deve ser ajustada, para efeitos de validação do modelo, em função das dimensões das amostras e do posicionamento dos sensores.

Na Figura 4-2 encontra-se representada uma malha de nós de temperatura bidimensional, com três colunas e três linhas.

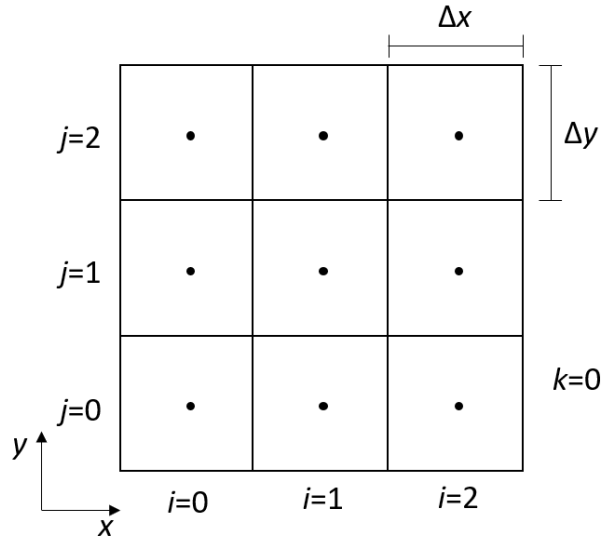


Figura 4-2 Malha de nós de temperatura (3x3x1)

Como se pode observar, existem nove nós de temperatura e os índices (i, j, k) permitem identificar o posicionamento do nó em análise na direção dos eixos cartesianos (x, y, z) .

Para os vários nós de temperatura $n_{i,j,k}$ representados na Figura 4-2, de modo a obter-se a equação de calor sob a forma de diferenças finitas de temperatura, utilizam-se as equações (4.2a), (4.2b) e (4.2c) (Incropera *et al*, 2020).

$$\frac{d^2 T_{i,j,k}}{dx^2} \approx \frac{T_{i-1,j,k} + T_{i+1,j,k} - 2 \cdot T_{i,j,k}}{(\Delta x)^2} \quad (4.2a)$$

$$\frac{d^2 T_{i,j,k}}{dy^2} \approx \frac{T_{i,j-1,k} + T_{i,j+1,k} - 2 \cdot T_{i,j,k}}{(\Delta y)^2} \quad (4.2b)$$

$$\frac{dT_{i,j,k}}{dx} \approx \frac{T_{i+1,j,k} - T_{i-1,j,k}}{2 \cdot \Delta x} \quad (4.2c)$$

Substituindo (4.2a), (4.2b) e (4.2c) na equação (4.1) obtém-se a equação (4.3):

$$\begin{aligned} \frac{dT_{i,j,k}}{dt} \approx & \frac{\alpha_x}{(\Delta x)^2} \cdot (T_{i-1,j,k} + T_{i+1,j,k} - 2 \cdot T_{i,j,k}) + \\ & + \frac{\alpha_y}{(\Delta y)^2} \cdot (T_{i,j-1,k} + T_{i,j+1,k} - 2 \cdot T_{i,j,k}) - \\ & - u_x \cdot \frac{T_{i+1,j,k} - T_{i-1,j,k}}{2 \cdot \Delta x} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Ao longo deste capítulo, que se foca no desenvolvimento do modelo do sistema em particular no processo de aquecimento que se dá de forma estacionária, considera-se $u_x = 0$.

Aplicando a equação (4.3) ao nó $n_{0,0,0}$ representado na Figura 4-2 obtém-se a equação (4.4) e surge um problema: os nós $n_{-1,0,0}$ e $n_{0,-1,0}$ não existem na malha considerada.

$$\begin{aligned} \frac{dT_{0,0,0}}{dt} \approx & \frac{\alpha_x}{(\Delta x)^2} \cdot (T_{-1,0,0} + T_{1,0,0} - 2 \cdot T_{0,0,0}) + \\ & + \frac{\alpha_y}{(\Delta y)^2} \cdot (T_{0,-1,0} + T_{0,1,0} - 2 \cdot T_{0,0,0}) \end{aligned} \quad (4.4)$$

Como tal, nesta situação, utilizam-se as equações fronteira representadas pelas equações (4.5a) e (4.5b) (Incropera *et al*, 2020).

$$\left. \frac{dT_{i,j,k}}{dx} \right|_{i=0} = 0 \Rightarrow \frac{T_{i+1,j,k} - T_{i-1,j,k}}{2\Delta x} = 0 \Rightarrow T_{i-1,j,k} \approx T_{i+1,j,k} \quad (4.5a)$$

$$\left. \frac{dT_{i,j,k}}{dy} \right|_{j=0} = 0 \Rightarrow \frac{T_{i,j+1,k} - T_{i,j-1,k}}{2\Delta y} = 0 \Rightarrow T_{i,j-1,k} \approx T_{i,j+1,k} \quad (4.5b)$$

Aplicando novamente a equação (4.3) ao nó $n_{0,0,0}$ e tendo em conta as equações fronteira (4.5a) e (4.5b), obtém-se a equação (4.6).

$$\begin{aligned} \frac{dT_{0,0,0}}{dt} \approx & \frac{\alpha_x}{(\Delta x)^2} \cdot (2 \cdot T_{1,0,0} - 2 \cdot T_{0,0,0}) + \\ & \frac{\alpha_y}{(\Delta y)^2} \cdot (2 \cdot T_{0,1,0} - 2 \cdot T_{0,0,0}) \end{aligned} \quad (4.6)$$

Ou seja, para os nós de temperatura que não apresentam um nó adjacente na direção do eixo x e/ou y devem ser consideradas as condições de fronteira (4.5a) e/ou (4.5b).

Deste modo, foram consideradas todas as hipóteses, ou seja, todas as configurações de nós de temperatura e seus adjacentes, que permitem obter todas as versões da aplicação da equação (4.3).

Existem 15 nós de temperatura genéricos que permitem obter qualquer malha de nós. Para cada uma destas 15 hipóteses, representadas na Figura 4-3, a aplicação da equação (4.3) é ligeiramente distinta.

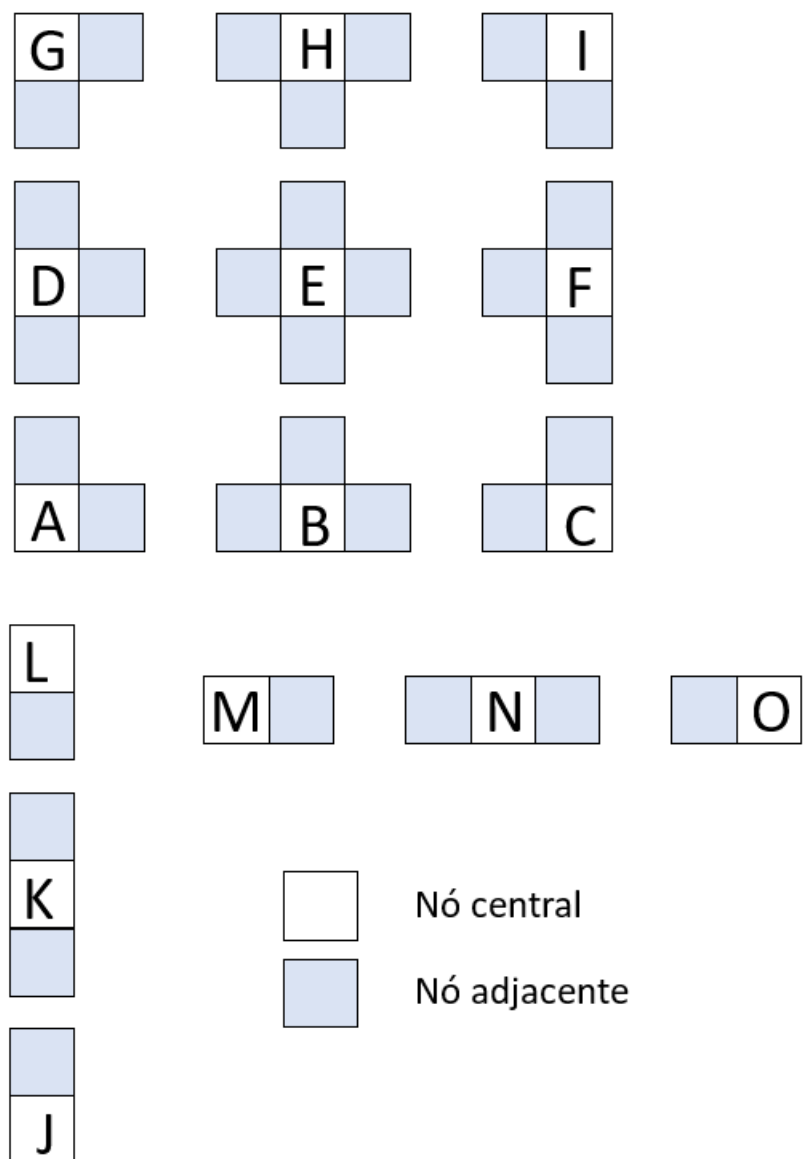


Figura 4-3 - Hipóteses de nós de temperatura consideradas

As 15 hipóteses representadas na Figura 4-3 permitem obter qualquer configuração de malha de nós de temperatura. Por exemplo, uma malha de nós de temperatura com 7 colunas e 4 linhas é composta por vários nós de temperatura em que cada um representa uma das hipóteses acima descritas, tal como se pode observar na Figura 4-4.

G	H	H	H	H	H	I
D	E	E	E	E	E	F
D	E	E	E	E	E	F
A	B	B	B	B	B	C

Figura 4-4 Malha de nós de temperatura (7x4x1)

Permite também obter configurações de malhas de nós de temperatura mais simples com um número reduzido de colunas e/ou linhas conforme se pode observar na Figura 4-5.

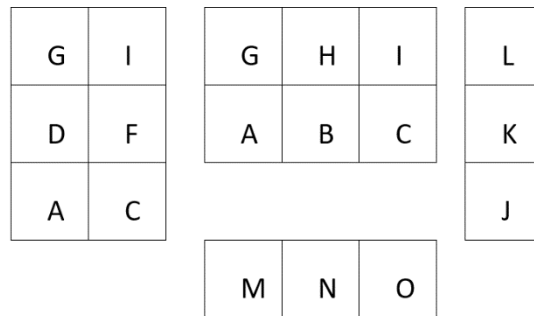


Figura 4-5 - Exemplos malhas de nós de temperatura simples

Como as condições de fronteira são semelhantes para todas as hipóteses consideradas, não é relevante representar a aplicação da equação (4.3) a cada uma. No entanto, isto foi considerado no algoritmo de construção do modelo, sendo o modelo válido para qualquer malha bidimensional de nós considerada e dimensões da amostra. Assim, o algoritmo implementado obtém as equações de forma automática para qualquer caso a considerar.

As amostras utilizadas no desenvolvimento e validação do modelo apresentam uma espessura muito reduzida, 0.14 mm, de onde resulta uma área de transferência de calor para o exterior na direção dos eixos x e y bastante inferior à área de transferência de calor na direção do eixo z . Assim, consideram-se desprezáveis as perdas de calor para o exterior ao longo dos bordos das amostras, considerando-se apenas a existência de trocas de calor entre as resistências, a amostra e o ambiente na direção do eixo z .

Para efeitos de validação do modelo matemático do sistema, consideram-se apenas malhas de nós de temperatura com um nó na direção do eixo z . Isto tem a ver com o facto de que, para além de terem sido utilizadas amostras com espessuras muito reduzidas, os sensores óticos de temperatura registam apenas os valores de temperatura à superfície das mesmas. Posteriormente, após validação do modelo, é possível extrapolar de modo que sejam consideradas amostras com espessuras mais significativas, considerando mais que um nó de temperatura na direção do eixo z .

Retomando a equação (4.3), esta não tem em conta as trocas de calor por radiação entre os vários elementos do sistema pois ocorrem sobretudo na direção do eixo z . No caso do forno em análise, o aquecimento é promovido através de uma troca de calor sob a forma de radiação entre as resistências cerâmicas e a amostra a aquecer. Assim, na equação de calor sob a forma de diferenças finitas de temperatura, aplicada a cada um dos nós, tem que se contabilizar a potência calorífica total que cada nó recebe por parte das resistências. O cálculo desta potência que é emitida pelas resistências de aquecimento a cada um dos nós é feito através do fator de visão de radiação e a potência fornecida pelas resistências cerâmicas, temas a abordar de seguida.

4.2 Fator de visão de radiação e potência das resistências

O fator de visão de radiação $F_{i,j}$ é definido como a fração da radiação emitida pela superfície i que é intercetada pela superfície j (Incropera *et al*, 2020).

Este parâmetro permite calcular a fração da potência emitida por cada uma das 42 resistências cerâmicas que é absorvida por cada nó. No caso do forno, as resistências por cima ou por baixo da zona de aquecimento encontram-se todas ao mesmo nível e a amostra a aquecer

encontra-se paralelamente e a meia altura em relação às anteriores. Assim, considera-se que parte da potência que cada resistência fornece é absorvida pela amostra e a restante é perdida para o ambiente.

Para calcular o fator de visão é necessário resolver a equação (4.7), em que os índices i e j representam, respetivamente, a resistência cerâmica e o nó de temperatura em análise (Incropera *et al*, 2020).

$$F_{i,j} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos(\theta_i) \cdot \cos(\theta_j)}{\pi \cdot R^2} dA_i dA_j \quad (4.7)$$

As resistências são todas iguais, logo a área de cada uma, A_i , é constante. A área dos nós de temperatura, A_j , varia conforme a malha de nós que se define e a dimensão da amostra a simular/testar experimentalmente.

Os ângulos θ_i e θ_j podem ser observados na Figura 4-6 e são obtidos através da equação (4.8). A relação representada na equação (4.8) só é válida para duas superfícies que se encontram dispostas paralelamente entre si. Se isto não se verificar, o cálculo do fator de visão de radiação é bastante mais complexo.

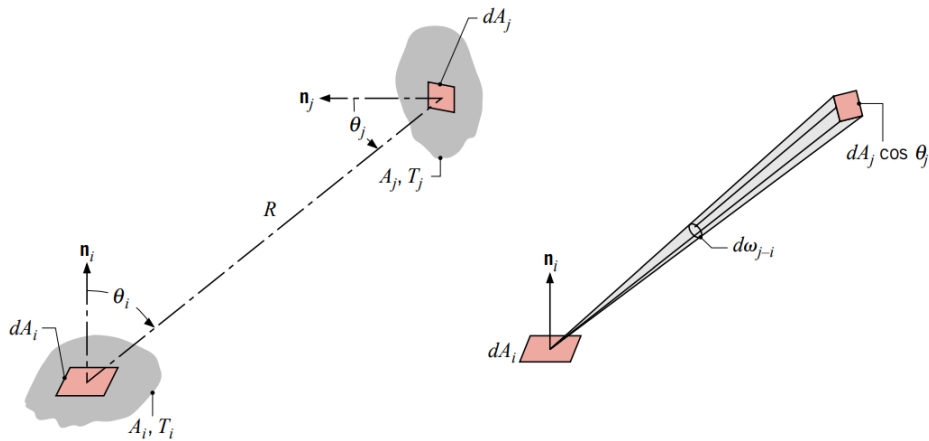


Figura 4-6 – Ângulos θ_i e θ_j (Incropera *et al*, 2020)

$$\cos(\theta_i) = \cos(\theta_j) = \frac{|z_i - z_j|}{R} \quad (4.8)$$

Na equação (4.8), z_i e z_j são, respetivamente, a posição em altura, isto é, a posição na direção do eixo z , da resistência e do nó de temperatura.

Por fim, o parâmetro R da equação (4.7) e (4.8) representa a distância entre o nó de temperatura e a resistência cerâmica em análise e pode ser obtido através da equação (4.9) (Incropera *et al*, 2020).

$$R = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \quad (4.9)$$

Em que os índices x , y , e z representam as coordenadas da resistência e do nó considerado ao longo dos eixos definidos na Figura 4-1.

O funcionamento das resistências cerâmicas é comandado pela atuação dos correspondentes relés de estado sólido. Estes relés controlam a potência fornecida às resistências, fornecendo a potência máxima ou não fornecendo potência nenhuma, não existindo um estado intermédio.

Através de testes experimentais, foi possível concluir que a potência calorífica emitida por cada resistência cerâmica apresenta uma evolução de um sistema de primeira ordem, de acordo com a equação (4.10).

$$\dot{Q}_r = \left(1 - e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau}}\right) \cdot \dot{Q}_{nom} \quad (4.10)$$

Na equação (4.10), \dot{Q}_r e \dot{Q}_{nom} representam, respetivamente, a potência calorífica fornecida por cada uma das resistências cerâmicas e a potência nominal. τ é a constante de tempo da evolução de primeira ordem considerada e t_0 o instante inicial.

Em suma, o fator de visão de radiação é um parâmetro adimensional que quando multiplicado pela potência calorífica fornecida pelas resistências cerâmicas, \dot{Q}_r , permite obter a quantidade de calor absorvida por cada nó de temperatura, \dot{Q}_n , tal como representado na equação (4.11).

$$\dot{Q}_n = \sum_{r=1}^{42} F_{r,n} \cdot \dot{Q}_r \quad (4.11)$$

Como as resistências cerâmicas se encontram distribuídas igualmente por cima e por baixo da zona de aquecimento, o cálculo dos fatores de visão das resistências superiores é exatamente igual ao das resistências inferiores. Isto simplifica a equação (4.11), obtendo-se a equação (4.12).

$$\dot{Q}_n = \sum_{r=1}^{21} F_{r,n} \cdot 2 \cdot \dot{Q}_r \quad (4.12)$$

4.3 Equações desenvolvidas no plano tridimensional

Conforme referenciado na secção 4.1, a equação (4.3) como só é aplicada a sistemas bidimensionais, não considera as trocas de calor por radiação que ocorrem no sistema em análise. Neste contexto é necessário proceder à inclusão dos desenvolvimentos expostos na secção 4.2, de forma que sejam incorporadas as trocas de calor.

Deste modo, considerando um sistema tridimensional em regime transitório, propriedades constantes e sem geração interna de calor, a equação de difusão de calor sob a forma de diferenças finitas de temperatura é definida por (4.13).

$$\begin{aligned} \frac{dT_{i,j,k}}{dt} \approx & \frac{\alpha_x}{(\Delta x)^2} \cdot (T_{i-1,j,k} + T_{i+1,j,k} - 2 \cdot T_{i,j,k}) + \\ & + \frac{\alpha_y}{(\Delta y)^2} \cdot (T_{i,j-1,k} + T_{i,j+1,k} - 2 \cdot T_{i,j,k}) + \\ & + \frac{\alpha_z}{(\Delta z)^2} \cdot (T_{i,j,k-1} + T_{i,j,k+1} - 2 \cdot T_{i,j,k}) \end{aligned} \quad (4.13)$$

A definição do parâmetro α_z é idêntica à definição de $\alpha_{x,y}$ referida anteriormente na equação (4.1).

Realizando um balanço de energias, na direção do eixo z , aplicado a um qualquer nó de temperatura $n_{i,j,k}$, onde a energia fornecida é a energia calorífica proveniente das resistências, afetada pelo fator de visão, conforme explicado anteriormente, e a energia que sai é a energia perdida da amostra para o ambiente, obtêm-se as equações (4.14a) e (4.14b) (Incropera *et al*, 2020).

$$\left\{ \begin{aligned} \sum_{r=1}^{21} F_{r,n_{i,j,k}} \cdot \dot{Q}_r - h_r \cdot (T_{i,j,k} - T_\infty) &= \frac{k_z}{\Delta z} (T_{i,j,k+1} - T_{i,j,k}) & (4.14a) \\ \sum_{r=1}^{21} F_{r,n_{i,j,k}} \cdot \dot{Q}_r - h_r \cdot (T_{i,j,k} - T_\infty) &= \frac{k_z}{\Delta z} (T_{i,j,k-1} - T_{i,j,k}) & (4.14b) \end{aligned} \right.$$

Nestas equações surgem dois novos termos, h_r , que representa o coeficiente de perdas por calor sob a forma de radiação e convecção da amostra para o ambiente e k_z , que representa a condutividade térmica do material na direção do eixo cartesiano z .

