



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Paulo Jorge Cunha Vieira

Controlo Holístico de QAI



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Paulo Jorge Cunha Vieira

Controlo Holístico de QAI

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/>

AGRADECIMENTOS

No desenvolvimento da presente dissertação foram várias as contribuições, dos mais diversos modos, que possibilitaram reunir as condições necessárias para a conclusão da mesmas. Desta forma, gostaria de expressar os mais sinceros agradecimentos às pessoas que de alguma forma partilharam um papel importante no seu desenvolvimento.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao professor Pedro Lobarinhas, orientador da dissertação, pelo tempo que despendeu orientando a mesma, em reuniões, esclarecimento de dúvidas e elucidação nos momentos de menor certeza.

De igual modo, à empresa Vieira & Lopes pela possibilidade de realizar o trabalho nas instalações da mesma, a ajuda prestada aquando da definição dos objetivos e todos os dados imprescindíveis fornecidos de forma oportuna.

Em particular a todos os membros do departamento de *solutions* pelos esclarecimentos prestados, ajuda e, acima de tudo, paciência mesmo em momentos de maior carga de trabalho.

A todos os meus amigos, os quais tive a oportunidade de partilhar os momentos de felicidade, infelicidade e tudo pelo meio, com eles estabeleci laços para a vida e memórias que guardarei.

Um agradecimento especial ao Paulo Leão e ao João Pedro Abreu, por todo o tempo que partilhamos, os jantares, as noites de estudo, o sorrisos e as lágrimas que fizeram deste percurso académico algo inesquecível.

Muito obrigado à minha família. À minha irmã pelo carinho e paciência durante todo este processo. Para a minha mãe um obrigado pela força que demonstra ter todos os dias, pela ajuda nos momentos mais difíceis e mais que tudo, pelo exemplo que estabeleceu para mim.

Por fim, o meu pai por todos os sacrifícios que fez, por todos os momentos que me proporcionou e pelos ensinamentos que me transmitiu, principalmente por me mostrar que ser engenheiro é mais do que um curso, é uma maneira de estar na vida. A ele dedico a presente dissertação, com um enorme carinho, admiração e saudade!

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, 26 de outubro de 2022

RESUMO

Nos dias que correm o aquecimento global e as alterações climáticas que dele advêm trouxeram para o foco e para as secretárias do mais diversos governantes a problemática das fontes energéticas disponíveis e da forma como se gere a utilização de dada energia. Por esse motivo, deu-se um crescimento na procura por métodos que permitam reduções de consumo de energia, seja por eliminação de equipamentos desnecessários ou pela otimização dos indispensáveis. É no contexto deste último ponto que o propósito da presente dissertação se enquadra, na busca de uma solução de controlo holístico de qualidade de ar interior que potencie a eficiência do sistema de ventilação, traduzindo-se, idealmente, em poupanças energéticas.

Ao longo da presente dissertação estudou-se a atual posição da legislação nacional e internacional no que diz respeito a obrigações de ventilação e tratamento do ar dentro de edifícios, tendo ainda sido verificada a influência que pode ser diretamente atribuída à presença de ocupantes num espaço e como se traduz o efeito que os mesmos têm neste. Mais ainda, foi explicitada a teoria de base aos sistemas de controlo e os métodos relevantes no processo em questão, tendo sido referida a história dos mesmos bem como o seu princípio de funcionamento, parâmetros requeridos, processo de afinação, etc.

Posto isto, foi feita um levantamento de toda a instalação atualmente em funcionamento, descrevendo-se o facto de a mesma estar dividida em duas frações das quais apenas se estudou a fração afeta aos escritórios. Os mesmos eram servidos por uma unidade de tratamento de ar com caudal constante de 25300 m³/h que alimentava as unidades terminais colocadas em cada escritório, sendo que esta apresentava um controlo comum utilizando sensores de temperatura e uma metodologia de controlo PID.

A dissertação culmina com o estabelecimento de solução alternativa, que incorpora um controlo de modelo preditivo utilizando a concentração de dióxido de carbono e os valores reais de ocupação para estabelecer um modelo de atuação mais individualizado e flexível, sempre com a redução dos gastos energéticos em mente.

Palavras-Chave

Energia, Sistemas AVAC, Método de Controlo, Modelo Preditivo.

ABSTRACT

Nowadays, global warming and the climate changes that result from it have brought the issue of available energy sources and the way in which the use said energy into focus and to the table tops of the most diverse and important government officials. For this reason, there has been a growth in the search for methods that allow energy consumption reductions, either by eliminating unnecessary equipment or by optimizing the essential ones. The purpose of this dissertation goes hand in hand with the context of this last point, in the search for a holistic control solution for indoor air quality that enhances the efficiency of the ventilation system, resulting, ideally, in energy savings.

Throughout this dissertation, the current position of national and international legislation regarding ventilation and air treatment obligations inside buildings was studied, and the influence that can be directly attributed to the presence of occupants in a space and in which way they affect its characteristics. Furthermore, the basic theory of the control systems and the methods relevant to the process in question were explained, with reference to their history as well as their working principle, required parameters, tuning process, etc.

Moreover, a careful examination was made of the entire system currently in operation, describing the fact that it is divided into two fractions of which only the fraction related to the offices was studied. They were serviced by an air treatment unit with a constant flow of 25,300 m³/h that fed the terminal units located in each office, which had a common control using temperature sensors and a PID control methodology.

The dissertation culminates with the establishment of an alternative solution, which incorporates a predictive model control using the concentration of carbon dioxide and the real values of occupancy to establish a more individualized and flexible model of action, always with the reduction of energy costs in mind.

Keywords

Energy, HVAC Systems, Control Methods, Predictive Mode

ÍNDICE

Agradecimentos	ii
Resumo.....	iv
Abstract	v
Índice	vi
Índice de Figuras.....	viii
Índice de Tabelas.....	xi
Lista de Símbolos.....	xii
1. Introdução.....	1
1.1. Empresa	1
1.2. Enquadramento	1
1.3. Objetivos.....	2
1.4. Guia de Leitura	3
2. Estado da Arte	4
2.1. Legislação.....	4
2.1.1. Legislação Internacional.....	4
2.1.2. Legislação Nacional	6
2.2. Geração Humana de CO ₂	8
2.3. Enquadramento Teórico de Sistemas de Controlo	10
3. Métodos de Controlo	20
3.1. Controlo <i>ON-OFF</i>	23
3.2. Controlo PID.....	28
3.3. Model Predictive Control (MPC).....	36
3.4. Fuzzy Logic	49
4. Descrição do Caso de Estudo	55
4.1. Espaço de Estudo.....	55

4.2. Variáveis em Estudo e Recolha de Dados.....	69
5. Definição de um Sistema Alternativo de Controlo QAI	75
5.1. Descrição do Funcionamento e Comportamento Esperado	75
6. Conclusões e Trabalhos Futuros	81
6.1. Conclusões.....	81
6.2. Trabalhos Futuros.....	83
Referências Bibliográficas	84
Anexos.....	87
Anexo A: Valores de eficácia para diferentes métodos de ventilação	88
Anexo B: Cálculo da zona climática de inverno e de verão	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Concentração máxima de poluentes segundo a Diretiva 2015/1480/EC, retirado e adaptado de [4].	5
Figura 2 - Valores do limiar de proteção e respetivas margens de tolerância para os diversos poluentes, retirado da Portaria nº 138-G/2021.	7
Figura 3 - Distância mínima a respeitar na colocação de admissões de ar, retirado da Portaria nº 138-I/2021.	8
Figura 4 - Taxa metabólica, M , em função do tipo de atividade, retirado do Manual SCE.	10
Figura 5 - Classificação de sistemas de controlo.	11
Figura 6 - Esquematização da propriedade da sobreposição, retirado de [8]	12
Figura 7 - Representação gráfica de um <i>input</i> em rampa.	15
Figura 8 - Representação gráfica de um <i>input</i> sinusoidal.	15
Figura 9 - Esquematização dos polos de um sistema estável e representação gráfica do mesmo (respetivamente), retirado e adaptado de [10].	17
Figura 10 - Esquematização dos polos de um sistema instável e representação gráfica do mesmo (respetivamente), retirado de [10].	17
Figura 11 - Representação gráfica de um sinal genérico de um controlador <i>ON-OFF</i> , retirado de [17].	23
Figura 12 – Representação do gráfico com o término das fases do controlo, retirado e adaptado de [17].	24
Figura 13 – Representação da resposta típica numa lógica de frequência fixa, retirado e adaptado de [17].	26
Figura 14 – Comparação da evolução no tempo das três lógicas de controlo, retirado e adaptado de [17].	27
Figura 15 - Representação esquemática da ação proporcional, retirado e adaptado de [8].	28
Figura 16 - Representação da resposta de um sistema PID, retirado de [8].	29
Figura 17 - Representação esquemática da ação integral, retirado de [8].	30
Figura 18 - Representação esquemática da ação derivativa, retirado de [8].	31

Figura 19 - Curva do tipo S numa análise de <i>Ziegler-Nichols</i> aplicada a um sistema de malha aberta, retirado e adaptado de [19].	33
Figura 20 - Onda sinusoidal pretendida segundo o método de <i>Ziegler-Nichols</i> num sistema de malha fechada, retirado de [8].	34
Figura 21 - Representação de uma resposta com horizonte retrocedente, retirado e adaptado de [21].	37
Figura 22 - Diagrama de blocos de um controlador MPC simples.	38
Figura 23 - Esquema da composição do controlador MPC de [21].	47
Figura 24 - Esquema de um controlador <i>Fuzzy Logic</i> , retirado e adaptado de [29].	50
Figura 25 - representação ilustrativa das funções de pertinência, retirado e adaptado de [30].	51
Figura 26 - Vista aérea do espaço em estudo.	56
Figura 27 - Planta das instalações, dividida por frações.	58
Figura 28 - Planta do rés do chão da fração de serviços.	59
Figura 29 - Planta do 1º piso da fração de serviços.	60
Figura 30 - Representação gráfica do perfil de ocupação do edifício.	61
Figura 31 - Representação das UTA e UTAN's que integram o sistema AVAC do edifício.	64
Figura 32 - Composição e distribuição dos componentes constituintes da UTA.	65
Figura 33 – Exemplo de unidades terminais da rede de aerúlica no caso do departamento de <i>solutions</i> .	66
Figura 34 - Planta da rede aerúlica do piso térreo.	66
Figura 35 - Planta da rede aerúlica do 1º piso.	67
Figura 36 – Registo da concentração de <i>CO2</i> média dos 4 sensores no dia 08/09/2022	71
Figura 37 – Registo das medições da concentração de <i>CO2</i> média dos 4 sensores ao longo de 4 dias.	72
Figura 38 - Percentagem de abertura do registo da caixa misturadora ao longo de um dia.	73
Figura 39 - Percentagem de abertura do registo da caixa misturadora ao longo de vários dias.	74

Figura 40 - Exemplo do histograma de um <i>frame</i> : (a) representa os pixéis em movimento e (b) o histograma resultante, retirado de [35].	76
Figura 41 - Relação entre a configuração da ventilação e a eficácia da mesma, retirado da Portaria nº 353-A/2013.	88
Figura 42 - Valores de referência para a estação de aquecimento, retirado e adaptado da Portaria nº 138-I/2021.	89
Figura 43 - Zona climática de inverno, retirado da Portaria 138-I/2021.....	90
Figura 44 - Valores de referência para a estação de arrefecimento, retirado e adaptado da Portaria nº 138-I/2021.	90
Figura 45 - Zona climática de verão, retirado da Portaria nº 138-I/2021	91

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Forma inicial da tabela de <i>Routh</i>	18
Tabela 2 - Tabela de <i>Routh</i> genérica.....	19
Tabela 3 - Influência da tipologia de ação em cada uma das componentes nas características de um sistema PID.....	32
Tabela 4 - Cálculo dos parâmetros do PID, para um sistema em <i>open loop</i> , segundo o método de <i>Ziegler-Nichols</i>	34
Tabela 5 - Cálculo dos parâmetros do PID, para um sistema de malha fechada, segundo o método de <i>Ziegler-Nichols</i>	35
Tabela 6 - Valores de caudal de extração mínimo a garantir nas instalações sanitárias de acordo com a Portaria nº 138-I/2021	61
Tabela 7 - Valores de caudal de ar novo mínimo para cada divisão do piso 0 de acordo com a Portaria nº 138-I/2021.....	62
Tabela 8 - Valores de caudal de ar novo mínimo para cada divisão do piso 1 de acordo com a Portaria nº 138-I/2021.....	63
Tabela 9 - Melhoria percentual expectável de acordo com o nível de alterações implementadas.....	80

LISTA DE SÍMBOLOS

Siglas, abreviaturas e acrónimos

ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and A-C Engineers</i>
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar condicionado
BEMS	<i>Building Energy Management System</i>
CO ₂	Dióxido de Carbono
DCV	<i>Demand-controlled ventilation</i>
DMC	<i>Dynamic Matrix Control</i>
FL	<i>Fuzzy Logic</i>
IMC	<i>Internal Model Control</i>
MAC	<i>Model Algorithmic Control</i>
MIMO	<i>Multiple Inputs Multiple Outputs</i>
MPC	<i>Model Predictive Control</i>
P	<i>Proportional</i>
PI	<i>Proportional-Integral</i>
PID	<i>Proportional-Integral-Derivative</i>
ppm	Partes por milhão
QAI	Qualidade do ar interior
UTA's	Unidades de tratamento de ar
UTAN's	Unidades de tratamento de ar novo

Nomenclatura

ε_p	Eficácia de remoção de poluentes
Q_{ANf}	Caudal de ar novo final corrigido [m ³ /h]
Q_{AN}	Caudal de ar novo [m ³ /h]
V_{CO_2}	Taxa de geração de CO ₂

A_{Du}	Área de <i>Dubois</i> da superfície corporal
M	Taxa metabólica [met]
RQ	Quociente respiratório
V_p	Saída do controlador
K_p	Parâmetro de ganho proporcional
e	Erro
K_i	Parâmetro de ganho integral
θ	Tempo
K_d	Parâmetro de ganho derivativo
m	Número de passos no futuro
p	Horizonte de previsão
r	<i>setpoint</i>
Γ_l e B_l	Matrizes de importância
n	Ordem de truncção
$y_m(k)$	Valor de y no instante de tempo k
GD	Graus dia [°C]
GD_{ref}	Graus dia de referência [°C]
a	Relação de altitudes
Z	Altitude [m]
Z_{ref}	Altitude de referência [m]
$\theta_{ext,v}$	Temperatura exterior na estação de arrefecimento [°C]
θ_{ref}	Temperatura exterior de referência [°C]
C_t	Concentração de CO ₂ no espaço [ppm]
n_t	Número de ocupantes
G_p	Taxa de geração de CO ₂ por pessoa [$L \times min^{-1} \times n^{o}ocupantes^{-1}$]
Q	Caudal de ar insuflado [m ³ /h]
C_R	Concentração de CO ₂ no ar insuflado [ppm]
V	Volume do espaço [m ³]
Δt	Intervalo de tempo [h]

1. INTRODUÇÃO

A presente dissertação, realizada no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, insere-se num contexto de procura por alternativas de controlo que permitam munir um sistema AVAC de uma maior eficiência energética por forma de garantir a competitividade dos mesmo, reforçando o compromisso com as preocupações da utilização energética derivadas da atual situação ambiental e social.

De facto, as preocupações ambientais, aliadas à curiosidade pelo desenvolvimento tecnológico, serviram de mote para o desenvolvimento desta tese tendo sempre por vista garantir integridade e a qualidade da mesma.

1.1. EMPRESA

A Vieira & Lopes foi fundada em 1998, em Braga, sendo na sua criação uma empresa de instalação de sistemas de ar condicionado subcontratada na área da construção. Com o passar dos anos a empresa cresceu e com ela cresceu também o número de colaboradores e setores de atuação, sendo a presente dissertação realizada no departamento OcramClima – direcionado para a produção de UTA's.

Atualmente, conta com escritórios em 3 países da europa, comercializando os seus produtos em mais de 10 países a nível europeu, sendo que o número de colaboradores é superior a 130. Grande parte dos produtos produzidos passam por unidades de tratamento de ar, com as mais diversas dimensões e configurações, sendo que ainda conta no seu catálogo com sistemas inovadores como é o caso *Nano Purifying System (NPS)*.

1.2. ENQUADRAMENTO

Com a evolução dos tempos os seres humanos começaram a passar cada vez mais tempo no interior de edifícios, seja as suas casas, os seus empregos ou até mesmo quando procuram o entretenimento (cinemas, teatros, etc.) e com essa evolução surgiu a necessidade de perceber de que modo a presença continuada num espaço fechado influenciava as condições do espaço em si e vice-versa, isto é, como é que as condições do espaço em utilização influenciam o bem-estar e o conforto dos seus ocupantes, originando-se a criação do conceito

da qualidade de ar interior (QAI). Convém ainda referir que com o avançar do tempo este conceito foi levado com maior seriedade criando-se leis que regem a qualidade de ar novo nos espaços, como é o exemplo da Portaria 138-G/2021 ou ainda a versão mais recente das normas estabelecidas pela ASHRAE, a ANSI/ASHRAE Standard 62.1 – 2019.

Este tipo de normas e leis regem todo o tipo de edifícios, de habitação e de comércio/serviços, delimitando valores para concentrações de poluentes – de origem humana, de origem natural ou até mesmo originária dos materiais que revestem os espaços – controlando parâmetros como: a concentração de CO₂, taxas mínimas de ventilação, entre outros parâmetros.

Mais ainda, a crescente preocupação com a transição energética e a utilização ponderada da energia fomentou o aparecimento de novas classes normativas, aplicadas a equipamentos responsáveis pela manutenção das características de QAI dos espaços, sistemas AVAC cada vez mais exigentes, pelo que se torna imperativo que as soluções apresentadas sejam gradualmente mais eficientes e consumam menos energia.

De facto, como referido em [1] os edifícios de comércio e serviços representam uma grande porção do consumo de energia elétrica a nível mundial. Por exemplo, numa grande potência mundial como os Estados Unidos da América, os sistemas AVAC representam mais de 50% do consumo energético dos edifícios, por sua vez na europa 40% da energia total consumida é atribuída a edifícios de comércio e habitação.

Posto isto, a implementação de mecanismos de controlo assume um papel preponderante na busca de sistemas mais eficientes e menos consumidores de energia, assim sendo, é nesta premissa que o tema da presente tese se enquadra, adotando uma posição de inovação em busca de um sistema integrado de monitorização das variáveis necessárias e atuação de acordo com as necessidades.

1.3. OBJETIVOS

O objetivo principal da presente dissertação passa pelo aumento do nível de controlo, idealmente transformando o mesmo numa vertente preditiva, dos sistemas de AVAC que garantem as condições de qualidade de ar interior, isto é, garantir que o sistema empregue assegure uma ventilação adequada, para os limites de poluentes estipulados na legislação

vigente, munido de um controlo que garanta maior eficiência energética e/ou maior sensação de conforto. Posto isto, destacam-se os seguintes objetivos:

- Estudo da legislação vigente;
- Estudo do estado da arte dos métodos de controlo de concentração de poluentes;
- Caracterização das variáveis e do espaço em estudo;
- Estabelecimento de um novo método preditivo para o controlo da evolução da concentração de CO₂

Assim sendo, os objetivos supracitados servem, não só de guia para o desenvolvimento da presente dissertação, como ainda de métrica para posteriormente avaliar a correta, ou não, evolução do mesmo.

1.4. GUIA DE LEITURA

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos e diversos subcapítulos, estando a mesma estruturada de forma sequencial e lógica, começando com a introdução ao tema, à empresa na qual a mesma foi realizada e os objetivos propostos para a mesma.

De seguida no capítulo 2 é possível de se observar uma descrição extensiva do estado da arte das várias vertentes de relevo para o estudo da solução de controlo holístico de QAI, sendo focados pontos como a legislação vigente na área da ventilação, a influência do fator humano na geração de CO₂ ou ainda a teoria de base aos sistemas de controlo.

Posto isto, no capítulo 3 procede-se a uma exposição exaustiva dos métodos de controlo atualmente empregues servindo este de base teórica para a formulação de uma solução alternativa de controlo da QAI. Segue-se a descrição do problema em estudo, mais propriamente do espaço das instalações da Vieira & Lopes que serve de caso de estudo, bem como das variáveis imprescindíveis ao estudo e à forma como estas são obtidas.

Posto isto, no capítulo 4 descreve-se em detalhe a solução de controlo proposta, baseando a mesma em estudos e artigos científicos realizados na área do controlo de sistemas AVAC. Por fim, no capítulo 6 procede-se à apresentação das conclusões e ilações retiradas do trabalho realizado, apresentando-se ainda sugestões de trabalhos futuros a realizar no seguimento destas, que não puderam ser realizadas por fatores temporais ou até mesmo monetários pois divergiam um pouco do propósito inicial da dissertação.

2. ESTADO DA ARTE

Para melhor compreender de que forma se pode melhorar o controlo da QAI é imprescindível perceber como é que o mesmo é feito atualmente e que estudos já foram realizados no passado. Deste modo, no presente capítulo será feita uma descrição exaustiva do estado da arte do controlo de CO₂ em ambientes fechados.

Posto isto, inicialmente será descrita a legislação que atualmente vigora, percebendo o que levou ao seu surgimento e as evoluções que tem vindo a sofrer, e que baliza as necessidades a suprir pelos sistemas em questão. Seguir-se-á uma explicação da geração humana de dióxido de carbono e de que forma esta influência o espaço, terminando-se com o subcapítulo do estado da arte dos métodos de controlo, que retém elevada importância visto ser a base do estudo em questão.

2.1. LEGISLAÇÃO

A legislação vigente serve de guia para o correto dimensionamento na fase de projeto, estabelecendo valores que irão delimitar certos parâmetros imprescindíveis. Deste modo, no presente subcapítulo serão expostas normas e leis – nacionais e internacionais – que servem de base à criação de portarias ou outras formas de controlo.

2.1.1. LEGISLAÇÃO INTERNACIONAL

Um dos principais organismos de criação de *guidelines*, que acabam por se traduzir em leis e/ou normas, é a ASHRAE. Esta é uma instituição americana de renome, que se dedica à criação de documentos que servem de apoio à correta construção de sistemas AVAC. A sua norma mais recente é a *ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2019*, na qual se estabelecem valores mínimos de ventilação de acordo com a atividade em causa, concentrações máximas de poluentes – como é o caso do CO₂ – ou ainda guias para a correta manutenção e operação dos equipamentos [3].

Deste modo, o documento supracitado estabelece como valor limite de referência, para a concentração de CO₂, as 1000 ppm sendo ainda estabelecido um valor mínimo de ar novo a introduzir no espaço de modo a garantir que este valor não é ultrapassado. De facto, para o caso em questão, um edifício com propósito múltiplo, mas principalmente ocupado por

escritórios, estabeleceu-se que seria necessário garantir um caudal de ar novo insuflado na ordem dos 2,5 l/s×pessoas ou 0,3 l/s×m² [3].

Por sua vez, a União Europeia também estabelece as suas normas que depois resultam em leis internas ao nível dos países membros. Em [4] é possível de se verificar os valores estabelecidos como referência para uma grande variedade de poluentes, sendo de referir os estabelecidos para as partículas finas (PM2.5 e PM10), como apresentado na Figura 1.

Poluente	Concentração	Período de Amostra
Partículas Finas (PM2.5)	25 µg/m ³	1 Ano
	20 µg/m ³	1 Ano
Dióxido de Enxofre (SO ₂)	350 µg/m ³	1 Hora
	125 µg/m ³	24 Horas
Dióxido de Azoto (NO ₂)	200 µg/m ³	1 Hora
	40 µg/m ³	1 Ano
PM10	50 µg/m ³	24 Horas
	40 µg/m ³	1 Ano
Chumbo (Pb)	0.5 µg/m ³	1 Ano
Monóxido de Carbono (CO)	10 µg/m ³	Média ao longo de 8 Horas

Figura 1 - Concentração máxima de poluentes segundo a Diretiva 2015/1480/EC, retirado e adaptado de [4].

Deste modo, é possível afirmar que o sistema projetado tem de ser capaz de sofrer ajustes ao nível das medições, e consequente *setpoint*, fruto da alteração das legislações, munindo-o assim de uma capacidade de ser implementado em países que apresentem legislações díspares.

2.1.2. LEGISLAÇÃO NACIONAL

Visto que o estudo retratado nesta dissertação pretende desenvolver uma solução para o mercado português, torna-se imperativo conhecer em detalhe a legislação que atualmente vigora. Deste modo, realizou-se um estudo intensivo dos vários tipos de leis, normas e diretivas que regem os sistemas AVAC, olhando aos valores definidos como aceitáveis, os métodos de cálculo recomendado, entre outros aspetos de relevo.

Atualmente, a legislação que vigora, no caso particular de concentração de poluentes e níveis mínimos de ventilação, são a Portaria nº 138-G/2021 e Portaria nº 138-I/2021, respetivamente, que saíram em Diário da República no dia 1 de julho de 2021, sendo esta a derivação nacional da normativa do Parlamento Europeu – Diretiva nº 2010/31/EU.

A portaria em questão aborda as necessidades e restrições a cumprir para situações que empreguem não só ventilação mecânica, atualmente bastante comum (como é o caso da situação em estudo), mas também, situações que seja garantida a ventilação natural, sendo explicitadas as particularidades a ter em conta, bem como os métodos empregues para garantir que a ventilação é adequada – método base, método simplificado e método condicional.

Olhando para o caso particular da ventilação mecânica, é referida a necessidade de o sistema garantir uma distribuição homogénea de ar no espaço, sendo ainda de mencionar a necessidade de garantir uma remoção eficaz dos poluentes na zona ocupada. Para tal, devem-se cumprir os valores estipulados de caudal de ar novo necessário, em função da atividade, tendo sempre em conta a eficácia de remoção de poluentes (valor que depende da configuração da ventilação no espaço). O cálculo do caudal de ar novo pode ser feito segundo a equação (1).

$$Q_{ANf} = \frac{Q_{AN}}{\varepsilon_v} \quad (1)$$

Em que:

Q_{ANf} – valor do caudal de ar novo final corrigido [m³/h]

Q_{AN} – valor do caudal de ar novo [m³/h]

ε_v – valor de eficácia de remoção de poluentes

Assim sendo, é necessário mencionar o significado prático de ε_v como o valor prático da eficácia de remoção de poluentes, isto é, fruto do tipo de ventilação instalado e das zonas de

colocação das unidades terminais de insuflação e exaustão a eficácia de remoção do ar dentro do espaço varia e, por conseguinte, a remoção dos poluentes que nele se encontram também. Deste modo, foram estabelecidos valores de base a ter em conta no cálculo do caudal de ar novo a insuflar tal como apresentado, estando estes valores compreendidos entre 0,5 e 1,2 – tabela completa presente no Anexo A.

Mais ainda, é necessário ter em conta o método utilizado no cálculo do caudal mínimo de ar novo, sendo permitidos dois:

- método analítico;
- método prescritivo;

No que diz respeito a este último, o método prescritivo, é de referir que este tem de seguir duas abordagens, uma baseada na ocupação sendo o caudal definido em função do número de ocupantes, e uma outra que se baseia na área de superfície, sendo que o caudal a adotar deverá ser o mais crítico dos dois. De facto, para a situação em causa, uma zona de escritórios, é estabelecido um valor de caudal mínimo na ordem dos $24 \text{ m}^3/(\text{hora} \cdot \text{pessoa})$, de acordo com o prescrito na Portaria nº 138-I/2021.

Por sua vez, tal como exposto no subcapítulo 2.1.1, também a legislação nacional estabelece limiares de proteção para os poluentes como é possível de ver na Figura 2.

Poluentes	Unidade	Limiar de proteção	Margem de tolerância [%]
Partículas em suspensão (fração PM_{10})	$[\mu\text{g}/\text{m}^3]$	50	100
Partículas em suspensão (fração $\text{PM}_{2,5}$)	$[\mu\text{g}/\text{m}^3]$	25	100
COV	$[\mu\text{g}/\text{m}^3]$	600	100
CO	$[\text{mg}/\text{m}^3]$	10	-
	[ppmv]	9	
CH_2O	$[\mu\text{g}/\text{m}^3]$	100	-
	[ppmv]	0,08	
CO_2	$[\text{mg}/\text{m}^3]$	2250	30
	[ppmv]	1250	
Radão	$[\text{Bq}/\text{m}^3]$	300 <i>l)</i>	-

Figura 2 - Valores do limiar de proteção e respetivas margens de tolerância para os diversos poluentes, retirado da Portaria nº 138-G/2021.

É de referir o valor estipulado como limite de concentração para o dióxido de carbono, 1250 ppm, uma vez que é um valor de elevada importância e que servirá de referência ao longo da presente dissertação.

