



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Filipe Manuel Rodrigues Dionísio

**DESENVOLVIMENTO E TESTE DE MODELOS DE
CONTROLO DO SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO DE
UMA CÂMARA CLIMÁTICA**

Dissertação no âmbito da obtenção de Grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente orientada pelo Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar e Professor Doutor Marco Alexandre dos Santos Fernandes e apresentada no Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Abril de 2021



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Development and Testing of control models of a HVAC system of an Environmental Chamber

Submitted in Partial Fulfilment of the Requirements for the Degree of Master in Mechanical Engineering in the speciality of Energy and Environment

DESENVOLVIMENTO E TESTE DE MODELOS DE CONTROLO DO SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO DE UMA CÂMARA CLIMÁTICA

Autor

Filipe Manuel Rodrigues Dionísio

Orientadores

Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar

Professor Doutor Marco Alexandre dos Santos Fernandes

Júri

Presidente Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes
Professor da Universidade de Coimbra

Vogais Professor Doutor Marco Alexandre dos Santos Fernandes
Professor Auxiliar Convidado da Universidade de Coimbra
Professor Doutor Mário Luís Oliveira de Sousa Mateus
Professor da Universidade de Coimbra

Coimbra, Abril de 2021

“Ao falhar em preparar-se, está a preparar-se para falhar”

Benjamin Franklin (1706-1790)

“Our posturings, our imagined self-importance, the delusion that we have some privileged position in the Universe, are challenged (...) Our planet is a lonely speck in the great enveloping cosmic dark. In our obscurity, in all this vastness, there is no hint that help will come from elsewhere to save us from ourselves.... Like it or not, for the moment the Earth is where we make our stand.”

Carl Sagan, *Pale Blue Dot: A Vision of the Human Future in Space*

Agradecimentos

Ao longo dos 8 meses de realização desta dissertação, bem como em todo o meu percurso académico, recebi muito apoio e assistência de várias pessoas e pelas quais sinto uma enorme gratidão.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à minha família, especialmente à minha mãe e avó que me inspiram todos os dias e que sem elas, não seria o homem que sou hoje.

À minha namorada, Isa, pelos conselhos sábios, ouvidos solidários e por me ter dado sempre força durante o meu percurso académico.

Quero agradecer a todos os meus amigos que Coimbra me proporcionou, dos que ainda cá estão e aos que já seguiram em frente. Um abraço a toda a gente que conheci em Itália e que tornou a minha experiência de ERASMUS fenomenal.

Também gostaria de agradecer os meus dois orientadores, Professor Doutor Adélio Gaspar e o Professor Doutor Marco Fernandes, pelo constante feedback perspicaz que impulsionou o meu trabalho e o elevou a um nível superior e que me permitiu concluir este percurso com sucesso. Aproveito para pedir desculpa ao Professor Doutor Adélio, pela noitada até as 4 da manhã no LAI a arranjar o antigo PC.

Uma nota rápida de agradecimento ao Sr. António Miranda pela sua disponibilidade e apoio técnico na resolução de problemas informáticos maiores que ocorreram ao longo da realização desta dissertação, e que foram muitos e o Sr. José Barbosa que sempre demonstrou disponibilidade para me ajudar com qualquer tipo de problema e também pela simpatia que manifesta todos os dias. Quero também agradecer à ADAI pela oportunidade do tema e pelas condições laboratoriais disponibilizadas durante o desenvolvimento deste trabalho.

Finalmente, eu não poderia ter concluído esta dissertação sem o apoio dos meus colegas colaborativos, António Pires e Gabriel Vieira, que forneceram discussões estimulantes, bem como distrações fora da pesquisa.

Um grande obrigado a todos.

Funding: The work was funded by ASHRAE 2020-2021 ASHRAE Undergraduate Program Equipment Grant, under the framework of the project “Humidifier and dehumidifier systems for a renovated full-scale environmental chamber”.

Abstract

Studies have demonstrated that athletes, who undertake heat acclimation training perform better physically and psychologically during competitions, who are hosted in hot and humid environments. A trend that is noticeable, in the last couple of years, with Rio de Janeiro and Tokyo, being the last and the next Olympic Games hosts. To conduct research on this type of training, it has been used an environmental chamber, located in the Industrial Aerodynamics Laboratory (LAI).

The manipulation of the air psychrometric parameters is achieved by two Air Handling Units (AHU) and one Fresh Air Handling Unit (FAHU) and it is controlled by a control program, developed in LabVIEW. With the perspective of improving the service provided to athletes, it was proposed to the author the improvement of the control program, as well as to add different features to the chamber.

In this regard, a new automatized humidification and dehumidification system was implemented, since the humidifier could only be activated manually, and the dehumidifier was deactivated. For protection purpose and to improve the control signal, an output rate PID controller was incorporated. A system has been added that correlates the level of CO₂ with the flow of fresh air. In terms of graphics, a new interface and a remote-control system was developed. A new computer was installed, along with new DAQ and new output-signal device.

The analysis of the output rate PID controller influence shows a strong correlation between the value of the output rate, the overshoot and deadtime and a weak or non-existence correlation between rise-time and this rate. In this analysis, it was possible to configure the combination of limiting values for better system performance. In addition, the performance of the system during heating was analysed and a quick analysis was made to the PID controllers for automatic gain configuration (Autotuning).

Keywords Acclimation training, LabVIEW, Output rate PID controller, HVAC control system, Environmental chamber, ADAI

Resumo

Vários estudos têm demonstrado que a realização de treino de aclimação permite aos atletas melhorar o seu desempenho durante provas que se realizam em ambientes quentes e húmidos. Uma tendência bastante notória, nos últimos anos, com a eleição do Rio de Janeiro e Tóquio como cidades-anfitriãs dos Jogos Olímpicos. Com o intuito de realizar investigações sobre este tipo de treino, adaptou-se uma câmara climática situada no Laboratório de Aerodinâmica Industrial (LAI) construída para estudos de conforto térmico.

O ambiente da câmara em estudo é manipulado por três grupos de tratamento de ar e controlado por um programa, desenvolvido em LabVIEW. Com a perspetiva de melhorar o serviço prestado aos atletas, foi proposto ao autor aperfeiçoar o programa de controlo, bem como adicionar diferentes funcionalidades.

Nesse sentido, foi implementado e automatizado o processo de desumidificação e humificação, uma vez que o humidificador apenas podia ser ativado manualmente e o desumidificador se encontrava desativado. Ambos os equipamentos foram protegido por um controlador PID que limita a evolução do sinal de envio. Foi também desenvolvido um sistema que correlaciona o nível de CO₂ com o caudal de ar novo, tendo-se, no seguimento, reativado a UTAN. Em termos gráficos, foi desenvolvida uma nova interface e um sistema de controlo remoto. Procedeu-se à instalação de um novo computador assim como novos equipamentos DAQ e envio de sinal, e também à atualização para uma nova versão do software de controlo.

No estudo da influência do controlador limitador, demonstrou-se a correlação do valor limitador com o *Overshoot*, *rise-time* e *deadtime* durante o processo de humificação. Nesta análise, foi possível, definir a combinação de valores limitadores para melhor performance do sistema. Além disso, foi analisada a performance do sistema durante o processo de aquecimento e foi realizada uma análise aos controladores PID de configuração automática dos parâmetros (*Autotuning*).

Palavras-chave: Treinos de aclimação, LabVIEW, Controlador PID limitador, Controlo de um sistema AVAC, Câmara climática, ADAI

Índice

Agradecimentos	iii
Abstract.....	v
Resumo.....	vii
Índice.....	ix
Índice de Figuras.....	xi
Índice de Tabelas.....	xiii
Nomenclatura	xv
Lista de Símbolos e Abreviaturas.....	xv
1. Introdução	1
1.1 Propósito e Motivação	2
1.1.1 Contexto histórico: Jogos Olímpicos 1968.....	2
1.1.2 Contexto atual: Jogos Olímpicos 2020.....	3
1.1.3 WBGT	5
1.2 Objetivos.....	6
2. Revisão bibliográfica.....	7
2.1 Fundamentos teóricos de climatização.....	7
2.1.1 Introdução.....	7
2.1.2 Parâmetros de ar húmido	7
2.1.3 Unidade de tratamento de Ar – UTA.....	10
2.2 Fundamentos teóricos de controlo	11
2.2.1 Introdução.....	11
2.2.2 Caracterização de sistemas de controlo	11
2.2.3 Definição de terminologias	12
2.2.4 Técnicas de controlo.....	14
3. Caso de estudo.....	19
3.1 Introdução	19
3.2 GTA I e GTA II	21
3.3 Humidificador	22
3.4 GTA III	23
3.5 Desumidificador	24
3.6 GTA IV	25
3.7 Componentes de controlo.....	25

3.7.1	Introdução.....	25
3.7.2	Sensores.....	26
3.7.3	Aquisição de sinal.....	27
3.7.4	Envio de sinal.....	28
3.8	Sistema de controlo.....	31
3.8.1	Introdução.....	31
3.8.2	Historial e Estrutura do programa.....	32
3.8.3	Controlo de temperatura.....	33
3.8.4	Controlo de humidade.....	34
4.	Matriz Desenvolvida.....	37
4.1	Introdução.....	37
4.2	Upgrade do software e hardware de controlo.....	37
4.2	Sistema de controlo de temperatura.....	41
4.2.2	Sistema de controlo de temperatura do GTA II.....	43
4.3	Sistema de controlo de humidade.....	44
4.3.1	Proteção do humidificador e do desumidificador.....	45
4.4	Sistema de controlo do nível de CO2 - Insuflação de ar novo.....	46
4.4.1	Necessidade.....	46
4.4.2	Reativação do GTA III.....	46
4.5	Nova <i>Graphics User Interface</i>	52
4.6	Programa simplificado.....	54
4.7	Controlo remoto.....	56
4.7.1	Sistema remoto via <i>Web Server</i>	56
4.7.2	Sistema remoto via App.....	57
4.8	Substituição de transdutores.....	58
5.	Avaliação da matriz desenvolvida.....	61
5.1	Testes Prévios.....	61
5.2	Teste ao controlador limitador implementado.....	62
5.3	Teste ao sistema de controlo.....	68
5.4	Teste aos controladores PID Autotuning.....	71
6.	Conclusão.....	75
7.	Bibliografia.....	77
	ANEXOS.....	1

Índice de Figuras

FIGURA 1 - ALTITUDE DE TODAS AS CIDADES ANFITRIÃS DE TODAS AS EDIÇÕES DOS JOGOS OLÍMPICOS DA ERA MODERNA	2
FIGURA 2 - DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE CLIMA SEGUNDO A CLASSIFICAÇÃO KÖPPEN-GEIGER [8]	3
FIGURA 3 - DISTRIBUIÇÃO PROBABILÍSTICA DA HUMIDADE RELATIVA REGISTADA (2010-2019) EM TÓQUIO	4
FIGURA 4 - DISTRIBUIÇÃO PROBABILÍSTICA DA TEMPERATURA MÍNIMA REGISTADA (2010-2019) EM TÓQUIO	4
FIGURA 5 - DISTRIBUIÇÃO PROBABILÍSTICA DA TEMPERATURA MÁXIMA REGISTADA (2010-2019) EM TÓQUIO	4
FIGURA 6 - RELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA DO AR E PERCENTAGEM DE DESISTÊNCIAS [25]	8
FIGURA 7 - DISTRIBUIÇÃO DAS PERFORMANCES [25]	8
FIGURA 8 - DEPENDÊNCIA DA PERCENTAGEM DE DESISTÊNCIAS EM RELAÇÃO À TEMPERATURA [24]	8
FIGURA 9 - DEPENDÊNCIA DA PERCENTAGEM DE DESISTÊNCIAS EM RELAÇÃO À HUMIDADE ABSOLUTA [24]	9
FIGURA 10 - CORTE SECÇÃO TRANSVERSAL DE UM EXEMPLO DE UMA UTA.....	10
FIGURA 11 - SISTEMA DE CONTROLO DE MALHA ABERTA.....	12
FIGURA 12 - SISTEMA DE CONTROLO DE MALHA FECHADA.....	12
FIGURA 13 - RESPOSTA DE UM SISTEMA DE SEGUNDA ORDEM.....	13
FIGURA 14 - RESPOSTA DE UM SISTEMA DE SEGUNDA ORDEM COM DEADTIME	13
FIGURA 15 - SISTEMA DE CONTROLO DE MALHA FECHADA COM DISTÚRBIOS	14
FIGURA 16 - RESPOSTA DE UM SISTEMA DE CONTROLO ON/OFF [27]	14
FIGURA 17 - RESPOSTA DE UM SISTEMA ON/OFF COM DEADTIME [27]	15
FIGURA 18 - DIAGRAMA DE BLOCOS DE UM ALGORITMO DE CONTROLO PID [28]	16
FIGURA 19 - SISTEMA DE CONTROLO EM CASCATA	18
FIGURA 20 - REPRESENTAÇÃO 3D DA CÂMARA CLIMÁTICA EM AUTOCAD	19
FIGURA 21 - PLANTA DA CÂMARA CLIMÁTICA	20
FIGURA 22 - ESQUEMA DOS ELEMENTOS CONSTITUINTES DO GTA I E GTA II.....	21
FIGURA 23 - CONSTITUINTES DO HUMIDIFICADOR NOVAP 3000	22
FIGURA 24 - ESQUEMA DOS EQUIPAMENTOS CONSTITUINTES DO GTA III	23
FIGURA 25 - ILUSTRAÇÕES DOS CAUDAIS INTERNOS DO DESUMIDIFICADOR INSTALADO NA CÂMARA	24
FIGURA 26 - ESQUEMA DE PRINCÍPIO DO FUNCIONAMENTO DO DESUMIDIFICADOR INSTALADO NA CÂMARA	24
FIGURA 27 - ABERTURA EM FUNÇÃO DA CORRENTE DA VÁLVULA	29
FIGURA 28 - ILUSTRAÇÃO DO SISTEMA DE ENVIO DE SINAL.....	30
FIGURA 29 - ILUSTRAÇÃO DE CORTE TRANSVERSAL DE UM POTENCIÓMETRO	31
FIGURA 30 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO PROGRAMA CRIADO EM 2008	32
FIGURA 31 - INTERFACE DO PROGRAMA CRIADO EM 2008.....	32
FIGURA 32 - ESQUEMA DE CONTROLO DA TEMPERATURA DO GTA I E GTA II [26]	34
FIGURA 33 - ESQUEMA DE CONTROLO DA HUMIDADE (PROCESSO DE HUMIDIFICAÇÃO) [26].....	34
FIGURA 34 - ESQUEMA DE CONTROLO DA HUMIDADE (PROCESSO DE DESUMIDIFICAÇÃO) [26]	35
FIGURA 35 - COMPUTADOR NOVO (WINDOWS 10)	38
FIGURA 36- COMPUTADOR ANTIGO (WINDOWS XP).....	38
FIGURA 37 - MÓDULO DE ENVIO ADQUIRIDO, MCC USB-3106	38
FIGURA 38 - MÓDULO DE AQUISIÇÃO ADQUIRIDO, MCC USB-1608G	39
FIGURA 39 – QUADRO DE SINAL ANTIGO	40
FIGURA 40 – QUADRO DE SINAL ATUAL.....	40
FIGURA 41 - DIAGRAMA DO CONTROLO PID EM CASCATA DA TEMPERATURA NO GTA I	41
FIGURA 42 - BOTÃO DE SELEÇÃO NA INTERFACE PARA CONTROLO DA TEMPERATURA PELA VARIÁVEL TPAR	41
FIGURA 43 - BOTÃO DE SELEÇÃO NA INTERFACE PARA CONTROLO DA TEMPERATURA PELA VARIÁVEL TDIF	43
FIGURA 44 - DIAGRAMA DO CONTROLO PID EM CASCATA DA TEMPERATURA NO GTA II	43
FIGURA 45 - DIAGRAMA DE BLOCOS DA PROGRAMAÇÃO DOS NÍVEIS DE DESUMIDIFICAÇÃO.....	45
FIGURA 46 - SINAL DE SAÍDA DO CONTROLO PID DE HUMIDIFICAÇÃO.....	45
FIGURA 47 - SINAL DE SAÍDA DO CONTROLADOR PID DE HUMIDIFICAÇÃO COM PID LIMITADOR.....	46
FIGURA 49 - INSTALAÇÃO DA BOMBA DO GTA IV NO GTA III.....	47

FIGURA 48 - REMOÇÃO DA BOMBA CIRCULATÓRIA DANIFICADA.....	47
FIGURA 50 - DIAGRAMA DO CONTROLO PID EM CASCATA DA TEMPERATURA NO GTA III	48
FIGURA 51 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE UM SENSOR NDIR.....	48
FIGURA 52 - SENSOR DE CO ₂ ADQUIRIDO INSTALADO NA CÂMARA CLIMÁTICA	50
FIGURA 54 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO CONTROLO DE CO ₂	51
FIGURA 53 - BOTÃO DE SELEÇÃO NA INTERFACE DO MODO DE CONTROLO DO SISTEMA DE CO ₂	51
FIGURA 55 - NOVA INTERFACE DO PROGRAMA DE CONTROLO	53
FIGURA 56 - INTERFACE DO PROGRAMA DE CONTROLO SIMPLIFICADO	55
FIGURA 57 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA FERRAMENTA <i>WEB SERVER</i>	56
FIGURA 58 - INTERFACE DA APP DE CONTROLO REMOTO	57
FIGURA 59 - CIRCUITO ELETRÓNICO MONTADO PARA TESTE DOS TRANSDUTORES SUSPEITOS DE ESTAREM DANIFICADOS	59
FIGURA 60 - TESTE PRELIMINAR REALIZADO ÀS RESISTÊNCIAS DO GTA I E GTA II.....	61
FIGURA 61 - TESTE PRELIMINAR REALIZADO AO HUMIDIFICADOR.....	62
FIGURA 63 - STEP RESPONSE DO SISTEMA AO PROCESSO DE HUMIDIFICAÇÃO COM VALOR LIMITADOR 20, E 30 (O SETPOINT ENCONTRA-SE MARCADO A PRETO)	63
FIGURA 62 - STEP RESPONSE DO SISTEMA NOS ENSAIOS DE HUMIDIFICAÇÃO COM VALOR LIMITADOR 70, 80, 90 E 100 (O SETPOINT ENCONTRA-SE MARCADO A PRETO)	63
FIGURA 64 - STEP RESPONSE DO SISTEMA AO PROCESSO DE HUMIDIFICAÇÃO COM VALOR LIMITADOR 100/20, 100/40, 100/50 o SETPOINT ENCONTRA-SE MARCADO A PRETO)	66
FIGURA 66 - COMPARAÇÃO DO TEMPO DE SUBIDA REGISTADO NOS ENSAIOS DE HUMIDIFICAÇÃO COM SETPOINT 70%, CONTROLANDO TCAM (AZUL) E TPAR (LARANJA).....	67
FIGURA 65 - COMPARAÇÃO DO TEMPO DE SUBIDA REGISTADO NOS ENSAIOS DE HUMIDIFICAÇÃO COM SETPOINT 70%, CONTROLANDO TCAM (AZUL) E TPAR (LARANJA).....	67
FIGURA 67 - STEP RESPONSE DO SISTEMA AO PROCESSO DE AQUECIMENTO, COM SETPOINT DE 28 °C (O SETPOINT ENCONTRA-SE MARCADO A PRETO).....	68
FIGURA 68 - VALORES DE OVERSHOOT REGISTADOS NOS ENSAIOS DE AQUECIMENTO E HUMIDIFICAÇÃO (VALOR MÉDIO ASSINALADO A VERDE)	69
FIGURA 69 - VALORES DO TEMPO DE SUBIDA REGISTADOS NOS ENSAIOS DE AQUECIMENTO E HUMIDIFICAÇÃO (VALOR MÉDIO ASSINALADO A VERDE)	71
FIGURA 70 - JANELA <i>POP-UP, AUTOTUNING WIZARD</i> (PID AUTOTUNING).....	72

Índice de Tabelas

TABELA 1 - RELAÇÃO DO ÍNDEX WBGT COM O RISCO DE SAÚDE ASSOCIADO [14].....	5
TABELA 2 - ÍNDEX WBGT DE TÓQUIO E DAS ÚLTIMAS 3 EDIÇÕES DOS JOGOS OLÍMPICOS (ADAPTADO [15])	5
TABELA 3 - PARÂMETROS DO MÉTODO DE CALIBRAÇÃO ZIEGLER-NICHOLS [22].....	17
TABELA 4 - CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DOS SENSORES.....	26
TABELA 5 - PRINCIPAIS ESPECIFICAÇÕES DA PLACA PCI NI-6220	27
TABELA 6 - CONFIGURAÇÕES EXISTENTES PARA ADQUIÇÃO DE SINAL	28
TABELA 7 - PRINCIPAIS ESPECIFICAÇÕES DA PLACA DT-2815.....	28
TABELA 8 - PRINCIPAIS ESPECIFICAÇÕES DO MÓDULO MCC USB-3106	39
TABELA 9 - PRINCIPAIS ESPECIFICAÇÕES DO MÓDULO MCC USB-1608G	39
TABELA 10 - TABELA DE COMPARAÇÃO ENTRE OS TIPOS DE SENSORES CO ₂ CONSIDERADOS	49
TABELA 11 - PRINCIPAIS ESPECIFICAÇÕES DO SENSOR NDIR ADQUIRIDO	50
TABELA 12 - CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DOS SENSORES (ATUALIZADA)	52
TABELA 13 – <i>MAXIMUM OVERTSHOOT (MO)</i> E <i>PERCENT OVERTSHOOT (PO)</i> REGISTRADOS NOS ENSAIOS DE HUMIDIFICAÇÃO COM VALORES LIMITADORES IGUAIS PARA O HUMIDIFICADOR E O DESUMIDIFICADOR	64
TABELA 14 - TEMPO DE SUBIDA E <i>DEADTIME</i> REGISTRADO DURANTE UM PROCESSO DE HUMIDIFICAÇÃO COM VALORES LIMITADORES IGUAIS PARA O HUMIDIFICADOR E O DESUMIDIFICADOR	65
TABELA 15 – <i>MAXIMUM OVERTSHOOT</i> E <i>PERCENT OVERTSHOOT</i> REGISTRADO NOS ENSAIOS DE HUMIDIFICAÇÃO COM VALORES LIMITADORES MISTOS	66
TABELA 16 – <i>MAXIMUM OVERTSHOOT</i> E <i>PERCENT OVERTSHOOT</i> REGISTRADO NOS ENSAIOS DE HUMIDIFICAÇÃO COM VALORES LIMITADORES DE 1000/60 E 100/70, COM E SEM CONDICIONANTE.....	67
TABELA 17 - <i>DEADTIME</i> , <i>SETTLING TIME</i> E ERRO <i>STEADY-STATE</i> REGISTRADOS NOS ENSAIOS DE AQUECIMENTO CONTROLANDO A VARIÁVEL TCAM	68
TABELA 18 - <i>DEADTIME</i> , <i>SETTLING TIME</i> E ERRO <i>STEADY-STATE</i> REGISTRADOS NOS ENSAIOS DE AQUECIMENTO CONTROLANDO A VARIÁVEL TPAR.....	69
TABELA 19 – <i>MAXIMUM OVERTSHOOT</i> E <i>PERCENT OVERTSHOOT</i> REGISTRADO NOS ENSAIOS DE AQUECIMENTO E HUMIDIFICAÇÃO COM VALORES LIMITADORES IGUAIS E COM/SEM CONDICIONANTE	70
TABELA 20 - COMPARAÇÃO ENTRE VALORES OBTIDOS PELO MÉTODO TENTATIVA-ERRO E PELO PID AUTOTUNING TEMPERATURE VI	73

Nomenclatura

Lista de Símbolos e Abreviaturas

A/D – Analógico/Digital

ADAI - Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial

AGND – Analog Ground (Terra Analógica)

AI – Analog Input

AO – Analog Output

AVAC - Aquecimento, Ventilação e Ar Conicionado

C - Variável de processo

C' - *Feedback* ou Realimentação

D/A – Digital/Analógico

DAQ - Data Acquisition

E – Erro

EGU – Engineering Units

FCTUC - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

FDUC - Faculdade de Desporto da Universidade de Coimbra

GND – GROUND (Terra)

GTA –Grupo de Tratamento de Ar

GUI - Graphics User Interface

K_c – Constante proporcional crítica

K_p – Constante proporcional

LAI - Laboratório de Aerodinâmica Industrial

MO – Maximum Overshoot

NDIR - Non-Dispersive Infrared

NRSE - Non-Referenced Single Ended

PID – Proporcional, Integral e Derivativo

PO – Percent Overshoot

P_u – Período de oscilação de U

r – Fator de correlação

RSE - Referenced Single Ended

RTD - Resistance Temperature Detector

SI – Sistema Internacional

SO – Sistema Operativo

SP, R– Setpoint

SR – Slew Rate

T – Temperatura

T_d – Tempo derivativo

T_i – Tempo integral

U – Valor de saída do controlador

UTA – Unidade de Tratamento de Ar

V, W – Distúrbios

V_{INST} , – Caudal instantâneo

W – Humidade absoluta

ϕ , HR – Humidade relativa

VI – Virtual Instruments

WBGT - Wet-Bulb Globe Temperature

1. Introdução

A aclimação é um método de treino muito praticado nos dias de hoje por atletas de alta competição e consiste, simplificada, em impor uma adaptação fisiológica do corpo para compensar as perturbações causadas por diferentes condições climáticas [1], tornando o corpo mais adaptado ao clima e, portanto, mais eficiente e competente para produzir melhores performances e, conseqüentemente, melhores resultados [1], [2].

