



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Paulo Jorge Teixeira Leão

Solução combinada de AVAC adaptativo



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Paulo Jorge Teixeira Leão

Solução combinada de AVAC adaptativo

Dissertação de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Trabalho efetuado sob a orientação do:

Professor Doutor Pedro Alexandre Moreira Lobarinhas

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-NãoComercial

CC BY-NC

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

“Sooner or later in life everyone discovers that perfect happiness is unrealizable, but there are few who pause to consider the antithesis: that perfect unhappiness is equally unattainable. The obstacles preventing the realization of both these extreme states are of the same nature: they derive from our human condition which is opposed to everything infinite.”

Primo Levi

AGRADECIMENTOS

Ainda que na capa deste documento apenas conste o meu nome, há um grupo de pessoas que muito contribuíram para este fim de percurso, portanto quero deixar-lhes uma palavra de agradecimento.

Ao Professor Pedro Lobarinhas, não apenas pela orientação técnica da dissertação, mas pelas palavras fruto da sua experiência que ajudaram a que continuasse motivado e calmo nos momentos mais difíceis deste percurso.

Ao Professor Jaime Fonseca, do Departamento de Eletrónica Industrial, que mesmo não sendo seu aluno, prontamente disponibilizou o seu tempo sendo indispensável na ajuda nos conhecimentos da lógica difusa e que em muito contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

À empresa Vieira & Lopes, em especial àqueles que disponibilizaram o seu tempo para contribuir no caso de estudo para aplicação dos conceitos técnicos.

Ao IPMA, pela prontidão na resposta e cedência dos registos de temperatura da cidade de Braga.

A todos os meus amigos, que partilharam comigo uma cerveja enquanto ouviam os meus sucessos ou os meus queixumes. As horas passadas em muito impulsionaram a vontade de prosseguir no curso e concluí-lo.

À minha avó, que sempre me inculuiu os valores de sucesso na educação e que muito me motivou para que não desistisse nos momentos de pior sorte. Sem este apoio, certamente este longo percurso era diferente.

E por fim, à Priscila. Por todas as horas que ouviu as minhas alegrias e tristezas, das estratégias e das horas de estudo partilhadas, às pausas para descanso e as conversas motivacionais nos exames mais difíceis, em muito lhe devo neste término com sucesso. Sem ela estes cinco anos certamente teriam sido mais difíceis e cinzentos.

Muito obrigado!

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Universidade do Minho, dia 26 de outubro de 2022

RESUMO

Os sistemas AVAC necessitam de um controlo automatizado e que seja capaz de cumprir com as respostas expectáveis para garantir os padrões exigidos para um espaço que possa ser ocupado ou não por pessoas. Estas exigências passam pelo campo da temperatura, humidade e qualidade do ar.

Tendo em mente o cumprimento de todas as exigências, deve recorrer-se a sistemas de controlo que sejam capazes de uma constante análise dos diversos parâmetros do espaço, através da utilização de sensores e, com esses dados, proceder às alterações das máquinas de forma a satisfazer as necessidades.

Desta feita, foi analisada uma gama de métodos de controlo passíveis de serem aplicados no campo da climatização e ventilação de edifícios. Estes métodos que tanto recorrem a formulações matemáticas como à inteligência computacional ou ambas, foram posteriormente estudados no que toca à sua fundamentação, implementação e lacunas de forma a inferir qual o método que se adequaria para o cumprimento dos parâmetros de temperatura e humidade relativa exigidos para um espaço industrial.

A realização desta análise, que passou por uma comparação entre controlo adaptativo e preditivo, culminou com a escolha da lógica *fuzzy* como método de controlo alternativo a aplicar na UTA que climatiza o espaço industrial. Com base nas exigências dos responsáveis do espaço comercial e na equipa responsável do fabrico da UTA, foram implementadas as regras de controlo em *MATLAB*, que permitissem alterar os valores de temperatura do caudal de água que circula na bateria de arrefecimento/aquecimento da UTA que abastece a zona de trabalho.

Obtendo valores de temperatura adequados para proceder à troca de calor com o ar que passa na UTA, tem-se como reflexo valores de temperatura e humidade relativa do espaço que igualam os requeridos, bem como menor consumo energético, já que o sistema não trabalha num cenário de sobredimensionamento.

Palavras-Chave

ADAPTATIVO; AVAC; CONSUMO; CONTROLO; *FUZZY*

ABSTRACT

HVAC systems need automated control to be able to comply with the expected responses to ensure the standards required for a space that can be occupied by people or not. These requirements can be: temperature, humidity and air quality.

In order to fulfill all requirements, it must be chosen control systems that are capable of constant analysis of the various parameters of space by using sensors and, with that data, to change the equipments in order to meet the needs.

Therefore, a range of control methods that could be applied in the field of air conditioning and ventilation of buildings was analyzed. These methods, which use both mathematical formulations or computational intelligence or both, were studied with regard to their grounding, implementation and gaps in order to understand which method would better suit with the temperature and relative humidity parameters responses, required for an industrial space.

The performance of this analysis, which went through a comparison between adaptive and predictive control, culminated in the choice of fuzzy logic as an alternative control method to be applied in the AHU that supplies the industrial space. Based on the requirements of the commercial space managers and the AHU manufacturing team, a range of control rules were implemented in *MATLAB* to allow the temperature values of the water flow circulating in the AHU cooling/heating coil that is mounted in the working area to be changed.

Obtaining adequate temperature values to exchange heat with the air that passes in the AHU, will cause temperature values and relative humidity values of the space to match the required, as well as being able to lower energy consumption, since the system is not oversized.

Keywords

ADAPTIVE; CONSUMPTION; CONTROL; *Fuzzy*; HVAC

ÍNDICE

Agradecimentos	iii
Resumo.....	v
Abstract	vi
Índice	vii
Índice de Figuras.....	ix
Índice de Tabelas.....	xiii
Lista de Símbolos.....	xiv
1. Introdução.....	1
1.1. Empresa	2
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Guia de Leitura	3
2. Motivações de Estudo.....	5
2.1. Eficiência Energética.....	5
2.2. Qualidade do Ar Interior.....	7
2.3. Conforto Térmico.....	10
2.4. Dificuldades Para Obtenção da Eficiência Energética	11
3. Controlo Clássico e Controlo Alternativo.....	13
3.1. Revisão Bibliográfica dos Sistemas PID	14
3.1.1. Implementação do Controlo	15
3.1.2. Principais Falhas do Sistema PID.....	21
3.2. Revisão Bibliográfica de Controlos Alternativos	25
3.2.1. Controlo Duro – Model Predictive Control	28
3.2.2. Controlo Macio.....	32

3.2.3. Controlo Híbrido.....	37
4. Aplicação para Controlo AVAC num Edifício.....	39
4.1. Utilização do Modelo de Controlo Preditivo.....	39
4.2. Utilização da Lógica <i>Fuzzy</i>	44
4.3. Comparações entre Controlo Preditivo e Lógica <i>Fuzzy</i>	49
5. Análise de uma Alternativa ao Controlo Clássico num Caso Prático.....	51
5.1. Avaliação das Necessidades de Ventilação.....	52
5.2. Caraterização do Espaço.....	53
5.3. Caraterização da Máquina Seleccionada.....	61
5.4. Falhas do Modelo de Controlo Utilizado.....	62
5.5. Regras de um Sistema <i>Fuzzy</i> Alternativo.....	65
5.6. Resultados Obtidos.....	71
6. Conclusões e Trabalhos Futuros.....	73
6.1. Conclusões.....	73
6.2. Perspetivas e Trabalhos Futuros.....	74
Bibliografia.....	76
Anexos.....	79
Anexo A: Valores de temperatura para distrito de Braga.....	80
Anexo B: NUTS III – Concelho de Braga.....	81
Anexo C: Fórmulas para cálculo da zona climática.....	82
Anexo D: Considerações na obtenção do valor da resistência térmica de uma solução.....	84
Anexo E: Cálculo do coeficiente de transmissão térmica dos elementos construtivos do edifício Fiorima S.A.....	87
Anexo F: Especificações da UTA.....	89
Anexo G: Pontos de Insuflação do Ar.....	92
Anexo H: Carta Psicrométrica.....	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Simulação que evidencia que a ventilação natural (janela aberta) extrai os poluentes para uma conduta no espaço [7].	9
Figura 2 - Conforto térmico numa sala (adaptado de [10]).....	11
Figura 3 - Representação esquemática do controlo de malha aberta (adaptado de [13]).	14
Figura 4 - Representação do controlo de malha fechada (adaptado de [13]).	14
Figura 5 - Representação de um controlo "On/Off" (adaptado de [8]).....	15
Figura 6 - Representação esquemática dos diferentes termos de controlo modulante aplicado a um controlo proporcional (adaptado de [8]).	16
Figura 7 - Representação gráfica do controlo PI, ao longo do tempo (adaptado de [8]).	17
Figura 8 - Representação de um sistema de controlo G(s) [18].	20
Figura 9 - Representação esquemática de um sistema de controlo com perturbações na entrada e na saída (adaptado de [19])......	22
Figura 10 - Representação de uma resposta sub-amortecida [16].	24
Figura 11 - Representação das possibilidades de previsão, otimização e controlo com base na inteligência computacional (adaptado de [20]).....	26
Figura 12 - Diferentes técnicas de modelação de sistemas de controlo (adaptado de [13]).	27
Figura 13 - Classificação dos métodos de controlo macio, duro e híbrido dos sistemas AVAC, respetivamente (adaptado de [9]).	28
Figura 14 – Representação do potencial real de diminuição do consumo entre a utilização atual e o controlo preditivo (adaptado de [13]).	29
Figura 15 - Diferentes tipos de modelos de controlo preditivo [12].	30
Figura 16 - Representação esquemática de funcionamento da técnica ANN (adotado e adaptado de [20]).	33
Figura 17 - Procedimento para tratamento de dados na técnica ANN (adaptado de [25]).	33

Figura 18 - Representação esquemática da lógica de um controlador <i>fuzzy</i> (adaptado de [20]).	36
Figura 19 - Representação do procedimento seguido pela lógica <i>fuzzy</i> (adaptado de [20]).	37
Figura 20 - Representação esquemática de um controlo <i>Fuzzy</i> PID [29].	38
Figura 21 – Representação gráfica do potencial de poupança energética com otimização ou controlo avançado, respetivamente, face aos consumos reais (adaptado de [13]).	39
Figura 22 - Diferentes possibilidades de modelação do sistema de controlo preditivo e a sua interação com o sistema AVAC (adaptado de [12]).	40
Figura 23 - Representação das diferentes arquiteturas do MPC: a) arquitetura centralizada; b) arquitetura descentralizada; c) arquitetura distribuída (adaptado de [12]).	43
Figura 24 - Comparação da representação do conjunto A: " Conjunto de homens altos" com: a modelação a) e a modelação b), respetivamente (adaptado de [29]).	44
Figura 25 - Representação da função-pertença do conjunto B num universo contínuo (adotado de [29]).	45
Figura 26 - Representação gráfica de um subconjunto A num conjunto B, em lógica <i>fuzzy</i> (adotado de [29]).	46
Figura 27 - Representação gráfica da união de um conjunto A e um conjunto B, em lógica <i>fuzzy</i> (adotado de [29]).	47
Figura 28 - Representação gráfica da interseção de um conjunto A e um conjunto B, em lógica <i>fuzzy</i> (adotado de [29]).	47
Figura 29 - Representação gráfica da interseção do complemento do conjunto A, em lógica <i>fuzzy</i> (adotado de [29]).	48
Figura 30 – Vista aérea da zona onde se encontra localizada a empresa, bem como o espaço em seu redor [33].	51
Figura 31 - Número de teares por linha de ar comprimido.	52
Figura 32 - Planta do edifício da Fiorima, com as duas zonas de trabalho assinaladas: teares e embalamento (adaptado de [34]).	55
Figura 33 - Seleção do município no <i>SCE.CLIMA_v1.0</i> para cálculo das zonas climáticas.	56
Figura 34 - Zona climática do edifício em estudo.	57
Figura 35 - Representação da zona envolvente da zona dos teares.	59

Figura 36 - Representação da composição das paredes exteriores e respetiva caracterização térmica [34].	59
Figura 37 - Representação esquemática da composição do pavimento sobre o solo e caracterização térmica [34].	60
Figura 38 - Representação esquemática da composição do teto falso e caracterização térmica [34].	60
Figura 39 - Representação de uma UTA com as características de construção semelhante à utilizada [34] [35].	61
Figura 40 - Valores de temperatura na zona de Frossos, Braga entre os dias 1 e 3 de agosto de 2022 [36].	63
Figura 41 – Valores de temperatura na zona de teares, de 1 a 3 de agosto de 2022, e comparação com <i>setpoint</i> .	63
Figura 42 - Valores de humidade relativa na zona de Frossos, Braga entre os dias 1 e 3 de agosto de 2022, e comparação com a humidade relativa de projeto [36].	65
Figura 43 - Representação do diagrama lógico de controlo alternativo.	66
Figura 44 - Arquitetura do sistema <i>fuzzy</i> em <i>MATLAB</i> .	67
Figura 45 – Funções-pertença para as entradas e a saída, respetivamente, obtidas em <i>MATLAB</i> .	68
Figura 46 - Distribuição da classificação da "Tteares" para um valor de 23,7 °C.	69
Figura 47 - Representação das regras lógicas de controlo <i>fuzzy</i> da zona de teares.	70
Figura 48 – Comportamento estimado da resposta do <i>chiller</i> e conseqüente valor de <i>Tagua</i> , em <i>MATLAB</i> .	71
Figura 49 – Representação de um exemplo da escolha de <i>Tteares</i> e HR na simulação no <i>MATLAB</i> .	72
Figura 50 - Valor de temperatura de água face aos valores escolhidos no exemplo da Figura 49 na simulação do <i>MATLAB</i> .	72
Figura 51 - Representação gráfica da temperatura mensal para todos os meses do ano em Braga.	80
Figura 52 - Valores médios de temperatura, irradiação solar, humidade relativa e velocidade do vento para a zona de Braga.	80
Figura 53 - Extrato da Tabela do NUTS III apresentada no anexo II do Manual SCE.	81

Figura 54 - Representação dos parâmetros necessários para a estação de aquecimento no concelho de Braga.....	82
Figura 55 - Representação dos parâmetros necessários para a estação de arrefecimento no concelho de Braga.....	83
Figura 56 - Representação da tabela das resistências térmicas superficiais do Manual SCE.....	84
Figura 57 - Representação da tabela de valores de resistências térmicas de espaços de espaços de ar não ventilados do Manual SCE.....	85
Figura 58 - Representação de um exemplo de resistência térmica total em solução construtiva com espaço de ar fortemente ventilado.	85
Figura 59 - Representação de um exemplo de resistência térmica total em solução construtiva com espaço de ar fracamente ventilado.	86

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Perspetivas de evolução do consumo de renováveis no setor do aquecimento e arrefecimento por tecnologia em Portugal até 2030 (adotado e adaptado de [3]).	6
Tabela 2 - Regras de ajuste do controlador com base no segundo método de Ziegler-Nichols.	20
Tabela 3 - Parametrização do controlador PID exemplificado.	21
Tabela 4 - Comparação das vantagens entre o modelo de Sugeno e o modelo de Mamdani.	49
Tabela 5 - Condições de funcionamento exigidas para UTA na zona de teares [34].	53
Tabela 6 - Condições de dimensionamento do sistema de ventilação aplicado na zona de teares.	53
Tabela 7 - Caracterização térmica do elemento construtivo: parede exterior.	87
Tabela 8 - Caracterização térmica do elemento construtivo: pavimento sobre o solo.	87
Tabela 9 - Caracterização térmica do elemento construtivo: teto falso.	88

LISTA DE SÍMBOLOS

V_p	<i>Saída do controlador</i>
K_p	<i>Parâmetro do ganho proporcional</i>
e	<i>offset</i>
V_o	<i>Parâmetro de ajuste do offset</i>
K_i	<i>Parâmetro do ganho integral</i>
θ	<i>Tempo</i>
K_d	<i>Parâmetro do ganho derivativo</i>
R_{tot}	<i>Resistência térmica total [(m². °C)/W]</i>
R_{si}	<i>Resistência térmica superficial interior</i> <i>[(m². °C)/W]</i>
R_{se}	<i>Resistência térmica superficial exterior</i> <i>[(m². °C)/W]</i>
R_j	<i>Resistência térmica da camada j</i> <i>[(m². °C)/W]</i>
U	<i>Coefficiente de transmissão térmica</i> <i>[W/(m². °C)]</i>
T	<i>Temperatura [°C]</i>
HR	<i>Humidade Relativa [%]</i>

Siglas, abreviaturas e acrónimos

ANN	<i>Artificial Neural Network</i>
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning</i> <i>Engineers</i>
AVAC	<i>Aquecimento Ventilação e Ar Condicionado</i>
BEMS	<i>Building Energy Management System</i>
BMS	<i>Building Management System</i>
C&S	<i>Comércio & Serviços</i>
CECA	<i>Comunidade Europeia do Carvão e Alumínio</i>

COVID-19	<i>Corona Virus Disease 2019</i>
COVs	<i>Compostos Orgânicos Voláteis</i>
D.L.	<i>Decreto-Lei</i>
EED	<i>Energy Efficiency Directive</i>
EPBD	<i>Energy Performance of Building Directive</i>
EPC	<i>Energy Performance Certificate</i>
Euroatom	<i>European Atomic Energy Community</i>
FIS	<i>Fuzzy Interference System</i>
FLC	<i>Fuzzy Logic Control</i>
GA	<i>Genetic Algorithm</i>
IA	<i>Inteligência Artificial</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
kTEP	<i>Kilotonelada Equivalente de Petróleo</i>
NNC	<i>Neural Network Control</i>
NUTS	<i>Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos</i>
nZEB	<i>Near Zero Emission Buildings</i>
PID	<i>Proportional-Integral-Derivative</i>
PMV	<i>Predicted Mean Vote</i>
PNEC	<i>Plano Nacional de Energia e Clima</i>
PTP	<i>Ponte Térmica Plana</i>
QAI	<i>Qualidade do Ar Interior</i>
SACE	<i>Sistemas de Automação e Controlo de Edifícios</i>
SARS-CoV-2	<i>Severe Acute Respiratory Syndrome coronavirus 2</i>
SCE	<i>Sistema de Certificação Energética dos Edifícios</i>
SES	<i>Smart Energy System</i>
SGCIE	<i>Sistema de Gestão de Consumos Intensivos de Energia</i>
UE	<i>União Europeia</i>
UTA	<i>Unidade de Tratamento de Ar</i>
VAV	<i>Volume Ar Variável</i>

1. INTRODUÇÃO

A existência de alterações climáticas que tem por origem ações antropológicas levam à necessidade de um planeamento da utilização da energia como outrora nunca exigido.

É indubitável que o planeamento e a execução de projetos que tenham como objetivo principal a melhoria da eficiência energética são fulcrais de implementar, principalmente em momentos onde a energia desempenha um papel tão importante no panorama socioeconómico a nível global.

Atualmente passa-se cada vez mais tempo em espaços fechados seja para atividades laborais seja para atividades de lazer. Desta feita, há necessidade de recorrer a aparelhos que sejam capazes de tratar o ar exterior para que possa ser insuflado a condições ótimas de temperatura e com qualidade, nestes espaços ocupados, de forma a não ter na sua composição organismos patogénicos advindos dos locais de captação do ar. Estes tipos de equipamentos são habitualmente consumidores de grandes quantidades de energia, por tal o seu funcionamento deve ser otimizado para obter-se um menor consumo energético.

O controlo destes equipamentos deve ser automatizado, não só para se adaptar às alterações do meio, como uma variação significativa da ocupação no espaço, assim como para se seguir num caminho de maior interatividade tecnológica e ter-se os edifícios mais automatizados e com diferentes respostas para área com necessidades diferentes.

Assim, sabendo que o controlo terá efeito direto no consumo de energia, já que controla o funcionamento das máquinas, deve ser feito um estudo do funcionamento do controlo clássico e relacionar as interações diretas que este terá no espaço, de modo a perceber as suas lacunas.

Este estudo deve culminar com uma solução que permita contornar os problemas atuais, otimizar o consumo energético, garantir o conforto dos ocupantes e aumentar a interoperabilidade do sistema de climatização com o sistema de controlo global de um edifício.

1.1. EMPRESA

A empresa Vieira & Lopes LDA (VLopes) surgiu em 1998, em Braga. O principal foco da VLopes era a instalação de equipamentos de ar condicionado no setor da construção. Três anos após o início da atividade obteve a certificação ISO 9001 do departamento industrial, garantindo assim o cumprimento de normas técnicas para a gestão da qualidade.

Em 2009, em parceria com a Universidade do Minho, via *Tecminho*, iniciam-se as pesquisas de I&D na área de purificação de ar. Surge o departamento *OCRAMclima*, destinado ao fabrico de UTAs.

Com o virar da década, inicia-se a expansão da VLopes para o mercado europeu. Em 2012 participa no projeto *IDI (7th Community Framework Program)* em Itália e surge a *VLopes Clim*, filial da empresa em França. Em Portugal ganha o 1º prémio do Concurso Nacional de Inovação com o protótipo *NPS (Nano Purifying System)*. No ano seguinte obtém certificações do produto pela *TÜV* e pela *EUROVENT*.

Três anos após a entrada no mercado francês, em 2015, surgiu a *VLopes Scandinavia*, na Dinamarca. Em 2017 obtém a certificação de produtos e *performance* pela *AHRI USA* (instituto de AVAC dos Estados Unidos da América) refletindo-se a expansão da empresa pelos diferentes mercados. Em 2018 dá-se a entrada no mercado indiano.

Atualmente a produção e montagem de equipamentos é paralela ao desenvolvimento de novas tecnologias, refletindo-se nos prémios e menções à empresa, bem como nas participações em feiras e eventos, em que o principal objetivo é a divulgação de equipamentos e soluções pensadas para garantir a maior e melhor qualidade do ar interior.

1.2. OBJETIVOS

Atualmente está-se na era do desenvolvimento sensorial. As ferramentas utilizadas tradicionalmente na regulação e controlo dos sistemas de climatização (como os termostatos), são ferramentas “pouco inteligentes”, na medida em que apenas leem pontualmente a temperatura, gerando uma resposta reativa e não preditiva. Pretende-se o desenvolvimento de outras soluções, com uma leitura matricial dos espaços ou o recurso a métodos de controlo que sejam adaptáveis, com o intuito de ajustar a distribuição da potência de forma mais homogénea e preditiva, aumentando a eficiência dos sistemas AVAC e garantindo o conforto das áreas abrangidas. Além do conforto do espaço, com uma melhor

regulação da luminosidade e temperatura pretende-se também o desenvolvimento de ferramentas que evitem o surgimento e difusão de organismos patogénicos, que não raras vezes encontram nos sistemas AVAC uma forma de se difundirem no espaço.

O objetivo deste trabalho será uma contribuição para a obtenção de formas alternativas que satisfaçam as necessidades, tendo por base as condições reais de um espaço e não as condições admitidas no momento do projeto.

1.3. GUIA DE LEITURA

Este documento está dividido em sete capítulos, tendo-se em conta um nível de estruturação do mais global, do tema da energia e ambiente, para o mais específico, ou seja, as conclusões do trabalho realizado no caso estudo.

No primeiro capítulo encontra-se a introdução ao tema de uma solução para o controlo de AVAC, bem como a apresentação da empresa que propõe o tema e colaborou na realização deste estudo e a atingir os objetivos definidos.

Posteriormente, no segundo capítulo, encontram-se as motivações de estudo iniciando-se pela que mais impera: a eficiência energética. Dado que um sistema AVAC é fulcral na QAI e no conforto térmico, também foram explicitados estes temas no sentido de perceber qual a influência que podem ter no momento do dimensionamento de um sistema de controlo AVAC. Abordam-se ainda as dificuldades, já que se preveem que haja, no campo do desenvolvimento, abertura à mudança e no financiamento.

Em seguida, no terceiro capítulo, faz-se a apresentação dos fundamentos do controlo clássico utilizado nos sistemas AVAC, desde as bases para modelar um sistema, passando pela forma de implementação, terminando nas principais falhas que este controlo apresenta.

A apresentação de alternativas ao controlo clássico, surge no quarto capítulo, onde são apresentadas as áreas de aplicação da inteligência computacional e onde se apresentam os diferentes tipos de controlo, além do controlo clássico. Após esta apresentação, são consideradas as técnicas que se enquadram na área de AVAC e são expostas as principais vantagens e desvantagens, fazendo-se de seguida uma comparação direta entre duas das técnicas mais estudadas na área de controlo de climatização.

No capítulo seguinte apresenta-se o caso de estudo, onde se faz uma breve exposição do tipo de indústria da empresa que foi auditada, caracterizando-se o edifício e os parâmetros do ar insuflado bem como a identificação das falhas na obtenção dos *setpoints* pretendidos.

No sexto capítulo é feito o ajuste de um controlador em lógica difusa, no sentido de obter um espetro de temperaturas do caudal de água que circula na bateria de aquecimento/arrefecimento.

Por fim, no sétimo capítulo, são apresentadas as conclusões, retiradas da análise realizada bem como as sugestões para trabalhos futuros.

2. MOTIVAÇÕES DE ESTUDO

Atualmente, atravessa-se uma época de constantes desenvolvimentos com objetivo de otimização de produtos e equipamentos no sentido de melhorar a eficiência energética e diminuir o impacto ambiental causado por estes. Os equipamentos de climatização de espaços além do impacto que tem no consumo energético, mediante a sua eficiência, são também fulcrais na garantia da qualidade do ar interior.

Assim, é de importância considerável o estudo com foco à melhoria do funcionamento e comportamento dos equipamentos AVAC num determinado espaço de forma a garantir os padrões normalizados (temperatura, humidade relativa, COVs, etc.) de maneira mais inteligente à atualmente implementada.

2.1. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Na União Europeia, os edifícios atualmente representam 40 % da energia consumida e 36 % das emissões de gases efeito de estufa. Nestes consumos de energia estão inseridas as necessidades de climatização e ventilação, que atualmente correspondem a 50 % dos gastos energéticos da UE [1]. Desta forma, é de ressaltar a importância de otimizar os equipamentos AVAC, já que têm uma contribuição considerável na energia consumida num edifício e, em caso de um tratamento de fim de vida não adequado, podem ter consequências severas no ambiente, nomeadamente os fluidos frigorigéneos que fazem parte dos equipamentos com ciclo de frio (*i.e.*, R-134a).

A preocupação da UE com o tema da energia é contemporânea com a sua criação, havendo já em 1951 o *Tratado CECA* e em 1957 o *Tratado Euroatom*. Porém, no que toca à eficiência energética, a conceção de normas e regulamentos surge fruto do embargo do petróleo, ocorrido em 1973. Esta normalização surge com a Resolução do Conselho de 17 de dezembro de 1974, onde eram estabelecidos os objetivos da política energética comunitária para 1985, onde se visava a redução do consumo da energia em 15 % face aos valores de janeiro de 1973. Numa perspetiva mais contemporânea, já no início do século XXI, em 2002,

surge a diretiva EPBD, tendo sido revista por duas ocasiões, em 2010 e em 2018, sendo a que atualmente vigora [2]. Esta diretiva (2018/844/EU, EPBD) assenta em três grandes princípios:

- Acelerar a renovação de edifícios para aumentar a quota de edifícios com neutralidade carbónica até 2050;
- Apoio da eletromobidade, através de instalação de infraestruturas de carregamentos nos parques de estacionamento dos edifícios;
- Reforço de tecnologias inteligentes nos edifícios, nomeadamente na sua automatização (BMS);

Este último ponto será uma das premissas deste estudo, no sentido de renovar os edifícios existentes a partir do controlo dos sistemas instalados, tornando-o mais adaptativo.

Transpondo as diretivas europeias para o panorama nacional, em Portugal está em vigor o Plano Nacional Energia e Clima 2030 (PNEC 2030), que sintetiza as metas a atingir de energia e clima. O PNEC tem por base, entre outros, o artigo 7º da diretiva EED. Esta diretiva de eficiência energética de 2012, define as metas para o máximo de consumo de energia primária e final global em 2030, prevendo-se uma redução de 32,5 % comparativamente ao ano de 2005 [3]. Para que no cômputo geral, o objetivo estabelecido para 2030 seja cumprido, o setor de aquecimento e arrefecimento dos edifícios deve ter a evolução apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Perspetivas de evolução do consumo de renováveis no setor do aquecimento e arrefecimento por tecnologia em Portugal até 2030 (adotado e adaptado de [3])¹.

	2020	2025	2030
Biomassa	963	965	953
Bombas de calor	101	102	102
Calor por solar térmico	91	89	86
Calor por cogeração	650	655	677
Gases renováveis	0	12	50
TOTAL	1805	1824	1868

¹ Todos os valores da Tabela 1 são em ktep

Ainda no campo da legislação, surge o Decreto-Lei 101-D/2020 como resposta à revisão da EPBD por parte da União Europeia com a publicação da Diretiva (UE) 2018/844. Este decreto tem como objetivo estabelecer os requisitos aplicáveis à conceção ou renovação de edifícios no sentido de promover o seu desempenho energético. Este decreto compila os requisitos a cumprir para edifícios de habitação e edifícios de C&S, não abrangendo os edifícios industriais como o deste caso de estudo, uma unidade de produção industrial. Ainda assim, não havendo obrigatoriedade imposta para o cumprimento de parâmetros variados, é sensata uma otimização dos sistemas e/ou espaço tendo por base os requisitos apresentados neste decreto (e restante legislação vigente), já que este decreto promove não só uma construção que promova a eficiência energética do espaço, mas também a implementação de sistemas de automatização e controlo, referido no artigo 13º, sendo o foco principal deste trabalho [4].

Os equipamentos de climatização devem assegurar o bem-estar e a saúde dos ocupantes, através da garantia do cumprimento dos parâmetros valores de qualidade do ar, analisada por exemplo em concentração de CO_2 e garantir igualmente valores mínimos de ventilação, verificado através do número de renovações do ar por hora (rph^{-1}).