Para além disso, torna-se imperativo estabelecer de que modo se chega aos valores do limiar de proteção, isto é, as concentrações referem-se a medições realizadas a uma

temperatura de 20° C e a uma pressão de 1 atm, ou 101,325 kPa. Mais ainda, estes valores dizem respeito a uma média de valores obtidos ao longo de 8 horas, sendo que as tolerâncias previstas se aplicam apenas a edifícios previamente existentes – antes da entrada em vigor da legislação – e a edifícios novos que não empreguem ventilação mecânica.

Mais ainda, a legislação nacional sujeita a localização dos sistemas de captação de ar novo a uma série de condicionantes, por forma de garantir que não serão introduzidos no espaço poluentes ou gases com efeito adverso para as condições interiores. De facto, existem em Portugal restrições sobre a distância mínima requerida de afastamento entre o local de captação do ar a insuflar e certas fontes de poluentes como garagens, torres de exaustão ou até mesmo distância ao solo. Como se pode ver na Figura 3 é necessário que exista uma distância mínima de 0,3 metros entre a grelha de entrada da conduta de admissão de ar e o pavimento, sendo que este valor sobe exponencialmente para os 5 metros quando se fala da distância para os pontos de exaustão de ar interior.

Local	Valor mínimo [m]
Pavimento (superfície abaixo da admissão de ar, telhado inclinado, entre outros)	0,3
Solo	2
Grelha de extração e exaustão de ar interior	5
Entradas de garagens	5
Respiradouros de colunas da rede de esgotos, chaminés e exaustões de equipamentos de combustão	5
Exaustões de torres de arrefecimento	7,5
Exaustões tóxicas ou perigosas	10

Figura 3 - Distância mínima a respeitar na colocação de admissões de ar, retirado da Portaria nº 138-I/2021.

A legislação ressalva a situação de existir a impossibilidade de garantir a distância mínima a todas as fontes acima explicitadas, referindo que nesses casos o projetista deve realizar uma explicação detalhada das incompatibilidades e justificar a solução alternativa adotada, garantindo sempre a manutenção da qualidade mínima do ar.

2.2. GERAÇÃO HUMANA DE CO₂

Um das variáveis mais importante do estudo em causa são as pessoas que frequentam os espaços, os ocupantes, mais concretamente o número delas ao longo do tempo. Deste modo, é impreterível que se compreenda de que forma a ocupação humana influência o

espaço, isto é, as suas condições de ocupação – temperatura, concentração de dióxido de carbono, CO₂, entre outros aspetos.

Assim sendo, existe a necessidade de compreender a maneira como o ser humano produz e exala CO₂ para o meio ambiente, sendo o principal objetivo estabelecer uma relação entre a presença humana e a variação da taxa de concentração deste poluente em função do tempo, permitindo posteriormente prever o comportamento de um espaço.

Atualmente, a expressão universalmente utilizada para o cálculo da evolução da concentração de dióxido de carbono é a seguinte [5], [6]:

$$V_{CO_2} = \frac{0,00276A_{Du} * M * RQ}{(0,23RQ + 0,77)} \quad (2)$$

Onde:

V_{CO_2} – taxa de geração de dióxido de carbono [L/s]

A_{Du} – área de *DuBois* da superfície corporal [m²]

M – taxa metabólica [met]

RQ – quociente respiratório

Olhando às particularidades das variáveis acima mencionadas, A_{Du} simboliza a área de Dubois e é dependente da altura e da massa corporal da pessoa, contudo, é prática comum adotar-se o valor de 1,8 m² para situações em que os ocupantes sejam adultos ou no caso de ser impossível obter-se informação sobre os mesmos.

Por sua vez, RQ simboliza o quociente respiratório, isto é, o rácio entre a taxa volumétrica de dióxido de carbono produzida e a taxa volumétrica de oxigénio consumida, e é uma variável que depende da dieta principal de cada pessoa, sendo o valor comumente estabelecido como 0,85 [7].

No que diz respeito à taxa metabólica (M), esta depende de vários fatores como a faixa etária, género, tipologia corporal, entre outras características que se distinguem de indivíduo para indivíduo, o que dificulta a capacidade de estabelecer valores de referência. De acordo com [7], muitos dos valores atualmente utilizados nas áreas da ventilação e qualidade do ar interior são referentes a estudos realizados em indivíduos dos anos 60, pelo que já se

encontram desatualizados fruto das alterações dietéticas das populações, da evolução da fisionomia das pessoas e ainda da tipologia das atividades comumente desenvolvidas. Os autores de [7] sugerem que se deve adotar uma posição mais crítica aquando do cálculo de M, tomando-se por base valores sustentados na massa corporal dos indivíduos, as suas taxas metabólicas basais (são mais próximas da realidade atual), entre outros fatores e variáveis que permitem a obtenção de um valor final de M e, por consequência, de geração de dióxido de carbono mais exatos.

Tipo de atividade	M_{met} [met]
Sono	0,80
Descanso	1,00
Sedentária	1,20
Moderada	1,75
Ligeiramente alta	2,50
Alta	5,00

Nota: 1 met = 58,15 W/m²

Figura 4 - Taxa metabólica, M, em função do tipo de atividade, retirado do Manual SCE.

Mais ainda, como é possível ver na Figura 4, o valor da taxa metabólica varia consoante o tipo de ação/atividade que a pessoa está a realizar pelo que isso por vezes complica o cálculo dos valores de geração de CO₂ em espaços onde ocorram vários tipos de atividades em simultâneo, sendo para tal necessário estabelecer-se uma média ponderada do número de pessoas que realizam cada tipo de atividade e a sua taxa metabólica teórica.

2.3. ENQUADRAMENTO TEÓRICO DE SISTEMAS DE CONTROLO

Com a evolução da sociedade atual, os processos com os quais as pessoas interagem no dia a dia começaram a ficar gradualmente mais complexos, o que aliado com a busca pela eficiência, provocando o desenvolvimento de mecanismos – físicos ou eletrónicos – que ajudem no controlo do mesmos. De facto, até os sistemas mais simples e que não atraem a atenção dos seus utilizadores incorporam sistemas que permitem o controlo de certas ações,

ou até mesmo total, dos mesmo. São um exemplo disso os sistemas de autoclismo que, aparentemente simples, empregam um sistema de controlo físico que controla ações como o fecho da válvula de descarga e subsequente abertura e fecho da válvula de enchimento com uma simples interação do utilizador.

Posto isto, é natural assumir que a crescente complexidade dos objetos utilizados, dos processos produtivos e até mesmo das possibilidades de controlo tenha originado a criação de novas metodologias de controlo permitindo assim controlar de forma mais precisa as ações de um sistema, aumentando a produtividade e eficiência do mesmo. Como tal, torna-se imperativo compreender os conceitos de base dos métodos de controlo que serão explicitados ao longo do presente subcapítulo.

Como é possível de observar na Figura 5, os sistemas podem ser classificados de acordo com quatro parâmetros, isto é, de acordo com a sua estabilidade, continuidade, variância no tempo e, por fim, a sua linearidade [8].

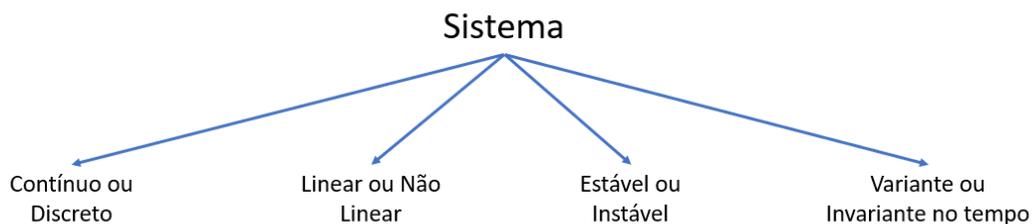


Figura 5 - Classificação de sistemas de controlo.

Todos os pontos acima citados são de elevada importância para a correta classificação do sistemas, bem como para a posterior operação e implementação do controlo, pelo que é de relevo compreender o que cada um deles significa. A continuidade de um sistema representa o facto de este possuir, ou não, entradas e saídas que sejam contínuas no tempo, enquanto a variância no tempo simboliza o facto do mesmo apresentar sempre a mesma resposta independentemente do ponto temporal considerado – caso tal se verifique o sistema será classificado como invariante.

No que diz respeito à linearidade de um sistema, é necessário que se verifiquem duas propriedades, a propriedade da homogeneidade e a da sobreposição, para que este seja classificado como linear. A propriedade da homogeneidade de um sistema verifica-se quando um dado *input* multiplicado por uma constante dá origem a uma saída multiplicada na mesma

proporção. Por sua vez, a propriedade da sobreposição pode ser descrita como a soma de duas entradas originar um *output* que corresponde à soma dos dois *outputs* individuais, como está demonstrado na Figura 6.

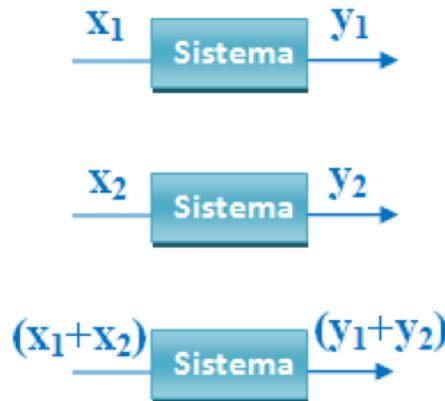


Figura 6 - Esquematização da propriedade da sobreposição, retirado de [8]

Por fim, no que diz respeito à classificação de um sistema como estável ou instável, é necessário verificar se para um *input* limitado se obtém um *output* limitado, sendo nesse caso o sistema estável. Por oposição, caso se verifique que a saída aumenta sem limite ao longo do tempo, então este é instável [8].

Para além disso, os sistemas podem ainda apresentar uma malha aberta ou fechada, o que indica se a saída (*output*) tem ou não influência na ação de controlo. Os sistemas em malha aberta, comumente designados de sistemas *open loop*, caracterizam-se pelo facto de que para cada entrada, ou *input*, de referência o sistema se comporta de maneira fixa – as torradeiras são um exemplo comum deste tipo de sistemas [9]. Este tipo de malha confere aos sistemas vantagens como a simplicidade, a possibilidade de aplicar técnicas de tentativa-erro ou ainda o facto, não havendo variações ou ocorrências inesperadas, saber-se o *input* exato a dar ao sistema para que se obtenha a saída desejada.

Contudo, os sistemas que empregam malhas abertas apresentam duas grandes desvantagens, são elas:

- a ocorrência de falhas/erros devido a variações no sistema;
- sujeito a imprecisões associadas a variações do ambiente externo;

Isto faz com que este tipo de sistemas de controlo apresente uma aplicabilidade limitada e que por sua vez não é de todo universal, ou passível de ser transposto para vários mecanismos sem requerer grandes alterações.

Por sua vez, um sistema em malha fechada (*closed-loop*) tem em consideração as saídas de modo a ajustar as entradas seguintes no tempo em busca da aproximação ao *setpoint* ou *output* pretendido. Este tipo de sistemas são muitas vezes denominados de sistemas de *feedback* uma vez que existe essa reintrodução do sinal de saída no ajuste do *input* do mesmo. Os sistemas de *closed-loop* pretendem combater as maiores desvantagens dos sistemas antes apresentados (sistemas de malha aberta) uma vez que as suas características os munem não só da capacidade de compensar variações internas do sistemas, bem como de uma certa robustez a perturbações externas [9].

De facto, dado as suas vantagens, esta tipologia de sistema é empregue em inúmeras situações, sendo que o seu princípio de funcionamento base serve de plataforma para o desenvolvimento de muitos outros métodos de controlo mais avançados e mais complexos, o que nem sempre simboliza que se obtenha um controlo mais preciso, como se verá posteriormente.

Assim sendo, é imperativo, para o correto desenvolvimento do estudo, a explicitação dos componentes, dos conceitos que constituem os sistemas de *feedback* e as suas implicações na generalidade do mesmo. Para além do conceito de *setpoint* ou de valor desejado, explicado nos parágrafos acima, torna-se necessário referir o conceito de *plant* como o objeto ou o sistema cujo comportamento pretendemos controlar, sendo no caso da presente dissertação um sistema de AVAC. Mais ainda, os *outputs* são medidos utilizando sensores sendo esse sinal enviado ao controlador que, conforme o erro – diferença do *output* para o *setpoint* – verificado, decide de que forma atuar no sistema através dos atuadores.

No que diz respeito a perturbações, estas são definidas como sinais que afetam, como o próprio nome indica, negativamente o valor da saída do sistema, podendo ser classificadas como externas ou internas [9].

O processo de criação de um sistema de controlo passa por várias etapas, começando-se por estabelecer quais os objetivos do controlo, isto é, qual o comportamento que pretendemos imprimir ao objeto/sistema. De seguida é necessário identificar quais as variáveis a controlar e quais os componentes essenciais para realizar esse controlo e posterior atuação, seguindo-se da modelação do esquema do sistema. Por fim, procede-se ao desenho, e conseqüente modelo matemático, do diagrama de blocos sendo que posteriormente se deve empregar uma avaliação crítica visando a redução do mesmo, culminando o processo com as

fases de análise e projeto. É de referir que em certos casos se realiza uma etapa complementar de análise à sensibilidade do sistema.

Um sistema de controlo é dinâmico, isto é, responde a um *input* passando por uma fase transiente antes de chegar à fase de equilíbrio em estado estacionário. Deste modo, é importante ter em conta as duas fases supramencionadas aquando do planeamento e conceção de um controlo.

Na fase de análise olha-se à performance do sistema, avaliando a fase transiente da resposta e o erro já em *steady-state* de modo a que se compreenda se este vai de encontro às especificações pretendidas. Por sua vez, na fase de *design*, podendo esta ser um processo iterativo, pretende-se a criação/alteração do funcionamento do sistema, isto é, de acordo com a análise concluir se o sistema vai ou não de encontro às especificações pretendidas, alterando-se parâmetros ou componentes para garantir o correto funcionamento do mesmo.

A aplicação da metodologia acima descrita visa a obtenção da estabilidade do sistema, de uma resposta transiente corretamente definida, a redução do erro, ou ainda o aumento da sensibilidade deste [9]. Para tal, é imprescindível a realização de testes ao sistema, sendo que para tal se realizam uma série de *inputs* de tipologias *standard*. As entradas mais comumente utilizadas nesta fase são:

- impulso;
- rampa;
- degrau;
- sinusoidal;
- parabólica;

Posto isto, e dado que os conceitos acima mencionados irão ser utilizados continuamente ao longo da presente dissertação, é de elevado interesse a exposição do significado de cada um deles. No que diz respeito a uma entrada de impulso este tipo de sinal é utilizado para colocar energia no sistema de modo a que a resposta apenas desenvolva a fase transiente possibilitando assim a derivação de modelos matemáticos que representem o sistema. Convém ainda referir que um impulso é infinito no instante de tempo $t=0$ mas é nulo em qualquer outro ponto do tempo.

Por sua vez, um *input* em rampa representa um comando linear de crescimento contínuo, isto é, graficamente apresenta a mesma representação de uma regressão linear

como representado na Figura 7, sendo este tipo de entradas empregue em teste para que se compreenda melhor o erro em *steady-state*.

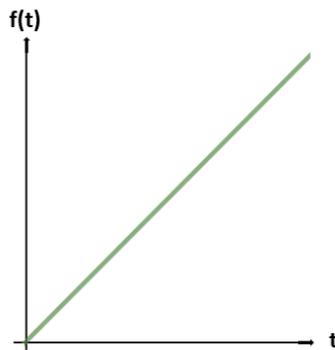


Figura 7 - Representação gráfica de um *input* em rampa.

No que diz respeito a uma entrada em degrau, tal como o nome indica a representação gráfica relembra um degrau, esta representa um comando constante dado pelo controlador e permite a quem está a programar o sistema perceber claramente qual a resposta transiente e a de *steady-state* podendo estas ser corretamente avaliadas [9].

Os *inputs* sinusoidais (Figura 8), em fase de testes, podem ser utilizados para que se possa chegar a modelos matemáticos a partir dos modelos físicos e ainda para testar o efeito das não linearidades, isto é, zonas mortas, o efeito de *backlash*, entre outras. Por fim, as entradas em parábola são empregues em condições e com objetivos semelhantes às entradas em rampa previamente descritas.

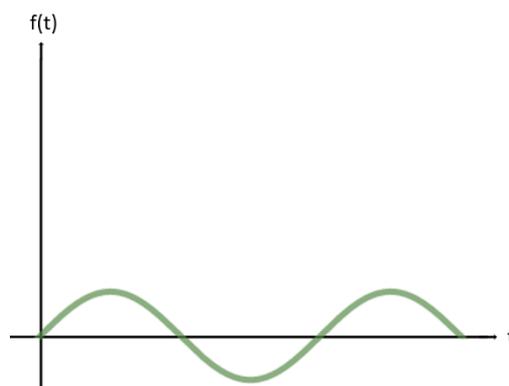


Figura 8 - Representação gráfica de um *input* sinusoidal.

Mais ainda, é de referir que o funcionamento dos processos realizados pelo sistema podem ser traduzidos sob a forma de funções de transferência, sendo esta a forma mais abundantemente utilizada, ou por um conjunto de equações diferenciais – método do espaço de estado. Este último é expresso utilizando equações diferenciais de primeira ordem, sendo

as suas condições iniciais obrigatoriamente diferentes de zero e o seu domínio o tempo, sendo que as entradas e as saídas são múltiplas (*MIMO*) e é empregue em sistemas não lineares, como é o caso da maior parte dos sistemas AVAC [8].

Por contraste, na metodologia da função de transferência as condições iniciais são iguais a zero, os parâmetros são constantes no tempo e a tipologia do sistema é linear, contudo, é de referir que este método é o mais popular visto ser várias vezes referenciado na literatura.

Por fim, olhe-se à estabilidade de um sistema, método este que pode ser feito de diversas maneiras. Começando pelo uso da resposta natural – representada pela segunda parcela da equação (3) – como indicador, um sistema pode ser considerado como estável, instável ou marginalmente estável dependendo da evolução desta no tempo [10].

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{y}_{\text{forçada}}(t) + \mathbf{y}_{\text{natural}}(t) \quad (3)$$

De facto, no caso de a resposta natural permanecer constante ou oscilar com uma amplitude constante o sistema linear é considerado marginalmente estável, sendo que para este ser considerado estável a resposta tem de tender para zero ao longo do tempo. Por contraste, um sistema é classificado como instável quando a parcela referente à resposta natural tende para infinito ao longo do tempo.

É ainda possível avaliar a estabilidade de um sistema analisando a sua resposta total (equação (3)), sendo que nesta situação um sistema é estável quando um *input* limitado se traduz numa saída limitada ou instável quando o mesmo *input* limitado produz uma saída ilimitada.

Existe ainda um outro método de estudar a estabilidade do sistema tendo por base a função de transferência do mesmo, chama-se: Critério Fundamental da Estabilidade. Este método tem por base a resolução da função de transferência de um dado sistema com vista a descobrir quais são os seus polos, sendo que é através da posição destes mesmos polos num referencial cartesiano que se pode inferir sobre a estabilidade do sistema [10].

Neste caso, um sistema que apresente todos os seus polos no segundo e/ou terceiro quadrantes do Plano-*s* é considerado como estável, como demonstrado na Figura 9.

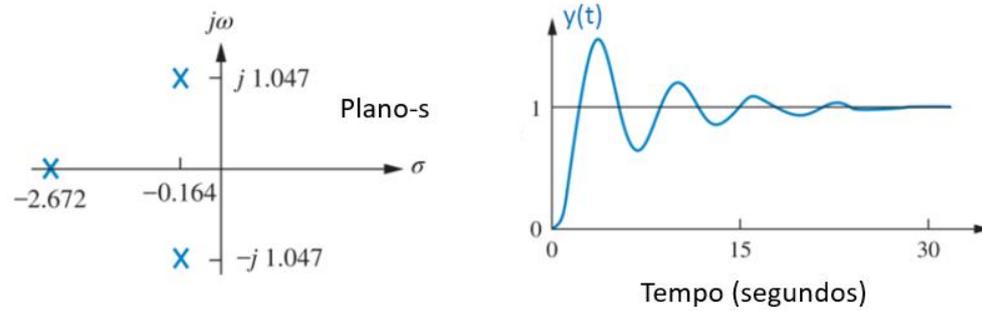


Figura 9 - Esquematização dos polos de um sistema estável e representação gráfica do mesmo (respetivamente), retirado e adaptado de [10].

No que diz respeito a um sistema cujos polos da função de transferência apresentem multiplicidade um, estando sobre o eixo imaginário, e não se encontrem no semi-plano positivo segundo σ , o sistema é caracterizado como marginalmente estável. Por fim, um sistema é instável quando os seus polos apresentam multiplicidade superior a um e se encontram representados também no eixo imaginário – Figura 10 – ou no caso de apresentar um polo no primeiro ou quarto quadrantes, sendo que tais fatores podem por vezes acontecer em simultâneo [10].

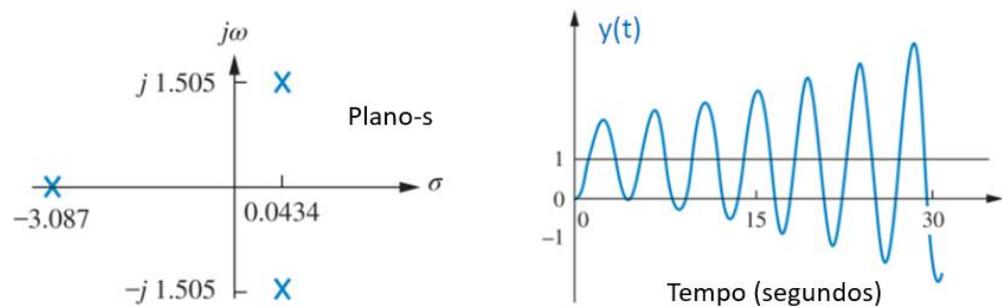


Figura 10 - Esquematização dos polos de um sistema instável e representação gráfica do mesmo (respetivamente), retirado de [10].

Por fim, existe ainda um outro método que possibilita o estudo da estabilidade dos sistemas sem que para tal seja necessário a resolução da função de transferência nem o posicionamento exato dos polos no referencial supramencionado, sendo este conhecido como Método de *Routh-Hurwitz*. O método em questão requer a execução de dois passos: o preenchimento de uma tabela de *Routh* e a posterior interpretação da mesma, com vista a perceber em que quadrantes se encontram os polos da função – reforçando que este método

apenas permite compreender o posicionamento geral dos polos sem que se saiba as suas coordenadas exatas nem o seu valor[11].

O primeiro passo tem por base uma tabela com quatro colunas que serão preenchidas de acordo com os valores associados a cada parcela da função de transferência original, sendo o número de linhas sempre dependente da ordem da mesma. Tomando por base um sistema que apresente uma função de transferência de ordem igual a quatro genérica, do tipo $a_4s^4 + a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0$, obtém-se a tabela de *Routh* seguinte:

Tabela 1 - Forma inicial da tabela de *Routh*.

s^4	a_4	a_2	a_0
s^3	a_3	a_1	0
s^2			
s^1			
s^0			

De seguida é necessário preencher os restantes espaços utilizando o conceito de determinante de uma matriz, sendo que as matrizes serão todas da tipologia 2x2, sendo a coluna esquerda desta composta pela primeira coluna das duas linhas que a antecedem e a coluna direita composta pelas duas linhas da coluna acima e imediatamente à direita, sucessivamente até que toda a linha referente a s^0 esteja preenchida [11]. O valor final é o quociente entre o valor negativo do determinante da matriz e o valor acima da parcela a ser calculada, como é possível de ver na Tabela 2.

Tabela 2 - Tabela de *Routh* genérica.

s^4	a_4	a_2	a_0
s^3	a_3	a_1	0
s^2	$-\frac{\begin{vmatrix} a_4 & a_2 \\ a_3 & a_1 \end{vmatrix}}{a_3} = b_1$	$-\frac{\begin{vmatrix} a_4 & a_0 \\ a_3 & 0 \end{vmatrix}}{a_3} = b_2$	$-\frac{\begin{vmatrix} a_4 & 0 \\ a_3 & 0 \end{vmatrix}}{a_3} = 0$
s^1	$-\frac{\begin{vmatrix} a_3 & a_1 \\ b_1 & b_2 \end{vmatrix}}{b_1} = c_1$	$-\frac{\begin{vmatrix} a_3 & 0 \\ b_1 & 0 \end{vmatrix}}{b_1} = 0$	$-\frac{\begin{vmatrix} a_3 & 0 \\ b_1 & 0 \end{vmatrix}}{b_1} = 0$
s^0	$-\frac{\begin{vmatrix} b_1 & b_2 \\ c_1 & 0 \end{vmatrix}}{c_1} = d_1$	$-\frac{\begin{vmatrix} b_1 & 0 \\ c_1 & 0 \end{vmatrix}}{c_1} = 0$	$-\frac{\begin{vmatrix} b_1 & 0 \\ c_1 & 0 \end{vmatrix}}{c_1} = 0$

Finalmente, estando toda a tabela de *Routh* preenchida podem ser tiradas conclusões sobre a estabilidade do sistema nela representado, isto é, através do número de variações do sinal na primeira coluna da tabela é possível inferir o número de polos que se encontram do lado direito do semi-plano, sendo esta relação direta, uma variação de sinal representa a existência de um polo no lado anteriormente referido. Assim sendo, pode-se afirmar que um sistema que não apresente variações de sinais na coluna esquerda da tabela é indubitavelmente um sistema estável [10].

3. MÉTODOS DE CONTROLO

Após a explicação dos vários conceitos de base – subcapítulo 2.3– necessários para a correta compreensão dos sistemas, olhe-se agora aos diversos métodos de controlo e aos tipos de controladores que deles advêm com vista a que se compreenda como diversas metodologias podem ser aplicadas em contexto industrial. No presente subcapítulo serão explicados métodos de controlo como o controlador PID, *Model Predictive Control* ou ainda *Fuzzy Logic Control*, que servirão posteriormente de base para o estudo de uma solução de controlo de sistema AVAC, tal como estabelecido no início da presente dissertação.

Comece-se por uma ressalva histórica, é sabido que o controlo de um sistema pode ser feito através de mecanismos físicos ou empregando metodologias elétricas/digitais de controlo, são prova disso os relatos da época das grandes civilizações gregas que já empregavam uma espécie de controlo de *feedback* rudimentar para controlar níveis de águas ou ainda algumas descrições na literatura de tentativas de inventar mecanismos de controlo da velocidade que remontam à época medieval [12].

De facto, com o passar dos anos e a evolução das civilizações, as tentativas de controlo de sistemas começaram a surtir mais efeito e ficar cada vez mais bem desenvolvidas, em meados do século XVII, *Cornelius Drebel*, testou um sistema de *feedback* que permitia o controlo da temperatura de um forno. Contudo, foi durante grande parte do século XVIII e XIX que esforços mais afinçados foram feitos dando origem a controladores diretos, isto é, controladores cujo elemento de medição estava diretamente ligado ao atuador do controlador, pelo que a força capaz de fazer a atuação era diretamente dependente da força que o mecanismo de medição conseguia desenvolver [12].

Com o final da primeira guerra mundial, os EUA viram a sua indústria crescer de uma maneira exponencial e com ela o aumento da necessidade de instrumentos capazes de controlar os processos industriais com alguma precisão, sendo por esta altura que começaram a aparecer (por vezes sem que fossem intitulados como tal) os primeiros controladores PID pneumáticos. Em 1939 a empresa *Taylor Instrument Companies* introduziu no mercado um sistema pneumático que incorporava a ação “*pre-act*”, por eles denominada, que era uma ação de controlo proporcional à derivada do erro, sendo que pela mesma altura uma outra empresa concorrente lançou um outro controlador que incorporava uma ação de *reset* –

comercializada segundo o nome *Hyper-reset* – que era igualmente proporcional ao integral do erro pelo que ambas as ofereciam soluções de controlo PID.

É ainda de referir que apesar de já existirem controladores PID há algum tempo, o funcionamento por detrás destes nunca tinha sido explicado nem traduzido para contexto de literatura até aos inícios da década de quarenta, quando *N.B. Nichols* e *J.G. Ziegler* publicaram os primeiros artigos científicos sobre o assunto, explicando o funcionamento e o modo de afinação deste tipo de controladores, método este que ainda hoje é utilizado como se verá mais à frente.

Atualmente, os controladores PID apresentam uma grande variedade de possíveis aplicações, combinações e níveis de intervenção no sistema que controla, pelo que se tornaram controladores bastante universais e largamente utilizados.