Resolvendo as equações (4.14a) e (4.14b) em ordem a $T_{i,j,k-1}$ e $T_{i,j,k+1}$, obtêm-se as equações (4.15a) e (4.15b).

$$\left\{ \begin{aligned} T_{i,j,k+1} &= \frac{\Delta z}{k_z} \cdot \left(\sum_{r=1}^{21} F_{r,n_{i,j,k}} \dot{Q}_r + h_r \cdot (T_\infty - T_{i,j,k}) \right) + T_{i,j,k} & (4.15a) \\ T_{i,j,k-1} &= \frac{\Delta z}{k_z} \cdot \left(\sum_{r=1}^{21} F_{r,n_{i,j,k}} \dot{Q}_r + h_r \cdot (T_\infty - T_{i,j,k}) \right) + T_{i,j,k} & (4.15b) \end{aligned} \right.$$

Introduzindo (4.15a) e (4.15b) na equação (4.13) alcança-se finalmente a equação de calor sob a forma de diferenças finitas de temperatura considerando o fornecimento de potência calorífica por parte das resistências cerâmicas à amostra em questão, bem como as perdas de energia da amostra para o ambiente, equação (4.16).

$$\begin{aligned}
 \frac{dT_{i,j,k}}{dt} \approx & \frac{\alpha_x}{(\Delta x)^2} \cdot (T_{i-1,j,k} + T_{i+1,j,k} - 2 \cdot T_{i,j,k}) + \\
 & + \frac{\alpha_y}{(\Delta y)^2} \cdot (T_{i,j-1,k} + T_{i,j+1,k} - 2 \cdot T_{i,j,k}) + \\
 & + \frac{2 \cdot \alpha_z}{\Delta z \cdot k_z} \cdot \left(\sum_{r=1}^{21} F_{r,n_{i,j,k}} \dot{Q}_r + h_r \cdot (T_\infty - T_{i,j,k}) \right)
 \end{aligned} \tag{4.16}$$

Reorganizando a equação (4.16) obtém-se a equação (4.17).

$$\begin{aligned}
 \frac{dT_{i,j,k}}{dt} \approx & \frac{\alpha_x}{(\Delta x)^2} \cdot (T_{i-1,j,k} + T_{i+1,j,k} - 2 \cdot T_{i,j,k}) + \\
 & + \frac{\alpha_y}{(\Delta y)^2} \cdot (T_{i,j-1,k} + T_{i,j+1,k} - 2 \cdot T_{i,j,k}) - \\
 & - h_r \cdot \frac{2 \cdot \alpha_z}{\Delta z \cdot k_z} \cdot T_{i,j,k} + \\
 & + \frac{2 \cdot \alpha_z}{\Delta z \cdot k_z} \cdot \left(\sum_{r=1}^{21} F_{r,n_{i,j,k}} \dot{Q}_r + h_r \cdot T_\infty \right)
 \end{aligned} \tag{4.17}$$

As equações anteriormente descritas, para além da potência das resistências e da configuração e dimensão da malha de nós de temperatura utilizada, tem também em conta algumas propriedades do material utilizado. Estas propriedades são a condutividade térmica, calor específico, coeficiente de perdas de calor e densidade.

As primeiras três dependem da temperatura pelo que, de modo a simplificar o modelo do sistema, se considerou correto utilizar valores médios dentro da gama de temperaturas à qual o material estará sujeito. Os gráficos que relacionam estas propriedades com a temperatura foram fornecidos pela UMEC, uma vez que foram realizados previamente ensaios experimentais para obter os mesmos, e podem ser consultados nas Figuras A-1 e A-2 do Anexo A.

A densidade, ao contrário das propriedades referidas anteriormente, não depende da temperatura. Uma vez mais, os valores da densidade foram fornecidos pela UMEC pelas mesmas razões acima referidas e podem ser consultados na Tabela A-1 e A-2 do Anexo A.

Os valores e unidades destas propriedades são expostos e analisados no capítulo 6.

4.4 Notação matricial

Nesta secção, apresentam-se as matrizes necessárias para a formulação do modelo do sistema em espaço de estados. Para um caso genérico, considerando “N” o número total de nós de

temperatura “ n_i ” existentes na malha tridimensional definida, obtém-se as equações (4.18) e (4.19).

$$\{\dot{T}\}_{N \times 1} = [A]_{N \times N} \cdot \{T\}_{N \times 1} + [B]_{N \times 2N} \cdot \{u\}_{2N \times 1} \quad (4.18)$$

$$\{y\}_{N \times 1} = [C]_{N \times N} \cdot \{T\}_{N \times 1} \quad (4.19)$$

De seguida, apresentam-se as matrizes **A**, **B**, **C** e o vetor **u**.

$$[A] = \begin{bmatrix} -2 \cdot \left(\frac{\alpha_x}{(\Delta x)^2} \cdot (...) + \frac{\alpha_y}{(\Delta y)^2} \cdot (...) \right) - h \cdot \frac{2 \cdot \alpha_z}{\Delta z \cdot k_z} & \frac{\alpha_x}{(\Delta x)^2} \cdot (*) + \frac{\alpha_y}{(\Delta y)^2} \cdot (...) & \dots & \frac{\alpha_x}{(\Delta x)^2} \cdot (...) + \frac{\alpha_y}{(\Delta y)^2} \cdot (...) \\ \frac{\alpha_x}{(\Delta x)^2} \cdot (...) + \frac{\alpha_y}{(\Delta y)^2} \cdot (...) & -2 \cdot \left(\frac{\alpha_x}{(\Delta x)^2} \cdot (...) + \frac{\alpha_y}{(\Delta y)^2} \cdot (...) \right) - h \cdot \frac{2 \cdot \alpha_z}{\Delta z \cdot k_z} & \dots & \frac{\alpha_x}{(\Delta x)^2} \cdot (...) + \frac{\alpha_y}{(\Delta y)^2} \cdot (...) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\alpha_x}{(\Delta x)^2} \cdot (...) + \frac{\alpha_y}{(\Delta y)^2} \cdot (...) & \frac{\alpha_x}{(\Delta x)^2} \cdot (...) + \frac{\alpha_y}{(\Delta y)^2} \cdot (...) & \dots & -2 \cdot \left(\frac{\alpha_x}{(\Delta x)^2} \cdot (...) + \frac{\alpha_y}{(\Delta y)^2} \cdot (...) \right) - h \cdot \frac{2 \cdot \alpha_z}{\Delta z \cdot k_z} \end{bmatrix}$$

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{2 \cdot \alpha_z}{\Delta z \cdot k_z} & \frac{2 \cdot \alpha_z}{\Delta z \cdot k_z} \cdot h & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2 \cdot \alpha_z}{\Delta z \cdot k_z} & \frac{2 \cdot \alpha_z}{\Delta z \cdot k_z} \cdot h & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{2 \cdot \alpha_z}{\Delta z \cdot k_z} & \frac{2 \cdot \alpha_z}{\Delta z \cdot k_z} \cdot h \end{bmatrix}$$

$$\{u\} = \begin{bmatrix} \sum_{r=1}^{21} F_{r,n1} \cdot \dot{Q} \\ T_{amb} \\ \sum_{r=1}^{21} F_{r,n2} \cdot \dot{Q} \\ T_{amb} \\ \vdots \\ \sum_{r=1}^{21} F_{r,nN} \cdot \dot{Q} \\ T_{amb} \end{bmatrix}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Nas representações matriciais anteriores, a indicação (...) significa que o termo em causa depende da malha de nós considerada e tem a ver com a configuração dos nós e a consideração ou não das condições de fronteira (4.5a) e (4.5b).

Os termos da diagonal principal da matriz **A** estão definidos para uma malha de nós de temperatura tridimensional, que é o caso verificado ao considerar que existe apenas um nó de temperatura na direção do eixo z.

5 Implementação dos controladores propostos

Ao longo deste capítulo serão descritos os procedimentos de implementação dos controladores propostos e todas as evoluções e problemas que surgiram ao longo dos mesmos. Serão também apresentados alguns resultados que permitem uma comparação entre as várias soluções. Os controladores desenvolvidos e implementados foram três controladores proporcionais e, posteriormente, três controladores proporcionais e integrais.

A solução escolhida para o controlo de temperatura do forno de aquecimento, assunto abordado no capítulo 3, foi a implementação de três controladores PID independentes, cada um controlando o funcionamento de um par de filas de resistências cerâmicas. Os resultados relativos à implementação da solução final são brevemente analisados no final deste capítulo e analisados em detalhe no capítulo 6.

5.1 Procedimentos de implementação

Conforme referido no capítulo 2, o funcionamento das resistências cerâmicas é determinado pela atuação ou não dos relés de estado sólido implementados no forno de aquecimento. Estes relés apresentam um comportamento discreto, isto é, ou estão atuados ou não estão atuados, conseguindo apenas definir se as resistências estão ligadas ou desligadas. Assim, não permitem um controlo das resistências com ações de controlo contínuas. No entanto, a solução a implementar envolve ações de controlo contínuas.

Para resolver este problema, recorreu-se ao método *pulse-width modulation* (PWM). Este método é utilizado para modular a duração de um sinal, controlando por sua vez a energia fornecida a um dispositivo. O controlo desta energia é conseguido alternando rapidamente as fases liga/desliga de um dispositivo de comando, fornecendo um valor médio de energia ao dispositivo de atuação. Este ciclo de trabalho é expresso como uma percentagem do período de atuação em que o dispositivo se encontra ligado - *duty cycle* (DC), (Vasca e Iannelli, 2012).

Na Figura 5-1 encontra-se representado um diagrama de blocos com três controladores genéricos e com três conversores de sinais discretos para PWM. Definiu-se como frequência de atuação dos PWM implementados um valor de 1 [Hz].

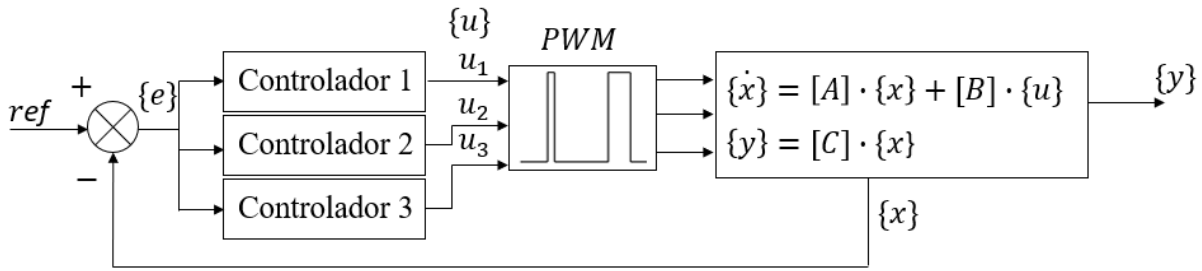


Figura 5-1 – Controladores genéricos e PWM

Cada uma das ações de controle de cada um dos três controladores permite obter um valor de *duty cycle* diferente. Cada valor de *duty cycle* obtido, define o ciclo de atuação do respectivo relé de estado sólido, que por sua vez liga e desliga o par de filas de resistências cerâmicas associado a esse mesmo controlador.

Assim, através desta representação e formulação, é possível determinar um funcionamento distinto para cada um dos pares de filas de resistências que é possível controlar com o *hardware* disponível.

O *duty cycle* de atuação dos relés de estado sólido é representado como uma percentagem do período de atuação. Deste modo, as ações de controle têm também que vir sob a forma de uma percentagem.

Para além da introdução de um PWM, introduziu-se um bloco de saturação da ação de controle. Este bloco tem como função limitar o valor das ações de controle entre 0-100 %. Esta limitação das ações de controle é devido ao facto de o *duty cycle* também só apresentar valores entre 0 e 100 %. Isto é, se a ação de controle for superior a 100% então o *duty cycle* é 100% e as resistências cerâmicas encontram-se permanentemente ligadas. Se a ação de controle apresentar um valor entre 0% e 100%, o *duty cycle* de atuação das resistências apresenta o mesmo valor que a ação de controle. Por fim, se a ação de controle for inferior a 0%, o *duty cycle* é 0% e as resistências permanecem desligadas. A potência nominal das resistências cerâmicas é de 1000 W, logo com esta modulação define-se implicitamente um ganho entre a ação de controle e a potência das resistências cerâmicas de $10 \left[\frac{W}{\%} \right]$.

Na Figura 5-2 encontram-se representados os três controladores genéricos, os PWM e o bloco de saturação.

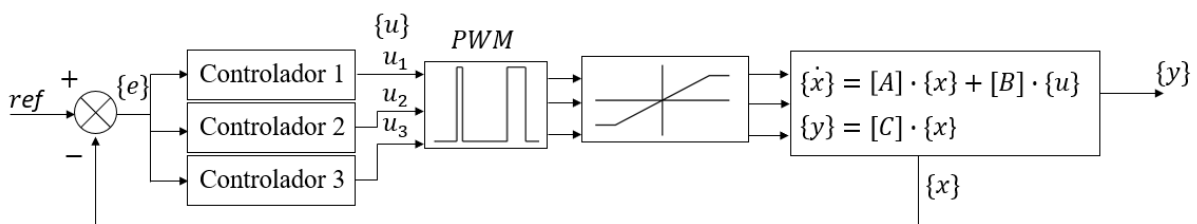


Figura 5-2 – Diagrama de blocos: controladores genéricos, PWM e bloco de saturação

Cada controlador tem em conta um valor de temperatura atual da amostra. Assim, o valor de temperatura utilizado para calcular o erro de temperatura para cada controlador, é um valor médio de temperatura. Como os três controladores comandam a atuação das resistências por filas, considera-se a média das temperaturas por fila da malha de nós definida.

Considere-se uma amostra de dimensões 0.59 x 0.167 x 0.00014 m e a malha de nós de temperatura representada na Figura 5-3.

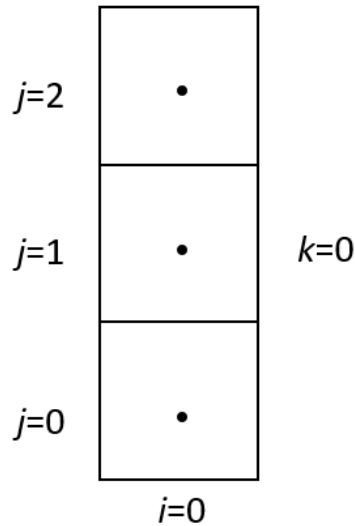


Figura 5-3 - Malha de nós de temperatura (1x3x1)

Neste caso, como a malha de nós de temperatura considerada é constituída por três nós numa só coluna, a média de temperaturas por fila é igual ao valor de temperatura em cada nó. Assim, para calcular o erro de temperatura, os controladores 1, 2 e 3 baseiam-se, respetivamente, na temperatura do nó $n_{0,0,0}$, $n_{0,1,0}$ e $n_{0,2,0}$.

Considere-se uma outra amostra, de dimensões 0.55 x 0.32 x 0.00014 m e a malha de nós de temperatura representada na Figura 5-4.

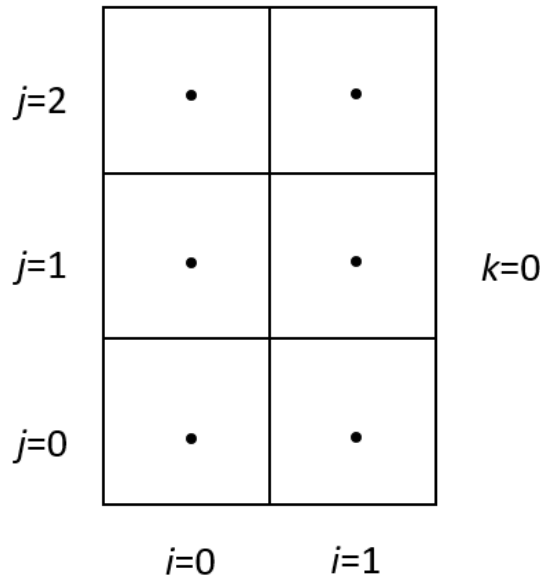


Figura 5-4 - Malha de nós de temperatura (2x3x1)

Neste caso, a malha de nós de temperatura é constituída por seis nós distribuídos por duas colunas. Assim, os controladores 1, 2 e 3 têm em conta, respetivamente, os valores médios de temperatura por fila \tilde{T}_1 , \tilde{T}_2 e \tilde{T}_3 . Estes valores são calculados através das equações (5.1a), (5.1b) e (5.1c).

$$\tilde{T}_1 = (T_{0,0,0} + T_{1,0,0}) \cdot 0.5 \quad (5.1a)$$

$$\tilde{T}_2 = (T_{0,1,0} + T_{1,1,0}) \cdot 0.5 \quad (5.1b)$$

$$\tilde{T}_3 = (T_{0,2,0} + T_{1,2,0}) \cdot 0.5 \quad (5.1c)$$

Nas próximas secções serão analisados os procedimentos de implementação de cada um dos tipos de controladores analisados bem como apresentados os resultados obtidos, que foram ao encontro do que se previu no capítulo 3.

5.2 Controladores proporcionais

Numa primeira fase, procedeu-se à implementação de três controladores proporcionais, cada um controlando um par de filas de resistências. Como estes controladores diferem apenas no ganho proporcional, optou-se por representar estes ganhos sob a forma de uma matriz de ganhos K_p . O diagrama de blocos deste sistema de controlo encontra-se representado na Figura 5-5.

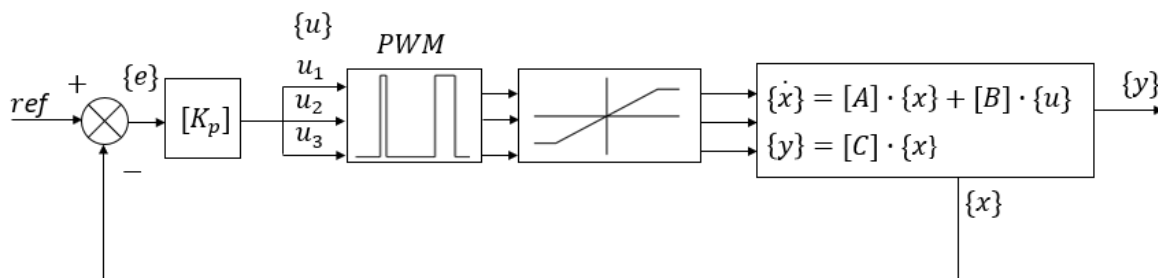


Figura 5-5 - Diagrama de blocos: Controladores proporcionais implementados

Após implementação dos controladores no forno de aquecimento, procedeu-se à realização de ensaios experimentais onde foram ajustados os valores dos ganhos proporcionais de cada controlador, de forma a obter-se uma evolução de temperatura o mais próximo possível do pretendido. Na Figura 5-6, encontra-se representada a evolução da temperatura no aquecimento de uma amostra, com dimensões 0.59 x 0.167 x 0.00014 m, até 100 °C. A malha de nós considerada para esta amostra encontra-se representada na Figura 5-3. Assim, no gráfico da Figura 5-6 as curvas denominadas por “Sensor 1”, “Sensor 4” e “Sensor 8”, representam, respetivamente, a temperatura nos nós $n_{0,0,0}$, $n_{0,1,0}$ e $n_{0,2,0}$.

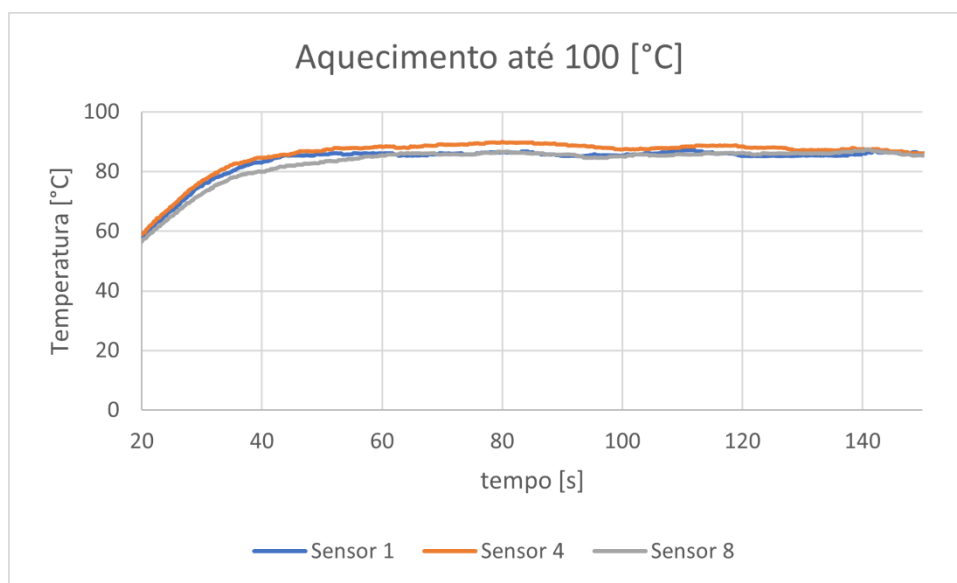


Figura 5-6 - Aquecimento até 100 °C – Controladores proporcionais

A matriz K_p utilizada para implementar este sistema de controlo, ajustada experimentalmente, é:

$$[K_p] = \begin{bmatrix} K_{p1} & 0 & 0 \\ 0 & K_{p2} & 0 \\ 0 & 0 & K_{p3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.0 & 0 & 0 \\ 0 & 2.0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0 \end{bmatrix}$$

Como se pode observar pelo gráfico da Figura 5-6, os controladores proporcionais permitem obter uma evolução de temperatura homogénea ao longo da amostra a aquecer. No entanto, a temperatura de estabilização da amostra foi inferior ao valor desejado, verificando-se uma

diferença de aproximadamente 15 °C. Este problema verificou-se para as várias temperaturas de interesse.