O método consiste em dois tipos - aclimação ao calor e à altitude. Aclimação ao calor é, como o próprio nome indica, um tipo de treino que é direcionado a melhorar a performance dos atletas em climas quentes e húmidos, muito comum em atletas de desportos de esforço [3] como a maratona e marcha. Aclimação à altitude é, de certa forma, diferente da aclimação ao calor, pois não prepara os atletas para altitudes médias/elevadas, mas antes prepara e desenvolve a habilidade dos atletas para uma melhor utilização do oxigénio em baixas altitudes, devido à maior produção de hemoglobina no sangue [4], [5], aumentando assim a capacidade de transporte e absorção de oxigénio pelo corpo [2]. Este treino é maioritariamente utilizado por ciclistas e nadadores.

Com o objetivo de um estudo aprofundado sobre os efeitos no corpo humano de diferentes ambientes térmicos foi instalada uma câmara climática no Laboratório de Aerodinâmica Industrial (LAI), da Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial (ADAI) da Universidade de Coimbra. Esta instalação foi posteriormente adaptada e utilizada nos últimos anos para a realização de treino de aclimação ao calor de atletas de alta competição como Dulce Félix, Jéssica Augusto entre outros, em competições como os Jogos Olímpicos 2016 no Rio de Janeiro, Brasil e o Campeonato do Mundo de Atletismo 2019, em Doha, capital do Qatar. Este projeto é uma parceria entre a Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (FCTUC) e a Faculdade de Desporto da Universidade de Coimbra (FDUC).

Como caso de estudo para esta tese, pretende-se desenvolver as capacidades da câmara para uma melhor simulação das condições climáticas em que os atletas competirão no Verão, sendo este treino, uma etapa crucial na preparação dos atletas participantes na próxima edição dos Jogos Olímpicos, que se realizará em Tóquio.

1.1 Propósito e Motivação

1.1.1 Contexto histórico: Jogos Olímpicos 1968

Em 1963, O Comité Olímpico Internacional elegeu a Cidade do México como anfitriã dos Jogos Olímpicos de 1968, a décima nova edição dos Jogos Olímpicos da Era Moderna. Esta eleição foi controversa, com preocupações geográficas no centro da polémica, pela razão de que a capital do México se encontra a média altitude [6], mais precisamente, 2316 m - 7350 feet - acima do nível do mar [7], o que é bastante superior relativamente às altitudes das anteriores cidades-anfitriãs dos Jogos, como se pode confirmar na Figura 1.

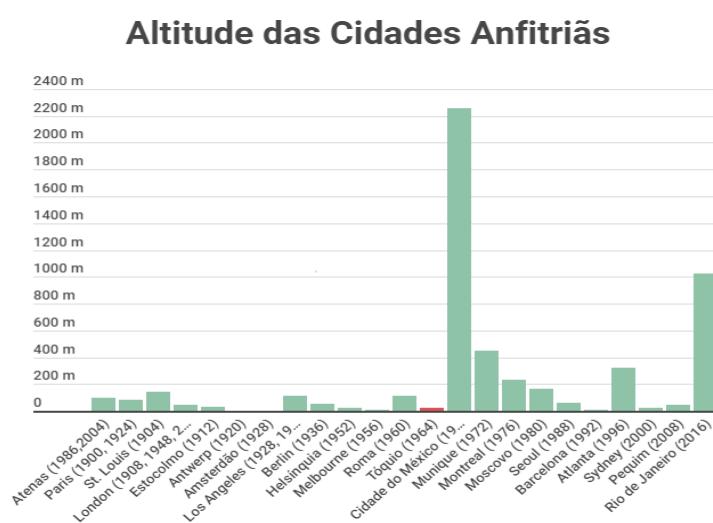


Figura 1 - Altitude de todas as cidades anfitriãs de todas as edições dos Jogos Olímpicos da Era Moderna

Criou-se um intenso debate acerca do efeito deste fator extrínseco no desempenho dos atletas, e cientistas previram que competições de esforço explosivo retirariam benefícios e provas de esforço seriam prejudicadas. Tal foi comprovado pelos recordes mundiais em todas as corridas masculinas de 400m, 200m e 100m, salto em comprimento e triplo salto [8]. Devido a esta especulação, vários estudos foram realizados, descobrindo que a altitude tem efeitos físicos como a diminuição da resistência do ar. Ao nível do mar, 11% da energia consumida pelo atleta para correr 1600 metros é atribuída à resistência do ar e na Cidade do México é apenas de 8% [9]. Além disso, afeta fisiologicamente o ser humano, ao nível do fornecimento de oxigénio ao corpo, que se torna inadequado como resultado da baixa pressão parcial do oxigénio e diminuição do conteúdo do oxigénio no sangue arterial [10].

Devido à polémica em torno deste evento desportivo, iniciou-se um processo de pesquisa científica em relação à influência e impacto das condições climáticas na performance dos atletas de alta competição, o que levou ao desenvolvimento dos métodos de treino de aclimação.

1.1.2 Contexto atual: Jogos Olímpicos 2020

Devido à pandemia de Covid-19 (vírus SARS-CoV-2), os Jogos Olímpicos previsto para se realizarem em Tóquio, no verão de 2020, foram adiados para 2021 e foram definidas novas datas: de 23 de julho (cerimónia de abertura) a 8 de agosto (cerimónia de encerramento).

A altitude não exercerá tanta influência nas performances dos atletas olímpicos em Tóquio, que se situa a 69 m acima do nível do mar, em comparação ao que aconteceu na Cidade do México. Porém, existem outros fatores extrínsecos que podem ter elevada influência nos resultados, como a temperatura e a humidade. De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger (Figura 2), a capital nipónica é classificada como clima subtropical húmido, Cfa [11], caracterizado pelos autores da classificação, como clima temperado quente e totalmente húmido, com verões quentes ($T_{máx} \geq +22^{\circ}\text{C}$). Acresce que Tóquio, atualmente, detém a maior área metropolitana do mundo [12], onde os efeitos da elevada urbanização provocam alterações ambientais, dificultando a adaptação ao clima [13], [14]. Exemplo disto foi o facto de em julho de 2018, durante a maior onda de calor registada nas últimas décadas no Japão, cerca de 138 pessoas terem morrido e mais de 700000 pessoas terem sido hospitalizadas por insolação [15].

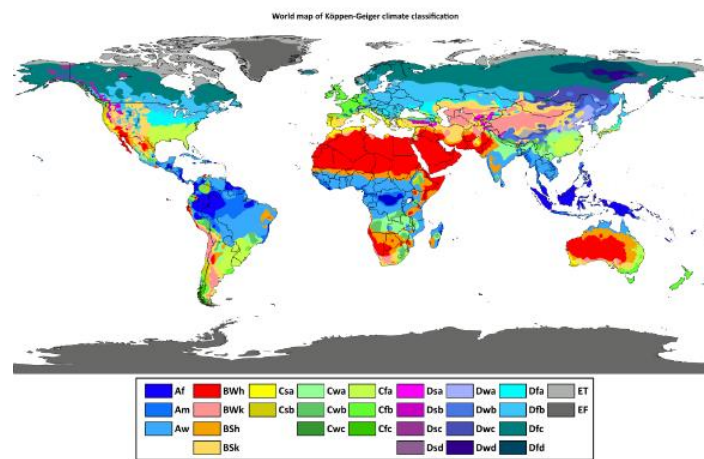


Figura 2 - Distribuição dos tipos de clima segundo a classificação Köppen-Geiger [8]

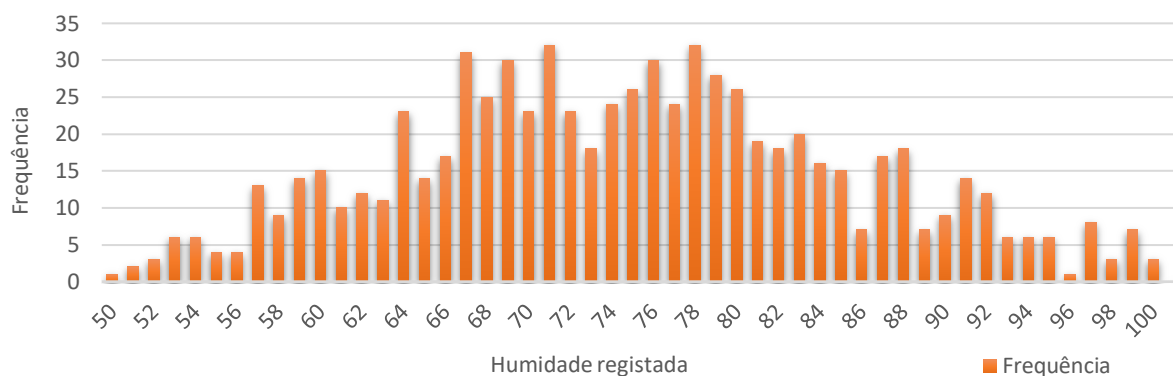


Figura 3 - Distribuição probabilística da Humidade Relativa registada (2010-2019) em Tóquio

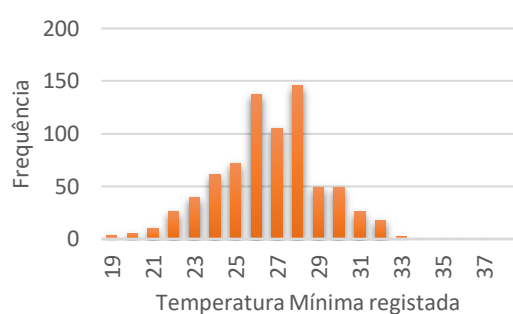


Figura 4 - Distribuição probabilística da Temperatura Mínima registada (2010-2019) em Tóquio

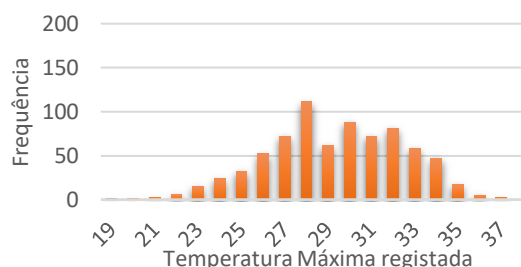


Figura 5 - Distribuição probabilística da Temperatura Máxima registada (2010-2019) em Tóquio

Os valores de levantamento da $T_{máx}$, $T_{mín}$ e RH registados nos últimos 10 anos em Tóquio no mesmo período que decorrerão os Jogos (23 de Julho a 8 de Agosto), apresentando-os nas Figuras 3, 4 e 5 com o objetivo de desenvolver as distribuições probabilísticas destas três variáveis.

Segundo as probabilidades de ocorrência, a capital nipónica apresentará temperaturas entre 26,6 °C e 29,4°C e humidade relativa de ~75%, durante os dias de competição. Em comparação, os Jogos Olímpicos de 2016 foram realizados na cidade tropical do Rio de Janeiro que apresentou condições ambientais entre 19,6 °C e 28,7 °C de temperatura do ar, com humidade relativa de ~71% [16]. Podemos concluir que os Jogos Olímpicos de 2021 apresentarão grandes desafios, mormente no que às condições climáticas respeita, o que pode ser facilmente comprovado também pelo *index* WBGT.

1.1.3 WBGT

Atualmente, a recomendação mais comum seguida pelos organizadores de eventos desportivos na tomada de decisão de adiar ou cancelar um evento baseia-se no índice WBGT, sigla para *Wet-Bulb Globe Temperature*. Este índice combina a temperatura ambiente, a humidade relativa, a velocidade e potência de arrefecimento do vento, o impacto da carga calorífica da radiação solar, temperatura de bolbo húmido natural e temperatura de ar [17], [18], [19]. O conceito foi desenvolvido pelo Exército Americano e, posteriormente, foi adotado por várias federações desportivas em todo o mundo, como se encontra descrito na Tabela 1.

Tabela 1 - Relação do índice WBGT com o risco de saúde associado [20]

WBGT [°C]	ATIVIDADE CONTÍNUA/COMPETIÇÃO
≤ 18,4	Geralmente Seguro
18,4 – 22,2	Risco elevado de EHS (apenas indivíduos de alto risco)
22,3 – 25,6	Risco médio de EHS (todos os indivíduos)
25,7 – 27,8	Risco elevado de EHS (apenas indivíduos não aclimatizados)
≥ 27,8	Risco elevado de EHS (todos os indivíduos) Cancelamento da atividade/competição

Num estudo realizado em 2017, os autores compararam os valores do indicador WBGT de Tóquio com as últimas três cidades-anfitriãs (Rio de Janeiro 2016, Londres 2012 e Pequim 2008), utilizando os dados de temperatura e humidade a cada 3h do dia (00:00, 03:00, 06:00, 09:00, 12:00, 15:00, 18:00, 21:00, 24:00) de um intervalo de tempo de 10 anos (2008-2017), resultados que se apresentam na Tabela 2.

Tabela 2 - Índice WBGT de Tóquio e das últimas 3 edições dos Jogos Olímpicos (Adaptado [21])

	00:00	03:00	06:00	09:00	12:00	15:00	18:00	21:00
Tóquio	30	30	30	33	34	34	33	31
Rio de Janeiro	23	23	22	26	31	30	29	26
Londres	18	17	18	21	22	22	21	19
Pequim	21	21	24	29	31	31	27	24

Relacionando os seus valores da Tabela 1 com a Tabela 2, deduz-se que a competição em Tóquio estaria no último patamar caracterizado por “*cancel level EHS risk*”, com *EHS*, sigla para *Environment Heath and Safety risk*. Com a análise deste índice, conclui-se mais uma vez que o clima causará inevitáveis dificuldades aos participantes do evento desportivo e, por isso mostra-se imprescindível o uso do método de treino de aclimação ao calor e clarifica a importância da reativação e desenvolvimento da câmara em estudo.

1.2 Objetivos

A câmara climática em estudo e o seu sistema de controlo foram concebidos, na década de 1990 por Pina Amaral, sob a coordenação do Professor Doutor Divo Quintela e com a colaboração de dois professores da Universidade Técnica da Dinamarca, Profs. Arsen Melikov e Peder Kjerulf-Jensen. A primeira versão do sistema de controlo foi implementada ocorreu em 2004, obra do Professor Doutor Adélio Gaspar, e a segunda versão levada a cabo em 2007/2008 por Fernando Aires na sua dissertação de mestrado, marcada pelo início da utilização do LabVIEW, versão 8.5, como software do sistema de controlo da instalação [22].

Passados 12 anos da última atualização, pretende-se atualizar e expandir, em termos de funcionalidades, o sistema para melhor controlo do ambiente térmico na câmara climática, com os objetivos principais a que o autor se propõe a realizar: desenvolvimento de um sistema melhorado do controlo de temperatura, a ativação e desenvolvimento de um sistema aperfeiçoado e modernizado de controlo de humidade e a renovação do software e hardware do sistema de controlo.

Simultaneamente, o autor propõe-se a desenvolver e melhorar a monitorização de diferentes fatores do ambiente da câmara climática, como um sistema de controlo de insuflação de ar novo correlacionado com o nível de dióxido de carbono na câmara climática, com o objetivo de tornar mais eficiente o procedimento de treino de aclimatização, tanto para os atletas como para o staff que os acompanha durante este processo, com o desenvolvimento de sistemas que permitem o controlo remoto. Também se pretende a alteração da *Graphics User Interface* (GUI) que mais se adequa ao utilizador comum.

2. Revisão bibliográfica

2.1 Fundamentos teóricos de climatização

2.1.1 Introdução

Neste subcapítulo, serão apresentados a terminologia e os conceitos teóricos que permitirão ao leitor uma melhor compreensão e entendimento dos processos de climatização e tratamento do ar realizados nas instalações da câmara climática, nomeadamente na aclimação de atletas de alta competição.

2.1.2 Parâmetros de ar húmido

2.1.2.1 Temperatura

A temperatura do ar húmido é, sem dúvida, a grandeza mais utilizada, pelo facto de ser uma das mais importantes nos processos que regem os fenómenos de transmissão de calor entre dois ou mais corpos [23]. Convém, então, perceber de que maneira é que este parâmetro afeta a performance dos atletas de uma forma detalhada e entender as consequências da não realização de um treino de aclimação ao calor apropriado podem trazer ao desportista.

A faixa normal de temperatura do corpo humano é normalmente 36,5 - 37,5 ° C. Durante esforço físico elevado, a produção metabólica de calor é aproximadamente dez vezes mais alta do que em repouso [24]. Para além disso, em provas realizadas em ambiente exterior, o atleta é aquecido pela radiação solar. Para manter a temperatura interna na faixa de valores ideais, o calor excessivo é transportado para a pele (condução) por vários mecanismos como o sistema vascular e, conseqüentemente, é libertado para a atmosfera (convecção). Contudo, este transporte é apenas possível se a temperatura da pele for inferior à temperatura interna. Caso não o seja, o corpo pode entrar em estado de hipertermia (temperatura interna ≥ 39 °C). Este estado leva a uma perda tanto nas capacidades físicas como mentais, prejudicando a sua performance.

Um estudo realizado em 2012 por vários investigadores franceses do Instituto Nacional de Desporto, Experiência e Desempenho (INSEP) analisou perto de 2 milhões de performances de pessoas que competiram entre 2001 e 2010 nas maratonas de Berlim, Boston, Chicago, Londres, Nova Iorque e Paris (6 maratonas x 10 anos = 60 corridas).

De acordo com os resultados, conclui-se que a temperatura do ar é o fator com maior impacto nas performances dos atletas de maratona, sejam estes amadores ou profissionais [25] e que quanto maior a temperatura do ar atmosférico, menor a velocidade média dos atletas. Estas afirmações são justificadas pelo maior número de desistências, quando as corridas foram realizadas em climas mais quentes (Figura 6), e pela ocorrência de uma mudança significativa nos resultados da corrida em toda a gama de distribuição de desempenho quando a temperatura do ar era significativamente mais elevada (Figura 7).

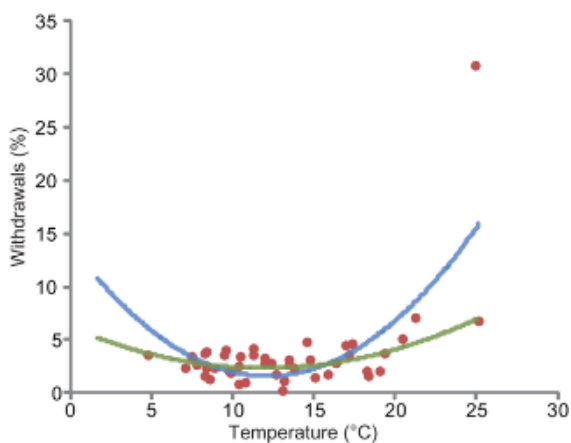


Figura 6 - Relação entre temperatura do ar e percentagem de desistências [25]

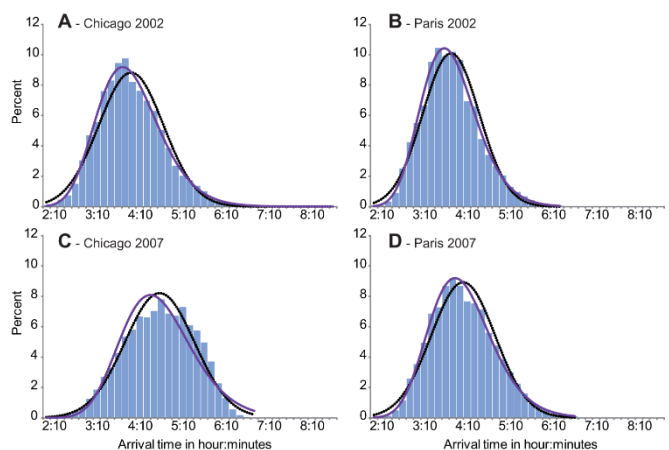


Figura 7 - Distribuição das performances [25]

Num estudo publicado em 2009, onde foram analisados os resultados e performances dos participantes da Maratona Anual de Estocolmo (Suécia) de 1980 a 2008, as conclusões foram bastante semelhantes, como se pode confirmar pela Figura 8.

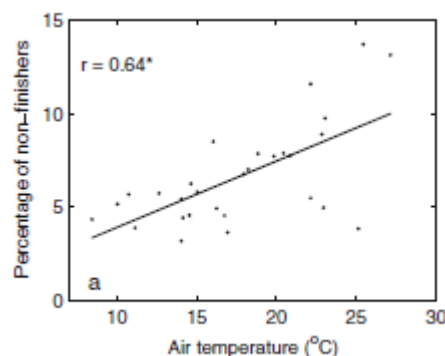


Figura 8 - Dependência da percentagem de desistências em relação à temperatura [24]

2.1.2.2 Humidade

Como foi referido no subcapítulo precedente, um dos grandes desafios que o corpo humano enfrenta durante o esforço físico em climas quentes é a produção de calor excessivo, produto da contração muscular. Um dos principais mecanismos para o corpo se manter na faixa recomendada de temperatura interna é a transpiração, ou para ser mais científico, a evaporação do suor produzido pelo corpo quando este entra em contacto com o ar. Para ocorrer evaporação é necessária uma certa quantidade de energia que é retirada do corpo na forma de calor, reduzindo, assim, a temperatura corporal.

A humidade do ar atmosférico é um parâmetro preponderante e crucial para a ocorrência deste mecanismo. Quanto maior for a humidade absoluta do ar externo, menor é a probabilidade de ocorrer a evaporação do suor produzido, pois significa que o nível de saturação do ar externo é maior. Sem a ocorrência da evaporação, a energia libertada pelo corpo durante o processo de transpiração é reduzida, o que resultará num aumento da temperatura interna corporal que prejudicará a performance do atleta.

O referido estudo de 2009, que analisou todas as edições da Maratona Anual de Estocolmo até 2010, com exceção do ano inaugural, conclui que a humidade absoluta afeta não só o tempo de chegada, como também a quantidade de desistências, conforme a Figura 9.

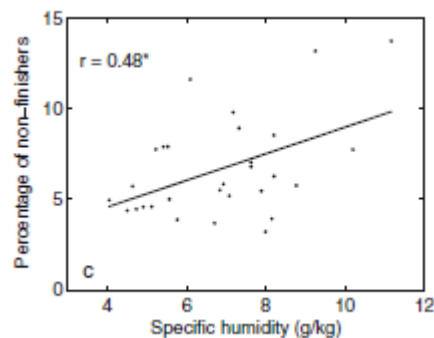


Figura 9 - Dependência da percentagem de desistências em relação à humidade absoluta [24]

O mesmo estudo afirma que “é lamentável que a variável de humidade mais comumente utilizada na caracterização do clima em competições desportivas seja a humidade relativa” [24], justificando esta afirmação pelo facto de a elevada humidade relativa poder significar elevada humidade absoluta ou baixa temperatura do ar atmosférico.

2.1.3 Unidade de tratamento de Ar – UTA

Uma Unidade de Tratamento de Ar, UTA, é um equipamento usado para condicionamento e recirculação de ar em sistemas de “Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado”. As UTAs são equipamentos modulares de estrutura em aço galvanizado, inoxidável ou alumínio, possibilitando variação no seu tamanho, na forma e nos seus constituintes elementares. Em termos de forma, uma UTA pode apresentar um ou dois andares e uma organização em linha, em U ou em L.

Os seus constituintes usuais são elementos de aquecimento/arrefecimento, elementos de filtração, ventiladores, atenuadores de ruído e grelhas de admissão e saída de ar. Ocasionalmente, apresentam elementos para humedificação/desumidificação. Poderão também incluir um módulo de entrada e mistura de ar novo. A Figura 10 é uma representação esquemática de uma unidade de tratamento de ar.

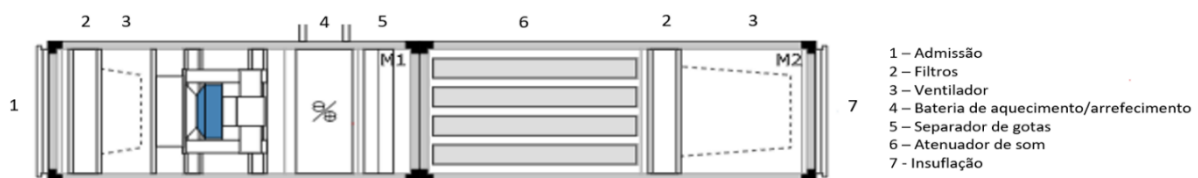


Figura 10 - Corte secção transversal de um exemplo de uma UTA

Por seu lado, uma Unidade de Tratamento de Ar Novo (UTAN) é uma UTA que trabalha exclusivamente com ar novo, recolhendo todo o ar que circula nela do exterior, sem qualquer recirculação de ar.