Este controlo otimizado será fulcral para o cumprimento do artigo 9º da EPBD, nZEB, ou seja, edifício cuja quota de emissões de carbono são relativamente reduzidas, já que o consumo energético será reduzido na área da climatização, entre outras.

2.2. QUALIDADE DO AR INTERIOR

A qualidade do ar está intrinsecamente ligada com o funcionamento dos sistemas de ventilação, refletindo-se o bom funcionamento destes na qualidade do ar no interior dos edifícios.

A QAI permite, acima de tudo garantir a saúde, o bem-estar e o conforto dos indivíduos. Devido ao último dos três pontos anteriormente mencionados, esta definição de qualidade do ar interior pode, por vezes, ser difícil de quantificar já que a sensação de conforto varia de pessoa para pessoa. Assim, de forma a materializar os valores de QAI, os parâmetros seguintes são avaliados [5]:

- Monóxido de carbono, CO ;
- Dióxido de carbono, CO_2 ;
- Dióxido de enxofre, SO_2 ;

- Óxidos de azoto, NO_x ;
- Material particulado;

No contexto português a gama de valores a cumprir para cada um destes parâmetros, encontra-se expressa no Despacho 6476-H/2021. Este despacho, que pertence ao mesmo pacote legislativo do Decreto-Lei 101-D/2020, aprova o Manual do Sistema de Certificação Energética dos Edifícios. O Manual SCE estabelece, assim, a metodologia de cálculo dos variados parâmetros para avaliação do desempenho energético do edifício, funcionando como uma compilação por temas de todas as peças legislativas em vigor. Dentro destes parâmetros encontram-se os valores de caudais mediante diversos fatores: tipo de ocupação, tipo de espaço, número de horas ocupadas, idade dos ocupantes, tipo de poluentes, entre outros. Estes cálculos podem ser feitos com base no capítulo nono deste despacho [6].

A norma 62:1:2019 da ASHRAE diz que *“a qualidade do ar interior aceitável é aquela em que o ar não tem nenhum poluente em níveis de concentração alarmantes, determinadas pela lei e, a maioria das pessoas ($\geq 80\%$) não está incomodada.”* A QAI é também importante para evitar a propagação de doenças que se transmitem por via aérea, cujo partículas tem um tamanho $\leq 5 \mu\text{m}$, tais como: adenovírus, gripe, tuberculose, varicela, entre outras. No momento, e fruto da pandemia COVID-19 causada pelo vírus SARS-CoV-2, a transmissão de partículas que causem esta infeção são alvo de análise detalhada, de maneira a que a ventilação utilizada nos diferentes edifícios, como por exemplo escolas, diminua o risco de transmissão [7]. Desta forma, pode considerar-se que a QAI além de estar intrinsecamente ligada à conceção e funcionamento do edifício, está igualmente conectada às questões de saúde pública.

Tomando como exemplo o vírus COVID-19, que normalmente tem dimensões entre 60 a 140 nm, em condições de concentração alta e com condições favoráveis proporcionadas pelo sistema de ventilação, a sua disseminação pode ser alta, levando à infeção das pessoas que estariam, aparentemente, a distâncias que evitavam o contágio [7].

Como mecanismo para contrariar a disseminação do vírus, a ventilação do edifício deve ser adaptada e/ou melhorada, para a diluição das partículas infecciosas. Porém, já em análises feitas em momentos pré-pandemia, denotava-se uma tendência para os edifícios não cumprirem com os valores necessários para garantir a qualidade do ar, havendo por isso interesse em reformular e redefinir os mecanismos e as estratégias de ventilação [7].

Este problema não tem solução simples nem transversal a todos os edifícios. Primeiro, não é resolúvel com a insuflação de mais caudal de ar, já que dependendo da origem do ar insuflado, este pode vir de fontes já contaminadas e/ou ser uma mistura de ar que não foi propriamente filtrado. Devido às suas dimensões, este tipo de vírus é facilmente arrastado nos caudais de extração dos sistemas de ventilação. Para tal, a velocidade e a turbulência do fluxo tomará importância considerável no dimensionamento deste sistema [7]. Em casos em que a ventilação é assegurada por UTAs, tipicamente utilizada quando há uma necessidade de grandes caudais, foi comprovado que a probabilidade de mistura de ar limpo e contaminado é alta, como referido na obra de P. Kumar *et. al* “*CFD Modeling for Turbomachinery using MRF Model*”, de maio de 2014 citado em [7].

No sentido de garantir a qualidade do ar, por vezes pode ir-se em sentido contrário ao caminho da eficiência energética parecendo, aparentemente paradoxal, que ambos os parâmetros sejam cumpridos de maneira barata e eficiente. Para tal, Lipinski *et. al* [7] menciona uma estratégia que recorre à ventilação mecânica e à ventilação natural. Esta solução acarreta algumas dificuldades na parte da ventilação natural visto que não são controláveis parâmetros tais como: velocidade do vento, humidade relativa do ar exterior ou sentido do fluxo, dificultando o controlo do espaço. Assim, é aconselhado que sejam automatizados os controlos das aberturas das janelas (vidros e/ou persianas). Na obra de Hopper e McCubbin “*Natural Ventilation Harnessing the environment for building ventilation*”, de 2019 citado em [7] encontram-se evidências que a ventilação natural poderia extrair os poluentes do espaço para uma conduta, como evidenciado na Figura 1.

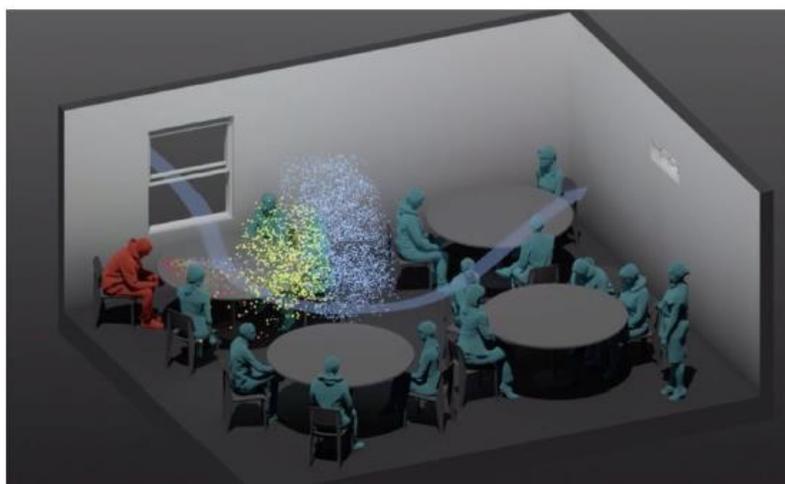


Figura 1 - Simulação que evidencia que a ventilação natural (janela aberta) extrai os poluentes para uma conduta no espaço [7].

No sentido de garantir os valores de segurança, pode recorrer-se a sensores e sondas que devem ser integrados num sistema inteligente de energia que permite o controlo de consumos energéticos e, nos edifícios se traduzirá num BMS ou BEMS. O BEMS recorre a técnicas de controlo tais como: PID, lógica *fuzzy* ou algoritmos genéticos. Este sistema permite o controlo do sistema ativo, nomeadamente o sistema de AVAC [5]. Um sistema BEMS permite ainda a integração de fontes de energia renováveis tais como: energia fotovoltaica, solar ou geotérmica, permitindo uma maior facilidade de os sistemas novos irem de encontro às metas estabelecidas no PNEC 2030.

2.3. CONFORTO TÉRMICO

A avaliação do conforto térmico, cuja definição passa pela definição da qualidade do ar interior, expressa na norma apresentada no capítulo 2.2, pode ser um bom mecanismo para avaliar a adaptação do sistema AVAC às necessidades, já que se controla a humidade, temperatura, velocidade do ar e, por vezes, a concentração de COVs. Dito isto, contraria-se a ideia comum que o conforto térmico passa apenas por um valor de temperatura agradável. A ideia de um índice que conseguisse limitar em valores o que é o conforto térmico surge com o PMV (*predicted mean vote*). O PMV prevê a resposta de um grupo grande de pessoas de acordo com a escala da sensação térmica estabelecida pela ASHRAE [8]. Neste sentido, pode ser feita uma correlação entre a radiação térmica emitida pelo corpo humano num certo ambiente e o fluxo de calor necessário para o conforto ideal para a realização de uma certa atividade [9].

Para tal, a ASHRAE em 2005 quantificou o PMV, que passa por 3 noções [8]:

- Neutro, para valores próximos de 0;
- Muito frio, para valores próximos de -3;
- Muito quente, para valores próximos de +3;

Para tal, Mařík *et al.* fizeram um estudo que mostra a distribuição do que é, num determinado grupo de pessoas numa sala, o conforto térmico, apresentado na Figura 2.

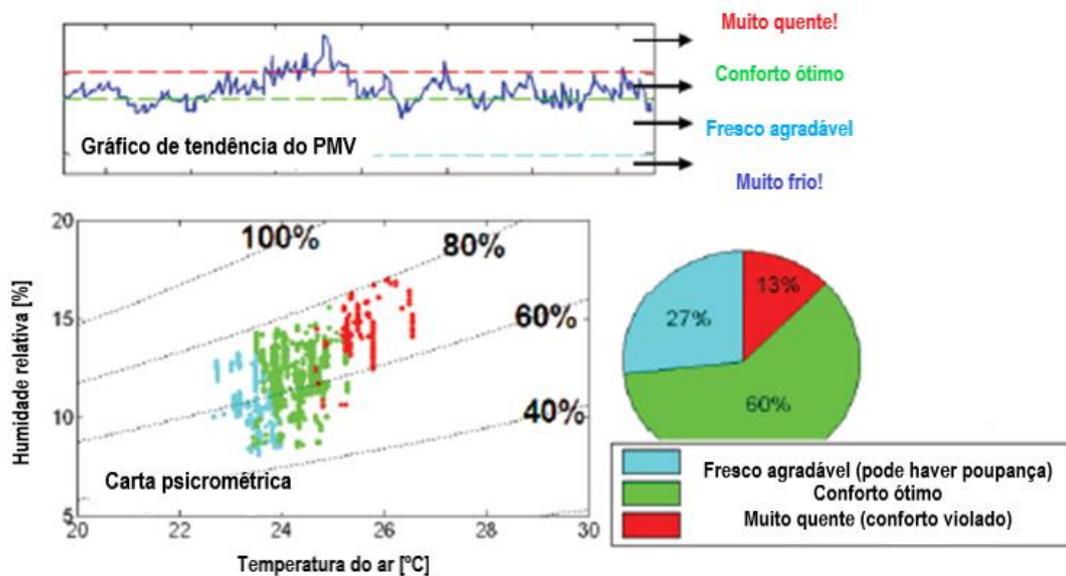


Figura 2 - Conforto térmico numa sala (adaptado de [10]).

De notar que a zona preenchida a verde, sem qualquer tipo de interseção seja da zona “fresco agradável” ou “muito quente!”, tem variação de aproximadamente 1 °C e de 10 % de humidade, podendo inferir-se, assim, que mesmo num espaço de conforto pode ter-se *setpoints* diferentes, requerem menos correções ao ar de insuflação, permitindo assim maior eficiência energética. Esta relação com: eficiência energética; custo inicial; conforto térmico; entre outros irá tornar o sistema mais ou menos complexo, consoante os diferentes parâmetros que se deseja controlar sincronamente.

Para que se atinja o conforto térmico, a envolvente deve ser eficiente e, em Portugal, o cumprimento dos requisitos mínimos encontram-se na Portaria nº 138-I/2021. Esta portaria faz, entre outros, a regulamentação dos requisitos mínimos de desempenho energético relativos à envolvente dos edifícios (habitação ou C&S) e aos sistemas técnicos e a respetiva aplicação em função do tipo de utilização e específicas características técnicas [11].

2.4. DIFICULDADES PARA OBTENÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

As alterações que implicam a construção de um sistema BEMS face ao já existente podem acarretar ceticismo à mudança, além de outros fatores importantes, como o custo inicial da alteração. Na obra de Vogel *et al.* “Categorizing barriers to energy efficiency in buildings”, de 2015 citado em [2] são apontadas 38 barreiras para a existência de edifícios mais eficientes, divididas em três campos:

- Projeto (falta de interesse ou falta de informação);
- Setor (resistência à mudança);
- Enquadramento (regras, regulamentos, políticas);

Desta forma, a falta de informação do tema, isto é, a falta de aplicabilidade em contextos semelhantes aos que habitualmente se trabalha, o receio de tornar a obra onerosa e a falta de abertura à modernização do controlo térmico do edifício são vistos como as principais dificuldades, já que na União Europeia e em Portugal a legislação vigente reflete a importância dada à eficiência energética e às metodologias que para esta contribuam, não se prevendo por isso quaisquer entraves neste ponto.

3. CONTROLO CLÁSSICO E CONTROLO ALTERNATIVO

O controlo PID é basilar no controlo clássico sendo aplicado há várias décadas para o controlo autónomo de variados processos industriais, entre os quais o controlo de sistemas AVAC.

Ainda que o PID apresente alguns problemas já desde a sua génese, continua a ser amplamente aplicado na área AVAC. Não obstante, desde o início da década de 2000 vários estudos têm sido apresentados no sentido de apresentar melhoria ou resolver problemas afetos ao PID no sentido de ter um controlo com melhor *performance*.

Assim, no sentido de entender os potenciais erros, falhas e melhorias a implementar para as corrigir, será feito de seguida uma descrição dos sistemas PID.

Uma alternativa ao dito controlo clássico poderá ser um modelo que tem por base os princípios da inteligência artificial ou inteligência computacional.

Este tipo de controlo diferencia-se do controlo PID por ser mais inteligente já que aborda variáveis que o controlo PID não tem em conta, nomeadamente condições externas ao edifício tornando-se, assim, o sistema AVAC mais responsivo às condições do espaço. Este tipo de controlo não torna apenas o modelo mais inteligente, mas também permitirá uma poupança energética e, alinhado para tal, uma poupança financeira, tornando-se apetecível para as empresas. Estes modelos mais avançados, adaptáveis e conectáveis são a base para a tangibilidade dos sistemas BMS ou BEMS, premissas fundamentais da UE para as metas de descarbonização de 2030 e, principalmente, 2050.

Pode considerar-se que a otimização que um controlo adaptativo traz, pode passar por um ou ambos dos seguintes ideais [12]:

- Obter um elevado nível de conforto, tendo por base o conforto térmico e a qualidade do ar;
- Obter elevada eficiência energética minimizando desta forma o custo de manutenção do edifício;

3.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DOS SISTEMAS PID

Relativamente ao tipo de controlo, este pode dividir-se em dois formatos diferentes: controlo de malha aberta (*open loop*) e controlo de malha fechada (*closed loop* ou *feedback*). O valor de saída num controlo de malha aberta não apresenta uma influência direta na ação de controlo, ou seja, um controlador *open loop* antecipa o efeito de uma variável externa ao sistema e ajusta o *setpoint* de forma a que o *offset* não seja excessivo [8]. Na Figura 3 encontra-se a esquematização do sistema de controlo de malha aberta.

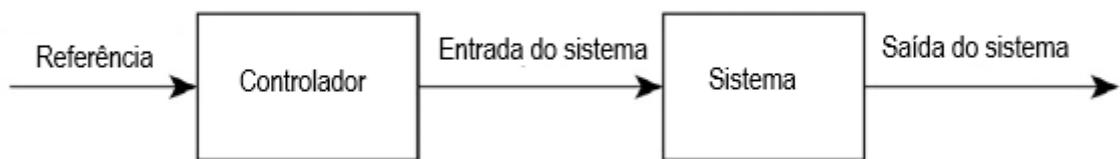


Figura 3 - Representação esquemática do controlo de malha aberta (adaptado de [13]).

Neste tipo de controlo, a saída não é medida nem realimentada para comparação com a entrada, não sendo por tal desejável a aplicação num sistema AVAC onde a possibilidade de interferências indesejáveis pode ocorrer com frequência elevada.

Por outro lado, o controlo de malha fechada utiliza uma medida da saída atual que compara com o valor que se deseja ter na saída. Uma ação de correção é mantida até que o *setpoint* esteja num valor desejado ou perto do desejado (tolerância admitida) [8]. Na Figura 4 encontra-se a esquematização do sistema de controlo de malha fechada.

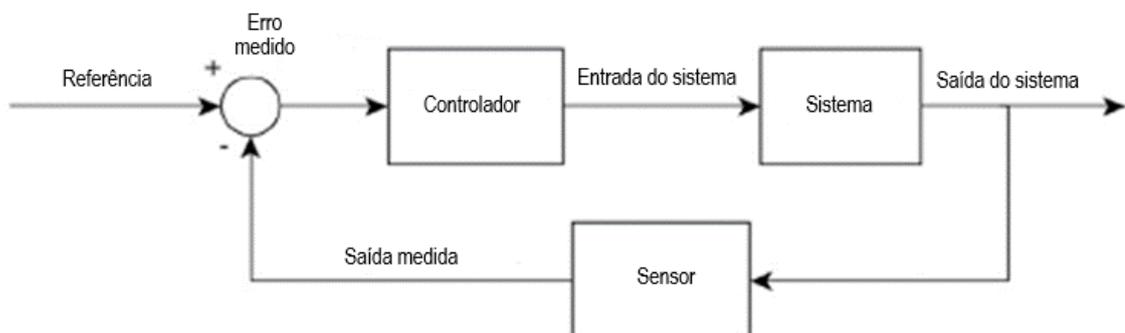


Figura 4 - Representação do controlo de malha fechada (adaptado de [13]).

O controlo PID insere-se nesta tipologia de controlo, onde serão efetuados três tipos de ações: proporcional, integral e derivativo.

Este tipo de controlo surgiu no ano de 1939, tendo sido desde então aplicado em diferentes campos, sendo a sua utilização difundida de forma considerável até que, 50 anos depois, em 1989, 90 % dos controladores utilizados na indústria japonesa (reconhecida pela eficácia e inovação) eram controladores PID. Nos dias atuais, com nuances no seu formato original ou não, os controladores PID continuam a ser amplamente usados, não sendo o setor AVAC exceção [14].

O controlo clássico, nomeadamente o controlo PID, assenta em princípios teóricos que o descrevem como um controlo do tipo caixa branca. Esta técnica de modelação de controlo consiste em modelos detalhados com base nos princípios físicos dos acontecimentos tendo por base conceitos algébricos (*i.e.*, matrizes) e equações diferenciais ordinárias e equações diferenciais parciais. Ainda que seja possível modelar com detalhe tendo por base os fundamentos físicos, esta técnica implica muito poder de processamento e, dificuldade de calibração que terá efeitos pejorativos no tempo-real de aplicação e no controlo [13].

3.1.1. IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLO

Ao modelar o controlo, pode ser feita uma escolha entre *controlo de duas posições* ou *controlo modulante*. No primeiro caso, só pode haver duas posições, ou seja, um mínimo e um máximo (*i.e.*, *On/Off*). Na Figura 5 está representado o comportamento de um controlo deste tipo.

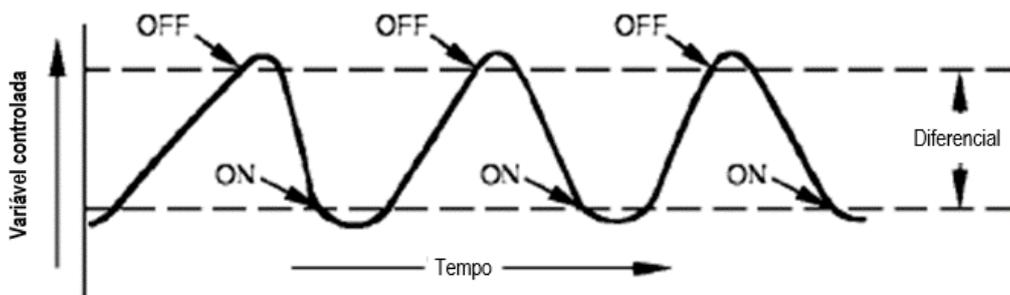


Figura 5 - Representação de um controlo "On/Off" (adaptado de [8]).

No que toca ao controlo modulante, a saída do controlador pode variar em toda a gama de tempo de controlo. Este tipo de controlo está associado a três noções fundamentais [8]:

- **Intervalo de acerto:** número de alterações na variável controlada que são necessárias para que o controlador consiga proceder a alterações de um extremo ao outro no dispositivo controlado. O intervalo de acerto é tanto maior quanto menor o ganho proporcional;

- **Ponto de controlo:** é o valor atual da variável controlada. Esta variação é entre o intervalo de acerto e varia com a carga de mudança do sistema e, eventualmente outras variáveis;
- **Offset:** é a diferença entre o *setpoint* e o ponto de controlo atual, quando o sistema está estável. Pode ser designado erro *steady-state*;

Estas diferentes definições estão representadas na Figura 6.

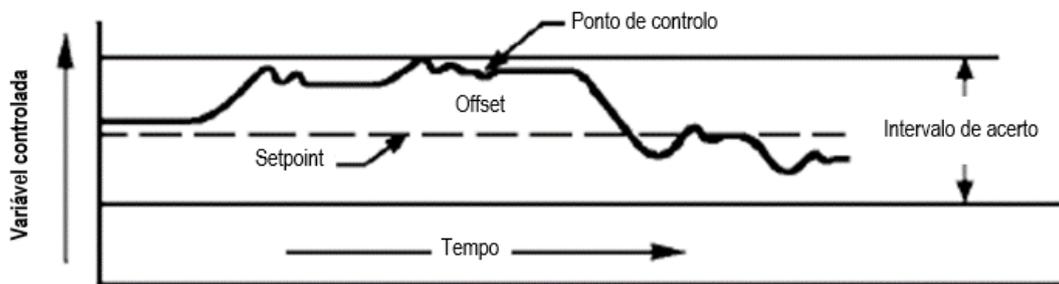


Figura 6 - Representação esquemática dos diferentes termos de controlo modulante aplicado a um controlo proporcional (adaptado de [8]).

O controlo modulante pode ser de três tipos: Proporcional (*P*), Proporcional-Integral (*PI*) e Proporcional-Integral-Derivativo (*PID*).

No controlo proporcional, o dispositivo controlado é colocado proporcionalmente às mudanças na variável controlada. O controlo *P* é representado pela equação (1).

$$V_p = K_p e + V_o \quad (1)$$

Onde:

V_p – saída do controlador;

K_p – parâmetro do ganho proporcional;

e – *offset*;

V_o – parâmetro de ajuste do *offset*;

O termo proporcional faz o erro ser multiplicado pelo ganho (K_p). Ao adicionar mais uma ação de controlo, a ação integral, passa-se a ter um controlo PI, que elimina o *offset* associado ao controlo P. Este controlo é representado pela equação (2) [8].

$$V_p = K_p e + K_i \int e d\theta + V_o \quad (2)$$

Onde:

K_i – parâmetro do ganho integral;

θ – tempo;

Na equação (2), denota-se que quanto maior for o espaço de tempo em que o erro *offset* existir, maior será o número de vezes que a saída do controlador vai mudar no sentido de eliminar o erro. Este controlo resulta no comportamento apresentado no gráfico da Figura 7 [8].

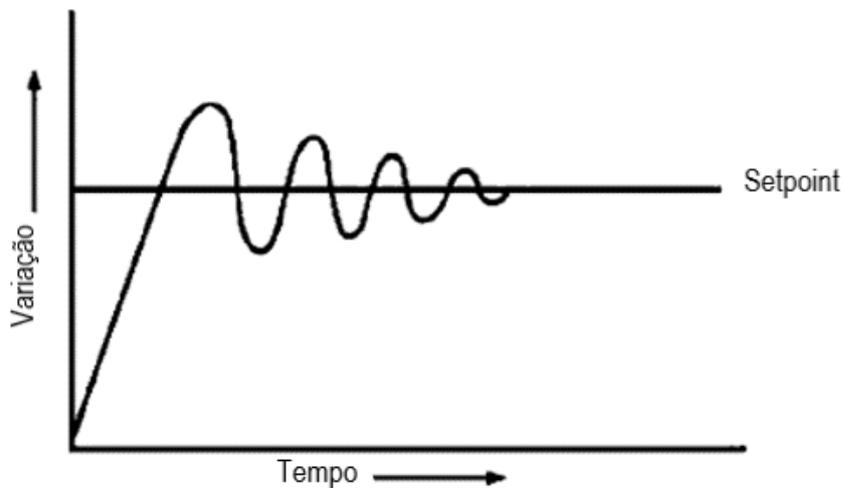


Figura 7 - Representação gráfica do controlo PI, ao longo do tempo (adaptado de [8]).

O termo integral faz o erro e a sua duração serem multiplicados pelo ganho (K_i). Por fim, existe a adição da ação derivativa. O controlo irá variar mediante o valor da derivada do erro, como apresentado na equação (3) [8].

$$V_p = K_p e + K_i \int e d\theta + K_d \frac{de}{d\theta} + V_o \quad (3)$$

Onde:

K_d – parâmetro do ganho derivativo;

$\frac{de}{dt}$ – derivada do tempo do erro;

O termo derivativo, faz com que o controlador tenha relativa capacidade de antecipação, fazendo com que a resposta seja mais rápida e a estabilidade também aumente, por outro lado a dificuldade de ajuste do controlador aumenta igualmente, sendo uma tarefa mais difícil face a um controlador PI [8].

Sabendo que o controlo PID se insere numa ótica de controlo do tipo caixa branca, logo recorre aos fundamentos matemáticos, deve ser exposta a lógica seguida para a obtenção de um modelo funcional.

A função de transferência é a transformada de Laplace que descreve a relação entre a entrada (*input*) e a saída (*output*) de um sistema, sendo que a função de transferência se baseia num sistema e a transformada de Laplace se baseia num sinal apenas. Desta forma, pode ser criada uma relação expressa pela equação (4) [15].

$$X(s) = G(s)F(s) \quad (4)$$

Onde:

$X(s)$ – Transformada da saída;

$G(s)$ – Função de transferência representativa do sistema;

$F(s)$ – Transformada da entrada;

Esta função de transferência de um sistema de equações que representa o sistema, invariável no tempo, equações estas diferenciais lineares, é definida pela transformada da saída sobre a transformada da entrada, como representado na equação (5) [15].

$$G(s) = \frac{\mathcal{L} [saída]}{\mathcal{L} [entrada]} \Big|_{\substack{\text{condições} \\ \text{iniciais} \\ \text{nulas}}} \quad (5)$$

Porém, como acima expresso, este sistema satisfaz apenas problemas lineares, logo caso o sistema seja não-linear, este deve ser linearizado.

A característica que mais importância tem num sistema de controlo é a estabilidade absoluta. Este sistema é estável se a sua saída volta ao estado de equilíbrio caso o sistema seja sujeito a uma perturbação [16].

No sentido de analisar a estabilidade absoluta do sistema, pode recorrer-se ao critério de Routh-Hurwitz. Este critério permite saber se numa equação polinomial existem ou não raízes instáveis sem que haja a necessidade de resolver a equação na sua totalidade. A equação característica de um sistema em malha fechada deriva da função de transferência que caracteriza o sistema e pode ser exemplificada pela equação (6).

$$a_0s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_{n-1}s + a_n = 0 \quad (6)$$

Onde é admitido que todos os coeficientes são números reais e as raízes nulas são removidas. Caso algum dos coeficientes seja zero ou negativo na presença de algum coeficiente positivo, uma ou mais raízes é imaginária ou tem componente positiva real e, assim, o sistema é instável. Se tal não se verificar, o procedimento deve continuar e os coeficientes devem ser dispostos numa matriz e calcular os coeficientes a, b, c, d, e mediante a ordem n do polinómio. A eventual alteração de sinal na matriz reflete a existência de raízes com componentes reais positivas, logo o sistema será instável [17].

Há ainda a necessidade do controlador PID ser submetido a uma afinação dos parâmetros. Um dos métodos de afinação é o método de Ziegler-Nicholas que tem duas variações, nomeadamente o 1º método e o 2º método. Num controlador PID, adequa-se o 2º método.

Com esta metodologia, deve-se reescrever a equação (3) na equação (7).

$$V_p = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t)dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (7)$$

Seguidamente, assumem-se os termos $T_i = \infty$ e $T_d = 0$. Inicialmente, usando apenas a ação de controlo proporcional, aumenta-se o valor de K_p de 0 até um valor crítico de K_{cr} em que a saída apresente as primeiras oscilações. Desta forma, o ganho crítico e respetivo período

crítico P_{cr} , são determinados experimentalmente. Na Tabela 2 encontra-se os valores de K_p , T_i e T_d , fruto do segundo método de Ziegler-Nichols.

Tabela 2 - Regras de ajuste do controlador com base no segundo método de Ziegler-Nichols.

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0,5 K_{cr}$	∞	0
PI	$0,45 K_{cr}$	$\frac{1}{1,2} P_{cr}$	0
PID	$0,6 K_{cr}$	$0,5 P_{cr}$	$0,125 P_{cr}$

Tome-se como exemplo o sistema da Figura 8.

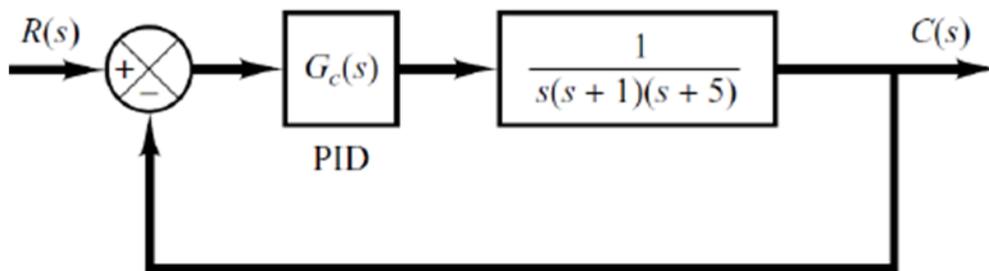


Figura 8 - Representação de um sistema de controlo $G(s)$ [18].