5.3 Controladores proporcionais e integrativos

De forma a tentar eliminar o problema referido anteriormente, procedeu-se à implementação de três controladores proporcionais e integrativos, introduzindo um ganho integral que é diretamente proporcional às integrais dos erros de temperatura. Este ganho é igual para os três controladores e a sua introdução permite resolver o problema que ocorria no caso anterior, no qual em regime permanente, a temperatura estabilizava abaixo do valor pretendido. O diagrama de blocos representativo deste sistema de controlo encontra-se representado na Figura 5-7.

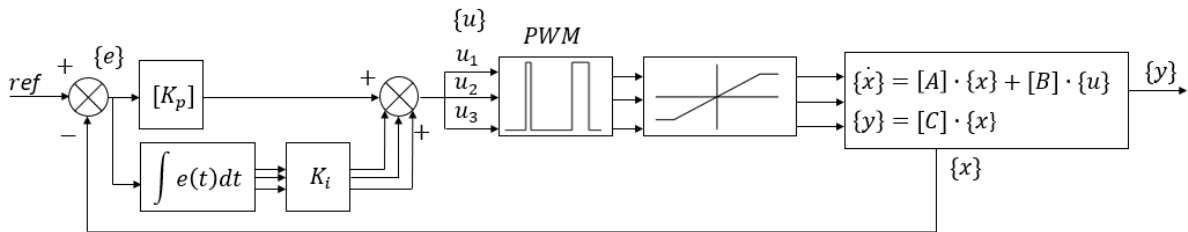


Figura 5-7 - Diagrama de blocos: controladores proporcionais e integrativos implementados

Os procedimentos de implementação deste sistema de controlo são idênticos ao caso anterior, tendo sido utilizada a mesma amostra e considerada a mesma malha de nós de temperatura. Na Figura 5-8, encontra-se representada a evolução da temperatura no aquecimento da amostra até 100 °C.

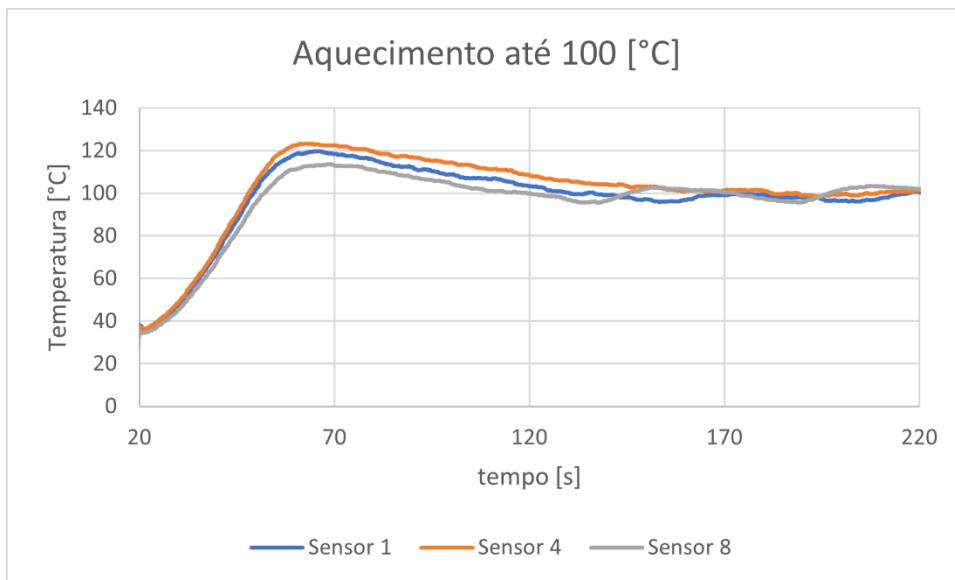


Figura 5-8 - Aquecimento até 100 °C - Controladores proporcionais e integrativos

A matriz K_p utilizada para definir este controlador e o ganho integral, novamente ajustados experimentalmente, apresentam os seguintes valores:

$$[K_p] = \begin{bmatrix} K_{p1} & 0 & 0 \\ 0 & K_{p2} & 0 \\ 0 & 0 & K_{p3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.0 & 0 & 0 \\ 0 & 2.0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0 \end{bmatrix}$$

$$K_i = 45$$

Como se pode observar no gráfico da Figura 5-8, a ação integral permitiu efetivamente a eliminação do erro de temperatura em regime permanente. Isto é, a temperatura estabiliza em torno do valor pretendido. Pode-se afirmar que a introdução da ação integral nos controladores proporcionais introduziu uma melhoria no processo de aquecimento, nomeadamente, na temperatura de estabilização da amostra.

No entanto, a introdução de uma ação integral também introduz um zero no sistema que conduz a um problema de *overshoot*. No aquecimento até 100 °C verificou-se um *overshoot* de 23 °C. Assim, a introdução da ação integral, apesar de permitir cumprir o requisito da estabilização da temperatura da amostra no valor pretendido, não respeita o requisito de obter uma evolução de temperatura sem *overshoot*.

5.4 Controladores PID

Por fim, para diminuir ou até eliminar o *overshoot* que resulta da introdução da ação integral, introduziu-se uma ação derivativa proporcional à taxa de variação do erro. Esta ação derivativa reage à tendência do erro, antecipando a sua evolução e diminuindo o *overshoot*. Os ganhos integral e derivativo são semelhantes para os três controladores PID. O diagrama de blocos representativo deste sistema de controlo encontra-se representado na Figura 5-9.

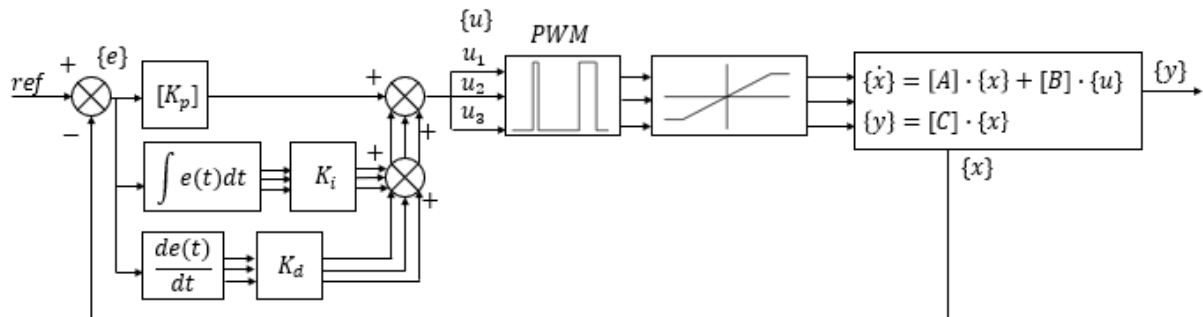


Figura 5-9 – Diagrama de blocos: Controladores PID implementados

Os procedimentos de implementação deste sistema de controlo são idênticos aos casos anteriores, tendo sido utilizada a mesma amostra e considerada a mesma malha de nós de temperatura. Na Figura 5-10, encontra-se representada a evolução da temperatura no aquecimento da amostra até 100 °C.

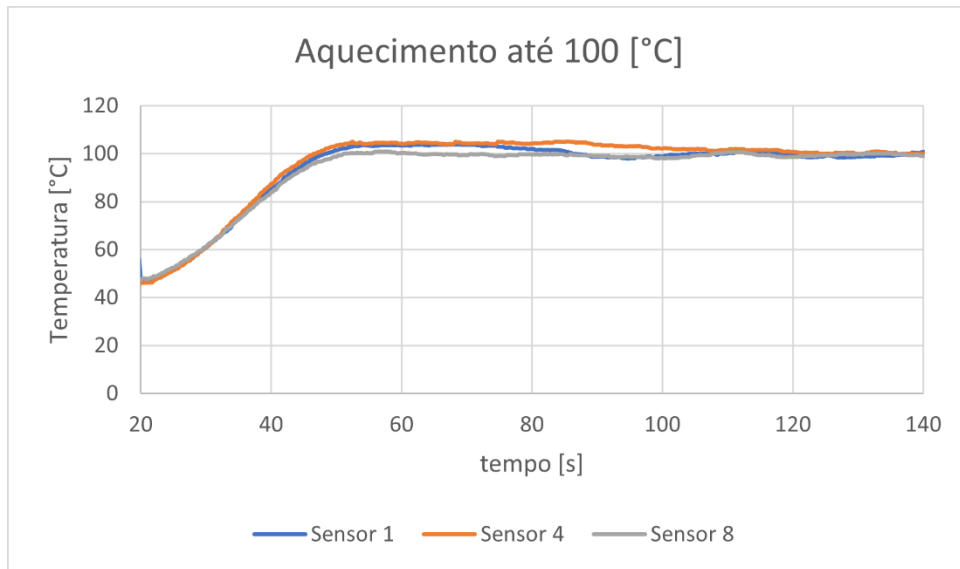


Figura 5-10 - Aquecimento até 100 °C – Controladores PID

A matriz K_p utilizada para definir estes controladores, o ganho integral e o ganho derivativo, novamente ajustados experimentalmente, apresentam os seguintes valores:

$$[K_p] = \begin{bmatrix} K_{p1} & 0 & 0 \\ 0 & K_{p2} & 0 \\ 0 & 0 & K_{p3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.0 & 0 & 0 \\ 0 & 2.0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0 \end{bmatrix}$$

$$K_i = 45$$

$$K_d = 52$$

Como se pode concluir pela análise do gráfico da Figura 5-10, a implementação de três controladores PID, permite cumprir com os requisitos de evolução de temperatura deste trabalho. Isto é, existe um aquecimento homogêneo da amostra, estabilização da temperatura em torno do valor pretendido e um valor de *overshoot* baixo, cerca de 5 °C neste caso.

Esta é a estratégia de controlo a implementar no forno. Os resultados experimentais para as várias temperaturas de interesse e procedimentos de ensaios experimentais serão analisados no capítulo 6.

6 Resultados experimentais

Ao longo deste capítulo são expostos e analisados os resultados obtidos durante as várias fases do trabalho.

Primeiramente, são analisados os dados e resultados obtidos relativos ao desenvolvimento e validação do modelo matemático do sistema.

Posteriormente, nas secções seguintes do capítulo, são apresentados e analisados os resultados obtidos com o controlador B, controlador implementado originalmente no forno, e com o controlador C, controladores PID desenvolvidos ao longo deste trabalho.

Por fim, é feita uma análise comparativa entre o controlador B e o controlador C, de modo a analisar as melhorias conseguidas no que diz respeito ao controlo de temperatura do forno.

6.1 Amostras utilizadas na validação do modelo

De seguida, são apresentadas as amostras utilizadas nos ensaios experimentais com o objetivo de validar o modelo desenvolvido no capítulo 4. A amostra 1 utilizada nos testes experimentais é uma amostra de fibra de carbono de dimensões $0.59 \times 0.167 \times 0.00014$ m, representada na Figura 6-1.

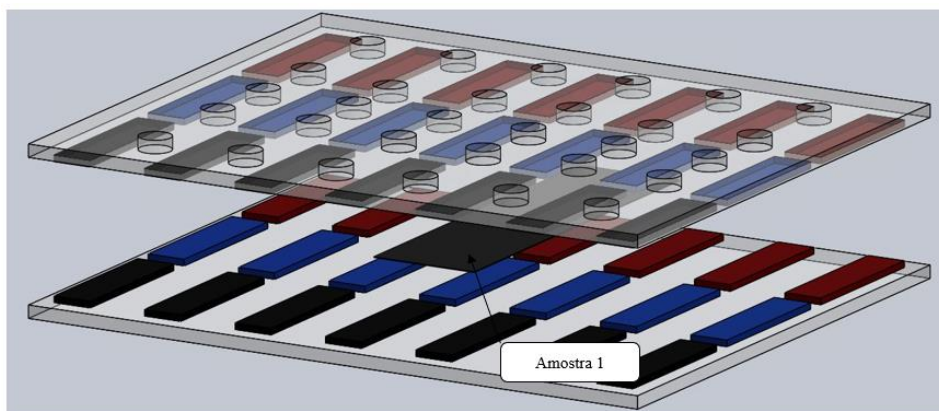


Figura 6-1 - Amostra 1 utilizada e o seu posicionamento relativamente às resistências cerâmicas

A amostra foi posicionada de modo que vários sensores óticos de temperatura consigam registar os valores de temperatura ao longo da mesma. Na Figura 6-2, representa-se uma vista inferior da zona de aquecimento onde é possível observar que os sensores 1,4 e 8 conseguem registar os valores de temperatura ao longo da amostra.

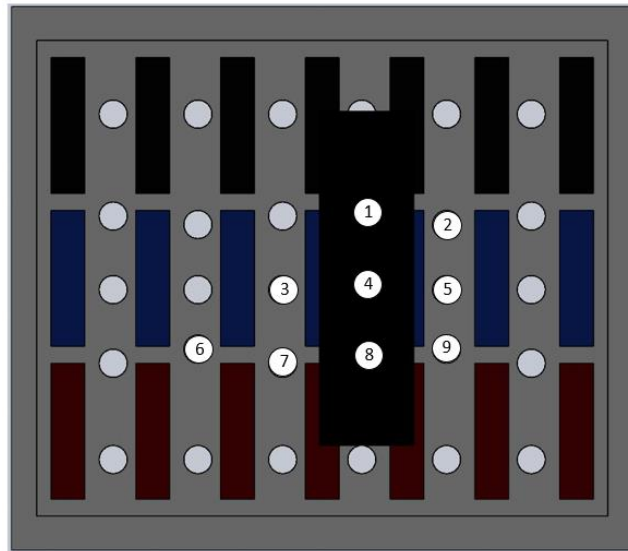


Figura 6-2 - Posicionamento da amostra 1 utilizada relativamente aos sensores óticos de temperatura

A amostra 2 utilizada nos testes experimentais é uma amostra de fibra de carbono de dimensões 0.55 x 0.32 x 0.00014 m, representada na Figura 6-3.

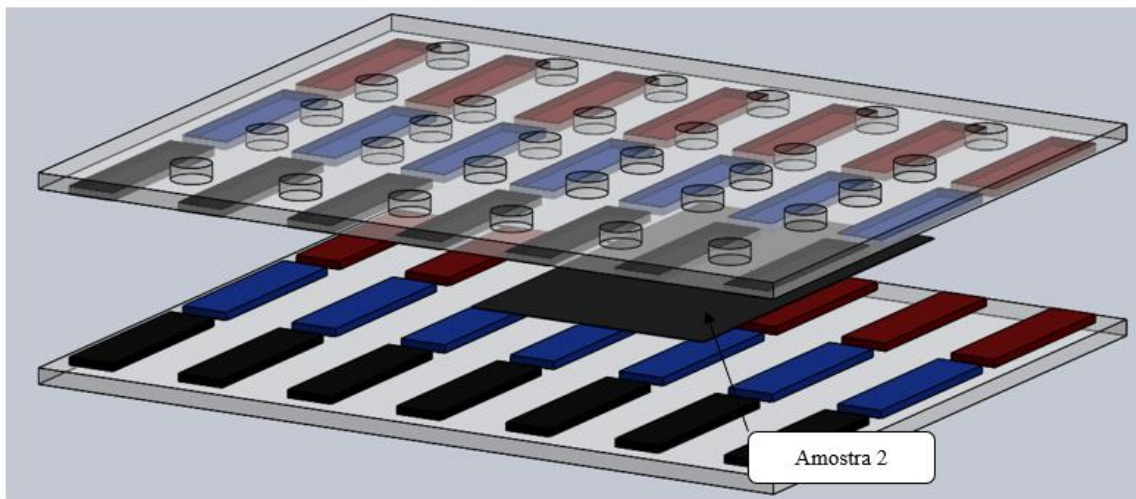


Figura 6-3 - Amostra 2 utilizada e o seu posicionamento relativamente às resistências cerâmicas

Esta amostra foi posicionada de modo a estar sob o raio de ação de 6 sensores de temperatura, sensores 1, 2, 4, 5, 8 e 9, pelo que se definiu uma malha de seis nós. O posicionamento da amostra 2 relativa aos sensores de temperatura utilizados pode ser observado na Figura 6-4.

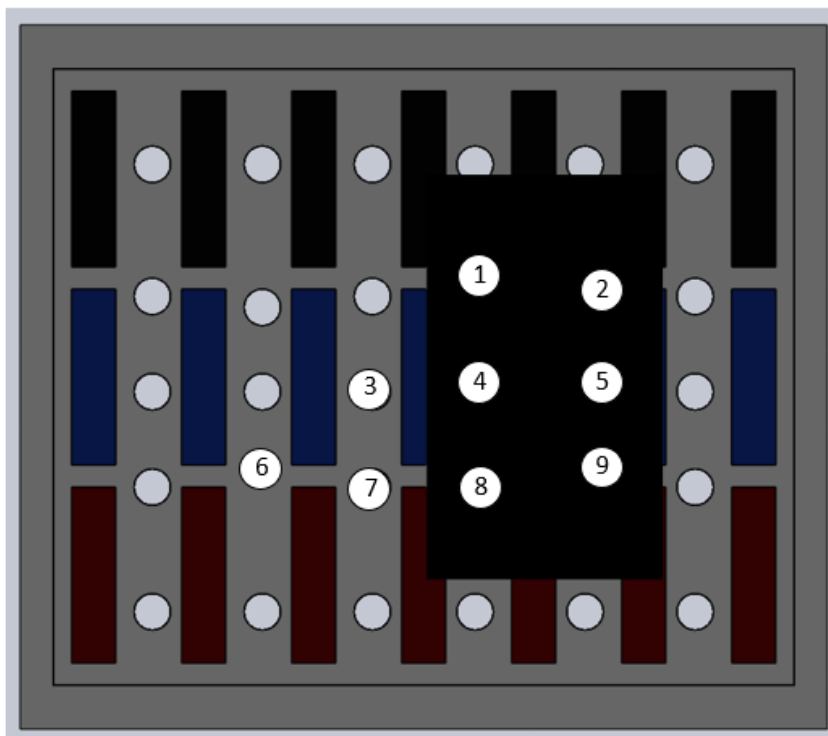


Figura 6-4 - Posicionamento da amostra 2 utilizada relativamente aos sensores óticos de temperatura

6.2 Equações no plano bidimensional

Relativamente à amostra 1, como tem um comprimento relativamente superior à sua largura e está sob o raio de ação de 3 sensores de temperatura, considerou-se uma malha de nós de temperatura, $n_{i,j,k}$, com 3 linhas, 1 coluna e apenas 1 fila de nós na direção do eixo z , devido à reduzida espessura. Esta configuração pode ser observada na Figura 6-5.

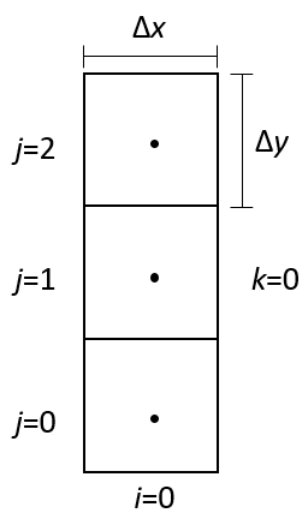


Figura 6-5 - Malha de nós considerada (amostra 1)

No caso da malha de nós considerada na Figura 6-5, constituída por nós que representam as hipóteses **J**, **K** e **L** (Figura 4-3), a aplicação da equação (4.3) resulta nas equações (6.1a), (6.1b) e (6.1c). Estas equações e o resultado da aplicação das condições de fronteira consideradas para cada hipótese de condição fronteira (C.F.) encontram-se representadas na Tabela 6-1.