Existem outros equipamentos/sistemas que permitem o condicionamento, ventilação e a recirculação de ar como *rooftops*, ventiloconvectores, sistemas de volume de refrigerante variável (VRV) entre outros. Contudo, nesta dissertação, o autor focou-se nas unidades de tratamento de ar e unidades de tratamento de ar novo, por ser o tipo de sistema instalado no caso em estudo.

2.2 Fundamentos teóricos de controlo

2.2.1 Introdução

O processo de aclimação ao calor de qualquer ser humano depende de duas variáveis críticas, intensidade e duração. Quanto mais intenso e prolongado for o treino, mais rápido serão observáveis os resultados dessa preparação. Isto significa que é necessário conservar a atmosfera quente e húmida durante um intervalo de tempo considerado. Assim, ao se utilizar uma câmara climática para o efeito, o seu sistema de climatização terá de funcionar de maneira controlada e automática.

Este controlo é efetuado por um equipamento ou sequência de equipamentos de funcionamento *ON/OFF* ou incremental que satisfaçam os valores requisitados pelo utilizador. Este sistema de controlo também deve ser utilizado de forma a tornar o processo de climatização o mais eficiente possível, evitando desperdícios de energia.

2.2.2 Caracterização de sistemas de controlo

Atualmente, é possível encontrar sistemas de controlo em quase todas as áreas da sociedade moderna, desde simples e baratos a sistemas de controlo bastante sofisticados e complexos. Independentemente da complexidade do sistema de controlo, este é sempre composto e definido pelos seguintes elementos [26]:

- Variável de processo, **C(t)**: valor atual da variável do sistema que se está a controlar.
- *Setpoint* ou valor de referência, **R(t)**: valor desejado ou valor alvo para a variável do processo.
- Planta: o próprio sistema que está a ser controlado.
- Atuador: equipamento(s) que atua(m) diretamente na planta.
- Controlador: responsável por calcular o input adequado para o atuador, de acordo com a diferença entre o setpoint e a variável do processo (erro, **E(t)**).
- *Feedback* ou realimentação, **C'(t)**: sistema que permite a leitura da variável de processo e conseqüentemente o cálculo do erro.

Os sistemas de controlo podem ser classificados como sistemas de controlo de malha aberta (*one-loop control system*) e sistemas de controlo de malha fechada (*closed-loop control system*).

Em sistemas de controlo de malha aberta, a saída não é realimentada para a entrada. Portanto, a ação de controlo é independente da saída desejada, conforme a Figura 11.

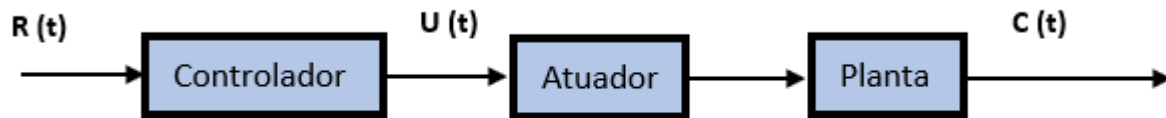


Figura 11 - Sistema de controle de malha aberta

Em sistemas de controle de malha fechada, a saída é realimentada para a entrada. Portanto, a ação de controle depende da saída desejada. A Figura 12 mostra o diagrama de blocos do sistema de controle de malha fechada de *feedback* negativo.

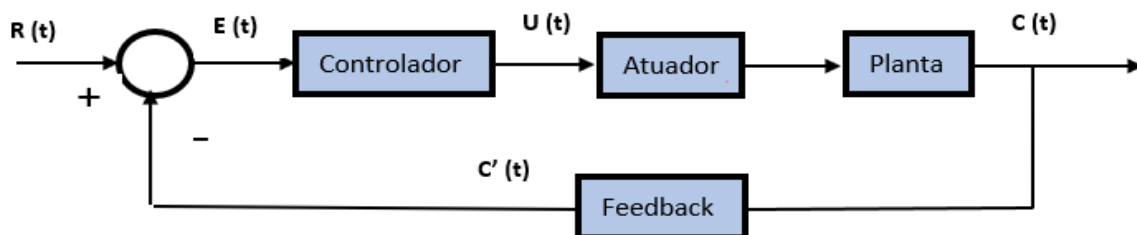


Figura 12 - Sistema de controle de malha fechada

O controlador recebe o sinal de erro ou offset, $E(t)$, que corresponde à diferença entre o valor de setpoint, $R(t)$, e o valor medido pelo sensor ou feedback, $C'(t)$ [(Equação (1))]. O valor de $U(t)$ irá depender do controlador usado. Este valor irá regular o sistema, de forma a ser atingido o valor $R(t)$.

$$E(t) = R(t) - C'(t) \quad (1)$$

2.2.3 Definição de terminologias

Em qualquer projeto de controle é necessária uma avaliação dos parâmetros de performance. Esta avaliação é feita e quantificada através da função, designada por *step response*, que mede a resposta da variável de processo desde o comando do *setpoint* até atingir esse valor e das suas características.

O tempo de subida, *rise time* [Equações (2), (3) e (4)], é o tempo que o sistema leva para ir de 10% a 90% do estado estacionário, ou valor final.

$$Rise\ time = t_2 - t_1 \quad (2)$$

$$C(t_1) = R(t) - 0,9 * (E(t_0)) = R(t) - 0,9 * (R(t) - C(t_0)) \quad (3)$$

$$C(t_2) = R(t) - 0,1 * (E(t_0)) = R(t) - 0,1 * (R(t) - C(t_0)) \quad (4)$$

O *percent overshoot (PO)* é o valor em que a variável de processo ultrapassa o valor final, expresso como uma percentagem do valor final [Equação (6)]. Este valor também pode ser expresso pela unidade medida. Neste caso, denominar-se-á *Peak Overshoot ou Maximum Overshoot (MO)* [Equação (5)].

$$MO = \text{MAX}(C(t)) - R(t) \quad (5)$$

$$PO = \frac{\text{MAX}(C(t)) - R(t)}{R(t)} * 100\% \quad (6)$$

Settling time é o tempo necessário para a variável do processo igualar o valor do setpoint, com um erro de mais ou menos 5%. O erro de *steady-state* é a diferença final entre as variáveis do processo e o valor de referência¹. A Figura 13 apresenta as terminologias referidas.

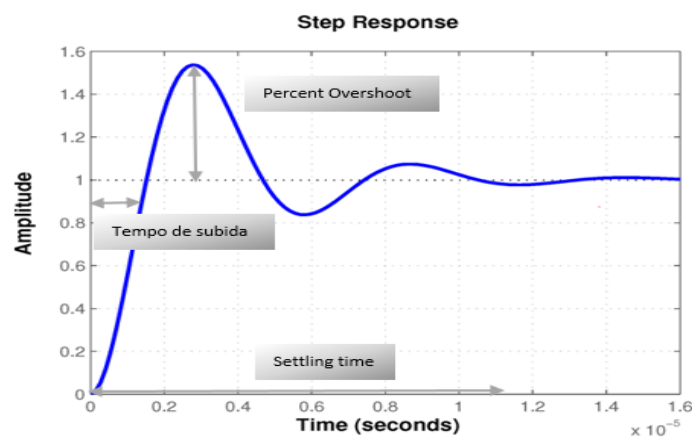


Figura 13 - Resposta de um sistema de segunda ordem

Alguns sistemas apresentam um comportamento indesejado, designado *deadtime*. O *deadtime* é um atraso entre o momento em que um novo *setpoint* é estabelecido e o momento em que essa mudança pode ser observada, como se pode ver na Figura 14. O *deadtime* pode ser causado por um atuador do sistema ou por uma saída lenta, demorando para responder ao comando de controlo.

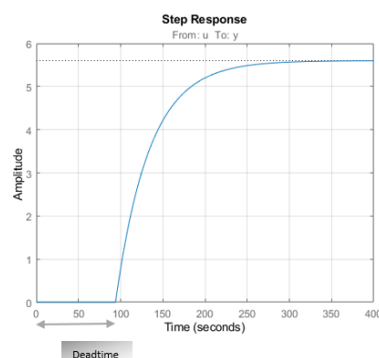


Figura 14 - Resposta de um sistema de segunda ordem com deadtime

¹ Note-se que algumas destas definições variam de indústria para indústria.

Outro comportamento/acontecimento indesejado que pode, ocasionalmente, ocorrer em sistemas de controle é a existência de distúrbios. Estes distúrbios, representados a amarelo na Figura 15, podem ocorrer na medição da variável de processo ($V(t)$) ou que afeta o sistema da variável de processo, planta ($W(t)$).

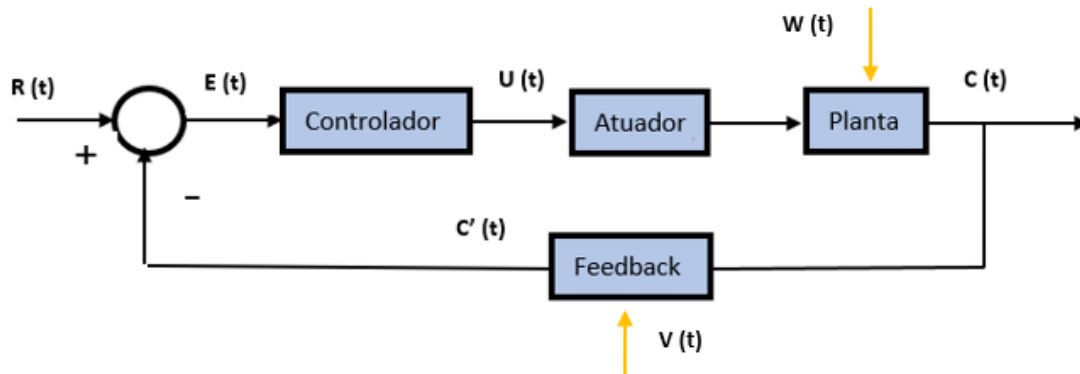


Figura 15 - Sistema de controle de malha fechada com distúrbios

2.2.4 Técnicas de controle

2.2.4.1 Controle ON/OFF

O controle *ON/OFF* ou controle *bang-bang* usa um controlador de *feedback* que alterna abruptamente entre dois estados. O seu funcionamento é controlado por duas premissas lógicas: quando o valor da variável de processo é menor do que o *setpoint*, o controlador aciona o atuador e, conseqüentemente, a planta. Quando o valor da variável de processo é maior do que o *setpoint*, o controlador desliga o sistema.

Estes controladores são frequentemente implementados pela sua simplicidade e conveniência. A Figura 16 representa a relação entre a *step response* de um controlador *ON/OFF* e o seu estado.

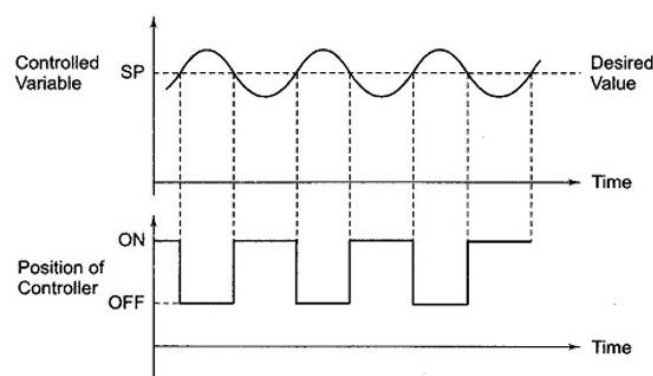


Figura 16 -Resposta de um sistema de controle ON/OFF [27]

A Figura 17 representa os efeitos de *deadtime* num controlador deste tipo, que é um grande problema aquando da utilização deste tipo de controlador. Outro grande problema, que geralmente ocorre neste tipo de controladores é o desgaste do sistema, porque a ativação e desativação do atuador são ações que provocam fadiga nos componentes do sistema.

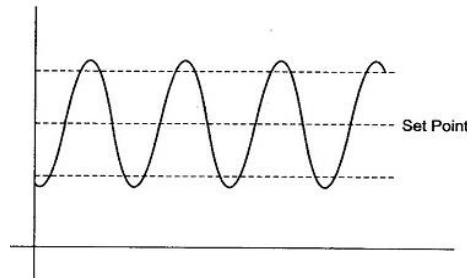


Figura 17 - Resposta de um sistema ON/OFF com deadtime [27]

2.2.4.2 Controlo PID

Controlo PID, acrónimo de controlo Proporcional, Integrativo e Derivativo é uma das técnicas de controlo mais usadas em engenharia desde 1930 e o seu nome devesse ao facto deste tipo de controlador atuar proporcionalmente ao erro (P), à integral do erro (I) e à derivada do erro (D). [Equações (7) e (8)]

$$U(t) = K_p * e(t) + K_i * \int_0^t e(t)dt + K_d * \frac{d}{dt} e(t) \quad (7)$$

ou

$$U(t) = K_p * [e(t) + 1/T_i * \int_0^t e(t)dt + T_d * \frac{d}{dt} e(t)] \quad (8), \text{ sendo}$$

$$T_i = \frac{K_p}{K_i} \text{ e } T_d = \frac{K_d}{K_p} \quad (9,10)$$

A componente proporcional depende apenas do erro. O ganho proporcional (K_p) determina a taxa de resposta de saída para o sinal de erro. Como consequência do aumento do K_p , a velocidade da resposta do sistema de controlo irá aumentar. No entanto, se K_p for muito grande, a variável de processo começará a oscilar e o sistema poder-se-á tornar instável [28].

A componente integral soma o termo do erro ao longo do tempo. Isto resulta no aumento da componente integral, mesmo que o erro seja mínimo. A resposta integral irá aumentar ao longo do tempo a menos que o erro seja zero [29], portanto, o efeito é fazer tender o erro de *steady-state* para zero.

A derivada de resposta é proporcional à taxa de variação da variável de processo. Aumentar o parâmetro do tempo derivativo (T_d) fará com que o sistema de controlo reaja mais fortemente às mudanças no parâmetro de erro, aumentando a velocidade da resposta global do sistema. A Figura 18 apresenta um diagrama de blocos de um controlador PID.

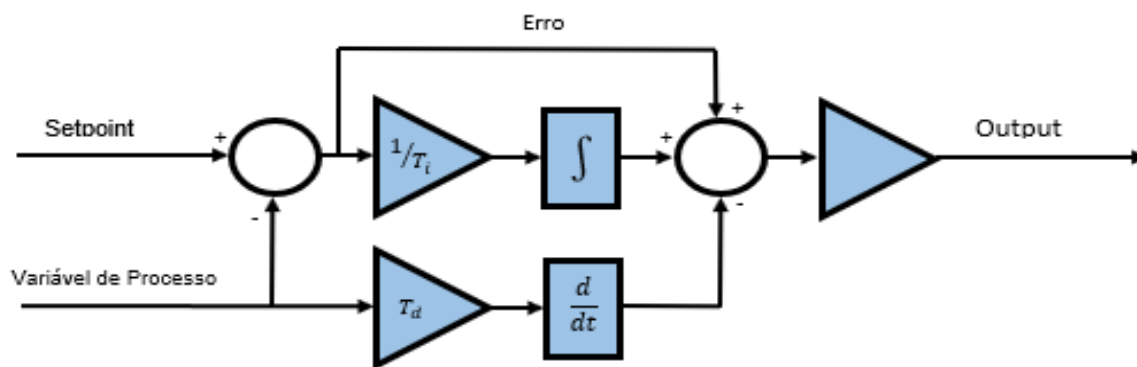


Figura 18 - Diagrama de blocos de um algoritmo de controlo PID [28]

Resumindo, o objectivo do controlo PID é que este aja proporcionalmente ao erro e que produza uma resposta imediata da saída controlada, agindo também proporcionalmente à integral do erro que aproximará o erro de *steady-state* de zero e, finalmente, agindo de forma proporcional à derivada do erro, que reduzirá as oscilações.

Para este tipo de controladores, existem processos de configuração para os ganhos da componente P, I e D para obter uma resposta ideal de um sistema de controlo: o método "Guess and Check", o método de Ziegler-Nichols e vários métodos analíticos.

- **Método "Guess and Check" ou Método Empírico**

Este método de calibração das constantes do controlador PID consiste num método de tentativa e erro. Desde que o utilizador entenda o significado de cada parâmetro de ganho e, conseqüentemente, a reação da planta às alterações dos coeficientes dos ganhos, este método torna-se relativamente fácil.

Atualmente, este método já não passa apenas por "adivinhar" quais os melhores coeficientes, mas sim, calculando-os através do uso de técnicas baseadas em modelos matemáticos [29]. Seja pelo método tradicional ou pelos métodos baseados em modelos matemáticos, é um método, que requer do utilizador um conhecimento elevado em Engenharia de Controlo e bastante experiência, mas também elevado tempo de elaboração.

- **Método Ziegler-Nichols (Z-N) ou Método Oscilatório**

O método de Ziegler-Nichols é um outro método popular para ajustar um controlador PID. Este método pode ser aplicado através de 4 passos:

1. Inicialmente, definir a planta do sistema apenas sob controlo proporcional (ganhos integral e derivativo são nulos), com um ganho, K_p muito pequeno,
2. Aumentar o ganho proporcional, K_p , até o ciclo oscilar. Esta oscilação deve ser detetada à saída do controlador;
3. Guardar o valor crítico do ganho proporcional, K_C , e o período de oscilação da saída do controlador PID, P_u ;
4. Ajustar os valores de K_p , T_i e T_d de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros do método de calibração Ziegler-Nichols [29]

	K_p	T_i	T_d
P	$0,50K_C$	-	-
PI	$0,45K_C$	$\frac{P_u}{1,2}$	-
PID	$0,60K_C$	$0,50P_u$	$\frac{P_u}{8}$

- **Métodos Analíticos**

Para além dos métodos apresentados anteriormente, existem vários métodos, que através de regras e cálculos analíticos, permitem obter controladores PID mais eficientes. Entre os métodos analíticos, o que tem mais aceitação na realidade industrial é o método Internal Model Control, IMC-PID, que tem uma abordagem mais simplificada e menos agressiva ao Método Ziegler-Nichols. É muito utilizado quando o sistema não apresenta *delay*. Este método tem sido alvo de variantes nas últimas décadas, como o método S-IMC [30].

2.2.4.3 Controlo em cascata

Um sistema de controlo em cascata é um sistema onde existem dois ou mais controladores. Estes controladores estão ordenados de maneira a que a variável de processo de um controlador, designado por controlador primário ou mestre, se torne o setpoint do controlador seguinte, designado por controlador secundário. A Figura 19 mostra um diagrama de blocos de um sistema em cascata.

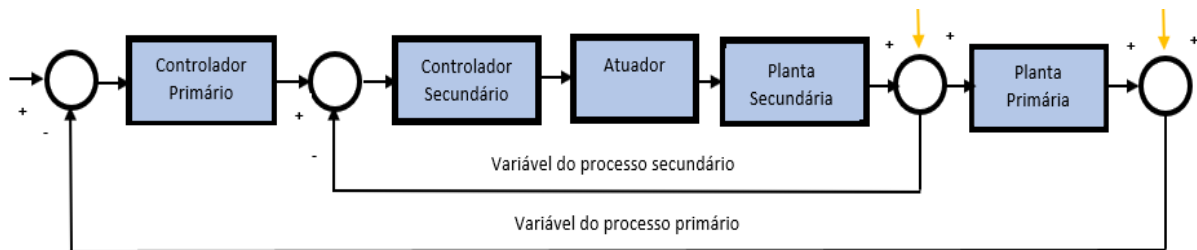


Figura 19 - Sistema de controlo em cascata

O objectivo de um sistema de cascata é melhorar o desempenho do processo, ao reduzir ou mesmo eliminar os efeitos de qualquer possível perturbação existente através do controlo de uma variável intermédia, que irá funcionar com um alerta precoce. Dependendo do tipo de controlador adotado, o sinal enviado, $U(t)$, para os dispositivos de controlo (atuadores) pode variar, podendo ter uma aproximação mais rápida da variável de controlo ao setpoint, ou uma resposta mais lenta, mas com maior exatidão (menor steady-state error).

3. Caso de estudo

3.1 Introdução

A temática desta dissertação é a modernização e desenvolvimento do sistema de climatização da câmara climática, localizada do Laboratório de Aerodinâmica Industrial da Associação de Desenvolvimento de Aerodinâmica Industrial (ADAI). A Figura 20 é uma representação tridimensional da estrutura da câmara e dos sistemas de AVAC instalados, desenvolvida em AutoCAD (mais detalhe no ANEXO I).

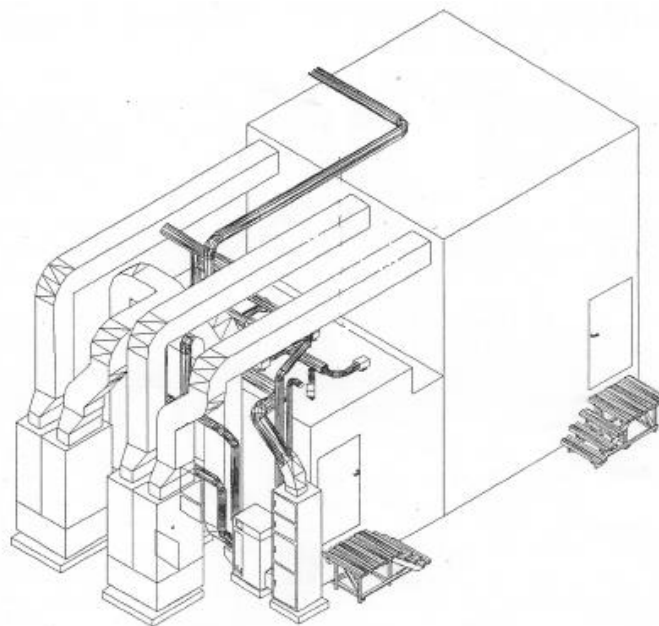


Figura 20 - Representação 3D da câmara climática em AutoCAD

A câmara é uma estrutura modular em madeira e é constituída por duas divisórias que designaremos, daqui para a frente, por Sala de Controlo e Sala de Testes. A Sala de Testes é a divisória com maiores dimensões com uma área aproximada de 23 m^2 e dispõe de um teto móvel que permite a variação do pé direito entre 2,1 m e 4,8 m. Esta divisão é a zona estipulada para os atletas e encontra-se atualmente equipada com duas máquinas de fitness, mais concretamente duas passadeiras. A Sala de Controlo apresenta uma área de aproximadamente 16 m^2 , com um pé direito de 2,8 m e foi concebida como sala de apoio. Nesta divisão, encontra-se o computador e o material que permite o controlo das condições da Sala de Testes. A planta da câmara está representada na Figura 21.

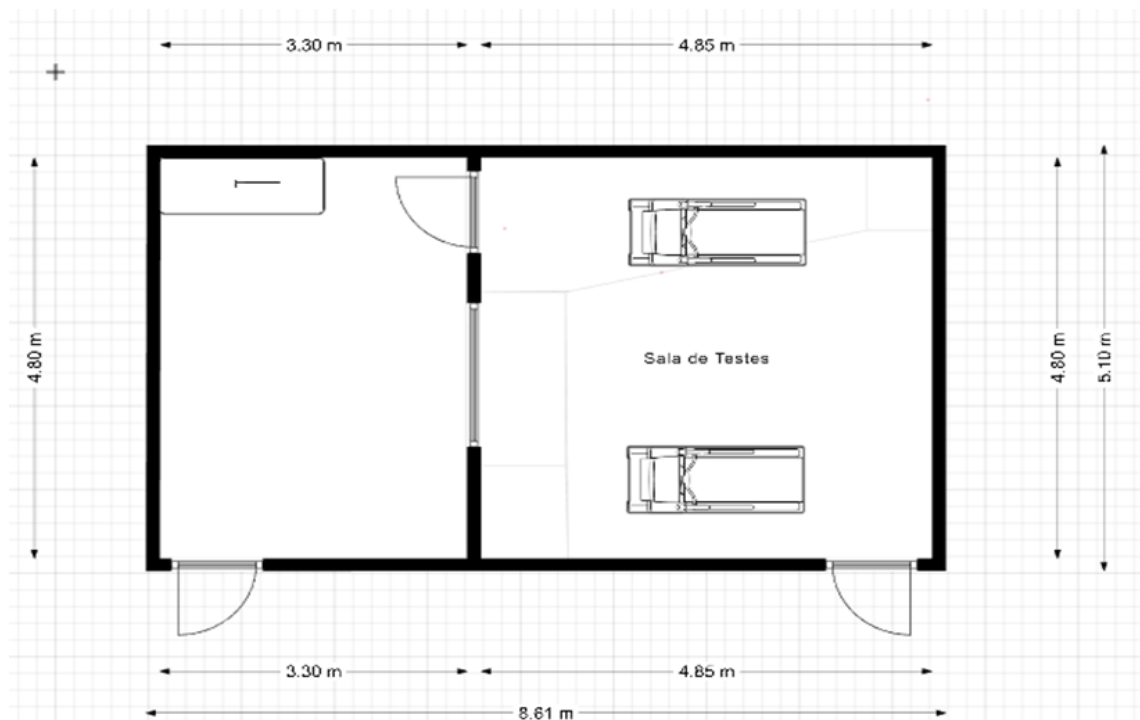


Figura 21 - Planta da câmara climática

A manipulação dos parâmetros ambientais no interior da Sala de Testes é conseguida pelo sistema de AVAC, instalado que é constituído por 4 Grupos de Tratamento de Ar, doravante designados por GTAs, que podem funcionar isoladamente ou em simultâneo. Estes grupos não são nada mais que unidades de tratamento de ar, abreviadamente UTA. Este sistema permite intervalos de temperatura de 5 °C a 45 °C e intervalos de humidade relativa de 20% a 90%. A descrição individual de cada um dos GTA será apresentada nos subcapítulos seguintes. A representação esquemática do sistema de AVAC em 2D, realizada no software AutoCAD, encontra-se em anexo (ANEXO II).