Neste sistema, a função de transferência será dada pela equação (8).

$$G(s) = K_p \left[1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] \quad (8)$$

Ao definir $T_i = \infty$ e $T_d = 0$, a função de transferência é dada pela equação (9).

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K_p}{s(s+1)(s+5) + K_p} \quad (9)$$

Através do critério de estabilidade de Routh, o valor de K_p que faz com que o sistema seja marginalmente estável (raiz no semi-plano direito). A equação característica, com base na

equação (9) é: $s^3 + 6s^2 + 5s$. De seguida, encontra-se a matriz de Routh da equação característica.

$$\begin{array}{ccc} s^3 & 1 & 5 \\ s^2 & 6 & K_p \\ s^1 & \frac{30 - K_p}{6} & 0 \\ s^0 & K_p & 0 \end{array}$$

Posteriormente, calculando o período crítico do sistema, através das raízes imaginárias do polinómio, que no caso é $\omega = \sqrt{5}$. Assim, o $P_{cr} = \frac{2\pi}{\omega} = 2,8099$.

Pela Tabela 2, o controlador PID pode ser caracterizado, dado estarem obtidos os valores necessários. O controlador PID do caso exemplificado está parametrizado na Tabela 3.

Tabela 3 - Parametrização do controlador PID exemplificado.

	PID Exemplo
K_p	18
T_i	1,405
T_d	0,35124

3.1.2. PRINCIPAIS FALHAS DO SISTEMA PID

O controlo PID apresenta falhas intrínsecas ao seu corrente funcionamento que, por vezes são colmatadas ou reduzidas através de alterações numa ou mais etapas do seu funcionamento (*i.e.*, *Fuzzy* PID), porém não resolvidas na sua totalidade.

Os problemas associados ao PID encontram-se em diversas fases da implementação do controlo, nomeadamente [19]:

- i. **Dificuldade em controlar tanto o encontro ao valor de *setpoint*, como os processos de rejeição de perturbações**

O controlador está desenhado com base em perturbações que alteram rapidamente a dinâmica do desejado. Assim, para casos onde as perturbações tenham gradualmente um efeito indesejado na dinâmica, a resposta do controlador será lenta, ou seja, as perturbações da saída serão muito lentas fazendo com que a realimentação demore até que reflita o que está a acontecer verdadeiramente.

No sentido de exemplificar estas perturbações da saída e entrada, bem com os efeitos nefastos na resposta do sistema, encontra-se na Figura 9 uma esquematização de um sistema com estas perturbações associadas.

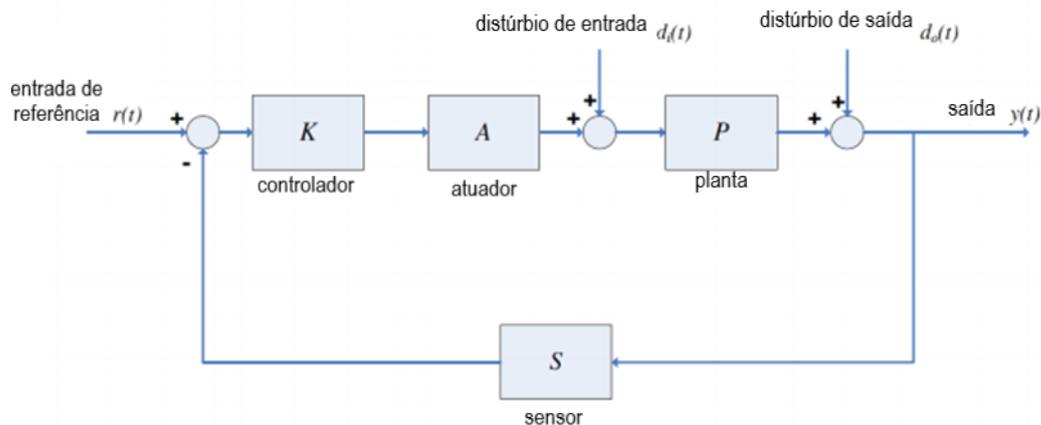


Figura 9 - Representação esquemática de um sistema de controlo com perturbações na entrada e na saída (adaptado de [19]).

Num cenário onde este sistema é fruto de uma aplicação para controlo de um sistema AVAC de um edifício, podem ser definidas as perturbações da entrada e da saída, respetivamente, da seguinte forma:

A temperatura das paredes exteriores de um edifício é afetada pela temperatura ambiente circundante ao edifício bem como a intensidade da radiação solar incidente nessas paredes. Dependendo da constituição das paredes (*i.e.*, resistência térmica do isolamento, número de camadas), a troca de calor do exterior para o interior irá variar podendo afetar com maior ou menor intensidade a temperatura no interior do edifício. Assim, estes dois parâmetros são considerados como perturbações da entrada;

Por outro lado, se o sensor que mede a temperatura está numa localização que não representa verdadeiramente o comportamento do espaço, como por exemplo uma ponte térmica ou zona do solo, este sensor pode estar sujeito a agentes externos como humidade ou radiação, fazendo com que a leitura esteja sujeita a perturbações da saída.

ii. Dificuldades em controlar o processo de integração

O método de Ziegler-Nicholas considera apenas um ponto do gráfico de Nyquist, portanto o ajuste do controlador pode ser fraco.

iii. Dificuldades em tratar problemas do tipo rampa unitária para encontro do *setpoint* ou rejeição de perturbações

Neste tipo de problemas, poucas frequências ou distúrbios afetam a saída do processo, porém o controlador não consegue manipular a mudança de *setpoint* neste sistema rampa unitária pelo facto de ter apenas um integrador.

iv. Dificuldades em controlar processos com elevado *time delay*

Habitualmente, a ação de controlo garante uma resposta mais rápida através de um sistema de malha fechada do que de um sistema de malha aberta. Porém, caso o *time delay* seja substancialmente maior que o *time constant* do processo, faz com que num sistema de malha fechada haja uma redução abrupta da saída seguido de um aumento igualmente abrupto, não havendo, portanto, uma estabilização junto do *setpoint*.

Como o controlo PID usa o erro de *feedback* que é constante ao longo do tempo, faz com que a resposta desejada tenha implicações consideráveis. Este problema é maior quanto maior é o *time delay* e, casos como os sistemas AVAC que envolvem processos termodinâmicos cujas alterações não são imediatas e, assim sendo, o *time delay* não pode ser curto, fazem com que o controlo PID seja problemático.

v. Limitações quando o modelo é de ordem elevada

Se um modelo for de ordem elevada, raramente se aplicam regras de ajuste do controlador que sejam simples, exceto regras de Ziegler-Nichols, ainda que com a contrapartida que a performance sob estas regras seja fraca.

Um exemplo, é a obtenção de uma resposta oscilatória e fora do seu *setpoint* em processos sub-amortecidos, como representado na Figura 10, problema este que está ligado com a dificuldade em controlar o processo de integração.

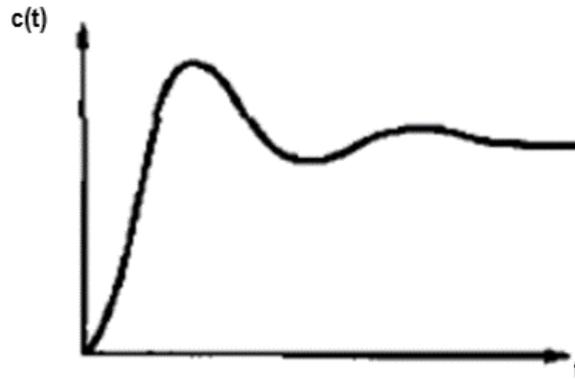


Figura 10 - Representação de uma resposta sub-amortecida [16].

Desta forma, denota-se particular dificuldade do controlo PID em responder às diferentes dificuldades advindas de agentes externos, principalmente em cenários termodinâmicos. Estes problemas refletem as lacunas que esta técnica com origem antecedente à II Guerra Mundial apresenta para acompanhar com as diferentes exigências que os sistemas AVAC apresentam, não sendo apenas necessário atingir objetivos de conforto, mas também saúde pública, eficiência energética e integração num sistema complexo de controlo geral do edifício. Assim, reforça-se a ideia de uma técnica anacrónica que não satisfaz as necessidades, sendo por tal necessário envergar por outros métodos alternativos.

3.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DE CONTROLOS ALTERNATIVOS

Um controlo autónomo e inteligente é algo que tem sido desenvolvido e aprimorado paralelamente com o desenvolvimento computacional das últimas décadas. Desta forma, na área AVAC também têm sido aplicados diversos modelos de controlo, com diversas funcionalidades influenciando mais ou menos parâmetros, em função do desejado pelo engenheiro de *software* e/ou engenheiro mecânico.

Considerando que o início deste controlo autónomo passou pela implementação dos controladores *On/Off* e seguidamente o controlo PID, como já anteriormente explicitado, um melhoramento e/ou desenvolvimento de técnicas significativamente mais eficientes foram desenvolvidos, principalmente desde meados da década 90, e postos à prova em modelos de simulação principalmente desde o início da década transata.

Com o desenvolvimento do *software* e do *hardware*, o controlo e/ou gestão de um edifício é mais abrangente do que nos primórdios do controlo autónomo. Atualmente, os diferentes modelos permitem controlar uma panóplia de parâmetros para além da que se espera de um sistema AVAC, a temperatura. Graças a algoritmos otimizados (*software*) e, por exemplo, sensores diversos, mais precisos e exatos (*hardware*), que permitem assim a recolha de dados efetivamente semelhantes ao meio, pode-se utilizar métodos que tem uma melhor *performance*, isto é, cumprir os *setpoints* com a utilização de menos energia, em diversos parâmetros tais como:

- Conforto térmico;
- Conforto visual;
- Consumo de energia;
- Custo da energia
- Preferência dos ocupantes;
- Previsão de ocupação;
- Qualidade do ar interior;
- Utilização de energias renováveis;

A possibilidade de controlo de mais parâmetros implica igualmente uma maior complexidade do sistema, desde a sua modelação até às máquinas que são capazes de executar o controlo. Este controlo, para que seja feito da forma mais otimizada possível, não

depende apenas da capacidade computacional, mas igualmente de um fator-chave, a recolha de dados. O controlo pode ser com base na previsão, otimização ou diagnóstico, tal como apresentado na Figura 11.

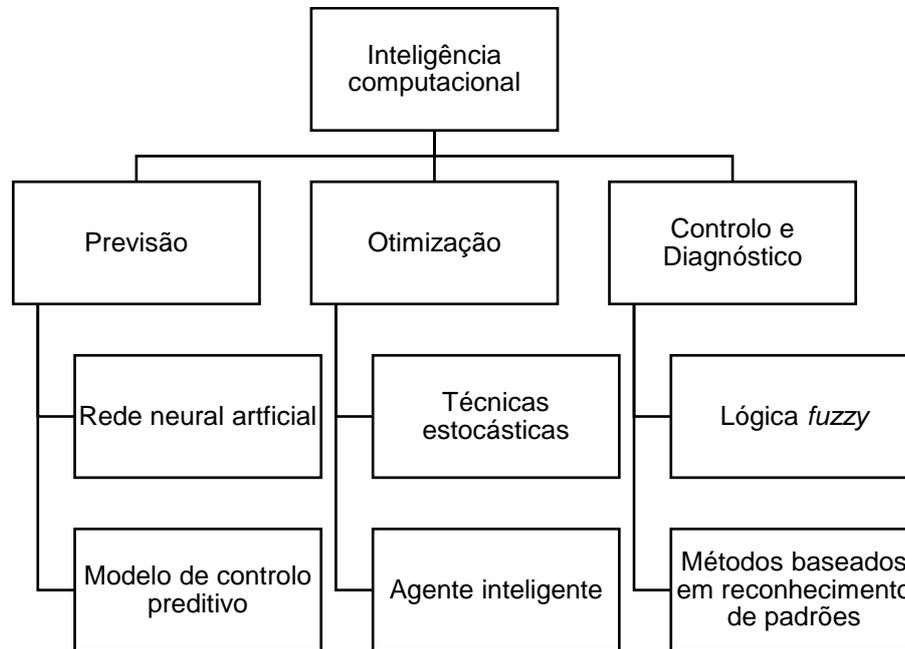


Figura 11 - Representação das possibilidades de previsão, otimização e controlo com base na inteligência computacional (adaptado de [20]).

Os dados obtidos para a formulação do modelo e a constante atualização destes para que o sistema consiga prever de forma mais rápida e otimizada serão fundamentais. Com a evolução dos sistemas de armazenamento de dados e a sua interligação com diferentes equipamentos, o potencial de melhoramento com dados recolhidos no presente é consideravelmente maior que no início da década passada e permite uma utilização mais eficiente dos equipamentos. Uma ferramenta importante é a nuvem (*cloud*), que permite o armazenamento de dados online levando a um outro fator importante: a interoperabilidade do sistema. A partir dos dados da nuvem o sistema poderá fazer previsões dos acontecimentos com base, ora em dados previamente retirados do espaço, ora em outros tipos de dados que sejam retirados em condições e ambientes semelhantes ao que é desejável controlar. Neste campo a IoT torna-se um conceito importante a abordar, já que permite a conexão de diferentes dispositivos, interligando os diferentes dados retirados destes, fazendo até as melhorias através de sistemas embebidos [13]. Desta forma obtém-se uma rede mais inteligente, diminui-se a probabilidade de erros ou falhas do sistema, graças à quantidade e qualidade dos dados e, inclusivamente, diminuiu-se os custos de operação.

No sentido de entender as diferentes exigências que os variados controlos aplicáveis em AVAC precisam, encontra-se na Figura 12, apresentada de seguida, a divisão em grupos das diferentes técnicas.



Figura 12 - Diferentes técnicas de modelação de sistemas de controlo (adaptado de [13]).

Resumidamente, as técnicas podem ser caracterizadas da mais empírica à mais baseada nos dados que já existem no histórico do espaço, sendo da caixa branca à caixa preta, esta classificação.

A técnica da caixa branca encontra-se detalhada no capítulo 3.1.1.

No que toca à técnica da caixa cinzenta, esta pode ser considerada o meio termo entre as restantes técnicas. Esta técnica recorre aos modelos físicos (recorrendo igualmente a matrizes e equações diferenciais ordinárias), mas os parâmetros são com base nos dados recolhidos e não por valores previamente estipulados. Porém, se por um lado esta técnica não é tão rigorosa como a da caixa branca, é difícil de replicar a mesma modelação para um sistema diferente e as simplificações previstas dependem da computação disponível. Por outro lado é mais fácil de aplicar num sistema do que a técnica da caixa branca, pois não requer tanta capacidade de processamento e é significativamente mais eficiente em adaptações do sistema em tempo-real [13].

Por fim, a técnica da caixa preta é a que mais assenta no tratamento de dados existentes tais como: temperatura exterior, temperatura interior, humidade relativa, taxa de ocupação, e praticamente despreza os modelos físicos. De certa forma, esta técnica é a que fará mais sentido num sistema cuja replicabilidade e previsibilidade dos acontecimentos é maior, como por exemplo, no setor industrial, onde o número de máquinas a trabalhar e pessoas será constante. Esta técnica tem como vantagem a eficiência no processamento e flexibilidade do modelo bem como a eficiência na adaptação e controlo em tempo-real. A falta de fundamentos físicos pode, por vezes, tornar-se um problema na implementação do controlo [13].

Para tal deve fazer-se uma caracterização dos diferentes tipos de controlo, estando estes apresentados na Figura 13.

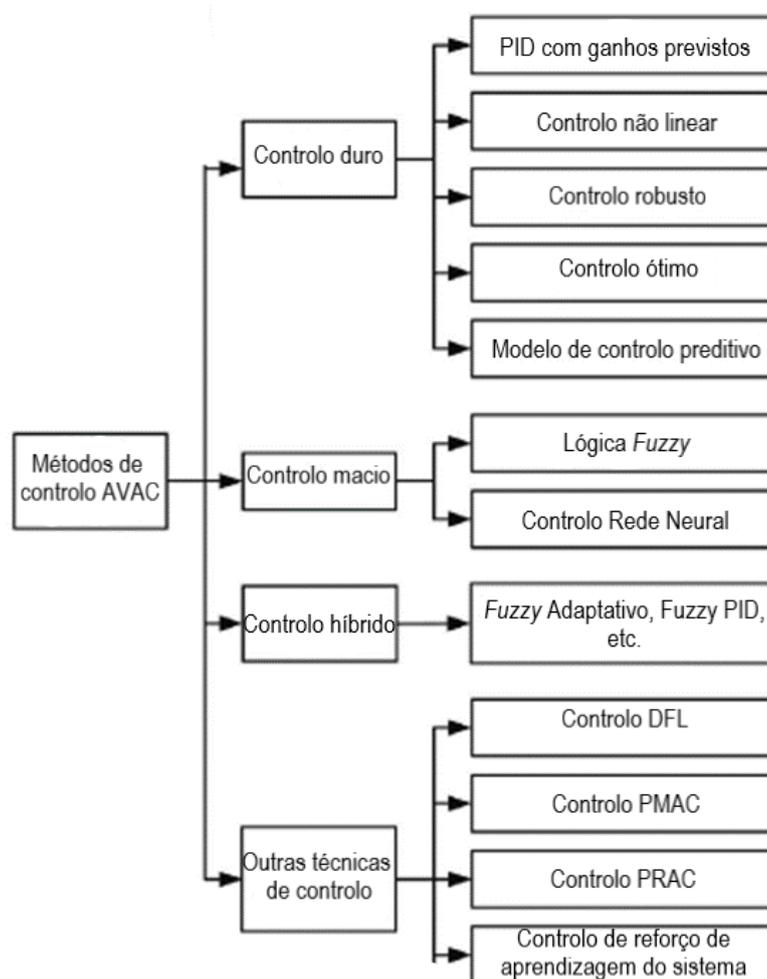


Figura 13 - Classificação dos métodos de controlo macio, duro e híbrido dos sistemas AVAC, respetivamente (adaptado de [9]).

3.2.1. CONTROLO DURO – MODEL PREDICTIVE CONTROL

Do *Hard Control* (Controlo Duro) destaca-se o *Model Predictive Control* (Modelo de Controlo Preditivo), já que há uma bibliografia extensa que estuda a sua aplicação na área AVAC, tendo uma percentagem deles sido utilizada para o desenvolvimento deste trabalho.

O modelo de controlo preditivo, ainda que seja uma técnica com aproximadamente 40 anos, tendo surgido em meados dos anos 80, só na última década é que tem sido abordado de forma mais concreta os seus prós e contras. Ainda que o número de artigos que enfocam no tema tenha crescido a um bom ritmo, como referido nas obras de Yao e Shekhar [21] e de Serale *et al.* [12], ainda existem muitas dificuldades na criação de um modelo que responda a todas as necessidades exigidas do sistema AVAC e seja replicável para o mesmo tipo de meios.

No momento de análise para a transição de um sistema de controlo diferente do convencional, ou seja, um sistema de controlo PID, deve ter-se em conta três fatores [21]:

- Comportamento dinâmico do sistema;
- Incerteza na previsão de perturbações;
- Aplicabilidade e viabilidade do método do controlo;

Comparativamente ao controlo PID, o MPC destacar-se-á na análise da dinâmica do sistema e na previsão das perturbações.

O controlo preditivo é capaz de controlar vários subsistemas associados ao sistema AVAC, tendo em conta aspetos que um controlo dito convencional não tem, nomeadamente o armazenamento passivo e ativo da energia térmica do edifício, pré-aquecimento ou pré-arrefecimento do edifício à noite e a forma como é utilizada a eletricidade da rede [10]. Este último parâmetro pode revelar-se particularmente interessante no contexto atual, onde a fatura energética tem aumentado consideravelmente, pelo contexto de incerteza dos mercados dos hidrocarbonetos fruto de constrangimentos nos fornecimentos e/ou embargos. Assim, uma utilização mais inteligente da energia com o aproveitamento de fontes próprias (*i.e.*, geotérmica, onde as temperaturas do furo sejam próximas das temperaturas de circulação do fluido dos permutadores) nos momentos de picos da rede e a utilização da eletricidade da rede durante a noite, onde o custo por kWh é mais baixo pode resultar numa poupança significativa. Na Figura 14 encontra-se expresso o potencial de poupança energética entre diferentes controlos.

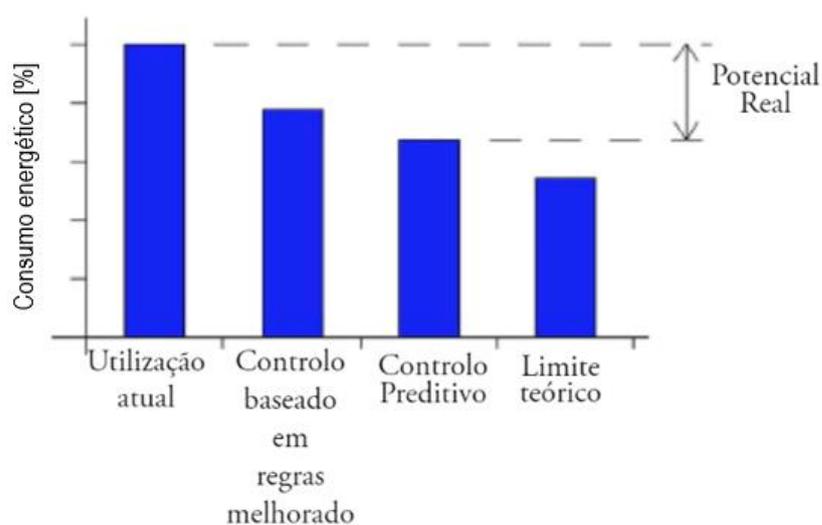


Figura 14 – Representação do potencial real de diminuição do consumo entre a utilização atual e o controlo preditivo (adaptado de [13]).

Acima, deve ter-se especial atenção ao “Utilização Atual” que remete para um controlo com base no PID e ao “Controlo Preditivo”, já que o potencial real de poupança compara precisamente entre estes dois controlos.

Porém, para que estas adaptações sejam realizáveis há necessidade de investimento em certas áreas, sendo um exemplo os sensores, como os de humidade, que permitirão calcular a necessidade de insuflar ar mais ou menos seco. Por vezes, as dificuldades na melhoria do controlo começam desde logo nesta fase, já que os responsáveis podem ser céticos a este tipo de investimento. Este ceticismo toca com um dos parâmetros muito avaliados pelos acionistas ou responsáveis da empresa, nomeadamente o rácio custo-benefício, ou seja, o tempo de amortização do investimento que irá aumentar à medida que mais alterações são implementadas no edifício, desprezando-se por vezes a poupança energética a curto-médio prazo.

Não obstante, a complexidade dos comportamentos termodinâmicos de um edifício, assim como a complexidade que um sistema AVAC pode ter, tornam o modelo de controlo preditivo um controlo que exige uma extensa análise e cuidada abordagem na seleção das fronteiras do sistema.

O MPC ramifica-se em diferentes modelos que permitirão colmatar diferentes problemas, estando estes apresentados na Figura 15.

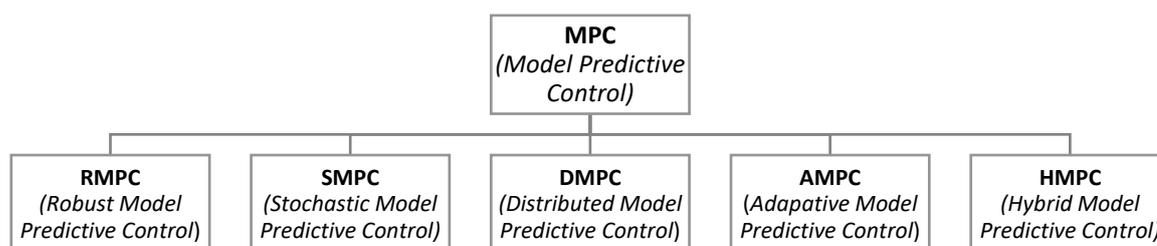


Figura 15 - Diferentes tipos de modelos de controlo preditivo [12].

As diferenças entre as variantes de MPC acima apresentadas prendem-se maioritariamente na sua futura aplicação, pois a base é comum a todos. O RMPC é um modelo que consegue manter as especificações programadas bem como a estabilidade em qualquer cenário possível, isto é, variações e sinais indesejados do sistema. Desta forma as *limitações* do sistema serão sempre mantidas [12]. Dos modelos desenvolvidos tendo por base esta

metodologia, destaca-se o trabalho de Nagpal *et. al* onde o RMPC foi utilizado para o controlo de um edifício com a presença de incertezas paramétricas, tendo obtido valores de temperatura dentro do intervalo desejado mesmo em situações onde havia um grande número de fatores de distúrbio do sistema [22]. Outro estudo, levado a cabo por Xinhua *et. al*, cujo objetivo era o controlo de temperatura de um sistema de ar condicionado, semelhante ao anteriormente citado, foi levado a cabo e inclusivamente comparado com o controlo convencional PID, denotando-se um cumprimento no que toca ao conforto térmico e melhor cumprimento das fronteiras estabelecidas [23].

Relativamente ao SMPC, um modelo dinâmico estocástico é usado para prever a futura evolução do sistema, onde as perturbações e as limitações são ambas incluídas como variáveis aleatórias com uma probabilidade de acontecimento determinada por uma distribuição (*i.e.*, normal). Habitualmente este tipo de MPC é utilizado para simular as alterações, fruto da ocupação num espaço, onde o autor defende que é o mais adequado para o controlo algorítmico de sistemas AVAC, já que: tem em conta que os efeitos que mais impacto teriam no sistema são igualmente os que menos probabilidade tem de acontecer e o SMPC consegue adaptar-se a distúrbios fora dos previstos [12]. Um estudo realizado por Yu *et al.* com base no SMPC para prever insuflações de caudal que estava preparado para aquecer um espaço e que atipicamente foi necessário o arrefecimento, demonstrou que foi conseguida uma poupança de 30 % de energia comparativamente a um controlo básico, mantendo-se os níveis de PMV dos ocupantes [24].

O DMPC permite a subdivisão do problema, isto é, faz iterações de nível inferior paralelamente, de maneira a reduzir o esforço de processamento do sistema. A utilização do modelo de controlo preditivo distribuído destaca-se particularmente em edifícios que apresentam zonas com diferentes níveis e necessidades de climatização e com um sistema de controlo comum, que levariam a um aumento de processamento do sistema bem como da complexidade do algoritmo de controlo. Na área AVAC, foram realizados estudos onde a variável a otimizar tanto passou pela redução do tempo de processamento, bem como a obtenção do *setpoint* de temperatura como o menor custo financeiro possível, mostrando-se, assim, a flexibilidade que este modelo de controlo apresenta [21].

No que toca ao HMPC, esta designação destina-se a sistemas que incluam variáveis discretas e variáveis contínuas. O modelo de controlo preditivo híbrido melhora a capacidade de um sistema relativamente a alterações dinâmicas e aumenta a estabilidade do algoritmo

de controlo, evitando alterações bruscas e imprevisíveis do sistema. Este tipo de modelo destaca-se particularmente na redução do consumo de energia, como refletido no estudo de Huang *et. al*, onde foi obtida uma redução de 41 % no consumo de energia e cerca de 13 % de poupança nos custos [25]. Esta poupança no consumo de energia foi graças à otimização dos arranques e das paragens da UTA, prevendo as necessidades de insuflação mediante as previsões de ocupação do espaço. Por outro lado, a redução de custos foi graças à otimização da utilização da energia na rede, diminuindo os períodos de consumo em picos da rede.

Foi também denotado um número de estudos que remete para a integração de energias renováveis para o consumo de sistema AVAC levando igualmente a uma redução nos custos energéticos.

3.2.2. CONTROLO MACIO

O *Soft Control* (Controlo Macio) divide-se, segundo a Figura 13, em duas técnicas: *Fuzzy Logic Control* e *Neural Network Control*.

A NNC que também é designada por *Artificial Neural Network (ANN)* é uma técnica que assenta nos princípios da caixa preta. A ANN tem por base o sistema nervoso do ser humano, tendo em conta os neurónios, axónios, dendrites e as sinapses permitindo, assim, que a ANN seja considerado “um sistema de processamento distribuído que armazena conhecimento obtido da experiência e que permite que seja aplicado”, como é referido na obra de Haykin “*Neural networks: a comprehensive Foundation*” de 1994 citado em [20]. Uma representação esquemática do funcionamento da ANN encontra-se na Figura 16.

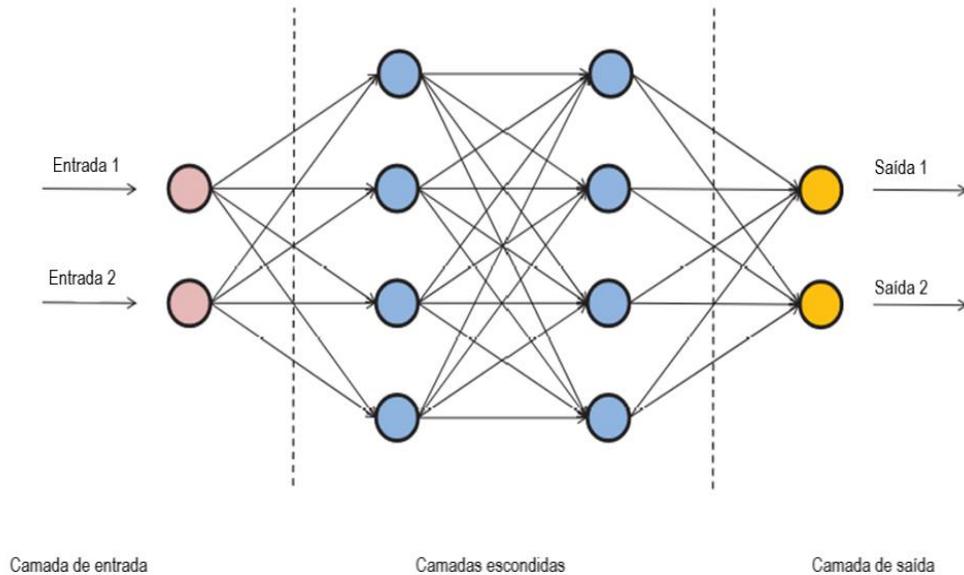


Figura 16 - Representação esquemática de funcionamento da técnica ANN (adotado e adaptado de [20]).