Tabela 6-1 - Aplicação da equação (4.3) aos nós considerados na Figura 6-5

Hipótese	C.F.	Aplicação da equação (4.3)	Eq.
J	$T_{i,j-1,k}$ $= T_{i,j+1,k}$	$\frac{dT_{i,j,k}}{dt} = \frac{\alpha_y}{(\Delta y)^2} \cdot (2 \cdot T_{i,j+1,k} - 2 \cdot T_{i,j,k})$	(6.1a)
K	-----	$\frac{dT_{i,j,k}}{dt} = \frac{\alpha_y}{(\Delta y)^2} \cdot (T_{i,j-1,k} + T_{i,j+1,k} - 2 \cdot T_{i,j,k})$	(6.1b)
L	$T_{i,j+1,k}$ $= T_{i,j-1,k}$	$\frac{dT_{i,j,k}}{dt} = \frac{\alpha_y}{(\Delta y)^2} \cdot (2 \cdot T_{i,j-1,k} - 2 \cdot T_{i,j,k})$	(6.1c)

Substituindo nas equações (6.1) os índices (*i, j, k*) obtêm-se as equações sob a forma de diferenças finitas de temperatura para os nós $n_{0,0,0}$, $n_{0,1,0}$ e $n_{0,2,0}$, equações (6.2).

$$\frac{dT_{0,0,0}}{dt} = \frac{\alpha_y}{(\Delta y)^2} \cdot (2 \cdot T_{0,1,0} - 2 \cdot T_{0,0,0}) \quad (6.2a)$$

$$\frac{dT_{0,1,0}}{dt} = \frac{\alpha_y}{(\Delta y)^2} \cdot (T_{0,0,0} + T_{0,2,0} - 2 \cdot T_{0,1,0}) \quad (6.2b)$$

$$\frac{dT_{0,2,0}}{dt} = \frac{\alpha_y}{(\Delta y)^2} \cdot (2 \cdot T_{0,1,0} - 2 \cdot T_{0,2,0}) \quad (6.2c)$$

No que diz respeito à amostra 2, como está sob o raio de ação de 6 sensores de temperatura, considerou-se uma malha de nós de temperatura, $n_{i,j,k}$, com 3 linhas, 2 coluna e apenas 1 fila de nós na direção do eixo *z*, devido à reduzida espessura. Esta configuração pode ser observada na Figura 6-6.

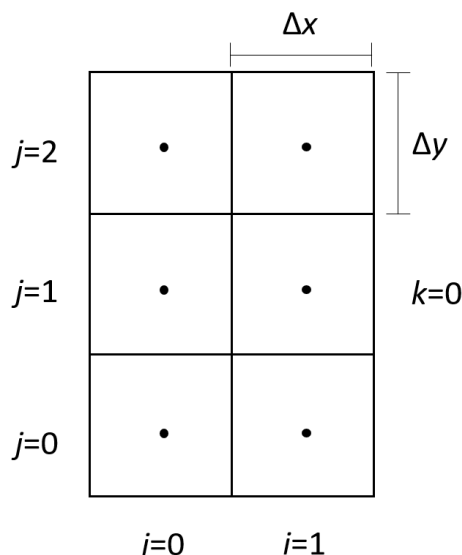


Figura 6-6 - Malha de nós considerada (amostra 2)

No caso da malha de nós considerada na Figura 6-6, constituída por nós que representam as hipóteses **A, C, D, F, G e I** (Figura 4-3), a aplicação da equação (4.3) resulta nas equações (6.3a), (6.3b), (6.3c), (6.3d), (6.3e) e (6.3f). Estas equações e o resultado da aplicação das

condições de fronteira consideradas para cada hipótese de condição fronteira (C.F.) encontram-se representadas na Tabela 6-2.

Tabela 6-2 - Aplicação da equação (4.3) aos nós considerados na Figura 6-6

Hipótese	C.F.	Aplicação da equação (4.3)	Eq.
A	$T_{i-1,j,k}$ $= T_{i+1,j,k}$ $T_{i,j-1,k}$ $= T_{i,j+1,k}$	$\frac{dT_{i,j,k}}{dt} = \frac{\alpha_x}{(\Delta x)^2} \cdot (2 \cdot T_{i+1,j,k} - 2 \cdot T_{i,j,k})$ $+ \frac{\alpha_y}{(\Delta y)^2} \cdot (2 \cdot T_{i,j+1,k} - 2 \cdot T_{i,j,k})$	(6.3a)
C	$T_{i+1,j,k}$ $= T_{i-1,j,k}$ $T_{i,j-1,k}$ $= T_{i,j+1,k}$	$\frac{dT_{i,j,k}}{dt} = \frac{\alpha_x}{(\Delta x)^2} \cdot (2 \cdot T_{i-1,j,k} - 2 \cdot T_{i,j,k})$ $+ \frac{\alpha_y}{(\Delta y)^2} \cdot (2 \cdot T_{i,j+1,k} - 2 \cdot T_{i,j,k})$	(6.3b)
D	$T_{i-1,j,k}$ $= T_{i+1,j,k}$	$\frac{dT_{i,j,k}}{dt} = \frac{\alpha_x}{(\Delta x)^2} \cdot (2 \cdot T_{i+1,j,k} - 2 \cdot T_{i,j,k})$ $+ \frac{\alpha_y}{(\Delta y)^2} \cdot (T_{i,j-1,k} + T_{i,j+1,k} - 2 \cdot T_{i,j,k})$	(6.3c)
F	$T_{i+1,j,k}$ $= T_{i-1,j,k}$	$\frac{dT_{i,j,k}}{dt} = \frac{\alpha_x}{(\Delta x)^2} \cdot (2 \cdot T_{i-1,j,k} - 2 \cdot T_{i,j,k})$ $+ \frac{\alpha_y}{(\Delta y)^2} \cdot (T_{i,j-1,k} + T_{i,j+1,k} - 2 \cdot T_{i,j,k})$	(6.3d)
G	$T_{i-1,j,k}$ $= T_{i+1,j,k}$ $T_{i,j+1,k}$ $= T_{i,j-1,k}$	$\frac{dT_{i,j,k}}{dt} = \frac{\alpha_x}{(\Delta x)^2} \cdot (2 \cdot T_{i+1,j,k} - 2 \cdot T_{i,j,k})$ $+ \frac{\alpha_y}{(\Delta y)^2} \cdot (2 \cdot T_{i,j-1,k} - 2 \cdot T_{i,j,k})$	(6.3e)
I	$T_{i+1,j,k}$ $= T_{i-1,j,k}$ $T_{i,j+1,k}$ $= T_{i,j-1,k}$	$\frac{dT_{i,j,k}}{dt} = \frac{\alpha_x}{(\Delta x)^2} \cdot (2 \cdot T_{i-1,j,k} - 2 \cdot T_{i,j,k})$ $+ \frac{\alpha_y}{(\Delta y)^2} \cdot (2 \cdot T_{i,j-1,k} - 2 \cdot T_{i,j,k})$	(6.3f)

Substituindo nas equações (6.3) os índices (i, j, k) obtêm-se as equações sob a forma de diferenças finitas de temperatura para os nós $n_{0,0,0}$, $n_{1,0,0}$, $n_{0,1,0}$, $n_{1,1,0}$, $n_{0,2,0}$, e $n_{1,2,0}$, equações (6.4).

$$\frac{dT_{0,0,0}}{dt} = \frac{\alpha_x}{(\Delta x)^2} \cdot (2 \cdot T_{1,0,0} - 2 \cdot T_{0,0,0}) + \frac{\alpha_y}{(\Delta y)^2} \cdot (2 \cdot T_{0,1,0} - 2 \cdot T_{0,0,0}) \quad (6.4a)$$

$$\frac{dT_{1,0,0}}{dt} = \frac{\alpha_x}{(\Delta x)^2} \cdot (2 \cdot T_{0,0,0} - 2 \cdot T_{1,0,0}) + \quad (6.4b)$$

$$\frac{\alpha_y}{(\Delta y)^2} \cdot (2 \cdot T_{1,1,0} - 2 \cdot T_{1,0,0})$$

$$\frac{dT_{0,1,0}}{dt} = \frac{\alpha_x}{(\Delta x)^2} \cdot (2 \cdot T_{1,1,0} - 2 \cdot T_{0,1,0}) + \frac{\alpha_y}{(\Delta y)^2} \cdot (T_{0,0,0} + T_{0,2,0} - 2 \cdot T_{0,1,0}) \quad (6.4c)$$

$$\frac{dT_{1,1,0}}{dt} = \frac{\alpha_x}{(\Delta x)^2} \cdot (2 \cdot T_{0,1,0} - 2 \cdot T_{1,1,0}) + \frac{\alpha_y}{(\Delta y)^2} \cdot (T_{1,0,0} + T_{1,2,0} - 2 \cdot T_{1,1,0}) \quad (6.4d)$$

$$\frac{dT_{0,2,0}}{dt} = \frac{\alpha_x}{(\Delta x)^2} \cdot (2 \cdot T_{1,2,0} - 2 \cdot T_{0,2,0}) + \frac{\alpha_y}{(\Delta y)^2} \cdot (2 \cdot T_{0,1,0} - 2 \cdot T_{0,2,0}) \quad (6.4e)$$

$$\frac{dT_{1,2,0}}{dt} = \frac{\alpha_x}{(\Delta x)^2} \cdot (2 \cdot T_{0,2,0} - 2 \cdot T_{1,2,0}) + \frac{\alpha_y}{(\Delta y)^2} \cdot (2 \cdot T_{1,1,0} - 2 \cdot T_{1,2,0}) \quad (6.4f)$$

6.3 Fator de visão de radiação

Como as 42 resistências cerâmicas se encontram igualmente divididas e posicionadas por cima e por baixo da zona de aquecimento, realizaram-se os cálculos dos fatores de visão para apenas 21 das mesmas, sendo para as restantes 21 são iguais. Estes cálculos foram realizados utilizando a equação (4.7) apresentada na secção 4.2.

De seguida, na Tabela 6-3, apresentam-se os valores dos fatores de visão, $F_{r,n}$, entre as resistências da zona superior de aquecimento e os nós de temperatura considerados no aquecimento da amostra 1.

Tabela 6-3 - Fatores de visão entre as resistências superiores/inferiores e os nós de temperatura considerados (amostra 1)

Resistência	Nó de temperatura		
	$n_{0,0,0}$	$n_{0,1,0}$	$n_{0,2,0}$
1	0.00134	0.00093	0.00049
2	0.00454	0.00249	0.00097
3	0.02441	0.00820	0.00187
4	0.18995	0.02763	0.00302
5	0.25730	0.03311	0.00321
6	0.04008	0.01120	0.00215
7	0.00646	0.00325	0.00114
15	0.00111	0.00138	0.00111
16	0.00332	0.00479	0.00332
17	0.01375	0.02692	0.01375
18	0.07126	0.22312	0.07126
19	0.09172	0.30436	0.09172
20	0.02053	0.04491	0.02053
21	0.00451	0.00686	0.00451
29	0.00049	0.00093	0.00134
30	0.00097	0.00249	0.00454
31	0.00187	0.00820	0.02441
32	0.00302	0.02763	0.18995
33	0.00321	0.03311	0.25730
34	0.00215	0.01120	0.04008
35	0.00114	0.00325	0.00646

De seguida, na Tabela 6-4, apresentam-se os valores dos fatores de visão, $F_{r,n}$, entre as resistências da zona superior de aquecimento e os nós de temperatura considerados no aquecimento da amostra 2.

Tabela 6-4 - Fatores de visão entre as resistências superiores/inferiores e os nós de temperatura considerados (amostra 2)

Resistência	Nó de temperatura					
	$n_{0,0,0}$	$n_{1,0,0}$	$n_{0,1,0}$	$n_{1,1,0}$	$n_{0,2,0}$	$n_{1,2,0}$
1	0.00121	0.00044	0.00084	0.00035	0.00047	0.00023
2	0.00408	0.00113	0.00226	0.00079	0.00093	0.00045
3	0.02171	0.00372	0.00740	0.00211	0.00184	0.00089
4	0.16585	0.01906	0.02430	0.00680	0.00301	0.00176
5	0.21342	0.14882	0.02810	0.02286	0.00317	0.00295
6	0.03219	0.22753	0.00949	0.02919	0.00207	0.00321
7	0.00540	0.03705	0.00280	0.01034	0.00107	0.00215
15	0.00104	0.00040	0.00126	0.00046	0.00104	0.00040
16	0.00318	0.00097	0.00440	0.00118	0.00318	0.00097
17	0.01366	0.00292	0.02498	0.00400	0.01366	0.00292
18	0.07462	0.01223	0.20849	0.02180	0.07462	0.01223
19	0.09264	0.06807	0.27053	0.18635	0.09264	0.06807
20	0.01902	0.09794	0.03770	0.28895	0.01902	0.09794
21	0.00408	0.02139	0.00588	0.04367	0.00408	0.02139
29	0.00047	0.00023	0.00084	0.00035	0.00121	0.00044
30	0.00093	0.00045	0.00226	0.00079	0.00408	0.00113
31	0.00184	0.00089	0.00740	0.00211	0.02171	0.00372
32	0.00301	0.00176	0.02430	0.00680	0.16585	0.01906
33	0.00317	0.00295	0.02810	0.02286	0.21342	0.14882
34	0.00207	0.00321	0.00949	0.02919	0.03219	0.22753
35	0.00107	0.00215	0.00280	0.01034	0.00540	0.03705

Calculando o somatório dos fatores de visão de todas as resistências para cada um dos nós, é possível obter uma aproximação da fração da potência calorífica que é fornecida pelas resistências a cada um dos nós. Os resultados relativos aos nós considerados para a amostra 1 e 2 encontram-se, respectivamente, na Tabela 6-5 e na Tabela 6-6.

Tabela 6-5 - Somatório dos fatores de visão entre as resistências e os nós considerados (amostra 1)

Nó de temperatura	$\sum_{r=1}^{21} F_{r,n}$
$n_{0,0,0}$	0.74312
$n_{0,1,0}$	0.78594
$n_{0,2,0}$	0.74312

Tabela 6-6 - Somatório dos fatores de visão entre as resistências e os nós considerados (amostra 2)

Nó de temperatura	$\sum_{r=1}^{21} F_{r,n}$
$n_{0,0,0}$	0.66463
$n_{1,0,0}$	0.65332
$n_{0,1,0}$	0.70361
$n_{1,1,0}$	0.69129
$n_{0,2,0}$	0.66463
$n_{1,2,0}$	0.65332

Como se pode observar nas Tabelas 6-5 e 6-6, os nós de temperatura laterais, apresentam os mesmos valores de somatório de fatores de visão, pois as amostras são simétricas e encontram-se centradas com as resistências. Para a amostra 1 os nós laterais são os nós $n_{0,0,0}$ e $n_{0,2,0}$ e ambos apresentam o valor de somatório de fator de visão de 0.74312. Na amostra 2, como é considerada uma malha de nós de temperatura com 2 colunas, existem dois pares de nós de temperatura que apresentam os mesmos valores de somatório de fator de visão. O primeiro par é formado pelos nós $n_{0,0,0}$ e $n_{0,2,0}$ que apresentam um somatório de fator de visão de 0.66463, e o segundo par é constituído pelos nós $n_{1,0,0}$ e $n_{1,2,0}$ com um valor de somatório de fator de visão de 0.65332.

Além disso, pode-se também concluir que, tal como esperado, estes nós de temperatura laterais recebem menos potência calorífica que os restantes nós que são os nós de temperatura mais centrais das amostras. Isto pode ser comprovado por valores inferiores dos somatórios de fator de visão e prova que, efetivamente, a zona central da amostra necessita de uma menor quantidade de calor que as zonas laterais, para atingir a mesma temperatura.

6.4 Potência das resistências

Para obter uma descrição do comportamento dinâmico das resistências cerâmicas realizou-se um teste experimental para medir a evolução de temperatura das mesmas ao longo do tempo. As 42 resistências cerâmicas existentes no forno de aquecimento são todas idênticas apresentando o mesmo comportamento. O teste experimental consistiu em ligar uma resistência cerâmica e através de um termopar registar a evolução de temperatura da mesma. A evolução verificada aproxima-se à de um sistema de primeira ordem, sendo que a constante de tempo e o ganho de regime permanente são os mesmos que permitem obter a evolução da potência calorífica fornecida (Almeida, 2019). Posteriormente, foram determinados os parâmetros que melhor permitem um ajuste da equação (4.10) aos resultados experimentais obtidos. Este ajuste foi conseguido através de um algoritmo de otimização que calcula os parâmetros ótimos que permitem obter uma evolução de temperatura aproximada o mais idêntica possível à evolução de temperatura medida.

No gráfico da Figura 6-7, apresenta-se a evolução de temperatura da resistência cerâmica na resposta ao degrau, isto é, quando a resistência foi ligada.

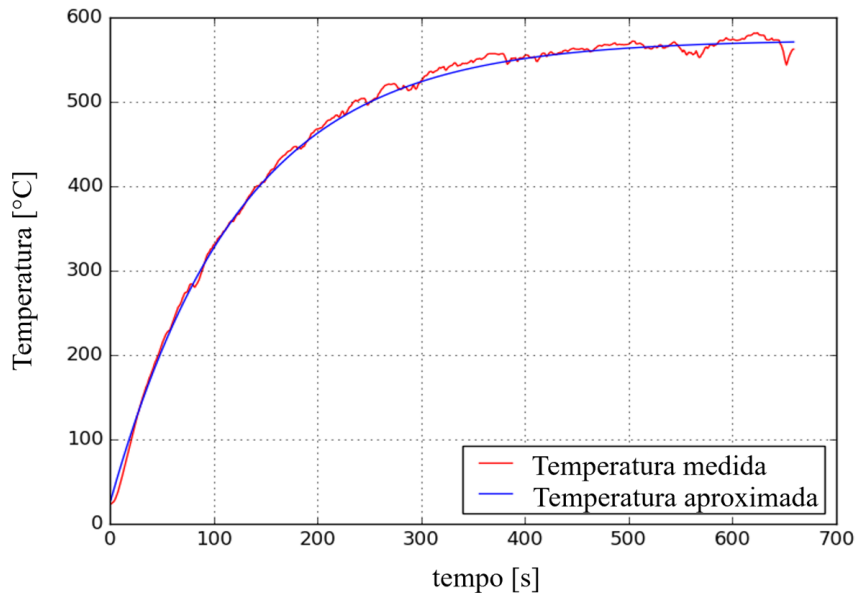


Figura 6-7 - Evolução da temperatura das resistências cerâmicas na resposta ao degrau

A equação que permite obter a evolução da potência calorífica das resistências encontra-se representada pela equação (6.5).

$$\dot{Q}_r = \left(1 - e^{-\frac{(t-t_0)}{113}}\right) \cdot 1000 \quad (6.5)$$

6.5 Propriedades do material

As propriedades da fibra de carbono utilizadas e as respectivas unidades encontram-se representadas na Tabela 6-7.