3.2 GTA I e GTA II

Os GTA I e GTA II são idênticos, tanto no que diz respeito à sua função como à sua constituição. Ambos viabilizam o aquecimento, arrefecimento e regulação do caudal de ar insuflado na câmara. Qualquer um destes GTA possui dois ventiladores com motor de frequência variável, um ventilador com motor de frequência constante, uma bateria de arrefecimento, uma bateria de aquecimento e filtros. O esquema dos GTAs I e II está representado na Figura 22.

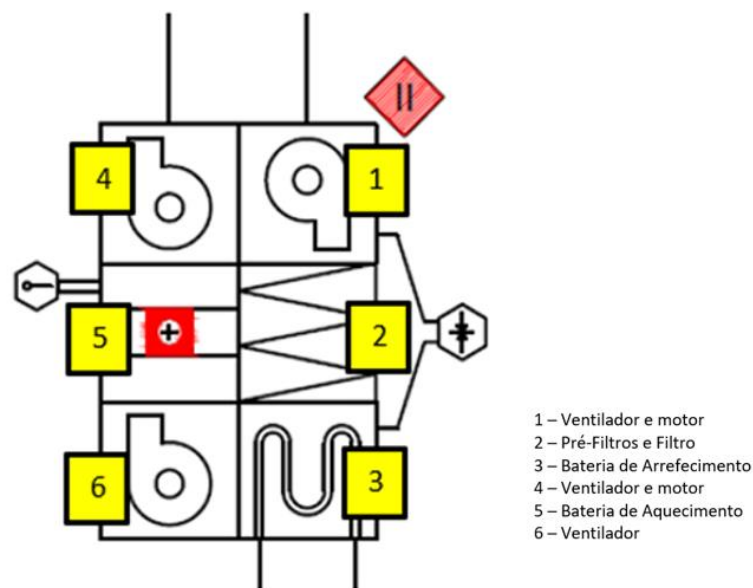


Figura 22 - Esquema dos elementos constituintes do GTA I e GTA II

Os ventiladores presentes em cada GTA têm como propósito a circulação do ar, no sentido desejado, dentro da unidade. O volume de ar, tanto do GTA I como do GTA II, é variável e tem como limite máximo de $4200 \text{ m}^3/\text{h}$. Esta variação é conseguida graças aos variadores de frequência acoplados aos motores.

A bateria de aquecimento é essencialmente um permutador de calor constituído por várias resistências elétricas. A bateria de arrefecimento é um termo genérico, utilizado na descrição dos GTAs, referindo-se a uma serpentina de arrefecimento com água como fluido de refrigeração. A água é arrefecida por três chillers.

Os filtros presentes são responsáveis por filtrar impurezas presentes no ar de modo a evitar a acumulação de partículas nos elementos anteriormente mencionados. Esta acumulação pode diminuir a eficiência destes elementos e o seu tempo de vida. A Tabela A no ANEXO III apresenta as especificações dos elementos constituintes dos GTA I e GTA II.

Como ilustrado no ANEXO II, o ar, depois de tratado no GTA I, é fornecido ao espaço da câmara através do pavimento, cuja secção transversal é constituída por dois elementos: uma chapa de aço inoxidável perfurada como a secção inferior e uma grelha padrão de aço galvanizado como secção superior. Se as grelhas se encontram vedadas, o ar segue para as paredes. Segundo o Professor Peder Kjerulf-Jensen, a idealização do pavimento é justificada para permitir a queda de pressão do escoamento, tornando a sua distribuição mais homogénea em toda a câmara.

De acordo como o mesmo anexo (ANEXO II), o ar, depois de tratado no GTA II, é fornecido através de um difusor mural. O difusor é construído em chapa de aço, com um tampo frontal perfurado amovível, em que os furos têm um diâmetro de 3 mm e estão distribuídos por uma área de 1500 mm por 600 mm [31].

3.3 Humidificador

O objetivo deste equipamento é a produção de vapor de água, que é misturado com o caudal de ar que abastece a câmara climática. Ao consultar o ANEXO II, pode-se verificar que o humidificador se encontra conectado à conduta de ar de saída do GTA I.

O aparelho instalado é um humidificador de vapor elétrico, mais propriamente um humidificador de elétrodos imersos. A Figura 23 apresenta os componentes presentes no humidificador.



Figura 23 - Constituintes do Humidificador NOVAP 3000

O princípio de funcionamento baseia-se no efeito de Joule. A água potável vulgar contém uma certa quantidade de minerais dissolvidos. Quanto maior a concentração destes minerais, maior a condutividade da água. Ao aplicarmos uma tensão nos elétrodos metálicos imersos na água contida no humidificador, irá criar-se uma corrente que aquece a água, acabando por ferver e, conseqüentemente, produzir vapor de água. A quantidade de vapor produzido é proporcional à corrente elétrica gerada, que é, por sua vez, proporcional ao nível da água no humidificador.

O modelo presente nas instalações é NOVAP série 3000, fabricado pela NORDMANN. Este humidificador possui uma unidade de controlo com microprocessadores com a função de regular o processo de vaporização. Esta regulação ocorre através do controlo do nível da água. As condutas, tanto de entrada e saída, dos GTA I e GTA II são interiormente revestidas por uma fita aquecedora para evitar condensação nas condutas.

3.4 GTA III

O GTA III é a unidade de tratamento de ar responsável pela insuflação de ar novo (UTAN). O GTA III possui filtros, ventilador com motor de frequência constante, bateria de arrefecimento e bateria de aquecimento, conforme se pode observar na Figura 24. O volume de caudal deste GTA é constante, cerca de $440 \text{ m}^3/\text{h}$. A Tabela B (ANEXO III) apresenta as especificações dos elementos constituintes desta unidade de tratamento de ar. Tal como nos GTAs anteriores, as condutas deste grupo de tratamento de ar têm, no seu interior, fita aquecedora para evitar o fenómeno de condensação.

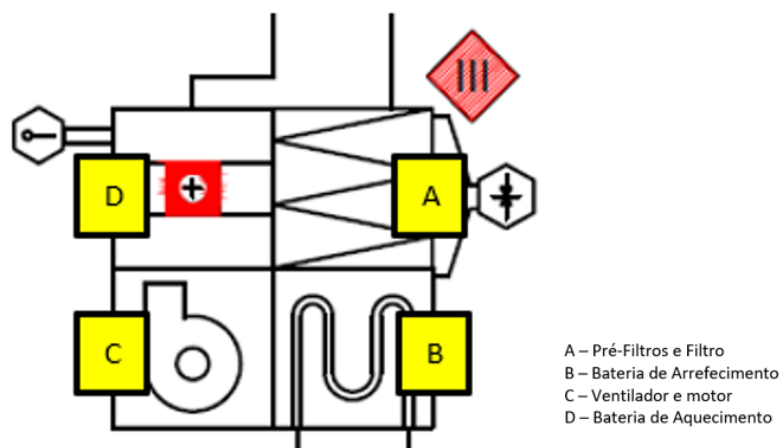


Figura 24 - Esquema dos equipamentos constituintes do GTA III

3.5 Desumidificador

O processo de desumidificação do ar insuflado é conseguido através de dois métodos: condensação e adsorção. O primeiro processo de desumidificação é realizado pelas serpentinas de arrefecimento. Isto só acontece se a sua temperatura das mesmas for igual ou inferior à temperatura de orvalho do ar húmido que as atravessa. Neste processo de arrefecimento, existe uma redução de calor sensível e redução de calor latente. A adsorção é o segundo método e consiste na adsorção do vapor de água presente no ar húmido através de materiais higroscópicos ou exsicante.

No sistema de AVAC da câmara climática, este processo é realizado pelo desumidificador Munters ML 420. Este dispositivo está equipado com um rotor, que permite a adsorção devido ao material compósito e hidros cópico de que é revestido, gel de sílica de alta performance. O rotor é dividido em duas zonas distintas por onde dois caudais de ar distintos passam. O caudal de ar a ser desumidificado, ar de processo, atravessa a zona do rotor de maiores dimensões onde o gel de sílica adsorve vapor de água e deixa o rotor como ar seco. A conduta de entrada do ar de processo encontra-se conectada à conduta de saída do GTA III, desumidificando o ar novo.

O caudal de ar de reativação é usado para a secagem do material higroscópico, evitando a sua saturação. Este caudal é pré-aquecido e deixa o desumidificador como ar húmido (quente e húmido). Na Figura 25 encontram-se ilustrados os fluxos internos do ar de processo e ar de reativação anteriormente descritos. O princípio de funcionamento encontra-se esquematizado na Figura 26.

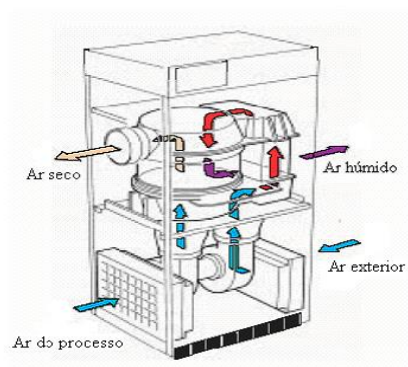


Figura 25 - Ilustrações dos caudais internos do desumidificador instalado na câmara

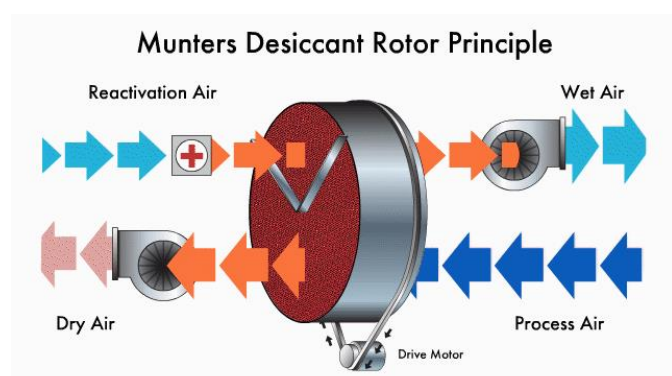


Figura 126 - Esquema de princípio do funcionamento do desumidificador instalado na câmara

3.6 GTA IV

O último Grupo de Tratamento de Ar apresentado é a UTA responsável pela climatização da Sala de Controlo. Este GTA encontra-se, de momento, desativado e, por isso, não será relevante para o desenvolvimento desta dissertação. Este GTA é constituído por um ventilador com motor de frequência constante, uma bateria de aquecimento, uma bateria de arrefecimento e filtros.

3.7 Componentes de controlo

3.7.1 Introdução

Os elementos supramencionados são os elementos que permitem a manipulação dos parâmetros de ar húmido para a realização dos treinos de aclimação. Ao mesmo tempo, a câmara possui componentes que viabilizam a ocorrência desta manipulação de forma automática. Estes componentes podem ser divididos em três categorias: os sensores/transdutores, os componentes de aquisição de sinal e os componentes de envio de sinal.

Os primeiros são dispositivos que respondem a um estímulo físico e transmitem um sinal resultante por via de sinais elétricos. Estes instrumentos permitem a leitura das características momentâneas do ar húmido.

Os segundos têm como função a receção dos sinais analógicos elétricos enviados pelos sensores que podem ser em forma de tensão, corrente ou frequência. Estas características irão variar de acordo com a informação recolhida pelos sensores e que será depois lida por estes componentes e transmitida ao utilizador.

Os últimos elementos identificados têm a função de enviar sinais analógicos que permitem regular os elementos constituintes dos GTAs, o desumidificador e o humidificador com o objetivo de igualar os valores estabelecidos e pretendidos pelo utilizador (*setpoints*).

3.7.2 Sensores

Os sensores originalmente (ao início do trabalho) presentes na instalação de AVAC da câmara e os respetivos modelos encontram-se listados na Tabela 4, bem como o tipo de sensor, a localização, os parâmetros medidos e o número de referencial.

Tabela 4 - Características principais dos sensores

Modelo	Tipo de sensor	Localização	Parâmetros medidos	Nº referencial ²
Vaisala HMW60Y	RTD	Câmara	Temperatura	Y1
	Sensor capacitivo		Humidade relativa	
PT100	RTD ³	Bateria de arref. GTA I	Temperatura	T1
PT100	RTD	Bateria de arref. GTA II	Temperatura	T2
PT100	RTD	Bateria de arref. GTA III	Temperatura	T3
PT100	RTD	Bateria de aquec. GTA I	Temperatura	T4
PT100	RTD	Bateria de aquec. GTA II	Temperatura	T5
PT100	RTD	Bateria de aquec. GTA III	Temperatura	T6
PT100	RTD	Difusor	Temperatura	T7
TROX VMR	Medidor Volumétrico	Difusor	Caudal	C1
PT100	RTD	Paredes da Câmara	Temperatura	T8

Para além destes sensores, encontram-se instalados termostatos, modelo IT DBTC-3090 juntamente com as baterias de aquecimento por questões de segurança, de forma a limitar a temperatura atingida (30°C e os 90°C). Também se encontram instalados manómetros para acompanhar a colmatção dos filtros. No Anexo IV, podem ser encontradas duas tabelas descritivas sobre o funcionamento de vários tipos de sensores, tanto de temperatura como humidade, existentes no mercado e de alguma forma justificatórias das escolhas dos sensores instalados na altura da conceção da câmara climática (anos 1990).

² Sensor responsável por: T- medição temperatura; H - medição humidade; C - Caudal; Y - medição temperatura e humidade; Q- medição nível de CO₂

³ RTD, sigla para Resistance Temperature Detector ou comumente termoresistência

3.7.3 Aquisição de sinal

O processo de aquisição de sinal é inicialmente realizado pelos sensores. O sinal elétrico vindo dos vários conversores a que estão ligados os sensores vem em corrente, entre 4 mA e 20 mA. Dois fatores foram determinantes na decisão de transmissão do sinal por corrente: o facto de a componente AC da tensão poder criar interferências/perturbações, ou em linguagem de controlo, ruído, resultante do ambiente eletromagnético circundante. Isso é particularmente problemático para sinais analógicos de baixo nível que passam pelo amplificador de instrumentação de um dispositivo de aquisição de dados (DAQ) e pelo facto de existir uma queda na tensão em cabos de longas distâncias. Esta premissa é justificada pela Lei de Ohm.

O sinal proveniente dos sensores passa por um transdutor, que é utilizado para conversão de sinais de uma forma de energia em sinais de outra [32]. No caso do sistema de aquisição presente na câmara climática, os tradutores têm como função adicional de isolar o circuito galvanicamente. Este isolamento de secções de sistemas elétricos serve para evitar fluxo constante de corrente, ou seja, nenhum caminho de condução direto é permitido. Os transdutores instalados são o modelo PXU-20, da BRODERSEN. Este sinal é depois convertido em tensão, por resistências de alta precisão ($\pm 0,1\%$ tolerância) de 250Ω e apresentará uma amplitude de 1 V a 5 V.

Este sinal de tensão será então enviado aos componentes de aquisição de sinal, as duas placas multifuncionais E/S PCI-6220, da NATIONAL INSTRUMENTS, que estão conectadas por barramento PCI (*Peripheral Component Interconnect*) à motherboard do computador. A Tabela 5 contém as especificações das placas.

Tabela 5 - Principais especificações da placa PCI NI-6220

ESPECIFICAÇÃO	NI PCI-6220
Número de canais	8 DIFFERENCIAL/16 SINGLE END
Taxa de amostragem (máximo)	250 kS/s
Resolução ADC	16 bits
Gama de entrada	$\pm 0.2 \text{ V}$, $\pm 1 \text{ V}$, $\pm 5 \text{ V}$, $\pm 10 \text{ V}$

Dois blocos de terminais de parafusos, um para cada placa, modelo TBX-68 DIN RAIL, da NATIONAL INSTRUMENTS encontram-se instalados no quadro de controlo da câmara. Estes elementos permitem a conexão dos fios condutores às placas PCI-6220 que têm como conetor I/O uma porta VHDCI. A ligação entre o bloco de terminais de pins e a placa de aquisição é realizada por um cabo multifunções SHC68-68-EPM, da NATIONAL INSTRUMENTS.

A ligação dos fios condutores aos terminais de pins do bloco para medir a tensão pode ser realizada utilizando três configurações diferentes: RSE (Referenced Single Ended), NRSE (Non-Referenced Single Ended) ou DIFFERENTIAL (Tabela 6). A configuração utilizada foi a NRSE, embora não seja tão estável como uma ligação DIFERENTIAL no que respeita a ruído elétrico. No entanto, permite poupar canais, visto que só precisa de metade [22].

Tabela 6 - Configurações existentes para aquisição de sinal

Referenced Single Ended (RSE)	Non-Referenced Single Ended (NRSE)	Diferencial
Mede a diferença de potencial entre AI e AI GND	Mede a diferença de potencial entre AI e AI SENSE	Mede a diferença de potencial entre AI+ e AI-

3.7.4 Envio de sinal

Como já foi referenciado no texto introdutório deste subcapítulo, os componentes de envio de sinal têm a funcionalidade de controlar os componentes dos GTAs que compõem o sistema que trata o ar e abastece a câmara de modo a atingir os valores pretendidos pelo utilizador. Este sinal analógico tem origem nas duas placas de saídas analógicas, DT 2815, da DATA TRANSLATION. Estas placas estão configuradas para enviar sinais analógicos de corrente, 4 mA a 20 mA. A Tabela 7 apresenta as especificações da placa DT-2815.

Tabela 7 - Principais Especificações da placa DT-2815

ESPECIFICAÇÃO	DT-2815
Número de canais	8
Resolução ADC	12 bits
Gama de saída	0-5 V, 0-20 mA
Slew Rate	0,2 V/s, 1 mA/s

As placas DT-2815 encontram-se conectadas a uma placa de expansão, de modelo desconhecido, via barramento ISA/EISA, sendo esta placa de expansão conectada via USB à motherboard do computador de controlo. Cada placa está ligada a um terminal de pins adquirido à RS PRO (modelo 403-314) por dois cabos de 20 pins. Este terminal possibilita a conexão entre os equipamentos de manipulação dos parâmetros de ar húmido e as placas DT-2815. O sinal é, então, recebido pelos equipamentos que realizam o aquecimento, arrefecimento, desumidificação e humidificação.

Caso seja necessário aquecer, o sinal proveniente das placas de envio é recebido por uma placa de circuito modelo FC36M, da UNITED AUTOMATION. Esta placa contém um microprocessador trifásico baseado num circuito de disparo que terá como função de controlar vários tirístores (SCR⁴). A função geral dos tirístores é abrir e fechar circuitos elétricos, mas também permite controlar a corrente. Os tirístores montados nos GTAs são o modelo SKKT 106/18E, da SEMIKRON e possuem sinais de entrada de corrente na gama 4-20mA. Com o circuito fechado, este sinal de corrente irá chegar as resistências elétricas, genericamente designadas por bateria de aquecimento, que permitiram o aquecimento do caudal de ar que fornece à câmara.

Por outro lado, se o ar da câmara estiver a uma temperatura superior à desejada, o sinal é recebido por válvulas reguladores de caudal, que regularizam o caudal de água refrigerada, proveniente dos chillers, que passa pelas serpentinas, habitualmente referidas como bateria de arrefecimento. A abertura destas válvulas é proporcional à necessidade de arrefecimento do ar, como se pode observar na Figura 27. As válvulas instaladas são o modelo M3B25GY, da SIEMENS, e o sinal recebido por estas válvulas está entre os valores 4 mA e 20 mA.

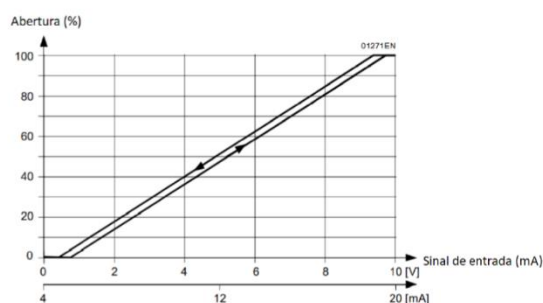


Figura 27 - Abertura em função da corrente da válvula

⁴ Sigla inglesa para *Silicon Controlled Rectifier*. Em Português, Retificador Controlado de Silício. Tipo de junção PNP

Os variadores de frequência conectados aos motores que acionam os ventiladores possibilitam a regulação da velocidade de rotação destes. Um sinal entre 4 e 20 mA é recebido pelos variadores de frequência, fabricados pela ABB (modelo ACS-143-1K6-3), que reduz ou aumenta a velocidade de rotação consoante o sinal recebido. Estes variadores de frequência, como já foi referido, localizam-se nos GTA I e GTA II, permitindo controlar o caudal de ar insuflado na câmara climática.

No ANEXO II, pode observar-se que o caudal de entrada da GTA I e GTA II é oriundo da câmara, ou seja, estes GTAs são responsáveis por reciclar o ar da câmara. Por esta razão, estes variadores apresentam outra função: controlar a quantidade de ar reciclado que entra na câmara. A Figura 28 apresenta esquematicamente um resumo do sistema de envio de sinal descrito nos parágrafos anteriores.

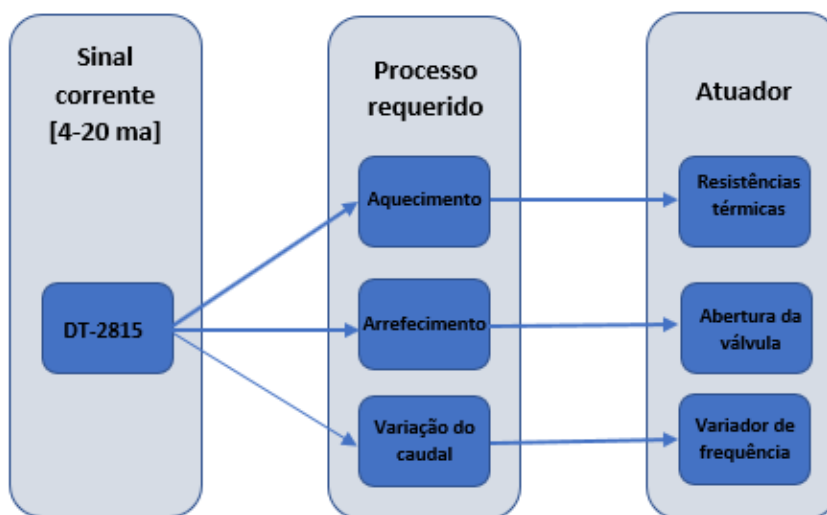


Figura 28 - Ilustração do sistema de envio de sinal

O humidificador vem equipado de fábrica com um adaptador proporcional apto a efetuar leitura de sinais analógicos em forma de corrente [0-20mA ou 4-20mA] ou tensão [0-5V ou 0-10V]. Ao contrário do humidificador, o desumidificador não possui unidade de controlo.

Apesar da presença do adaptador proporcional, este aparelho encontra-se danificado, com suspeitas de que as grandes oscilações tenham avariado os circuitos internos do adaptador, mais propriamente os condensadores. Por este motivo, o humidificador é controlado através de um potenciómetro, assim como o desumidificador. Um potenciómetro é um componente eletrónico que cria uma limitação para o fluxo de corrente elétrica, o que se consegue através do ajuste da resistência elétrica.

A Figura 29 apresenta uma ilustração de um corte transversal de um potenciómetro. O material resistivo está representado a azul. Ao girar o cursor, aumenta-se ou diminui-se o comprimento pelo qual a corrente tem de passar e, conseqüentemente, ocorre um aumento ou diminuição da resistência. Este controlo manual apresenta-se como a maior limitação do controlo de humidade, sendo umas das maiores prioridades do autor a ser realizadas.

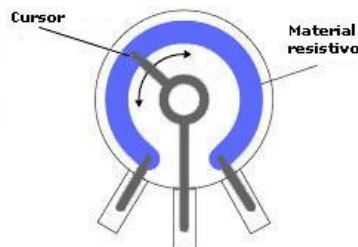


Figura 29 - Ilustração de corte transversal de um potenciómetro

Além disso, foram levantadas as seguintes limitações relativas à utilização do GTA III: a) a falta da placa de circuito e de tirístores que possibilitam o envio de sinal para as resistências, b) bomba de circulação das serpentinas encontra-se avariada, c) falta de controlo no programa, d) falta de sensor na conduta de saída, e e) necessidade de mudança da ligação elétrica das resistências de forma a limitar a sua potência de aquecimento.

3.8 Sistema de controlo

3.8.1 Introdução

Nas subsecções 3.8.x apresenta-se o sistema de controlo implementado à data do início do trabalho desenvolvido pelo autor, por forma a definir as características e limitações que levaram ao desenvolvimento do trabalho apresentado na secção 4.