Das três diferentes técnicas de modelação, a ANN insere-se na tipologia caixa preta pois não requer uma informação exaustiva do sistema, mas sim de uma forte base de dados, criando uma relação entre as entradas e as saídas com base nesses mesmos dados. O procedimento utilizado na ANN está apresentado na Figura 17.

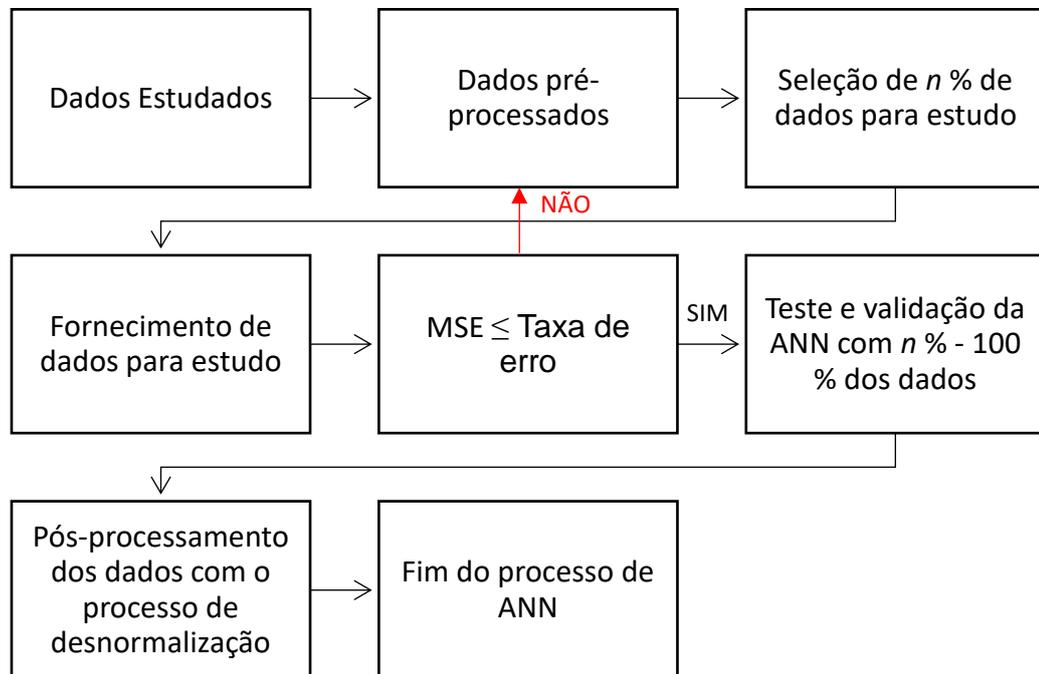


Figura 17 - Procedimento para tratamento de dados na técnica ANN (adaptado de [25]).

A chave para um bom desempenho de um controlo com base na ANN está na obtenção do número correto de neurónios nas camadas escondidas e o número de nós das entradas e nós das saídas, sendo esta a maior dificuldade na modelação de um controlo deste tipo. Esta fase pode tornar-se um problema já que um número baixo de neurónios faz com que haja um controlo com demasiados erros e, por outro lado, um alto número de neurónios traduz-se num sistema sobrecarregado. Habitualmente começa-se com um número de camadas mais baixo e adapta-se mediante os resultados obtidos, ou seja, por tentativa-erro [20].

Como dito anteriormente, a ANN adapta-se a partir de exemplos e cria relações entre as entradas e as saídas e, para tal, é necessário dar um exemplo inicial para que as relações possam ser iniciadas, testadas e validadas. Este tipo de método de treino da ANN divide-se em dois grupos, nomeadamente aprendizagem vigiada e aprendizagem não-vigiada onde a principal diferença se encontra nas entradas. Na aprendizagem vigiada, as entradas e as saídas desejadas são conhecidas pela rede e o método de treino é aplicado no sentido de diminuir o erro entre as saídas desejadas e as verdadeiras saídas que a ANN fornece enquanto que, na aprendizagem não-vigiada, a tipologia das entradas é conhecida e o método de treino é utilizado para descobrir a estrutura escondida num conjunto de dados sem identificação, isto é, não caracterizados ou sem propriedades atribuídas [20].

Na área do AVAC, a aplicação da metodologia ANN pauta-se principalmente pela gestão de energia e/ou do conforto. Na década de 90 começou a haver literatura que suportou este fundamento, como os estudos de Curtiss *et. al*, na obra *“Energy management in central HVAC plants using neurais networks”*, onde em 1994 utilizaram a metodologia ANN para o controlo do sistema AVAC de um edifício de comércio e serviços, com o principal objetivo de realçar os problemas do controlador PID. Este controlo era subdividido, nomeadamente no controlo local, num permutador de tubos de água quente e num controlo global, o sistema de AVAC no seu todo. Dos resultados, denotou-se uma resposta não-linear onde a válvula do permutador tinha um comportamento oscilatório e que o controlo PID dependia fortemente do valor do ganho, valor este que se superior a “2” tornava o sistema particularmente instável. Os autores progrediram no estudo e utilizaram o ANN para o controlo em questão, cuja lógica se encontra apresentada de seguida:

1. Existência de dois controladores ANN;
2. Controlador 1 aprende a relação entre diferentes *inputs*, condições meteorológicas e consumo energético;
3. Controlador 2 prevê as condições ótimas de funcionamento ao ajustar *setpoints local loop*

Dos resultados, evidenciou-se que a ANN superava o PID no comportamento não-linear, atingindo os *setpoints* de forma mais eficiente [20].

Kanarachos e Geramanis, em 1998, também construíram modelos para um controlador ANN que permitiam manter os níveis de temperatura num espaço, servindo de base para um outro estudo, realizado em 2004 por Argiriou *et. al* para o controlo da ventilação de um edifício de escritórios. Em cada um dos casos não foi estabelecida uma relação ótima entre as condições desejadas e as condições externas, resultando em valores que não se traduziam em conforto no espaço, corrigindo-se o problema através da adoção de mais um módulo ANN, capaz de lidar com alterações significativas no *setpoint* da temperatura.

Num panorama mais recente, em 2010, Ning e Zaheeruddin utilizaram um controlo com base na técnica ANN para otimizar o funcionamento de um sistema VAV. Este sistema era utilizado num espaço com duas zonas técnicas diferentes. O sistema era desligado à noite e era reiniciado aquando do início das operações. Com a aplicação deste sistema os autores observaram que o sistema tinha um funcionamento mais próximo do ponto ótimo, apresentando uma melhor resposta a imprevistos e, num cenário de cargas parciais, apresentava maior potencial de poupança de energia, com poupanças de 8 % e 19 % para uma carga total e carga parcial, respetivamente, isto quando comparado com a estratégia convencional de desligar as máquinas no período da noite [26].

Tais factos evidenciam a capacidade que o controlo ANN tem para lidar com os problemas de natureza não-linear de forma mais eficiente que o controlo comum, ainda que com limitações associadas, nomeadamente o equilíbrio entre as camadas e neurónios do modelo, já que mais camadas e neurónios implicam mais tempo de processamento e, também um modelo em que a sua especificidade pode ser tal que não terá qualquer outra aplicabilidade que não a original.

Por outro lado, existe a *Fuzzy Logic Control* (FLC), que também tem por base comportamentos humanos. Se por um lado a ANN tem por base uma rede semelhante à do

cérebro humano, a FLC tem como objetivo principal um sistema que replique a capacidade do ser humano de raciocinar e avaliar imprevistos e/ou problemas [20].

O termo “*Fuzzy Logic*” surge pela primeira vez em 1965, segundo Zadeh, definindo algebricamente e geometricamente o controlo. O autor remeteu para a necessidade de classificar os dados não apenas em valores, por exemplo, “0” e “1”, mas sim numa gama contínua de valores. Esta possibilidade permite que o campo de aplicabilidade da lógica *fuzzy* fosse consideravelmente alargado, especialmente na área do processamento da informação. Esta metodologia de controlo permitiria a resolução dos problemas onde as imprecisões surgiriam da falta de assertividade na definição dos critérios de atuação perante situações atípicas e não das variáveis aleatórias presentes no controlo [27].

A FLC é baseada em três grandes módulos: um “fuzzificador” (*fuzzifier*), um motor de interferência (FIS) e um “defuzzificador” (*defuzzifier*), estando a lógica de funcionamento apresentada na Figura 18, abaixo.

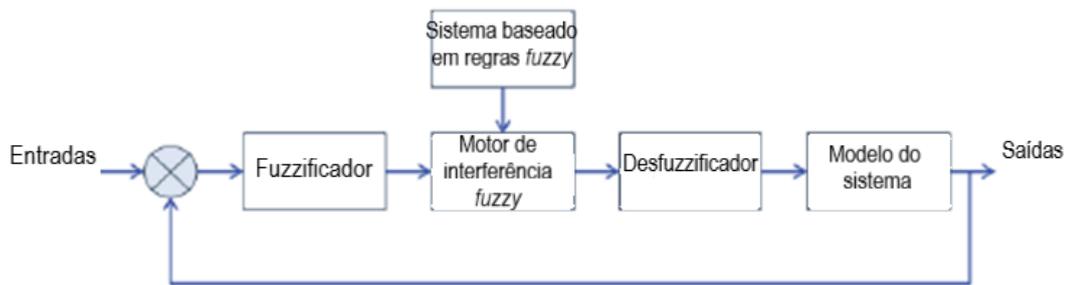


Figura 18 - Representação esquemática da lógica de um controlador *fuzzy* (adaptado de [20]).

No “fuzzificador”, os valores “não-*fuzzy*” são convertidos em valores “*fuzzy*” para que possam ser posteriormente utilizados. De seguida, o motor de interferência *fuzzy* infere uma ação de controlo mediante a entrada dada, previamente convertido, onde habitualmente a regra empregue é a “*If-Then*”. Posteriormente este valor será “defuzzificado” no “*defuzzifier*” para que o valor inserido possa ser um valor de controlo lógico (estilo 0 ou 1). De forma esquemática, encontra-se na Figura 19 o procedimento passo-a-passo realizado na lógica *fuzzy*.

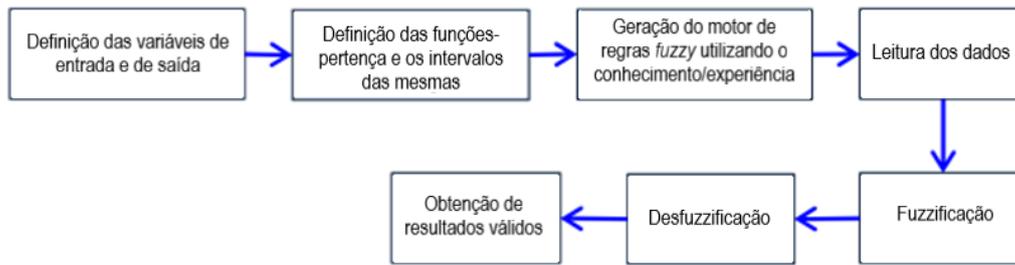


Figura 19 - Representação do procedimento seguido pela lógica *fuzzy* (adaptado de [20]).

Um exemplo da regra “*If-Then*” (“Se-Então”) aplicado à climatização de um edifício pode ser dado como [8]:

- “SE” a temperatura do espaço é alta “E” a temperatura está a descer “ENTÃO” aumentar o arrefecimento um pouco;
- “SE” a temperatura do espaço é alta “E” a temperatura está a aumentar “ENTÃO” aumentar bastante o arrefecimento;

Este exemplo corrobora a capacidade que a lógica difusa tem para copiar, de certa forma, a lógica do pensamento humano.

Em aplicações concretas, os autores fazem questão de fazerem análises comparativas maioritariamente face ao controlo PID.

Em 2001, Ghiaus desenvolveu um modelo *fuzzy* do tipo Sugeno, para o controlador de um ventiloconvector tendo como principal foco a comparação face ao controlador PID. Os resultados mostraram que o modelo *fuzzy* tinha um tempo de estabilização de 100 segundos face aos 225 segundos do controlador PID, reforçando a eficácia de um controlo com esta lógica. Em 2012, Ali abordou a possibilidade de um controlador baseado na lógica *fuzzy* para um sistema de ar condicionado. Este controlador incidia na regulação da velocidade do motor do compressor com o objetivo de reduzir os custos energéticos e atingir o conforto térmico pressuposto, porém os resultados não foram satisfatórios por falta de um número maior de variáveis linguísticas levando, assim, a um nível de fuzzificação baixo. Uma série de estudos foram levados a cabo no início da década de 2010 aplicados principalmente aos EUA e à Europa, refletindo a aplicabilidade da lógica fuzzificada para o controlo de sistemas AVAC [20].

3.2.3. CONTROLO HÍBRIDO

Das inúmeras técnicas que se encontram registadas na literatura relativamente ao controlo dos sistemas AVAC, nenhuma delas consegue ser amplamente transposta para diferentes sistemas, que não o originalmente previsto sem que ocorram problemas de

diferentes tipos, como por exemplo: aumento do consumo energético, alteração do tempo de resposta ou insuficiência no conforto térmico necessário. É difícil encontrar-se uma tipologia de modelo e de controlo que satisfaça plenamente as necessidades do espaço a ventilar [28]. Os métodos de controlo híbridos (*Hybrid Control*) surgem no sentido de colmatar essa falha, isto é, da falta de adaptabilidade quer dos modelos que recorrem totalmente da formulação matemática (controlo duro), ou os que assentam nos dados fornecidos (controlo macio). Das vastas combinações possíveis de serem feitas, tais como: *Fuzzy* adaptativo, ANN adaptativo ou *Fuzzy* PID, há em comum o facto de combinarem a utilização da formulação clássica combinada com a utilização dos dados e conseqüente aumento da adaptabilidade do sistema.

Destas alternativas deve dar-se especial atenção ao *Fuzzy* PID, já que o controlo PID é amplamente utilizado no controlo dos sistemas AVAC e, desta forma, consegue-se uma alternativa com as bases do controlo já existente.

Assim, no *Fuzzy* PID os ganhos do controlador são auto-ajustados através da lógica *fuzzy*, combinando-se assim os dois tipos de controlo. De forma sucinta, com a utilização de um *Fuzzy* PID, tem-se um controlador difuso, que afina os valores de P e I antes de ser feita a ação PID, como apresentado na Figura 20.

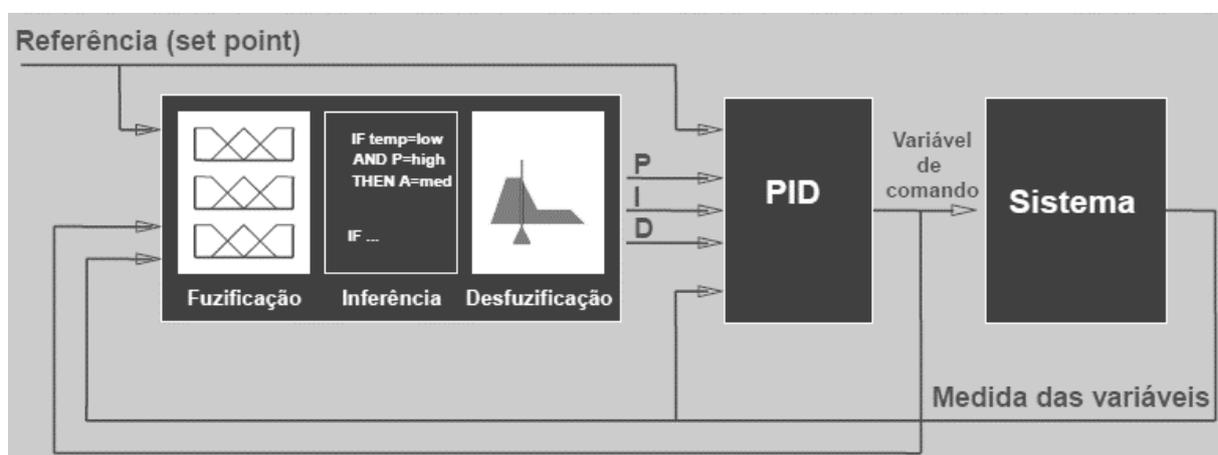


Figura 20 - Representação esquemática de um controlo *Fuzzy* PID [29].

Porém, a complementaridade dos dois não traz apenas os benefícios, mas acarreta igualmente os seus problemas, nomeadamente o conhecimento das necessidades do sistema e experiência de quem modela o controlo bem como a dificuldade de programar e ajustar um controlo que terá que satisfazer uma ampla gama de necessidades, característico dos sistemas AVAC [30].

4. APLICAÇÃO PARA CONTROLO AVAC NUM EDIFÍCIO

A tipologia do edifício é importante para a decisão do tipo de controlo a envergar para o sistema AVAC. Da literatura, diferentes métodos de controlo e respetivos algoritmos foram aplicados para diferentes tipo de edifícios, isto é, em edifícios residenciais um certo tipo de métodos era mais adequado que outros, enquanto para edifícios de comércio e serviços outros métodos e algoritmos eram mais adequados. Nestes últimos inserem-se, por exemplo, os hospitais e os centros comerciais.

O método de controlo a escolher varia não apenas com o tipo de edifício em questão, mas também com a(s) variável(eis) a controlar e, tal como no tipo do edifício, as variáveis tomam um papel importante para a decisão do controlo a utilizar. Assim, no quadro de controlo de temperatura e humidade de uma unidade de produção, o MPC e a Lógica *Fuzzy* respondem de forma mais satisfatória às necessidades. A escolha adequada de um método de controlo e/ou otimização é importante já que traz um benefício considerável nos consumos energéticos, como representado na Figura 21.

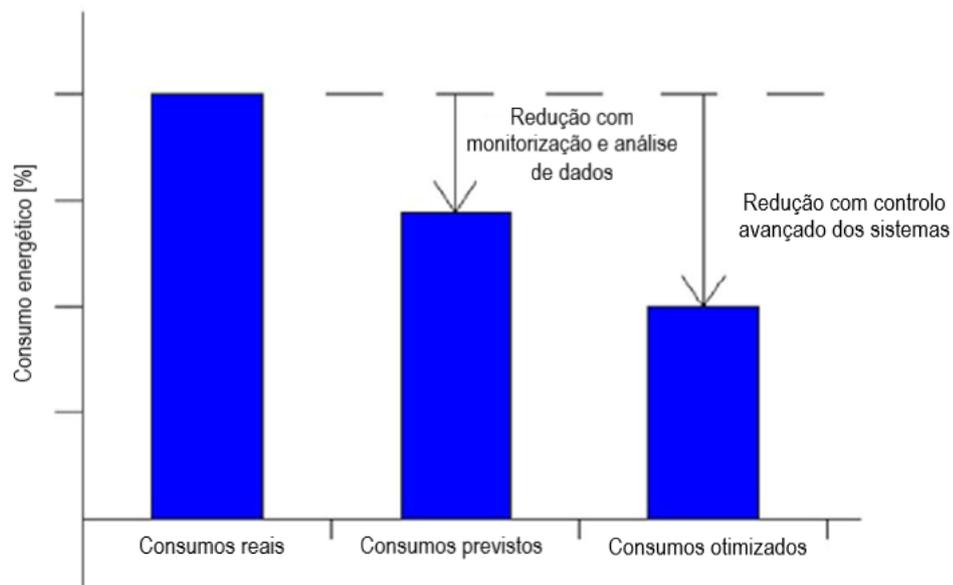


Figura 21 – Representação gráfica do potencial de poupança energética com otimização ou controlo avançado, respetivamente, face aos consumos reais (adaptado de [13]).

4.1. UTILIZAÇÃO DO MODELO DE CONTROLO PREDITIVO

A escolha do tipo de modelo dependerá do tipo de abordagem que se fará no controlo do edifício. O controlo pode ser:

- Do edifício e do sistema AVAC, tendo em conta as variações termodinâmicas e o MPC utiliza os dados para otimização online;
- Com utilização de modelos de perturbações que conseguem prever o comportamento de variáveis não controladas que podem afetar a resposta dinâmica do sistema;

Para tal, pode haver três diferentes formas de controlo AVAC no edifício, onde [12]:

- O sistema AVAC não é considerado na modelação do controlo preditivo;
- O sistema AVAC e as características do edifício são considerados na modelação do controlo preditivo;
- As características do edifício não são consideradas na modelação do controlo preditivo;

Um algoritmo destas três possibilidades encontra-se apresentado, abaixo, na Figura 22.

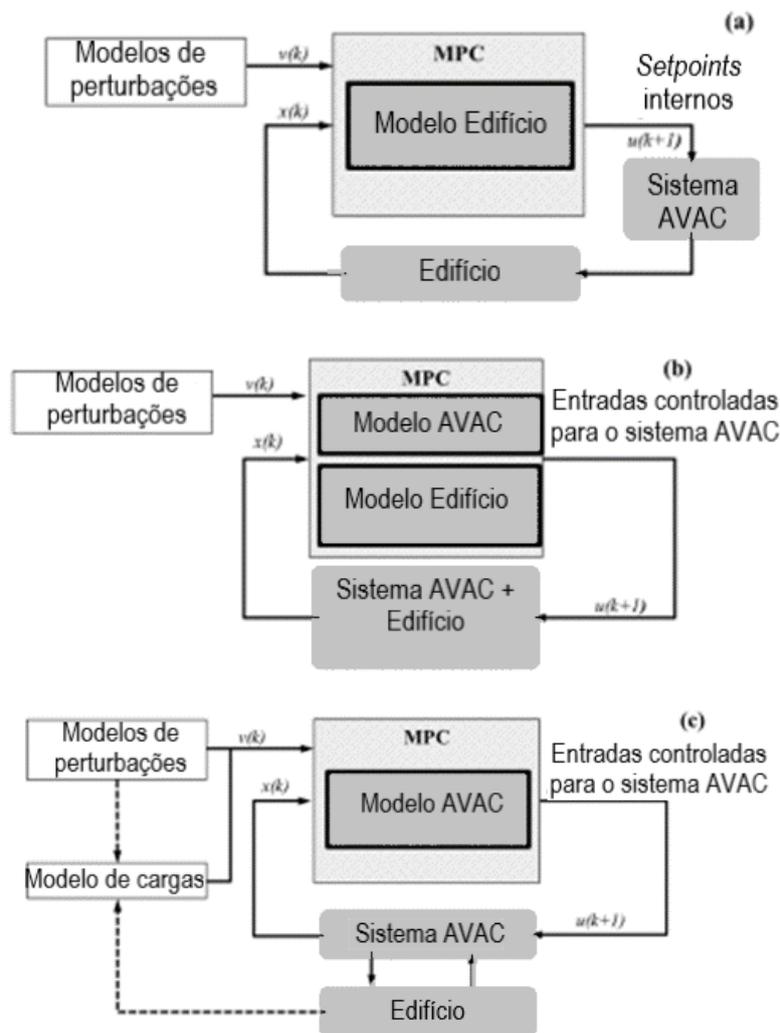


Figura 22 - Diferentes possibilidades de modelação do sistema de controlo preditivo e a sua interação com o sistema AVAC (adaptado de [12]).

As perturbações do modelo podem ser de dois tipos: medidas ou não-medidas. As perturbações medidas fazem parte do modelo da dinâmica do edifício e o impacto que terão na resposta do sistema é contrariado pelo modelo de controlo. Por outro lado, as perturbações não-medidas tanto podem ser insignificantes como podem ter um impacto significativo, afetando a precisão da resposta do modelo [12].

As perturbações passíveis de acontecer podem ser divididas em:

- Perturbações climáticas (temperatura exterior, humidade relativa, temperatura do bolbo molhado, etc.);
- Perturbações de ocupação (alterações dos *setpoints* de conforto, ganhos internos de calor, etc.);
- Perturbações da rede (preços, utilização nos picos da rede);

As limitações do sistema podem ser divididas em: “rígidas” (*hard*) ou “macias” (*soft*), tendo diferentes influências no sistema. As limitações rígidas devem ser satisfeitas sem qualquer outro compromisso, portanto o sistema é obrigado a cumpri-las, enquanto que as limitações macias são, de certa forma, não prioritárias [21].

Globalmente, as limitações desempenham um papel fundamental no campo da otimização e no sentido de proporcionar estabilidade ao sistema de controlo com *feedback*, já que os estados do sistema de controlo são diretamente afetados pelas limitações.

Neste processo de otimização do controlo deve ter-se em conta aspetos variados, nomeadamente a fiabilidade deste processo e o cumprimento das limitações. Além destes dois aspetos, há ainda que ter em conta a estabilidade do controlador e a minimização do esforço de controlo, isto é, variação das entradas de controlo em dois instantes de tempo subsequentes. Outros objetivos, além dos acima falados (temperatura, conforto ou utilização de energia) devem ser considerados na função objetivo. A função objetivo permitirá minimizar um parâmetro (por exemplo, custo) em detrimento de outros parâmetros, sem que o sistema incumpra com as limitações. Na equação (10) encontra-se um exemplo da formulação da função objetivo [21].

$$\min \sum_{k=0}^{Np-1} a(x(k), u(k), r(k)) \quad \text{Função objetivo} \quad (10)$$

$$\mathbf{x}_0 = \mathbf{x} \quad \text{Estado inicial} \quad (10)$$

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{f}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{g}(k)\mathbf{u}(k) + \mathbf{h}(k)\mathbf{r}(k) \quad \text{Variáveis de} \quad (11)$$

atualização do estado

$$\mathbf{a}(k) = \mathbf{O}(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k), \mathbf{r}(k), \mathbf{c}(k)) \quad \text{Variáveis da saída} \quad (12)$$

$$(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k), \mathbf{r}(k)) \leq \mathbf{0} \quad \text{Limitações} \quad (13)$$

Onde:

k = tempo de amostragem;

N_p = horizonte preditivo;

$\mathbf{x}(k)$ = estado do sistema;

$\mathbf{u}(k)$ = *input* de controle;

$\mathbf{r}(k)$ = vetor de perturbações;

$\mathbf{a}(k)$ = *saída* do sistema;

Nos resultados, cada valor destes estará diretamente interligado às limitações. Assim, para cada intervalo de tempo definido, onde num sistema com a inércia associada aos processos termodinâmicos, este não deverá ser menor que 15 minutos, o MPC estará constantemente a resolver o problema de otimização em *open-loop* para que sejam cumpridos os *setpoints*.

Relativamente à arquitetura do sistema, esta dependerá diretamente das interações consideradas, apresentadas anteriormente, na Figura 22. Uma esquematização dos três diferentes tipos está representada na Figura 23.

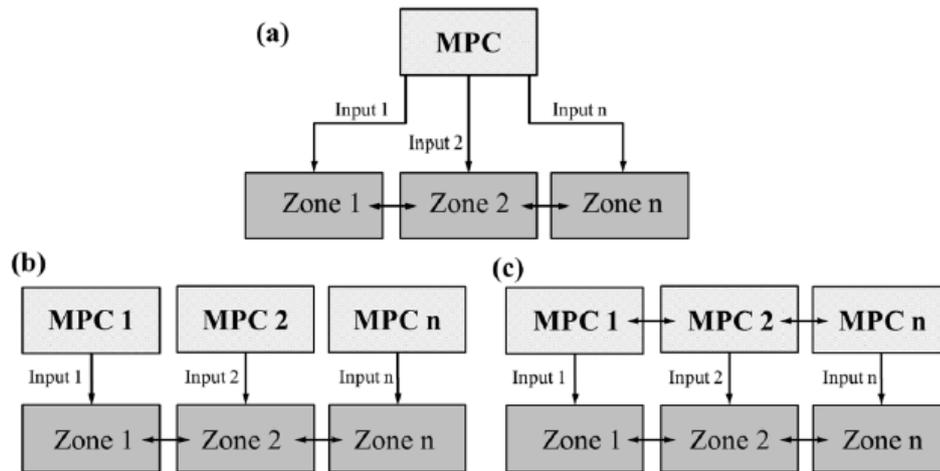


Figura 23 - Representação das diferentes arquiteturas do MPC: a) arquitetura centralizada; b) arquitetura descentralizada; c) arquitetura distribuída (adaptado de [12]).

No que toca ao alinhamento de a), o MPC irá controlar o edifício e o sistema AVAC numa única diretriz (esquema b) da Figura 22). Assim, a dinâmica do edifício, interações e perturbações são tidas em conta num único modelo com as limitações associadas, implicando que nem sempre a resposta seja a mais desejável, já que o esforço de processamento será significativo. Neste tipo de arquitetura deve destacar-se, pela negativa, a utilização de apenas um controlador MPC, o que em caso de falha, não prevê um sistema de *back-up*, podendo acarretar sérios problemas advindos desta falha.

No que toca ao alinhamento b), apresentado na Figura 23, cada parte é controlada por um controlador independente, que não considera os acontecimentos ocorridos nos outros controladores, já que não há qualquer interligação entre si. O alinhamento c), que pode ser considerado um avanço do alinhamento anterior, pois na sua base é semelhante, acrescentando o facto de neste caso todos os controladores estão interligados entre si, desde o controlador 1 até ao controlador n , trazendo benefícios. Num primeiro aspeto, o facto de haver interligações entre os controladores faz com que a *performance* global seja otimizada, com um esforço de processamento reduzido, visto que haverá comandos que poderão ser partilhados entre controladores, sendo por isso um cruzamento ótimo entre as interligações associadas à arquitetura centralizada e ao número de controladores associados à arquitetura descentralizada [12].

Não obstante, segundo autores como: Hilliard *et. al*; Killian; Kozek; Mady; Longobardi, entre outros, a aplicação em contexto real fica aquém do desejado, sendo apontados alguns aspetos críticos tais como: a exatidão do modelo bem como a exatidão da previsão

meteorológica que afetam diretamente a *performance* do MPC. No campo da programação, o algoritmo MPC que estará na camada de supervisão do controlo requer uma capacidade de processamento considerável e um bom sistema de calibração para que a interação entre o controlador de alto-nível seja feita na sua íntegra com os controladores de níveis inferior, sem quaisquer interferências desejáveis. E, como já mencionado, o facto de cada edifício possuir aspetos na sua arquitetura e/ou construção (*i.e.*, isolamento) fazem com a capacidade do controlo através de MPC seja dificilmente replicável de caso para caso [12].