Por sua vez, o Modelo Preditivo de Controlo (MPC) surgiu no contexto industrial com um propósito muito específico, propósito este que consistia em permitir uma melhor previsão e controlo dos processos de tomada de decisão da indústria petroquímica. De facto, este setor industrial era caracterizado pela grande volatilidade do preço das matérias-primas e do mercado final onde os subsequentes produtos eram vendidos, pelo que o ato de tomada de decisões podia ser algo difícil e por vezes custoso [13].

Foi neste contexto que apareceram os primeiros controladores com uma capacidade preditiva, ainda que um pouco arcaica, sempre com uma frase de mote: *“On-line update the manipulated variables to satisfy multiple, changing performance criteria in the face of changing plant characteristics”* [13]. Ou seja, procurava-se um controlo capaz de reagir às alterações do próprio sistema tendo por base uma base de dados *online* capaz de ler as evoluções do mesmo e antecipá-las alterando conformemente os *inputs*.

Assim sendo, em finais da década de 70 surgiram os primeiros relatos científicos de aplicações bem-sucedidas do MPC – em 1979 engenheiros da gasoleira *Shell* mostrariam a sua aplicação no contexto do *fracking*. É de referir que os desenvolvimentos anteriormente citados são referentes apenas a aplicações conseguidas desta tipologia de controlo, o que não significa que estas potencialidades não tivessem sido descobertas anteriormente, mas sido descartadas fruto da sua complexidade [13].

De facto, em 1963, *Propoi* propôs uma metodologia com horizonte “andante” que é a base do MPC, isto apesar de referências a um controlo com relações semelhantes que remontam ao ano anterior (1962). Ainda assim, tais parecenças e ligações com a metodologia

de *model predictive control* só foram traduzidas para literatura e explicadas em inícios dos anos 80, tendo ocorrido nessa década o *boom* desta tecnologia.

Deste modo, foram várias as aplicações com sucesso deste tipo de controlo desde a indústria petrolífera, como anteriormente referido, até ao fabrico do papel ou até mesmo à produção de vapor em caldeiras, resultando numa enormidade de publicações científicas relatando o correto funcionamento, como se verá de seguida, de tais sistemas. Mais concretamente, em 1985 foram várias as aplicações, no contexto das trocas de energia, onde o MPC foi empregue, como por exemplo em permutadores de calor e num tanque misturador, como descrito em [14].

Nos dias que correm este tipo de métodos de controlo ainda se encontra muito na voga e a sua aplicabilidade não podia ser mais atual, uma vez que a preocupação com a utilização energética sobe de dia para dia e estes sistemas podem permitir fazer uma gestão mais adequada da energia, fazendo uso da sua capacidade de previsão.

A título de conclusão, olhe-se brevemente para a história da metodologia *Fuzzy Logic* e a sua origem. Segundo [15] a necessidade e o uso de uma metodologia de *design* lógico remonta a trabalhos desenvolvidos pelo filósofo grego Aristóteles, ainda que de forma primitiva, sendo várias as referências ao longo da história a mecanismos lógicos de dois ou três níveis. Durante vários anos *Lukasiewicz* propôs a lógica de três níveis – Verdadeiro, Falso ou Neutro – sendo que em paralelo, na China, iam aparecendo mais relatos do conceito de lógica multinível.

Na década de 1930 apareceram os primeiros “*fuzzy set*” pela mão do filósofo *Black*, como uma análise do vago, sendo que no início dos anos 50 apareceu a primeira menção aos *fuzzy set* num contexto *framework* probabilístico. Finalmente, em 1974, foi conseguida a primeira implementação da metodologia FL no controlo de um pequeno motor a vapor, mostrando assim a sua viabilidade.

Com o passar dos anos, este método foi extensivamente detalhado em diversos estudos e, recentemente, tem vindo a subir de importância no que diz respeito ao *design* de sistemas de controlo não lineares, como se verá em 3.4.

3.1. CONTROLO *ON-OFF*

O controlo *ON-OFF* é, provavelmente, dos métodos de controlo o mais antigo, sendo também o mais simples e barato de aplicar, fruto óbvio da sua simplicidade. Contudo, a sua simplicidade está, aliada ao seu nome, representada no facto de este controlador ser de apenas dois estados, estados estes que não apresentam a possibilidade de uma saída intermédia: ou se encontram totalmente ligado ou totalmente desligado, podendo ser também denominado de controlo *two-step* – do inglês, para duas etapas ou dois estados.

Deste modo, podemos afirmar que este método de controlo deverá ser empregue em sistemas que sejam discretos e não lineares, sistemas estes cujo problema de controlo não será muito complicado ou exigente, sendo que a sua logica de controlo poderá ter diferentes origens: modo comparativo, frequência fixa ou um modo híbrido.

A essência deste método de controlo passa por manter uma variável de controlo entre dois limiares previamente estabelecidos, o limiar marginal superior e o marginal inferior – y_H e y_L , respetivamente. Deste modo, o controlo *ON-OFF* pode-se resumir, no seu estado mais básico, onde existe apenas um único valor de *setpoint*, a uma regra de controlo do tipo: “Se e (erro) for superior a 0 então a saída deverá ser *ON*, senão a saída será *OFF*”. No caso de o pretendido for manter o valor entre um intervalo, intervalo este denominado de histerese, a regra terá de ter em conta a amplitude do mesmo (h) – ilustrado na Figura 11 – pelo que o controlador assumirá a posição *ON* sempre que o erro seja superior a $-\frac{h}{2}$ [16].

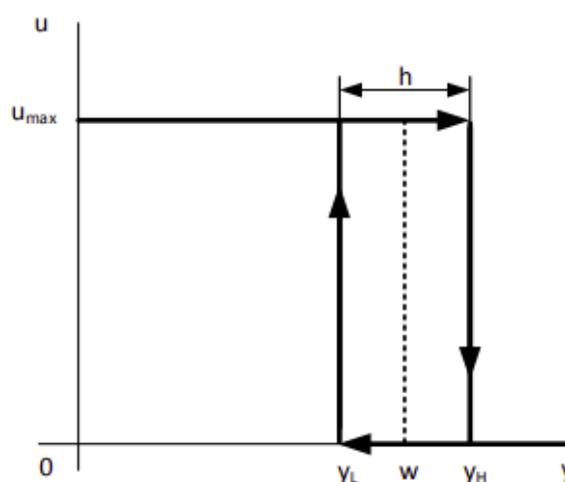


Figura 11 - Representação gráfica de um sinal genérico de um controlador *ON-OFF*, retirado de [17].

Tal como referido anteriormente, este método de controlo pode ser aplicado usando mais do que uma lógica de controlo, sendo uma delas a lógica de modo comparativo. Neste caso, a variável de controlo é comparada com o valor do *setpoint*, sendo o acionamento do controlador realizado segundo as regras supracitadas, contudo, torna-se imperativo explicar em maior detalhe o processo por detrás desta lógica de controlo. Sendo w (Figura 11) o valor atribuído ao *setpoint*, caso se verifique que o valor da variável de controlo cumpre com $w - y_L$, o sistema entra na sua fase de estado ligado, muitas vezes denominada de fase de *power supply*, estando conectado à fonte de energia.

Por oposição, no caso de se verificar que a saída do sistema se encontra num valor superior ou igual a $w + y_H$, o controlador logico irá colocar o sistema no estado de *OFF*, entrando o controlador na fase de carga (*load phase*) no qual a *plant* se encontra desligada da rede elétrica. Entrando nesta fase o valor da saída do controlador irá diminuir a um ritmo conhecido, normalmente, voltando inevitavelmente a ir de encontro às condições que o fazem entrar na fase anterior, completando assim um ciclo de operação [17].

Contudo, como neste tipo de sistemas raramente se pretende que o valor de saída atinja os valores máximos possíveis do controlador, muitas das vezes para se manter a saída dentro do intervalo vantajoso ao funcionamento do sistema, é necessário terminar ambas as fases antes que estas atinjam o seu valor máximo, resultando em gráficos de funcionamento semelhantes ao da Figura 12.

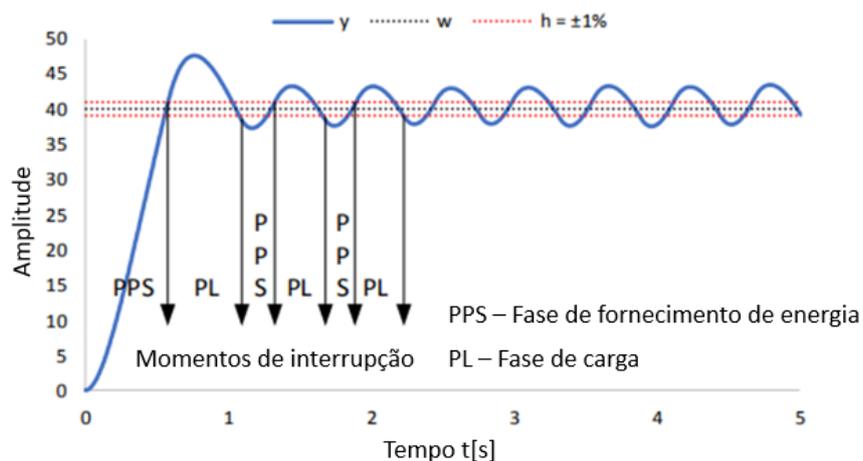


Figura 12 – Representação do gráfico com o término das fases do controlo, retirado e adaptado de [17].

As principais desvantagens desta lógica de controlo passam por existir, por vezes, *overshoot* ou *undershoot* – derivado do atraso (*lag*) inerente a estes controladores – considerável, contudo, neste tipo de processos pode tentar-se reduzir as oscilações no *output*, ou seja, a histerese, aumentando o número de ciclos/comutações por minuto do controlador, contudo, tal iria reduzir a vida dos componentes do atuador pelo que seria sempre um *trade-off* a ter em conta de caso para caso, sendo que se irá aumentar também a complexidade do controlo [16].

Uma outra lógica de controlo existente no método de controlo *ON-OFF* é o modo de frequência fixa, que consiste na manipulação da frequência do *input* de modo a melhor se controlar o comportamento do controlador. Neste caso, dado que a forma da entrada é uma curva em degrau, esta pode ser caracterizada por três aspetos: a sua frequência, a amplitude e o ciclo.

Assim sendo, as propriedades do controlador podem ser reduzidas e definidas pelo ciclo de funcionamento (*D*) e pela sua frequência varável (f_{sw}), podendo ainda afirmar-se que a exatidão desta lógica de controlo, e por consequência do método de controlo em si, está diretamente ligada à frequência que se define, sendo que esta é tanto maior quanto maior for a frequência de variação[17].

Tal como referido na descrição da lógica de controlo anterior, o seu maior problema passa pela existência de *overshoot* o que reduz grandemente as potencialidades de aplicação e reduz a qualidade do controlo, contudo, no modo de frequência fixa consegue-se eliminar em grande parte essa situação, sendo essa a principal vantagem desta lógica. Para tal, controla-se com precisão a frequência do *input* e o ciclo de funcionamento de modo a que se caminhe “lentamente” para o valor pretendido evitando assim as grandes oscilações em torno deste. Todavia, a lógica em questão apresenta uma grande desvantagem que é, em resultado deste caminhar para o *setpoint*, o aumento no tempo de estabilização da resposta do sistema.

Convém referir que, fruto das características da lógica em causa, a resposta do sistema pode ser dividida numa fase de resposta transiente e noutra de *steady-state* como se vê na Figura 13.

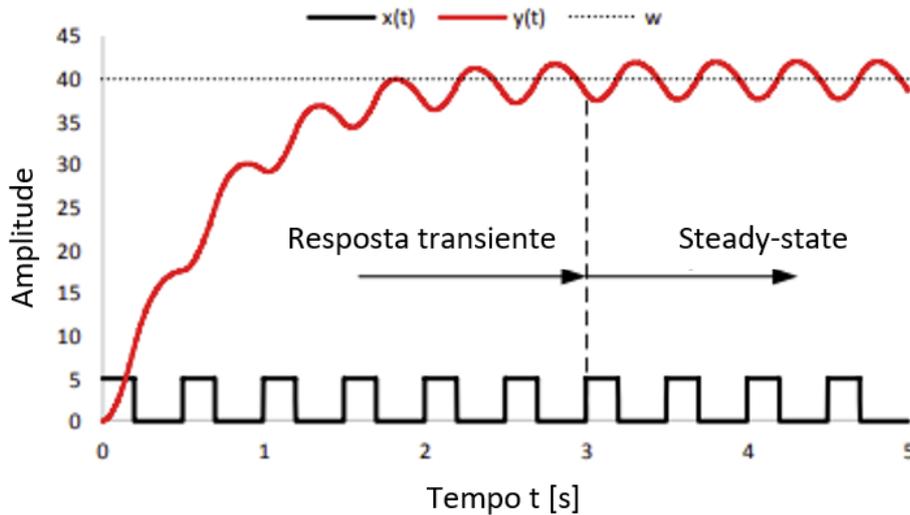


Figura 13 – Representação da resposta típica numa lógica de frequência fixa, retirado e adaptado de [17].

Comparando a figura acima com a Figura 12 e estabelecendo que ambas representam o mesmo sistema, alterando-se apenas a lógica de controlo, pode-se afirmar que se reduziu consideravelmente o *overshoot* e/ou *undershoot* obtendo-se assim um controlo mais preciso, contudo, também se pode observar que o tempo necessário para que a resposta se estabeleça em torno do *setpoint* é bastante superior.

Existe ainda uma outra lógica de controlo que pretende combinar as vantagens das duas anteriormente explicitadas: é a lógica de controlo em modo híbrido. Neste caso, pretende-se estabelecer um controlo que enquadre numa fase inicial uma metodologia de controlo comparativa transitando para um modo de “frequência fixa” oportunamente.

De facto, no caso do modo híbrido aproveita-se o facto do modo comparativo apresentar maior rapidez a nível da resposta transitente para o arranque do controlo trocando-se para um modo de “frequência fixa” posteriormente, de modo a evitar o *overshoot* característico da lógica anterior. Contudo, a aplicação destes controladores não é tão linear quanto parece, pois, o momento da troca entre modos é de alta importância para a precisão dos mesmos, pois se a alteração ocorrer demasiado cedo ir-se-á verificar uma resposta transitente lenta – característica do modo de frequência fixa – ou, no caso inverso, a resposta apresentará *overshoot* considerável, o que também não é vantajoso. Mais ainda, a troca que caracteriza o modo híbrido vem acrescentar complexidade ao método de controlo, visto que a mesma se processa numa fase em que o sistema ainda não se encontra no estado estável, sendo assim requerido que se regule mais o mesmo.

Tal como referido anteriormente, o momento em que se alterna entre modos – denominado de τ_{CFE} – é de extrema importância e requer que se tenha em consideração características como o atraso e a inércia inerente ao sistema. Nestas situações, todas as características afetas ao sistema têm de ser tidas em conta, para que se possa ajustar τ_{CFE} , muitas vezes definido de forma experimental, sendo este valor normalmente estabelecido entre 20% e 50% do valor de *setpoint* [17].

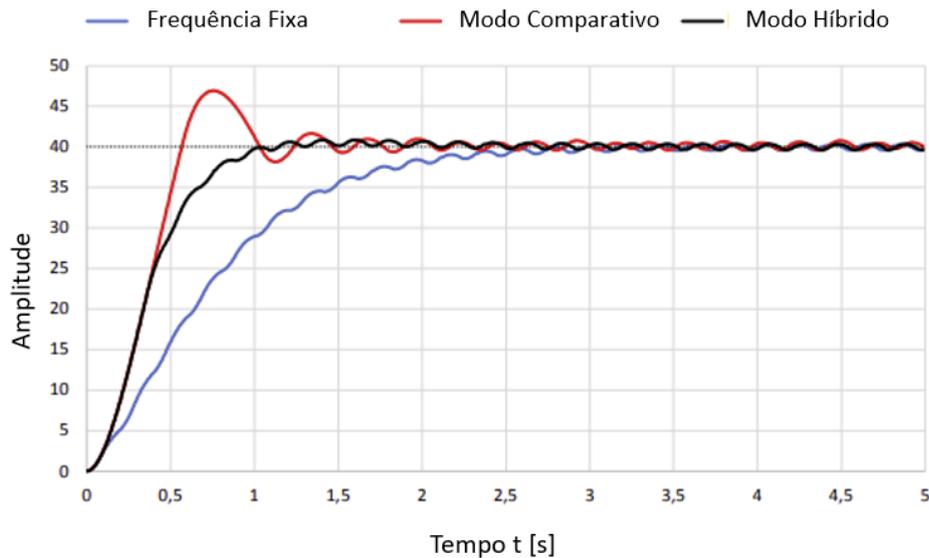


Figura 14 – Comparação da evolução no tempo das três lógicas de controlo, retirado e adaptado de [17].

Como se pode ver pela Figura 14, a representação da lógica híbrida apresenta as características que lhe são comuns como o tempo de estabilização relativamente rápido e ainda um *overshoot* reduzido, podendo então afirmar-se que é a lógica de controlo que apresenta uma maior número de vantagens e conseqüentemente um maior número de possibilidades de aplicações bem sucedidas, sendo as suas desvantagens, como o ligeiro aumento da complexidade do controlo, levadas para um segundo plano.

Em suma, o modo comparativo é o mais básico dos demais e também o menos dispendioso, pelo que a sua aplicação é grande em situações cujo controlo não é particularmente exigente, visto, por vezes, apresentar valores de *overshoot* na ordem dos 20%-40%, enquanto a lógica de “frequência fixa” é mais complexa e requer uma maior capacidade computacional, sendo o seu defeito apresentar um tempo de estabilização, isto é, até atingir a fase de *steady-state* cerca de até 2 vezes superior – o que leva a concluir que, de facto, quando possível se deve aplicar o “modo híbrido” pelos aspetos supracitados [17]. É de

ressalvar que dada a complexidade de controlo requerida atualmente nas máquinas e nos sistemas de AVAC e QAI, este método de controlo não tem grande aplicabilidade prática por si só.

3.2. CONTROLO PID

Um dos métodos de controlo mais comumente falado é o controlo PID, do inglês *proportional-integral-derivative*, sendo este muitas vezes utilizado na indústria dado a sua malha ser fechada e a sua grande robustez. Como o próprio nome indica este controlo é composto por três partes distintas que, em conjunto, dotam o controlador de características vantajosas e que apoiam a sua grande aplicação [8]. São essas partes a:

- ação proporcional;
- ação integral;
- ação derivativa;

Começando pela ação proporcional, dado ser esta a de base ao método de controlo em causa, é possível afirmar que é uma parte integral de todo o tipo de sistema de controlo sendo por vezes parte única quando satisfaz as condições necessárias.

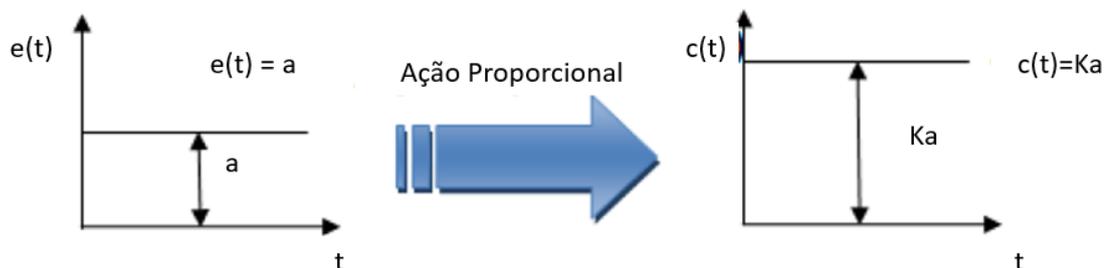


Figura 15 - Representação esquemática da ação proporcional, retirado e adaptado de [8].

A parte proporcional do PID, representado matematicamente através da equação (4), irá funcionar como um ganho do sistema, sendo proporcional ao valor do erro e ainda de ação imediata.

$$V_p = K_p e \quad (4)$$

Onde:

V_p – saída do controlador

K_p –parâmetro de ganho proporcional

e – erro ou *offset*

Apresenta como vantagens reduzir o erro *steady-state* – regime permanente – e o tempo de subida do sistema – tempo necessário para o sinal variar entre 10% e 90% do valor da amplitude estacionária, como ilustrada abaixo – sendo que acelera ainda o tempo de resposta. Contudo, este método de controlo apresenta também as suas desvantagens como, por exemplo, o aumento do tempo necessário para a estabilização da resposta ou ainda o aumento do *overshoot*, representado na Figura 16, o que faz com que este método, e subsequentemente os controladores P que o empregam, não sejam utilizados em contexto de indústria com muita frequência [6], [18].

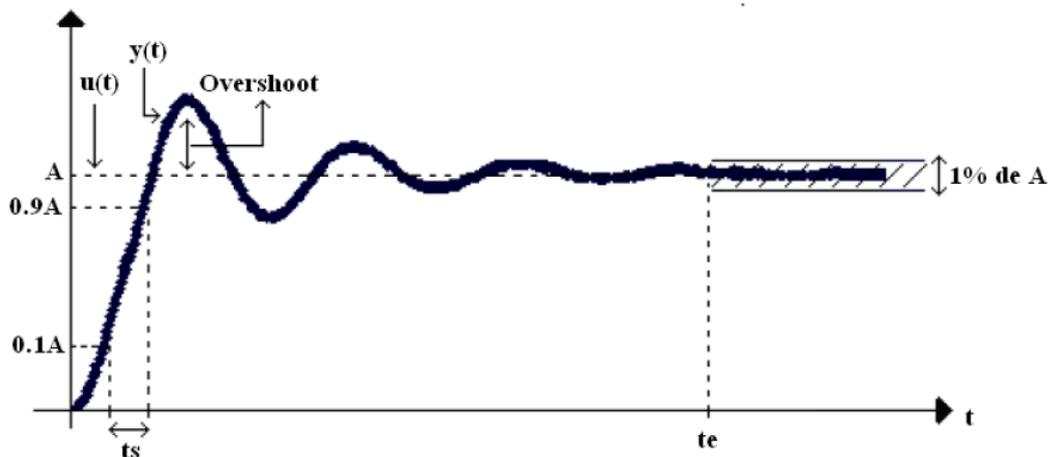


Figura 16 - Representação da resposta de um sistema PID, retirado de [8].

No que diz respeito à ação integral, que aparece por norma associada à proporcional formando os controladores PI, o seu principal objetivo prende-se com a eliminação do erro em regime *steady-state*, sendo uma das suas vantagens o facto de reduzir o tempo de subida do sistema. Tal como referido, esta ação não se utiliza separada da ação proporcional visto que a sua adição tende a interferir negativamente com a estabilidade do sistema em malha fechada [8].

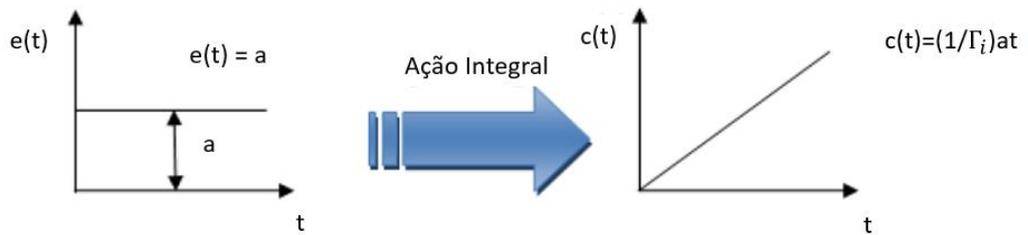


Figura 17 - Representação esquemática da ação integral, retirado de [8].

A equação matemática que traduz um controlador PI é caracterizada por manter a parte referente ao controlo proporcional – representado na equação (4)– adicionando-lhe apenas a parcela afeta à ação integral. A equação final é a seguinte:

$$V_p = K_p e + K_i \int e \, d\theta \quad (5)$$

Onde:

K_i – parâmetro de ganho integral

θ – tempo

Olhando atentamente à segunda parcela da equação (5) é possível inferir que quanto mais tempo o erro e existir, mais vezes o controlador tentará alterar a sua saída para tentar eliminá-lo [6]. Tal facto serve de base a algumas das desvantagens associadas a este tipo de sistemas, como por exemplo, o facto de aumentar o período de oscilação e o tempo de estabilização ou ainda o aumento do *overshoot* da resposta.

Um fator ainda a ter em conta é o *Wind-up*, fenómeno causado pelas possíveis respostas lentas e oscilatórias, que tende a ocorrer quando a variável de controlo atinge o seu valor de limite físico, quer máximo quer mínimo, fazendo com que o sinal de controlo fique saturado. Mais ainda, quando o sinal de controlo atinge o seu limite e conseqüentemente a saturação, este irá manter-se neste estado qualquer que seja o *output* do sistema, contudo, de modo a tentar resolver o problema, o algoritmo de controlo corta a ação de controlo no valor máximo ou mínimo, evitando assim que a ação integral origine parcelas elevadas [8].

Assim sendo, é possível afirmar que uma seleção cuidadosa do parâmetro de ganho proporcional e integral (K_p e K_i , respetivamente) trará ao sistema uma maior precisão de controlo e uma maior estabilidade, o que faz com que grande parte das necessidades dos sistemas AVAC sejam suprimidas com utilização de métodos de controlo PI apenas [6].

Por fim, a ação derivativa (Figura 18) é, à semelhança da ação integral acima explicitada, adicionada ao controlador P e também ao PI, formulando o controlador final PID. A ação derivativa varia com a derivada do erro e pode ser aproximada a uma ação do estilo preditivo munindo o sistema de uma capacidade antecipatória o que resulta em reações e respostas, por parte deste, mais rápidas [6]. A equação (6) abaixo expressa um controlador PID genérico na sua forma matemática.

$$V_p = K_p e + K_i \int e \, d\theta + K_d \frac{\partial e}{\partial \theta} \quad (6)$$

Onde:

K_d – parâmetro de ganho derivativo

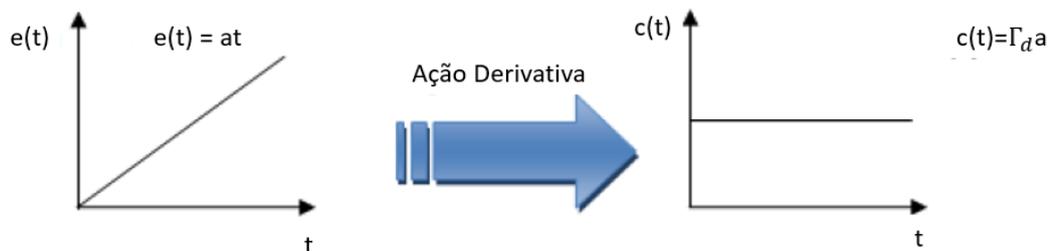


Figura 18 - Representação esquemática da ação derivativa, retirado de [8].

A adição da parte derivativa traz ao sistema vantagens como:

- reduzir o *overshoot*;
- reduzir o erro máximo;
- aumenta a estabilidade da resposta e a rapidez da mesma;
- reduzir o período de oscilação;
- melhor estabilização da malha;

Contudo, a ação derivativa não é indicada para situações em que haja sinais de ruído e dificulta a afinação do controlador face a um controlador apenas PI, facto este que vai de encontro a uma maior utilização de controlos sem ação derivativa, tal como referido anteriormente [6], [8].

De modo a facilitar a compreensão das características principais de cada ação do controlador PID encontram-se resumidas as vantagens e desvantagens na Tabela 3.

Tabela 3 - Influência da tipologia de ação em cada uma das componentes nas características de um sistema PID.

Ação de Controlo	Proporcional	Integral	Derivativo
Tempo de subida	Diminui	Diminui	Inalterado
Tempo de estabelecimento	Inalterado	Aumenta	Diminui
Erro <i>steady-state</i>	Diminui	Elimina	Inalterado
Overshoot	Aumenta	Aumenta	Diminui

De facto, e como referido anteriormente, a correta seleção dos parâmetros de ganho de cada ação, isto é, a correta sintonização do controlador é um processo moroso, mas de grande importância. A sintonização do controlador será sempre um balancear de vários parâmetros como: a velocidade de resposta, desempenho da malha, a estabilidade e a robustez, pelo que, não existe uma formulação genérica passível de ser aplicada a todos os sistemas. A afinação dependerá sempre do controlo em questão e do desempenho pretendido pelo que quanto mais informação sobre o sistema existir, melhores resultados advirão deste processo.

De acordo com [8] é possível constatar que existe mais do que uma metodologia para a sintonização de controladores, contudo, a mais comumente aceite como correta para a sintonização de controladores PID é o método *Ziegler-Nichols*.