O algoritmo do sistema de controlo da câmara climática foi desenvolvido em *LabVIEW*, *Laboratory Instruments Engineering Workbench*, linguagem de programação patenteada pela *NATIONAL INSTRUMENTS*. O *LabVIEW* é uma linguagem de programação gráfica, ou seja, a programação é feita com objetos, usando uma programação de fluxo de dados. Este tipo de programação simplifica a implementação de sistemas complexos que incorporam aquisição e/ou envio de dados, como é caso do sistema AVAC em estudo.

As rotinas de programação realizadas em *LabVIEW* são designadas por VI's, sigla que significa Virtual Instruments e são compostos por uma *Graphics User Interface* (GUI) e pelo diagrama de blocos.

O diagrama de blocos contém as funções e a estrutura (organização dessas funções) que realizam as operações ditadas pelos elementos de controlo e fornecem os dados aos indicadores que apresentam esses mesmos dados ao utilizador. O diagrama de blocos (versão 2008) encontra-se na Figura 30.

Essa *GUI* é conhecida como painel frontal e é constituída por elementos de controlo ou indicadores. Os elementos de controlo permitem ao utilizador fornecer informações ao VI (por exemplo, botões) e os indicadores exibem os resultados com base nos sinais de entrada fornecidas ao VI (por exemplo, tabelas, gráficos, LED). O painel frontal (versão 2008) encontra-se na Figura 31.

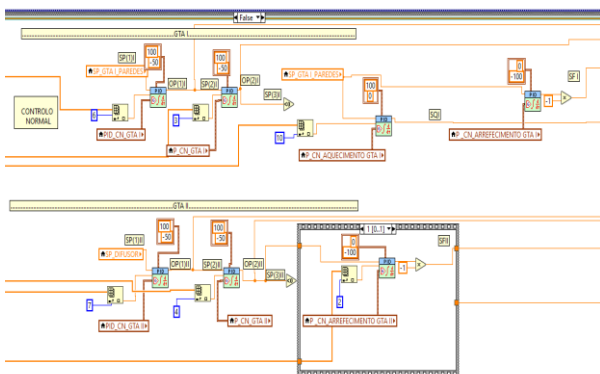


Figura 30 - Diagrama de blocos do programa criado em 2008

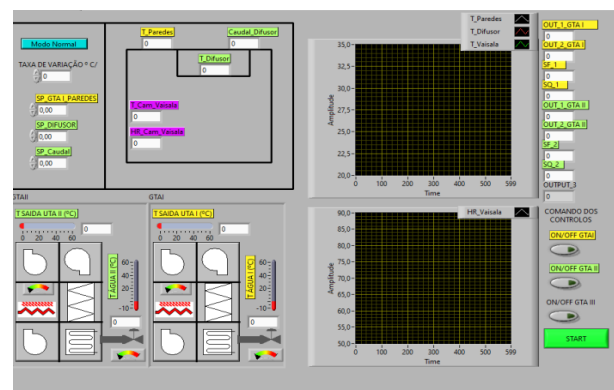


Figura 31 - Interface do programa criado em 2008

3.8.2 Historial e Estrutura do programa

O programa original de controlo das condições no interior da câmara foi desenvolvido pelo Professor Doutor Adélio Gaspar e compilado em Genesis Control Series em 2004.

Em 2008, e devido à desatualização do referido software, o programa foi modernizado e melhorado por Fernando Aires [22], no projeto para obtenção do Grau de Mestre, usando o software *LabVIEW*, versão 8.5. O software operativo (OS) utilizado foi o WINDOWS XP.

Apesar da atualização de 2008, o programa manteve a sua estrutura, em que o diagrama de blocos se encontra dividido em três partes: inicialização, controlo e paragem. A existência da primeira parte é justificada pela necessidade de executar um programa de ativação das quatro placas de controlo, NI PCI-6220 e DT-2815.

A parte de controlo é a porção principal do programa. Preliminarmente, os valores são adquiridos através dos vários sensores instalados e localizados, segundo o subcapítulo “Sensores”. Estes dados são conduzidos para a etapa seguinte, onde são comparados com os set-points, valores definidos e desejados pelo utilizador, processando-se assim a ordem de controlo para as placas de envio e, posteriormente, para os equipamentos controláveis.

A terceira parte do programa é responsável pela paragem do mesmo, o que é possível selecionando o botão “STOP” no painel principal.

Posteriormente, e ao longo dos últimos anos, o programa de controlo tem vindo a ser atualizado de forma pontual, incluindo pequenas melhorias, mas mantendo a base da versão de 2008.

3.8.3 Controlo de temperatura

Tanto o arrefecimento como o aquecimento do ar insuflado na câmara são realizados pelo GTA I como pelo GTA II, que podem funcionar em separado ou simultaneamente. A programação do sistema de controlo dos GTAs referidos anteriormente é idêntica dado que apresentam a mesma estrutura enquanto UTAs e os seus elementos constituintes são também idênticos, como pode ser verificado no ANEXO III.

A metodologia de controlo de temperatura encontra-se ilustrada na Figura 32. O sinal de aquecimento e arrefecimento são assinalados, respetivamente, a vermelho e a azul. O controlo da temperatura no interior da câmara é iniciado através da definição do setpoint (SP(1)), valor pretendido pelo utilizador. Este valor é imediatamente comparado com o valor de temperatura medido pelo sensor Y1, AI(0) e desta comparação resulta o primeiro erro, E(1). E(1) é inserido num controlador PID ou apenas P, se o ganho de proporcionalidade (K_p) for suficientemente grande. O sinal de saída do primeiro controlador, OP(1), será o SP(2) que vai ser comparado com os valores medidos pelos sensores T6 e T7. A diferença destes valores irá resultar na definição do segundo erro, E(2), cujo valor será introduzido no segundo controlador do sistema, de natureza proporcional.

O sinal de saída do segundo controlador torna-se o terceiro *setpoint*, SP(3). Se este valor for maior que 0, estamos perante um caso de aquecimento, que é diretamente introduzido noutra controlador proporcional que gerará um sinal SQ. Tendo em conta o valor de SQ, um sinal de corrente será enviado à placa de circuito que, por sua vez, acionará os tiristores e, conseqüentemente, as resistências.

Se o sinal SP(3) for negativo, inicia-se uma ação de arrefecimento. Neste caso, SP (3) será comparado com a leitura da temperatura da água de refrigeração proveniente dos chillers, efetuada pelos sensores T2 e T3, AI(2). Esta comparação originará o terceiro erro, E(3), e será inserido num controlador proporcional, resultando no sinal SF, que regula a válvula controladora do caudal de entrada das serpentinhas.

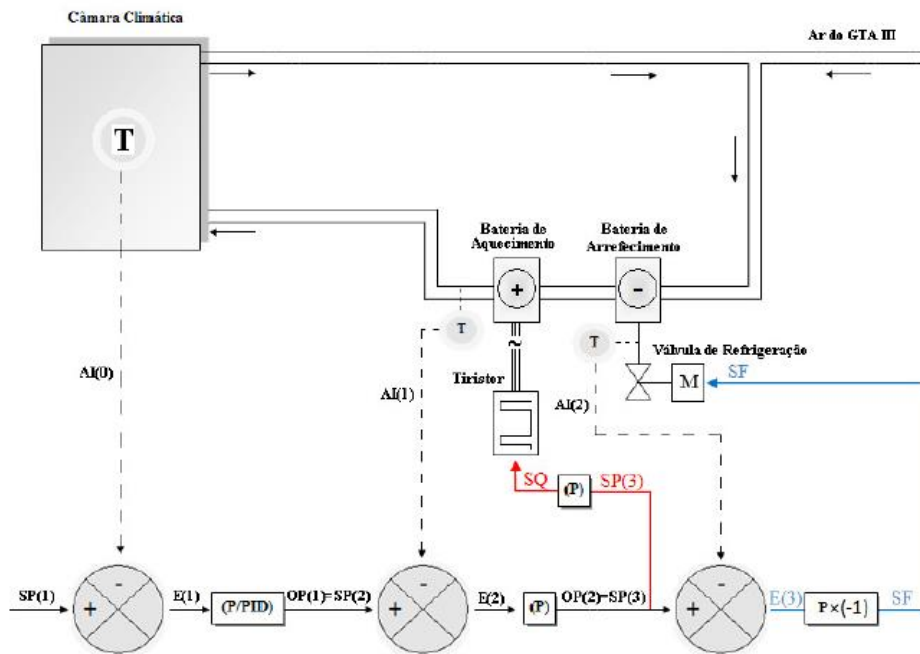


Figura 32 - Esquema de controlo da temperatura do GTA I e GTA II [26]

3.8.4 Controlo de humidade

O controlo de humidade consiste nos processos de humidificação e desumidificação que foram esboçados e delineados pelos professores dinamarqueses mencionados no subcapítulo “Objetivos”, com especial destaque para o Professor Peder Kjerulf-Jensen, especialista na área de implementação de sistemas de controlo. O processo de humidificação foi idealizado de acordo com o esquema da Figura 33.

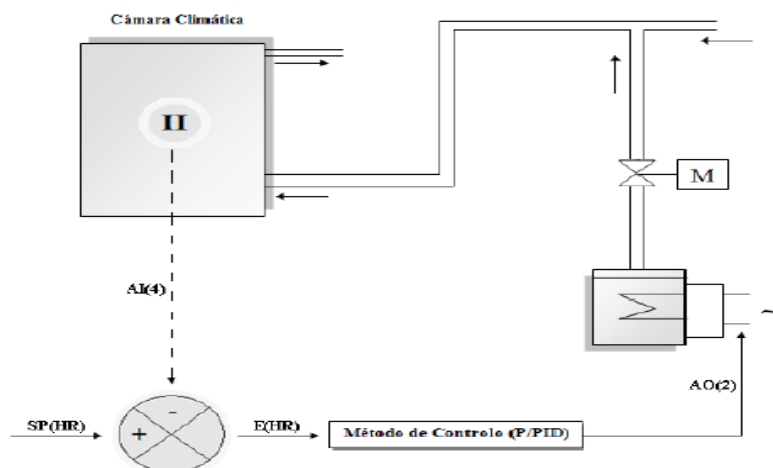


Figura 33 - Esquema de controlo da humidade (processo de humidificação) [26]

A humidade relativa na câmara é medida através do sensor Y1, AI(4), e comparada com o *setpoint* de humidade relativa, SP(HR). A diferença entre SP (HR) e AI(4), é igual ao erro, E(HR), e será o sinal de entrada num controlador P ou PID, dependente do ganho estabelecido. O sinal de saída deste controlador, AO (2), regulará a corrente transmitida aos elétrodos do humidificador NOVAP 3000 e, conseqüentemente, regulará a produção de vapor de água, que depois será introduzido na conduta de saída do GTA I.

Na Figura 34, pode observar-se que o processo de desumidificação é iniciado pela comparação entre o *setpoint* de humidade absoluta, SP(W), e o valor lido por um sensor localizado na conduta de saída do GTA III. Antes desta comparação, os valores de temperatura e humidade são convertidos em humidade absoluta, obtendo assim a variável do processo, VP(W). Da diferença entre estes dois valores de humidade absoluta, resultará o sinal de erro, E(W), que será o sinal de entrada de um controlador P ou PID, originando dois sinais de saída: AO(3) e AO(4). O primeiro acionará e regularizará o desumidificador e o segundo regulará a abertura da válvula, permitindo a passagem de refrigeração nas serpentinas da GTA III.

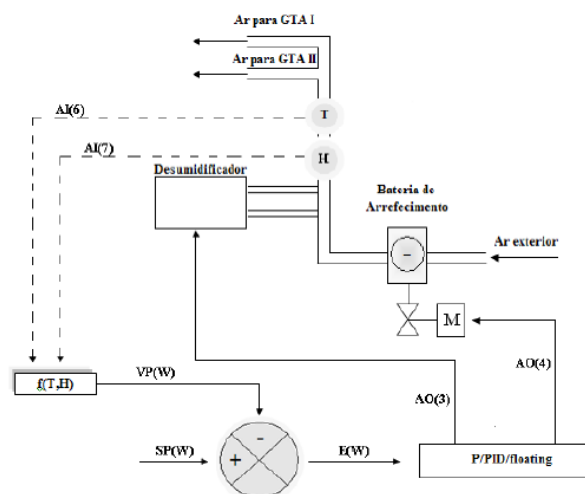


Figura 34 - Esquema de controlo da humidade (processo de desumidificação) [26]

Apesar da sua idealização, o sistema de controlo de humidade não se encontra em funcionamento por várias razões: o sensor à saída da GTA III, essencial no processo de desumidificação, não se encontra instalado e o controlo tanto do humidificador como do desumidificador é realizado de maneira manual através dos dois potenciômetros anteriormente referidos.

4. Matriz Desenvolvida

4.1 Introdução

Na fase inicial do trabalho, foi feita uma análise cuidada à câmara na tentativa do autor se familiarizar com as instalações, de identificar os seus problemas, desde os mais ligeiros aos mais críticos e urgentes e desenvolver um plano cuidado de trabalho. Esta análise incluiu o estudo de documentos, desde a fase inicial da conceção da câmara climática a recentes dissertações com o mesmo caso de estudo, e testemunhos do Professor Doutor Adélio Gaspar e Professor Marco Fernandes, do Professor José Afonso e do meu colega colaborador António Pires. Esta avaliação permitiu ao autor adquirir um conhecimento elevado das instalações, mas também estabelecer objetivos e elaborar um cronograma para o desenvolvimento da utilização da câmara climática de forma eficiente.

4.2 Upgrade do software e hardware de controlo

O principal problema que exigiu atenção imediata, por parte do autor, foi a atualização do software do sistema de controlo. O último upgrade tinha sido a sua atualização para o *LabVIEW* 8.5, software que foi lançado pela NI em 2007 e instalado no computador da câmara em 2008. Até a data, a empresa patente do software já lançou trinta e duas versões posteriores à que se encontrava instalada, tendo sido instalada a versão *LabVIEW* 20.6.

A tabela do ANEXO V mostra a compatibilidade entre as versões do *LabVIEW* e os diferentes sistemas operativos Windows. Para resolver qualquer problema de compatibilidade entre versões *LabVIEW* e Windows, adquiriu-se um novo computador para a câmara, com WINDOWS 10 como sistema operativo. As Figuras 35 e 36 apresentam o computador atual e o antigo.



Figura 35 - Computador novo (Windows 10)



Figura 36 - Computador antigo (Windows XP)

Aquando da montagem do novo computador e instalação dos controladores⁵ necessários dos dispositivos de controlo (DT2815, placa de expansão e NI PCI-6220), observou-se a incompatibilidade destes com o sistema operativo do novo PC. Esta incompatibilidade foi não só confirmada pelo autor ao consultar os catálogos dos dispositivos como também por representantes dos fabricantes, MCC e NI, que afirmaram que tanto os componentes de aquisição como de envio de sinal já se encontravam em *end-of-life* (EOL⁶), com a compatibilidade das placas NI PCI-6220 e DT2815 garantidas até ao WINDOWS 7 e WINDOWS 98, respetivamente. A primeira solução encontrada foi o reaproveitamento das placas NI PCI-6220 e aquisição de um novo dispositivo de envio de sinal.

O equipamento escolhido foi o USB-3106, da MCC. A Figura 37 é uma imagem do aparelho adquirido, que é responsável pela conversão D/A e a Tabela 8 contém as suas especificações.



Figura 37 - Módulo de envio adquirido, MCC USB-3106

⁵ Um controlador ou drive de um dispositivo é um programa que permitem a comunicação entre o Sistema Operativo e o hardware (dispositivo)

⁶ End-of-life (EOL) de um equipamento significa que a sua produção e marketing já foram concluídos e até a sua compatibilidade com sistemas operativos atuais já não são garantidos pelos fabricantes.

Tabela 8 - Principais Especificações do módulo MCC USB-3106

ESPECIFICAÇÃO	MCC USB-3106
Número de canais	16 SINGLE END
Resolução ADC	16 bits
Gama de entrada	± 10 V, 0-10V, 0-20 mA
Slew Rate	1,2 V/ μ s

Contudo, comprovou-se, que as novas versões *LabVIEW* já não suportavam as versões do *DAQmx*⁷ compatíveis com as placas NI PCI-6220 (ver ANEXO VI). Por este motivo, foi adquirido o módulo USB-1608G, da MCC. A Tabela 9 apresenta as especificações deste aparelho e a Figura 38 é a imagem do aparelho, que é responsável pela conversão A/D.



Figura 38 - Módulo de aquisição adquirido, MCC USB-1608G

Tabela 9 - Principais Especificações do módulo MCC USB-1608G

ESPECIFICAÇÃO	MCC USB-1608G
Número de canais	8 DIFFERENCIAL/16 SINGLE END
Taxa de amostragem (máximo)	500 kS/s
Resolução ADC	16 bits
Gama de entrada	± 0.2 V, ± 1 V, ± 5 V, ± 10 V

Durante o processo de aquisição destes equipamentos, foi realizado um estudo de mercado de dispositivos DAQ, que incluiu empresas como National Instruments, MCC, ADLINK Technology, ADDI DATA, Agilent, entre outras. O custo dos dispositivos e a o tipo de ligação ao computador foram fatores preponderantes na decisão.

⁷ Programa que permite a visualização no computador dos valores adquiridos pelas placas de aquisição

A instalação destes aparelhos permitiu, não só a remoção das placas NI PCI-6220 e DT 2815 do quadro de controlo, mas também dos terminais de pins TBX-68 DIN RAIL, RS PRO modelo 403-314 e respetivos cabos. Esta substituição pode-se observar nas Figuras 39 e 40. Nos anexos VII e VIII, encontram-se as tabelas dos canais de entrada e saída e a tabela que correlaciona o sinal de aquisição com o número referencial do sensor.

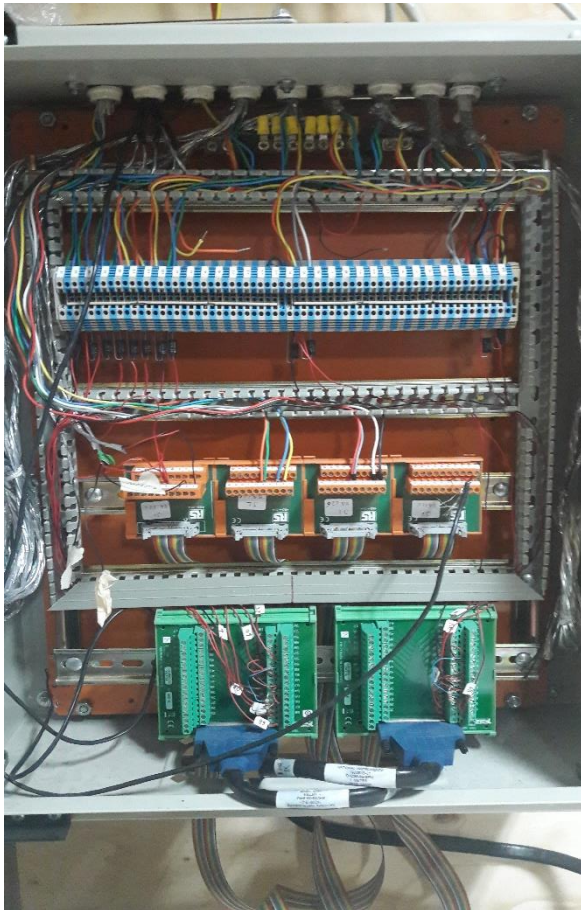


Figura 39 – Quadro de sinal antigo

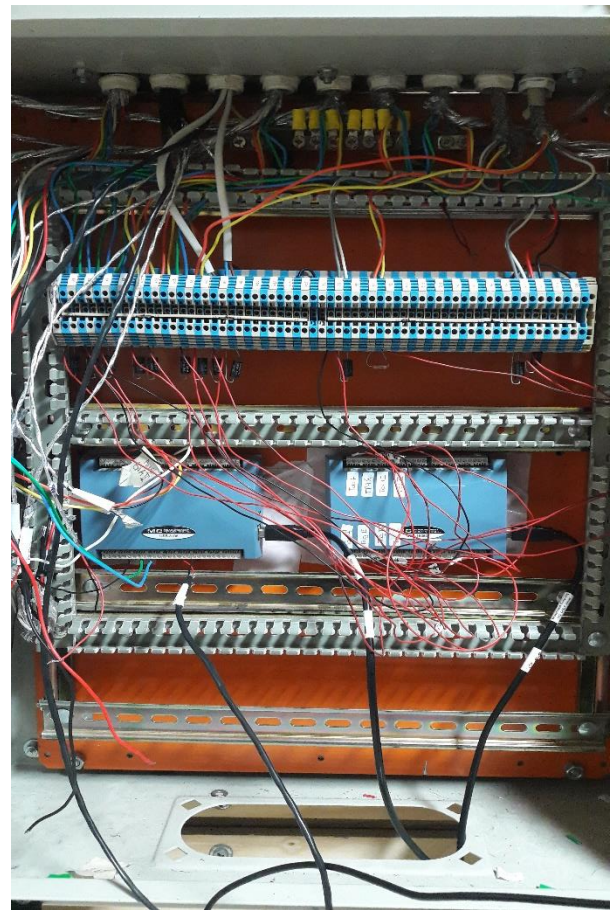


Figura 40 – Quadro de sinal atual

No Anexo IX, é apresentado um relatório de contas, em Microsoft Excel, com informação elementar (fabricante, descrição e modelo adquirido, fornecedor, preço, data e número de fatura). O autor também analisou a percentagem de gastos por objectivo e por categoria.

4.2 Sistema de controlo de temperatura

Segundos vários estudos analisados pelo autor, a temperatura é o fator extrínseco que mais afeta a performance dos atletas. Esta afirmação é exposta e justificada no subcapítulo “Parâmetros de ar húmido”. Por este motivo, o desenvolvimento do novo sistema de controlo da temperatura do ar foi priorizado em relação aos demais.

4.2.1 Sistema de controlo de temperatura do GTA I

Os próximos parágrafos descreverem o sistema de controlo otimizado que realiza a ordem de aquecimento ou arrefecimento do ar insuflado para a câmara proveniente do GTA I, utilizando o mesmo método já implementado (secção 3.8.3) – controladores PID em cascata. A implementação deste controlo encontra-se esquematizada na Figura 41.

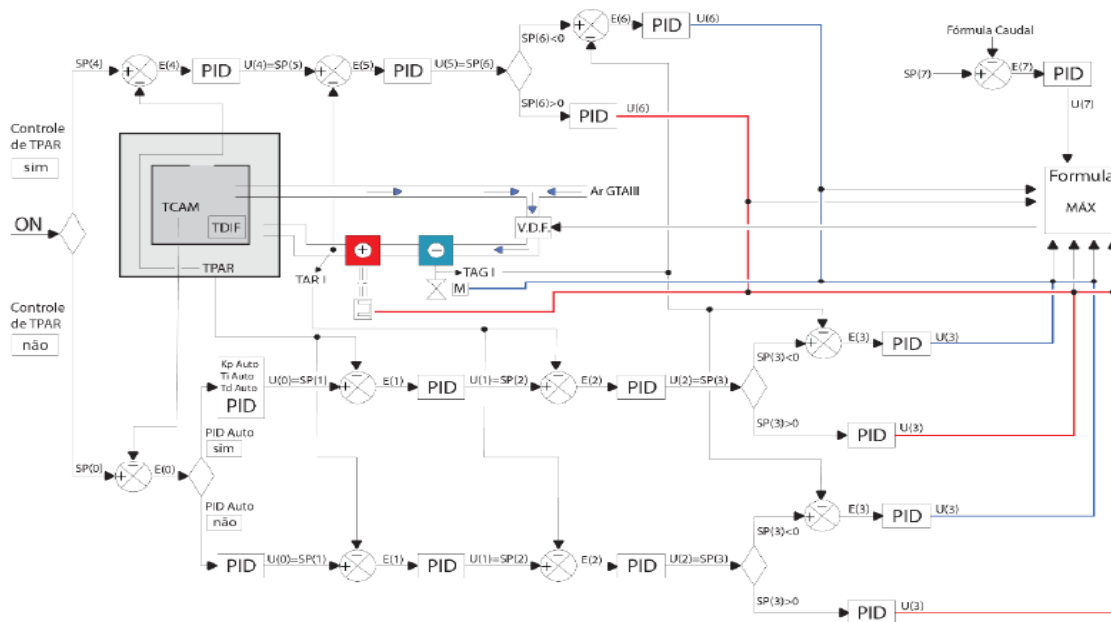


Figura 41 - Diagrama do controlo PID em cascata da temperatura no GTA I

Antes da definição do setpoint da temperatura por parte do utilizador, é-lhe dada a opção de controlo da temperatura das paredes da câmara (ver Figura 42).

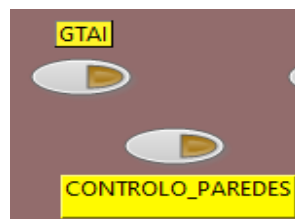


Figura 42 - Botão de seleção na interface para controlo da temperatura pela variável TPAR

Esta opção foi implementada no programa para permitir a simulação da temperatura radiante de espaços interiores. Caso o utilizador opte por controlar este fator, deverá inserir o valor da temperatura que pretende no interior das paredes. O valor do setpoint é então comparado com o valor registado pelo sensor T9. O setpoint da temperatura das paredes será então comparado com o valor da temperatura do ar à saída da bateria de aquecimento do GTA I, medido pelo sensor T5, resultando o erro E(5) que será inserido noutra controlador PID e conseqüentemente assumirá o valor U(5). Este valor definirá o valor de referência SP(6).