4.2. UTILIZAÇÃO DA LÓGICA FUZZY

A lógica *Fuzzy* caracteriza-se pela zona de incerteza que não poderia ser caracterizada pela lógica matemática comum, sendo por tal uma lógica multi-valor já que gere o conceito de “parcialmente verdade”. Na Figura 24 encontra-se uma representação deste conceito num exemplo do conjunto A: “Conjunto de homens altos”.

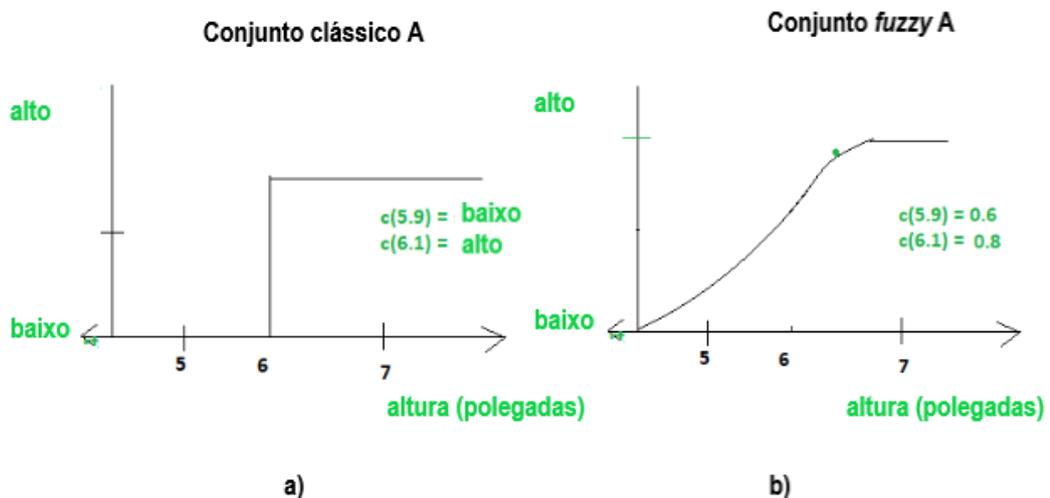


Figura 24 - Comparação da representação do conjunto A: "Conjunto de homens altos" com: a modelação a) e a modelação b), respetivamente (adaptado de [29]).

Nesta representação, há uma zona de incerteza entre os mínimos e os máximos, que são proposições totalmente falsas ou totalmente verdadeiras, como visto na figura anterior. Este conjunto *fuzzy* é definido pela função-pertença, expressa na equação (14).

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in X\} \quad (14)$$

Onde:

A = conjunto *fuzzy*;

$\mu_A(x)$ = função-pertença;

X = universo do discurso;

As funções-pertença mais utilizadas são: as triangulares, trapezoidais ou gaussianas. Na Figura 25 encontra-se uma função-pertença, onde o conjunto B é definido por: “aproximadamente 50 anos de idade”.

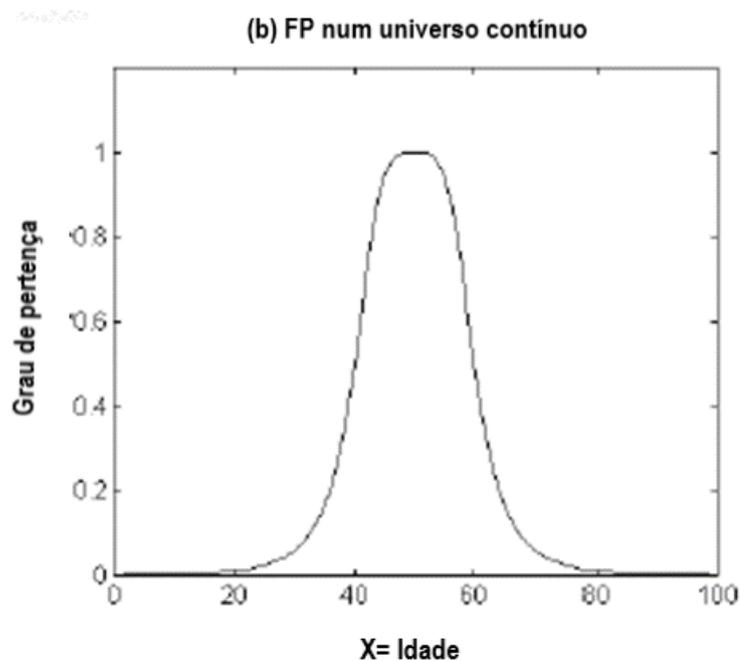


Figura 25 - Representação da função-pertença do conjunto B num universo contínuo (adotado de [29]).

Neste caso em particular a função-pertença, $\mu_B(x)$, é definida pela equação (15).

$$\mu_B(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x - 50}{10}\right)^2} \quad (15)$$

A lógica *fuzzy* permite fazer operações com conjuntos diferentes. Seja A um conjunto *fuzzy* e B um outro conjunto. Estes dois conjuntos podem ter uma série de operações que permite ter as interações seguintes [29]:

a. Subconjunto de um conjunto fuzzy

O conjunto *fuzzy* A está contido num conjunto *fuzzy* B (ou A é um subconjunto de B) se e somente se $\mu_A(x) \leq \mu_B(x)$ para todo e qualquer x . Esta operação é definida pela condição expressa na equação (16).

$$A \subseteq B \Leftrightarrow \mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad (16)$$

Na Figura 26 encontra-se a representação gráfica desta operação.

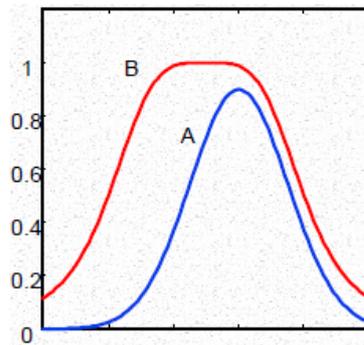


Figura 26 - Representação gráfica de um subconjunto A num conjunto B , em lógica *fuzzy* (adotado de[29]).

b. União de dois conjuntos fuzzy

A união de dois conjuntos *fuzzy* A e B é um conjunto *fuzzy* C , expresso por $C = A \cup B$. Esta operação é definida pela condição expressa na equação (17).

$$C = A \cup B \Leftrightarrow \mu_C(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) \quad (17)$$

Na Figura 27 encontra-se a representação gráfica desta operação.

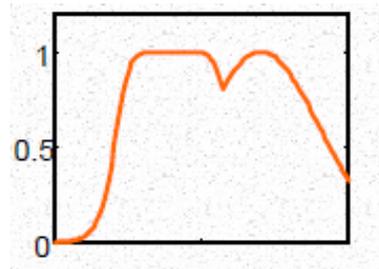


Figura 27 - Representação gráfica da união de um conjunto A e um conjunto B , em lógica *fuzzy* (adotado de [29]).

c. Interseção de dois conjuntos fuzzy

A união de dois conjuntos *fuzzy* A e B é um conjunto *fuzzy* C , expresso por $C = A \cap B$. Esta operação é definida pela condição expressa na equação (18).

$$C = A \cap B \Leftrightarrow \mu_C(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) \quad (18)$$

Na Figura 28 encontra-se a representação gráfica desta operação.

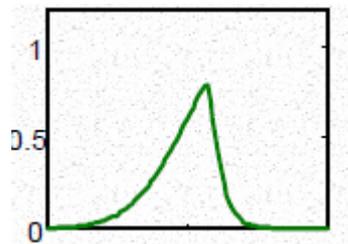


Figura 28 - Representação gráfica da interseção de um conjunto A e um conjunto B , em lógica *fuzzy* (adotado de [29]).

d. Complemento de um conjunto fuzzy

O complemento de um conjunto *fuzzy* A é designado \bar{A} . Esta operação é definida pela equação (19).

$$\bar{A} = X - A = \mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (19)$$

Na Figura 29 encontra-se a representação gráfica desta operação.

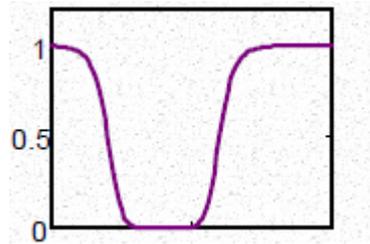


Figura 29 - Representação gráfica da interseção do complemento do conjunto A, em lógica *fuzzy* (adotado de [29]).

Nos motores de interferência, como apresentado na Figura 18 do capítulo 4.2., é feito um conjunto de mecanismos que se refletirá num raciocínio encadeado. Para tal, existem duas metodologias habitualmente usadas: Sugeno e Mamdani.

O modelo de Sugeno, também denominado de Takagi-Sugeno, apresenta uma única função-pertença para saída que tanto pode ser uma função linear ou uma constante do valor da entrada. A saída pode ser traduzida pelas equações (20) e (21) [29].

$$IF x = A \text{ and } y = B \text{ then } z = k \quad (20)$$

$$IF x \text{ is } A \text{ and } y \text{ is } B \quad (21)$$

$$z = p.r + q.y + r$$

$$p = q = r = \text{constantes}$$

Por outro lado, o modelo de Mamdani, foi criado com o objetivo de proporcionar um sistema de controlo que sintetizava um conjunto de regras de controlo linguístico obtidas da experiência dos operadores humanos. Num sistema Mamdani, a saída de cada regra é um conjunto *fuzzy* [31].

Na escolha entre ambos os modelos, deve ter-se em conta as principais vantagens dos modelos, expressas na Tabela 4.

Tabela 4 - Comparação das vantagens entre o modelo de Sugeno e o modelo de Mamdani.

SUGENO	MAMDANI
Eficiência computacional	Mais intuitivo
Trabalha bem com técnicas não lineares (<i>i.e.</i> , PID)	Aceitação generalizada
Trabalha bem com otimizações e técnicas adaptativas	Traduz melhor a experiência humana

Com a análise da tabela anterior, para um sistema AVAC o modelo Mamdani será preferível dado que, ao contrário do Sugeno, não faz combinações lineares e tem a vantagem de traduzir melhor a experiência do operador, sendo fulcral para um sistema em que se prevê a otimização do controlo.

O processo de defuzzificação neste modelo é mais eficiente a nível computacional que no modelo de Mamdani, já que utiliza médias ponderadas e somas ponderadas ao invés de criar um centro geométrico de uma área bidimensional, como feito no modelo de Mamdani [32].

4.3. COMPARAÇÕES ENTRE CONTROLO PREDITIVO E LÓGICA FUZZY

Com base na literatura, tem-se que quer o MPC quer a FLC, serão dois métodos de controlo adequados para uma aplicação num sistema AVAC. Porém, se por um lado o MPC terá uma componente mais incisiva na previsão, a FLC será mais adaptativa ao meio e adequa-se a ambientes onde a falha do sistema requer mais cuidado que a falta de previsibilidade.

O MPC tem como vantagem, em casos em que haja uma base de dados consolidada, prever o comportamento que haverá no edifício e contrariar as alterações dinâmicas através de *inputs* diferentes no sistema. Por outro lado, a FLC adequa-se a um meio em que a incerteza não seja tão impactante e os problemas passem no campo de falhas do sistema, como por exemplo, respostas lentas ou avarias de *hardware*.

Desta forma a aplicação de um controlo MPC enquadra-se num espaço de comércio, como por exemplo um centro comercial, onde o fluxo de pessoas não é constante e, devido as características típicas deste género de edifícios, as alterações das condições externas (*i.e.*, temperatura ou humidade relativa) terão um impacto significativo. Assim, recorrendo a um

MPC o sistema terá a possibilidade de prever as necessidades fruto das consequências das alterações, proporcionando um sistema que funcione nas condições ótimas.

No campo da adaptabilidade, a FLC adequa-se para meios onde as alterações ao desejado são pontuais e as imprevisibilidades são menos ocorrentes. Assim, a FLC será adequada para meios onde o número de pessoas é constante, bem como máquinas e outros equipamentos que produzam calor e as alterações são proporcionadas maioritariamente pelas mudanças nas condições externas ao edifício.

Globalmente a escolha deve ser feita com base nas premissas acima expostas, sabendo que os modelos MPC são pouco corroborados em ambientes reais e a FLC tem uma baixa replicabilidade de modelos de controlo fora do ambiente original de modelação.

5. ANÁLISE DE UMA ALTERNATIVA AO CONTROLO CLÁSSICO NUM CASO PRÁTICO

O caso de estudo em questão é da empresa FIORIMA, S.A., uma empresa da área têxtil.

A indústria têxtil caracteriza-se pela necessidade de temperaturas e humidades relativas com especificidade considerável, no sentido de manter a qualidade nos fios utilizados, de forma a que os fios não quebrem e, conseqüentemente evitar paragens na produção, devido à influência que a humidade tem no material utilizado, isto é, nos fios de algodão. No caso em questão, estavam equacionadas condições para que fosse obtido uma temperatura de 24 °C e uma humidade relativa entre os 60 e 70 %.

A FIORIMA, S.A. está localizada na freguesia de Frossos, no concelho de Braga. Na Figura 30 encontra-se a vista aérea do edifício.

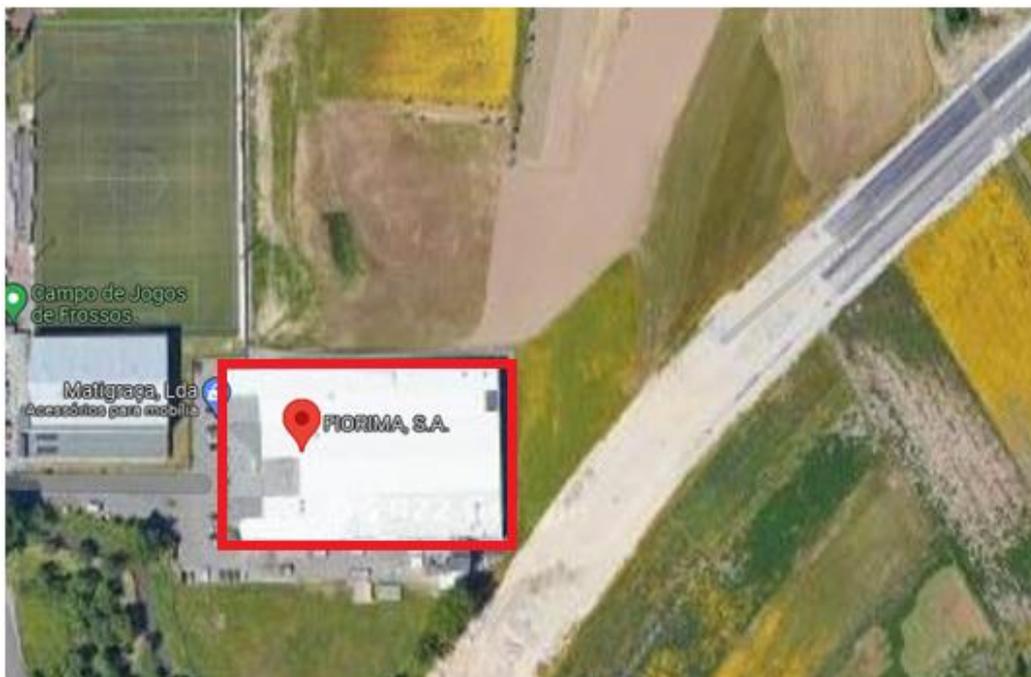


Figura 30 – Vista aérea da zona onde se encontra localizada a empresa, bem como o espaço em seu redor [33].

Na figura anterior é visível que a localização da empresa se encontra num espaço pouco edificado, com boa exposição solar.

A legislação nacional relativa ao sistema de certificação energética, não abrange os edifícios industriais. Estes poderão estar obrigados ao cumprimento do SGCIE (Sistema de Gestão de Consumos Intensivos de Energia), que terão diferentes metas a cumprir consoante o seu consumo energético seja inferior ou superior a 1000 tep/ano. As instalações cujo

consumo seja inferior a 500 tep/ano ou estejam ao abrigo do Decreto-Lei nº 118/2013 de 20 de agosto, estão isentas do cumprimento do SGCIE. Tal facto não invalida que se use os valores dos requisitos do SCE como referência para as soluções construtivas adotadas nestes edifícios.

5.1. AVALIAÇÃO DAS NECESSIDADES DE VENTILAÇÃO

O sistema tem que estar preparado para satisfazer as condições de funcionamento adequadas ao tipo de atividade realizada. O cálculo do caudal insuflado foi obtido, tendo em conta o tipo de poluentes (emissão de pó dos fios), o número de operários a trabalhar bem como a carga térmica produzida pelos teares em funcionamento. Na Figura 31 encontra-se a planta dos teares, com o respetivo número de máquinas por cada linha.

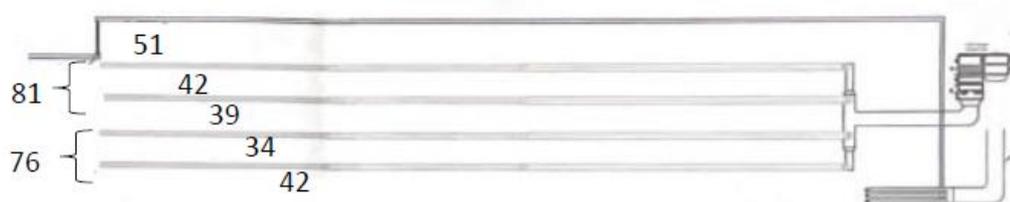


Figura 31 - Número de teares por linha de ar comprimido.

Tendo em conta os cálculos feitos aquando da caracterização das necessidades térmicas de aquecimento e de arrefecimento do edifício, obteve-se um valor de carga térmica de aquecimento de 327 kW e 356 kW de arrefecimento. Para tal, é necessário um caudal de insuflação de 27 000 m^3/h [34].

O caudal insuflado deve ter uma quota de ar novo, nomeadamente de 5200 m^3/h , tendo-se por base o método do cálculo do caudal pela área, como estabelecido na Portaria nº 138-I/2021. Admitindo que é um edifício que tem uma atividade que envolve a emissão de poluentes específicos, ou seja, o caudal mínimo de ar novo tem que ser 5 [$m^3/(hora.m^2)$] e que a zona onde são emitidos os poluentes tem uma área de 900 m^2 , o caudal de ar novo deve ser no mínimo 4500 m^3/h . Foi utilizado um fator de sobredimensionamento de 15 %, tendo-se assim um valor de 5200 m^3/h .

As condições de funcionamento exigidas encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5 - Condições de funcionamento exigidas para UTA na zona de teares [34].

Tempo de funcionamento	24 h (dias úteis) 8 h (fim-de-semana)
Caudal insuflado	27000 m ³ /h
Temperatura	24 °C
Humidade relativa	50-60 %

Para as condições de projeto, assumiram-se valores de temperatura exterior e humidade relativa exterior, nas estações de aquecimento e arrefecimento, com base no histórico meteorológico da zona de Braga. Relativamente à temperatura e humidade relativa interiores, foi assumido para em ambas as estações uma temperatura de 21 °C e 50 % de humidade relativa.

Os valores de dimensionamento de temperatura e humidade relativa encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6 - Condições de dimensionamento do sistema de ventilação aplicado na zona de teares.

Estação	Espaço	Temperatura [°C]	Humidade Relativa [%]
Verão (Arrefecimento)	Interior	21 °C	50 [±5] %
	Exterior	32 °C	45 %
Inverno (Aquecimento)	Interior	21 °C	50 [±5] %
	Exterior	1 °C	90 %

5.2. CARATERIZAÇÃO DO ESPAÇO

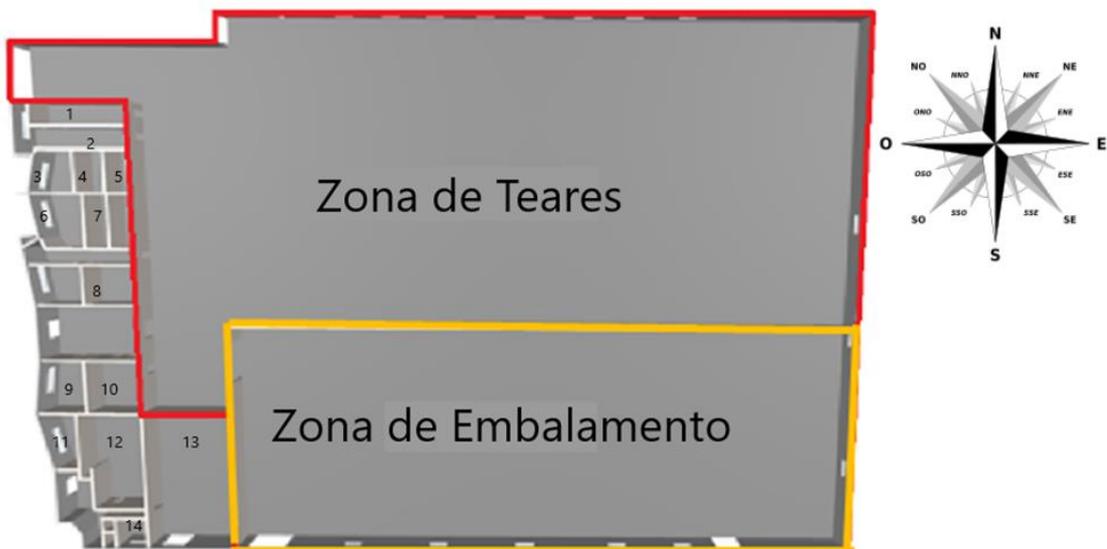
Relativamente ao edifício, no âmbito do SCE, o ponto 11 do artigo 6º do Decreto-Lei nº 101-D/2020, ressalva que os edifícios de C&S estão sujeitos ao cumprimento de requisitos numa panóplia de componentes. Ainda que o edifício em estudo não seja da tipologia C&S, será esta a categoria que fará mais sentido enquadrar este edifício destinado à indústria dos teares.

Do ponto 11 do artigo 6º do decreto acima referido, devem ser cumpridos requisitos nos componentes expressos:

- a) Envolvente opaca;
- b) Envolvente envidraçada;
- c) Sistemas de ventilação;
- d) Sistemas de climatização;
- e) Sistemas de preparação de água quente;
- f) Sistemas fixos de iluminação;
- g) Sistemas de produção de energia elétrica;
- h) SACE;
- i) Instalações de elevação;
- j) Infraestruturas de carregamento de veículos elétricos

Assim, para o estudo em questão, serão calculados valores para avaliação dos requisitos do ponto a), sendo o mais pertinente para o desenvolvimento do controlo do sistema AVAC do edifício. Esta verificação prende-se com a necessidade de tratar o ar interior, nomeadamente a temperatura e a humidade relativa, sendo por isso mais fácil atingir estas metas com o cumprimento dos mínimos dos requisitos, ainda que não sejam obrigatórios.

Na Figura 32 encontra-se a planta do edifício em estudo.



Legenda:

<i>Número</i>	<i>Identificação da zona</i>
1	Sala CAD
2	Sala de manutenção
3	Laboratório
4	Vestiário homens
5	WC homens
6	Sala de apoio a turnos
7	WC senhoras
8	Vestiário senhoras
9	Sala de visitas
10	Laboratório médico/ Sala de formação
11	Sala de apoio a refeitório
12	Vestiário/WC mulheres
13	Armazém de embalagens
14	Lavandaria

Figura 32 - Planta do edifício da Fiorima, com as duas zonas de trabalho assinaladas: teares e embalagem (adaptado de [34]).

Neste estudo será apenas considerada a zona de teares, fruto da natureza das necessidades do fio que implicam as condições de temperatura e humidade relativa anteriormente mencionadas. Numa visita às instalações observou-se que o incumprimento do *setpoint* de temperatura era frequente na zona dos teares enquanto que na zona de embalagem as condições ótimas pré-estabelecidas eram cumpridas. Na zona de embalagem a temperatura era de 25 °C e a humidade relativa cerca de 50 %, ou seja, mais baixo que a zona de teares, fruto das necessidades não serem tão exigentes, uma vez que o fio já se encontra trabalhado.

O facto de a humidade relativa necessária ser alta, o número de máquinas de teares ser alto face à área disponível levando a que a temperatura se eleve e a envolvente, *à priori*, apresentar características de isolamento pobre, contribui para uma resposta não satisfatória do sistema de climatização atualmente implementado.

No sentido da caracterização deste espaço, deve seguir-se a metodologia imposta pelo Manual SCE. Inicialmente, deve calcular-se a zona climática, estando esta dividida em zona climática de verão e zona climática de inverno.

De forma a realizar esta caracterização, o Manual SCE indica o *software SCE.CLIMA_v1.0*, disponibilizado pela DGEG. Sabendo que o edifício em estudo se localiza na freguesia de Frossos, no concelho de Braga, deve ser selecionado o município de Braga no *software* utilizado, como representado na Figura 33.

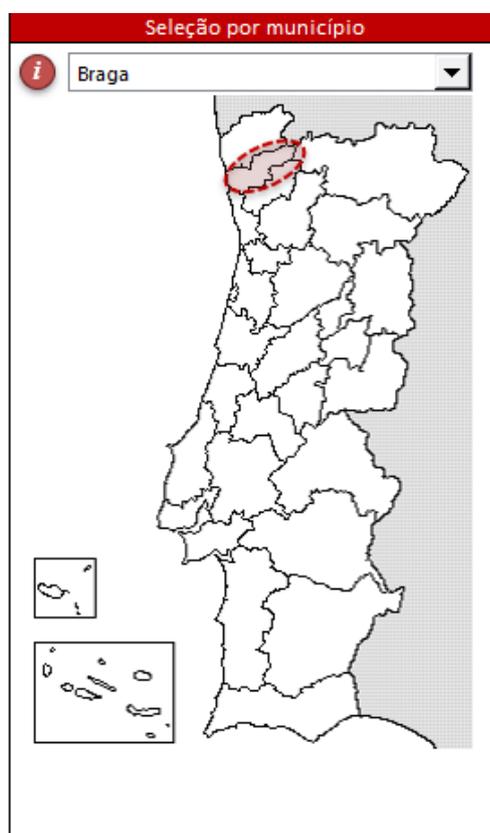


Figura 33 - Seleção do município no *SCE.CLIMA_v1.0* para cálculo das zonas climáticas.

Após a introdução no *software*, dos *inputs* relativos à localização deste edifício, é obtido o zoneamento climático, apresentada na Figura 34.



Figura 34 - Zona climática do edifício em estudo.

Estando a caracterização a nível da zona climática realizada, no sentido de definir os valores dos requisitos da envolvente, pode agora fazer-se um estudo da envolvente opaca.

A envolvente opaca são elementos construtivos como paredes, coberturas, pavimentos e zonas de PTP. Neste caso em particular, a construção ou a renovação dos elementos construtivos que permitam um maior isolamento térmico poderá não ser o desejado, já que os teares produzem calor no espaço, podendo assim haver um aumento indesejado e inesperado de temperatura nos momentos de produção fabril. Não obstante, o sistema de controlo AVAC redesenhado deve estar capacitado a operar tendo em conta o ganho térmico obtido pelas máquinas e ser capaz de contrariar o aumento de temperatura no espaço quando agentes externos atuarem atipicamente (*i.e.*, aumento inesperado de temperatura para um dia de inverno).

A avaliação da qualidade térmica da envolvente é feita através do cálculo da resistência térmica total (R_{tot}). A fórmula de cálculo para obtenção da R_{tot} está na equação (22).

$$R_{tot} = R_{si} + \sum_j R_j + R_{se} \quad (22)$$

Onde:

R_{tot} – Resistência térmica total [(m².°C)/W];

R_{si} – Resistência térmica superficial interior [(m².°C)/W];

R_{se} – Resistência térmica superficial exterior [(m².°C)/W];

R_j – Resistência térmica da camada j [(m².°C)/W].

A obtenção da resistência térmica da camada é dada pela equação (23).

$$R_j = \frac{d_j}{\lambda_j} \quad (23)$$

Onde:

R_j – Resistência térmica da camada j [(m².°C)/W];

d_j – Espessura da camada j [m];

λ_j – Condutibilidade térmica da camada j [W/(m.°C)].

De forma a quantificar a transmissão de calor que ocorre, após o cálculo da resistência térmica total, deve ser feito o cálculo do coeficiente de transmissão térmica U . Este coeficiente é obtido a partir da equação (24).

$$U = \frac{1}{R_{tot}} \quad (24)$$

Onde:

U – Coeficiente de transmissão térmica [W/(m².°C)];

R_{tot} – Resistência térmica total [(m².°C)/W].

De seguida será feita a caracterização térmica das diferentes soluções construtivas observadas na envolvente do espaço em análise. Todos os elementos encontram-se na zona que envolve a zona de teares. Foi admitida uma simplificação, como se a zona de teares fosse um espaço isolado dos demais. O estudo foi realizado com base nos seguintes elementos: parede exterior, pavimento sobre o solo, teto falso. A representação da construção assumida está na Figura 35.