O método supramencionado é composto por um conjunto de regras que regem e guiam no processo de determinação dos valores dos ganhos do controlador – ganho proporcional, integral e derivativo – tomando sempre a resposta transiente do sistema por base. A principal vantagem deste método, sobre a qual recai grande parte da sua vasta utilização a nível industrial, é o facto de não requerer que se conheçam todas as características do sistema, nomeadamente a função de transferência. Tal é possível pois o método de *Ziegler-Nichols* assenta num regime mais prático que possibilita a obtenção de valores de base para os parâmetros de ganho através da realização de testes no sistema, eliminando assim a necessidade de modelar o sistema – bastante benéfico dado a existência de variância no tempo e de não linearidades em muitos sistemas em contexto real.

Contudo, é de referir que este método apenas permite chegar a valores iniciais de ganho, pelo que é sempre necessário a realização de afinações aquando da instalação do controlador de modo a garantir a otimização do controlo.

A aplicação desta metodologia em sistemas de malha aberta é feita apenas quando o sistema em questão responde a uma entrada em degrau com um *output* do tipo S, isto é, uma curva em S. Mais ainda, a análise é feita aproximando o sistema um de primeira ordem com atraso, ou seja, a curva em S é caracterizada por um atraso e uma constante de tempo, L e τ respetivamente, como se pode observar na Figura 19.

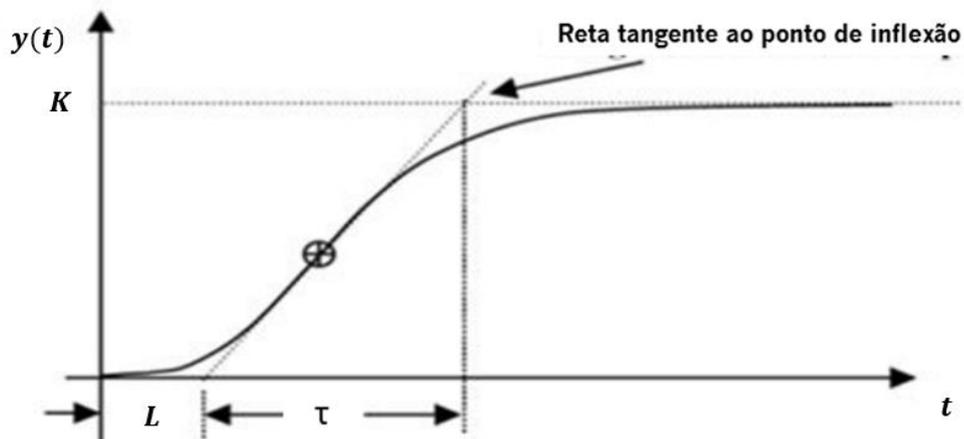


Figura 19 - Curva do tipo S numa análise de *Ziegler-Nichols* aplicada a um sistema de malha aberta, retirado e adaptado de [19].

De modo que seja possível calcular-se o atraso (L) desenha-se uma resta tangente que passe no ponto de inflexão, como se pode ver na Figura 19, sendo ainda através desta, possível obter-se a constante de tempo. Posteriormente, calcula-se a interseção da reta tangente com a linha representada por K (Figura 19) e com o eixo das abcissas, possibilitando assim a obtenção do declive da reta [8]. Por fim, tendo todos os parâmetros, L e declive da reta (R) sido obtidos, procede-se ao cálculo dos parâmetros iniciais de ganho do controlador PID, de acordo com a seguinte tabela:

Tabela 4 - Cálculo dos parâmetros do PID, para um sistema em *open loop*, segundo o método de *Ziegler-Nichols*.

	K_p	K_i	K_d
P	$\frac{1}{RL}$	-	-
PI	$\frac{0,9}{RL}$	$3L$	-
PID	$\frac{1,2}{RL}$	$2L$	$\frac{L}{2}$

No que diz respeito a sistemas com malha fechada o método de *Ziegler-Nichols* também se aplica, ainda que de uma maneira distinta, não havendo restrições ao tipo de resposta inicial esperado. De facto, a metodologia em questão quando aplicada a sistemas com *closed-loop* requer o cumprimento de várias etapas, diferentes das anteriormente explicitadas, começando-se por colocar o sistema nas suas condições normais de funcionamento introduzindo-lhe, de seguida, uma variação, em degrau, do input de referência. É necessário referir que o passo anterior deve ser executado apenas com a ação proporcional em funcionamento, devendo antes ser desligada a parte integral e a derivativa do controlador. Para concluir, vai se aumentado o ganho do controlador até que a curva da respostas seja da forma oscilatória (Figura 20), momento a partir do qual se obtém a informação necessária para a aplicação da tabela do método de *Ziegler-Nichols* [8].

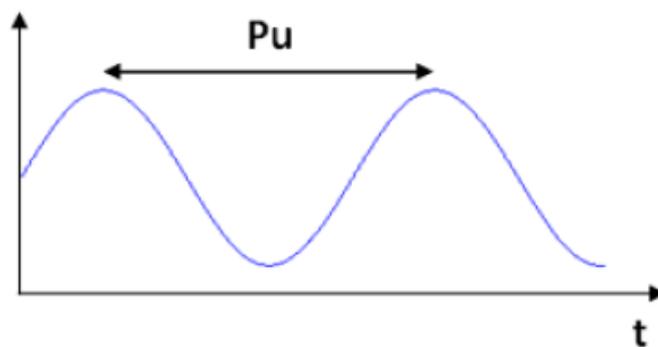


Figura 20 - Onda sinusoidal pretendida segundo o método de *Ziegler-Nichols* num sistema de malha fechada, retirado de [8].

Como é possível observar na Figura 20, P_u representa o período da curva, que corresponde ao último período no qual o sistema se mantém estável e, por sua vez, k_u (não

representado) simboliza o ganho máximo introduzido no sistema, ganho este que origina a onda pretendida.

Na Tabela 5 encontram-se expressas as relações entre os parâmetros mencionados no parágrafo anterior e os parâmetros iniciais de ganho do controlador PID, tal como pretendido.

Tabela 5 - Cálculo dos parâmetros do PID, para um sistema de malha fechada, segundo o método de Ziegler-Nichols.

	K_p	K_i	K_d
P	$\frac{k_u}{2}$	-	-
PI	$\frac{k_u}{2,2}$	$\frac{Pu}{1,2}$	-
PID	$\frac{k_u}{1,7}$	$\frac{Pu}{2}$	$\frac{Pu}{8}$

Focando agora o estudo para a vertente na qual a presente dissertação se enquadra, existem diversos modos nos quais este método de controlo é aplicado a sistemas AVAC mais especificamente ligados à gestão da ventilação. Em [20] é descrito um estudo sobre *demand-controlled ventilation* tendo como parâmetro de controlo a concentração de CO₂ no espaço, com vista à poupança de energia. O estudo passa pela utilização de sensores de concentração de dióxido de carbono como indicador de ocupação, sendo que foram empregues várias metodologias para a deteção das pessoas – *steady-state detection* ou *dynamic detection*, por exemplo. No sistema de ar condicionado em questão o sistema do permutador de tubos de água, que alimentam o sistema de VAV, são controlados por dois controladores PID de forma a manter o fluxo de ar pretendido. Os ângulos dos registos do ventilador de insuflação são modulados utilizando este tipo de controlo, utilizando a pressão estática do ar de insuflação como *setpoint*, bem como o ventilador de exaustão, por forma de garantir o caudal pretendido. Mais ainda, um outro controlador PID é empregue na zona da caixa de mistura, regulando as porções de ar novo e ar recirculado que irão ser insufladas no espaço [20].

Para além disso, a metodologia de controlo PID é a mais comumente empregue nesta área dado os inúmeros estudos sobre o seu funcionamento e, fruto da popularidade, custo de operação relativamente controlados, sendo um exemplo disso as instalações da Vieira &

Lopes, local onde se realizou o presente estudo, que apresenta controladores PID nos módulos de unidade de tratamento de ar – a instalação será apresentada em maior detalhe no capítulo 4.

3.3. MODEL PREDICTIVE CONTROL (MPC)

O modelo preditivo de controlo, do inglês *model predictive control* (MPC), tal como referido no início do capítulo 3, foi um dos primeiros métodos de controlo a permitir uma ação de controlo preditiva ao invés de reativa. Mais ainda, o MPC permite ultrapassar as limitações inerentes ao sistema de uma forma sistemática durante a criação e implementação do mesmo, sendo ainda que é um método que não se encontra restringido pelo modelo, a função de transferência ou mesmo restrições de funcionamento, tornando-se um controlo bastante versátil e capaz de operar com a representação real do processo.

Assim sendo, pode-se afirmar que o MPC é formulado como um problema de otimização dinâmica e constante, incluindo as *constraints* e a importância relativa dos diferentes objetivos do sistema, onde os *inputs* das variáveis de controlo são manipulados de acordo com a otimização, sempre em busca da diminuição do erro previsto. A otimização é feita a cada intervalo de ciclo de funcionamento do controlador (*sampling time*) com informação nova vinda do sistema, avançando-se sempre o horizonte da previsão.

A metodologia de modelo de controlo preditivo não é exclusiva a uma tipologia de sistemas, podendo ser aplicada desde sistemas com entradas e saídas únicas até sistemas MIMO, sendo que, dependendo do sistema e da situação, ainda podem ser sistemas traduzidos por funções de transferência, espaço de estados ou até mesmo matrizes de transferência. No que diz respeito a algoritmos de controlo, um controlador MPC pode apresentar vários métodos de tratar a informação, sendo que na presente dissertação serão abordados o algoritmo de matriz dinâmica de controlo (DMC) e modelo algorítmico de controlo (MAC), visto que os restantes são bastante semelhantes [13].

Na sua essência, o problema de otimização de um sistema pode ser reduzido às seguintes equações:

$$\min f(x_{t \rightarrow t+N|t}, u_{t \rightarrow t+N|t}) \quad (7)$$

Sendo que:

$$\begin{aligned}
 x_{t+k+1|t} &= g(x_{t+k|t}, u_{t+k|t}), k \\
 &= 0, 1, \dots, N - 1 \\
 x_{t+k|t} &\in X, u_{t+k|t} \in U
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Onde $x_{t+k|t}$ representa o estado previsto do sistema no instante t e $u_{t+k|t}$ representa o *input*, na forma de um vetor, do sistema no instante t [21].

O comportamento do sistema é modelado a partir do seu estado inicial, obtido através de medições, e dos distúrbios previstos, sendo a entrada no instante t a solução da equação de otimização acima expressa para os diversos instantes N , tendo em conta que a otimização é feita para um período de tempo específico, o horizonte de tempo. Posto isto, os *inputs* obtidos são introduzidos no controlador como resposta otimizada, repetindo-se o processo continuamente para os seguintes instantes, como representado na Figura 21.

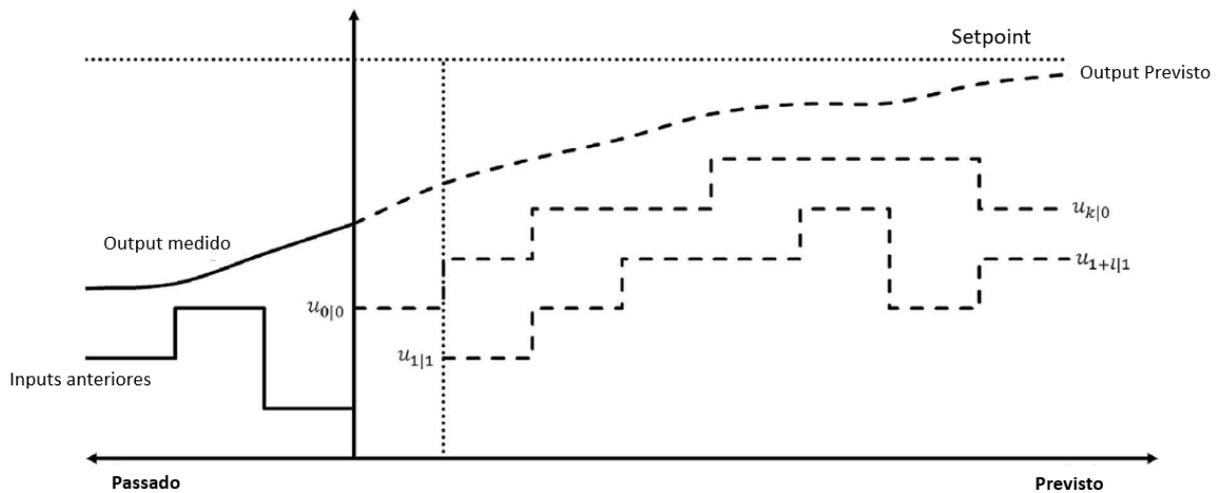


Figura 21 - Representação de uma resposta com horizonte retrocedente, retirado e adaptado de [21].

Olhe-se agora à estruturação de um controlo MPC, estrutura esta que segundo [13] se denomina de IMC do inglês para “modelo interno de controlo”, como se pode ver representado a sombreado na Figura 22. P representa o sistema (*plant*), Q o controlador, y os valores de *output* e r o *setpoint*. Mais ainda, na mesma figura, d simboliza as perturbações nas saídas e u a variável manipulada.

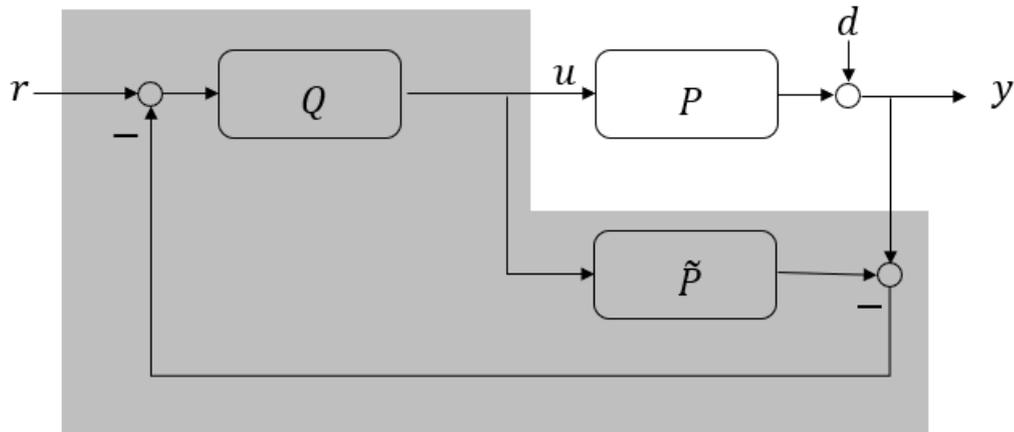


Figura 22 - Diagrama de blocos de um controlador MPC simples.

Considera-se ainda que o modelo do sistema, comumente representado por \tilde{P} , é uma descrição fiel do sistema podendo ser aproximado ao mesmo e considerado $P = \tilde{P}$, denotando-se sempre que (\sim) simboliza a parte referente ao sistema de controlo.

Contudo, o método MPC pode ser, também, traduzido sob a forma de matrizes, assumindo uma descrição em contexto de espaço de estados:

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k - 1) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k - 1) \quad (9)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) \quad (10)$$

Sendo que para condições iniciais iguais a zero, é possível obter-se a matriz de transferência:

$$\mathbf{y}(z) = \mathbf{P}(z)\mathbf{u}(z) \quad (11)$$

$$\mathbf{P}(z) \triangleq \mathbf{C}(z\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} \quad (12)$$

O que permite, assumindo A como estável, a seguinte expansão:

$$\mathbf{P}(z) = \sum_{i=0}^{\infty} \mathbf{C}\mathbf{A}^i\mathbf{B}z^{-i-1} \quad (13)$$

$$\triangleq \bar{\mathbf{H}}_i z^{-i} \quad (14)$$

Uma vez que \bar{H}_i representa os coeficientes de impulso, se se desenvolver a equação (14) num domínio temporal obtém-se a equação abaixo:

$$\mathbf{y}(k) = \sum_{i=1}^n \bar{H}_i \mathbf{u}(k-i) \quad (15)$$

$$\bar{H}_i = \mathbf{H}_i - \mathbf{H}_{i-1} \quad (16)$$

O que, por fim permite estabelecer-se a representação do modelo truncado de resposta em degrau – equação (17).

$$\mathbf{y}(k) = \sum_{i=1}^n \mathbf{H}_i \Delta \mathbf{u}(k-i) \quad (17)$$

É necessário referir que todas as equações e deduções acima apresentadas foram expostas de acordo com [13].

Olhando agora ao algoritmo DMC, semelhante à equação (7) acima apresentada, o objetivo passa pela seleção das variáveis manipuladas, com vista a diminuir um problema de função quadrático (equação (18))

$$\begin{aligned} & \Delta \mathbf{u}(k) \dots \Delta \mathbf{u}(k+m-1) \sum_{\ell=1}^p \|\hat{\mathbf{y}}(k+\ell|k) - \mathbf{r}(k+\ell)\|_{\Gamma_\ell}^2 \\ & + \|\Delta \mathbf{u}(k+\ell-1)\|_{B_\ell}^2 \end{aligned} \quad (18)$$

Onde:

$\hat{\mathbf{y}}(k+\ell|k)$ – valor previsto de y no instante $k+\ell$ com base na informação do instante k

$\Delta \mathbf{u}(k+\ell)$ – diferença entre o instante de tempo $k+\ell$ e o anterior ($k+\ell-1$)

m – número de passos no futuro em que se encontram as variáveis manipuladas

p – horizonte de previsão

\mathbf{r} – *setpoint*

Γ_ℓ e B_ℓ – matrizes de importância ou peso

Contudo, de forma a resolver-se a equação acima apresentada é necessário obter-se o valor previsto no instante ($\hat{y}(k + \ell|k)$), pelo que é necessário resolver a equação (19) composta por três termos. O primeiro destes termos representa a parte dos movimentos presentes e futuros das variáveis de controlo, o segundo inclui apenas valores e estados passados das mesma variáveis, sendo totalmente conhecido no instante k . Por fim, o terceiro termo representa as perturbações previstas (\hat{d}) – equação (20)– e este termo é assumido como constante para todos os instantes futuros [13].

$$\hat{y}(k + \ell|k) = \sum_{i=1}^{\ell} H_i \Delta u(k + \ell - i) + \sum_{i=\ell+1}^n H_i \Delta u(k + \ell - i) + \hat{d}(k + \ell|k) \quad (19)$$

$$\hat{d}(k + \ell|k) = \hat{d}(k|k) = y_m(k) - \sum_{i=1}^n H_i \Delta u(k - i) \quad (20)$$

Onde:

$H_i, i = 1, \dots, n$ – parâmetro de instante da matriz de resposta

n – ordem de truncação

$y_m(k)$ – valor de y no instante de tempo k

$\hat{d}(k + \ell|k)$ – valor previsto das perturbações no output no instante $k + \ell$ com base na informação do instante k

Em suma, as equações (18) a (20) representam a metodologia DMC na sua essência, como um problema quadrático que é resolvido novamente a cada instante de tempo, tentando prever a resposta do sistema [13].

No que diz respeito ao modelo algorítmico de controlo (MAC), este diverge do DMC em três aspetos principais, sendo um deles o facto de o número de passos do input (m) não ser utilizado na afinação do controlador – $m = p$. Do mesmo modo, ao invés da resposta em degrau, usando Δu , é empregue uma resposta em impulso (u) sendo que no caso de existir uma penalização desse tipo de input no nosso objetivo quadrático, o controlador não retira o offset que nele existe. Ambos os métodos divergem ainda no que diz respeito às perturbações (\hat{d}) visto que num controlo MAC estas são filtradas, segundo a seguinte equação:

$$\begin{aligned}\widehat{d}(k + \ell | k) &= \alpha \widehat{d}(k + \ell - 1 | k) \\ &+ (1 - \alpha)(y_m(k) - \widehat{y}(k)) \\ \widehat{d}(k | k) &= 0, 0 \leq \alpha < 1\end{aligned}\tag{21}$$

A equação (21) adiciona ao sistema um filtro exponencial de primeira ordem, tendo ainda incorporado um parâmetro α ajustável na zona do *feedback*. Este parâmetro é um método de afinação mais conveniente e direto do que os comumente utilizados na formulação generalizada do MPC, sejam eles os pesos ou o tamanho do horizonte, uma vez que se encontra diretamente relacionado com a largura da banda, robustez e até mesmo a velocidade de reposta, em afetar a estabilidade nominal do sistema [13].

De modo a facilitar a comparação desta metodologia com as demais explicitadas torna-se imperativo considerar a situação em que o MPC se encontra num sistema sem *constraints* de modo a que se garanta uma avaliação correta. Neste caso particular, sem constrangimentos, as equações (18) a (20) podem ser mais facilmente simplificadas, passando a resolver-se um problema de método dos mínimos quadrados, passível de ser resolvido explicitamente.

Voltando a olhar o MPC como um método geral, mais concretamente a representação de modelo interno de controlo (Figura 22), pode afirmar-se que esta é atrativa pelo facto de, por exemplo, no caso de se considerar $P = \tilde{P}$ então haverá uma relação linear entre os *inputs* e as saídas do sistema.

Da mesma forma, a estrutura do controlador representada na Figura 22 pode ser assemelhada uma estrutura de um controlo clássico, na medida em que um par de entradas externas $\{r, d\}$ irá provocar uma variação nos sinais internos $\{u, y\}$ quando Q e C – controlador no caso do controlo clássico – se relacionam da seguinte forma:

$$Q = C(I + \tilde{P}C)^{-1}\tag{22}$$

$$C = Q(I - \tilde{P}Q)^{-1}\tag{23}$$

Mais ainda, um outro aspeto que torna o MPC numa proposta atrativa prende-se com o caso de P sendo estável, todo o sistema poder ser considerado internamente estável, caso se verifique C , presente na equação (23), é internamente estável também [13].

Contudo, tais factos também permitem estabelecer que um sistema MPC sem constrangimentos não é por si só melhor ou mais preciso, visto que, teoricamente, para cada controlo que aplique a metodologia MPC existe um controlador clássico equivalente, pelo que Q pode ser definido como uma maneira alternativa de se parametrizar o controlador clássico C , munindo o mesmo de mais capacidades e, em simultâneo, uma maior simplicidade uma vez que por norma as funções de transferência de Q são afim, por contraste com as funções não lineares em C . De igual modo, por vezes em controladores clássicos como é o caso dos que empregam a metodologia PID, nem sempre se consegue relacionar diretamente de que forma certos parâmetros afetam a performance do sistema, enquanto no caso do controlo MPC, do ponto de vista da atratividade, estas relações são mais fáceis de justificar [13].

É de ressaltar que a metodologia IMC dos controlos MPC apresenta uma limitação a nível do efeito dos valores de d e r afetarem o erro, através de uma única matriz de transferência, de acordo com a equação abaixo:

$$e = y - r = (I - PQ)(d - r) \quad (24)$$

Assim sendo, é possível inferir que no caso de d e r apresentarem dinâmicas díspares será impossível afinar o controlador simultaneamente para ter resistência às perturbações e um bom comportamento rumo ao *setpoint*. É com vista a minimizar esta menos-valia da formulação simples de um sistema IMC que surge o método IMC com dois graus de liberdade, ou seja, consiste na incorporação de um outro controlador Q – passando a haver uma distinção entre Q_1 e Q_2 – o que leva à representação matemática do sistema da seguinte forma [13]:

$$e = (I - \tilde{P}Q_1)d - (I - \tilde{P}Q_2)r \quad (25)$$

Através da análise da equação (25) é possível compreender que esta metodologia já permite uma afinação mais cuidadosa do controlador para uma boa resposta ao *setpoint* e às perturbações.

No que diz respeito à afinação dos controladores MPC, tendo em conta as equações (18)-(20), esta ação pode ser assemelhada à realizada com a otimização de problemas quadráticos lineares, onde se verifica a existência de uma vasta oferta de métodos, e bibliografia para os apoiar, sendo que se conhece as condições necessárias para uma afinação capaz de surtir um controlo de *feedback* estável. Contudo, a afinação do controlo MPC recorre

um pouco à metodologia de tentativa-erro tendo por base as condições suficientes representadas na equação (18), dado o seu horizonte finito [13].

Posto isto, apresentam-se de seguida os teoremas que guiam a afinação dos controladores que empregam a metodologia de modelo preditivo de controlo, onde o teorema 1 refere que no caso de $\Gamma_\ell \neq 0$ e $B_\ell = 0$, se se seleccionar $m = p \leq n$ obter-se-á o modelo inverso do controlo $Q(z) = z^{-1}P(z)^{-1}$, no entanto, esta lei apenas é estável no caso dos zeros de $P(z)$ se encontrarem dentro do círculo unitário e pode causar um pouco de mutabilidade no sinal de saída pelo que se traduz em resultados melhores quando o intervalo de *sampling* do controlador é significativo.

O segundo teorema diz que existe um $B^* > 0$ no qual $B_\ell \geq B^*$ garante uma lei de controlo estável, garantindo $m \geq 1, p \geq 1$ e $\Gamma_\ell > 0$. Este teorema traduz-se no facto de que é possível estabilizar o sistema através da variação da variável de penalização do controlo (B_ℓ) independentemente dos restantes parâmetros. Por fim, o terceiro teorema estabelece que assumindo $\Gamma_\ell = 1$ e $B_\ell = 0$ então para um valor de número de passos no futuro (m) suficientemente pequeno e para um valor suficientemente grande da relação $p > n + m - 1$ o sistema é possível de ser considerado estável, logo é pode-se inferir que o tamanho do horizonte de previsão (p) pode adquirir uma importância semelhante ao parâmetro de *input* B_ℓ .

É necessário referir que todas as condições acima apresentadas como guia à afinação deste tipo de controladores advêm de [13] e foram estabelecidas para sistemas de entrada única e saída única (SISO) com vista a facilitar a análise, uma vez que no caso dos sistemas MIMO as não linearidades teriam de ser impostas dificultando a exposição.

Aprofundando agora a metodologia IMC, é perceptível que esta foi criada de modo a que se colmatassem certas desvantagem da formulação sem constrangimentos permitindo uma afinação online ajustando parâmetros com influência física, a utilização de inputs diversos e garante ainda uma boa performance sem que ocorra *intersample rippling (ringing)* – oscilação das entradas e saídas entre pontos no tempo [22].

O procedimento de criação de um sistema de controlo IMC consiste em duas etapas distintas, sendo a primeira o estabelecimento de \hat{Q} com vista a que se obtenha uma boa respostas sem ter em conta a robustez do mesmo ou ainda os constrangimentos das variáveis em questão. Em seguida, define-se Q através da influência de um filtro F em \hat{Q} , onde $Q =$

$F\hat{Q}$, com o intuito de melhorar a robustez do controlo e diminuir a ação das variáveis manipuladas [13].

Por vezes, pode empregar-se um termo que penalize as variações no input ao invés do filtro F , contudo, o filtro apresenta parâmetros relação direta com a constante de tempo enquanto o termo penalizador tem um cariz mais artificial e acrescenta complexidade uma vez que necessita de ser afinado utilizando uma metodologia de tentativa-erro, o que leva à necessidade de computar qualquer alteração ao peso da penalização.

Comparando agora as metodologias até ao momento explicitadas – IMC, DMC e MAC – pode inferir-se que a estrutura de construção é partilhada por todas, sendo uma estrutura bastante vantajosa visto que um controlador MPC estável implica um sistema *closed-loop* igualmente estável. Posto isto, a vantagem dos métodos que utilizam uma formulação sem constrangimentos passa pela sua maior facilidade, face a técnicas lineares quadráticas, de ser aplicada a casos com a necessidade de gerar controladores capazes de variações não lineares no tempo em sistemas lineares com constrangimentos. Por sua vez, no caso do modelo interno de controlo este reduz o número de parâmetros ajustáveis face às demais metodologias, expandindo ainda a função do filtro aplicado em MAC. Isto faz com que para um modelos de baixa ordem se possa obter através deste método um controlo PID com apenas um parâmetro de ajuste, sendo ainda que permite acomodar *inputs* para além da forma de degrau [13].

Contudo, na maioria das situações reais o sistema encontra-se sujeito a constrangimentos que são impossíveis de negligenciar sem que se comprometa a viabilidade do sistema de controlo. Dessa forma, torna-se imperativo, para o contexto da dissertação em questão, expor a teoria que envolve o desenvolvimento de um controlo MPC capaz de reagir aos constrangimento inerentes ao sistema, sendo essa a base da maior parte das aplicações na área do AVAC.

De facto, a existência da metodologia MPC capaz de incorporar os constrangimentos do sistema na sua formulação apresenta uma maior aplicabilidade, mas ao mesmo tempo, logicamente, apresenta maior complexidade. A sua estrutura é semelhante à anteriormente descrita para o caso sem constrangimentos, sendo passível considerar se $P = \tilde{P}$ e que o sistema é internamente estável se P e Q o forem também, sendo tal transposto para o contexto não linear ou mesmo no caso de se verificar condicionamentos à saturação dos *inputs* de P , desde que essas entradas, ainda que constrangidas, sejam de igual forma

introduzidos em \tilde{P} – sempre em busca da preservação de $P = \tilde{P}$ [13]. Convém, ainda, reforçar que a saturação da entrada não causa problemas de estabilidade nesta tipologia de sistemas, por contraste extremo com os sistemas de controlo clássicos que reagem adversamente com esse acontecimento.