No caso de este ser positivo, inicia-se um processo de aquecimento do ar reciclado. SP (6) é então inserido num controlador PID ou controlo P (se o ganho for suficientemente grande) e resultará no valor de U(6) que será então enviado pelo módulo USB-3106 para a placa de circuito que controla os tirístores ligados à resistência elétrica do GTA I. No caso de SP(6) ser negativo, é então subtraído a este o valor da temperatura medido pelo sensor T1 que resultará no erro E(6) que atravessa um controlador PID ou P. O valor de saída deste controlador levará a abertura da válvula do sistema de refrigeração.

O utilizador pode selecionar a opção de não controlo da temperatura das paredes. Assim deve definir-se o valor pretendido para o ar no interior da câmara, sendo que este valor corresponde ao valor SP(0). O valor SP (0) será então comparado com o valor medido na câmara pelo sensor Vaisala HMW60Y (Y1). O resultado originará o erro E(0) e o utilizador deve também definir no programa o método de calibração dos ganhos PID, PI ou P do controlador, podendo este ser automático ou manual. O método automático é denominado de Autotuning e utiliza um método matemático (método Ziegler-Nichols). Este método de calibração foi desenvolvido por António Pires na sua dissertação de Mestrado [33], apresentada em Dezembro de 2020.

No GTA I, o caudal de ar também pode ser definido pelo utilizador - SP(7). Este valor é então comparado com o caudal instantâneo, $V_{INST,I}$. Apesar de ser uma funcionalidade do programa, ainda não se encontra instalado um caudalímetro no GTA I.

4.2.2 Sistema de controlo de temperatura do GTA II

Tal como no sistema de controlo de temperatura do GTA II, antes da definição do valor pretendido pelo utilizador, é-lhe dado duas opções: controlar a temperatura do difusor ou não (ver Figura 43). Se o utilizador elege a opção de controlo da temperatura do difusor, este deverá definir o valor pretendido no interior das paredes, SP(4). A estrutura lógica deste método de controlo segue a mesma que foi descrita no subcapítulo anterior, como pode ser confirmado na Figura 44. No GTA II, o caudal também pode ser definido pelo utilizador, SP(7). Este valor é então comparado com o caudal instantâneo, $V_{INST,II}$. Tal como o controlo do caudal do GTA I, esta opção não costuma ser utilizada durante os treinos de atletas.

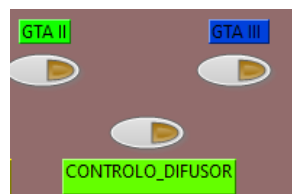


Figura 43 - Botão de seleção na interface para controlo da temperatura pela variável TDIF

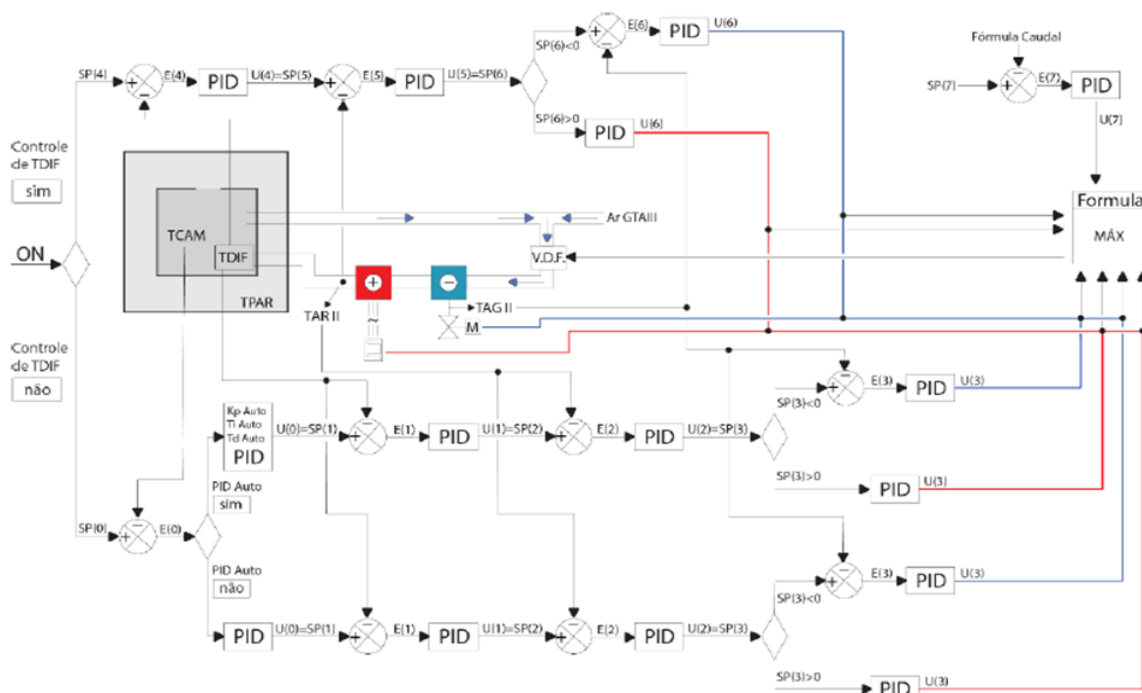


Figura 44- Diagrama do controlo PID em cascata da temperatura no GTA II

4.3 Sistema de controlo de humidade

Tal como foi projetado no início desta dissertação, um dos objetivos primários é a ativação do sistema de controlo de humidade original e o aperfeiçoamento e melhoria da eficiência deste sistema de controlo.

O primeiro passo para a ativação deste sistema foi a instalação do sensor Vaisala HMD60Y na conduta de saída do GTA III (esta unidade foi reativada no decorrer do presente trabalho - secção 4.4.2), responsável pelo envio dos sinais AI(6) e AI(7). O segundo passo foi a remoção dos potenciômetros que controlavam manualmente, tanto o humidificador como desumidificador, e foram habilitados a receber, respetivamente, sinais de corrente e tensão. Ambos os equipamentos são controlados de forma automática pelo programa de controlo. A programação destes dois elementos foi realizada de forma bastante simples, através de um ciclo *if...else*.

O novo sistema de controlo de humidade inicia-se com a definição do *setpoint* de humidade relativa pelo utilizador, que é comparado com a humidade relativa medida na câmara pelo sensor Y1. Esta comparação irá definir se existe necessidade de humidificar (>0) ou de desumidificar (<0) o ar que é insuflado na câmara, através do ciclo *if...else* implementado. O valor resultante desta comparação é depois inserido numa série de controladores PID, sendo pelo meio comparado com os valores de humidade relativa à saída do GTA I, depois do spray do humidificador e de saída do GTA III depois da desumidificação.

O autor deu especial atenção ao processo de desumidificação, pois considera-o crucial durante o treino de aclimação dos atletas. Durante o treino, os atletas respiram e transpiram, libertando humidade para o ar. Isto significa que o processo de desumidificação tem de ser realizado eficientemente para não ocorrer um aumento muito abrupto na humidade relativa. Por esta razão foram implementados dois níveis de desumidificação (Figura 45):

- 0-20%, apenas ocorre desumidificação por condensação;
- 20-100%, ocorre desumidificação por adsorção e condensação;

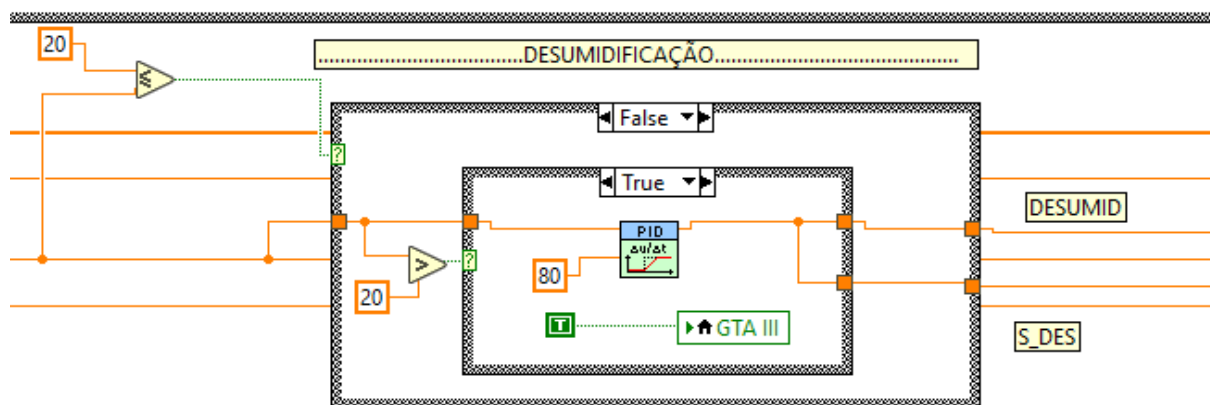


Figura 45 - Diagrama de blocos da programação dos níveis de desumidificação

4.3.1 Proteção do humidificador e do desumidificador

Como foi referido no subcapítulo 3.7.4 “Envio de sinal”, o adaptador proporcional do humidificador encontrava-se danificado, suspeitando-se que as grandes oscilações do sinal de envio possam ter causado esta avaria. O sinal de saída do controlador PID de humidificação foi medido a fim de comprovar a grande amplitude destas oscilações (Figura 46).

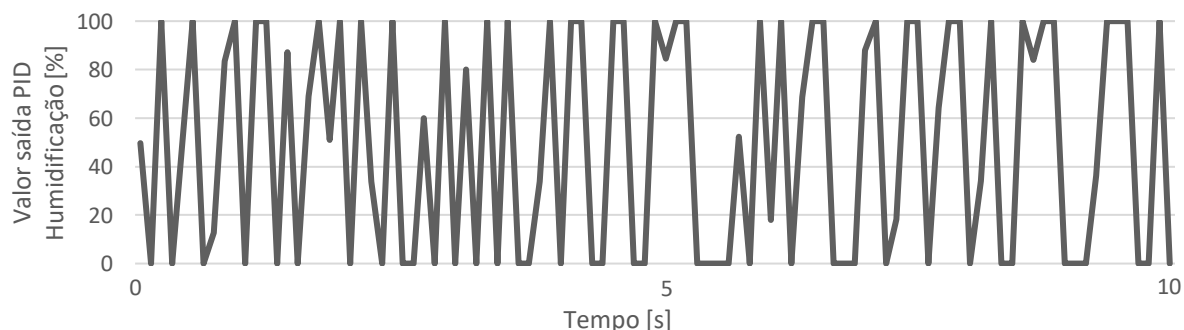


Figura 46 - Sinal de saída do controlo PID de humidificação

A Slew Rate (SR) de um amplificador é a taxa máxima de mudança de tensão ou corrente na sua saída [34]. É expresso em V/s, A/s (SI), ou mais vulgarmente V/ μ s, A/ μ s. Esta especificação representa a velocidade máxima de transição do sinal de saída. Se o equipamento recetor desse sinal tiver um limite inferior de transição, o seu funcionamento pode estar em causa e levar a danos. É o que se presume que aconteceu no humidificador.

Este índice é, então, justificatório da avaria ocorrida e por esse motivo, foi adicionado no programa de controlo um controlador PID limitador⁸ da taxa de variação do sinal de envio antes deste chegar ao humidificador (o mesmo para o desumidificador). O Gráfico 6 é a leitura do sinal de saída enviado ao humidificador depois de instalado o controlador PID limitador.

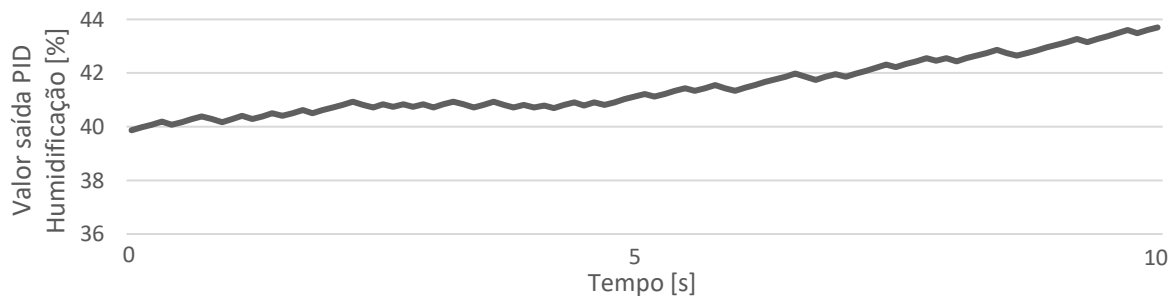


Figura 47 - Sinal de saída do controlador PID de humidificação com PID limitador

4.4 Sistema de controlo do nível de CO_2 - Insuflação de ar novo

4.4.1 Necessidade

O dióxido de carbono é o resultado da respiração celular, a qual oxida as gorduras para a produção de energia. No ar ambiente, uma concentração normal de CO_2 varia entre 200 ppm⁹ e 300 ppm, não devendo ultrapassar os 1000 ppm [35]. Em ambiente fechado e durante o exercício físico, a concentração de CO_2 aumenta com o tempo decorrido e a intensidade, sendo que, num exercício de esforço máximo, o atleta pode consumir até 5 l/min de O_2 e expirar 5 l/min de CO_2 , levando a que rapidamente se ultrapassem os 1000 ppm recomendados durante o exercício [36]. Como consequência deste aumento, a capacidade física e cognitiva do atleta diminui consideravelmente [37], [38].

4.4.2 Reativação do GTA III

Antes do desenvolvimento de qualquer sistema de controlo que correlacione o nível de dióxido de carbono com o caudal de ar novo insuflado para o interior da câmara, foi necessário reativar a única UTAN do sistema AVAC instalado (GTA III), que se encontrava inoperacional, o que inviabilizava também a utilização do desumidificador (ver secção 3.7.4).

⁸ Resumidamente, este controlador limita a taxa de variação do sinal de envio que esta a ser enviado para o humidificador e desumidificador

⁹ Partes por milhão, ppm – é uma medida de concentração que expressa a massa do soluto, em μg ($1 \cdot 10^{-6}$ g) existentes numa 1 g de solução

No processo de reativação deste GTA, foram realizadas as seguintes tarefas:

- Instalação de um sensor na conduta de saída do GTA III (depois do desumidificador) para permitir a leitura destes parâmetros do ar a ser insuflado a semelhança dos restantes GTAs. O sensor instalado é o modelo HMD60Y, da Vaisala. Este sensor tem as mesmas características que o sensor Vaisala que mede as condições no interior da câmara, sendo a única diferença a sua adaptabilidade para medição de caudais forçados;
- Instalação de um sensor de dióxido de carbono no interior da câmara para permitir a leitura deste gás. (ver secção 4.4.3);
- Instalação de um variador de frequência, para permitir a variação da velocidade do motor acoplado ao ventilador do GTA III e, conseqüentemente, do caudal de ar novo insuflado (ver secção 4.4.4);
- Substituição da bomba circulatória de alimentação das serpentinas de arrefecimento, pois a bomba do GTA III encontrava-se danificada. Na substituição, foi reaproveitada a bomba do GTA IV, que também se encontrava desativada no início da realização desta dissertação. Esta troca viabiliza o arrefecimento do ar novo. As Figuras 48 e 49 ilustram o processo de mudança de bomba.



Figura 48 - Remoção da bomba circulatória danificada



Figura 49 - Instalação da bomba do GTA IV no GTA III

A realização destas tarefas, permitiu ao autor a implementação de um sistema de controlo da temperatura, semelhante aos dos outros GTAs (Figura 50). De referir que, apesar do processo de aquecimento no GTA III estar implementado no programa, este ainda não é possível de realizar devido à falta da placa de circuito e de tirístores que possibilitam o envio de sinal para as resistências (ver secção 3.7.4)

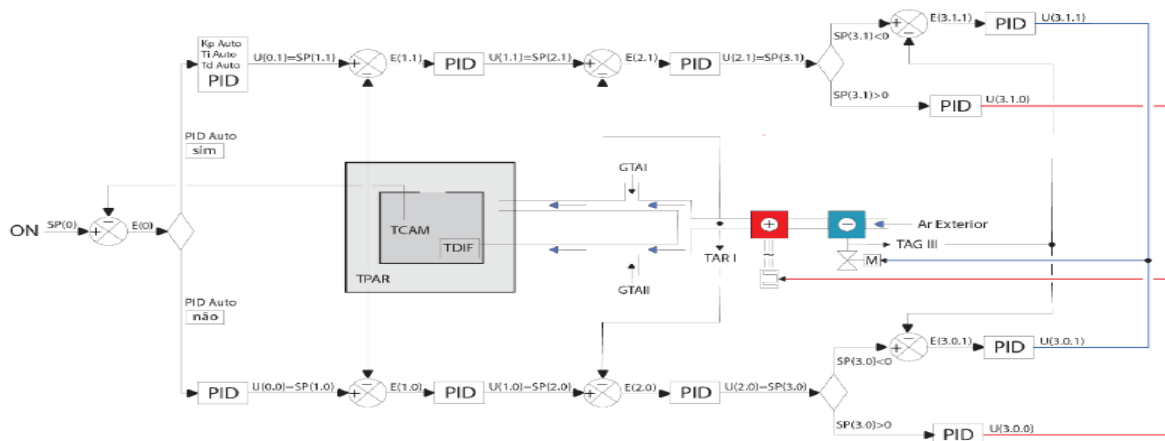


Figura 50 - Diagrama do controlo PID em cascata da temperatura no GTA III

4.4.3 Sensor de CO₂

No mercado atual, existem dois tipos de sensores principais para medição do nível de CO₂:

- A. Sensores de infravermelhos não dispersivos (NDIR)
- B. Sensores eletroquímicos

A. Sensor NDIR

Este tipo de equipamento é, basicamente, um sensor espectroscópico usado para deteção da presença de um determinado gás. O termo “não dispersivo” deve-se ao facto de utilizar um elemento não dispersivo (ND) para separação do espectro da luz e utilizar uma fonte de luz infravermelha (IR). Os componentes principais deste tipo de sensor são a fonte de infravermelhos, a câmara de recolha da amostra, o filtro ótico e o detetor infravermelhos (Figura 51).

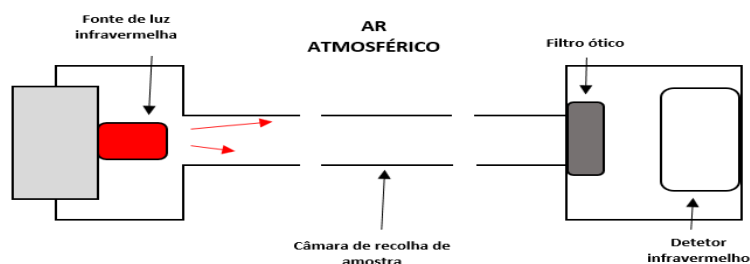


Figura 51 - Princípio de Funcionamento de um sensor NDIR

Quando a luz passa pela câmara de amostra, o gás aí presente absorve determinados e específicos comprimentos de onda do espectro da luz. O filtro ótico apenas permite a passagem desses comprimentos de onda específicos, cuja atenuação é medida pelo detetor que determina a concentração de um gás específico. Por este motivo, estes sensores são amplamente utilizados para monitorização em tempo-real de concentrações de CO₂ [39].

B. Sensores eletroquímicos

Os componentes principais de um sensor eletroquímico são o eléctrodo, o contra-eléctrodo, o condutor de iões e o fio condutor. Quando o gás entra em contacto com o eléctrodo, ocorre a oxidação do gás através de uma reacção química entre as moléculas de água presentes no ar. Dos produtos desta reacção química, assinalamos a formação de iões de hidrogénio ou protões (H⁺) e electrões. Os protões atravessam a camada intermédia (condutor de iões) para chegar ao contra-eléctrodo enquanto os electrões chegam ao contra-eléctrodo através do fio condutor. Um amperímetro está conectado em série com o fio condutor medindo a corrente (a quantidade de electrões/a corrente é proporcional à concentração do gás no ambiente).

A Tabela 10 apresenta uma comparação entre os dois tipos de sensores referidos.

Tabela 10 - Tabela de comparação entre os tipos de sensores CO₂ considerados

	Vantagens	Desvantagens
Sensor NDIR	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Tempo de vida grande - ~10 anos ✓ Precisão elevada ✓ Calibração pouco frequente 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Dimensões elevadas ❖ Investimento inicial elevado
Sensor eletroquímicos	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Baixo consumo de energia (produção de corrente analógica) ✓ Dimensões pequenas 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Calibração necessária e frequente ❖ Tempo de vida baixo - ~1 a 3 anos ❖ Contaminação por gases heterogéneos

Tendo em conta as vantagens e desvantagens de cada tipo de sensor, optou-se por um sensor NDIR. O modelo do sensor adquirido é o EE820 – HV2A6E1, da E+E Elektronik (Figura 52). As especificações deste aparelho encontram-se apresentadas na Tabela 11.



Figura 52 - Sensor de CO₂ adquirido instalado na câmara climática

Tabela 11 - Principais Especificações do sensor NDIR adquirido

ESPECIFICAÇÃO	E+E ELEKTRONIK EE820
Gama de medição	0-5000 ppm
Taxa de amostragem	15 s
Precisão ¹⁰	$\pm \frac{1 + \text{concentração } CO_2 \text{ [ppm]}}{1000}$ [ppm/°C]
Condições de operação	-20 a 60 °C 0-100 % HR
Sinal analógico	0-20 mA

4.4.4 Variador de frequência

Como foi referido anteriormente, o objectivo do módulo desenvolvido para controlo de CO₂ é controlar e possibilitar a variação do caudal de ar novo que é insuflado na câmara climática, por isso foi necessária a aquisição de um variador de frequência para o ventilador do GTA III. Este elemento atua sobre a frequência da alimentação elétrica do motor do ventilador, convertendo a frequência da rede (50 Hz) numa outra entre 0 Hz e 50 Hz ou até mesmo superior, dependendo do sinal analógico de tensão recebido que é enviado pelo módulo de envio de sinal, USB 3106. Assim, dependendo da frequência enviado pelo variador (0-50 Hz), acelera ou diminui a velocidade de rotação do motor e, conseqüentemente, aumenta ou diminui, respetivamente, o caudal do ventilador (ar novo).

O critério para a escolha do variador de frequência foi bastante elementar: a compatibilidade deste elemento com a potência nominal do motor presente no GTA III. Por este motivo, optou-se por adquirir a versão mais recente dos variadores de frequência, já acoplados aos motores dos GTA I e GTA II - o modelo ACS310/A, do fabricante ABB. A par com o variador de frequência, também foi adquirida uma consola avançada, que permite a programação simples do aparelho responsável pela manipulação do caudal de ar novo.

¹⁰ Este parâmetro é dependente da temperatura

4.4.5 Módulo de controlo - LabView

O módulo de controlo do nível de CO₂ ou de ar novo desenvolvido tem as seguintes características. Antes do sistema iniciar, são dadas duas alternativas ao utilizador: limite de CO₂ automático e limite de CO₂ manual (ver Figura 53). Quando o utilizador selecionar a opção limite automático, o caudal de ar novo irá aumentar se a concentração de dióxido de carbono na câmara atingir ou ultrapassar os 1250 ppm (ou $2250 \frac{mg}{m^3}$), o limiar de proteção de CO₂ estabelecido na legislação portuguesa, mais precisamente Tabela I.03 da Portaria 353-A/2013 [40]. Caso o utilizador opte pela segunda alternativa, pode escolher qual o limite de CO₂ que pretende. Esta opção foi adicionada, caso o utilizador tenha a intenção de usar um limite inferior a 1250 ppm (Figura 54).



Figura 53 - Botão de seleção na interface do modo de controlo do sistema de CO₂

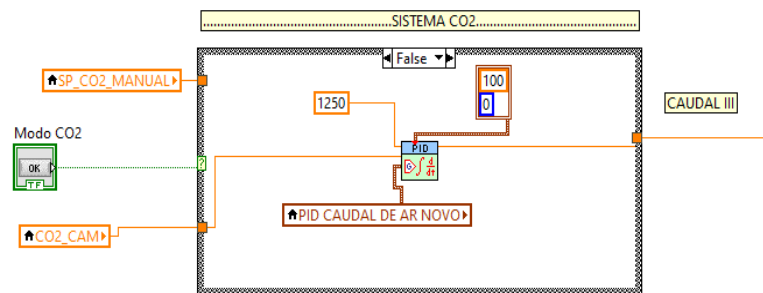


Figura 54 - Diagrama de blocos do controlo de CO₂

4.4.6 Sensores - Atualizado

A Tabela 12 é uma versão atualizada da Tabela 4 – “Características principais dos sensores”, tendo em conta os sensores instalados pelo autor, assinalados a negrito (secção 4.4.2). Em adenda, no Anexo IX apresenta-se uma ilustração, em AutoCAD, do sistema eletrónico montado atualmente na camara climática.