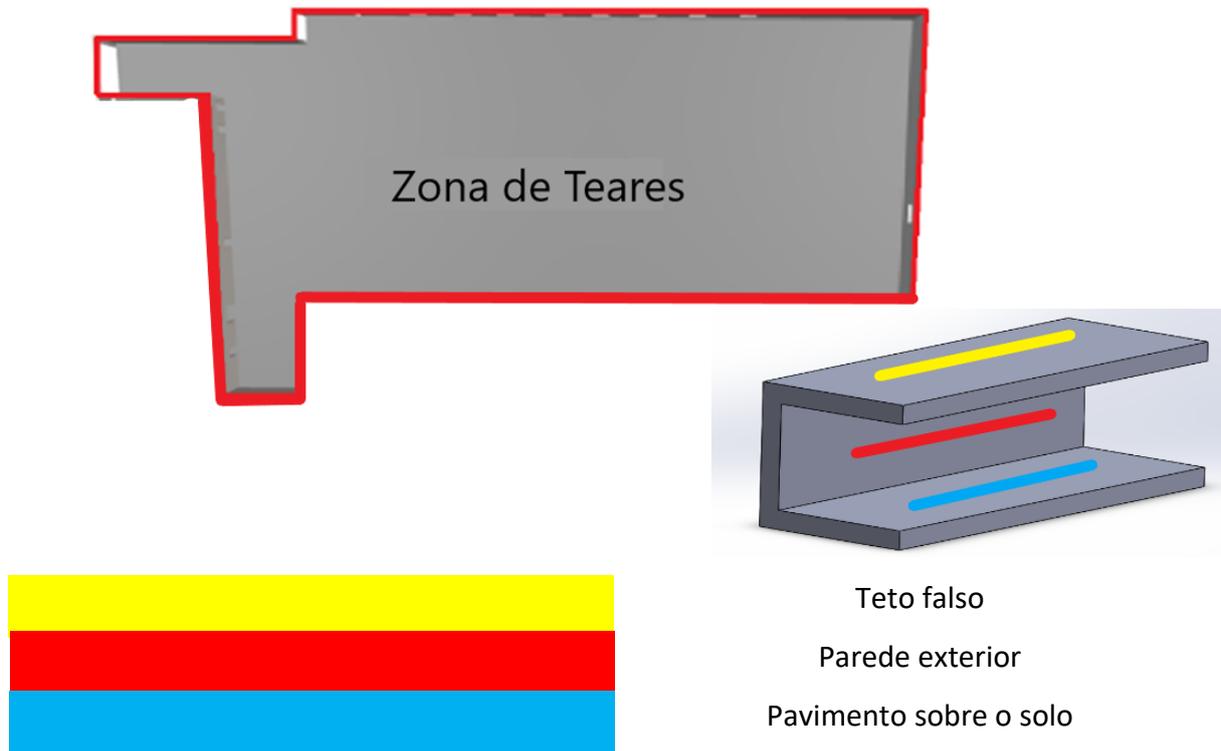


Figura 35 - Representação da zona envolvente da zona dos teares.

a. Parede exterior

As paredes exteriores são constituídas por um painel *sandwich* (50 mm) e envolvidas por chapas de aço (5,0 mm), como representado na Figura 36.

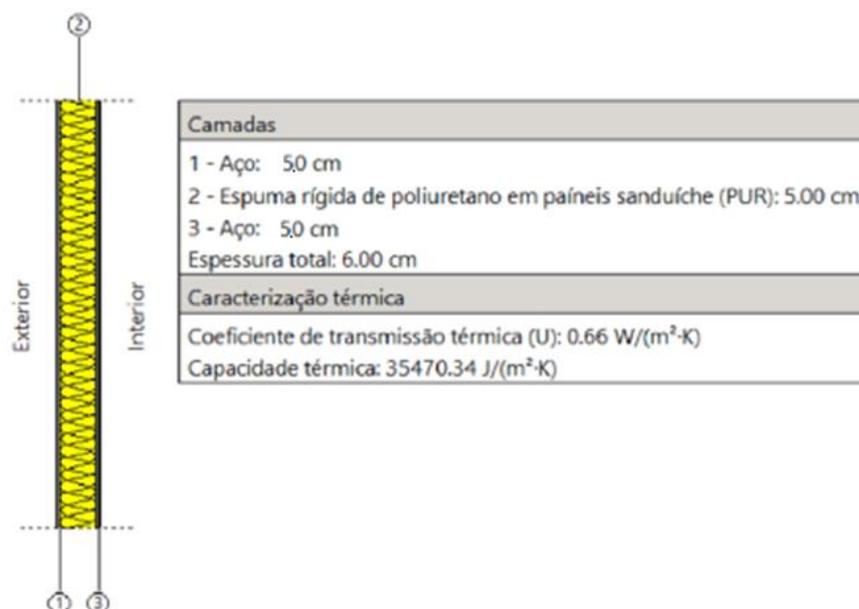


Figura 36 - Representação da composição das paredes exteriores e respetiva caracterização térmica [34].

b. Pavimento sobre o solo

O pavimento sobre o solo resume-se a uma camada de betão normal depositada, como esquematizado na Figura 37.

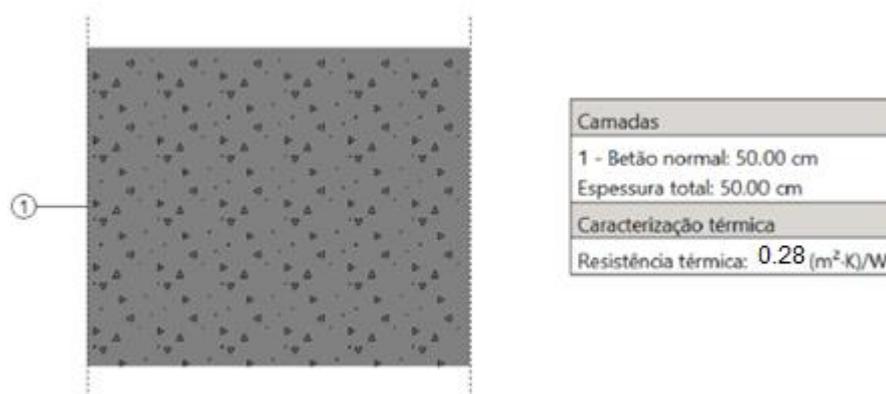


Figura 37 - Representação esquemática da composição do pavimento sobre o solo e caracterização térmica [34].

c. Teto falso

O teto falso é uma placa de gesso cartonado, permitindo a criação de uma ponte térmica entre o espaço de trabalho e o telhado da fábrica, telhado este que se admite ter uma resistência desprezável. A representação da sua composição encontra-se na Figura 38.

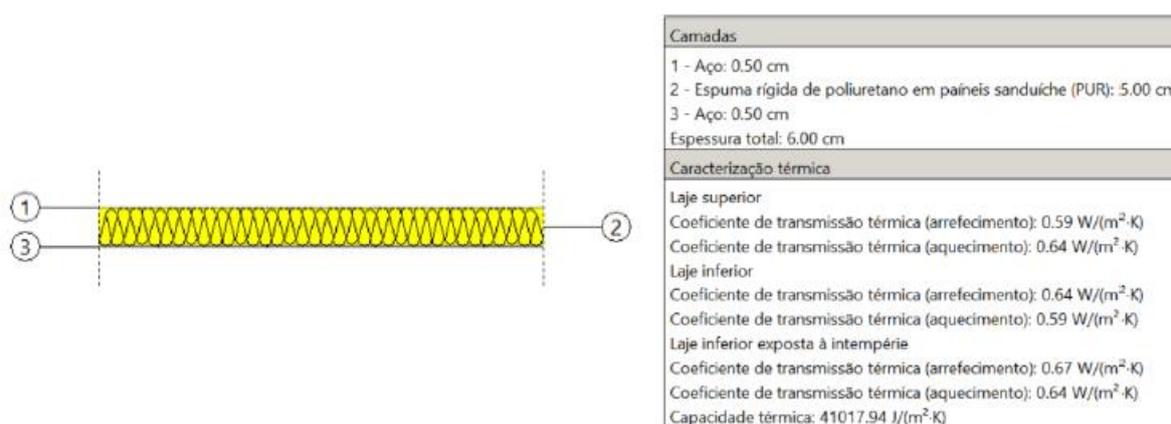


Figura 38 - Representação esquemática da composição do teto falso e caracterização térmica [34].

Assim, e comparando os valores, apenas um dos elementos construtivos apresenta valores de resistências térmicas iguais ou abaixo dos valores mínimos da Portaria nº 138-

I/2021. Com base na zona climática I2, o pavimento sobre o solo apresenta uma resistência térmica de 0,28 [W/m².°C], estando, portanto, abaixo dos 1,00 [W/m².°C] que a Portaria nº 138-I/2021 exige para zonas de PTP interiores. Por outro lado, os restantes estão fora dos valores estipulados, onde a maior diferença se nota no teto falso, que deveria à priori aproximar-se mais dos valores estipulados, dada a função de uma solução construtiva deste tipo. O teto falso tem uma resistência térmica de 2,56 [W/m².°C], quando o valor estabelecido está em 0,90 [W/m².°C]. Ao nível da parede exterior, o valor máximo de *U* é de 0,60 [W/m².°C], e este elemento apresenta um valor de resistência térmica de 0,66 [W/m².°C]

5.3. CARATERIZAÇÃO DA MÁQUINA SELECIONADA

O controlo das variáveis de temperatura e humidade relativa é feito por UTAs. A água que circula nas serpentinas tem origem num furo geotérmico, onde posteriormente é aquecida/arrefecida até à temperatura desejada numa bomba de calor/*chiller*.

A UTA irá tratar o ar de forma a cumprir com os requisitos necessários, tendo-se assumido as condições apresentadas na Tabela 6, aquando do seu dimensionamento.

No sentido de satisfazer estas necessidades foi construída uma UTA com duas baterias, uma de aquecimento e uma de arrefecimento a água. A UTA em questão terá uma composição semelhante à apresentada na Figura 39.

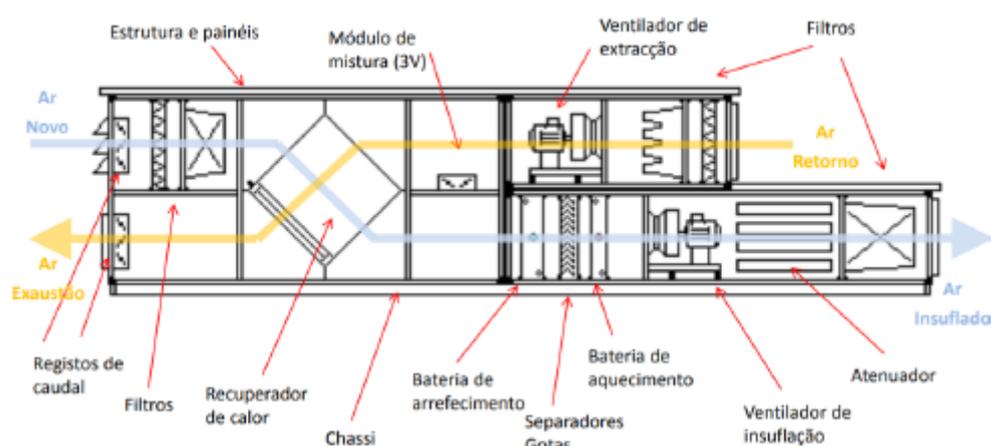


Figura 39 - Representação de uma UTA com as características de construção semelhante à utilizada [34] [35].

No sentido de obter os valores desejados a UTA tem o seguinte funcionamento: é admitido o ar na grelha de admissão onde numa primeira fase passará por um pré-filtro, com a classificação mínima M5, já que antecede uma bateria de aquecimento/arrefecimento. No caso em particular está equipado com um filtro M6-ePM 10 80 %, estando por isso um nível acima do mínimo exigido.

Posteriormente o ar será aquecido ou arrefecido, mediante o desejado numa das baterias para a função através da permuta de calor. As baterias são permutadores de calor que nas suas serpentinas tem água quente ou fria e farão troca de calor com o ar no sentido deste ficar à temperatura desejada.

Por fim, o ar às condições desejadas é ventilado, por uma conduta, até ao espaço destinado de forma a proceder-se à ventilação e climatização do espaço.

5.4. FALHAS DO MODELO DE CONTROLO UTILIZADO

Ainda que a UTA tenha sido especificamente desenhada para satisfazer as necessidades das zonas de teares da Fiorima, denota-se falhas na obtenção dos *setpoints* de temperatura e humidade relativa. Numa análise das condições, num dia de visita às instalações, na estação de arrefecimento (maio), verificou-se que a temperatura estava acima do desejado, com picos de 29,2 °C e a humidade abaixo do pretendido, num valor de 41 %, apontando-se como eventual falha a incapacidade do método de controlo, ao não se obter uma resposta de adaptação à rapidez desejada neste processo.

Após inferir-se que o momento de principal dificuldade do sistema é para cenários onde as condições externas para o verão não se assemelham às pré-estabelecidas, já que os registos de maior desvio do *setpoint* aconteciam nos dias de mais calor, foram analisados valores de T para os primeiros três dias do mês de agosto de 2022, na zona de Braga. Os valores encontram-se expressos na Figura 40.

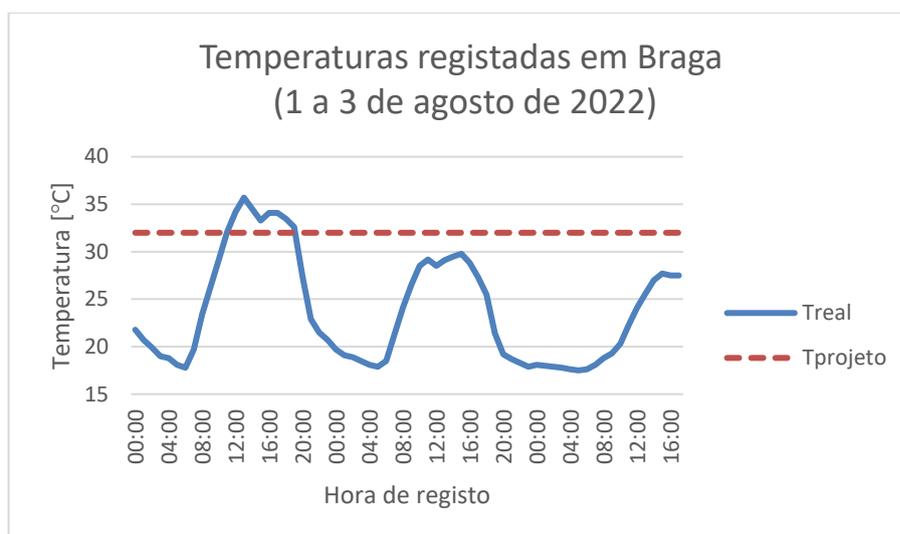


Figura 40 - Valores de temperatura na zona de Frossos, Braga entre os dias 1 e 3 de agosto de 2022 [36].

As temperaturas registadas (*Treal*) estão praticamente sempre acima do valor de projeto (*Tprojeto*, Tabela 6). Posteriormente, no sentido de fazer uma comparação entre a temperatura registada no exterior e a possível influência de aumentos acentuados da temperatura no espaço, avaliou-se a evolução de temperaturas na zona dos teares, obtendo-se o perfil apresentado no gráfico da Figura 41.

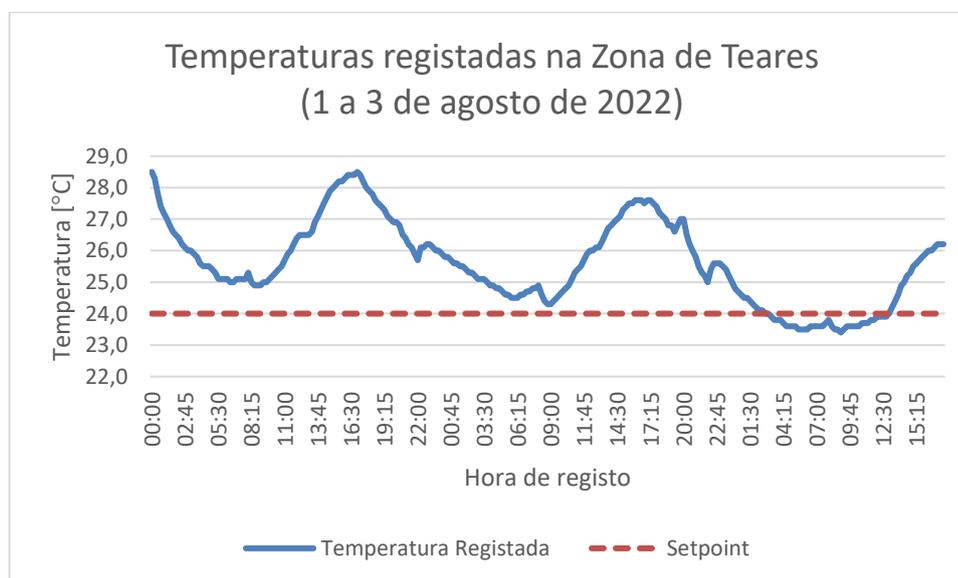


Figura 41 – Valores de temperatura na zona de teares, de 1 a 3 de agosto de 2022, e comparação com *setpoint*.

A média de temperaturas registadas na zona dos teares foi de 25,61 °C para os três dias, havendo assim um desvio de 1,61 °C do *setpoint* (24°C).

Fazendo uma comparação entre as duas figuras, é visível a semelhança entre os perfis de temperaturas da zona de teares e da zona exterior. Tal facto mostra que o controlador é sensível às mudanças de temperatura externas, acompanhando as suas descidas e os seus aumentos. Este tipo de comportamento corrobora o primeiro ponto da lista das falhas comuns a este tipo de controlo, apresentadas no capítulo 3.1.2.

Deve ainda fazer-se uma comparação dos valores de temperaturas obtidos na zona de produção com as premissas utilizadas para o fabrico da UTA. Na Figura 41 é visível que apenas durante um período de 6 horas a temperatura real é superior à temperatura de projeto, porém na zona de teares este facto não foi suficiente para que as temperaturas obtidas correspondessem ao *setpoint*. Os únicos registos com temperaturas na zona de teares iguais ou inferiores ao *setpoint* foram obtidos num momento que correspondeu aos registos mais baixos de temperatura exterior, onde a posterior subida ditou igualmente o mesmo comportamento na zona de trabalho.

Através do registo de temperaturas foi notado que, em certos momentos, a temperatura exterior era inferior aos registos da zona teares, o que é indesejável quando as temperaturas externas estão no espetro do desejável para o espaço a climatizar. Assim, deve referir-se a oportunidade de utilização da técnica de *free cooling*, no sentido de otimização do controlo e obtenção de uma maior eficiência energética.

A técnica de *free cooling* permite a climatização de um espaço com um menor gasto energético, já que as trocas de calor são feitas diretamente com o ar vindo do exterior que estará a uma temperatura inferior à desejada ao pretendido. A recorrer a esta técnica, sempre que a temperatura exterior seja inferior à temperatura do *setpoint*, o ar exterior ao ser insuflado é capaz de absorver a energia do espaço, diminuindo-se assim a temperatura interior com menor gasto energético.

Relativamente à humidade relativa, é denotado dificuldade em obter os valores pretendidos no projeto. Ainda que não tenha sido possível registar os valores de humidade relativa na zona de teares, denotou-se ao longo do período de análise (1 a 3 de agosto de 2022), dificuldade em verificar o valor de 50 % de HR (ou a tolerância aceite) por parte dos operários da produção. Este facto contraria com as condições externas onde na maioria do tempo de análise, a HR externa era superior à HR do projeto, como verificado na Figura 42.

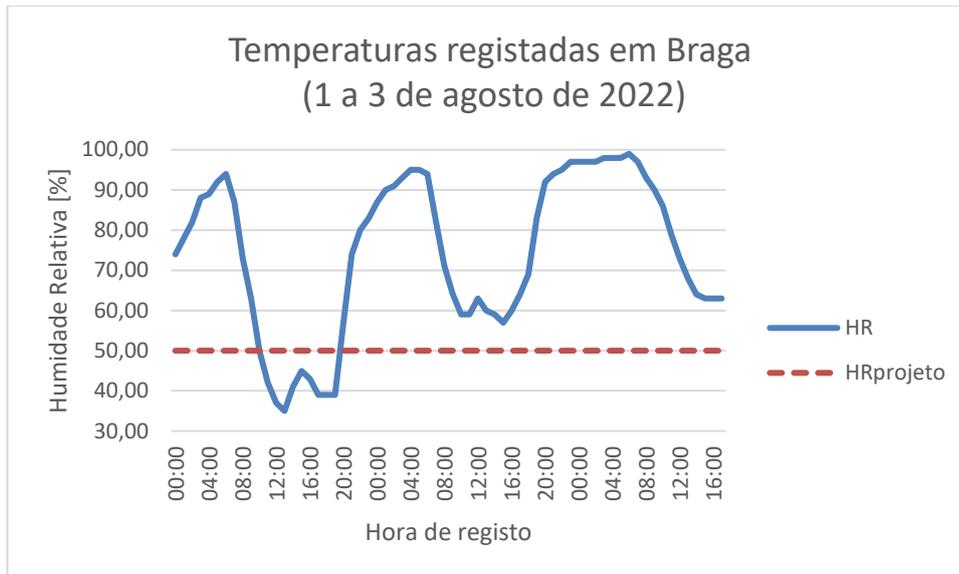


Figura 42 - Valores de humidade relativa na zona de Frossos, Braga entre os dias 1 e 3 de agosto de 2022, e comparação com a humidade relativa de projeto [36].

Ainda que para as condições de projeto fosse assumida uma humidade relativa exterior de 45 %, o que não se verificou na maioria do tempo, sendo este valor mais alto, na zona dos teares dificilmente foi obtido os valores de humidade relativa do projeto, verificando-se assim uma falha no sistema de ventilação.

Após a análise qualitativa e quantitativa dos resultados obtidos do modelo de controlo utilizado, que recorre aos fundamentos clássicos de controlo PID, é visível a inaptidão deste sistema para a satisfação das necessidades requeridas. Assim, é proposto um método de controlo alternativo, recorrendo à lógica *fuzzy*.

5.5. REGRAS DE UM SISTEMA FUZZY ALTERNATIVO

Com base nos fundamentos apresentados no capítulo 3.2., é pertinente a definição dos parâmetros que serão ajustados para o início da estruturação do controlo *fuzzy*. Sabendo que a temperatura exterior e a humidade relativa do ar terão influência no objetivo para a zona de teares, é pertinente utilizar esse conhecimento na implementação de regras *fuzzy*, aplicando-se, assim um dos principais pontos da teoria da lógica *fuzzy*: aproveitar o conhecimento empírico para a modelação de um sistema. Ainda no campo do conhecimento obtido face à análise dos dados desta zona climatizada, foi debatida a possibilidade de circular a água a uma temperatura mais baixa que a atualmente implementada ($T_{\text{circulação da água}} = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Em discussão com a equipa de controlo, decidiu-se que uma eventual solução para o problema

seria baixar a temperatura da água no permutador para 10 °C nas situações extremas, isto é, com temperaturas do espaço superior às desejadas. Esta solução passaria pela diminuição do aquecimento da água de circulação na bomba de calor.

Assim, na Figura 43, está apresentado o diagrama lógico da sugestão de controlo do espaço.

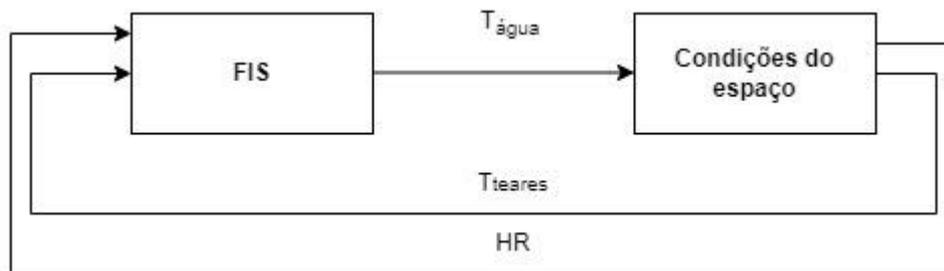


Figura 43 - Representação do diagrama lógico de controlo alternativo.

Na figura anterior está representada a interação pretendida do sistema: com os valores lidos dos sensores de humidade relativa (HR) e de temperatura dos teares (T_{teares}), o sistema FIS, após a conversão dos valores lidos, em valores *fuzzy*, irá fazer as correções necessárias no caudal de ar a insuflar, através da correção da temperatura de água de circulação, na serpentina do permutador da UTA, de forma a que a temperatura da água seja a ideal para que o ar insuflado consiga permitir manter a temperatura de *setpoint*.

Através da variação do valor de temperatura da água de circulação, o cenário de poupança energética aumenta uma vez que haverá momentos em que a exigência de aquecimento/arrefecimento por parte da bomba de calor/*chiller* não será tão elevado pelo facto da temperatura necessária não ser um valor fixo e, indiretamente, sobredimensionar o sistema ou, em casos de calor externo elevado, um subdimensionamento com consequências indesejáveis.

Com base na definição das entradas e da saída, definem-se as funções-pertença no *MATLAB*. O sistema *fuzzy* tem a arquitetura apresentada na Figura 44, recorrendo a um processo de desffuzificação Mamdani.

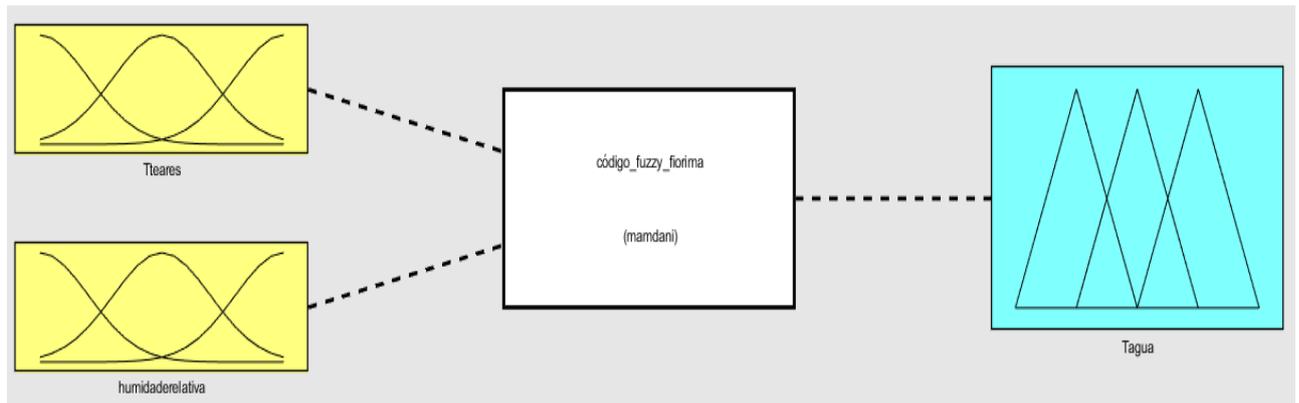


Figura 44 - Arquitetura do sistema *fuzzy* em *MATLAB*.

Cada entrada e saída será definida por uma função triangular e tem 5 funções-pertença cada, como representado na Figura 45. Neste sistema foi considerado uma lógica onde os valores do espaço, obtidos pelos sensores, nomeadamente de humidade relativa (*humidaderelativa*) e temperatura do espaço (*Tteares*) servem como entradas, no sentido de estar a operar sempre próximo ou no valor de *setpoint*. O valor de saída (*Tagua*) seria uma temperatura adequada do caudal de água na serpentina.

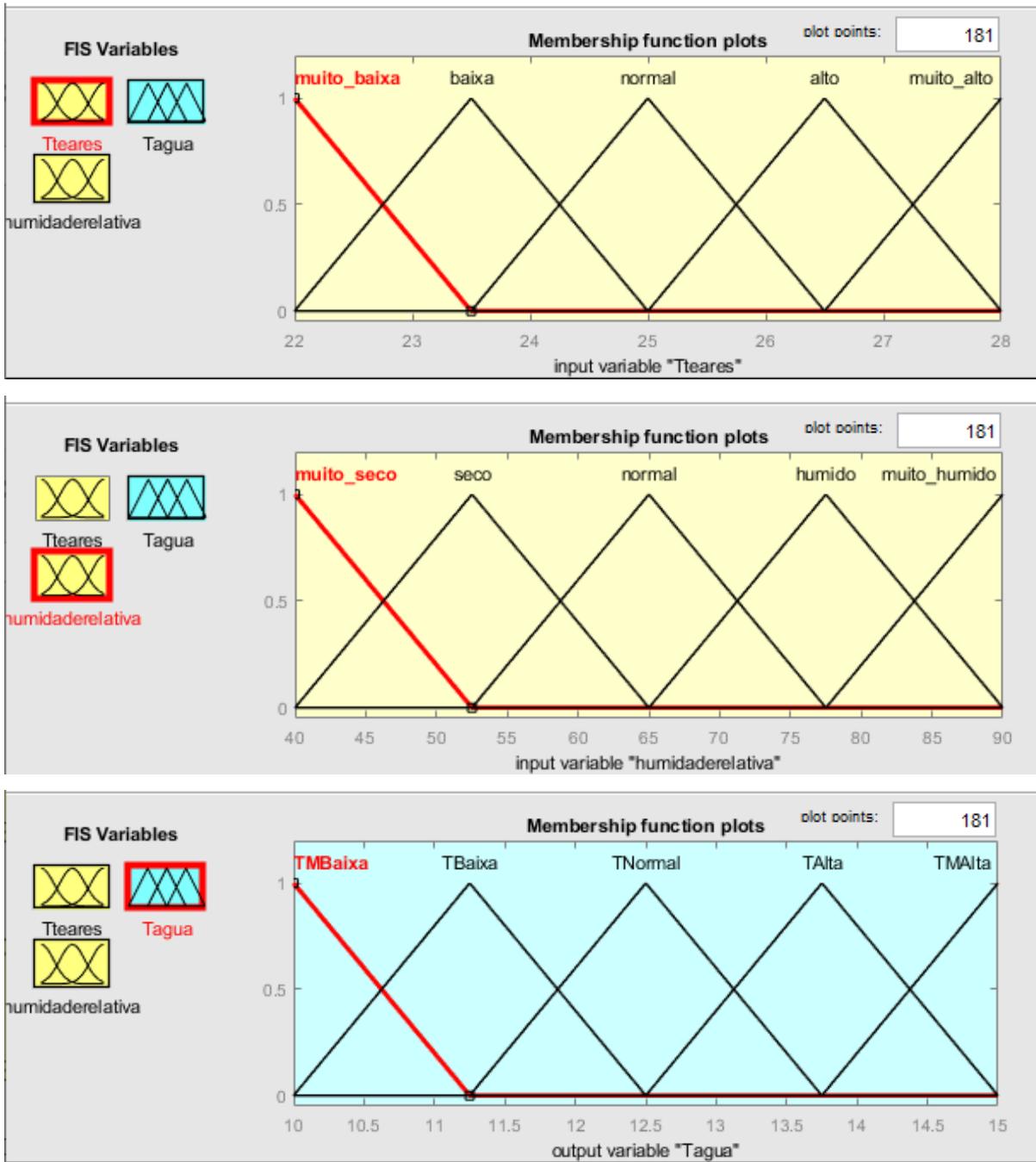


Figura 45 – Funções-pertença para as entradas e a saída, respetivamente, obtidas em MATLAB.