No entanto, fruto das simplificações feitas de modo a obter-se um sistema desconstrangido, o controlador Q nele contido apresenta uma certa incapacidade para lidar com a saturação do *input* o que afeta a sua performance, logo, o sistema, e por conseguinte Q , beneficia da incorporação dos constrangimentos aquando da sua fase de *design* ao invés de lidar com os mesmos à posteriori.

Falando agora da robustez que é característica destes métodos de controlo, isto é, a capacidade que estes apresentam para manter um bom controlo do sistema mesmo quando o funcionamento deste diverge um pouco do modelo assumido. Tal como foi referido ao longo do presente subcapítulo, na sua forma mais simples e linear os MPC sem constrangimentos tendem a ser aproximados a controlos clássicos de feedback pelo que se podem aplicar formas de analisar, caracterizar e melhorar a robustez semelhantes a estes, tais como as que foram descritas ao longo do presente trabalho. Igualmente, não existem conclusões de cariz científico que permitam afirmar que a metodologia de controlo MPC apresenta mais ou menos robustez face às demais.

Porém, pode-se afirmar que no caso dos modelos preditivos de controlo, o ajuste da robustez é significativamente mais simples do que nos casos mais clássicos, podendo tal ser explicado pelo maneira como são explicitados certos parâmetros ou até mesmo a utilização de filtros no caso da formulação MAC ou IMC, que apresentam uma influencia muito direta na afinação da robustez.

Após uma extensiva explicação teórica de toda a envolvente do método de controlo MPC torna-se relevante olhar a aplicações práticas do mesmo, por forma de se comparar e verificar a aplicabilidade de certos pressupostos. Mais ainda, a apresentação do estado da arte, no contexto da presente dissertação, é de elevada importância para uma posterior decisão sobre a metodologia a adotar numa possível solução, como se prevê realizar no capítulo 5.

No caso de [21] a metodologia MPC foi empreguem com o intuito de controlar as condições interiores de um edifício tendo por base a sua ocupação sempre com o objetivo de aumentar a eficiência energética do sistema. De facto, os autores consideram que este

método de controlo pode ser uma grande mais-valia no que diz respeito ao controlo em busca da eficiência nos sistemas AVAC uma vez que permitem a utilização de bases de dados das condições meteorológicas, ocupação típica do edifício ou até mesmo as flutuações do preço da energia, culminando na criação de uma função objetivo tal como explicado na exposição teórica do método.

Neste caso em particular, ao desenhar-se o modelo e o controlador com vista a obter-se a função objetivo para otimizar a climatização do edifício é necessário considerar-se a energia total consumida no mesmo, custos de operação, eficiência geral, emissões de gases de efeito de estufa, inércia térmica do edifício, *setpoint* da temperatura, entre outros. Mais ainda, uma das grandes vantagens do modelo preditivo de controlo é que, face à existência de pesos para a importância de cada uma das variáveis, pode-se alterar o indicador com maior influência para cada situação, seja temperatura dentro do edifício ou, indo de encontro ao tema desta dissertação, a concentração de CO₂ dentro deste.

Por sua vez, o problema real apresenta uma série de constrangimentos, um deles encontra-se ao nível da temperatura de conforto térmico, isto é, temperatura limite que permite que os ocupantes se sintam confortáveis dentro do edifício – que varia consoante as estações, períodos do dia e, obviamente, de pessoa para pessoa. Existem várias maneiras de introduzir essa condicionante no modelo, sendo que os autores de diversos estudos apontam um método que tem um valor médio como base, PMV do inglês *predicted mean value* para previsão do voto médio, como bastante vantajoso, por possibilitar uma diminuição da complexidade da otimização do problema [23]. Algumas das outras limitações neste caso particular, que por sinal serão comuns a outros sistemas, passam por limites a nível de atuação e a níveis físicos, que se podem representar por limites de caudal dos ventiladores, limites de transferência de calor nos permutadores ou até mesmo na própria potência térmica instalada.

Dado a complexidade que um edifício inteiro pode representar, sugere-se a descentralização do MPC, originando vários segmentos mais pequenos de um sistema geral, sendo comumente empregue uma programação quadrática sequencial para a resolução do problema. Nesta situação, cada parcela individual tem acesso ao valor médio das zonas que lhe são vizinhas, sendo assim gerada uma rede descentralizada de MPC – assemelhando-se a uma rede neuronal – que consegue reduzir ao poder de computação necessário sem prejudicar a qualidade da solução.

Com o aumento de complexidade do sistema, a representação esquemática do controlo assume algo igualmente complexo como se pode ver na figura:

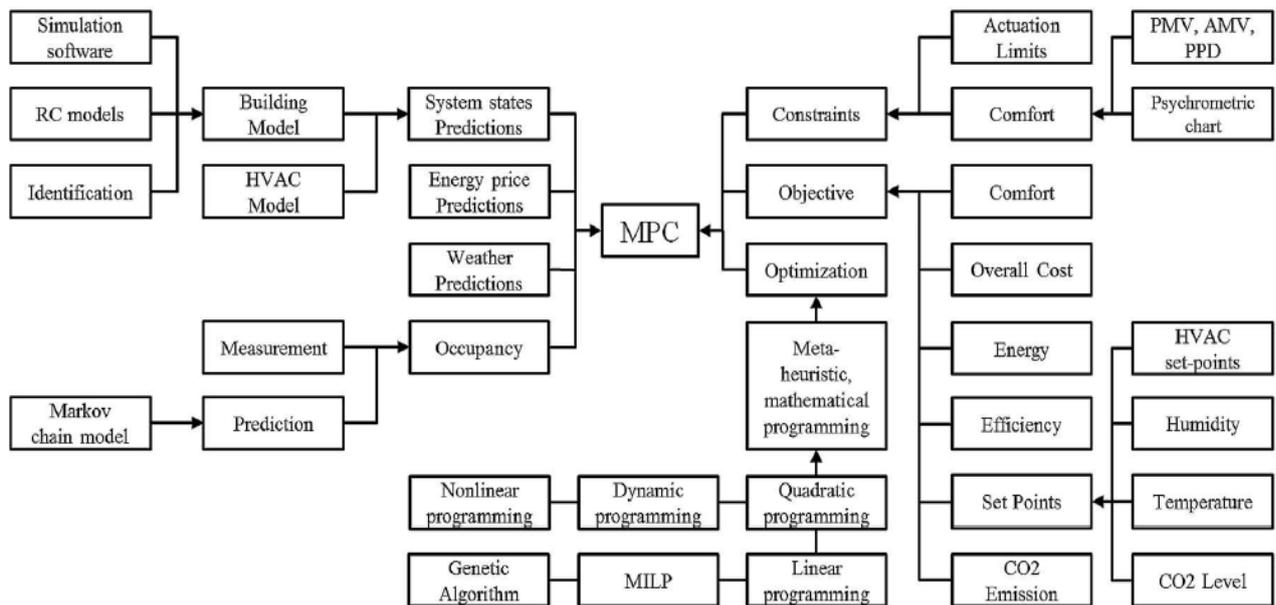


Figura 23 - Esquema da composição do controlador MPC de [21].

Wang e Xiao [24], empregam um sistema que utilizava um controlo desta tipologia, usando o número de ocupantes como variável de controlo, para minimizar o consumo energético, mas mantendo a qualidade do ar e o conforto térmico como objetivo. Deste modo, verificou-se uma redução dos gastos de energia na ordem dos 12%, sendo o MPC responsável por garantir que os ocupantes não sentiam diferenças de temperaturas entre as zonas do edifício, prevendo a movimentação dos mesmo.

Mais ainda, um outro estudo testou as diferenças entre quatro métodos de controlo de um sistema AVAC: controlo de base com e sem medição da ocupação do edifício, controlo de otimização com medições da ocupação e por fim MPC com interferência do número de ocupantes também. Os resultados demonstraram que esta última solução foi a que se revelou mais capaz de surtir poupanças a nível de consumo energético e a que mais conseguiu garantir o conforto térmico das pessoas [25].

Como é possível de perceber, por vezes o conforto térmico dos ocupantes pode ser um entrave à ventilação pois limita a mesma na vertente que tem em conta as recomendações ou até mesmo as medições da concentração de CO_2 no espaço. Nestes cenários é necessário inferir-se de que forma uma destas variáveis tem mais peso do que as outras, indo de encontro

aos parâmetros que caracterizam a versatilidade do MPC. Uma das possibilidades para acomodar estas duas características do espaço passa pela implementação de um mecanismo que consiga calcular a probabilidade de o espaço ser ocupado, este tipo de formulação tem o nome de sequência de *Markov*. Assim sendo, a associação deste tipo de sequências à metodologia de controlo preditivo permite a incorporação do valor médio de probabilidade de ocupação de um espaço como o erro do *setpoint*, resultando assim num controlo capaz de apresentar poupanças energéticas na ordem dos 15% no verão e 9% no inverno, face a um controlo mais clássico com a ocupação base agendada [26].

Por sua vez, uma aplicação do método de controlo preditivo com a adição de uma base de aprendizagem, isto é, os dados passados vão treinando o sistema para que este consiga prever possíveis acontecimentos futuros, sendo que a instalação foi realizada numa bomba de calor simples. O modelo pretendia prever a geração de calor no espaço tendo em conta o espaço em si, a influência do ar condicionado e a temperatura no mesmo. O controlo surtiu uma diminuição no consumo de energia superior a 30% face a um controlador *ON-OFF* [27].

Por fim, um ensaio de 10 e 51 dias foi realizado em dois edifícios de cariz comercial, tendo produzido resultados bastante positivos de poupança energética de 32% e 19%, respetivamente. Neste estudo, o modelo teve como informação fornecida as previsões meteorológicas do local e ainda os preços da energia, sendo o objetivo a diminuição das emissões de CO₂ geradas pelos sistemas de climatização, dos custos operacionais dos mesmos e ainda do desconforto dos visitantes. É de referir que os modelos eram afinados a cada 24 horas com base na informação proveniente dos sensores no local e dos questionários realizados aos ocupantes sobre a perceção pessoal das condições do espaço – conforto térmico e qualidade do ar interior, essencialmente [21], [28].

Contudo, todos os sistemas, por mais vantajosos e eficientes que sejam, apresentam as suas desvantagens e no caso dos MPC essas revelaram-se sobre a forma de um aumento significativo da complexidade dos modelos e do poder computacional requerido aquando do aumento da informação proveniente ou fornecida ao controlador, *i.e.* no caso de se considerar a ocupação, ou ainda o facto de no momento atual, fruto do ceticismo, não existirem muitos casos práticos de aplicações que permitam corroborar os estudos realizados e as suposições teóricas do benefícios deste método de controlo.

Em suma, a metodologia de controlo preditivo demonstra ser uma alternativa aos métodos tradicionais capaz de se traduzir em grandes resultados não só ao nível do controlo,

mas também a nível das potenciais poupanças que poderão advir desse controlo. Tal como foi explicitado, uma previsão efetiva da ocupação resulta num maior conforto dos utilizadores do espaço e ainda ajuda na poupança energética dos mesmos, munindo os sistemas AVAC de uma capacidade de serem mais eficazes e obterem performances melhores. Fundamentalmente, se se comparar um controlo baseado em regras e um MPC, este último conseguirá, em média, mais 10% de poupança, sendo que este valor pode acrescer aos 30% no caso de se incorporar a previsão da ocupação do local. Tais características resultam num maior investimento na investigação da aplicabilidade destes sistemas e colocam os mesmos numa posição de relevo no contexto da tese em causa.

3.4. FUZZY LOGIC

A retórica da transição e poupança energética, aliada à busca incessante por métodos de controlo mais diversificados e polivalentes, continua a mover o estudo e desenvolvimento de tipologias e controladores que permitam os sistemas e o equipamentos neles inseridos alcançar patamares de eficiência superiores. Foi neste contexto que surgiu a metodologia *Fuzzy Logic* sendo esta uma tentativa de criar um distanciamento dos métodos de controlo do panorama matemático, procurando uma aproximação ao estilo de raciocínio humano.

De facto, a lógica *fuzzy* foi apresentada como uma disrupção da dependência dos modelos matemáticos tentando que o controlo fosse feito à semelhança do que um operador faria se tivesse de controlar pessoalmente o sistema, tentando emular o pensamento e resposta do mesmo de uma forma automatizada. O controlo FL caracteriza-se pela utilização de dados que em outros sistemas são classificados como valores únicos de 0 ou 1 (ou totalmente falso ou totalmente verdadeiro) e traduz os mesmo num espectro bastante mais vasto onde qualquer uma das variáveis pode adquirir qualquer valor do intervalo [0,1].

Realmente, esta possibilidade de classificar o valor como uma percentagem de um valor, e não apenas tudo ou nada, revela-se bastante importante pois permite modular o sistema segundo um conjunto de regras do estilo “*if-then*” tendo por base diversos grupos de classificação das variáveis. As regras que regem o funcionamento do controlador FL são estabelecidas de acordo com o conhecimento real do processo e o comportamento pretendido, contudo, isso exige um conhecimento elevado do sistema e dos processos

estando a eficácia do controlo sempre sujeito ao nível de especialização da pessoa responsável pela definição das regras.

O método de controlo *Fuzzy Logic* caracteriza-se por três partes distintas, como representado pelo retângulo verde na Figura 24, são elas:

- Fuzzificação;
- Motor de interferência;
- Desfuzzificação;

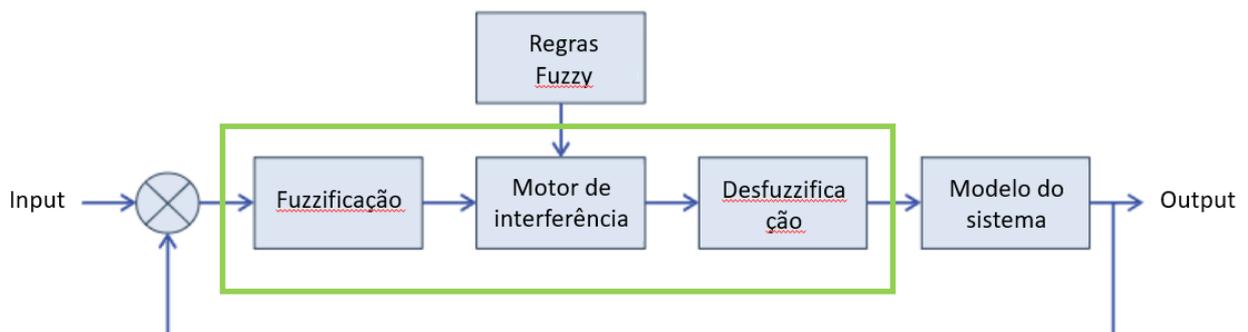


Figura 24 - Esquema de um controlador *Fuzzy Logic*, retirado e adaptado de [29].

Inicialmente, é necessário proceder-se à conversão do valor real das variáveis em valores que o controlador *fuzzy* seja capaz de processar, a este procedimento chama-se de “fuzzificação” – do inglês *fuzzifier*. Este procedimento caracteriza-se pela conversão dos valores de input definidos em valores em linguagem *fuzzy* através do mecanismo que relaciona os mesmos. Para tal torna-se necessário definir as funções de pertença, comumente descritas na literatura pelo sua nomenclatura inglesa *Membership functions* (MFs), que são nada mais nada menos do que uma série de funções que permitem classificar o input como pertencente a certos grupos lógicos, balizando assim as características dos mesmo e facilitando a decisão, semelhante ao processo realizado inconscientemente pelo operador. Convém ainda referir que as funções de pertença são algo uma tentativa de representação palpável de parâmetros outrora abstratos e variam não só em número, mas também em formulação de sistema para sistema ou até mesmo de programador para programador, isto é, um mesmo problema poderá originar funções de pertença distintas dependendo da pessoa responsável pela avaliação dos processos e das variáveis em estudo [30].

Por exemplo, no caso de se pretender controlar a temperatura de uma sala é possível definir-se as funções de pertinência, representadas na Figura 25, como muito baixa (mb), baixa (b), aceitável (ac), alta (a), muito alta (ma), sendo que é de fácil compreensão que o nome que lhes é atribuído está associado à sensação térmica dentro do espaço, neste caso a forma linguística como a pessoa o descreveria, sendo ainda que uma dado input pode pertencer em 60% a uma destas funções e os restantes 40% a uma das funções vizinhas [6].

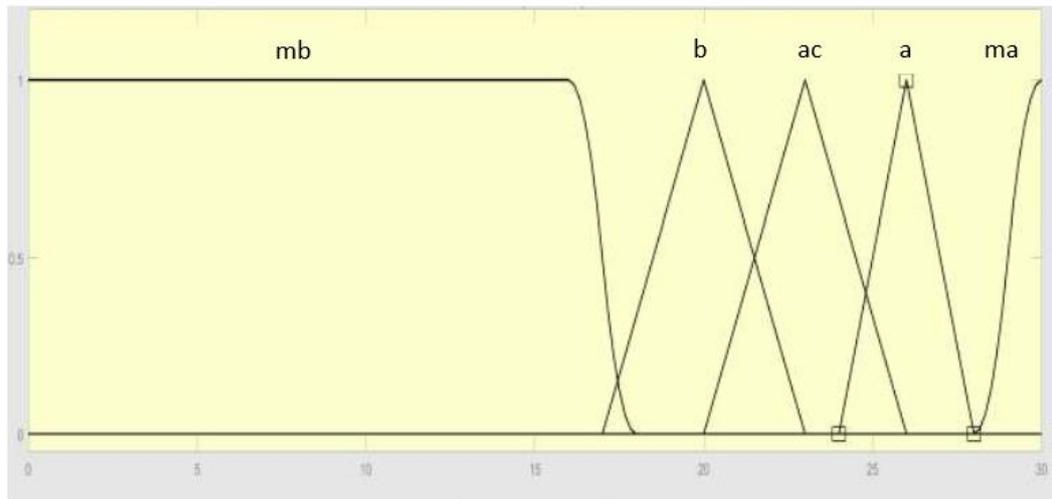


Figura 25 - representação ilustrativa das funções de pertinência, retirado e adaptado de [30].

Por sua vez, a segunda etapa deste método de controlo denomina-se de motor de inferência e é a etapa responsável pela tomada de decisão do sistema uma vez que, tal como o nome sugere, permite inferir sobre o estado presente do sistema e sobre o comando a dar para que se vá de encontro ao *setpoint*. Este processo é fortemente apoiado nas regras definidas para o sistema, que tal como referido anteriormente são normalmente definidas por alguém com um conhecimento profundo do processo, pelo que a sua correta definição é impreterível para a precisão do controlo. No motor de inferência trata-se a informação proveniente do módulo anterior, ou seja, de que forma os inputs se enquadram nas funções de pertinência, combinando-se esta com as regras estabelecidas de forma que se possa derivar o output de controlo. Como referido anteriormente, as regras são do tipo “*if-then*”, ou seja, é estabelecida uma relação de causa-efeito onde a regra diz que se o valor do input proveniente corresponde a uma regra, então a ação será a previamente definida. Isto faz com que, na sua essência, o motor de inferência estabelece a informação necessária para se fazer correspondência da linguagem nos processos que o antecedem e procedem.

De seguida, passa-se para o módulo de “desfuzzificação” onde se realiza o processo inverso ao da primeira fase do método de controlo, isto é, a informação de comando proveniente do motor de inferência encontra-se em linguagem *fuzzy* e existe a necessidade de converter a mesma para valores ditos comuns de serem lidos pelos sistemas, terminado assim o processo, o output é reintroduzido no sistema de forma a surtir as alterações pretendidas de acordo com o conjunto de regras [30].

A metodologia FL pode ser expressa segundo várias tipologias características, no contexto da presente dissertação será explicitada a diferença de apenas duas destas a título de exemplo, sendo elas: o controlo FL segundo a base *Mamdani* e segundo a base *Takagi-Sugeno*. A principal diferença entres estas duas lógicas prende-se com o modo como se permite escrever o *output*, isto é, no caso da base *Mamdani* é possível obter-se uma saída segundo as funções de pertença, enquanto no caso da segunda não existem funções de inferência no *output*.

A grande característica que define o método de controlo FL é o facto de este não necessitar de qualquer tipo de sistema, modelo ou até mesmo uma simples equação matemática para ser definido, contudo, é possível traduzir algumas das suas particulares sobre a forma de relações matemáticas para que se melhor compreenda as suas implicações. Desta forma, e tomando o processo de deteção de falha como base, pode definir-se os valores numéricos de input como $A = \{A_1, A_2, \dots, A_N\}$, sendo que na fase de fuzzificação se transformam em valores representados pela sua forma linguística segundo $L(A_k) = \{L_1^k, L_2^k, \dots, L_{S_k}^k\}$. Por sua vez, as falhas (F) no sistema, que funcionam como pontos de comparação no motor de inferência e não falhas ditas reais no sistema, são matematicamente representadas por $F = \{F_1, F_2, \dots, F_M\}$ e são classificadas segundo o conjunto de regras definidas para o sistema, $R = \{r_1, r_2, \dots, r_i\}$, onde a regra de ordem i pode ser escrita na sua forma geral como: “SE (A_1 é $L_{j_1}^1$) E (a_k é $L_{j_k}^k$); ENTÃO (falha é F_a)” [29].

Olhando agora para a deteção de falhas, no sentido literal da palavra, num sistema que empregue a metodologia *Fuzzy Logic* no seu controlo, este processo pode ser realizado de diversas formas e tendo muito critérios distintos como referência. No caso particular de [31] foi empregue como critério de deteção de falha a média absoluta do erro entre o valor medido no sensor e o valor previsto, sendo que os valores eram obtidos através do BEMS – do inglês para o sistema de gestão da energia do edifício. Os resultados demonstraram que a performance deste tipo de sistema podia ser grandemente melhorada diminuindo

perturbações externas, sendo ainda que na maior parte das vezes até se falhou na deteção da falha devido à baixa qualidade dos dados previstos.

Uma outra forma de se implementar um sistema que incorpore a deteção de falhas com base FL passou pelo uso de um conjunto de modelos *fuzzy* em funcionamento normal e em falha, sendo essa informação recolhida para ser usada posteriormente como termo comparativo. De facto, foi empregue um sistema *fuzzy* que fazia a comparação dos valores medidos nos sensores com os previamente estudados de forma a perceber que rumo o modelo estava a tomar, sendo ainda que o modelo *fuzzy* era comparado com outros de referência para tentar eliminar a incerteza em certos valores dúbios. Este método era complexo e exigente a nível computacional o que restringe em parte a sua aplicação, contudo, revelou-se capaz de identificar com prontidão as falhas na zona das baterias de frio de uma UTA.

Ainda que a utilização dos controladores PID seja feita em grande escala, cerca de 95% das operações em automação de sistemas de *closed-loop* segundo [30], pelas várias vantagens que este controlo apresenta, tal como falado em 3.2, e pelo seu reduzido custo. Porém, é possível de se afirmar que este método tem uma grande dependência na tradução do sistema para relações matemáticas e a sua eficácia esta diretamente relacionada com os parâmetros de ganho. Mais ainda, foi feito um estudo sobre a aplicação de um controlo *fuzzy* com base *Sugeno* num sistema de ventilação com permutador de calor (denominado de unidade *fan-coil*) e os resultados demonstraram que este tipo de sistema surtia numa diminuição considerável do tempo de estabilização da resposta, superior a 50% do tempo [32].

Foi com vista a colmatar estas adversidades que se foi estabelecendo a metodologia *Fuzzy-PID* como uma alternativa viável e capaz de oferecer as vantagens de ambos os métodos ou, mais concretamente, utilizando as capacidades do método FL, uma vez que este é mais robusto e eficiente a nível energético, para garantir um funcionamento ótimo da parte de controlo PID.

O controlador *Fuzzy-PID* caracteriza-se pela utilização da lógica de decisão do controlo FL, e o facto de este estar baseado no conhecimento intrínseco do processo, para a obtenção dos parâmetros de ganho ideais do controlador PID. Assim, foram vários os métodos aplicados para que se produzisse o resultado pretendido, um sistema capaz de afinar a parte PID do controlo de forma automática, sendo um deles a criação de um controlo PI, não incluía a capacidade derivativa, com auto-afinação *fuzzy* para o controlo da pressão do ar de insuflação

por parte de um sistema AVAC. Neste caso, aplicou-se o modelo fuzzy com base na variação do erro e no erro das variáveis de controlo, tendo estas regras sido posteriormente utilizadas para ajustar o fator de aumento escalar (*scaling factor*) do output, o que resultou num método que prestava uma performance a nível de controlo superior ao PID clássico ou até mesmo a um sistema *fuzzy* adaptativo [29]. Ainda assim, é de referir que o método FL-PID, tal como qualquer método de controlo, apresenta algumas desvantagens como é o facto revelar uma resposta transiente fraca.

A título de curiosidade, olhe-se agora a alguns exemplos de aplicações de controlos da metodologia *Fuzzy Logic*. Em [33] é descrita aplicação de um controlo *fuzzy* para o controlo da temperatura e da humidade relativa num sistema de ar-condicionado de zona única, através da atuação do compressor, do motor e do permutador de calor. Foram ainda definidas 5 funções de pertinência, iguais, para ambas as variáveis de controlo, a partir das quais se formularam tabelas de dupla entrada onde se estabelecia a relação entre elas, permitindo assim mapear o controlo sobre os três sistemas a ser atuados. Os testes ao sistema revelaram que a aplicação do método foi bem-sucedida uma vez que foi capaz de manter os *setpoints* pretendidos com bastante precisão, tendo ainda conseguido diminuir-se o tempo necessário para o sistema estabilizar e consumo energético do mesmo.

Concluindo, o método de controlo *Fuzzy Logic* apresenta-se como uma alternativa de bastante interesse face aos demais previamente expostos pela sua distanciação da necessidade de modelos exatos ou de relações matemáticas de complexa resolução, podendo ser apenas apoiado no vasto conhecimento prático já existente. Contudo, não existem muitos estudos que descrevam a aplicação destes controladores em sistemas cuja variável de controlo é a concentração de CO₂, o que, no caso da dissertação em causa, pode ser visto como uma sinal de alarme visto não haver uma fonte científica que apoie o estudo, mas também pode ser interpretado como um fator positivo visto que permite o desenvolvimento de inovação.

4. DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO

Dado por concluído o estudo do estado da arte, estão reunidas as condições necessárias para que se proceda à exposição do caso de estudo sobre o qual se debruça a presente dissertação. Foi definido como local a estudar as mais recentes instalações da Vieira & Lopes uma vez que facilitaria o acesso a informação, fornecida pela equipa responsável pela gestão das mesmas.

Tal como referido anteriormente o espaço em questão representa um edifício que se pode considerar subdividido em duas partes: uma de escritórios e outra de chão de fábrica, onde se desenvolve toda a produção, sendo esta a que apresenta um maior número de ocupantes (aproximadamente 40 pessoas), como se verá em seguida.

Ao longo do presente capítulo serão explicitadas todas as condicionantes do caso de estudo desde as variáveis em estudo, isto é, quais os parâmetros do edifício que serão tidas como forma de controlo, passando pela descrição detalhada do espaço e terminando-se esta fase com uma recolha de dados referentes ao edifício, que permitiriam a incorporação de um controlo semelhante aos descritos no capítulo 3.

4.1. ESPAÇO DE ESTUDO

O caso de estudo aqui tratado refere-se às novas instalações da sede da empresa Vieira & Lopes, situadas na Vila de Prado, concelho de Vila Verde do distrito de Braga. O edifício foi construído totalmente de novo, tendo uma área de implantação de 4088 m², encontrando-se representada uma vista aérea do mesmo, circundado a amarelo, na Figura 26.



Figura 26 - Vista aérea do espaço em estudo.

No que diz respeito à localização do edifício, este encontra-se situado a cerca de 2 km do rio Cávado e cerca de 38 metros de altitude. Mais ainda, no que diz respeito às zonas climáticas no qual o edifício se insere, é possível constatar-se que, tendo em conta a altitude de referência de 171 metros para a NUTS III do Cávado na qual se insere Vila Verde, o edifício se encontra situado na zona climática de inverno I2.

$$GD = GD_{ref} + \alpha \times (z - z_{ref}) = 1318,1 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (26)$$

Onde:

GD – graus dia

GD_{ref} – graus dia de referência

α – declive que relaciona a diferença de altitudes

Z – altitude

Z_{ref} – altitude de referência

Convém mencionar que todas os valores de referência necessários na equação (26) foram obtidos segundo os valores presentes na Portaria nº 138-I/2021, publicada em Diário de República no dia 1 de julho de 2021, que se encontram representados, bem como todo o processo de cálculo, no Anexo B.