Tabela 6-7 - Propriedades da fibra de carbono

Propriedade	Símbolo	Valor	Unidades
Condutividade térmica (x)	k_x	0.18	$\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$
Condutividade térmica (y=z)	$k_{y,z}$	0.09	$\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$
Massa volúmica	ρ	1342.012	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
Calor específico	c_p	1650	$\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$
Coefficiente de perdas de calor	h_r	0.0048	$\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$

6.6 Equações no plano tridimensional e formulação em espaço de estados

Aplicando a equação geral do modelo (4.17) a cada um dos nós considerados para a amostra 1 e substituindo os resultados obtidos nas secções até agora descritas, obtêm-se as equações (6.6).

$$\begin{aligned} \frac{dT_{0,0,0}}{dt} \approx & -3.21 \cdot 10^{-5} \cdot T_{0,0,0} + \\ & + 2.1 \cdot 10^{-6} \cdot T_{0,1,0} + \\ & + 0.0065 \cdot (0.74369969 \cdot \dot{Q}_r + 0.0048 \cdot T_\infty) \end{aligned} \quad (6.6a)$$

$$\begin{aligned} \frac{dT_{0,1,0}}{dt} \approx & -3.21 \cdot 10^{-5} \cdot T_{0,1,0} + \\ & + 1.05 \cdot 10^{-6} \cdot (T_{0,0,0} + T_{0,2,0}) + \\ & + 0.0065 \cdot (0.78657168 \cdot \dot{Q}_r + 0.0048 \cdot T_\infty) \end{aligned} \quad (6.6b)$$

$$\begin{aligned} \frac{dT_{0,2,0}}{dt} \approx & -3.21 \cdot 10^{-5} \cdot T_{0,2,0} + \\ & + 2.1 \cdot 10^{-6} \cdot (T_{0,1,0}) + \\ & + 0.065 \cdot (0.74369969 \cdot \dot{Q}_r + 0.0048 \cdot T_\infty) \end{aligned} \quad (6.6c)$$

Através das equações (6.6) é possível obter a formulação em espaço de estados para a amostra 1. As matrizes **A**, **B** e **C** e o vetor **u** resultantes desta formulação, conforme referido no capítulo 4.4, encontram-se de seguida representadas.

$$[A] = \begin{bmatrix} -0.00003210 & 0.00000210 & 0.0 \\ 0.00000105 & -0.00003210 & 0.00000105 \\ 0.0 & 0.00000210 & -0.00003210 \end{bmatrix}$$

$$[B] = \begin{bmatrix} 0.00645 & 0.000031 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.00645 & 0.000031 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.00645 & 0.000031 \end{bmatrix}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\{u\} = \begin{bmatrix} 0.74369969 \cdot \dot{Q}_r \\ T_{amb} \\ 0.78657168 \cdot \dot{Q}_r \\ T_{amb} \\ 0.74369969 \cdot \dot{Q}_r \\ T_{amb} \end{bmatrix}$$

Relativamente à amostra 2, utilizando o mesmo procedimento acima descrito para a amostra 1, aplicando a equação geral do modelo (4.17) a cada um dos nós considerados e substituindo os resultados obtidos nas secções até agora descritas, obtêm-se as equações (6.7).

$$\begin{aligned} \frac{dT_{0,0,0}}{dt} = & 3.172 \cdot 10^{-6} \cdot (2 \cdot T_{1,0,0} - 2 \cdot T_{0,0,0}) + \\ & 1.208 \cdot 10^{-6} \cdot (2 \cdot T_{0,1,0} - 2 \cdot T_{0,0,0}) + \\ & 0.0065 \cdot (0.66463 \cdot \dot{Q}_r + 0.0048 \cdot T_\infty) \end{aligned} \quad (6.7a)$$

$$\begin{aligned} \frac{dT_{1,0,0}}{dt} = & 3.172 \cdot 10^{-6} \cdot (2 \cdot T_{0,0,0} - 2 \cdot T_{1,0,0}) + \\ & 1.208 \cdot 10^{-6} \cdot (2 \cdot T_{1,1,0} - 2 \cdot T_{1,0,0}) + \\ & 0.0065 \cdot (0.65332 \cdot \dot{Q}_r + 0.0048 \cdot T_\infty) \end{aligned} \quad (6.7b)$$

$$\begin{aligned} \frac{dT_{0,1,0}}{dt} = & 3.172 \cdot 10^{-6} \cdot (2 \cdot T_{1,1,0} - 2 \cdot T_{0,1,0}) + \\ & 1.208 \cdot 10^{-6} \cdot (T_{0,0,0} + T_{0,2,0} - 2 \cdot T_{0,1,0}) + \\ & 0.0065 \cdot (0.70361 \cdot \dot{Q}_r + 0.0048 \cdot T_\infty) \end{aligned} \quad (6.7c)$$

$$\begin{aligned} \frac{dT_{1,1,0}}{dt} = & 3.172 \cdot 10^{-6} \cdot (2 \cdot T_{0,1,0} - 2 \cdot T_{1,1,0}) + \\ & 1.365 \cdot 10^{-6} \cdot (T_{1,0,0} + T_{1,2,0} - 2 \cdot T_{1,1,0}) + \\ & 0.0065 \cdot (0.69129 \cdot \dot{Q}_r + 0.0048 \cdot T_\infty) \end{aligned} \quad (6.7d)$$

$$\begin{aligned} \frac{dT_{0,2,0}}{dt} = & 3.172 \cdot 10^{-6} \cdot (2 \cdot T_{1,2,0} - 2 \cdot T_{0,2,0}) + \\ & 1.208 \cdot 10^{-6} \cdot (2 \cdot T_{0,1,0} - 2 \cdot T_{0,2,0}) + \\ & 0.0065 \cdot (0.66463 \cdot \dot{Q}_r + 0.0048 \cdot T_\infty) \end{aligned} \quad (6.7e)$$

$$\begin{aligned} \frac{dT_{1,2,0}}{dt} = & 3.172 \cdot 10^{-6} \cdot (2 \cdot T_{0,2,0} - 2 \cdot T_{1,2,0}) + \\ & 1.208 \cdot 10^{-6} \cdot (2 \cdot T_{1,1,0} - 2 \cdot T_{1,2,0}) + \\ & 0.0065 \cdot (0.65332 \cdot \dot{Q}_r + 0.0048 \cdot T_\infty) \end{aligned} \quad (6.7f)$$

Através das equações (6.7) é possível obter a formulação em espaço de estados para a amostra 2. As matrizes **A**, **B** e **C** e o vetor **u** resultantes desta formulação, conforme referido na secção 4.4, encontram-se de seguida representadas.

$$[A] = \begin{bmatrix} -0.00003877 & 0.00000635 & 0.00000242 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.00000635 & -0.00003877 & 0.0 & 0.00000242 & 0.0 & 0.0 \\ 0.00000121 & 0.0 & -0.00003877 & 0.00000635 & 0.00000121 & 0.0 \\ 0.0 & 0.00000121 & 0.00000635 & -0.00003877 & 0.0 & 0.00000121 \\ 0.0 & 0.0 & 0.00000242 & 0.0 & -0.00003877 & 0.00000635 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.00000242 & 0.00000635 & -0.00003877 \end{bmatrix}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\{u\} = \begin{bmatrix} 0.66463 \cdot \dot{Q}_r \\ T_{amb} \\ 0.65332 \cdot \dot{Q}_r \\ T_{amb} \\ 0.70361 \cdot \dot{Q}_r \\ T_{amb} \\ 0.69129 \cdot \dot{Q}_r \\ T_{amb} \\ 0.66463 \cdot \dot{Q}_r \\ T_{amb} \\ 0.65332 \cdot \dot{Q}_r \\ T_{amb} \end{bmatrix}$$

6.7 Validação do modelo

Por fim, realizou-se uma comparação entre a evolução de temperatura obtida através da simulação do modelo em *software Python* com os resultados experimentais reais obtidos.

Para avaliar a qualidade da simulação, utilizou-se a raiz do valor quadrático médio – *RMSE*. Esta métrica de erro é calculada através da equação (6.8) e definiu-se que para o modelo poder ser corretamente validado, o *RMSE* tem que ser inferior a 5 °C.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k (T_i^r - T_i^s)^2} \quad (6.8)$$

Na equação (6.8), k representa o número de instantes de medição da temperatura ao longo do ensaio experimental. T_i^r e T_i^s representam as temperaturas obtidas através do ensaio experimental e através da simulação para cada instante i do ensaio experimental, respetivamente. O aquecimento promovido através deste ensaio experimental foi conseguido ligando todas as resistências cerâmicas. Não foi possível atingir regime permanente pois, tal como observado na Figura 6-7, a temperatura de estabilização das resistências cerâmicas, aproximadamente 580 °C, é muito superior à temperatura de fusão do material compósito utilizado, cerca de 220 °C. Assim, até se atingir o regime permanente iria-se verificar a destruição das amostras invalidando os resultados experimentais obtidos. Deste modo, foram realizados diversos ensaios experimentais que consistiram em ligar todas as resistências até a amostra atingir uma determinada temperatura, inferior à temperatura de fusão do material utilizado. De seguida, é apresentado apenas um ensaio experimental para cada uma das amostras utilizadas, sendo que os restantes ensaios conduziram a resultados semelhantes.

Nos gráficos das Figuras 6-8 a 6-10 e nos gráficos das Figuras 6-11 a 6-16 é possível observar a comparação da evolução de temperatura real com a simulada para a amostra 1 e 2, respetivamente, bem como os valores de $RMSE$ obtidos.

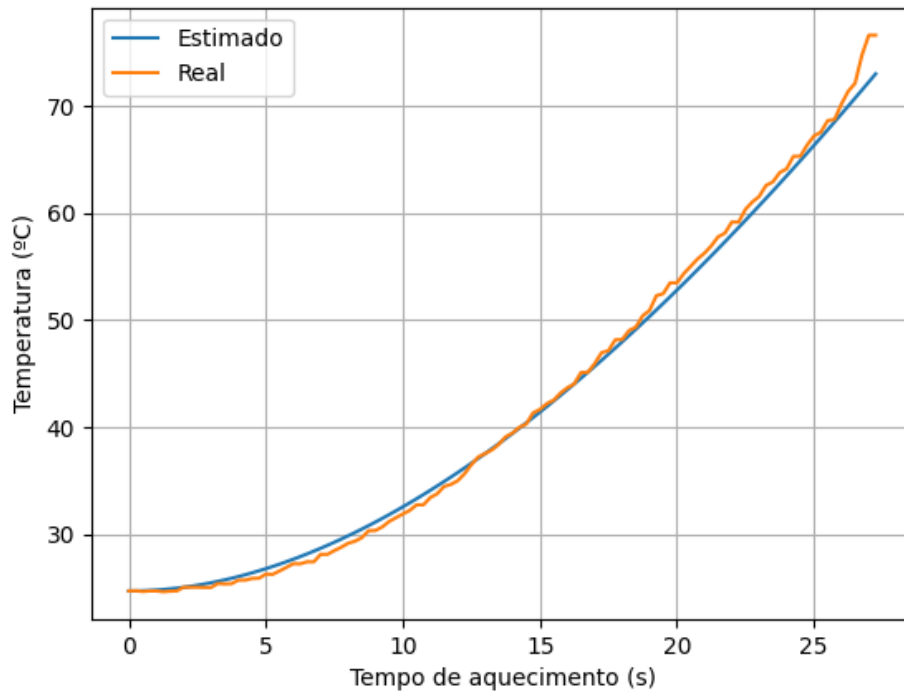


Figura 6-8- Evolução de temperatura do nó $n_{0,0,0}$ (amostra 1)

$$RMSE = 0.90 \text{ } ^\circ\text{C}$$

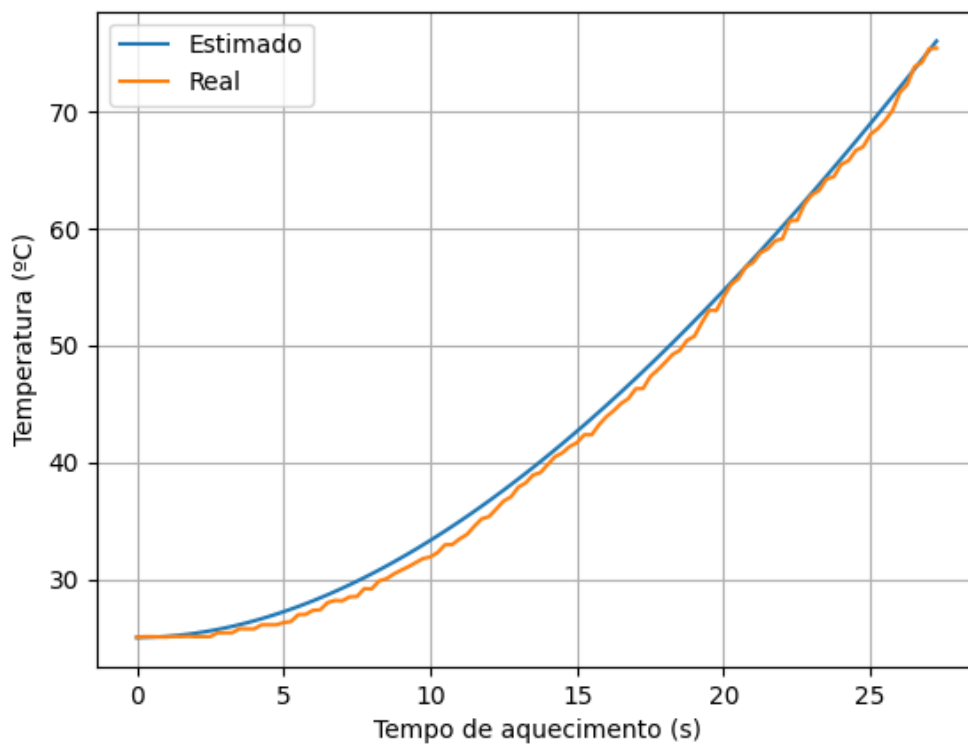


Figura 6-9 - Evolução de temperatura do nó $n_{0,1,0}$ (amostra 1)

$$RMSE = 0.88 \text{ } ^\circ\text{C}$$

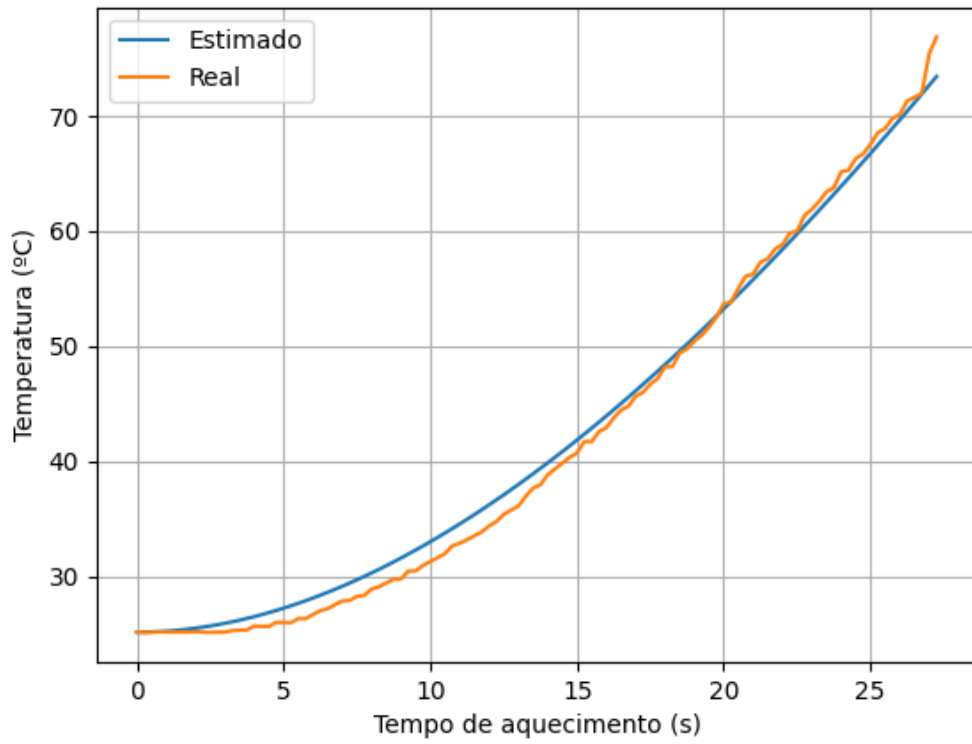


Figura 6-10 - Evolução de temperatura do nó $n_{0,2,0}$ (amostra 1)

$$RMSE = 1.15 \text{ } ^\circ\text{C}$$

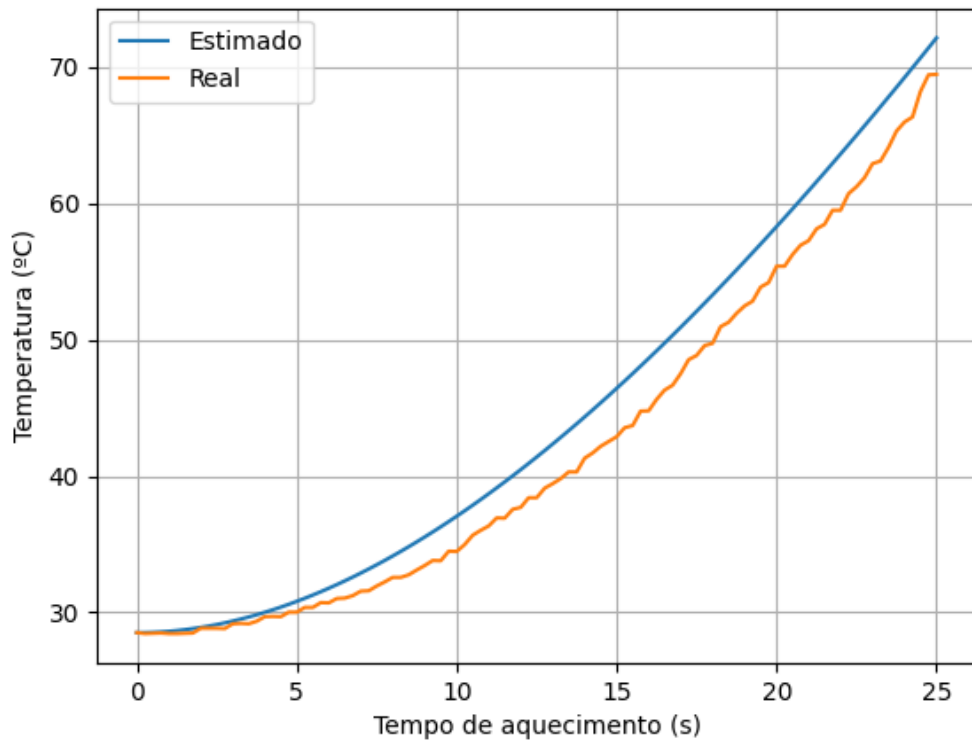


Figura 6-11 - Evolução de temperatura do nó $n_{0,0,0}$ (amostra 2)

$$RMSE = 2.61 \text{ } ^\circ\text{C}$$

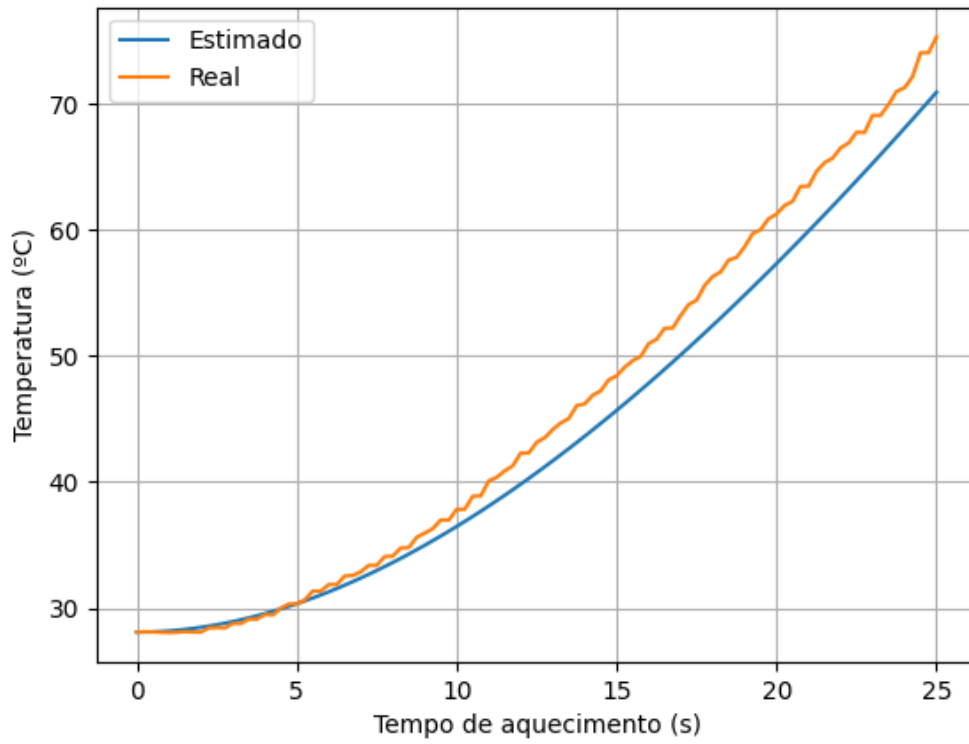


Figura 6-12 - Evolução de temperatura do nó $n_{1,0,0}$ (amostra 2)

$$RMSE = 2.53 \text{ } ^\circ\text{C}$$

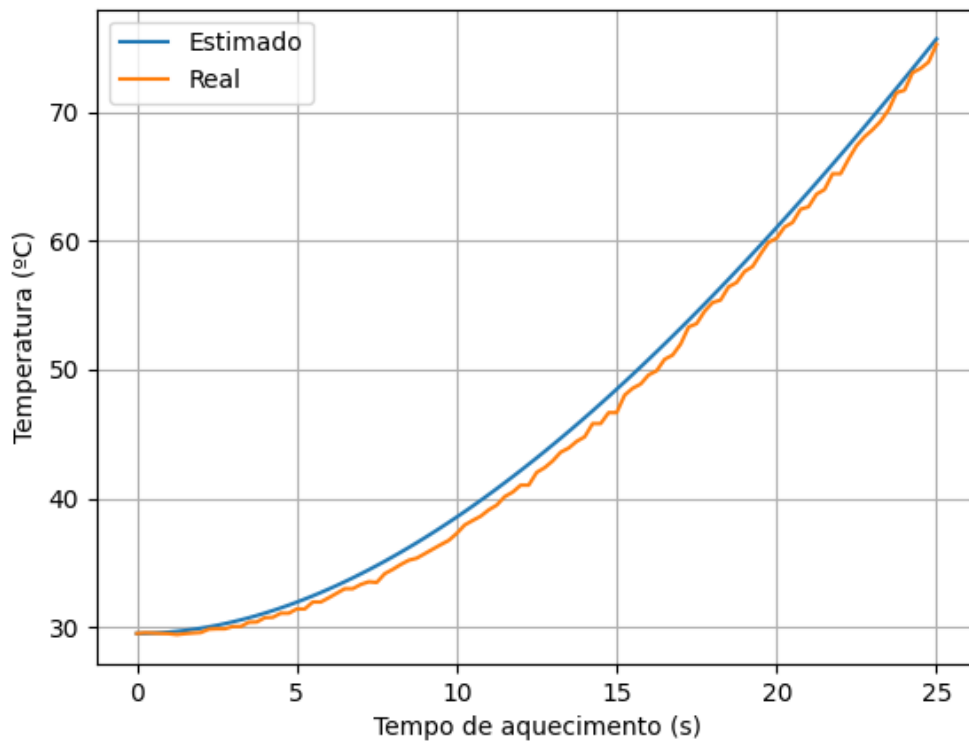


Figura 6-13 - Evolução de temperatura do nó $n_{0,1,0}$ (amostra 2)