Tendo por base os princípios da lógica *fuzzy*, já se tem a classificação dos valores de entrada definida, que permitirá que o motor de interferência atue nos valores previamente fuzzificados. A lógica para a fuzzificação dos valores é a seguinte: o valor após a entrada irá ser inserido num intervalo com base nos intervalos de classificação apresentados na figura anterior. Assumindo o valor de "Tteares" = 23,7 °C, este insere-se numa classificação tanto de "baixa" como de "normal". Esta classificação implica que, segundo os intervalos definidos, a temperatura de água é, para o sistema, 20 % "normal" e 80 % "baixa". Esta classificação tem

a representação gráfica obtida na Figura 46, onde a linha azul classifica a percentagem inserida no campo da “normal” e a linha laranja faz a classificação para a “baixa”.

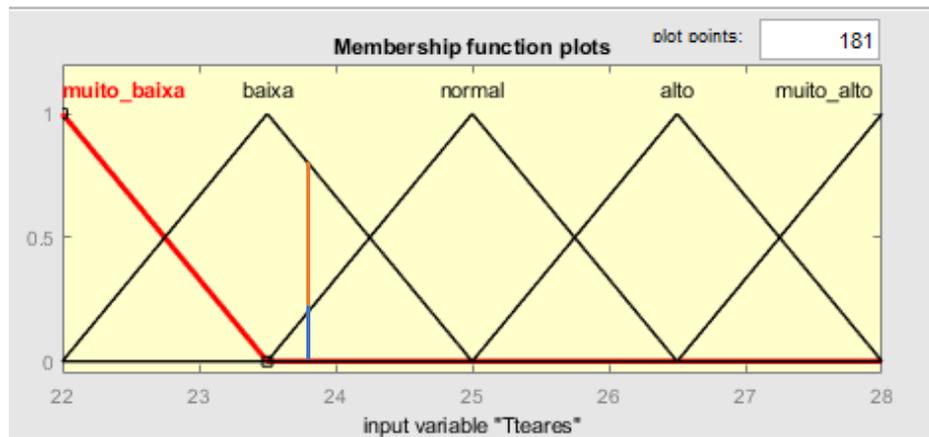


Figura 46 - Distribuição da classificação da "Tteares" para um valor de 23,7 °C.

Posterior a esta análise, os valores são tratados como valores fuzzificados, onde no exemplo acima apresentado, obter-se-ia o seguinte valor fuzzificado:

$$[0 \quad 0,8 \quad 0,2 \quad 0 \quad 0]$$

Este valor fuzzificado pode ser traduzido em: da temperatura de entrada dos teares, segundo as classificações previamente definidas, considera-se 0 % uma temperatura muito baixa, 80 % uma temperatura baixa, 20 % uma temperatura normal e 0 % uma temperatura alta ou muito alta.

De seguida, definem-se um conjunto de regras lógicas com base no objetivo pretendido. As regras consideradas encontram-se na Figura 47.

1. If (Tteares is muito_baixa) and (humidaderelativa is muito_seco) then (Tagua is TMAAlta) (1)
2. If (Tteares is muito_baixa) and (humidaderelativa is seco) then (Tagua is TMAAlta) (1)
3. If (Tteares is muito_baixa) and (humidaderelativa is normal) then (Tagua is TMAAlta) (1)
4. If (Tteares is muito_alto) and (humidaderelativa is muito_seco) then (Tagua is TMBaixa) (1)
5. If (Tteares is muito_alto) and (humidaderelativa is seco) then (Tagua is TMBaixa) (1)
6. If (Tteares is muito_alto) and (humidaderelativa is normal) then (Tagua is TMBaixa) (1)
7. If (Tteares is muito_alto) and (humidaderelativa is humido) then (Tagua is TMBaixa) (1)
8. If (Tteares is muito_alto) and (humidaderelativa is muito_humido) then (Tagua is TMBaixa) (1)
9. If (Tteares is muito_baixa) and (humidaderelativa is humido) then (Tagua is TMAAlta) (1)
10. If (Tteares is muito_baixa) and (humidaderelativa is muito_humido) then (Tagua is TMAAlta) (1)
11. If (Tteares is baixa) and (humidaderelativa is muito_seco) then (Tagua is TAlta) (1)
12. If (Tteares is baixa) and (humidaderelativa is seco) then (Tagua is TAlta) (1)
13. If (Tteares is baixa) and (humidaderelativa is normal) then (Tagua is TAlta) (1)
14. If (Tteares is baixa) and (humidaderelativa is humido) then (Tagua is TNormal) (1)
15. If (Tteares is baixa) and (humidaderelativa is muito_humido) then (Tagua is TNormal) (1)
16. If (Tteares is normal) and (humidaderelativa is muito_seco) then (Tagua is TMBaixa) (1)
17. If (Tteares is normal) and (humidaderelativa is seco) then (Tagua is TNormal) (1)
18. If (Tteares is normal) and (humidaderelativa is normal) then (Tagua is TNormal) (1)
19. If (Tteares is normal) and (humidaderelativa is humido) then (Tagua is TNormal) (1)
20. If (Tteares is normal) and (humidaderelativa is muito_humido) then (Tagua is TNormal) (1)
21. If (Tteares is alto) and (humidaderelativa is muito_seco) then (Tagua is TMBaixa) (1)
22. If (Tteares is alto) and (humidaderelativa is seco) then (Tagua is TMBaixa) (1)
23. If (Tteares is alto) and (humidaderelativa is normal) then (Tagua is TMBaixa) (1)
24. If (Tteares is alto) and (humidaderelativa is humido) then (Tagua is TMBaixa) (1)
25. If (Tteares is alto) and (humidaderelativa is muito_humido) then (Tagua is TMBaixa) (1)
26. If (Tteares is baixa) and (humidaderelativa is humido) then (Tagua is TAlta) (1)

Figura 47 - Representação das regras lógicas de controlo *fuzzy* da zona de teares.

A definição das regras tem por base princípios psicrométricos, dando prevalência à estabilização da temperatura e posteriormente ao encontro dos valores de humidade relativa.

Um valor de humidade relativa acima de 50 % é necessário para o processo fabril, de forma a evitar quebra no fio utilizado nos teares. Segundo a Organização Mundial de Saúde, há um intervalo ideal para a o valor de humidade relativa num espaço. Uma humidade relativa acima de 70 % torna-se desconfortável para os operários, além de ser propícia ao surgimento de doenças respiratórias. Por outro lado, a humidade relativa baixa promove a quebra o fio de tecido, provocando quebras na produção e também traz doenças respiratórias, requerendo assim especial atenção para que a humidade relativa não baixe dos 40 %.

Sabendo que para a mesma humidade absoluta, o valor de humidade relativa baixa para aumentos de temperaturas, o controlador deve atuar no sentido de baixar a temperaturas para que esta diminuição não ocorra.

Em situações em que a humidade relativa é baixa, mas a temperatura é satisfatória, é onde se prevê maior dificuldade, já que a baixa de temperatura através da circulação da água a uma temperatura mais baixa pode não ser suficiente para os ganhos na humidade relativa e os valores de temperatura destoarem.

5.6. RESULTADOS OBTIDOS

Após a definição das regras, pode simular-se o comportamento que o sistema FIS teria e a reação que o sistema daria para ajustar a temperatura da água ao valor desejado. Na Figura 48 está representado o comportamento do *chiller* como resposta às necessidades do espaço.

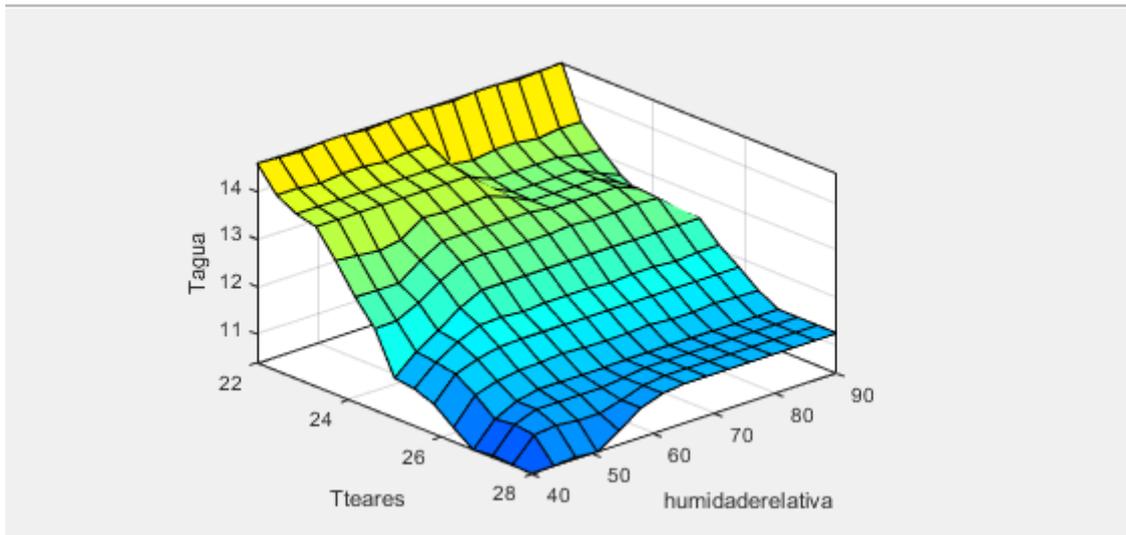


Figura 48 – Comportamento estimado da resposta do *chiller* e consequente valor de *Tagua*, em *MATLAB*.

Através da simulação é possível prever a temperatura do caudal de água, mediante a *Tteares* e HR. Um exemplo encontra-se na Figura 49, onde foi escolhida uma temperatura nos teares de 24 °C e humidade relativa de 60,1 %.

Posteriormente, o sistema através de inferência dos valores e posterior desfuzzificação, com base nas percentagens de cada uma das funções-pertença, o sistema *fuzzy* cria uma resposta com base no centroide originado pela forma geométrica das interseções, obtendo-se uma resposta.

Esta resposta, neste caso da temperatura da água da bateria da UTA, como apresentado na Figura 50, seria de 13,3 °C.

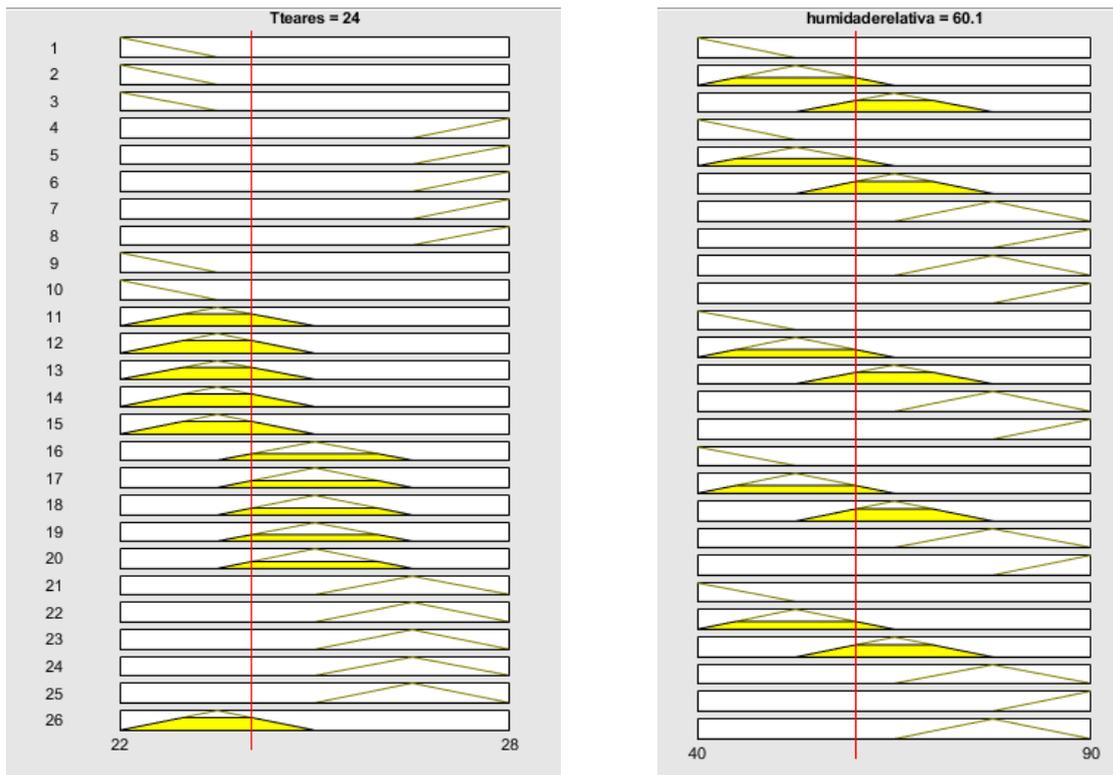


Figura 49 – Representação de um exemplo da escolha de T_{teares} e HR na simulação no *MATLAB*.

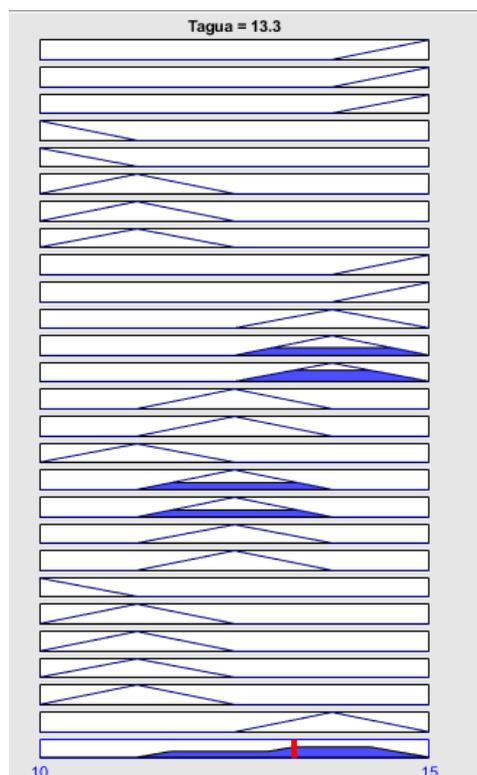


Figura 50 - Valor de temperatura de água face aos valores escolhidos no exemplo da Figura 49 na simulação do *MATLAB*.

6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O caminho para a obtenção de maior eficiência energética de um espaço pode seguir diversas vias, sendo pela eficiência das máquinas que constituem o espaço, melhorias nos aspetos construtivos ou alteração e consequente automatização da climatização de um espaço. Todavia, ainda havendo uma série de áreas passíveis de serem melhoradas, não há de facto uma solução ótima que permita ser implementada transversalmente em diferentes edifícios e os resultados sejam igualmente satisfatórios em todos os casos.

6.1. CONCLUSÕES

As soluções para a obtenção de um sistema AVAC otimizado não passam apenas por uma melhoria do controlo das máquinas, mas também pela envolvente do edifício. No caso de estudo foi feita uma análise dos elementos construtivos tendo em conta uma comparação com um edifício de comércio e serviços, com base nas restrições apresentadas no Manual SCE.

Desta forma e, sempre com a premissa que um edifício industrial como o analisado não tem exigência de cumprimento de quaisquer requisitos dos acima mencionados, é pertinente concluir que alterações a nível construtivo irão contribuir para o cumprimento dos objetivos estipulados para o sistema AVAC implementado e tal facto pode ser concluído graças ao comportamento que a temperatura do espaço apresentava face às alterações da temperatura exterior, obtendo-se um perfil deveras semelhante. Esta semelhança não deveria ser tão rapidamente obtida, ou seja, a frequência de oscilação da temperatura externa reflete-se na oscilação de temperatura interna, devendo o sistema de controlo de temperatura do edifício e o próprio edifício serem capazes de se adaptarem às alterações em espaços de tempo aceitáveis (entre 15 e 30 minutos). Porém, um elemento destacou-se no desvio do coeficiente da resistência térmica, concluindo-se que a dificuldade de atingir os *setpoints* não passa apenas pela melhoria da envolvente.

Assim sendo, um método de controlo alternativo, como o aplicado cimenta a obtenção de *setpoints* exigidos e um funcionamento otimizado das máquinas do circuito de AVAC. Sabendo as falhas que o sistema atual tem na obtenção das temperaturas e/ou humidades relativas desejáveis para a boa execução do processo fabril, é sugerido uma alteração ao controlo clássico PID para um controlo com base na lógica *fuzzy* permitindo assim uma

variação na temperatura da água que circula na bateria de arrefecimento/aquecimento, permitindo que as trocas de calor com o ar sejam feitas a uma temperatura ideal.

Assim, a bomba de calor/*chiller* aquece ou arrefece a água que irá circular mediante as necessidades atuais do sistema e não, como é feito atualmente, assumindo condições que na maioria das vezes não cumprem à realidade. Com a implementação deste método de controlo, em substituição do atual com condições que o tornam sobredimensionado e paradoxalmente não cumpre com os *setpoints*, obtém um sistema adaptável e que permite poupança de energia já que a bomba de calor terá um funcionamento otimizado e, por vezes, dado que a água provém de um furo geotérmico, haverá mais cenários em que a bomba não precisará de intervir já que a gama de temperaturas da água se estende e não é apenas um valor fixo, de 15 °C. Para o campo da humidade relativa, a instalação de um humidificador na UTA para satisfazer as necessidades de humificação em temperaturas normais pode ser uma solução a considerar.

Desta forma, investindo nas soluções construtivas para auxiliarem o modelo de controlo, alterando para uma lógica *fuzzy*, obter-se-á um espaço que cumprirá com os objetivos previstos e o custo energético será menor já que as máquinas trabalharão para condições otimizadas graças a um controlo adaptável, com base em dados reais e, por conseguinte, mais inteligente.

6.2. PERSPETIVAS E TRABALHOS FUTUROS

Prevê-se que este trabalho seja utilizado como ponto de partida para análise do controlo alternativo de sistemas AVAC. Assim, sugere-se numa primeira fase a obtenção de uma base de dados mais completa durante um período maior relativamente às condições do espaço da zona de teares. Em seguida deve ser feita uma modelação do sistema onde deve ser tido em conta os seguintes aspetos: número de operários a trabalhar por turno, número de máquinas a funcionar (devido à contribuição de aquecimento do espaço, fruto das perdas térmicas) e, picos de utilização. Desta forma na modelação do sistema deve ter-se em conta o calor emitido pelos operários, bem como a potência térmica emanada pelos teares para que o sistema seja capaz de contornar esta carga térmica, que será à partida um valor sempre fixo. A utilização de dados online na operação do sistema fará com que o sistema seja mais adaptável, portanto o sistema deve comparar diretamente com os valores de base de dados

on-line de temperaturas com um *delay* de 15 minutos, permitindo assim a que o espaço reflita as alterações termodinâmicas impostas pelas alterações de temperatura exterior. Numa ótica diferente o sistema poderá prever a temperatura do caudal de água com base nas temperaturas exteriores registadas através de valores lidos de registos de anos anteriores, porém o controlo será mais preditivo que adaptativo.

Um sistema de natureza adaptativa enquadrar-se-ia mais num edifício de características diferentes, como por exemplo, um hospital ou um centro comercial, onde as temperaturas e humidades relativa estão estipuladas com mais prevalência no conforto humano do que em condições de produção e as variações de ocupação são substancialmente diferentes face ao caso de estudo.

Em qualquer espaço de aplicação deste controlo adaptativo, sugere-se a definição dos materiais necessários para a implementação, como por exemplo microcontroladores e viabilidade financeira do projeto.

BIBLIOGRAFIA

- [1] «HEATING AND COOLING facts and figures», 2017.
- [2] M. Economidou, V. Todeschi, P. Bertoldi, D. D’Agostino, P. Zangheri, e L. Castellazzi, «Review of 50 years of EU energy efficiency policies for buildings», *Energy and Buildings*, vol. 225, p. 110322, 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110322.
- [3] «Plano Nacional Energia E Clima (2021-2030)», n. Pnec 2030, p. 200, 2021.
- [4] República Portuguesa, «Decreto-Lei n.º 101-D/2020 - Sistema de Certificação Energética dos Edifícios», *Diário da República n.º 237/2020, 1º Suplemento, Série I de 2020-12-07*, n. 2, pp. 7-(21) a 7-(45), 2020.
- [5] P. Kumar *et al.*, «Indoor air quality and energy management through real-time sensing in commercial buildings», *Energy and Buildings*, vol. 111, pp. 145–153, 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.11.037.
- [6] República Portuguesa, «Despacho n.º 6476-H/2021 de 1 de julho (Manual do SCE)», n. 66, p. 251, 2021.
- [7] T. Lipinski, D. Ahmad, N. Serey, e H. Jouhara, «Review of ventilation strategies to reduce the risk of disease transmission in high occupancy buildings», *International Journal of Thermofluids*, vol. 7–8, p. 100045, 2020, doi: 10.1016/j.ijft.2020.100045.
- [8] ASHRAE; American National Standards Institute, «2013 ASHRAE Handbook—Fundamentals», 2013.
- [9] P. . Fanger, *Thermal comfort : analysis and applications in environmental engineering*. New York: McGraw-Hill, 1970.
- [10] K. Mařík, J. Rojíček, P. Stluka, e J. Vass, «Advanced HVAC control: Theory vs. reality», *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, vol. 44, n. 1 PART 1, pp. 3108–3113, 2011, doi: 10.3182/20110828-6-IT-1002.03085.
- [11] «Portaria n.º 138-I/2021», *Diário da República n.º 126/2021, 2º Suplemento, Série I de 2021-07-01*, n. 12, pp. 12–53, 2021.
- [12] G. Serale, M. Fiorentini, A. Capozzoli, D. Bernardini, e A. Bemporad, «Model Predictive Control (MPC) for enhancing building and HVAC system energy efficiency: Problem formulation, applications and opportunities», *Energies*, vol. 11, n. 3. 2018, doi: 10.3390/en11030631.
- [13] N. Aste, M. Manfren, e G. Marenzi, «Building Automation and Control Systems and

- performance optimization: A framework for analysis», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 75, n. October 2016, pp. 313–330, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.10.072.
- [14] M. Araki, «“CONTROL SYSTEMS, ROBOTICS AND AUTOMATION – Volume VII - PID Control”», vol. II, 2009.
- [15] J. Machado, «Modelação Matemática de Sistemas de Controlo (Teórica)», *Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Minho*, p. 36, 2020.
- [16] J. Machado, «Análise de resposta transitória e de regime estacionário sistemas de 2ª ordem (Teórica)», *Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Minho*, p. 52, 2020.
- [17] J. Machado, «Critério de Estabilidade de Routh-Hurwitz», *Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Minho*, p. 33, 2020.
- [18] J. Machado, «PID», *Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Minho*, p. 48, 2020.
- [19] S. W. Sung e I. B. Lee, «Limitations and countermeasures of PID controllers», *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 35, n. 8, pp. 2596–2610, 1996, doi: 10.1021/ie960090+.
- [20] M. W. Ahmad, M. Mourshed, B. Yuce, e Y. Rezgui, «Computational intelligence techniques for HVAC systems A review», p. 40, 2015, doi: 10.1007/s12273-016-0285-4.
- [21] Y. Yao e D. K. Shekhar, «State of the art review on model predictive control (MPC) in Heating Ventilation and Air-conditioning (HVAC) field», *Building and Environment*, vol. 200, 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.107952.
- [22] H. Nagpal, A. Staino, e B. Basu, «Robust model predictive control of HVAC systems with uncertainty in building parameters using linear matrix inequalities», *Advances in Building Energy Research*, vol. 0, n. 0, pp. 1–17, 2019, doi: 10.1080/17512549.2019.1588165.
- [23] X. Xu, S. Wang, e G. Huang, «Robust MPC for temperature control of air-conditioning systems concerning on constraints and multitype uncertainties», *Building Services Engineering Research and Technology*, vol. 31, n. 1, pp. 39–55, 2010, doi: 10.1177/0143624409352420.
- [24] Z. Yu, L. Jia, M. C. Murphy-Hoye, A. Pratt, e L. Tong, «Modeling and stochastic control for home energy management», *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, n. 4, pp. 2244–

- 2255, 2013, doi: 10.1109/TSG.2013.2279171.
- [25] H. Huang, L. Chen, e E. Hu, «A new model predictive control scheme for energy and cost savings in commercial buildings: An airport terminal building case study», *Building and Environment*, vol. 89, pp. 203–216, 2015, doi: 10.1016/j.buildenv.2015.01.037.
- [26] M. Ning e M. Zaheeruddin, «Neuro-optimal operation of a variable air volume HVAC&R system», *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, n. 5, pp. 385–399, 2010, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2009.10.009.
- [27] L. A. Zadeh, «Fuzzy Sets», *Department of Electric Engineering and Electronics Research Laboratory*, n. 1, pp. 338–353, 1965.
- [28] Z. Afroz, G. Shafiullah, T. Urmee, e G. Higgins, «Modeling techniques used in building HVAC control systems: A review», Western Australia, 2017.
- [29] J. Fonseca, «Controlo Digital Lógica Fuzzy», *Departamento de Eletrónica Industrial, Universidade do Minho*, p. 149, 2000.
- [30] A. Afram e F. Janabi-Sharifi, «Theory and applications of HVAC control systems - A review of model predictive control (MPC)», *Building and Environment*, vol. 72, 2014, doi: 10.1016/j.buildenv.2013.11.016.
- [31] E. H. Mamdani e S. Assilian, «An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller», *International Journal of Man-Machine Studies*, vol. 7, n. 1, pp. 1–13, Jan. 1975, doi: 10.1016/S0020-7373(75)80002-2.
- [32] T. Takagi e M. Sugeno, «Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control», *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. SMC-15, pp. 116–132, 1985, doi: 10.1109/TSMC.1985.6313399.
- [33] «Google Maps», 2022. <https://www.google.pt/maps/place/41°34'09.2%22N+8°26'49.6%22W/@41.56922,-8.4493037,17z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x0:0x199ae3f2a5820655!8m2!3d41.56922!4d-8.447115?hl=pt-PT>.
- [34] T. Vale, «Estudo e viabilidade económica de projeto de geotermia num sistema AVAC», Universidade do Minho, 2021.
- [35] DAIKIN, «Unidades de Tratamento de Ar», vol. 2016, pp. 1–66, 2014.
- [36] Instituto Português do Mar e da Atmosfera, «622-BragaMerelim082022», 2022.

ANEXOS

ANEXO A: VALORES DE TEMPERATURA PARA DISTRITO DE BRAGA

Através do cálculo das zonas climáticas foi possível obter o gráfico de temperaturas mensais para todos os meses de um ano, como representado na Figura 51.

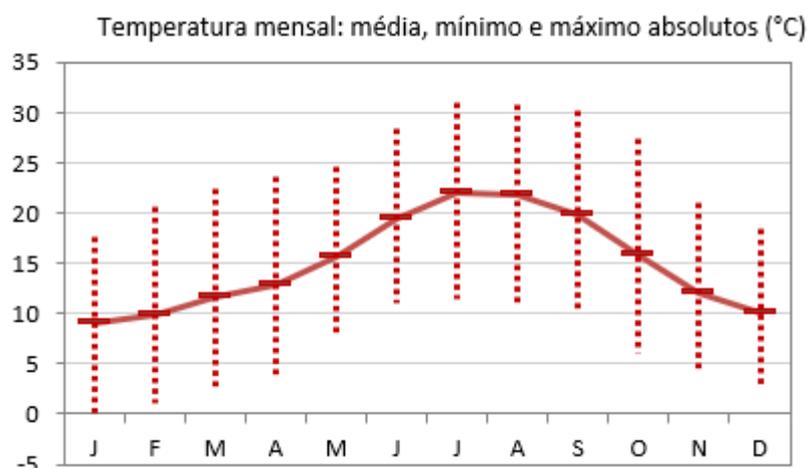


Figura 51 - Representação gráfica da temperatura mensal para todos os meses do ano em Braga.

Foi igualmente possível obter uma tabela que sintetiza os valores médios das temperaturas mensais, mínimos, máximos bem como os valores de irradiação solar mensal média diária global (G) e difusa (D), os valores de humidade relativa média mensais (U) e velocidade do vento (v).

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
T	9,0	9,9	11,6	12,9	15,5	19,4	21,9	21,7	19,8	15,8	12,1	10,1 °C
min T	-0,2	1,1	2,4	3,8	7,6	11,0	11,4	10,8	10,1	6,0	4,0	2,5 °C
max T	17,6	20,7	22,4	23,6	24,6	28,3	30,9	30,7	30,2	27,4	21,1	18,5 °C
G	2,2	3,1	5,2	6,7	8,2	9,2	9,4	8,5	6,1	4,0	2,4	1,8 kWh/m ²
D	1,1	1,5	2,4	2,9	3,1	2,9	2,8	2,3	2,2	1,9	1,3	1,1 kWh/m ²
U	85	83	78	76	76	73	74	75	79	83	85	85 %
v	2,1	2,3	2,1	2,6	2,5	2,1	2,2	2,1	1,8	1,7	1,7	2,0 m/s

Figura 52 - Valores médios de temperatura, irradiação solar, humidade relativa e velocidade do vento para a zona de Braga.

ANEXO B: NUTS III – CONCELHO DE BRAGA

A NUTS III (D.L. nº 68/2008 de 14 de abril), apresentada no Anexo II do Manual SCE, remete que o concelho de Braga pertence à zona do Cávado, como apresentado na Figura 53.