Por sua vez, a nível da zona climática de verão o edifício pode ser considerado como localizado numa zona V2, uma vez que apresenta um valor de temperatura média exterior ($\theta_{ext,v}$) igual a 21,1 °C, obtido através de:

$$\theta_{ext,v} = \theta_{ref} + a \times (z - z_{ref}) = 21,1 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (27)$$

O estabelecimento de tais parâmetros é imperativo em situações de dimensionamento e decisões construtivas, contudo, permite de igual forma estabelecer alguns fatores, a nível de temperatura e necessidades de climatização, que possibilitam o estabelecimento de linhas de guia para o estudo.

Olhando agora para o edifício em si, este é composto por duas frações distintas, tal como referido anteriormente, sendo uma destinada ao dito chão de fábrica onde se processa a parte produtiva de toda a atividade referente à Vieira & Lopes, e a outra fração é ocupada pela zona de escritórios que se encontra dividida e distribuída pela diversas áreas de ação desde os recursos humanos, a gestão e administração, engenharia do produto e o departamento de *solutions*, conforme apresentado na Figura 28 e Figura 29. O trabalho desenvolvido foi feito sobre a parte administrativa deste edifício. Esta parte do edifício referente aos escritórios apresenta um total de 3 pisos, dois deles com atividades diversas e um outro (-1, neste caso) é uma zona técnica, onde se encontram vários equipamentos do sistema de climatização referentes ao sistema de geotermia instalada no edifício. Assim sendo, esta fração onde se encontram os escritórios pode ser considerada uma fração de comércio e serviços, sobre a qual se aplica a legislação vigente, e em parte, explicitada no subcapítulo 2.1.2, sendo a outra considerada uma fração de indústria.



Figura 27 - Planta das instalações, dividida por frações.

Como se pode observar na Figura 27, a fração afeta à zona industrial encontra-se delimitada a amarelo e esta representa uma área de pavimento útil na ordem de 3150 m², sendo que a disposição deste é a de um *open-space*, ou seja, uma planta totalmente plana e aberta, sem qualquer divisória física entre os espaços, com a exceção da cabine de pintura que é fechada, sendo que também não apresenta outros pisos, o que resulta num pé direito que acompanha a totalidade do edifício de 6,7 metros.

Por sua vez, a fração referente aos escritórios (delimitada a vermelho) e, por conseguinte, classificada como uma zona de comércio e serviços, apresenta uma área de pavimento útil consideravelmente inferior na ordem dos 1250 m². Como referido, esta apresenta três andares cada um deles com um pé direito de 3 metros, excetuando a zona referente ao *hall* de entrada onde se situa a receção que acompanha os dois pisos térreos, sendo o último primeiro destes subterrâneo e totalmente ocupado por uma zona técnica referente ao sistema de climatização do edifício, razão pela qual não foi considerado uma vez que é uma espaço não útil à luz da lei.

Na Figura 28 encontra-se representada a planta do piso rés do chão da fração de comércio e serviços, nesta encontram-se identificadas as diversas áreas, bem como a sua função ou atividade nelas desempenhada.

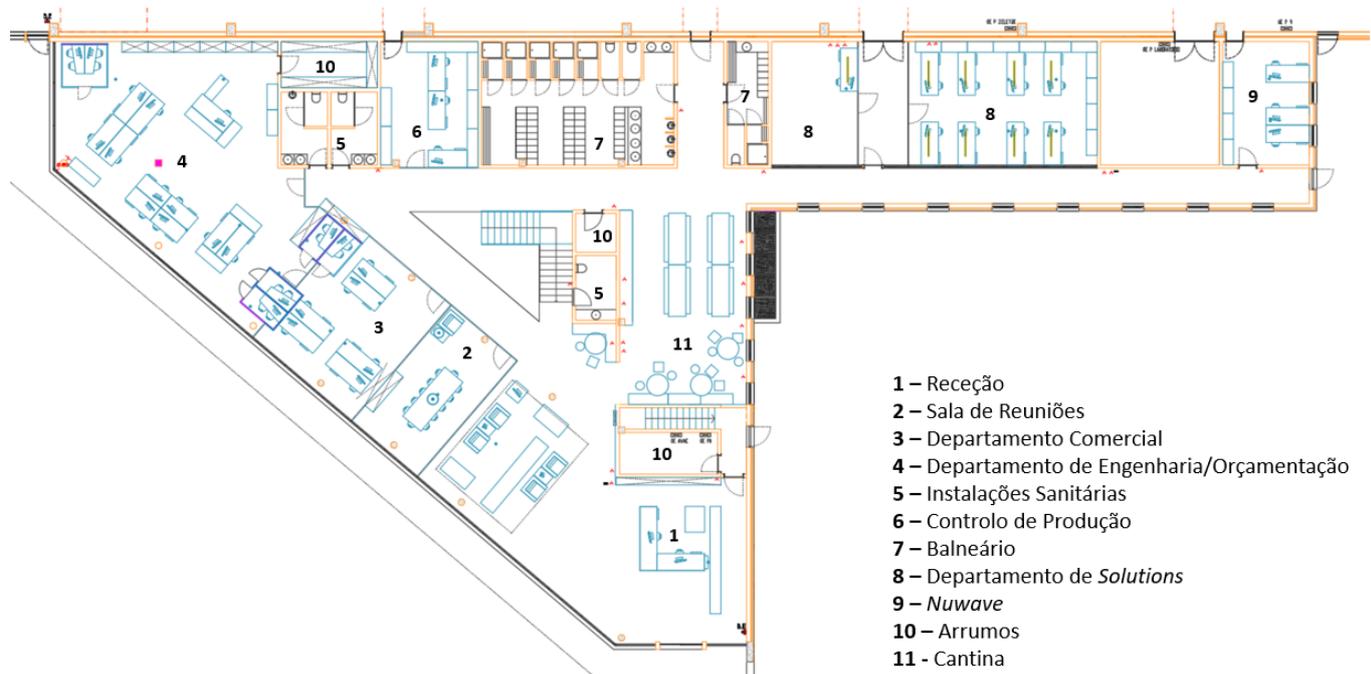


Figura 28 - Planta do rés do chão da fracção de serviços.

Deste modo, é possível observar que no contexto do piso representado na Figura 28 existem espaços afetos a diferentes tipos de atividades, requerendo tipologias e caudais de ar novo distintos. De facto, no que diz respeito a zonas de atividades é possível estabelecer, com clareza, pelo menos três: zonas de escritório representadas (representada pelos números 1,2,3,4,6,8 e 9), zona de refeição neste caso representada pela cantina e, por fim, as zonas de balneários e instalações sanitárias – números 7 e 5, respetivamente. Nestas situações é necessário ter em consideração que são aplicadas exigências de ventilação distintas, sendo até no caso dos balneários e instalações sanitárias requerido apenas a exaustão de ar, pelo que isso deverá ser considerado aquando da instalação e controlo do sistema AVAC.

No que diz respeito ao segundo piso da fracção de comercio e serviços, esta é de dimensões semelhantes à do piso que a antecede e apresenta apenas duas tipologias de utilização senda estas escritórios ou instalações sanitárias, como se pode observar na Figura 29. É de referir ainda a existência de uma sala de formações neste piso, contudo, esta raramente é utilizada.

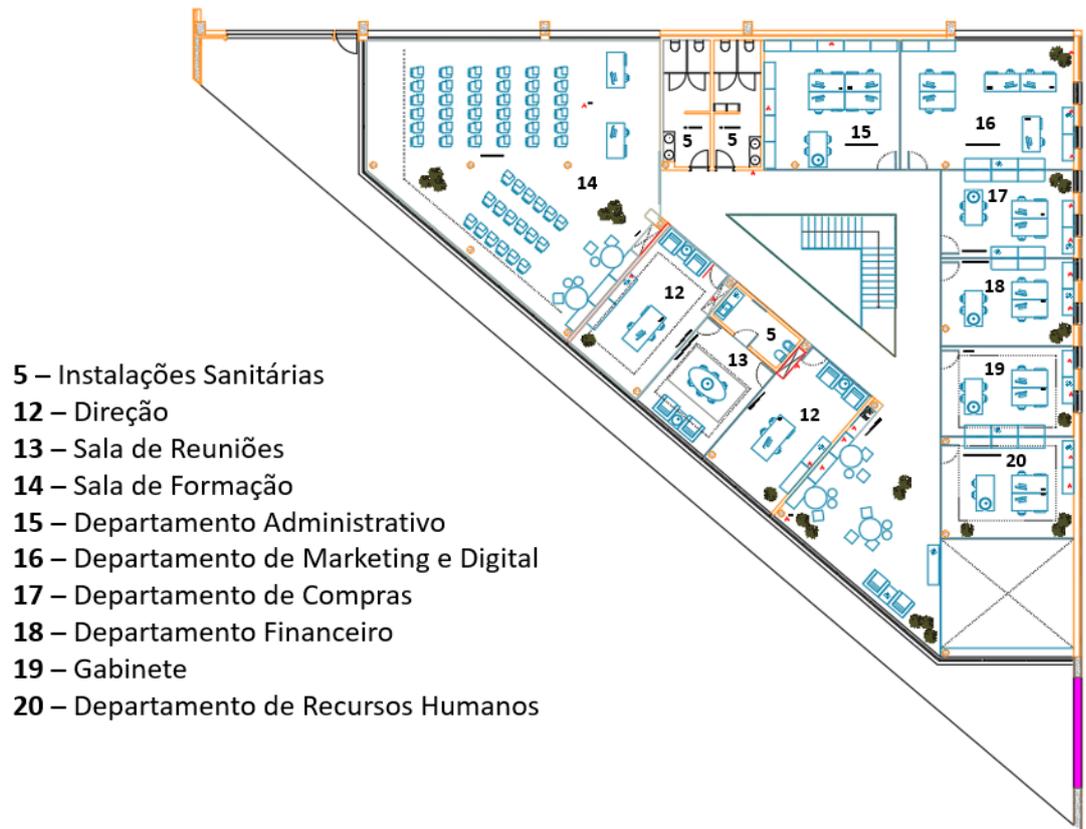


Figura 29 - Planta do 1º piso da fração de serviços.

Como se pode ver este piso é maioritariamente composto por escritórios e uma sala de formação com uma área considerável, pelo que a ventilação poderá ser assegurada por uma UTA única de caudal constante uma vez que a ocupação nestes espaços é constante ao longo do tempo e a atividade realizada neles requer caudais mínimos de ventilação iguais. É de ressaltar que fruto do contexto da presente dissertação, e ainda do interesse em futuras aplicações a contextos comerciais, apenas a fração afeta aos escritórios está a ser considerada, fruto da sua classificação como fração de comércio e serviços e das subsequentes regras e condicionantes a que fica sujeita.



Figura 30 - Representação gráfica do perfil de ocupação do edifício.

A Figura 30 demonstra o perfil de ocupação do edifício da Vieira e Lopes, sendo possível identificar períodos claros de ocupação, entre as 8 horas e as 12-13 horas a partir das quais se realiza a pausa para almoço, retomando-se a atividade e, por conseguinte, a ocupação para o período da tarde a partir das 14 horas e até as 18 horas, hora a partir da qual a empresa encerra e a ocupação passa a ser nula. A ocupação será estudada mais atentamente e relacionada com variáveis de estudo posteriormente.

Na Tabela 7 e Tabela 8 encontra-se exposto os níveis mínimos de caudal de ar novo a garantir em cada uma das divisões do piso 0 e piso 1, respetivamente. Estes valores foram obtidos tendo em conta a atividade realizada em cada espaço, bem como a comparação da mesma com a legislação vigente. É necessário referir que para o caso particular das instalações sanitárias e dos balneários este valor é calculado em função da área de pavimento, sendo que no caso das primeiras é necessário garantir um caudal mínimo de extração de ar (Tabela 6), sendo nos demais espaços o parâmetro importante a ocupação.

Tabela 6 - Valores de caudal de extração mínimo a garantir nas instalações sanitárias de acordo com a Portaria nº 138-I/2021

Espaço	Caudal Mínimo de Exaustão	Área
Instalações Sanitárias	70 [m ³ /h]	7 m ²

Tabela 7 - Valores de caudal de ar novo mínimo para cada divisão do piso 0 de acordo com a Portaria nº 138-I/2021.

Espaço (piso 0)	Caudal Mínimo de Ar Novo	Nº Pessoas ou Área
Receção	20 [m ³ /(h×pessoa)]	1 pessoa
Sala de Reuniões	24 [m ³ /(h×pessoa)]	Até 12 pessoas
Departamento Comercial	24 [m ³ /(h×pessoa)]	4 pessoas
Departamento de Engenharia/Orçamentação	24 [m ³ /(h×pessoa)]	7 pessoas
Controlo de Produção	24 [m ³ /(h×pessoa)]	2 pessoas
Balneário	510 [m ³ /h]	51 m ²
Departamento de <i>Solutions</i>	24 [m ³ /(h×pessoa)]	8 pessoas
Nuwave	24 [m ³ /(h×pessoa)]	3 pessoas
Arrumos	-	-
Cantina	35 [m ³ /(h×pessoa)]	Até 18 pessoas

Tabela 8 - Valores de caudal de ar novo mínimo para cada divisão do piso 1 de acordo com a Portaria nº 138-I/2021.

Espaço (piso 1)	Caudal Mínimo de Ar Novo	Nº Pessoas ou Área
Direção	24 [m ³ /(h×pessoa)]	1 pessoa
Sala de Reuniões	24 [m ³ /(h×pessoa)]	Até 8 pessoas
Sala de Formação	24 [m ³ /(h×pessoa)]	Até 35 pessoas
Departamento Administrativo	24 [m ³ /(h×pessoa)]	2 pessoas
Departamento de Marketing e Digital	24 [m ³ /(h×pessoa)]	3 pessoas
Departamento de Compras	24 [m ³ /(h×pessoa)]	1 pessoa
Departamento Financeiro	24 [m ³ /(h×pessoa)]	2 pessoas
Gabinete	24 [m ³ /(h×pessoa)]	-
Departamento de Recursos Humanos	24 [m ³ /(h×pessoa)]	1 pessoa

Atentando agora no sistema de climatização e ventilação do edifício este emprega uma bomba de calor reversível de geotermia como fonte de energia térmica, pelo que possibilita que na estação de arrefecimento se produza água fria e na estação oposta se produza água quente. Dado que em ambos os pisos se processam atividades de tipologia bastante semelhante e em paralelo o sistema não requer que se proceda a aquecimento e arrefecimento em simultâneo, sendo apenas uma destas funções realizada de cada vez o que reduz não só a complexidade do controlo requerido, mas também a de toda a instalação de ventilação. Para além disso, parte da climatização do edifício de escritório é garantido pelo piso radiante instalado, sendo que este se encontra repartido de acordo com as divisórias referentes a cada piso (como representado na Figura 28 e Figura 29) possibilitando assim um controlo mais localizado e direcionado consoante as necessidades e preferências.

As instalações são munidas de três unidades de tratamento de ar novo (UTAN) e uma unidade de tratamento de ar (UTA), representadas na Figura 31, tal deve-se ao facto de ser necessário movimentar-se caudais de ar consideráveis, pelo que uma unidade única não seria

indicado, e pelos constrangimentos levantados nos casos da cantina e dos balneários que requerem tipologias de ventilação distintas e que poderiam causar incompatibilidades no sistema, isto é, dado ser necessário garantir que nestes espaços apenas se introduz ar novo e todo o ar extraído é exaurido, não podendo ocorrer recirculação. Olhando para as unidades de tratamento de ar novo, estas equipam divisões específicas e foram instaladas fruto da atividade que estas desempenham de forma a garantir que não existe contaminação dos outros espaços. Chame-se UTAN 1 à unidade que serve apenas a zona de balneários e UTAN 2 à unidade responsável pelo tratamento de ar da zona da cantina.

Uma das UTAN, denominada de UTAN 3, serve apenas o laboratório, a zona da montagem dos quadros elétricos e ainda a parte da assistência, uma vez que são zonas que se caracterizam pela produção de partículas que de outra forma iriam acabar por reentrar em circulação aquando da sua passagem por uma caixa misturadora. Mais ainda, a UTAN 2 serve apenas para ventilar a zona da cantina, devido à produção de odores derivados da presença de alimentos cozinhados, e não se encontra em funcionamento contínuo dado a periodicidade de utilização deste espaço. Claro está que, dado o seu nome, ambas as unidades funcionam apenas com ar novo, não havendo qualquer tipo de recirculação ou mistura de ar, sendo assim a totalidade do ar exaurido expelido, à semelhança dos balneários e instalações sanitárias equipadas por ventiladores de extração. Contudo, é de ressaltar que para o contexto da presente tese apenas se considera pertinente o estudo da unidade de tratamento de ar, pelas suas características e pelas divisões do edifício que ventila, como se verá de seguida.



Figura 31 - Representação das UTA e UTAN's que integram o sistema AVAC do edifício.

De facto, todas as restantes divisões são ventiladas através da utilização de uma UTA, produzida pela própria empresa, que é responsável pela introdução de ar novo nos espaços, sendo utilizada para climatizar em paralelo com o piso térmico. Efetivamente, a UTA (Figura 32) é equipada com dois ventiladores, um de admissão e outro de extração, uma caixa misturadora que permite uma reintrodução parcial ou total do ar extraído em circulação; uma roda térmica que possibilita o reaproveitamento térmico do ar exaurido e baterias de aquecimento e arrefecimento, que tal como referido, complementam a climatização feita pelo piso radiante.

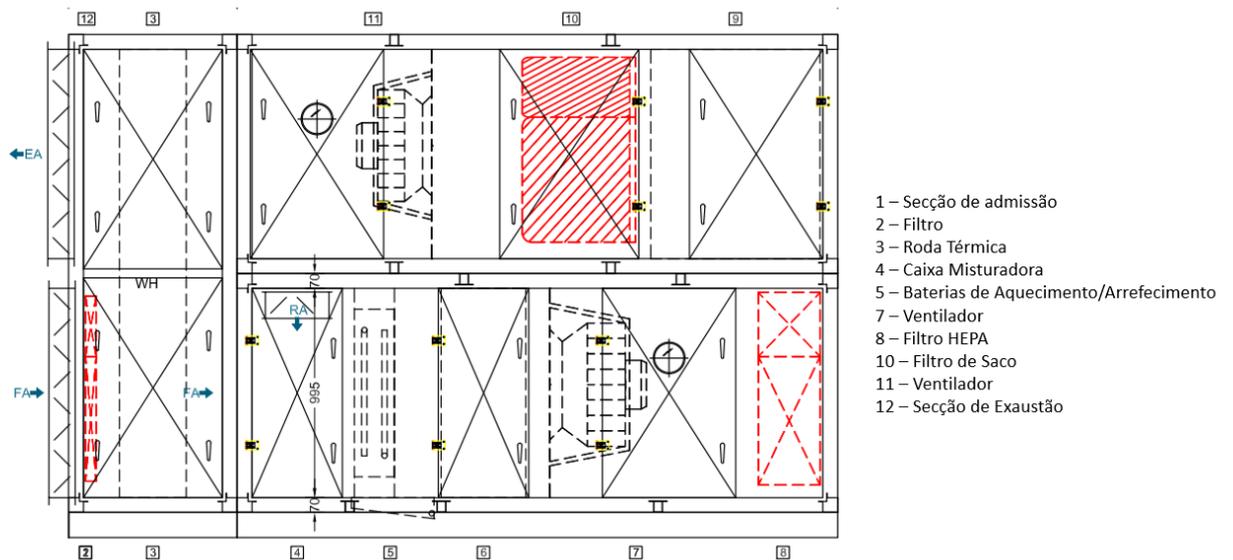


Figura 32 - Composição e distribuição dos componentes constituintes da UTA.

Atente-se que de forma a diminuir o consumo energético do sistema apenas se introduz no espaço a percentagem de ar novo necessária para cumprir com os requisitos mínimos de ar novo, sendo o restante caudal de ar composto por ar recirculado após ter sido tratado pelos filtros existentes na unidade.

O sistema de ventilação, incorpora unidades terminais capazes de formar cortinas de ar e que se encontram colocadas de forma oposta, isto é, em extremidades opostas das divisões por forma a criar um efeito de varrimento total do ar dos espaços. Na Figura 33 pode ver-se a colocação das condutas de insuflação (representadas pela cor azul) e de exaustão (vermelho) referentes aos escritórios do departamento de *solutions* (representado na Figura 28 com o número 8) sendo visível efeito acima descrito. É de referir que cada unidade terminal insufla um caudal constante de 250 m³/h.

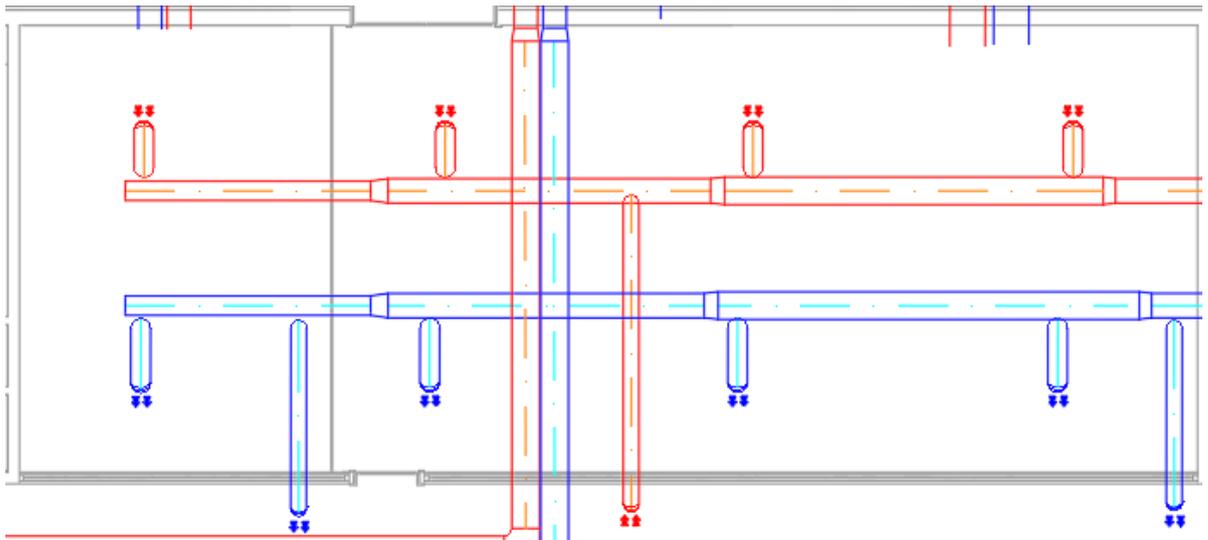


Figura 33 – Exemplo de unidades terminais da rede de aerúlica no caso do departamento de *solutions*.

Adicionalmente, a rede de aerúlica completa dos pisos rés do chão e 1º andar pode ser vista nas Figura 34 e Figura 35, respetivamente, sendo possível de se observar que esta é de grande extensão e composta por diversas unidades terminais que funcionam sempre no mesmo registo, um lado único para a insuflação e o lado oposto para a exaustão, não sendo possível a sua variação separada.

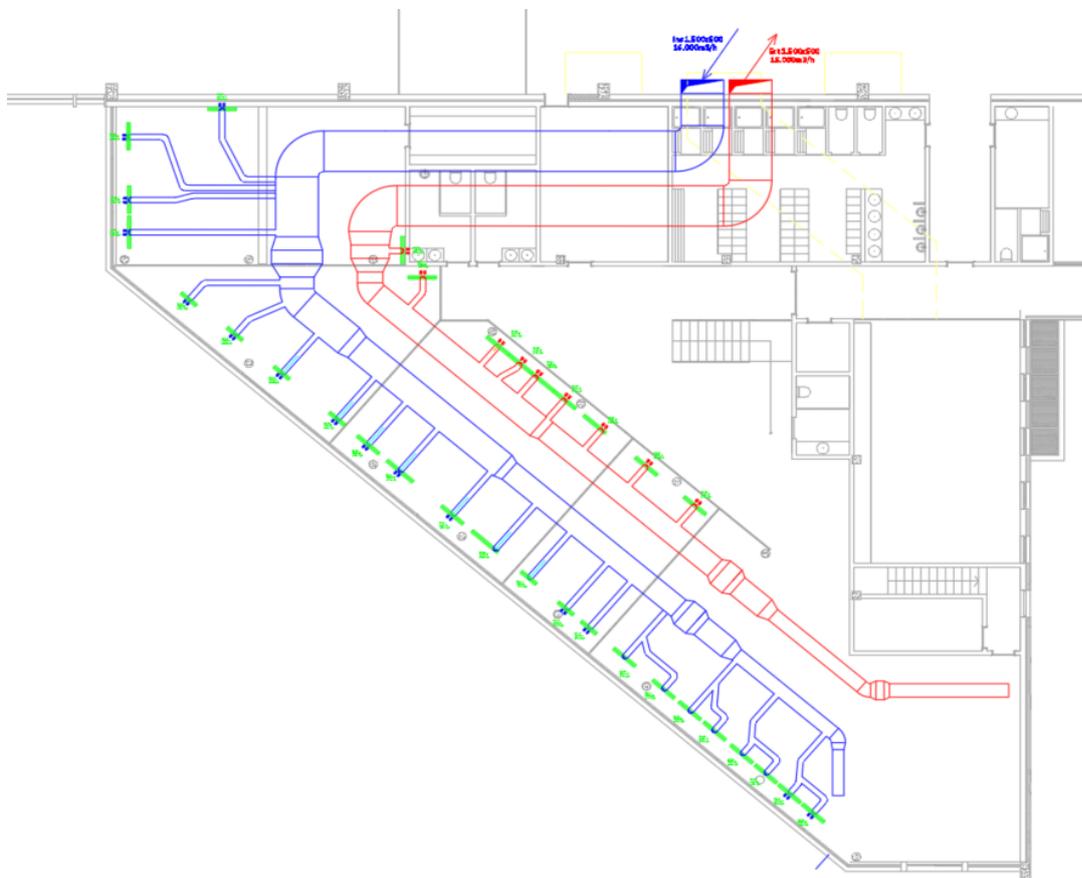


Figura 34 - Planta da rede aerúlica do piso térreo.

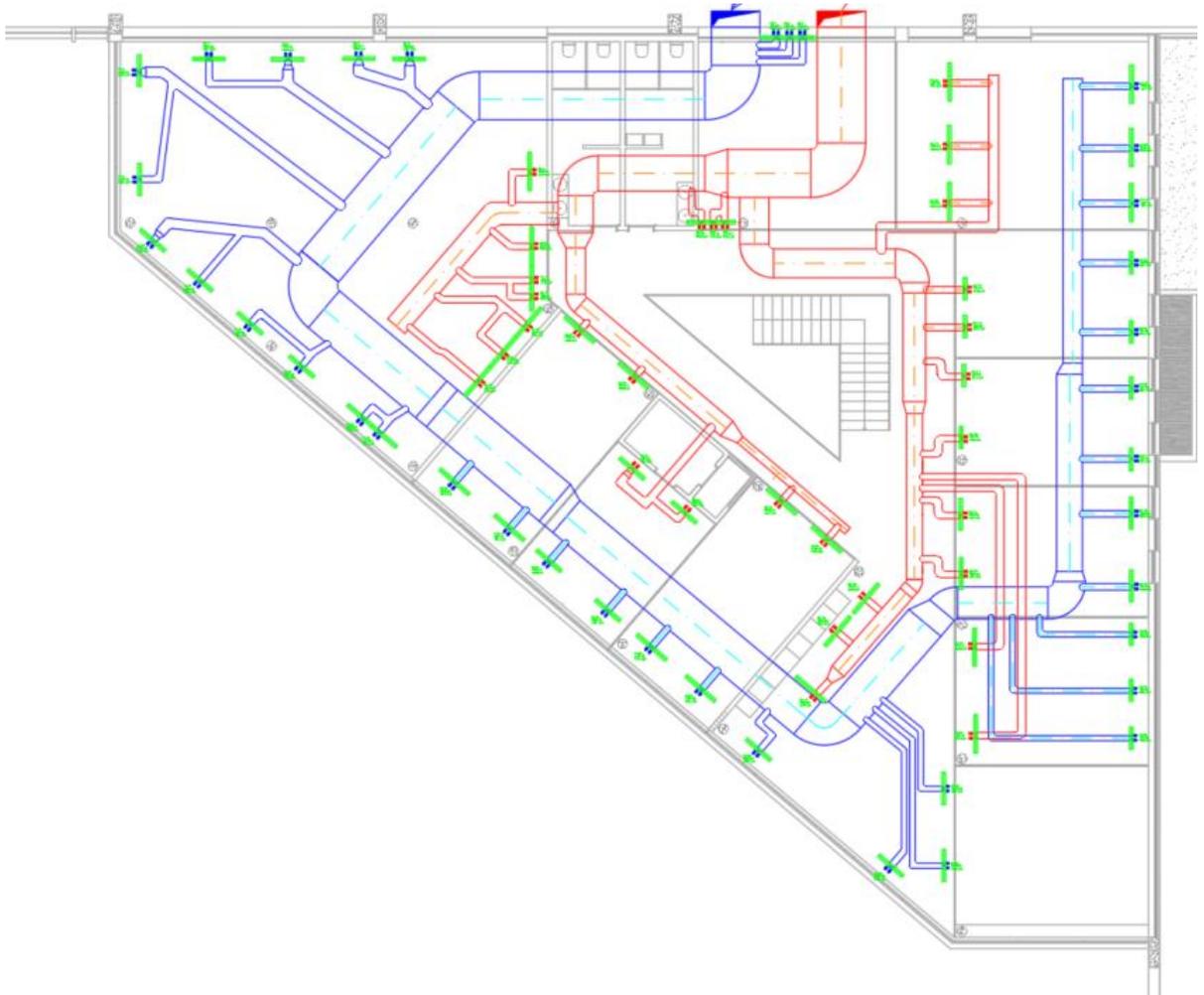


Figura 35 - Planta da rede aerúlica do 1º piso.