$$RMSE = 0.95 \text{ } ^\circ\text{C}$$

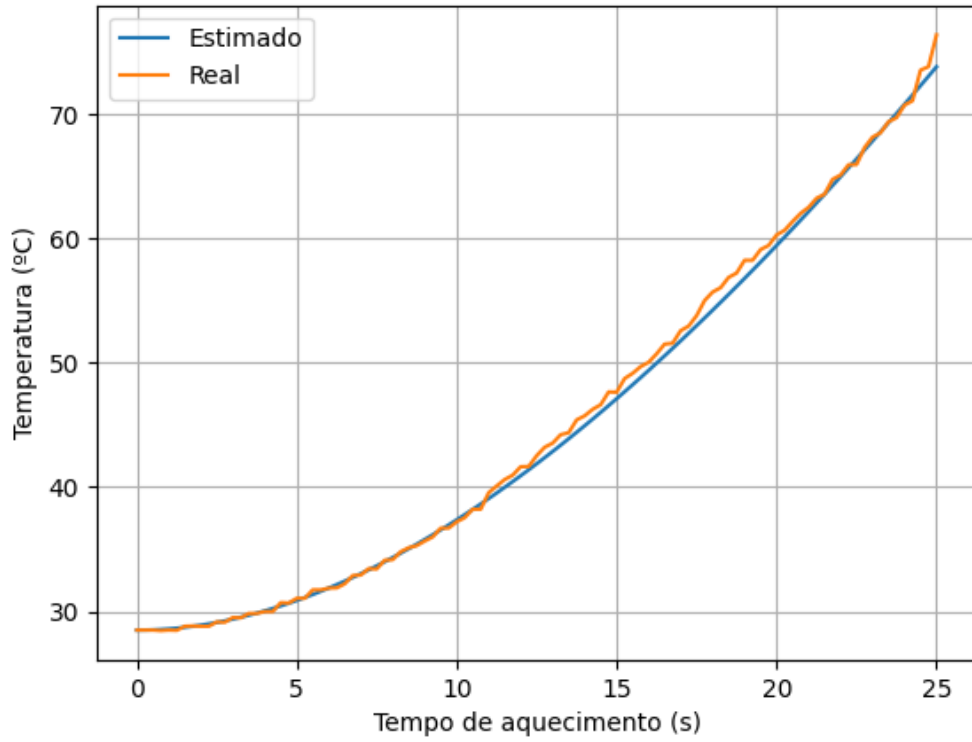


Figura 6-14 - Evolução de temperatura do nó $n_{1,1,0}$ (amostra 2)

$$RMSE = 0.63 \text{ } ^\circ\text{C}$$

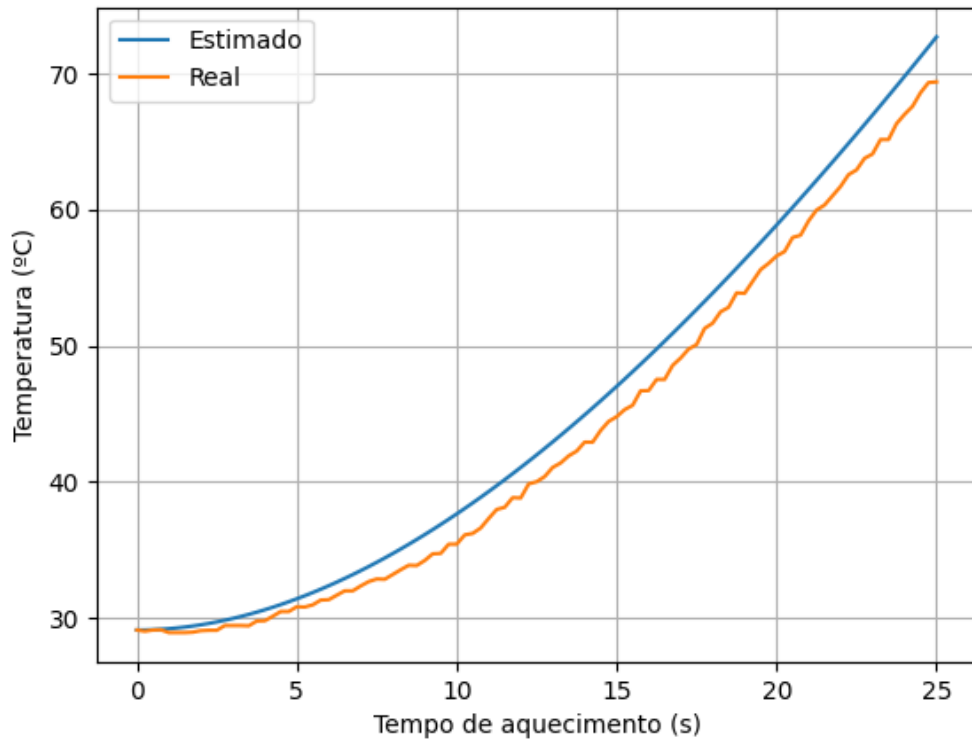


Figura 6-15 - Evolução de temperatura do nó $n_{0,2,0}$ (amostra 2)

$$RMSE = 1.93 \text{ } ^\circ\text{C}$$

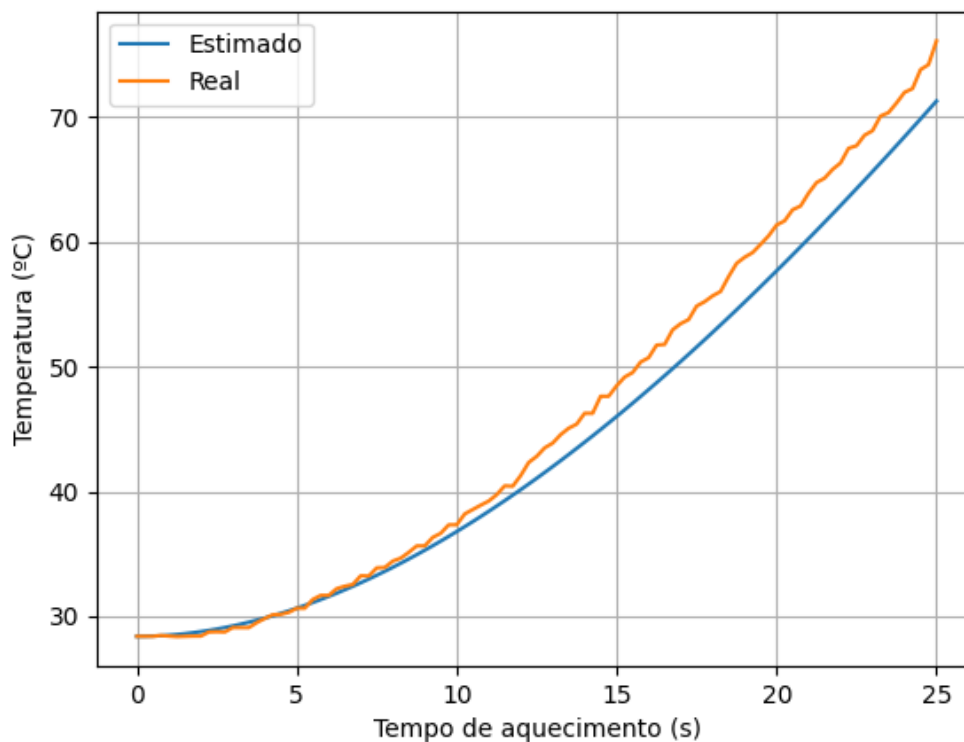


Figura 6-16 - Evolução de temperatura do nó $n_{1,2,0}$ (amostra 2)

$$RMSE = 2.26 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Por fim, pode-se concluir que o modelo do sistema do forno de aquecimento desenvolvido permite uma boa aproximação ao comportamento real. Realizando testes experimentais recorrendo a amostras com diferentes características foi possível obter evoluções de temperatura semelhantes através das equações e do modelo desenvolvido, dentro de uma gama de erro considerada aceitável.

Os desvios observados nos gráficos apresentados anteriormente, sobretudo na amostra 2 de maiores dimensões, podem ser justificados como um posicionamento imperfeito da amostra na zona de aquecimento. Isto é, os seis sensores utilizados no ensaio experimental não estavam perfeitamente alinhados com a zona da amostra onde se consideram os nós discretos de temperatura. Este alinhamento imperfeito dos sensores deve-se ao facto da estrutura onde os próprios se encontram não ser simétrica, isto é, como se pode observar na Figura 2-6, os sensores 2, 5 e 9, não se encontram totalmente alinhados com os sensores 1, 4 e 8. Ou seja, os sensores óticos de temperatura 2, 5 e 9 registaram valores de temperatura, em alguns casos, de zonas ligeiramente deslocadas daquelas que se consideraram como nós de referência.

No entanto, este problema não afeta os resultados pois as evoluções de temperatura simuladas e as obtidas experimentalmente encontram-se bastante próximas e dentro dos limites considerados aceitáveis.

6.8 Resultados obtidos - controlador B

Conforme referido no capítulo 2, durante o estudo sobre o estado inicial do sistema, realizaram-se testes experimentais para testar o controlador B e verificar a evolução de temperatura obtida.

Estes testes experimentais consistiram no aquecimento da amostra 1 utilizada na validação do modelo do sistema até várias temperaturas de interesse. Como o material utilizado apresenta uma temperatura de fusão de aproximadamente 220 °C, consideram-se como temperaturas de interesse valores entre 100 e 200 °C e com intervalos de temperatura de 20 °C.

A amostra 1 foi fixa através do sistema de fixação do sistema de modo que durante o aquecimento, os sensores de temperatura 1,4 e 8 estejam alinhados com a mesma (Figura 6-2).

A nível de procedimentos, para todas as temperaturas de interesse, define-se inicialmente a temperatura pretendida na interface HMI 1, o sensor responsável por registar esse valor de temperatura e através das botoneiras do quadro elétrico A controla-se o funcionamento do sistema.

Em todos os testes, como a amostra e o seu posicionamento não se alteraram, utilizou-se sempre o sensor 4 para registar o valor de temperatura pretendido.

Por fim, como o objetivo do trabalho é melhorar o processo de aquecimento no que toca à homogeneização do perfil de temperaturas na amostra, bem como respeitar um valor limite de *overshoot*, para cada ensaio experimental foram calculados parâmetros que permitem avaliar a qualidade do processo de aquecimento imposto pelo controlador. Estes parâmetros são o “*overshoot* [°C]” registado por cada sensor utilizado e a “diferença de temperatura média [°C]”, ao longo de todos os instantes do ensaio experimental, que representa a diferença de temperatura entre os vários sensores utilizados. Esta análise permitirá também uma fácil e rápida comparação entre os resultados obtidos com o controlador B (controlador implementado na UMEC) e o controlador C (controlador desenvolvido ao longo deste trabalho).

É de realçar que ao longo do trabalho e do desenvolvimento de um novo controlador de temperatura não se teve em conta o tempo de resposta. Efetivamente, o objetivo principal do trabalho é obter uma distribuição de temperaturas uniforme ao longo das amostras e sem que ocorra *overshoot*, independentemente da velocidade de resposta do sistema.

Deste modo, o tempo de resposta do processo de aquecimento é um parâmetro que em aplicações industriais tem bastante relevância, mas que para este caso não foi definido nenhum requisito quanto aos valores a atingir, não tendo sido utilizado como métrica de desempenho do sistema.

Tal como referido no capítulo 2, o controlador B, originalmente, promove um aquecimento da amostra até à temperatura pretendida e mal se atinge esse valor, esta é deslocada em direção à prensa. No entanto, nos ensaios realizados com este controlador, forçou-se a que a amostra a aquecer permaneça na zona de aquecimento durante 120 s, intervalo de tempo este posteriormente utilizado nos ensaios realizados com o controlador C, por forma a permitir uma fácil comparação entre ambos.

Nos gráficos das Figuras 6-17 a 6-22 e nas Tabelas 6-8 a 6-13, representam-se os resultados obtidos e os parâmetros de avaliação calculados, através dos ensaios realizados com o controlador B.

Os gráficos da evolução de temperatura iniciam em $t = 20$ s, instante que corresponde, aproximadamente, ao tempo que o *Blank Holder* demora a deslocar-se com a amostra desde a sua posição inicial até à zona de aquecimento.

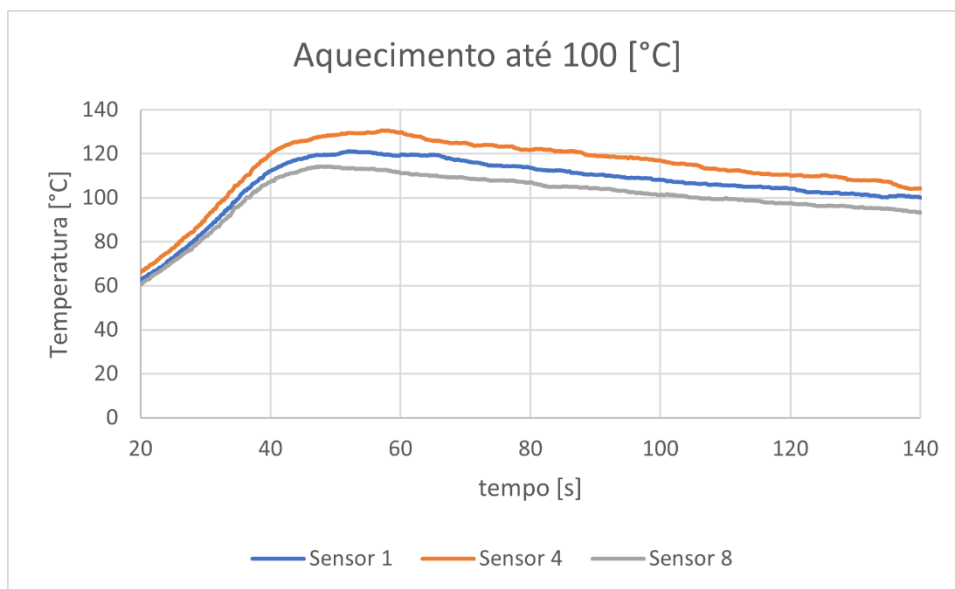


Figura 6-17 - Aquecimento até 100 °C (Controlador B)

Tabela 6-8 - Parâmetros de avaliação - aquecimento até 100 °C – controlador B

Diferença de T média [°C]			Overshoot máximo [°C]		
Sensor 1 e 4	Sensor 8 e 4	Sensor 1 e 8	Sensor 1	Sensor 4	Sensor 8
7.47	13.49	6.0	21.16	30.61	14.25

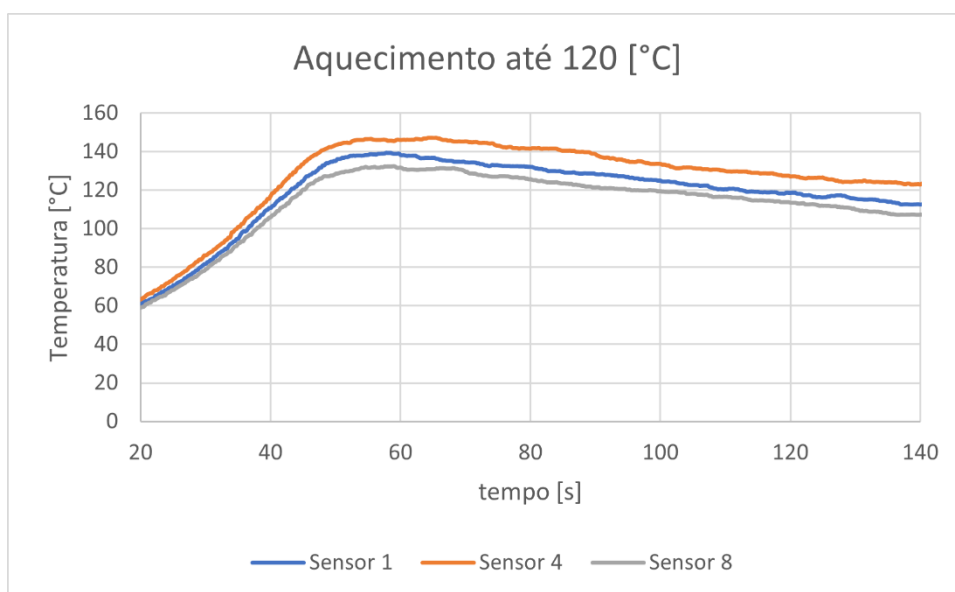


Figura 6-18 - Aquecimento até 120 °C (Controlador B)

Tabela 6-9 - Parâmetros de avaliação - aquecimento até 120 °C – controlador B

Diferença de T média [°C]			Overshoot máximo [°C]		
Sensor 1 e 4	Sensor 8 e 4	Sensor 1 e 8	Sensor 1	Sensor 4	Sensor 8
8.47	13.56	5.1	19.33	27.25	12.41

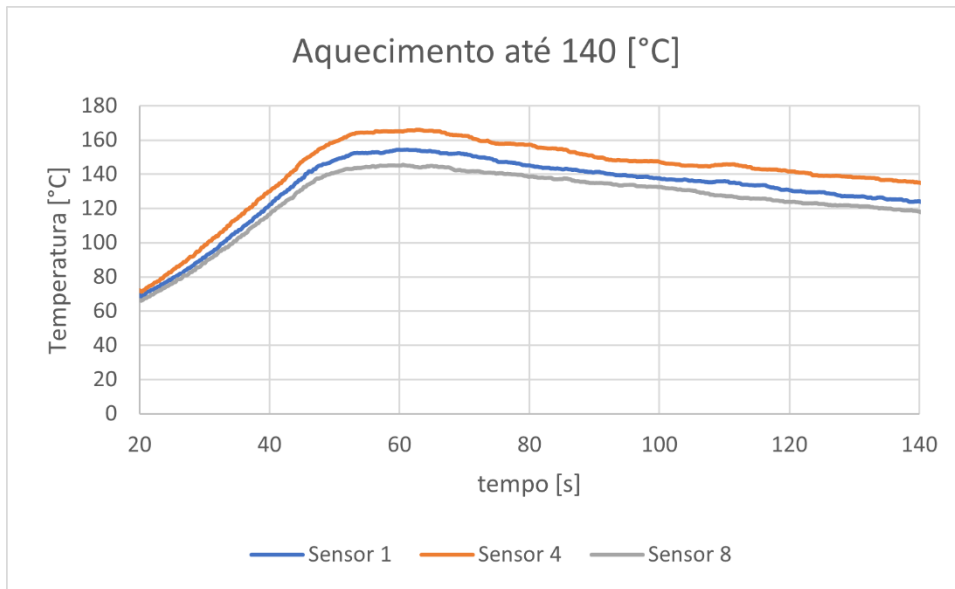


Figura 6-19 - Aquecimento até 140 °C (Controlador B)

Tabela 6-10 - Parâmetros de avaliação - aquecimento até 140 °C – controlador B

Diferença de T média [°C]			Overshoot máximo [°C]		
Sensor 1 e 4	Sensor 8 e 4	Sensor 1 e 8	Sensor 1	Sensor 4	Sensor 8
9.59	16.08	6.49	14.42	25.91	5.42

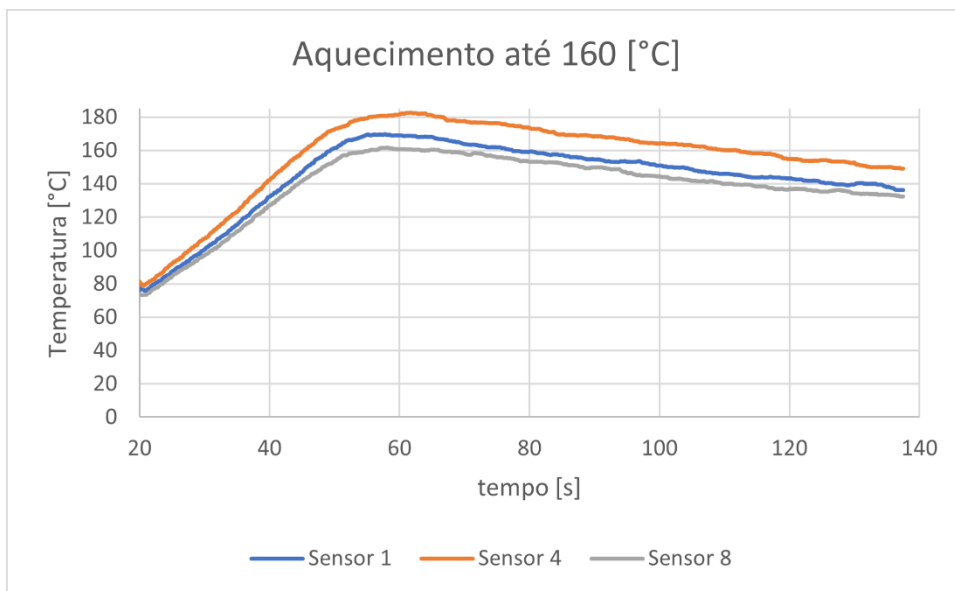


Figura 6-20 - Aquecimento até 160 °C (Controlador B)