Tabela 12 - Características principais dos sensores (Atualizada)

Modelo	Tipo de sensor	Localização	Parâmetros medidos	Nº referencial
Vaisala HMW60Y	RTD	Câmara	Temperatura	Y1
	Sensor capacitivo		Humidade relativa	
Vaisala HMD60Y	RTD	Conduta saída GTA III	Temperatura	Y2
	Sensor capacitivo	Conduta saída GTA III	Humidade relativa	
TME PT1000	RTD	Bateria de arref. GTA I	Temperatura	T1
TME PT1000	RTD	Bateria de arref. GTA II	Temperatura	T2
TME PT1000	RTD	Bateria de arref. GTA III	Temperatura	T3
TME PT1000	RTD	Bateria de aquec. GTA I	Temperatura	T4
TME PT1000	RTD	Bateria de aquec. GTA II	Temperatura	T5
TME PT1000	RTD	Bateria de aquec. GTA III	Temperatura	T6
TME PT1000	RTD	Difusor	Temperatura	T7
TROX VMR	Medidor Volumétrico	Difusor	Caudal	C1
TME PT1000	RTD	Paredes da Câmara	Temperatura	T8
E+E Elektronik EE820	Sensor NDIR	Câmara	Nível de CO₂	Q1

4.5 Nova *Graphics User Interface*

Devido à implementação de novas funcionalidades nos vários módulos de controlo (temperatura, humidade, caudal de ar novo) e de novos equipamentos entre os quais sensores, e de forma a otimizar e facilitar a interação com o utilizador, surgiu a necessidade de desenvolver e implementar um nova *Graphics User Interface* (GUI), vulgarmente designada por *interface*. A nova *interface* é apresentada na Figura 55.

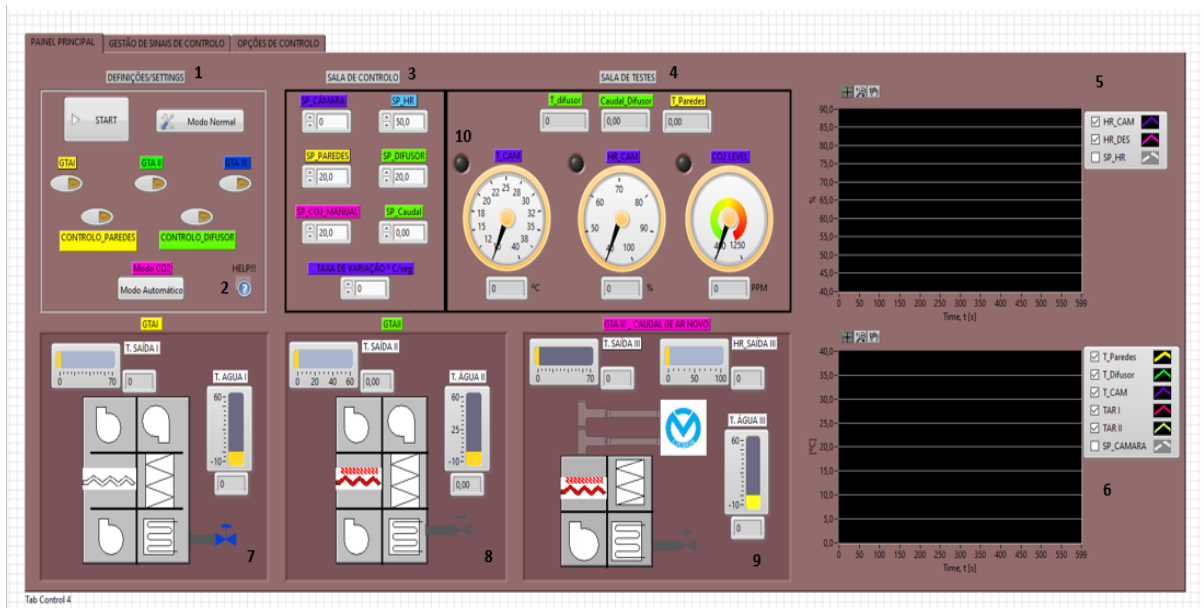


Figura 55 - Nova interface do programa de controlo

A nova interface consiste em 3 abas/separadores: “Painel Principal”, “Gestão de Sinais de Controlo” e “Opções de Controlo”. No painel principal, o *layout gráfico* foi alterado, esteticamente, de modo a ser mais compreensível para o utilizador comum:

1. “Definições/Settings” – Nesta secção, o utilizador pode configurar de que forma quer que o sistema funcione, podendo seleccionar o modo de controlo – Normal ou Taxa de Variação, quais os GTAs que pretende controlar, se pretende controlar a temperatura das paredes e difusor e qual o modo de controlo para o CO_2 – modo automático ou manual;
2. “Botão HELP” – Depois de selecionado, o programa abre uma caixa de texto, dando orientações passo a passo de como configurar o sistema de controlo da câmara;
3. “Setpoints” – Nesta secção, o utilizador coloca os setpoints que pretende, tendo em conta as definições seleccionadas no ponto 1;
4. “Sala de Testes” – Aqui, o utilizador pode seguir a evolução dos vários parâmetros dentro da câmara climática - temperatura, humidade relativa e concentração de CO_2 no interior, assim como temperatura nas paredes e no difusor, e também o caudal de ar que atravessa o difusor;
5. Gráfico de Humidade - Neste gráfico, é possível seguir, em tempo real, a evolução dos parâmetros de humidade relativa na câmara e à saída do desumidificador (GTA III). O autor também adicionou a possibilidade de desativar qualquer das variáveis e ampliar a vista, voltar atrás e escolher um intervalo específico anterior;
6. Gráfico de Temperatura – Semelhante ao ponto 5 e com as mesmas funcionalidades. As variáveis que o autor pode seguir são: TPAR, TDIF, TCAM, TAR I, TAR II) – consultar Anexo VII referente à lista e canais;

7. “GTA I” – Neste *cluster*, o utilizador pode seguir as variáveis referentes ao GTA I, assim como os elementos que estão a ser utilizados no momento;
8. “GTA II” – Semelhante ao ponto 7, mas referente ao GTA II;
9. “GTA III” – Semelhante ao ponto 7, mas referente ao GTA III;
10. LED de aviso – Indicador instalado de forma a informar o utilizador de Overshoot nas variáveis relevantes da câmara.

O segundo separador, Gestão de Sinais de Controlo, contém os valores de saída dos controladores PID dos vários processos de climatização. Este sinais permitem averiguar a ação produzida pelos controladores e verificar o correto funcionamento do sistema de controlo. O terceiro separador, Opções de Controlo, é a parte da *interface* que permite ativar, desativar ou reiniciar o *Autotuning* que realiza a calibração automática dos controladores PID.

4.6 Programa simplificado

Numa primeira fase de testes do programa desenvolvido, constatou-se que, cada vez que se iniciava o VI, ocorria, persistentemente, um erro do tipo Blue Screen of Death (BSoD), 15 minutos depois de o executar. Este tipo de erro significa um problema fatal do sistema operativo que não permite que este continue a operar de forma segura, e por este motivo o computador reinicia.

Várias tentativas foram realizadas para resolver este erro como mudança de memória RAM e disco rígido, regressão de sistema operativo (Windows 7) e NET framework, redução da velocidade de aquisição e envio de sinais e desativação de partes/ciclos do programa e até alterações de diversas drivers. Contudo, nenhuma destas “soluções” apresentou resultados positivos e concluiu-se que a causa do erro se encontrava no próprio programa (uma vez que foi elaborado originalmente na versão 8.5 do LabView, em Windows XP, o que levou, possivelmente, a algum tipo de incompatibilidade).

Com este cenário, o autor decidiu reescrever o programa de raiz (na versão 20.6 do LabView, em Windows 10), na tentativa de diagnosticar qual o elemento que impedia o seu funcionamento correto do programa, ou seja, sem ocorrência do erro. Este processo possibilitou, ao autor, a simplificação, em grande escala, da estrutura base do programa, que permitiu o desenvolvimento de uma versão mais simples e ajustada aos treinos de aclimatação. A simplificações encontram-se enumeradas abaixo:

- O programa consiste agora apenas em um ciclo WHILE, deixando assim de ter três partes (inicialização, controlo e paragem) contendo apenas a parte de controlo;
- Eliminação do modo de controlo “Taxa de Variação”, pois não é utilizado nos treinos de aclimação;
- Eliminação de controladores, considerados desnecessários para os utilizadores regulares, como os caudais de ar dos GTA I e GTA II;
- Eliminação da fila atualizadora dos valores dos sinais de aquisição na interface;
- Eliminação dos vários momentos de diálogo entre programa e utilizador;

A interface do programa simplificado é apresentada na Figura 56, sendo as diferentes secções equivalentes às da interface original (secção 4.5).

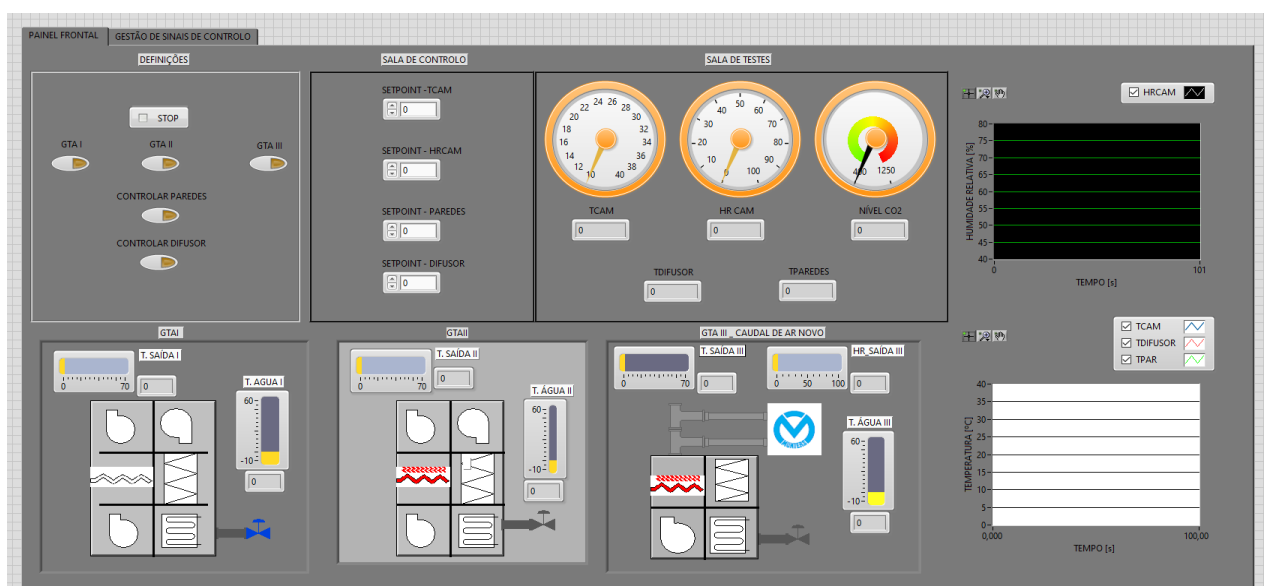


Figura 56 - Interface do programa de controlo simplificado

Refira-se que o programa simplificado, embora tenha solucionado o referido problema informático, não permitiu, contudo, identificá-lo. Assim, pretende-se que, no futuro, todas as funcionalidades da versão original sejam transferidas para a corrente versão funcional. Atualmente, esta versão, embora mais simples, tem já vindo a ser utilizada com sucesso em vários testes. De notar também que devido ao problema informático explicado no início deste subcapítulo, o programa simplificado será o programa usado nos testes de avaliação da matriz desenvolvida (ver secção 5).

4.7 Controlo remoto

Nesta era digital, deve-se procurar aproveitar todas as oportunidades para maximizar o uso da tecnologia existente com o objetivo de aumentar a produtividade, a eficiência e a qualidade dos serviços. Com inovações contínuas nos nossos dispositivos, a forma como acedemos a estes foi modificada, podendo agora ser feita remotamente.

O controlo remoto permite aos utilizadores o acesso a arquivos, a gestão de sistemas e a conexão de diferentes redes através dos seus dispositivos pessoais como tablets e smartphones, sem a necessidade da sua presença física. Atualmente, muitas empresas e instituições já permitem o acesso por controlo remoto às suas redes corporativas. Uma tendência que veio a aumentar com o início da pandemia COVID-19, prevendo-se a sua continuidade.

Neste sentido, o autor procurou habilitar o acesso ao sistema de controlo da câmara climática remotamente, permitindo uma resolução de problemas mais eficiente e, possibilitando o controlo do sistema ao staff diretamente dentro da Sala de Testes, viabilizando assim o acompanhamento contínuo do(s) atleta(s). O autor desenvolveu dois métodos que possibilitam o controlo remoto.

4.7.1 Sistema remoto via *Web Server*

O primeiro método usado para atingir este objectivo foi o uso de uma ferramenta do próprio programa LabView, chamada *Web Server*. Esta ferramenta permite o acesso à GUI do programa através de qualquer *Web browser*, possibilitando também configurar que dispositivos têm acesso, o tipo de acesso (visualização e controlo ou apenas visualização) e a duração desse controlo. A Figura 57 é uma representação ilustrativa deste método, *Web Server*, utilizado para permitir controlo remoto. O computador instalado na câmara é designado por dispositivo servidor e os outros dispositivos aos quais são permitidos acesso são designados por dispositivos clientes.

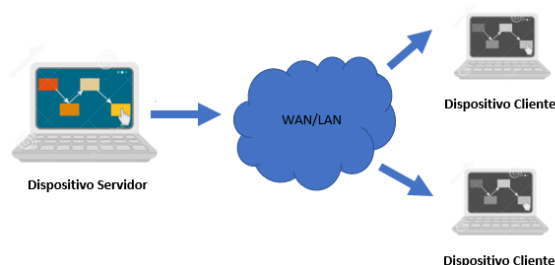


Figura 57 - Princípio de funcionamento da ferramenta *Web Server*

Apesar da utilidade desta ferramenta, esta não é isenta de inconvenientes, já que para a sua utilização é necessário o uso de *NPAPI plugins*, um tipo de programa que adiciona funções específicas a programas maiores. Este mecanismo de *plugins* não é compatível com as versões mais recentes dos *browsers* Google Chrome, Microsoft Edge and Safari (Apple).

4.7.2 Sistema remoto via App

Devido às limitações apresentadas pelo método “*Web Server*”, foram exploradas outras opções para tornar o acesso remoto mais simples, rápido e sem inconvenientes. A evolução dos dispositivos móveis mudou a forma como comunicamos e como controlamos sistemas e a *National Instruments* acompanhou essa tendência ao desenvolver uma aplicação, *Data Dashboard*, que permite o controlo e monitorização remota de sistemas baseados no seu software patenteado *LabVIEW*. A *Data Dashboard LabVIEW* é uma aplicação para dispositivos móveis como smartphones ou tablets que possibilita a criação de um ou vários layouts personalizados para cada equipamento pelo próprio utilizador e que permite visualizar, e controlar, o sistema de controlo presente no dispositivo servidor.

Esta aplicação funciona, configurando as variáveis que o utilizador quer controlar remotamente em variáveis partilháveis (*shared variables*) e verificando o IP do computador da câmara para ser a possível ligação ao dispositivo móvel. A utilização deste software permitiu a criação de uma página remota (Figura 58).

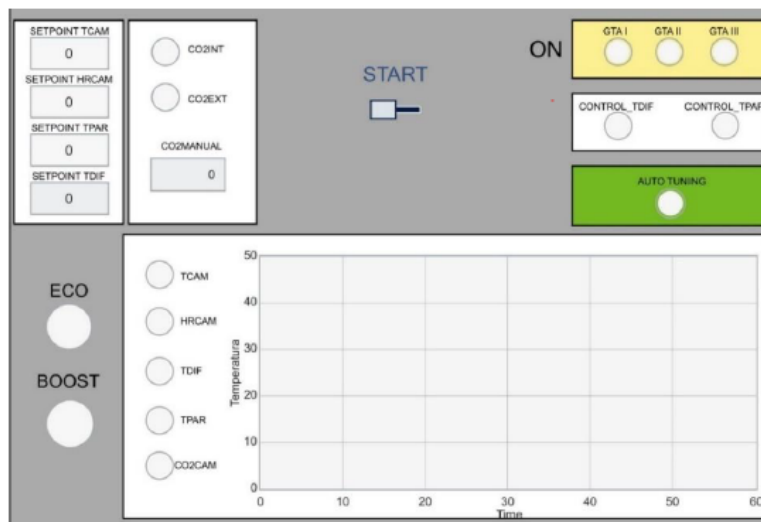


Figura 58 - Interface da APP de controlo remoto

Simultaneamente com o desenvolvimento da App, foram acrescentados os seguintes modos de funcionamento do sistema de AVAC: modo Económico (ECO) e modo BOOST:

- **Modo Económico ou ECO**

Como o próprio nome indica, este modo pretende reduzir a energia consumida. O seu funcionamento começa com duas comparações: a primeira, entre a temperatura do ar novo, valor medido pelo sensor Y2, e o setpoint da câmara, e a segunda comparação, entre a temperatura do ar reciclado, medido pelo sensor T4, e o setpoint da câmara.

Caso a diferença da primeira comparação seja menor que a diferença da segunda, a insuflação de ar para a câmara será, exclusivamente, feita pelo GTA III (apenas de ar novo). Caso contrário, a insuflação é efetuada pelo GTA I. Em qualquer dos casos, o GTA II será desativado, quando este modo é selecionado.

Em termos práticos, este modo ainda não se encontra operacional. O acionamento das resistências termoelétricas presentes no GTA III não é ainda possível, devido a falta dos tirístores e da placa de circuito (seção 3.7.4, Anexo IX e Anexo VIII).

- **Modo BOOST**

Este modo é recomendado se do utilizador pretender um aquecimento rápido. Com a ativação deste modo, todos os GTAs são ativados simultaneamente para permitir uma aproximação rápida ao setpoint. Posteriormente, com a aproximação ao valor do setpoint de temperatura desejado na câmara, o programa desativa os GTAs, cuja temperatura de saída esteja mais afastada do setpoint pretendido. Isto resultará em menor Overshoot e menos tempo será necessário para o sistema atingir o regime estacionário.

4.8 Substituição de transdutores

Em Dezembro de 2020, os treinos de aclimatação dos atletas franceses Yohan Diniz e Kevin Champion tiveram de ser adiados, não só devido ao atraso na chegada dos novos módulos, mas também porque foi diagnosticado um problema nos transdutores conectados aos sensores Y1 e Y2. Estes transdutores, que deveria converter valores de corrente 4-20 mA para valores entre 4-20 mA¹¹, estavam a enviar valores substancialmente superiores (aproximadamente 36 mA).

¹¹ Como já referido, alguns transdutores apenas encontram-se instalados para isolar galvanicamente o circuito.

Para melhor diagnóstico, o autor montou um circuito eletrónico bastante simples para confirmar a avaria dos transdutores. Este circuito consistiu numa pilha de 9V, uma resistência de 1000 ohms, vários cabos leap, uma breadboard e os transdutores, que se pretendiam testar, tal como representado na Figura 59.



Figura 59 - Circuito eletrónico montado para teste dos transdutores suspeitos de estarem danificados

De acordo com a Lei de Ohm, a corrente *input* do transdutor e, conseqüentemente de saída, com este circuito montado (Figura 54) é de 9 mA, mas este convertia para valores muito superiores e variados (33, 36, 44, ... mA). Através deste método experimental, pode-se concluir que 2 dos 4 transdutores testados se encontravam danificados e posteriormente foram substituídos por transdutores do mesmo modelo (BORDENSEN PXU-20)

5. Avaliação da matriz desenvolvida

Neste capítulo apresenta-se um conjunto de testes para avaliar o trabalho desenvolvido, apresentado no capítulo anterior. Importa mencionar que os testes apresentados foram realizados sem proceder a repetições. Obviamente, os resultados deveriam ser justificados por testes de reprodutibilidade, para se poder desenvolver médias, desvios-padrões e distribuições probabilísticas (intenção do autor). Contudo, tal não foi possível devido a várias condicionantes durante o trabalho (demora na receção de componentes vários, problemas de compatibilidade, erro BSOD, entre outros) e dada ao tempo necessário e prolongado na realização de cada teste. Deste modo, os resultados devem ser avaliados com alguma cautela, ainda que permitam dar uma noção do real comportamento do sistema. A frequência de amostragem, f_s dos testes da secção 5.2 e 5.3 é de 5 Hz, ou seja, o período de amostragem, T_s , é de 0,2 segundos. Isto significa que as amostras estão espaçadas por 0,2 segundos aproximadamente (5 amostras por segundo).

5.1 Testes Prévios

Durante o desenvolvimento desta dissertação, o autor elaborou vários programas simplificados em LabVIEW, com o objectivo de testar e comprovar o funcionamento dos componentes AVAC dos GTAs e medir o seu desempenho máximo.

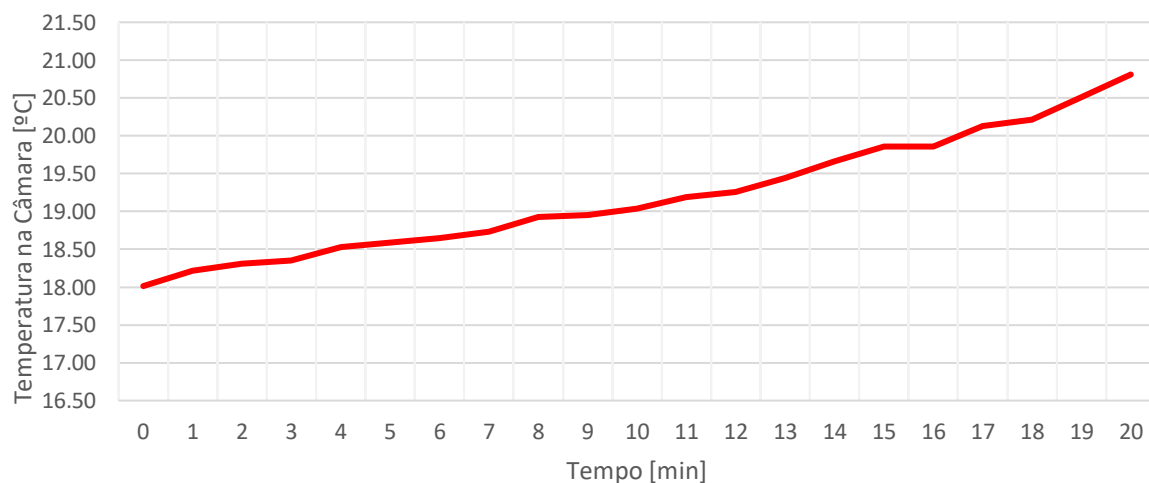


Figura 60 - Teste preliminar realizado às resistências do GTA I e GTA II

As baterias de aquecimento dos GTA I e GTA II, a funcionarem simultaneamente e na máxima capacidade, apresentavam uma capacidade de aquecimento da câmara de 0,14°C/min (ver Figura 60). As baterias de arrefecimento não puderam ser devidamente testadas, pois os chillers não se apresentavam funcionais aquando da realização dos testes devido a uma das bombas de circulação da água de refrigeração não estar operacional.

Tal como as baterias de aquecimento e arrefecimento, o funcionamento do humidificador e o seu desempenho máximo foram testados. Durante os ensaios, o aparelho apresentou um capacidade de humidificação muito boa, cerca de 1,2% (HR)/min (Figura 61).

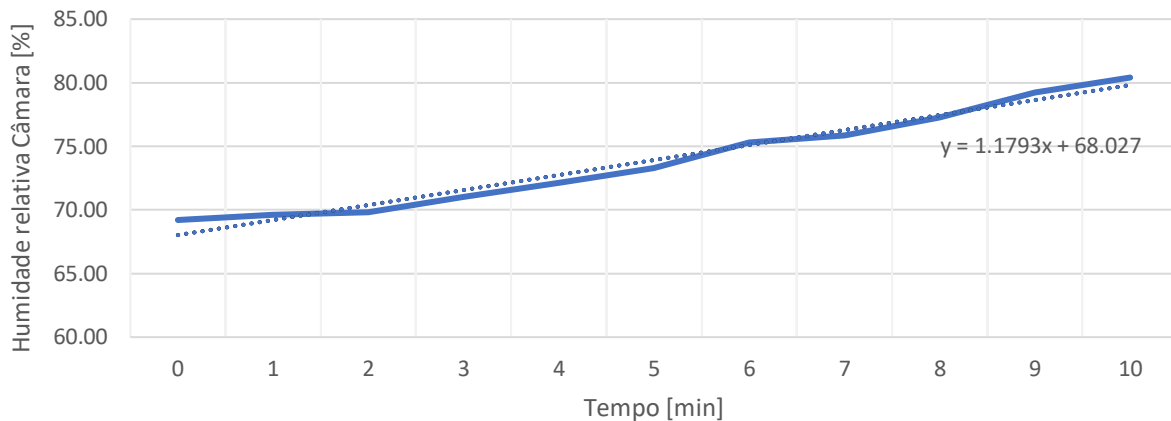


Figura 61 - Teste preliminar realizado ao humidificador

5.2 Teste ao controlador limitador implementado

Tal como referido no subcapítulo 4.3.1 “Proteção do Humidificador e Desumidificador”, foi implementado um controlador PID especial, que permite limitar a taxa variação do sinal de envio que chega aos dois aparelhos responsáveis pela manipulação da humidade do ar dentro da câmara, com o objectivo único de os proteger eletronicamente.