A UTA funciona a um caudal constante de 25300 m³/hora, alimentando ambos os pisos, pelo que as únicas variações possíveis são feitas ao nível da temperatura e humidade relativa do ar de insuflação ou da percentagem de recirculação, como se verá no subcapítulo seguinte.

A nível de sensores que permitem o controlo das características do espaço existem essencialmente dois tipos: os responsáveis pela medição de valores afetos à temperatura e humidade relativa e os responsáveis pelas medições das concentrações de dióxido de carbono. Estes primeiros encontram-se instalados no teto de todos os escritórios sendo a informação por eles recolhida catalogada e utilizada como parâmetro preferencial de atuação, isto é, o funcionamento da UTA é definido por um *setpoint* de temperatura e de humidade relativa, sendo os registos desta, ao nível das baterias de aquecimento e arrefecimento, atuados de diversas formas sempre em busca da diminuição do erro. Por outro lado, os sensores responsáveis pela medição de CO₂ encontram-se colocados em três locais no piso

térreo do edifício e apenas em um local no piso acima deste, sendo assim a qualidade dos dados obtidos comprometida pela reduzida amostra.

Ao nível do controlo, é de referir que o todos os sensores presentes na instalação integram um sistema de controlo PID, onde utilizando as técnicas previamente descritas, se pretende que o sistema se mantenha o mais próximo possível do *setpoint*. O sistema tem um funcionamento relativamente simples, sendo a maior parte da sua atuação feita para manter a sensação de conforto térmico e não de qualidade do ar interior, uma vez que o caudal da UTA e das unidades terminais se mantém constante, como tal, o controlo faz a variação de caudal de água proveniente da estação de geotermia de forma a que se garanta a temperatura estabelecida como *setpoint*. Para tal, as unidades de tratamento de ar são equipadas com um módulo de controlo integrado do tipo *plug-in* – SIEMENS da família de produtos POL – capacitado de diversas entradas e conectores para que se realizem as ligações dos sensores necessários, sendo que o esquema de programação destes sistemas já é predefinido pelo fabricante, permitindo apenas alguns graus de liberdade no funcionamento da UTA que podem ser ajustados de máquina para máquina, a nível de evolução da temperatura, atuação dos registos de ar e da troca de calor.

Posto isto, é fácil de compreender a facilidade na hora de tomada de decisão da implementação deste tipo de sistemas pois permite um controlo altamente estudado, de aplicação praticamente universal, uma vez que permite o controlo de diversos componentes resultando em alterações ao estado do sistema bastante diretas, contudo, o controlo em si e a sua afinação caem um pouco fora das mãos do utilizador visto que, no caso deste tipo de produtos, se encontram dentro das conhecidas “caixas cinzentas” nas quais se pode alterar alguns fatores mas sem se compreender o total funcionamento por detrás das mesmas.

Por fim, resta mencionar que os dados de atuação, funcionamento e estado do sistema são registados numa nuvem, o que permite a sua acessibilidade em qualquer altura, apoiada pela existência de um centro de controlo *online* permitindo assim ao utilizador o controlo e atuação do sistema de forma remota ou até mesmo a exibição das características deste para os ocupantes do espaço através de *dashboards* informativos.

4.2. VARIÁVEIS EM ESTUDO E RECOLHA DE DADOS

Ao longo da presente dissertação foi possível compreender que a qualidade do controlo de um sistema está diretamente relacionada com a qualidade dos dados a este fornecido e das variáveis por ele utilizadas para reger dado controlo. Desta forma, os dados recolhidos no contexto do controlo do sistema de ventilação e climatização das instalações da Vieira & Lopes simbolizam a diferença entre o correto controlo e, por conseguinte, funcionamento do mesmo. No caso em estudo, o sistema tem acesso a uma grande variedade de parâmetros que caracterizam o estado e o funcionamento do sistema em tempo real, sendo estes utilizados para garantir que o sistema se encontra dentro das condições pretendidas de operação, bem como catalogados para posterior uso comparativo ou estatístico. Tal como referido no subcapítulo anterior, o sistema emprega sensores que controlam variáveis desde a temperatura, humidade relativa, concentração de dióxido de carbono ou até mesmo posição dos registos de passagem de ar, etc.

Posto isto, é importante fazer a distinção entre as variáveis que o sistema recolhe e trata na sua totalidade e as que são de relevância para o estudo em causa. Desta forma, olhe-se em primeiro lugar ao caso da temperatura e da humidade relativa, pois estas são as variáveis tratadas com maior importância pelo controlador, sendo grande parte da programação do sistema realizada em torno das mesmas, contudo, são variáveis que não apresentam relevância no contexto do controlo da qualidade do ar interior pois não são indicadores diretos da evolução da QAI no espaço. Mais ainda, estas são recolhidas por sensores que equipam os tetos de todas as divisórias climatizadas das instalações, sensores estes que são na sua essência sensores de presença equipados com sensores de temperatura, capazes de medir temperatura, e sensores de medição de humidade relativa do ar.

Os sensores empregues são da marca *SIEMENS*, com a referência de produto 5WG1258-2DB31, apresentando uma voltagem na ordem dos 24V e uma potencia de 0,28 W, encontrando-se colocados em todos os escritórios das instalações, ou seja, a uma distância de 3 metros do solo tal como estipulado pelo fabricante para que se garanta um funcionamento de acordo com as especificações. O fabricante anuncia uma área de deteção de 400 m² para a deteção de movimento e de 64 m² para o caso de presença no espaço, considerando a altura de colocação anteriormente definida. No que diz respeito à medição de temperatura, esta é feita utilizando um termistor do tipo NTC incorporado no módulo de deteção de presença e

apresenta um intervalo de medição entre os 0°C e os 50°C, pelo que pode ser considerado utilizável no contexto do nosso país. A medição da humidade relativa fica ao encargo de um módulo próprio e apresenta intervalos de medição entre os 0% e 100%, como era de esperar.

Focando agora a atenção nas variáveis que são do interesse do estudo e apresentam potencialidade de incorporarem uma metodologia de controlo com o principal objetivo de garantir a QAI é de referir a concentração de dióxido de carbono no espaço e a percentagem de ar recirculado que é insuflado. De facto, tendo por base a informação reunida nos capítulos antecedentes e os objetivos definidos no início do presente trabalho, é possível compreender-se que estas duas variáveis são de extrema importância, não só por forma de garantir o cumprimento de legislação, mas também pelo facto de serem essências para a formulação de um sistema de controlo completo. O atual sistema instalado no edifício da Vieira & Lopes, emprega apenas um total de 4 sensores, ao estilo dos previamente explicitados sobre a temperatura, capazes de medir tais valores e estes encontram-se divididos entre os pisos sendo que estão aplicados três no piso térreo, um na entrada do edifício (zona da receção), outro no corredor imediatamente antes do departamento de engenharia e orçamentação e um último no corredor entre o balneário e o departamento de *solutions*. No que diz respeito ao piso superior existe apenas um sensor colocado no centro do corredor de acesso aos escritórios da direção. Existem ainda mais dois sensores que se encontram colocados dentro da própria UTA, um deles na conduta de admissão de ar com o objetivo de garantir que o ar exterior que se está a injetar no sistema apresenta condições mínimas, e um outro colocado na conduta de exaustão por forma de corroborar a informação do valor médio dos outros colocados no interior do edifício e permitir uma melhor decisão sobre as condições nas quais se fará a mistura do ar recirculado com o ar novo.

Os sensores são da mesma família de produtos, apresentando a referência 5WG1258-2DB51, pelo que apresentam as mesmas dimensões, mesma colocação e por conseguinte capacidades de deteção, mesmas características elétricas, contudo, apresenta diferenças a nível da forma de medição de temperatura, que passa a ser realizada por um módulo próprio ao invés do termistor, e da presença, óbvia, de um módulo de medição da concentração de CO₂, com uma amplitude de medição desde 400 ppm até 10000 ppm, o que cobre confortavelmente os valores espectáveis de serem verificados nesta situação.

Este módulo aplica uma tecnologia de deteção bastante comum, com diversas aplicações e dados que suportam a sua qualidade, sendo ela a tecnologia NDIR (*Non-dispersive*

Infrared sensor) que se caracteriza por empregar um sistema de infravermelhos, como o nome indica, para analisar a percentagem e, por conseguinte, a concentração de dióxido de carbono presente na amostra. Um feixe infravermelho incide sobre a amostra de ar recolhido onde este reage com o dióxido de carbono, o que provoca uma variação na intensidade do mesmo, sendo esta variação detetada por um filtro ótico seletivo colocado sobre um detetor de luz que avalia a os efeitos sofridos em certos comprimentos de onda que caracteristicamente são absorvidos pelo dióxido de carbono sendo assim possível inferir a sua concentração com base no aumento ou diminuição da intensidade destes comprimentos de onda [34]. Esta tipologia de deteção pode sofrer de uma diminuição da precisão ao longo do tempo, fruto da acumulação de partículas no interior do sensor, pelo que o fabricante já conta com esse fator e introduz um algoritmo de correção que toma por *baseline* o valor mais baixo medido nos últimos oito dias e ajusta todas as medições de acordo com este, reduzindo assim grandemente os erros associados.

De seguida encontram-se explicitados sobre forma gráfica os valores das medições da concentração de dióxido de carbono, realizadas em contexto real e de correto funcionamento do sistema, dos valores da concentração de dióxido de carbono e da percentagem de abertura dos registos responsáveis pela mistura de ar. Estes valores foram obtidos ao longo de uma semana, com intervalos de amostragem de 15 minutos, estando a empresa no seu funcionamento habitual, isto é, com os níveis ocupacionais de acordo com o perfil representado na Figura 30.

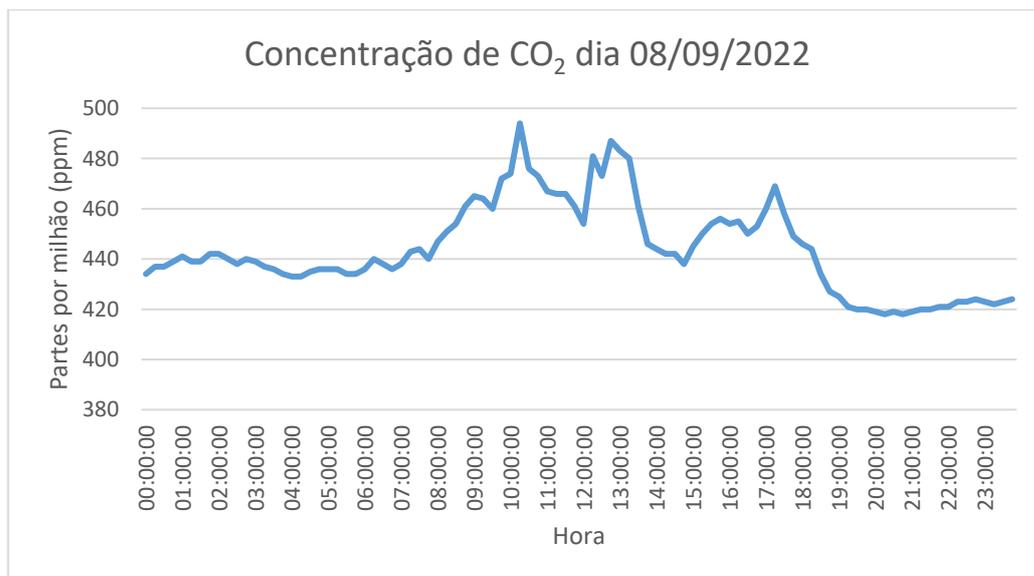


Figura 36 – Registo da concentração de CO₂ média dos 4 sensores no dia 08/09/2022

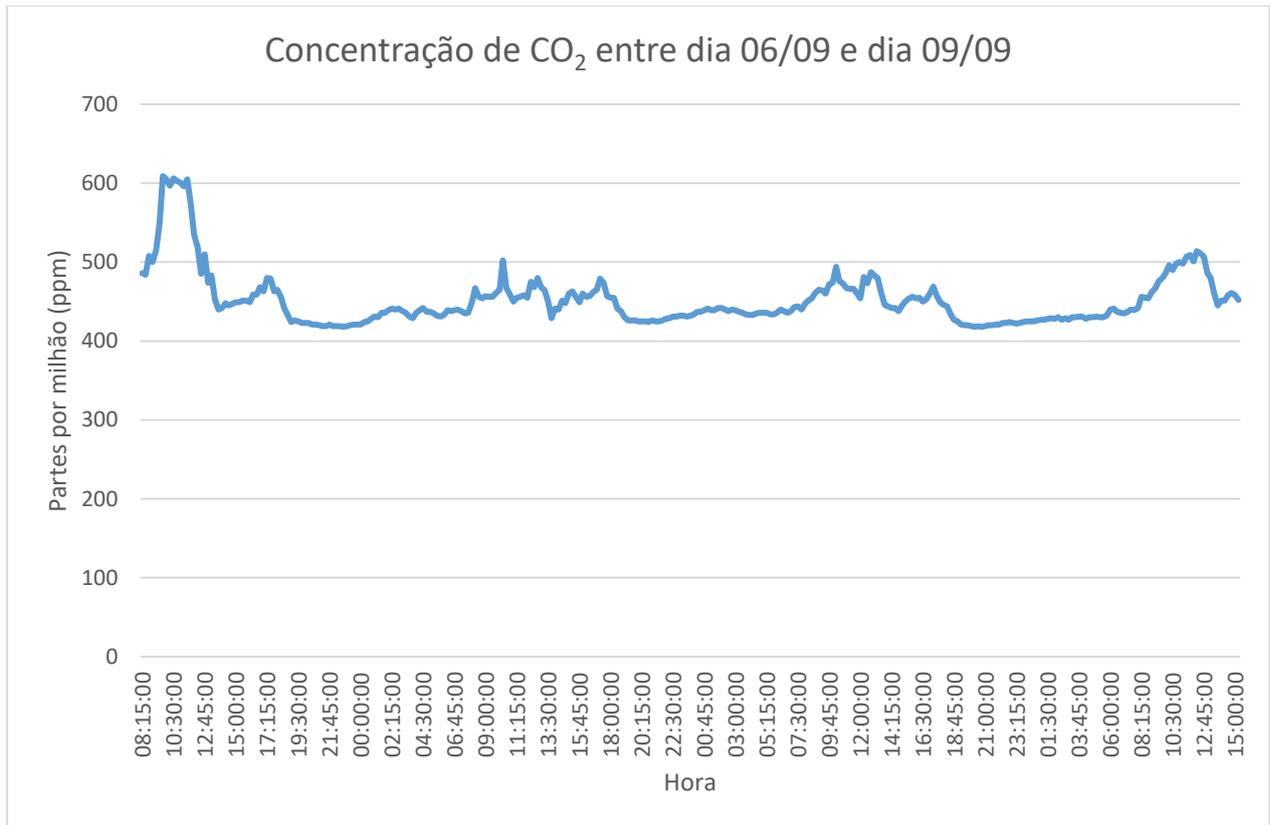


Figura 37 – Registo das medições da concentração de CO₂ média dos 4 sensores ao longo de 4 dias.

Como se pode observar nas Figura 36 e Figura 37, existe uma certa ciclicidade na evolução da concentração de CO₂ ao longo do dia, sendo o pico de concentração, 605 ppm no seu máximo, normalmente por volta do meio da manhã o que tem a sua explicação no horário habitual dos funcionários que entram perto das oito horas e trabalham continuamente até as dez e meia quando fazem uma pausa, provocando a descida verificada sempre por volta desta hora. Tal como era de esperar a concentração reduz de uma forma sustentada durante a hora de almoço, voltando a subir ao longo da tarde, verificando-se um segundo pico diário – apresentando um valor máximo de 480 ppm – ao final desta que volta a coincidir com o horário de saída dos ocupantes, sendo que após isso o valor cai para próximo do valor normalmente atribuído ao ar novo (375-400 ppm) permanecendo assim durante o período inocupado do edifício. Desta forma, pode afirmar-se que ambos os gráficos acima expostos coincidem da forma esperada com a ocupação do edifício (Figura 30), pelo que é um bom indicador para o caso pretendido de se usar esta última variável como forma de controlar a concentração de CO₂. Contudo, é de referir que os valores acima expostos revelam-se bastante positivos do ponto de vista da qualidade do ar interior, uma vez que nunca se afastam de forma considerável dos valores esperados para o ar novo nem se aproximam do

limite legislativo máximo de 1000 ppm, mas os mesmos são referentes aos valores médios dos quatro sensores colocados, pelo que podem ser uma representação um pouco genérica do comportamento do edifício.

No que diz respeito ao valor de abertura do registo responsável pela mistura de ar recirculado na caixa de mistura, verificou-se também que este apresenta um comportamento cíclico ao longo dos dias. Como se pode ver na Figura 38 o registo assume um comportamento maioritariamente *on-off* ao longo do dia, não fazendo a mistura de ar extraído com ar novo durante o período de ocupação e o comportamento oposto aquando da desocupação do espaço, realizando-se apenas recirculação do ar.

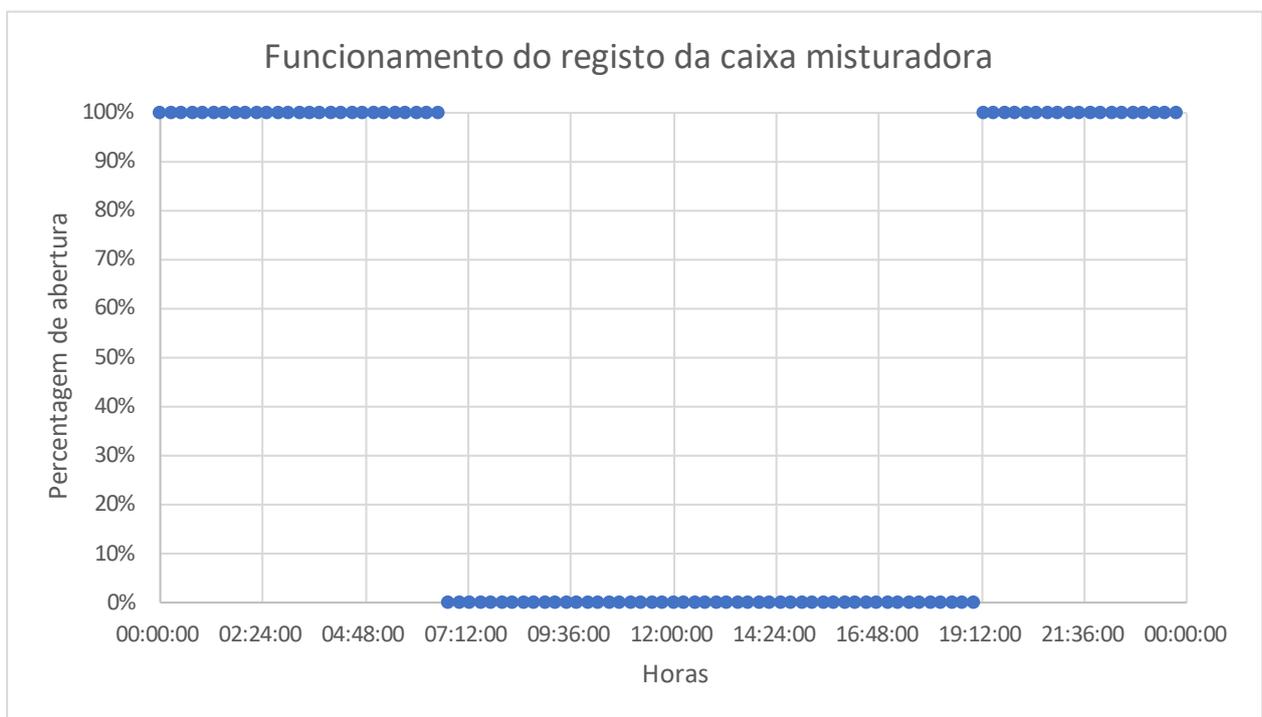


Figura 38 - Percentagem de abertura do registo da caixa misturadora ao longo de um dia.

De facto, o funcionamento do registo é controlado de forma cíclica uma vez que este apresenta sempre o mesmo comportamento ao longo dos dias, como representado na Figura 39 que traduz graficamente esse comportamento ao longo de vários dias.

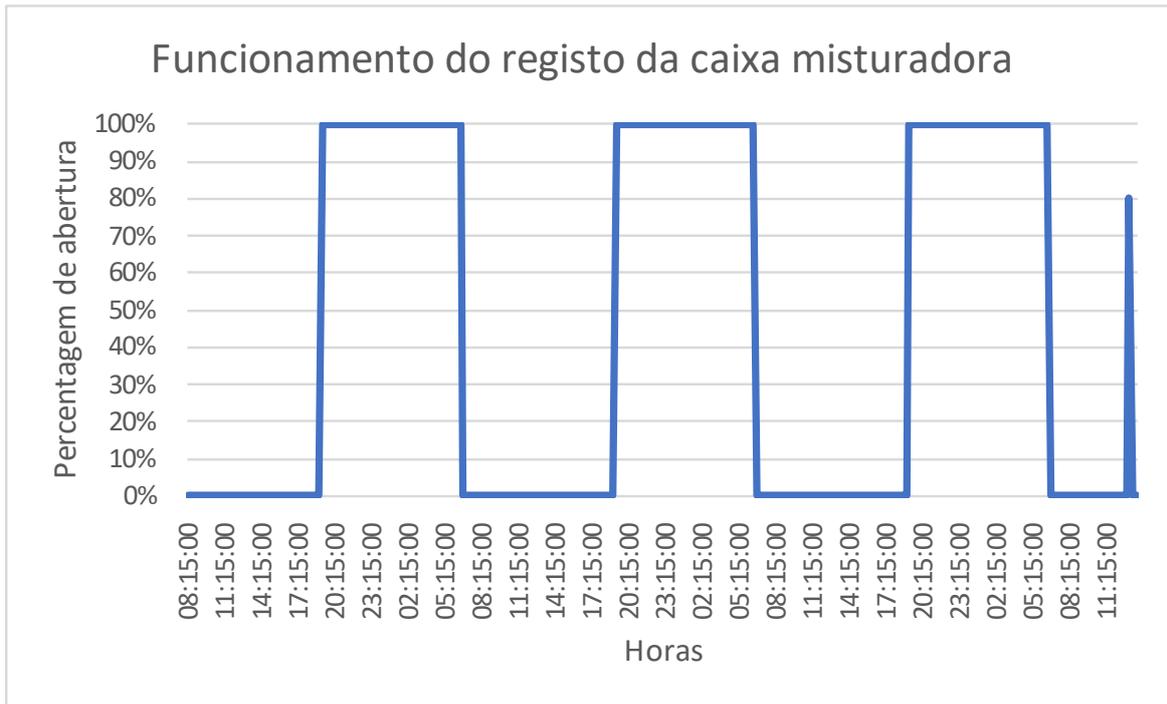


Figura 39 - Percentagem de abertura do registo da caixa misturadora ao longo de vários dias.

Posto isto, é possível estabelecer-se uma relação entre os valores relativamente baixos de concentração de CO₂ face à ocupação e os valores verificados para a quantidade de ar que é recirculado, isto é, uma vez que durante o horário de ocupação das instalações o registo da caixa misturadora se encontra fechado isso significa que apenas se estará a insuflar ar novo, logo ar com uma concentração de dióxido de carbono baixa o que aliado ao grande caudal verificado constantemente garante que os valores medido nunca entram em intervalos considerados menos preferíveis (superiores a 800 ppm).

5. DEFINIÇÃO DE UM SISTEMA ALTERNATIVO DE CONTROLO QAI

Concluído todo o estudo teórico das diversas legislações aplicadas aos sistemas, compreendido de que forma a presença de pessoas influencia o espaço e as suas condições, tendo um conhecimento profundo dos métodos de controlo comumente empregues e, por fim, o estado do sistema atualmente utilizado nas instalações em causa, estão reunidas as condições necessárias para que se possa idealizar um solução alternativa que vá de encontro aos objetivos do presente trabalho.

De facto, no presente capítulo será explicitada uma sugestão de solução alternativa para o controlo da qualidade do ar interior tendo como principal suporte a literatura desenvolvida nessa área e como objetivo a poupança energética. Assim sendo, pretende-se que a solução apresente a robustez necessária para garantir um correto funcionamento, mas ao mesmo tempo a flexibilidade que lhe permita ser adaptada a diversas situações ou variações ocupacionais significativas, sem que se perda qualidade.

5.1. DESCRIÇÃO DO FUNCIONAMENTO E COMPORTAMENTO ESPERADO

Tendo por base o estado da arte extensivamente descrito no capítulo 2, é possível de se constatar que as condicionantes que envolvem os sistemas AVAC e o seu controlo são inúmeras, pelo que a sua correta priorização é um processo de elevada importância. Desta forma, foi estabelecido que a qualidade do ar no interior do edifício era do mais alto nível de prioridade a par do cumprimento dos valores mínimos de caudal de ar novo, seguindo-se a qualidade do controlo, isto é, garantir que o sistema irá funcionar sem erros e com uma fiabilidade que justifique a sua aplicação a longo prazo. Por fim, garantir que a solução alternativa garante algum benefício a nível de controlo, simplicidade ou poupança, seja ela de cariz energético ou monetário aquando da instalação ou do custo de operação/manutenção.

Assim sendo, a solução proposta passa pela incorporação de um sistema de controlo com metodologia de modelo preditivo de controlo (MPC) onde se utiliza a ocupação do espaço como variável de controlo por forma de fornecer uma estimativa da evolução prevista da concentração de CO₂, tendo por base as leis de geração de dióxido de carbono pelos humanos. Para que o sistema tenha acesso ao número de ocupantes no espaço a cada momento, será incorporado um dispositivo que permita a contagem automática de pessoas, sendo esta

informação automaticamente reintroduzida no algoritmo de controlo para o ajuste do caudal de ar necessário, o que implica que a unidade de tratamento de ar esteja equipada por um ventilador capaz de acomodar diferentes registos de funcionamento.

Olhando ao método de contagem de pessoas, a alternativa proposta passa pela utilização de sensores óticos e câmaras que utilizando algoritmos específicos permitem a obtenção do número exato de pessoas dentro de um espaço. Parte do benefício desta aplicação parte da incorporação das câmaras de segurança no sistema, não necessitando assim da colocação de novos sensores ou incorrer em mais custos para além dos necessários para a implementação do algoritmo. O sistema de deteção de pessoas funciona com a assunção de que as pessoas se encontram em movimento, o que para o caso da contagem das pessoas que entram e saem do edifício é algo verídico, para além disso, a colocação da câmara, equipada com uma lente de grande abertura, no teto resulta numa visão superior de toda a zona de entrada. Uma vez a câmara colocada, é possível ter em consideração a altura da sua colocação para que se defina o intervalo de estatura médio das pessoas estando assim o sistema capaz de identificar como um humano as imagens que cumpram os critérios definidos, extraíndo assim a sua localização física no espaço.

O algoritmo de identificação emprega uma metodologia à base de histogramas para o reconhecimento de pessoas e o seu posicionamento. Os histogramas são desenhados de forma a conseguir reconhecer a dimensão humana típica sob a forma de pixéis e utilizar essa informação para computar a sua posição ao longo do tempo, através dos picos no histograma [35] – processo visível na Figura 40.