Tabela 6-11 - Parâmetros de avaliação - aquecimento até 160 °C – controlador B

Diferença de T média [°C]			Overshoot máximo [°C]		
Sensor 1 e 4	Sensor 8 e 4	Sensor 1 e 8	Sensor 1	Sensor 4	Sensor 8
11.71	17.34	5.63	9.84	22.57	1.76

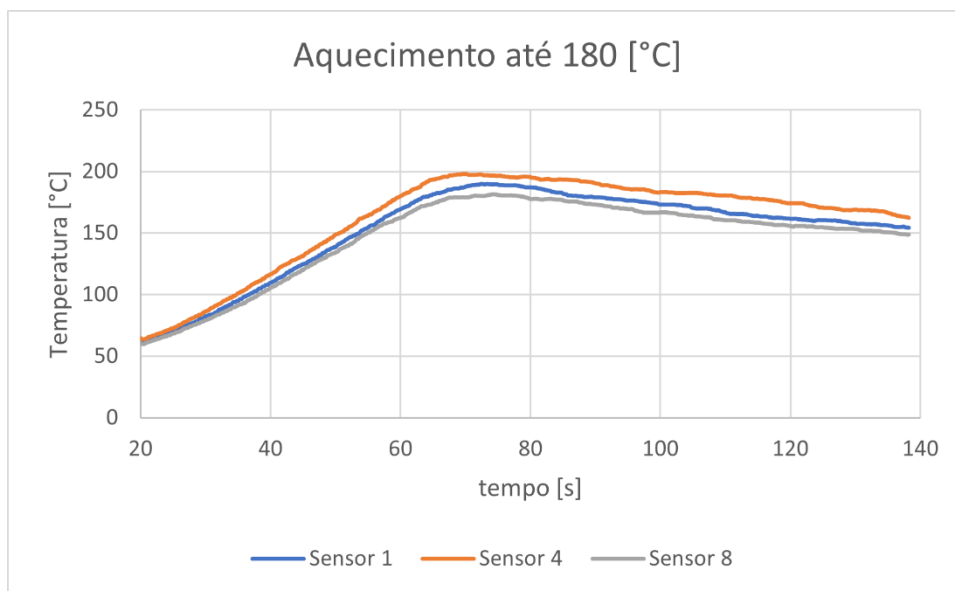


Figura 6-21 - Aquecimento até 180 °C (Controlador B)

Tabela 6-12 - Parâmetros de avaliação - aquecimento até 180 °C – controlador B

Diferença de T média [°C]			Overshoot máximo [°C]		
Sensor 1 e 4	Sensor 8 e 4	Sensor 1 e 8	Sensor 1	Sensor 4	Sensor 8
9.27	15.02	5.75	9.79	17.83	1.14

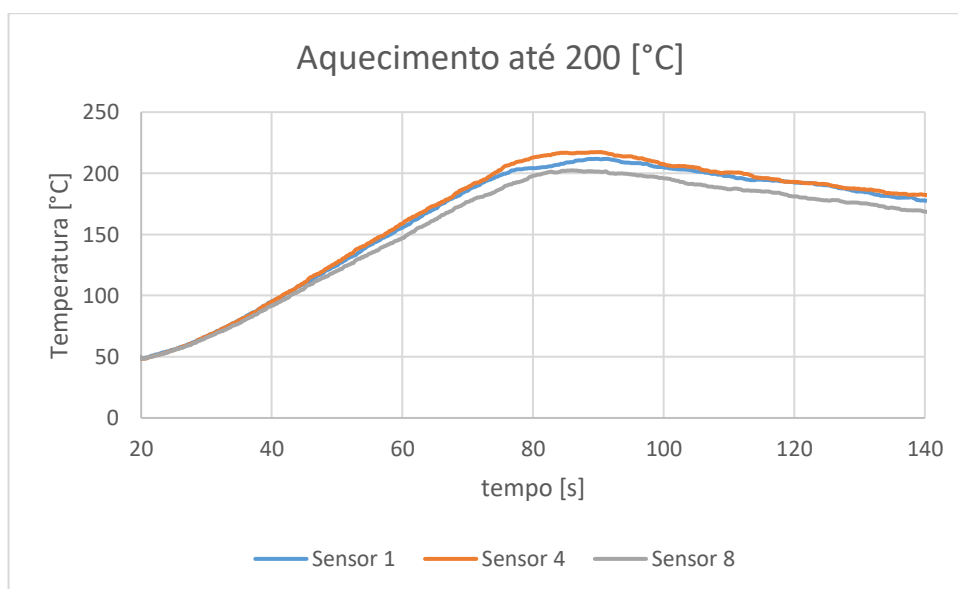


Figura 6-22 - Aquecimento até 200 °C (Controlador B)

Tabela 6-13 - Parâmetros de avaliação - aquecimento até 200 °C – controlador B

Diferença de T média [°C]			Overshoot máximo [°C]		
Sensor 1 e 4	Sensor 8 e 4	Sensor 1 e 8	Sensor 1	Sensor 4	Sensor 8
2.83	9.67	6.96	11.77	17.33	2.38

Analisando os resultados obtidos, para as várias temperaturas de interesse, é possível retirar duas conclusões importantes que confirmam os problemas resultantes da utilização do controlador B para controlar o processo de aquecimento.

Tal como esperado, a zona central da amostra (temperatura registada pelo sensor 4) apresenta sempre um aumento de temperatura superior relativamente às zonas laterais (temperatura registada pelo sensor 1 e 8). Estas diferenças de temperatura justificam-se pelo facto de que, por um lado, a zona central da amostra recebe maior potência calorífica que as zonas laterais e, por outro lado, as zonas laterais perdem mais energia para o ambiente devido à configuração física do sistema. Este problema pode ser comprovado através do parâmetro de avaliação “Diferença de T média”, que apresenta valores na ordem dos 2.83-17.34 °C.

Existe um *overshoot* muito elevado no aquecimento até às várias temperaturas de interesse. Isto deve-se ao facto que a elevada inércia térmica das resistências cerâmicas leva a que exista ainda algum fornecimento de potência calorífica das mesmas à amostra após serem desligadas. Isto é, quando se atinge a temperatura pretendida desligam-se as resistências, mas dá-se ainda um aumento de temperatura da amostra verificando-se um *overshoot* bastante elevado. Este fenómeno pode ser verificado analisando os vários valores de *overshoot* registados, que se situam no intervalo de 1.14 a 30.61 °C.

6.9 Resultados obtidos - controlador C

De seguida serão analisados os resultados obtidos no processo de aquecimento utilizando o controlador C, que constitui um conjunto de três controladores PID independentes.

A análise destes testes e a sua comparação com os resultados obtidos com o controlador B, permite avaliar a qualidade do controlador C desenvolvido e as melhorias que este introduziu no processo de aquecimento.

Os procedimentos, as dimensões da amostra utilizada e o seu posicionamento e os parâmetros de avaliação utilizados são idênticos aos do controlador B.

Os resultados obtidos com este controlador encontram-se representados nos gráficos das Figuras 6-23 a 6-28 e os respetivos parâmetros de avaliação calculados representam-se nas Tabelas 6-14 a 6-19.

Para amostras com espessuras elevadas, é necessário garantir que todo o seu volume se encontra à temperatura pretendida. Isto é conseguido mantendo as amostras na zona de aquecimento durante um intervalo de tempo suficiente, de tal modo que, as zonas mais interiores das amostras atinjam a mesma temperatura que as zonas superficiais. O cálculo deste intervalo de tempo é analisado no capítulo 7 na secção relativa às melhorias futuras do trabalho.

No entanto, para amostras como a utilizada nos ensaios experimentais a analisar de seguida, devido à sua reduzida espessura, este problema não se verifica. Ainda assim, para todas as temperaturas de interesse, manteve-se a amostra na zona de aquecimento durante um intervalo de tempo de aproximadamente 60 s para comprovar que efetivamente o controlador implementado consegue manter a temperatura estável em torno do valor desejado.

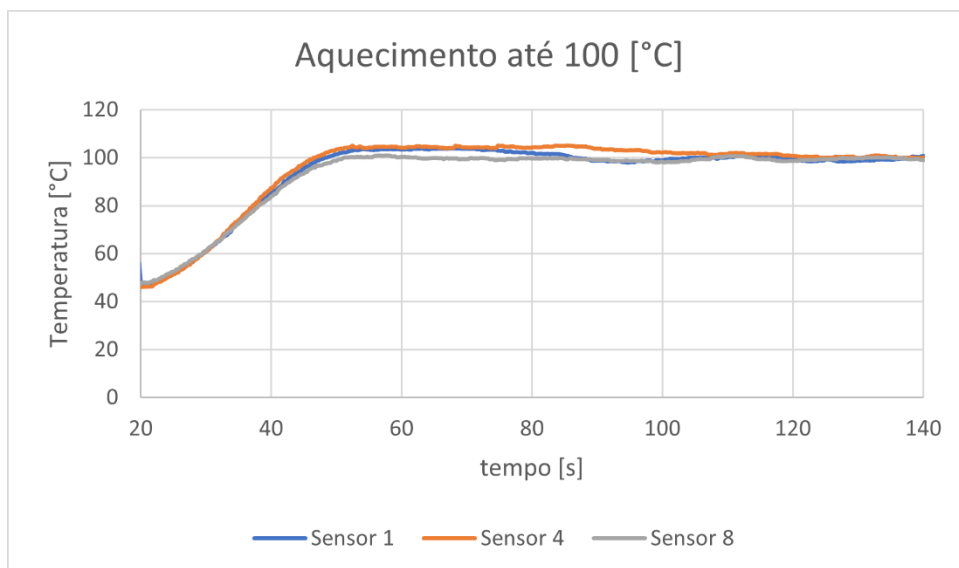


Figura 6-23 - Aquecimento até 100 °C (Controlador C)

Tabela 6-14 - Parâmetros de avaliação - aquecimento até 100 °C – controlador C

Diferença de T média [°C]			Overshoot máximo [°C]		
Sensor 1 e 4	Sensor 8 e 4	Sensor 1 e 8	Sensor 1	Sensor 4	Sensor 8
2.31	2.48	0.79	3.89	5.04	1.05

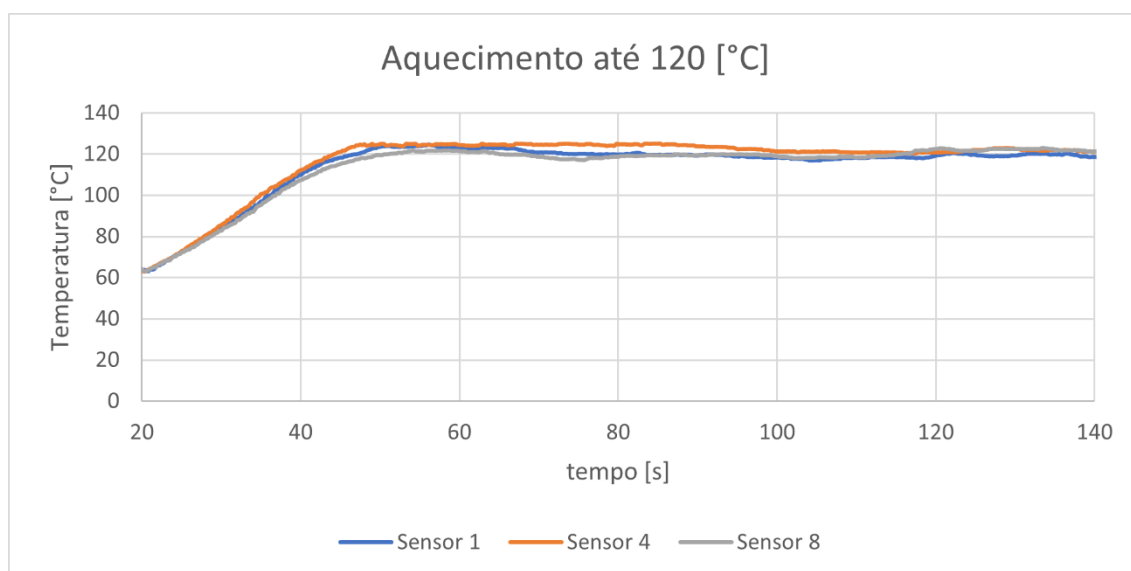


Figura 6-24 - Aquecimento até 120 °C (Controlador C)

Tabela 6-15 - Parâmetros de avaliação - aquecimento até 120 °C – controlador C

Diferença de T média [°C]			Overshoot máximo [°C]		
Sensor 1 e 4	Sensor 8 e 4	Sensor 1 e 8	Sensor 1	Sensor 4	Sensor 8
3.19	2.71	1.55	4.52	5.01	3.02

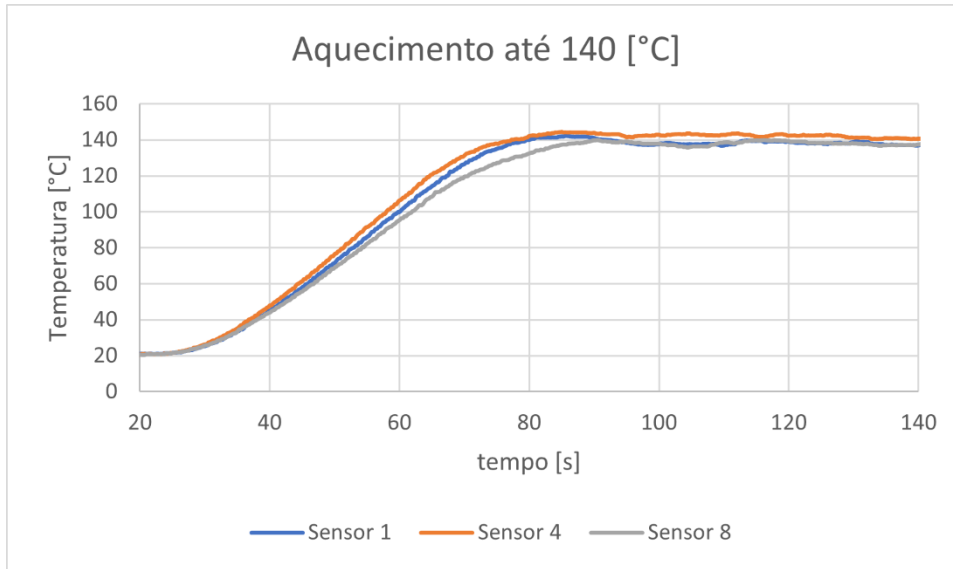


Figura 6-25 - Aquecimento até 140 °C (Controlador C)

Tabela 6-16 - Parâmetros de avaliação - aquecimento até 140 °C – controlador C

Diferença de T média [°C]			Overshoot máximo [°C]		
Sensor 1 e 4	Sensor 8 e 4	Sensor 1 e 8	Sensor 1	Sensor 4	Sensor 8
3.53	4.73	1.42	2.3	4.37	0.05

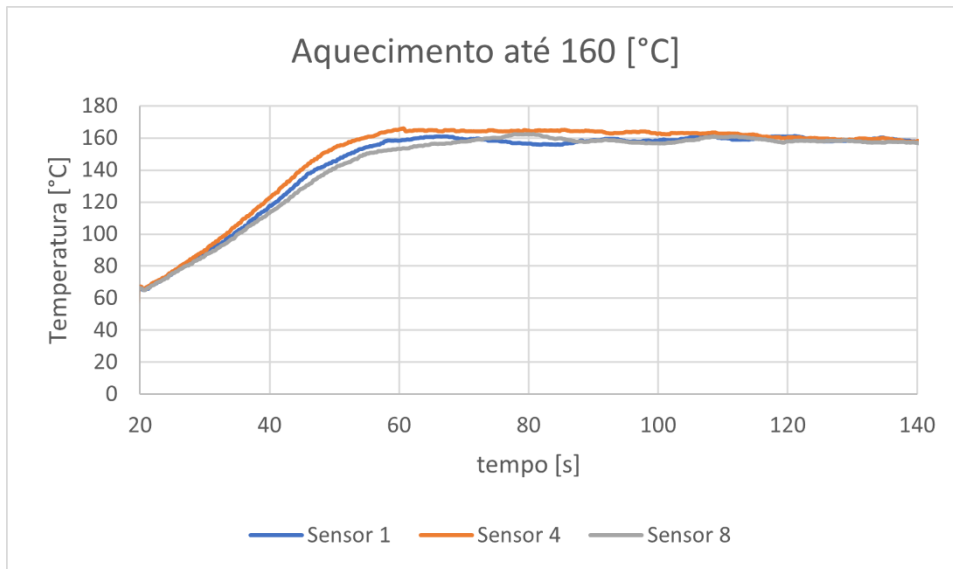


Figura 6-26 - Aquecimento até 160 °C (Controlador C)

Tabela 6-17 - Parâmetros de avaliação - aquecimento até 160 °C – controlador C

Diferença de T média [°C]			Overshoot máximo [°C]		
Sensor 1 e 4	Sensor 8 e 4	Sensor 1 e 8	Sensor 1	Sensor 4	Sensor 8
3.25	3.41	1.55	1.17	5.6	2.41

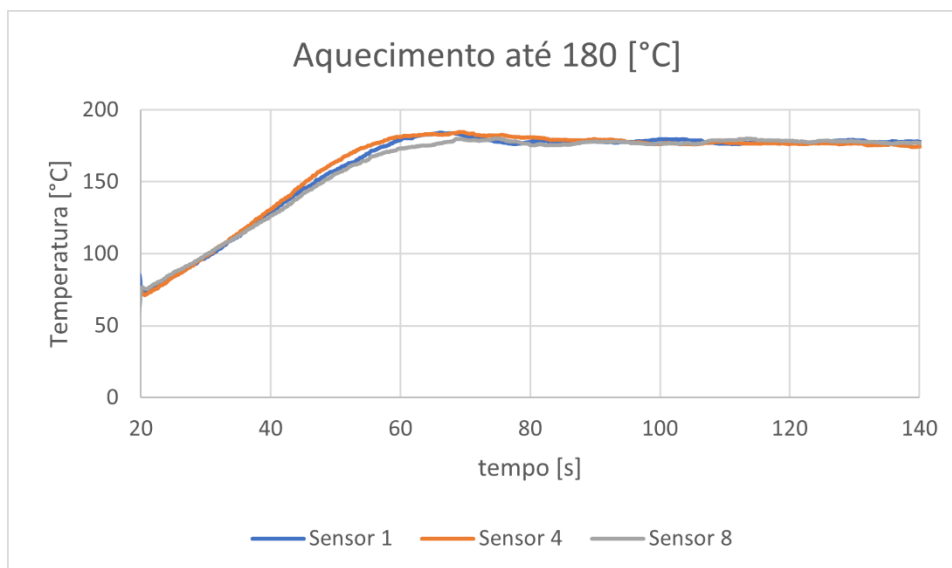


Figura 6-27 - Aquecimento até 180 °C (Controlador C)

Tabela 6-18 - Parâmetros de avaliação - aquecimento até 180 °C – controlador C

Diferença de T média [°C]			Overshoot máximo [°C]		
Sensor 1 e 4	Sensor 8 e 4	Sensor 1 e 8	Sensor 1	Sensor 4	Sensor 8
1.66	1.70	1.51	4.28	4.35	----

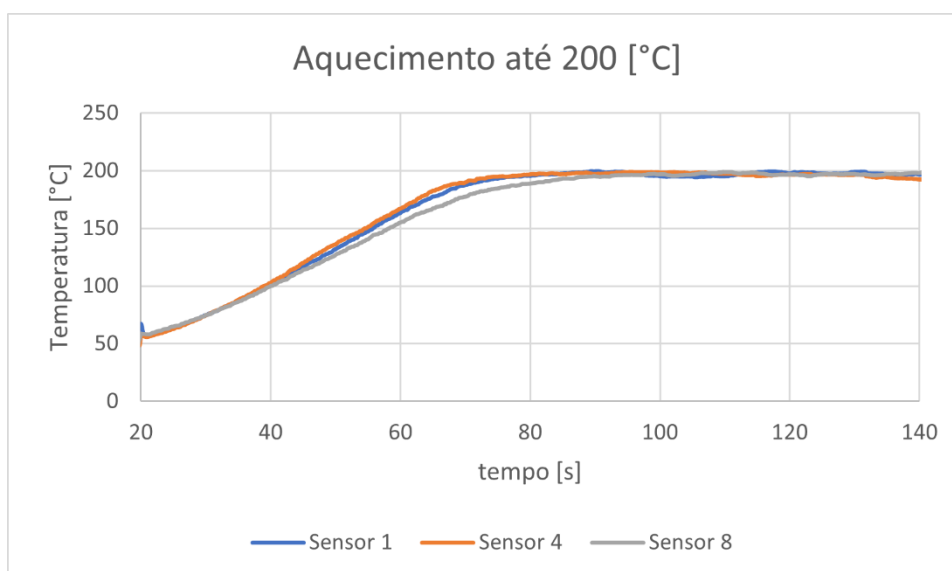


Figura 6-28 - Aquecimento até 200 °C (Controlador C)

Tabela 6-19 - Parâmetros de avaliação - aquecimento até 200 °C – controlador C

Diferença de T média [°C]			Overshoot máximo [°C]		
Sensor 1 e 4	Sensor 8 e 4	Sensor 1 e 8	Sensor 1	Sensor 4	Sensor 8
2.11	2.26	2.34	0.52	---	0.5

Analisando os resultados obtidos, para as várias temperaturas de interesse, é possível observar fenômenos importantes que evidenciam as melhorias resultantes do desenvolvimento e implementação do controlador C e sua utilização para controlar o processo de aquecimento.