Concelho	NUTS III
Ansião	Pinhal Interior Norte
Arcos de Valdevez	Minho-Lima
Arganil	Pinhal Interior Norte
Armamar	Douro
Arouca	Entre Douro e Vouga
Arraiolos	Alentejo Central
Arronches	Alto Alentejo
Arruda dos Vinhos	Oeste
Aveiro	Baixo Vouga
Avis	Alto Alentejo
Azambuja	Lezíria do Tejo
Baião	Tâmega
Barcelos	Cávado
Barrancos	Baixo Alentejo
Barreiro	Península de Setúbal
Batalha	Pinhal Litoral
Beja	Baixo Alentejo
Belmonte	Cova da Beira
Benavente	Lezíria do Tejo
Bombarral	Oeste
Borba	Alentejo Central
Boticas	Alto Trás-os-Montes
Braga	Cávado
Bragança	Alto Trás-os-Montes
Cabeceiras de Basto	Ave
Cadaval	Oeste

Figura 53 - Extrato da Tabela do NUTS III apresentada no anexo II do Manual SCE.

ANEXO C: FÓRMULAS PARA CÁLCULO DA ZONA CLIMÁTICA

Os valores dos parâmetros climáticos (X) associados a um determinado local, são obtidos a partir de valores de referência (X_{REF}) para cada NUTS III e ajustados com base na altitude desse local (z). Deve utilizar-se a equação (2) do Manual SCE.

$$X = X_{REF} + a \cdot (z - z_{REF}) \quad (2)$$

Onde:

X – Parâmetro climático a corrigir;

X_{REF} – Parâmetro climático à cota de referência;

a – Declive que relaciona a diferença de altitudes [mês/km] ou [°C/km];

z – Altitude do edifício [km];

z_{REF} – Altitude de referência [km].

Os parâmetros necessários para a estação de aquecimento encontram-se na Tabela 9 do Manual SCE e tem por base a zona NUTS III a que o concelho de Braga pertence, apresentado na Figura 54.

NUTS III	z_{REF} m	M		GD		$\theta_{ext.i}$		G_{sul} kWh/ (m ² .mês)
		M_{REF} meses	a mês/km	GD_{REF} °C	a °C/km	$\theta_{ext.i,REF}$ °C	a °C/km	
Alentejo Central	221	5,3	2	1 150	1 100	10,0	-4	150
Alentejo Litoral	88	5,3	2	1 089	1 100	10,8	-2	150
Algarve	145	4,8	0	987	1 800	11,3	-6	155
Alto Alentejo	246	5,3	2	1 221	1 200	9,6	-3	145
Alto Trás-os-Montes	680	7,3	0	2 015	1 400	5,5	-4	125
Ave	426	7,2	0	1 653	1 500	7,8	-6	125
Baixo Alentejo	178	5,0	0	1 068	1 000	10,7	-2	155
Baixo Mondego	67	6,3	0	1 304	1 000	9,7	-5	140
Baixo Vouga	50	6,3	2	1 337	1 100	9,5	-5	140
Beira Interior Norte	717	7,5	0	1 924	1 000	6,3	-3	135
Beira Interior Sul	328	5,4	1	1 274	1 800	9,1	-6	140
Cávado	171	6,8	1	1 491	1 300	9,0	-6	125

Figura 54 - Representação dos parâmetros necessários para a estação de aquecimento no concelho de Braga.

Onde:

GD – Número de graus-dias na estação de aquecimento, na base de 18 °C [°C];

M – Duração da estação de aquecimento [meses];

$\theta_{ext, i}$ – Temperatura exterior média do mês mais frio da estação de aquecimento [°C];

G_{sol} – Energia solar média mensal incidente numa superfície vertical orientada a sul, durante a estação de aquecimento [kWh/(m².mês)].

Os parâmetros necessários para a estação de arrefecimento encontram-se na Tabela 10 do Manual SCE e tem por base a zona NUTS III a que o concelho de Braga pertence, apresentado na Figura 55.

NUTS III	z_{REF} m	$\theta_{ext,v}$		G_{sol} [kWh/m ²]								
		$\theta_{ext,v_{REF}}$ °C	a °C/km	0° H	90° N	90° NE	90° E	90° SE	90° S	90° SO	90° O	90° NO
Alentejo Central	221	24,3	0	850	225	370	510	500	415	500	510	370
Alentejo Litoral	88	22,2	0	850	225	365	510	495	405	495	510	365
Algarve	145	23,1	0	865	225	375	515	500	405	500	515	375
Alto Alentejo	246	24,5	0	845	225	365	505	500	415	500	505	365
Alto Trás-os-Montes	680	21,5	-7	790	220	345	480	485	425	485	480	345
Ave	426	20,8	-3	795	220	350	490	490	425	490	490	350
Baixo Alentejo	178	24,7	0	855	225	370	510	495	405	495	510	370
Baixo Mondego	67	20,9	0	825	225	360	495	495	420	495	495	360
Baixo Vouga	50	20,6	-2	810	220	355	490	490	420	490	490	355
Beira Interior Norte	717	21,7	-5	820	220	355	495	500	425	500	495	355
Beira Interior Sul	328	25,3	-7	830	220	360	500	495	420	495	500	360
Cávado	171	20,7	-3	795	220	345	485	490	425	490	485	345

Figura 55 - Representação dos parâmetros necessários para a estação de arrefecimento no concelho de Braga.

Onde:

$\theta_{ext, v}$ – Temperatura exterior média na estação de arrefecimento [°C];

G_{sol} – Energia solar média incidente numa superfície horizontal (0°) ou vertical (90°), acumulada durante a estação de arrefecimento [kWh/m²].

ANEXO D: CONSIDERAÇÕES NA OBTENÇÃO DO VALOR DA RESISTÊNCIA TÉRMICA DE UMA SOLUÇÃO

Resistência térmica de materiais não homogêneos

Para camadas não homogêneas, designadamente alvenarias ou lajes aligeiradas, a resistência térmica deve ser obtida mediante a utilização da equação (22).

Resistência térmica superficial

Na determinação da resistência total de um elemento é necessário ter em conta as resistências térmicas superficiais, variando estas com o sentido do fluxo de calor e a sua posição, conforme tabela apresentada na Figura 56.

Sentido do fluxo de calor	Resistência térmica superficial [(m ² .°C)/W]	
	Interior (R_{si})	Exterior (R_{se})
Horizontal ⁽¹⁾	0,13	0,04
Ascendente	0,10	
Descendente	0,17	

(1) Inclinação entre 0° e ± 30°

Figura 56 - Representação da tabela das resistências térmicas superficiais do Manual SCE.

Resistência térmica de soluções construtivas com espaços de ar não ventilados

Com base na espessura e no sentido do fluxo de calor, devem ser tomados os valores da tabela apresentada na Figura 57.

Espessura média [cm]	R_{ar} [(m ² .°C)/W]		
	Fluxo horizontal ⁽¹⁾	Fluxo ascendente	Fluxo descendente
< 0,5	0,00		
0,5	0,11		
0,7	0,13		
1	0,15		
1,5	0,17	0,16	0,17
2,5	0,18		0,19
5			0,21
10			0,22
30			0,23

(1) Inclinação entre 0° e ± 30°

Figura 57 - Representação da tabela de valores de resistências térmicas de espaços de espaços de ar não ventilados do Manual SCE.

Resistência térmica de soluções construtivas com espaços de ar fortemente ventilados

No caso da existência de um espaço de ar fortemente ventilado na solução construtiva, a determinação da resistência térmica total ($R_{tot, ve}$) deve apenas ter em conta as camadas desde o interior até o referido espaço de ar, não considerando esta camada nem as restantes, como exemplificado no Manual SCE, abaixo na Figura 58.

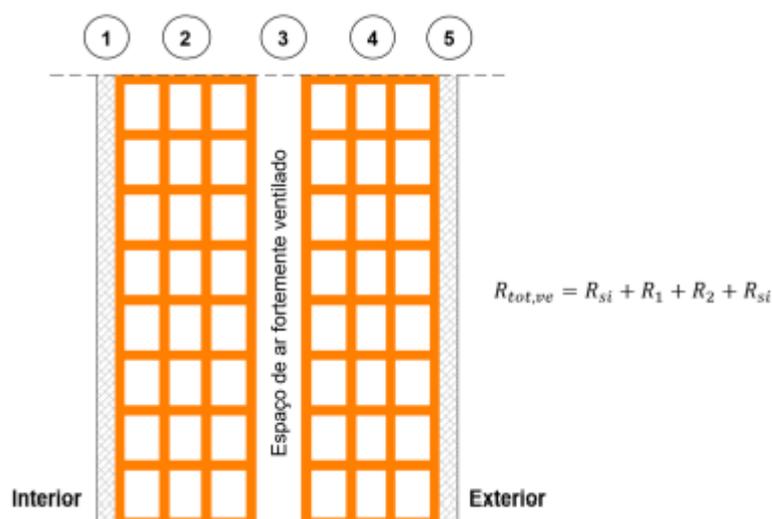


Figura 58 - Representação de um exemplo de resistência térmica total em solução construtiva com espaço de ar fortemente ventilado.

Resistência térmica de soluções construtivas com espaços de ar fracamente ventilados

A determinação da resistência térmica dos espaços de ar fracamente ventilados depende do somatório das resistências térmicas das camadas que se encontram entre o espaço de ar e o exterior, de acordo com as condições seguintes:

- Se a soma das resistências térmicas das camadas localizadas entre o espaço de ar e o ambiente exterior for superior a 0,15 (m².°C)/W, a resistência térmica do espaço de ar toma o valor de 0,15 (m².°C)/W;
- Se a soma das resistências térmicas das camadas localizadas entre o espaço de ar e o ambiente exterior for igual ou inferior a 0,15 (m².°C)/W, a resistência térmica do espaço de ar é igual a metade do valor obtido através da tabela apresenta na Figura 57.

A título explicativo, considera-se o exemplo do Manual SCE, apresentado na Figura 59.

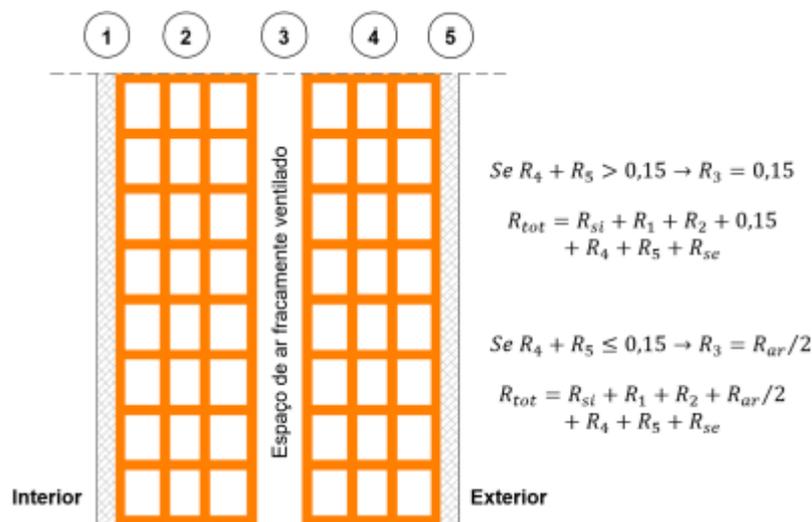


Figura 59 - Representação de um exemplo de resistência térmica total em solução construtiva com espaço de ar fracamente ventilado.

ANEXO E: CÁLCULO DO COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA DOS ELEMENTOS CONSTRUTIVOS DO EDIFÍCIO FIORIMA S.A.

Parede exterior

Tabela 7 - Caracterização térmica do elemento construtivo: parede exterior.

Elemento	Espessura d [m]	Condutibilidade λ [W/mK]	Resistência térmica R_T [m ² K/W]	Coefficiente de transmissão térmica U [W/m ² K]
R_{se}	-	-	0,04	
Chapa de aço	0,005	50	~0	
Poliuretano	0,05	0,3	1,35	
Chapa de aço	0,005	50	~0	
R_{si}	-	-	0,13	
		Total	1,52	0,66

Pavimento sobre o solo

Tabela 8 - Caracterização térmica do elemento construtivo: pavimento sobre o solo.

Elemento	Espessura d [m]	Condutibilidade λ [W/mK]	Resistência térmica R_T [m ² K/W]	Coefficiente de transmissão térmica U [W/m ² K]
R_{se}	-	-	0,04	
Betão normal	0,50	1,65	3,30	
R_{si}	-	-	0,17	
		Total	3,51	0,28

Teto falso

Tabela 9 - Caracterização térmica do elemento construtivo: teto falso.

Elemento	Espessura d [m]	Condutibilidade λ [W/mK]	Resistência térmica R_T [m ² K/W]	Coefficiente de transmissão térmica U [W/m ² K]
R_{se}	-	-	0,04	
Placa de gesso cartonado	0,02	0,25	0,08	
R_{si}	-	-	0,10	
		Total	0,39	

ANEXO F: ESPECIFICAÇÕES DA UTA



Eficiência Energética CLASSE A Folha de Características Técnicas

Ficheiro: UTA_Teares

Versão: OCRAM AHU Select V13.00

Data Versão: November 2019

Classificação de acordo com a EN 1886:

Resistência Mecânica: D1 (M)

Fugas pela envolvente: L1 / L1 (M) - L2 / L2 (R) (- 400 Pa / + 700 Pa)

Fugas p/by-pass nos filtros: F9 (M)

Coefficiente de Transferência Térmica: T3 (M)

Factor de Pontes Térmica: TB3 (M)

Atenuação Acústica da Envolvente:

Hz	125	250	500	1K	2K	4K	8K
dB	19	23	27	30	30	34	43

DETALHES DO PROJECTO

Data	Projecto n.	Ref. Projecto	Unidade n.
24 Sep 2020	PRJ20-1226	UTAs Fiorima	UTA_Teares
Cliente	Data da Revisão	Ref. do Cliente	Caudal de Ar
	24 Sep 2020	UTA_Teares	26000 m3/h
Velocidade na Unidade	Velocidade de alimentação	Velocidade de Extracção	
1.92 m/s	1.92 m/s	1.92 m/s	
Design Outdoor Air	Recirculated Air		
2.00 C	80 %		

CONSTRUÇÃO DA UNIDADE

Espessura do Painel	Isolamento do Painel	Estrutura em Alumínio	Acabamento da Estrutura
50 mm	RW 90kg/m3	Aluminium Post	Mill Finished
Painel Exterior	Painel Interior	Estrutura da Base	Localização
1.0mm Galv RAL9006 silver	0.8mm Galv	Chassis STD 120mm	External
Lado dos Acessos	Modelo	Tipo de Telhado	Reforço do Chão
Right	MU11	Flat painted	None

PESO E DIMENSÕES DAS SECÇÕES

Secção N.	Comprimento	Largura	Altura	Peso
A	2416 mm	2050 mm	2050 mm	727 kg
B	1466 mm	2050 mm	2050 mm	517 kg
C	1736 mm	2050 mm	2050 mm	428 kg

DIMENSÕES TOTAIS DA UNIDADE

Comprimento	Largura	Altura	Peso Total
3882 mm	4100 mm	2050 mm	1673 kg

001 REGISTO/LIGAÇÃO FLEX.

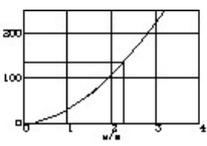
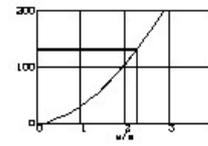
Caudal de Ar	Dimensões	Perda de Carga	Fugas	Velocidade	Damper	Ligação Flexível	Louvre	Actuador
26000 m3/h	1910 x 800 mm	22 Pa	Class 2	4.73 m/s	Yes	No	No	No

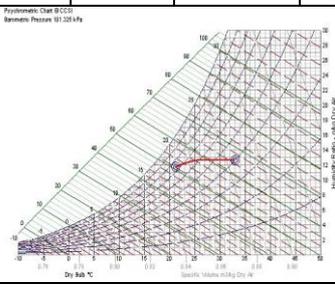
001 REGISTO/LIGAÇÃO FLEX.

Caudal de Ar	Dimensões	Perda de Carga	Fugas	Velocidade	Damper	Ligação Flexível	Louvre	Actuador
20800 m3/h	600 x 1700 mm	32 Pa	Class 2	5.66 m/s	Yes	No	No	No

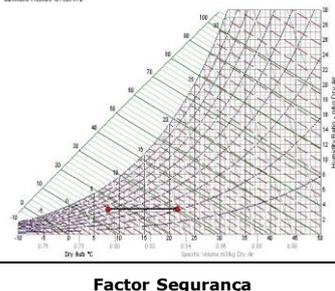
001 PORTA DE ACESSO

Dimensões	Tipo
630 x 1910 mm	Hinged door

002 FILTROS										
Etapas	Caudal	Velocidade	Classe	Classe Energética	Tipo	Modelo	Mat.	Qtd/Dim. 1	Qtd/Dim. 2	Comp.
1	26000 m3/h	2.29m/s	M6 - ePM10 80%	E	Plano	MINIPLEAT	Glass micro fiber paper	9/592x592	.	50
2	26000 m3/h	2.29m/s	F7 - ePM1 55%	C	Bag	ALFABAG	Synthetic micro fibre	9/592x592	.	535
1						2				
Limpo	Final	Média				Limpo	Final	Média		
85 Pa	185 Pa	135 Pa				81 Pa	181 Pa	131 Pa		
			Mean							
Método Cálculo P.D.C.										

003 BATERIA DE ARREFECIMENTO A ÁGUA										
Caudal de Ar	Qtd	Modelo						Fiadas	Espaçamento Alhetas	Área Frontal
26000 m3/h	1	Cu-Al-FeZn P40AR 2R-44T-1733A-2.0pa 22C 2 1/2"-RHS						2	2	1733 x 1760
Ar	BS	BH	HR	Pot. Total	Pot. Sensível	Velocidade Frontal	Perda de Carga			
On	33.0 °C	22.4 °C	40.1 %	122.00 kW	103.70 kW	2.37 m/s	76 Pa			
Off	21.2 °C	18.2 °C	75.4 %							
Água	Temp.	Caudal		P.D.C. Água	Tipo Glycol	% Glycol	Ligações			
In	7.0 °C	1 x 20916 L/h		19 kPa	None	0 %	2 1/2" x 1off			
Out	12.0 °C						2 1/2" x 1off			
Circuitos	Margem Serv.	Mat. Alhetas		Material Tubos	Tipo Tratamento	Material Estrutura	Factor Segurança			
22	327 %	AL-0.20		P40	Copper	FeZn 1.5 mm	1.20			

Projectado para condições húmidas (Dry Pressure Drop = 48 Pa)

005 BATERIA DE AQUECIMENTO A ÁGUA										
Caudal de Ar	Qtd	Modelo						Fiadas	Espaçamento Alhetas	Área Frontal
26000 m3/h	1	Cu-Al-FeZn P40AC 1R-44T-1763A-2.5pa 11C 1 1/4"-RHS						1	3	1763 x 1760
Ar	BS	BH	HR	Pot. Total	Pot. Sensível	Velocidade Frontal	Perda de Carga			
On	7.8 °C	-	-	122.00 kW	122.00 kW	2.33 m/s	20 Pa			
Off	21.6 °C	-	-							
Água	Temp.	Caudal		P.D.C. Água	Tipo Glycol	% Glycol	Ligações			
In	80.0 °C	1 x 5400 L/h		8.6 kPa	None	0 %	1 1/4" x 1off			
Out	60.0 °C						1 1/4" x 1off			
Circuitos	Margem Serv.	Mat. Alhetas		Material Tubos	Tipo Tratamento	Material Estrutura	Factor Segurança			
11	165 %	AL-0.11		P40	Copper	FeZn 1.5 mm	1.20			

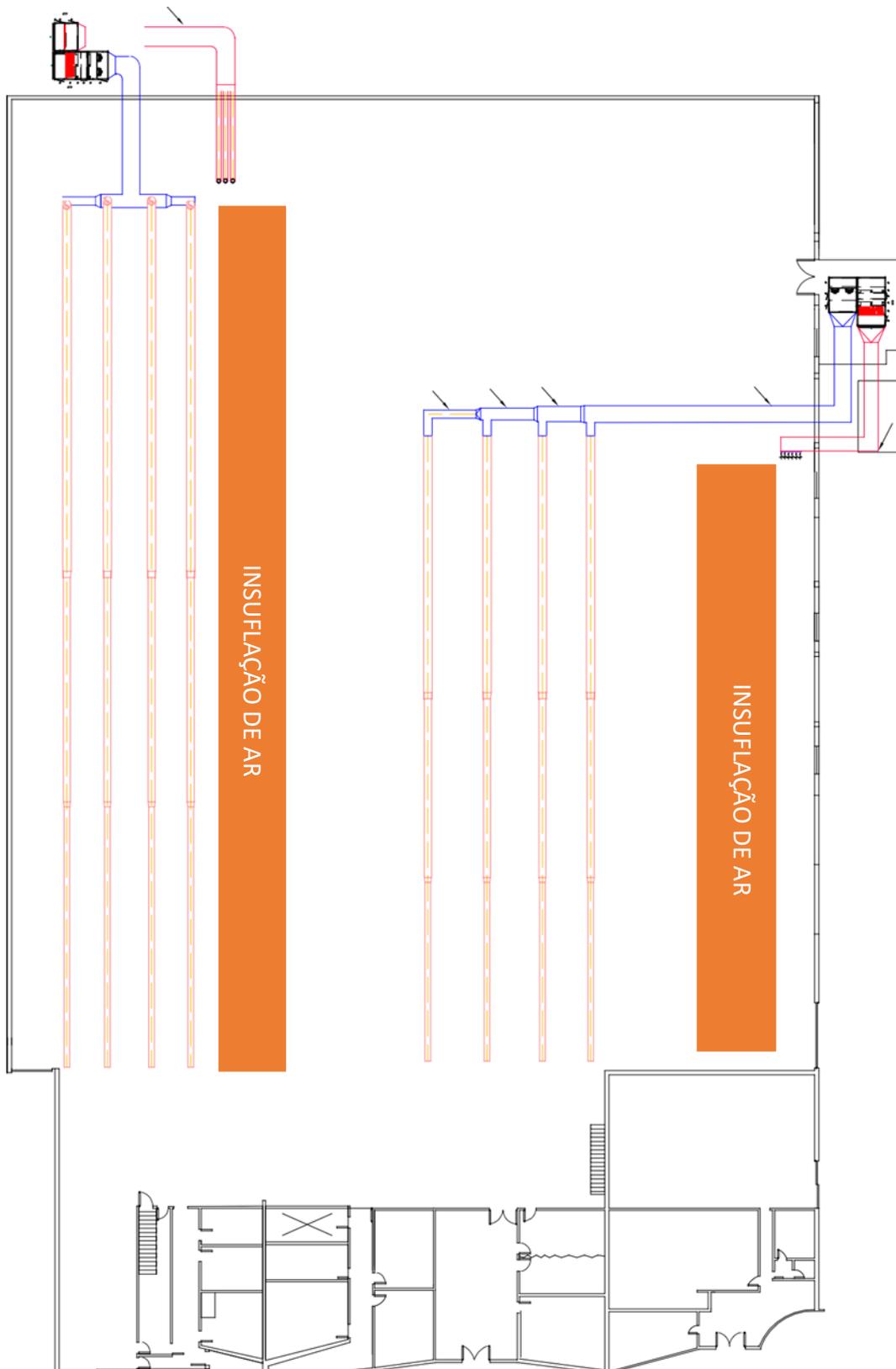
006 VENTILADOR PLUG									
Fabricante	Configuração	Classe de eficiência IE	Frequência de Operação - Voltage						
OcramClima	Ducted Outlet	IE4	7.82 V						
Modelo	Tipo de Roda	Tamanho	Motor Technology						
Plenum Fan	Backward Curve	400	EC						
Caudal de Ar	Velocidade de Saída	Polias	.						
26000 m³/h			.						
Pressão. Est. Disponível	Velocidade	Velocidade nominal	.						
200 Pa	2184 rpm	2800 rpm	.						
Pressão .Est. Unidade	Potência Absorvida	Potência Nominal	Factor de Segurança						
393 Pa	1.80 kW	3.80 kW	2.11						
Pressão .Est. Ventilador	Eficiência Estática	Corrente Nominal	.						
593 Pa	59.5 %	5.8 A	.						
Quantidade	Var. Freq.	Volts/Ph/Hz	.						
4		400-3-50.00	.						
		Tipo de Apoios							
		None	1	2	3	4			
		Código							
		Côr							
Frequência	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz	Descrição
Entrada	68	72.8	79.2	77.9	72.4	70.8	68.7	74.4	SWL Interior da Conduta Admissão (dB)
Saída	72.1	73.5	78.8	78.9	80.7	84.2	76.1	75.8	SWL Interior da Conduta Descarga (dB)

008 FILTROS										
Etapas	Caudal	Velocidade	Classe	Classe Energética	Tipo	Modelo	Mat.	Qtd/Dim. 1	Qtd/Dim. 2	Comp.
1	26000 m3/h	2.29m/s	M6 - ePM10 80%	E	Plano	MINIPLEAT	Glass micro fiber paper	9/592x592	.	50 mm
			1							
			Método Cálculo P.D.C.		Mean					

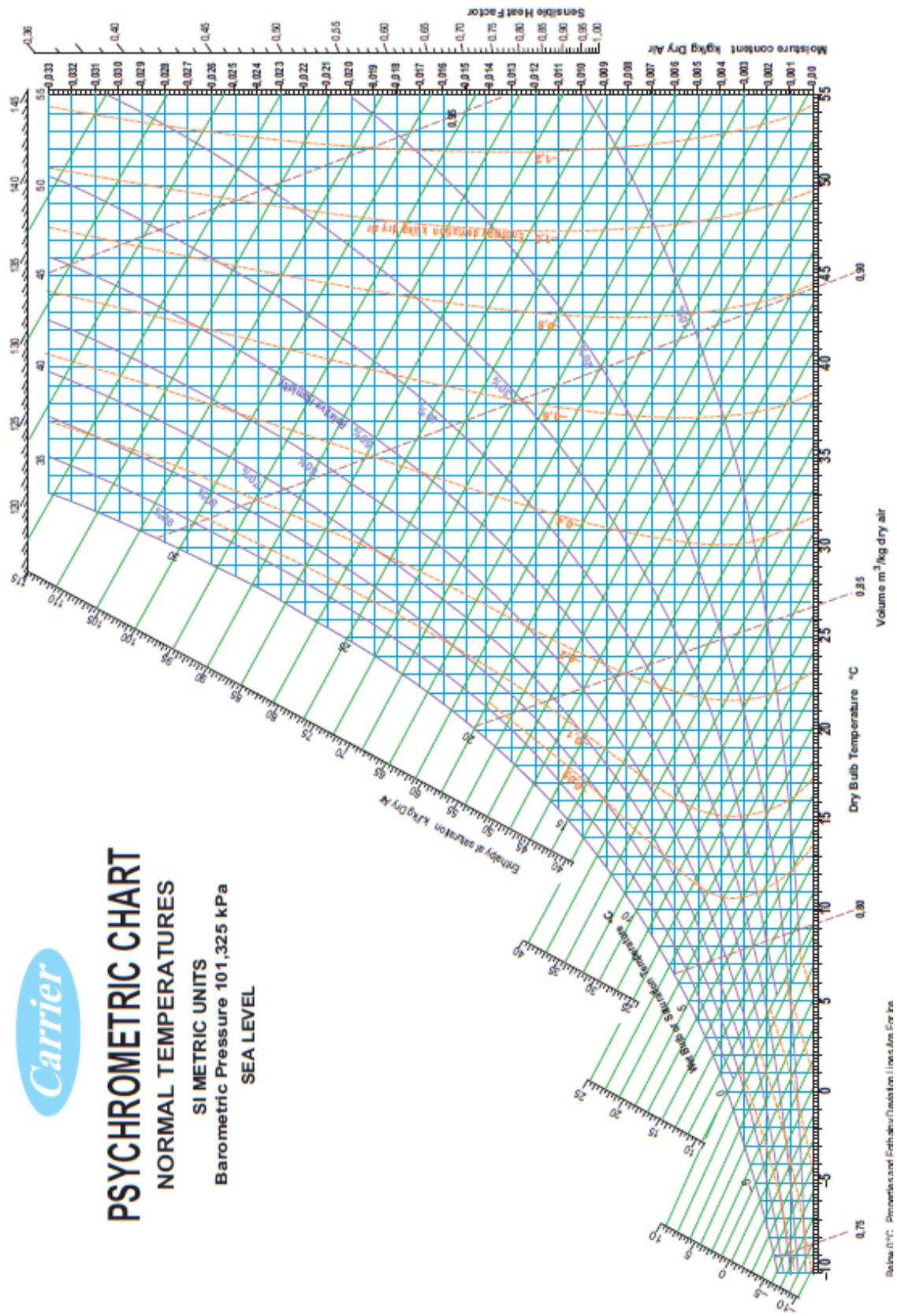
009 REGISTO/LIGAÇÃO FLEX.									
Caudal de Ar	Dimensões	Perda de Carga	Fugas	Velocidade	Damper	Ligação Fléxivel	Louvre	Actuador	
26000 m3/h	1910 x 800 mm	22 Pa	Class 2	4.73 m/s	Yes	No	No	No	

SFP (SPECIFIC FAN POWER)			
Ventilador Insuflação		Ventilador de Extracção	
Estado de Filtro	Clean	Estado de Filtro	
Potência Absorvida	6.24 Kw	Potência Absorvida	NaN Kw
Eficiência Accionamento	100%	Eficiência Accionamento	NaN%
Eficiência Var. Freq.	100%	Eficiência Var. Freq.	NaN%
Eficiência Motor	100%	Eficiência Motor	NaN%
Caudal de Ar	7.22m3/s	Caudal de Ar	7.22m3/s
SFP	.86 Kw/m3/s		

ANEXO G: PONTOS DE INSUFLAÇÃO DO AR



ANEXO H: CARTA PSICROMÉTRICA



Revised 11/11. Psychrometric Chart and Psychrometric Chart for SI Units. For Info.