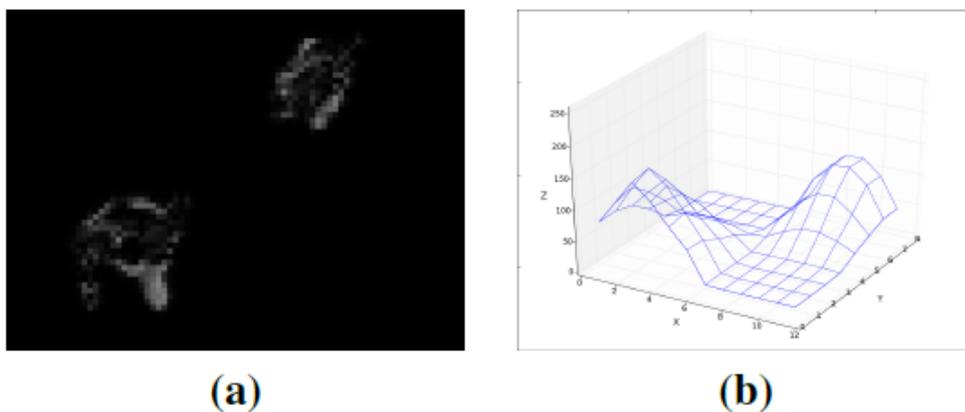


Figura 40 - Exemplo do histograma de um *frame*: (a) representa os pixéis em movimento e (b) o histograma resultante, retirado de [35].

O sistema é construído com algoritmos que permitem a identificação individual de cada pico e o seu seguimento com a evolução dos *frames* de vídeo, pelo que para além da capacidade de contar pessoas ainda é possível rastrear o seu percurso e posição, sendo esta função parcialmente desconsiderada por razão de simplificação do poder computacional necessário, uma vez que esta não acrescenta vantagens para o fim pretendido é apenas utilizada de forma a perceber se o movimento de cada pessoa, através dos vetores de posição, velocidade e aceleração originados a partir dos histogramas, é feito no sentido de estar a entrar no edifício ou a sair do mesmo. Desta forma, o sistema pode ser simplificado utilizando apenas uma câmara que registre as movimentações na zona das entradas, originando um contador simples de pessoas no interior do mesmo.

Em [35] foi feito o ensaio experimental de uma solução que aplicava esta tecnologia tendo a câmara sido colocada a uma altura de 3 metros, o que é vantajoso para retirar ilações uma vez que o pé direito de cada andar das instalações é de 3 metros, também. Neste caso, era possível detetar-se um campo de visão de 3 metros por 2 metros, suficiente para cobrir completamente a entrada de um edifício, tendo os resultados obtidos sido traduzidos numa capacidade de deteção de pessoas distintas quando estas se encontram afastadas por mais de 15 cm (limitado pela resolução da câmara) sendo que o sistema era capaz de corretamente identificar e contar uma pessoa 89,5% das vezes, caindo este valor para 79,8% quando um total de três pessoas entrava no espaço em simultâneo. Desta forma, pode considerar-se que face aos requerimentos computacionais serem reduzidos, os resultados apresentados são positivos pelo que se espera um bom funcionamento no contexto do problema da presente dissertação.

Posto isto, a informação relativa ao número de pessoas no interior do edifício é introduzida no algoritmo de controlo MPC que utilizando a uma equação que expressa a evolução da concentração de CO₂ em função da ocupação consegue prever de que forma o espaço irá progredir e atuar o sistema AVAC antecipadamente, ou numa alternativa mais simples, garantir que o caudal mínimo por pessoa de acordo com a legislação nacional é cumprido em função dos ocupantes ao invés de o sistema estar em funcionamento constante durante períodos de menor ocupação. É neste ponto que a aplicação de um modelo preditivo de controlo pode trazer vantagens que os outros métodos não podem, pois este permite que com base no histórico de dados o sistema seja treinado para prever com mais precisão padrões de ocupação e assim antecipar picos no funcionamento do sistema.

Assim sendo, torna-se imperativo definir o modelo que irá reger a evolução da concentração de dióxido de carbono dentro do espaço, ou seja, que servirá de base ao controlo preditivo para que este possa prever a progressão lógica do sistema de uma forma cientificamente sustentada, deste modo, foi escolhido o método de balanço de massa transiente fruto das condições estipuladas para a sua utilização e das parecenças das mesmas com as condições reais de funcionamento. De facto, o método em questão é comumente empregue dado a sua flexibilidade de aplicação, podendo ser utilizado em condições de ocupação arbitradas, desde que sejam conhecidas, e não requer condições iniciais de steady-state, isto é, condições de equilíbrio entre a geração de dióxido de carbono e a taxa de ventilação.

Segundo o método de balanço de massa a concentração de dióxido de carbono no espaço pode ser modelada e determinada da seguinte forma [36]:

$$C_{t+1} = \frac{6 \times 10^4 n_t G_P}{Q \left(1 - \exp\left(-\frac{Q}{V\Delta t}\right)\right)} + (C_t - C_R) \exp\left(-\frac{Q}{V\Delta t}\right) + C_R \quad (28)$$

Onde:

C_t – concentração de CO₂ no espaço no instante t

n_t – número de ocupantes no instante t

G_P – taxa de geração de CO₂ por pessoa

Q – caudal de insuflação no instante t

C_R – concentração de CO₂ no ar insuflado

V – volume do espaço

Δt – intervalo de tempo

Desta forma, ao se introduzir o método acima descrito no algoritmo de controlo é possível de se obter a evolução prevista da concentração de dióxido de carbono para um contexto em que o caudal, e por associação a taxa de renovação de ar, é constante sendo que depois se teria de recorrer a métodos computacionais para se proceder à resolução do processo inverso por forma de encontrar o valor do caudal necessário para que se mantenha a evolução da concentração com um declive igual a zero.

A metodologia descrita já foi empregue e devidamente estudada em condições de ocupação escolar, que diferem um pouco das verificadas no contexto da presente dissertação,

mas ao mesmo tempo caracterizam-se por estágios de ocupação estáveis e previsíveis tendo os resultados obtidos sido bastante positivos na determinação correta das taxas de ventilação, existindo ainda relatos de aplicações em sistemas com ventilação multi-zona. Tal resultou numa opinião generalizada de que a metodologia descrita é menos sensível à janela temporal estabelecida, permite intervalos amostrais (Δt) variados e, ainda, acomoda variações no valor da concentração do gás no ar insuflado desde que esta seja conhecida, o que é uma situação bastante corrente e já se encontra em controlo no sistema atual.

Posto isto, é espectável que a solução apresentada surta melhorias face à atualmente instalada uma vez que permitirá exercer-se um controlo mais direcionado e preciso sobre as necessidades do espaço, visto que, por norma, um sistema AVAC que se encontra em funcionamento com caudal constante tende a não ser o mais eficiente a nível energético. Tal é apoiado pelos casos de estudo realizados na área que demonstram que sistemas de ventilação que alteram a sua metodologia de controlo para uma de modelo preditivo de controlo apresentam poupanças energéticas na ordem do 15% a 20%, o que revela que a implementação da solução sugerida pode ser um caminho que leva à redução da pegada de carbono do edifício e dos custos operacionais do mesmo, poupando ainda o sistema de ventilação em si pois ajuda a reduzir situações que requeiram funcionamento no pico dos componentes [37].

Adicionalmente, olhando a diversos estudos que procuravam compreender de que forma a incorporação dos dados de ocupação resultariam em melhorias nos sistemas, os resultados obtidos por estes suportam ainda mais a solução uma vez que apresentam de forma geral vantagens a nível de redução de custos, tal como se pretendia. Um relatório sobre simulações realizadas pelo *Pacific Northwest National Laboratory* revelou que num dado sistema VAV os potenciais de poupança energética, utilizando a ocupação do edifício como fator de controlo dos sistemas de ventilação e climatização, são de cerca de 23%. Ou ainda, no caso de se empregar sensores de CO₂, temperatura e humidade relativa num contexto de medição de ocupação surtiu reduções de 37% no consumo energético de um sistema AVAC [21].

Tabela 9 - Melhoria percentual expectável de acordo com o nível de alterações implementadas.

Melhoria percentual expectável	
Melhoria implementada	Percentagem de ganho/poupança
Sensores óticos para deteção de ocupantes	79% - 89% (deteção)
Modelo preditivo de controlo simples	15% - 20% (poupança energética)
Sistema VAV com dados de ocupação	20% - 23% (poupança energética)
Sistema VAV c/ ocupação e sensores de CO ₂ , humidade relativa e temperatura	37% (poupança energética)

A Tabela 9 expõem de uma forma mais visual os resultados obtidos experimentalmente em artigos científicos que estudaram a aplicação da metodologia descrita em contexto real. Desta forma, pode comprovar-se que, de facto, a solução proposta trará benefícios no que diz respeito à poupança de energia como era pretendido, contudo, é de ressaltar que os valores obtidos numa solução em fase final de desenvolvimento para comercialização podem ser diferentes e ligeiramente inferiores.

Contudo, é necessário referir que tal proposta de solução apresenta as suas desvantagens como a necessidade de um sistema de ventilação subdividido por zonas do tipo VAV para que o controlo possa ser mais localizado de forma a gerir melhor as subdivisões de ocupação dentro de espaço, sendo ainda que nesse caso se necessitaria de colocar uma rede de sensores de CO₂ maior do que a existente por forma de garantir uma visão mais generalizada do espaço e mais fiel à realidade de cada escritório. Mais ainda, a desvantagem mais gritante passa pela falta de casos de aplicação comercial de uma solução deste tipo, o que causa problemas acrescidos pois retira, em parte, a possibilidade de utilização de certos componente *off-the-shelf* e enfrenta a dificuldade na alteração da mentalidade da indústria, contudo, em simultâneo pode revelar-se como um formato pioneiro no mercado. Por fim, como foi possível constatar aquando da explicitação dos valores de concentração medido no local, pode afirmar-se que não será necessário proceder-se a alterações do ponto de vista de melhorar a QAI uma vez que os valores de concentração não excedem os 605 ppm, contudo, tal é feito através de um caudal superior ao requerido pelo que se incorre em custos energéticos acrescidos, podendo tal ser mitigado.

6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Após o estudo do estado da arte, dos pressupostos teóricos e exposição das metodologias de controlo que serviram de suporte à formulação de uma alternativa de controlo preditivo, torna-se possível retirar ilações sobre o trabalho e os temas abordados ao longo da presente dissertação.

Desta forma, neste capítulo serão apresentadas as conclusões que foram passíveis de ser atingidas, de forma sustentada e clara, sendo ainda expostas propostas de trabalhos futuros a realizar. Trabalhos estes que não se encontram presentes por diversos motivos desde o facto de não se enquadrarem com os objetivos iniciais da dissertação ou por restrições temporais.

6.1. CONCLUSÕES

Cada vez mais as pessoas começam a passar grande parte do seu tempo dentro de espaços fechados e nos grandes centros urbanos os espaços verdes dão lugar a escritórios, apartamentos ou até mesmo centros comerciais. Deste modo, a sensação do que simboliza ar limpo e de qualidade começa inevitavelmente a sofrer alterações, mutando e reaparecendo como um ar que apenas permite o não aparecimento de doenças e um mínimo de conforto, em condições mais normais. Ainda assim, o contexto da qualidade do ar interior ainda não tem a devida atenção uma vez que na grande parte dos casos é dada mais atenção a questões de temperatura ou conforto térmico, uma vez que é algo mais palpável e cujos ocupantes conseguem estabelecer uma relação de causa-efeito praticamente de forma instantânea.

No entanto, foi possível identificar-se que a qualidade do ar no interior de um edifício apresenta implicações a nível da produtividade dos ocupantes, pois com o deteriorar das características de ocupação pode instalar-se um mau estar generalizado ou sonolência, ou a nível de saúde, uma vez que a exposição prolongada a concentrações de dióxido de carbono elevadas, ainda que abaixo dos valores considerados tóxicos, podem provocar complicações respiratórias ou cognitivas. De facto, nos finais da década de 90 a organização mundial começou a fazer referência à influência que a exposição prolongada a ar de qualidade inferior à recomendada, denominando o acontecimento de "*Sick Building Syndrome*" que se

caracteriza pelos seguintes sintomas: dores de cabeça, náuseas, tonturas e cansaço, entre outros.

Desta forma, o estudo da legislação vigente, mais concretamente a internacional das quais as demais derivam, permitiu compreender de que forma as obrigações impostas são calculadas e o porque da importância da sua implementação, estando a valor muitas vezes tomado como baliza, os 1000 ppm, diretamente relacionado com este síndrome e com a garantia da qualidade da habitabilidade dos espaços.

No que diz respeito aos métodos de controlo existentes foi possível de se constatar que existe uma variedade de metodologias possíveis de serem aplicadas sendo que algumas tendem a ser preferidas face ao grande conhecimento prático existente. Contudo, no contexto dos objetivos inicialmente propostos para a presente dissertação optou-se por seguir pelo ramo do controlo preditivo, mais concretamente através de um controlo MPC. Tal deve-se ao facto de estes permitirem que sejam aplicados a sistemas nos quais existem constrangimentos operacionais ou que se pretenda uma otimização, de forma ponderada, de mais do que um aspeto e que se possa utilizar dados anteriores para o treino do modelo, sendo que ao longo do período de funcionamento o controlador se vai afinando melhorando continuamente a sua precisão de controlo, o que é um benefício num caso onde existe um padrão ocupacional bem definido como no caso das instalações da Vieira & Lopes.

O caso de estudo revelou-se ser um pouco desadequado, ainda que se trate de uma fração afeta a comércio e serviços, em parte fruto de a tipologia da instalação ser de fornecimento indiferenciado a todos os espaços, isto é, não existe a possibilidade de repartir de forma distinta o caudal proveniente da UTA. De igual modo, a mesma apresenta um controlo que prioriza o conforto térmico dos ocupantes procurando manter a temperatura sempre dentro de um intervalo bem definido, sendo ainda que garante as condições seguras de ocupação através da insuflação constante de 25300 m³/h de ar novo, visto que os dados recolhidos demonstram que durante o horário de funcionamento das instalações não se realiza recirculação de ar, pelo que a concentração de CO₂ nunca se acerca de valores na ordem dos 700 ppm.

Desta forma a solução proposta procurou suprimir algumas das falhas existentes no caso de estudo, mas sempre com o intuito de manter a flexibilidade e aplicabilidade da mesma a outros casos pelo que se revela polivalente. A utilização da metodologia MPC mune o sistema de uma capacidade de prever acontecimentos o que se revela benéfico na medida em que

permite uma atuação preventiva ao invés de reativa. Mais ainda, a utilização de um sistema de vídeo capaz de contabilizar o número de ocupantes e de o fornecer ao algoritmo de controlo resulta numa aplicação de leis de balanço de massa e de taxas de geração de dióxido de carbono pelos mesmo que podem ser utilizadas para a validação das previsões realizadas pelo MPC, complementando-se e originando um mecanismo mais robusto. Assim sendo, a solução proposta capacita o sistema de um controlo que vai de encontro ao pretendido aquando da aceitação do projeto, ou seja, é uma alternativa que permite uma visualização mais abrangente do espaço e que tem características passíveis de surtir reduções de custos operacionais e energéticos.

Os objetivos inicialmente propostos foram alcançados ainda que a sua visão na perspetiva do trabalho possa ter sido reapreciada de forma a acomodar as condicionantes encontradas, pelo que se considera um trabalho bem-sucedido.

6.2. TRABALHOS FUTUROS

Porém, o trabalho encontra-se, em parte, inacabado visto que a solução proposta assenta em bases teóricas não tendo havido oportunidade para a realização de testes que surtissem em conhecimento prático. Tal deve-se ao facto de o mesmo ter sido realizado num contexto empresarial no qual o objetivo inicial seria adquirir e reunir a informação teórica de base antes da tomada de decisão de investir recursos num projeto disruptivo.

Desta forma, podem destacar-se algumas sugestões de trabalhos futuros começando pela implementação, ainda que em contexto de simulação, da solução proposta de forma a validar suposições e simplificações realizadas, resultados teóricos e, não menos importante, a viabilidade económica real. Adicionalmente, o estudo da aplicação da mesma num caso de estudo de cariz diferente, idealmente num contexto de ocupação comercial, por exemplo, um centro comercial, seria benéfico para estudar a flexibilidade das soluções preditivas, uma vez que introduziam variáveis ao nível do perfil de ocupação e da atividade em questão – obrigando a alterações ao nível do caudal de ar novo variável ao longo do dia.

Por fim, sugere-se que se procure uma alternativa no ramo do controlo *Fuzzy Logic*, dado as características que lhe são atribuídas, principalmente a distanciação da dependência matemática e a baixa necessidade computacional, sendo que os resultados traduzidos pelos artigos científicos da área apresentam evoluções positivas ao nível da poupança energética.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] V. Vakiloroaya, B. Samali, A. Fakhar, and K. Pishghadam, “A review of different strategies for HVAC energy saving,” *Energy Convers Manag*, vol. 77, pp. 738–754, 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2013.10.023.
- [2] Observatório Da Energia, DGEG – Direção Geral de Energia e Geologia, and ADENE – Agência para a Energia, *Ficha Técnica Título Energia em Números-Edição 2021*. 2021.
- [3] ASHRAE, “ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2019,” 2019. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/344489124>
- [4] European Commission, “Air Quality Standards,” <https://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm>, May 05, 2022.
- [5] ASTM, “Standard Guide for using Indoor Carbon Dioxide Concentrations to Evaluate Indoor Air Quality and Ventilation.,” West Conshohocken, PA, Jul. 2018.
- [6] American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers., *ASHRAE handbook : fundamentals*. 2013.
- [7] A. Persily and L. de Jonge, “Carbon dioxide generation rates for building occupants,” *Indoor Air*, vol. 27, no. 5, pp. 868–879, Sep. 2017, doi: 10.1111/ina.12383.
- [8] B. Alves, F. Soares, and C. Leão, “Controlo Digital: da Teoria à Simulação Numérica,” 2011.
- [9] E. B. Erlhagen, “Introduction to Control Systems: concepts, definitions and examples.” Guimarães, 2020.
- [10] E. B. Erlhagen, “Stability of linear control systems: Routh-Hurwitz Criterion.” 2020.
- [11] N. S. Nise, *Control Systems Engineering*, 7th Edition. Wiley, 2014.
- [12] S. Bennett, “Development of the PID Controller,” *IEEE Control Syst*, vol. 13, no. 6, pp. 58–62, 1993, doi: 10.1109/37.248006.
- [13] M. Morari, C. E. Garcia, and D. M. Prett, “Model predictive control: Theory and practice,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 21, no. 4, pp. 1–12, Jun. 1988, doi: 10.1016/b978-0-08-035735-5.50006-1.
- [14] Y. Arkun, W. M. Canney, J. Hollett, and M. Morari, “Experimental study of internal model control,” *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, vol. 25, no. 1, pp. 102–108, Jan. 1986, doi: 10.1021/i200032a016.

- [15] I. Eker and Y. Torun, “Fuzzy logic control to be conventional method,” *Energy Convers Manag*, vol. 47, no. 4, pp. 377–394, Mar. 2006, doi: 10.1016/j.enconman.2005.05.008.
- [16] E. B. Erlhagen, “On-off Control Systems.” 2020.
- [17] T. Urica, P. Sojka, D. Koniar, and A. S. Libor Hargas, “The Control Process of an On-off Controller,” Zilina, 2019.
- [18] E. B. Erlhagen, “Proportional Control: theory and application to 1st and 2nd order systems.” 2020.
- [19] D. Dinakin and P. Oluseyi, “COMPARATIVE STUDY OF META-HEURISTIC AND CLASSICAL TECHNIQUES FOR AUTOMATIC GENERATION CONTROL OF A MULTI-SOURCE SINGLE-AREA HYDRO-THERMAL-GAS POWER SYSTEM,” *Kufa Journal of Engineering*, vol. 10, no. 3, pp. 151–172, Jul. 2019, doi: 10.30572/2018/kje/100310.
- [20] Shengwei Wang and Xinqiao Jin, “CO₂-Based Occupancy Detection for On-Line Outdoor Air Flow Control,” *Indoor and Built Environment*, vol. 7, no. 3, pp. 165–181, May 1998, doi: 10.1177/1420326x9800700305.
- [21] A. Mirakhorli and B. Dong, “Occupancy behavior based model predictive control for building indoor climate—A critical review,” *Energy and Buildings*, vol. 129. Elsevier Ltd, pp. 499–513, Oct. 01, 2016. doi: 10.1016/j.enbuild.2016.07.036.
- [22] H. Chen, Y. Li, and L. Pao, *Intersample ripple resulting from discrete-time feedforward control*. 2013. doi: 10.1109/ACC.2013.6580471.
- [23] J. Cigler, S. Prívará, Z. Váňa, E. Žáčková, and L. Ferkl, “Optimization of Predicted Mean Vote index within Model Predictive Control framework: Computationally tractable solution,” *Energy Build*, vol. 52, pp. 39–49, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.05.022>.
- [24] X. Xu, S. Wang, Z. Sun, and F. Xiao, “A model-based optimal ventilation control strategy of multi-zone VAV air-conditioning systems,” *Appl Therm Eng*, vol. 29, no. 1, pp. 91–104, Jan. 2009, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2008.02.017.
- [25] S. Goyal, H. A. Ingley, and P. Barooah, “Occupancy-based zone-climate control for energy-efficient buildings: Complexity vs. performance,” *Appl Energy*, vol. 106, pp. 209–221, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.01.039>.
- [26] A. Beltran and A. E. Cerpa, “Optimal HVAC Building Control with Occupancy Prediction,” in *Proceedings of the 1st ACM Conference on Embedded Systems for Energy-Efficient Buildings*, 2014, pp. 168–171. doi: 10.1145/2674061.2674072.

- [27] A. Aswani, N. Master, J. Taneja, D. Culler, and C. Tomlin, “Reducing transient and steady state electricity consumption in HVAC using learning-based model-predictive control,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, no. 1, pp. 240–253, 2012, doi: 10.1109/JPROC.2011.2161242.
- [28] S. R. West, J. K. Ward, and J. Wall, “Trial results from a model predictive control and optimisation system for commercial building HVAC,” *Energy Build*, vol. 72, pp. 271–279, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.037>.
- [29] M. Waseem Ahmad, M. Mourshed, B. Yuce, and Y. Resgui, “Computational intelligence techniques for HVAC systems: A review,” Cardiff, Feb. 2016.
- [30] A. Berouine *et al.*, “A Fuzzy Logic-Based Approach for HVAC Systems Control,” in *2019 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, 2019, pp. 1510–1515. doi: 10.1109/CoDIT.2019.8820356.
- [31] D. Kolokotsa, A. Pouliezios, and G. Stavrakakis, “Sensor fault detection in building energy management systems,” 2005.
- [32] C. Ghiaus, “Fuzzy model and control of a fan-coil,” *Energy Build*, vol. 33, no. 6, pp. 545–551, 2001, doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00097-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00097-9).
- [33] M. Mongkolwongrojn and V. Sarawit, “Implementation of Fuzzy Logic Control for Air Conditioning Systems,” Korea, Jun. 2005.
- [34] M. Schell and D. Int-Hout, “Demand Control Ventilation Using CO₂,” *ASHRAE J*, pp. 18–29, Feb. 2001.
- [35] T. Teixeira and A. Savvides, “Lightweight people counting and localizing for easily deployable indoors WSNs,” *IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing*, vol. 2, no. 4, pp. 493–502, 2008, doi: 10.1109/JSTSP.2008.2001426.
- [36] S. Batterman, “Review and extension of CO₂-based methods to determine ventilation rates with application to school classrooms,” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 14, no. 2. MDPI, Feb. 04, 2017. doi: 10.3390/ijerph14020145.
- [37] G. Serale, M. Fiorentini, A. Capozzoli, D. Bernardini, and A. Bemporad, “Model Predictive Control (MPC) for Enhancing Building and HVAC System Energy Efficiency: Problem Formulation, Applications and Opportunities,” Mar. 2018.

ANEXOS

ANEXO A: VALORES DE EFICÁCIA PARA DIFERENTES MÉTODOS DE VENTILAÇÃO

Configuração da distribuição de ar na zona	ϵ_v
Insuflação pelo teto, ar frio	1
Insuflação pelo teto e extração junto ao pavimento, ar quente	1
Insuflação pelo teto, de ar quente pelo menos 8°C acima da temperatura do local e extração/retorno pelo teto	0,8
Insuflação pelo teto, de ar quente pelo menos 8°C acima da temperatura do local e extração/retorno pelo teto, desde que o jato de ar de insuflação, tenha velocidade superior a 0,8m/s e alcance até 1,4m do pavimento (nota: para velocidades mais baixas, $\epsilon_v = 0,8$)	1
Insuflação de ar frio junto ao pavimento e extração/retorno junto ao teto, desde que o jato de ar de insuflação com uma velocidade de 0,8m/s, tenha um alcance de 1,4m ou mais, em relação ao pavimento.	1
Insuflação de ar frio a baixa velocidade junto ao pavimento e extração junto ao teto, numa estratégia de ventilação do tipo deslocamento, proporcione um fluxo unidirecional e estratificação térmica	1,2
Insuflação de ar quente junto ao pavimento e extração junto ao pavimento, no lado oposto do compartimento	1
Insuflação de ar quente junto ao pavimento e extração/retorno junto ao teto	0,7
Admissão natural de ar no lado oposto do compartimento em relação ao ponto de extração/retorno mecânica	0,8
Admissão natural de ar junto ao ponto de extração/retorno mecânica	0,5
Insuflação de ar quente junto ao pavimento e extração/retorno junto ao teto, no mesmo lado do compartimento ou em localização próxima	0,5
Insuflação de ar frio junto ao teto e extração/retorno junto ao pavimento, do mesmo lado do compartimento ou em localização próxima	0,5

Figura 41 - Relação entre a configuração da ventilação e a eficácia da mesma, retirado da Portaria nº 353-A/2013.

ANEXO B: CÁLCULO DA ZONA CLIMÁTICA DE INVERNO E DE VERÃO

O cálculo das zonas climáticas tanto de inverno como de verão são feitas segundo a equação geral:

$$X = X_{ref} + a \times (z - z_{ref}) \quad (29)$$

Nestes casos altera-se apenas a variável X e X_{ref} em função do valor pretendido para a comparação com os tabelados para cada zona, sendo por norma utilizado graus dia (GD) no caso da estação de aquecimento e $\theta_{ext,v}$ na estação de aquecimento.

No caso do cálculo da zona climática de inverno segue-se a Figura 42 com os valores necessários.

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
Cova da Beira	507	7,1	0	1 687	1 400	7,5	-5	140
Dão-Lafões	497	7,3	0	1 702	1 900	7,5	-6	135
Douro	579	6,9	0	1 764	1 400	6,3	-4	135

Figura 42 - Valores de referência para a estação de aquecimento, retirado e adaptado da Portaria nº 138-I/2021.

Desta forma:

$$GD = 1491 + 1300 \times ((38 - 171) \times 10^{-3}) = 1318,1 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (30)$$

O que comparando com os valores de referência abaixo permitem afirmar que as instalações se encontram numa zona climática de inverno I2.

Critério	$GD \leq 1300 \text{ } ^\circ\text{C}$	$1300 \text{ } ^\circ\text{C} \leq GD \leq 1800 \text{ } ^\circ\text{C}$	$GD > 1800 \text{ } ^\circ\text{C}$
Zona climática inverno	I1	I2	I3

Figura 43 - Zona climática de inverno, retirado da Portaria 138-I/2021.

No que diz respeito ao cálculo da zona climática de verão os valores de referência são diferentes, estando representados na Figura 44.

NUTS III	Z_{REF} m	$\theta_{ext,v}$		G_{sol} [kWh/m ²]								
		$\theta_{ext,v,REF}$ °C	α °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
Cova da Beira	507	22,5	-6	825	225	360	495	495	425	495	495	360
Dão-Lafões	497	21,2	-3	815	220	355	495	490	415	490	495	355
Douro	579	22,7	-6	805	220	350	490	490	420	490	490	350

Figura 44 - Valores de referência para a estação de arrefecimento, retirado e adaptado da Portaria nº 138-I/2021.

Logo:

$$\theta_{ext,v} = 20,7 - 3 \times ((38 - 171) \times 10^{-3}) = 21,1 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (31)$$

Assim sendo, pode afirmar-se que de acordo com os valores de referência para as zonas climáticas de verão, abaixo expostas, as instalações encontram-se numa zona climática de verão V2.

Critério	$\theta_{ext,v} \leq 20 \text{ } ^\circ\text{C}$	$20 \text{ } ^\circ\text{C} \leq \theta_{ext,v} \leq 22 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\theta_{ext,v} > 22 \text{ } ^\circ\text{C}$
Zona climática verão	V1	V2	V3

Figura 45 - Zona climática de verão, retirado da Portaria nº 138-I/2021