Como se pode observar nos gráficos das Figuras 6-23 a 6-28, o aquecimento das amostras apresenta uma evolução de temperatura conforme o pretendido. Para qualquer temperatura inicial da amostra, o controlador desenvolvido permite um aquecimento das amostras até à temperatura de interesse e uma manutenção estável da mesma em torno desse valor.

Para além disso, o processo de aquecimento, para as várias temperaturas de interesse, deu-se de uma forma homogénea. As diferenças de temperatura registadas entre as zonas laterais da amostra e a zona central, ou entre as zonas laterais em si são muito reduzidas. Isto pode ser comprovado pelos valores de “Diferença de T média” calculados que registaram valores situados no intervalo 0.79 a 4.73 °C.

Ocorre por vezes um ligeiro *overshoot* em relação à temperatura de aquecimento pretendida, mas que é desprezável e cumpre com os requisitos do problema. O valor máximo de *overshoot* registado foi 5.6 °C no aquecimento da amostra até 160 °C, representando um valor de 3.5% em relação ao valor de temperatura de referência.

Estes resultados permitem afirmar que o controlador desenvolvido e implementado ao longo deste trabalho cumpre com os objetivos do mesmo. No entanto, para obter uma visão não só sobre a qualidade do controlador C, mas também das melhorias introduzidas em relação ao controlador B, na seguinte secção é feita uma análise comparativa entre os resultados obtidos com ambos.

6.10 Comparação dos resultados obtidos– controlador B vs. controlador C

Esta secção do trabalho destina-se à apresentação dos resultados já referidos nas secções anteriores, mas em comparação entre si e não de forma individual. Apresentam-se apenas as tabelas com os parâmetros de avaliação definidos pois permitem obter uma análise comparativa e qualitativa dos resultados obtidos com o desenvolvimento de um novo controlador de temperatura, face ao implementado originalmente no forno. No entanto, nesta secção, os resultados dos parâmetros calculados são apresentados em termos de percentagem em relação à temperatura de aquecimento definida. Os resultados encontram-se representados nas Tabelas 6-20 a 6-25.

Tabela 6-20 - Parâmetros de avaliação: aquecimento até 100 °C – Controlador B vs. Controlador C

	Diferença de T média [%]			Overshoot máximo [%]		
	Sensor 1 e 4	Sensor 8 e 4	Sensor 1 e 8	Sensor 1	Sensor 4	Sensor 8
Controlador B	7.47	13.49	6.0	21.16	30.61	14.25
Controlador C	2.31	2.48	0.79	3.89	5.04	1.05

Tabela 6-21 - Parâmetros de avaliação: aquecimento até 120 °C – Controlador B vs. Controlador C

	Diferença de T média [%]			Overshoot máximo [%]		
	Sensor 1 e 4	Sensor 8 e 4	Sensor 1 e 8	Sensor 1	Sensor 4	Sensor 8
Controlador B	7.06	11.3	4.25	16.11	22.71	10.34
Controlador C	2.66	2.26	1.29	3.77	4.18	2.52

Tabela 6-22 - Parâmetros de avaliação: aquecimento até 140 °C – Controlador B vs. Controlador C

	Diferença de T média [%]			Overshoot máximo [%]		
	Sensor 1 e 4	Sensor 8 e 4	Sensor 1 e 8	Sensor 1	Sensor 4	Sensor 8
Controlador B	6.85	11.49	4.64	10.30	18.51	3.87
Controlador C	2.52	3.38	1.01	1.64	3.12	0.04

Tabela 6-23 - Parâmetros de avaliação: aquecimento até 160 °C – Controlador B vs. Controlador C

	Diferença de T média [%]			Overshoot máximo [%]		
	Sensor 1 e 4	Sensor 8 e 4	Sensor 1 e 8	Sensor 1	Sensor 4	Sensor 8
Controlador B	7.32	10.84	3.52	6.15	14.11	1.10
Controlador C	2.03	2.13	0.97	0.73	3.5	1.51

Tabela 6-24 - Parâmetros de avaliação: aquecimento até 180 °C – Controlador B vs. Controlador C

	Diferença de T média [%]			Overshoot máximo [%]		
	Sensor 1 e 4	Sensor 8 e 4	Sensor 1 e 8	Sensor 1	Sensor 4	Sensor 8
Controlador B	5.15	8.34	3.19	5.44	9.91	0.63
Controlador C	0.92	0.94	0.84	2.38	2.42	----

Tabela 6-25 - Parâmetros de avaliação: aquecimento até 200 °C – Controlador B vs. Controlador C

	Diferença de T média [%]			Overshoot máximo [%]		
	Sensor 1 e 4	Sensor 8 e 4	Sensor 1 e 8	Sensor 1	Sensor 4	Sensor 8
Controlador B	1.42	4.84	3.48	5.89	8.67	1.19
Controlador C	1.06	1.13	1.17	0.26	----	0.25

Como se pode observar pelas tabelas anteriores, para as várias temperaturas de interesse, o controlador C introduziu bastantes melhorias no controlo do processo de aquecimento face ao controlador B.

No que toca à homogeneização de temperatura ao longo das amostras, com o controlador B as diferenças de temperatura média ao longo da mesma apresentam valores entre 1.42-13.49 %. Com o controlador C, estas diferenças foram bastante atenuadas apresentando valores entre 0.79-3.38 %.

No que diz respeito ao *overshoot*, as melhorias são ainda mais significativas. Com o controlador B os valores de *overshoot* apresentados encontram-se entre 0.63-30.61%. Com o controlador C, estes valores são muito inferiores, situando-se entre 0.04 e 5.04 %.

Em suma, o controlador desenvolvido ao longo deste trabalho introduziu melhorias bastante significativas no processo de aquecimento. O aquecimento até às várias temperaturas de interesse definidas ocorreu de uma forma bastante mais homogénea que o aquecimento verificado inicialmente com o controlador B. A nível dos valores de *overshoot* as melhorias são ainda mais acentuadas reduzindo o valor máximo verificado de 30.61 para 5.04 %.

7 Conclusões e trabalhos futuros

Aquando do início dos trabalhos, o forno de aquecimento encontrava-se funcional. No entanto, o processo de aquecimento dos materiais compósitos não respondia cabalmente aos requisitos exigidos. Por um lado, como a fase seguinte do processo de fabrico destes materiais é um processo de estampagem, a homogeneização do aquecimento dos mesmos é essencial de modo a obterem-se as propriedades mecânicas pretendidas e, simultaneamente, uniformes ao longo das peças. Por outro lado, pretende-se evitar um aumento de temperatura para além dos valores pretendidos pois pode haver danificação das amostras provocando, por exemplo, que a matriz do material atinja temperaturas perto da mudança de fase, levando à perda da organização e do alinhamento das fibras que constituem o material compósito.

O controlador de temperatura implementado no forno não cumpria com estes requisitos, pelo que se procedeu ao desenvolvimento e implementação de um novo controlador de temperatura. Este novo controlador consiste num conjunto de três controladores PID independentes, cada um controlando o funcionamento de um par de filas de resistências cerâmicas. Após a sua implementação, foram realizados vários ensaios experimentais de aquecimento com amostras de fibra de carbono concebidas na UMEC e analisados os resultados obtidos. Verificaram-se melhorias no processo de aquecimento, na medida em que este se deu de uma forma homogénea e sem ultrapassar o valor pretendido de temperatura, situação que não se verificava com o controlador implementado originalmente no sistema. A diferença de temperatura média ao longo das amostras testadas com o controlador original apresentava valores na ordem dos 1.42-13.49 % e valores de *overshoot* no intervalo 0.79-13.49 %.

Com a implementação do controlador desenvolvido ao longo deste trabalho, reduziram-se as diferenças de temperatura médias ao longo das amostras para valores entre 0.79 e 3.38 % e os valores de *overshoot* para valores entre 0.04 e 5.04 %.

O segundo objetivo a que este trabalho pretendia dar resposta era o desenvolvimento de um modelo matemático do sistema que permitisse estimar a evolução da temperatura nas amostras ao longo do processo de aquecimento. Neste sentido, foi desenvolvido um modelo do sistema recorrendo a métodos de diferenças finitas que permite obter a evolução de temperatura nas amostras. Este modelo foi validado através da comparação de resultados obtidos experimentalmente com resultados obtidos através da simulação do processo de aquecimento.

Embora este processo de validação tenha sido feito recorrendo a amostras de fibra de carbono com uma espessura reduzida, o algoritmo de programação do modelo permite a adaptação a outros materiais compósitos e a amostras de qualquer dimensão.

Este objetivo foi atingido com sucesso, na medida em que as simulações do processo de aquecimento apresentaram desvios bastante baixos relativamente aos resultados experimentais. O valor de *RMSE* máximo foi de 2.61 °C, substancialmente abaixo do valor máximo considerado aceitável (*RMSE*=5 °C).

Em suma, o trabalho realizado no âmbito da presente Dissertação foi bem-sucedido uma vez que foram cumpridos na íntegra os objetivos propostos inicialmente.

Ainda assim, existem ainda alguns aspetos relativos ao funcionamento do forno e do processo de aquecimento que podem ser melhorados em trabalhos futuros.

No que diz respeito ao processo de aquecimento em si, os sensores óticos de temperatura não permitem registar os valores nas zonas mais interiores das amostras. Como tal, para amostras com uma espessura elevada, é necessário garantir que as zonas interiores das mesmas aquecem, efetivamente, até à temperatura pretendida. Neste sentido, entende-se pertinente calcular, de forma automática e com base no modelo desenvolvido, o tempo de aquecimento durante o qual as amostras devem permanecer à temperatura pretendida, garantindo que todo o seu volume se encontra a esse mesmo valor.

Posteriormente, no movimento a “céu aberto” das amostras desde a zona de aquecimento do forno até à zona de estampagem, ocorrem perdas de calor que fazem com que a distribuição de temperaturas no momento em que atingem a zona de estampagem seja diferente da distribuição de temperaturas na zona de aquecimento do forno. Assim, poderão no futuro ser desenvolvidas técnicas de controlo avançadas com vista à compensação das perdas de calor referidas. Esse controlador deve permitir obter uma distribuição de temperaturas uniforme em torno do valor pretendido na zona de estampagem, complementando o controlador desenvolvido que garante essa mesma distribuição uniforme de temperaturas, mas ao nível da zona de aquecimento. O desenvolvimento deste novo controlador deve ter como base o modelo matemático do sistema desenvolvido ao longo deste trabalho, na medida em que este permite obter uma estimativa da temperatura ao longo das amostras quando estas atingem a zona de estampagem.

Bibliografia

Almeida, F. (2019), Apontamentos da Unidade Curricular – Sistemas de Controlo, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Almeida, F. (2020), Apontamentos da Unidade Curricular – Complementos de Sistemas de Controlo, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Amran, Y.H., Alyousef, R., Rashid, R.S.M., Alabduljabbar, H., “Properties and applications of FRP in strengthening RC structures: A review”, 2018, Structures, Volume 16, p.208-238

ASTM D792-20, Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, www.astm.org

ASTM D3171-15, Standard Test Methods for Constituent Content of Composite Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, www.astm.org

ASTM E1269-11(2018), Standard Test Method for Determining Specific Heat Capacity by Differential Scanning Calorimetry, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, www.astm.org

Gomes, R. 2021, “Novas tecnologias para a produção de compósitos: ciclos produtivos menores e mais sustentabilidade”, 19 fevereiro 2021, último acesso: junho 2021, <http://www.inegi.pt/pt/noticias/novas-tecnologias-para-a-producao-de-compositos-ciclos-produtivos-menores-e-mais-sustentabilidade/?l=28&s=335>

Incropera, F., “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”, 6ª edição. 2006, John Wiley & Sons.

Pietrak, K., Wisniewski, T., “A review of models for effective thermal conductivity of composite materials”, 2015, J. Power Technologies 95., p.14-24.

Neves, P. 2004, “Missão da UMEC”, 2004, último acesso: junho 2021, <https://paginas.fe.up.pt/compositos/umec.htm>

Ogata, K., Modern Control Engineering, 5ª edição. 2009, Prentice Hall.

OMEGA, Manual do sensor de temperatura OS151-HT-T, 2018.

Silveira, C. 2016, “O controle de Temperatura nos processos Industriais”, 14 novembro 2016, último acesso: junho 2021, <https://www.citisystems.com.br/controle-de-temperatura/>

Scampicchio, A., Aravkin, A., Pillonetto, G., “LQR Design under Stability Constraints”, 2020, IFAC-PapersOnLine, Volume 53, 2, 2020, p.5556-5560

Yang, C., “Estimation of the temperature-dependent thermal conductivity in inverse heat conduction problems”, Applied Mathematical Modelling, Volume 23, 6, 1999, p.469-478

ANEXO A: Propriedades do material compósito utilizado

No presente Anexo A, encontram-se os resultados experimentais, fornecidos pela UMEC, relativos à obtenção das propriedades do material compósito utilizado ao longo da presente Dissertação.

Na Figura A-1 encontra-se representada a relação entre o calor específico, c_p , do material compósito e a temperatura do próprio material. A obtenção dos resultados foi realizada através de uma máquina *Differential Scanning Calorimetry* (DSC), de acordo com a norma ASTM E1269-11(2018).

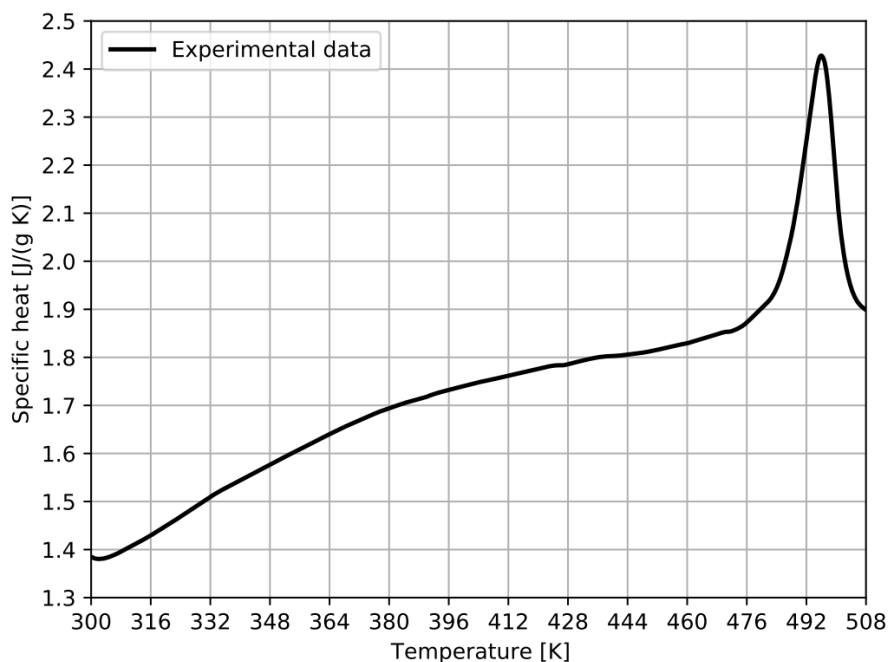


Figura A-1 – Calor específico em função da temperatura do material compósito

Na Figura A-2 encontra-se representada a relação entre a condutividade térmica do material compósito no sentido da direção das fibras, k_x , e a temperatura do próprio. Para esta relação seguiu-se o método proposto por Yang (1998). Segundo o autor, é possível determinar a relação entre a condutividade térmica de um material e a temperatura do mesmo através da resolução de um conjunto de equações não lineares. Estas equações são formuladas com base na temperatura medida experimentalmente e a temperatura estimada e cuja variável a calcular é a condutividade térmica. A resolução das equações assenta num método de linearização.

Como o material utilizado é um material compósito, isto é, não é um material isotrópico como um material puro, é necessário obter a condutividade térmica do material compósito no sentido perpendicular às fibras. Um dos métodos utilizados é o sugerido por Pietrak e Wisniewski (2015), sendo necessário conhecer a relação as várias fases constituintes do material compósito. O cálculo desta relação e dos teores de fibras foram obtidos de acordo com a norma ASTM D 3171 (Método G - 6h a 425°C) e os resultados são apresentados na Tabela A-1.

Tabela A-1 - Resultados obtidos no cálculo do teor de fibras do material compósito

Provete	m(cad)/g	m(cad+prov)/g	m(prov)/g	m(cad+fibra)/g	m(fib)/g	m(res)/g	% Res	% Fib	dcompósito (g/cm³)	Vfibra (%)	Vresina (%)	Vvazios (%)
1	22,72	24,84	2,13	23,94	1,22	0,90	42,36	57,64	1,34	42,48	49,85	7,66
2	22,72	24,40	1,69	23,66	0,94	0,74	43,97	56,03	1,40	43,17	54,08	2,75
3	24,16	25,82	1,67	25,07	0,91	0,76	45,43	54,57	1,20	36,10	47,98	15,92
4	23,19	25,05	1,86	24,24	1,05	0,81	43,71	56,29	1,32	40,83	50,62	8,56
5	24,41	26,35	1,94	25,47	1,06	0,88	45,54	54,46	1,16	34,73	46,36	18,90
6	24,58	26,40	1,82	25,59	1,01	0,81	44,66	55,34	1,29	39,16	50,45	10,38
7	24,33	26,33	2,00	25,44	1,11	0,89	44,58	55,42	1,33	40,60	52,13	7,28
Média	23,73	25,60	1,87	24,77	1,04	0,83	44,32	55,68	1,29	39,58	50,21	10,21
Desvio	0,82	0,83	0,17	0,81	0,11	0,07	1,10	1,10	0,08	3,15	2,54	5,50

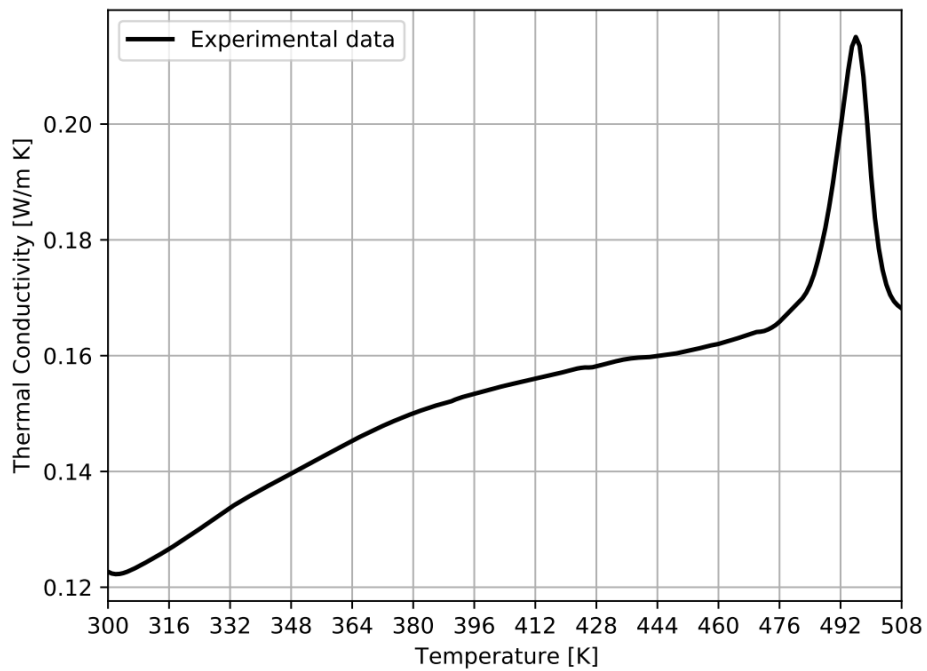


Figura A-2 - Condutividade térmica como função da temperatura no sentido das fibras de carbono do material compósito

Na tabela A-2 encontram-se representadas as medições da densidade do material compósito, ρ , para diversas amostras, de acordo com a norma ASTM D 792 – 07.

Tabela A-2 - Densidade do material compósito

	Densidade (ρ) [$\frac{g}{cm^3}$]
Amostra 1	1.34
Amostra 2	1.40
Amostra 3	1.20
Amostra 4	1.32
Amostra 5	1.16
Amostra 6	1.29
Amostra 7	1.33
$\bar{\rho}$	1.29
σ	0.08