Neste subcapítulo pretende-se avaliar, de que forma, este controlador protetor influencia a estabilidade e outras características do sistema de controlo de humidade apresentadas no subcapítulo 2.2.3 “Definição de Terminologias” e qual o melhor valor limitador, em EGU/min para o controlador. A avaliação foi feita através de uma situação de humidificação da câmara climática sem aquecimento ou arrefecimento, com um setpoint de 70% e com condições iniciais sempre abaixo dos 60 %. Neste caso, o desumidificador apenas entra em funcionamento quando o valor de humidade relativa ultrapassa o setpoint, na tentativa de manter a humidade na câmara próxima desse valor. Cada teste teve, aproximadamente a mesma duração, uma hora. Antes dos testes, o autor previu que o limitador pudesse afetar negativamente o tempo de subida e o overshoot.

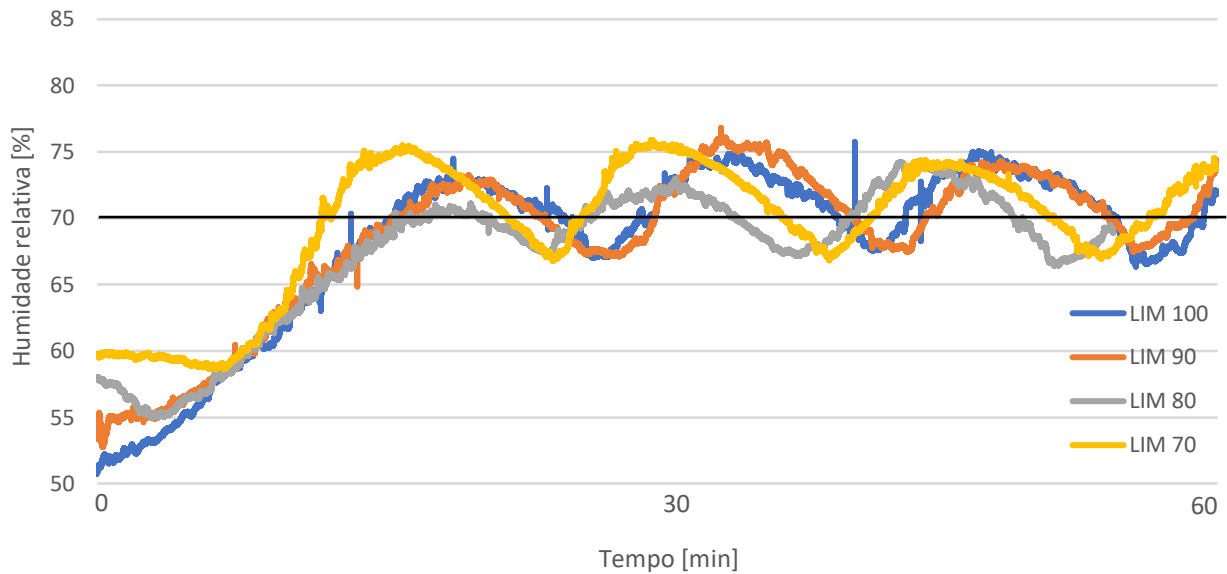


Figura 62 - Step Response do sistema nos ensaios de humificação com valor limitador 70, 80, 90 e 100 (o setpoint encontra-se marcado a preto)

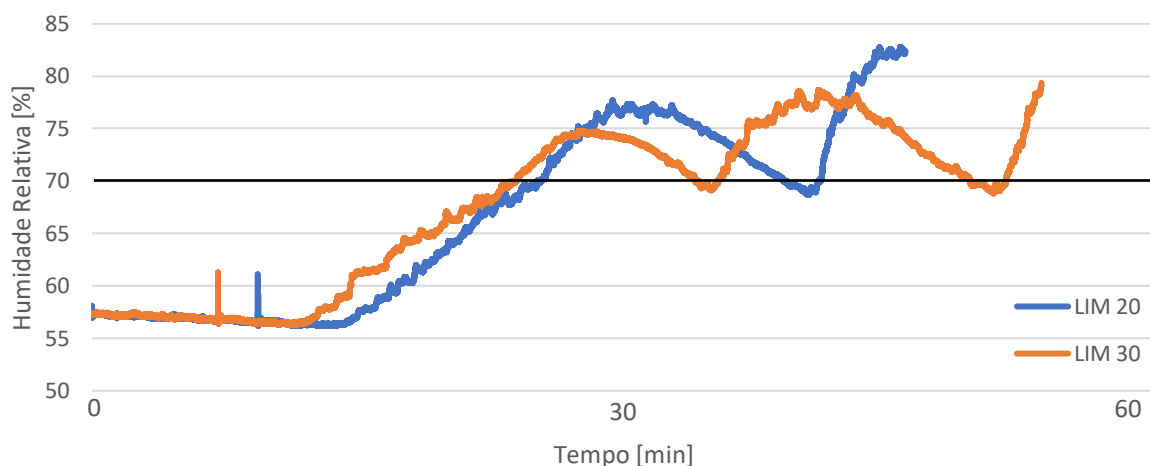


Figura 63- Step response do sistema ao processo de humificação com valor limitador 20, e 30 (o setpoint encontra-se marcado a preto)

Nas Figuras 62 e 63 pode-se visualizar as respostas do sistema de controlo com os valores de 20, 30, 70, 80, 90 e 100 EGU/min para o limitador (idêntico para o humidificador e para o desumidificador). Por questões de segurança, o sistema não foi testado sem limitador, devido ao risco de avaria do humidificador.

Analisando o segundo gráfico, chega-se a conclusão de que o sistema se torna instável se o sistema for programado com um valor limitador baixo, levando a um valor de overshoot bastante elevado (Tabela 13). Ambos os testes (20 e 30 EGU/min) foram encurtados pelo autor, porque se observou rapidamente uma instabilidade nos resultados. Daqui, podemos concluir que os valores dos ganhos do controlador PID de humificação não estão bem calibrados para se usar um valor de limitador baixo.

Tabela 13 – *Maximum Overshoot (MO)* e *Percent Overshoot (PO)* registados nos ensaios de humificação com valores limitadores iguais para o humidificador e o desumidificador

Valor limitador [EGU/min]	MO Humificação [%HR]	PO Humificação [%]	MO Desumificação [%HR]	PO Desumificação [%]
20	12,08	18,3	1,33	1,9
30	9,14	13,1	1,65	2,4
70	5,91	8,4	3,21	4,6
80	4,29	6,1	3,57	5,1
90	6,79	9,7	2,87	4,1
100	5,76	8,2	3,68	5,3

Com o objectivo de otimização do processo de humificação/desumificação, procurou-se encontrar o valor para o controlador PID limitador que mais se adequava ao sistema de controlo.

Com o auxílio da Figura 62 e das Tabelas 13 e 14, pode-se retirar as seguintes conclusões:

- O *Maximum Overshoot* e *Percent Overshoot* de humificação tendem a diminuir, com o aumento do valor limitador ($r = -0,86$), estabilizando entre os 4-6 %HR. Esta gama é considerada aceitável para os treinos de aclimação – os valores devem ser de ± 5 %HR do setpoint;
- O *Maximum Overshoot* e *Percent Overshoot* de desumificação tendem a aumentar, com o aumento do valor limitador ($r = 0,93$), estabilizando entre os 2-3 %HR, estando também dentro do intervalo aceitável;
- Ao contrário do previsto, o tempo de subida mantém-se aproximadamente constante – entre 1,0 e 1,4 %HR/min, à exceção do 70 EGU/min, com o aumento do valor limitador (Tabela 14), mas notou-se que o Deadtime aumenta significativamente com a diminuição do limitador ($r = -0,99$). Daqui, podemos colocar a hipótese que o humidificador apenas se ativa quando o valor do sinal atinge um determinado valor do intervalo, 0-5V. Esse valor não foi determinado.

- O controlo de humidade implementado não é estável, ou seja, não é atingido regime permanente. Isto pode ser explicado porque, apesar da técnica utilizada para controlar cada equipamento se basear em controladores PID (ver seção 2.2.2) no geral, o sistema de humificação/desumificação funciona com um controlo ON/OFF (ciclo *if...else*) - se o setpoint de humidade relativa for maior que a respetiva variável de processo, o humidificador é ligado e o desumidificador desligado. Pelo contrário, se o setpoint for menor, o humidificador desliga e desumidificador é ativado. No futuro, poderá ser necessário implementar outro tipo de ciclo ou outra forma de programar o controlo de humidade, tendo como objectivo estabilizar o sistema.

Tabela 14 - Tempo de subida e *deadtime* registado durante um processo de humificação com valores limitadores iguais para o humidificador e o desumidificador

Valor limitador [EGU/min]	Tempo de subida [%HR/min]	Deadtime [minutos]
20	1,44	≈ 15
30	1,32	≈ 13
70	0,50	≈ 6
80	1,26	≈ 6
90	1,02	< 2
100	1,26	< 2

Observando os resultados anteriormente apresentados, é interessante mencionar que, ao contrário da humificação, os melhores resultados em termos de overshoot na desumificação foram obtidos quando o valor limitador do controlador em estudo era baixo. Por esse motivo, justificou-se uma segunda fase de testes, onde foram analisadas combinações entre um valor limitador alto para a humificação e um valor limitador baixo para desumificação. Para esta segunda fase, a metodologia de avaliação foi a mesma, ensaio apenas de humificação com condições iniciais abaixo de 60%, com um setpoint de 70% e duração de 60 minutos.

Relativamente aos valores do controlador utilizados, definiu-se um valor limitador de humidificação fixo, de 100 EGU/min, e aumentou-se progressivamente o valor limitador do desumidificador de ensaio para ensaio, começando com 20 EGU/min. Os resultados obtidos estão representados no Figura 64 e na Tabela 15 .

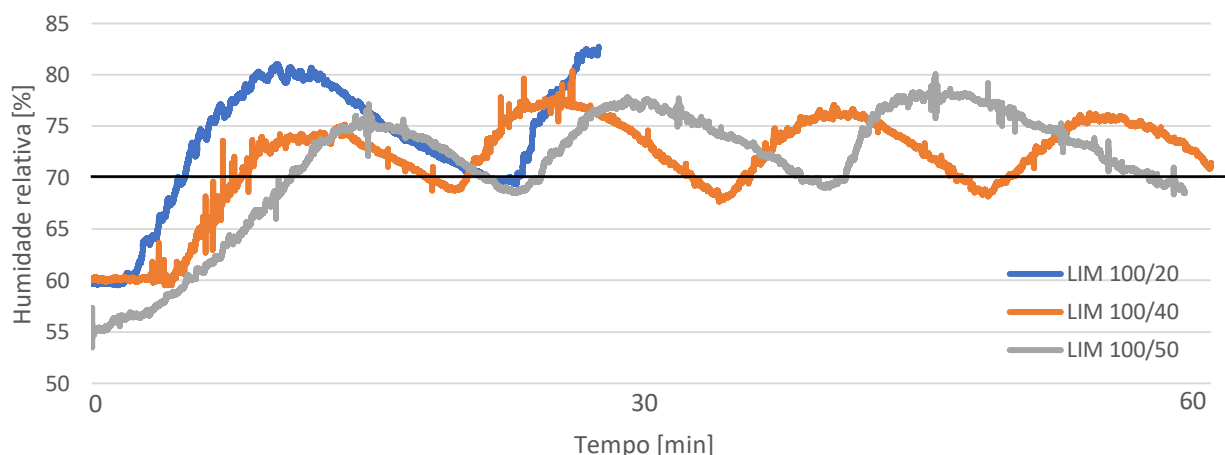


Figura 64 - Step response do sistema ao processo de humidificação com valor limitador 100/20, 100/40, 100/50 o setpoint encontra-se marcado a preto)

Tabela 15 – *Maximum Overshoot* e *Percent Overshoot* registado nos ensaios de humidificação com valores limitadores mistos

Valores limitador [EGU/min]	MO Humidificação [%HR]	PO Humidificação [%]	MO Desumidificação [%HR]	PO Desumidificação [%]
100/20	12,72	18,7	0,66	0,95
100/40	10,37	14,8	2,32	3,32
100/50	10,08	14,3	1,90	2,71
100/60	5,79	8,0	2,52	3,68
100/70	7,56	10,8	2,61	3,73

No ensaio de 100/20 EGU/min, pôde-se concluir imediatamente que o sistema não tinha estabilidade (ver Figura 64) e por esse motivo encurtou-se o ensaio, apesar de demonstrar resultados excelentes em termos de *Overshoot* de Desumidificação (0,66 %HR).

Com esta segunda ronda de ensaios, pode-se concluir o seguinte :

- Com o aumento do valor limitador do desumidificador, o *Overshoot* de desumidificação tende a aumentar ($r = 0,89$) ;
- Com o aumento do valor limitador do aparelho de desumidificação, ocorre uma diminuição no *Overshoot* de Humidificação até ao limitador 60 EGU/min ($r = -0,89$) .

Com base nos resultados das duas fases de teste do limitador, o autor experimentou uma redução de 15% do valor máximo da tensão de controlo do humidificador de 5V para 4,25V (*condicionante, C*), com intenções de diminuir o Overshoot de humidificação, que apresentou sempre valores superiores a 4%HR. Na Tabela 16 pode-se observar os resultados conseguidos.

Tabela 16 – *Maximum Overshoot* e *Percent Overshoot* registado nos ensaios de humidificação com valores limitadores de 100/60 e 100/70, com e sem condicionante

Valores limitador [EGU/min]	MO Humidificação [%HR]	PO Humidificação [%]	MO Desumidificação [%HR]	PO Desumidificação [%]	C
100/60	5,79	8,0	2,52	3,68	×
100/60	3,13	4,46	3,32	4,74	✓
100/70	7,56	10,8	2,61	3,73	×
100/70	3,35	4,79	2,57	3,68	✓

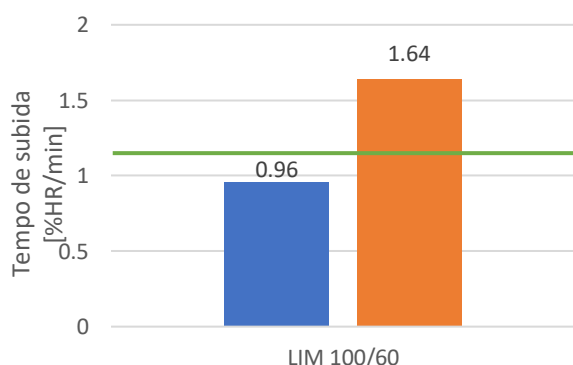


Figura 65 - Comparação do tempo de subida registado nos ensaios de humidificação com setpoint 70%, controlando TCAM (azul) e TPAR (laranja)

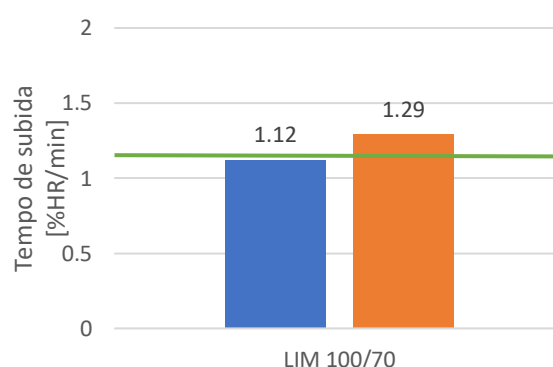


Figura 66 - Comparação do tempo de subida registado nos ensaios de humidificação com setpoint 70%, controlando TCAM (azul) e TPAR (laranja)

Com a condicionante no sinal de envio recebido pelo humidificador, verificou-se uma redução significativa (aproximadamente 50%) no Overshoot de humidificação, sem um aumento notável no Overshoot no processo de desumidificação. Estes testes adicionais, demonstraram que não há uma alteração considerável no tempo de subida (Figura 65 e 66), que apresentaram valores semelhantes aos já calculados na Tabela 14 e muito próximos da média (Tabela 14), assinalada a verde. Esta redução significativa do valor de *Overshoot* com a condicionante demonstra que existe um sobredimensionamento do humidificador, verificando-se que o valor máximo de tensão recebido é exagerado. Este método de redução do valor de tensão de controlo é bastante simples e permite melhorar significativamente o sistema de controlo de humidade.

5.3 Teste ao sistema de controlo

Neste subcapítulo, o autor pretende avaliar a performance do sistema de controlo numa situação de preparação da câmara para um treino de aclimação a um ambiente quente e húmido, ou seja, situação de aquecimento e humidificação. Estes testes têm como objectivo avaliar o sistema desenvolvido e estabelecido, assim como entender as vertentes em que ele pode ser melhorado.

5.3.1 Controlo de temperatura

Para este efeito, foram testados dois ambientes térmicos com setpoints diferentes para o interior da câmara : 28 °C e 80%HR, 34 °C e 75%HR (condições de treino de preparação dos atletas franceses olímpicos de marcha em Fevereiro de 2021). Em relação à temperatura, cada um destes ambientes foi testado com controlo da temperatura da câmara (TCAM) e com controlo da temperatura das paredes (TPAR). Os resultados das características apresentam-se na Figura 67 e nas Tabelas 17 e 18.

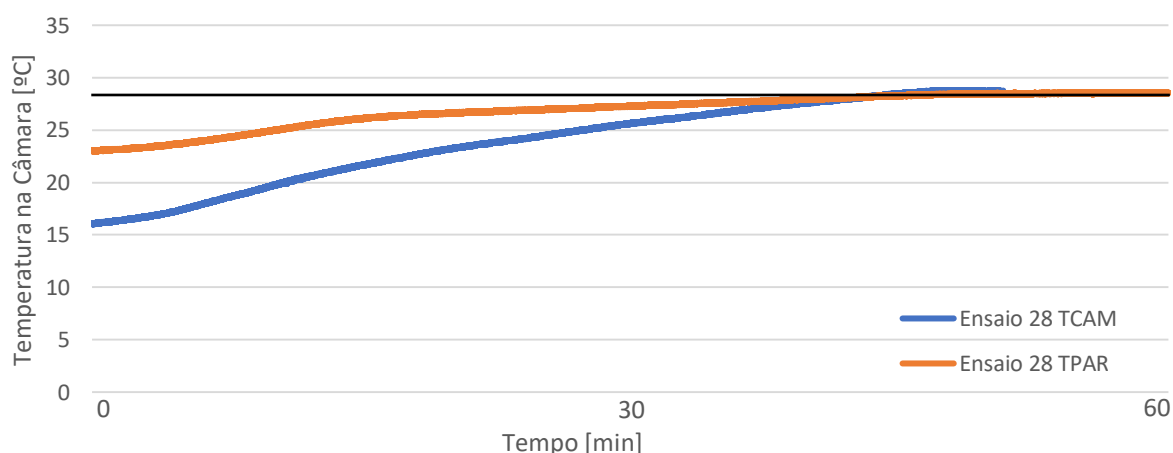


Figura 67 - Step response do sistema ao processo de aquecimento, com setpoint de 28 °C (o setpoint encontra-se marcado a preto)

Tabela 17 - Deadtime, Settling time e Erro steady-state registados nos ensaios de aquecimento controlando a variável TCAM

Setpoints [°C, %HR]	Deadtime [minutos]	Settling time [hh:mm:ss]	Erro steady-state [°C]
28 , 80	≈ 2	00:57:20	0,6
34 , 75 ¹²	< 1	-	-

¹² Os valores de settling-time e de erro steady-state não são apresentados na Tabela 17, porque o sistema de controlo não atingiu estabilidade.

Tabela 18 - Deadtime, Settling time e Erro steady-state registados nos ensaios de aquecimento controlando a variável TPAR

Setpoints [°C, %HR]	Deadtime [minutos]	Settling time [hh:mm:ss]	Erro steady-state [°C]
28 , 80	≈ 2	00:47:57	0,5
34 , 75	< 1	01:00:41	0,1

Pode-se verificar que os resultados obtidos referentes ao sistema de controlo implementado são bastante satisfatórios, com os quatro ensaios a apresentar boa estabilidade, com valores de tempo morto ou *deadtime* e erro *steady-state* pouco significativos, mesmo sem sistema de arrefecimento operacional. O settling time assume valores razoáveis, mas com possibilidade de melhoria.

Neste ponto importa salientar a diferença na capacidade de aquecimento do GTA I e do GTA II, visto que a temperatura máxima registada pelas RTDs, instaladas nas saídas destes grupos de tratamento de ar, durante os quatro testes efetuados foi de 42,6 °C e 68,9 °C, respetivamente. Esta diferença é justificável pela diferença nos caudais atuais dos dois grupos, com o GTA II a apresentar um caudal menor que o GTA I. Uma diferença bastante considerável de temperaturas e que se resolve no futuro, poderá apresentar-se com uma possibilidade para incrementar a capacidade de aquecimento, melhorando o *rise time* e o *settling time*.

No que diz respeito ao Overshoot, o sistema também produziu uma excelente performance nos quatro ensaios de aquecimento (Figura 68), considerando que não tinha sistema de arrefecimento funcional e ativo, porque como já foi mencionado (ver secção 5.1), uma das bombas circulatórias do circuito da água de refrigeração encontrava-se avariada.

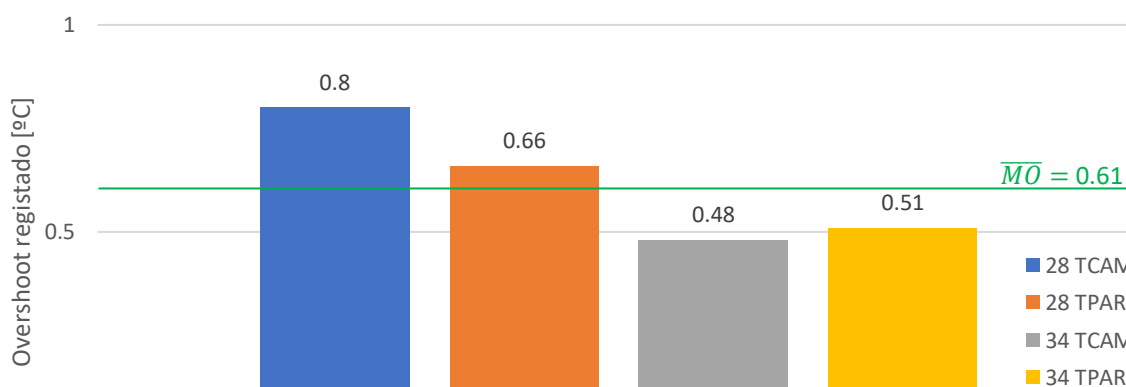


Figura 68 - Valores de overshoot registados nos ensaios de aquecimento e humidificação (valor médio assinalado a verde)

De notar que não foi possível utilizar o difusor durante os ensaios, pois o sensor RTD instalado no interior do difusor, encontrava-se danificado.

5.3.2 Controlo de humidade

No caso dos testes ao controlo da humidade na câmara climática, o autor utilizou os melhores resultados obtidos no estudo do limitador do humidificador e desumidificador, ou seja, 100 e 70 EGU/min, respetivamente, mas aproveitou a ocasião para voltar a confirmar o efeito do uso da condicionante de 15% no sinal de envio para o humidificador, reduzindo o intervalo de sinal enviado de [0;5] V para [0;4,25] V (ver secção 5.2).

Globalmente, observa-se uma redução de 3 a 4 %HR no Overshoot de Humidificação e uma conservação dos resultados de Overshoot relativamente aos ensaios representados na Tabela 19. Tal como se verificou na secção 5.2, a condicionante provando, mais uma vez, o sobredimensionamento do humidificador em relação à câmara.

Tabela 19 – *Maximum Overshoot* e *Percent Overshoot* registado nos ensaios de aquecimento e humidificação, com valores limitadores iguais e com/sem condicionante

Setpoints [°C, %HR]	C	MO Humidificação [%HR]	PO Humidificação [%]	MO Desumidificação [%HR]	PO Desumidificação [%]
28 , 80	×	3,39	4,24	3,27	4,68
28 , 80	✓	0,73	0,91	4,77	5,96
34 , 75	×	4,46	6,38	2,77	3,96
34 , 75	✓	1,52	2,03	2,67	3,57

O tempo de subida nestes quatro ensaios manteve-se relativamente constante (Figura 69) com valores na gama dos observados na Tabela 14. Isto significa que o tempo de subida se mantém constante, apesar de um processo de aquecimento ocorrer ao mesmo tempo. Ao consultar os gráficos de dispersão do Anexo XI, verifica-se que o tempo de subida tende para os mesmos valores (1-1,5 %HR/min), tendo uma relação de correlação fraca do setpoint de humidade relativa ($r = -0.20$), uma relação de correlação desprezável com o valor do limitador do humidificador ($r = -0.04$) e independentemente se está a ocorrer simultaneamente um processo de mudança de temperatura.

Outra conclusão que se pode retirar do funcionamento do sistema de controlo no processo de humidificação é que o valor de saída do controlador PID de humidificação é quase sempre máximo, pois os valores de tempo de subida, em quase todos os ensaios, são muito semelhantes aos observados nos testes prévios (ver secção 5.1).

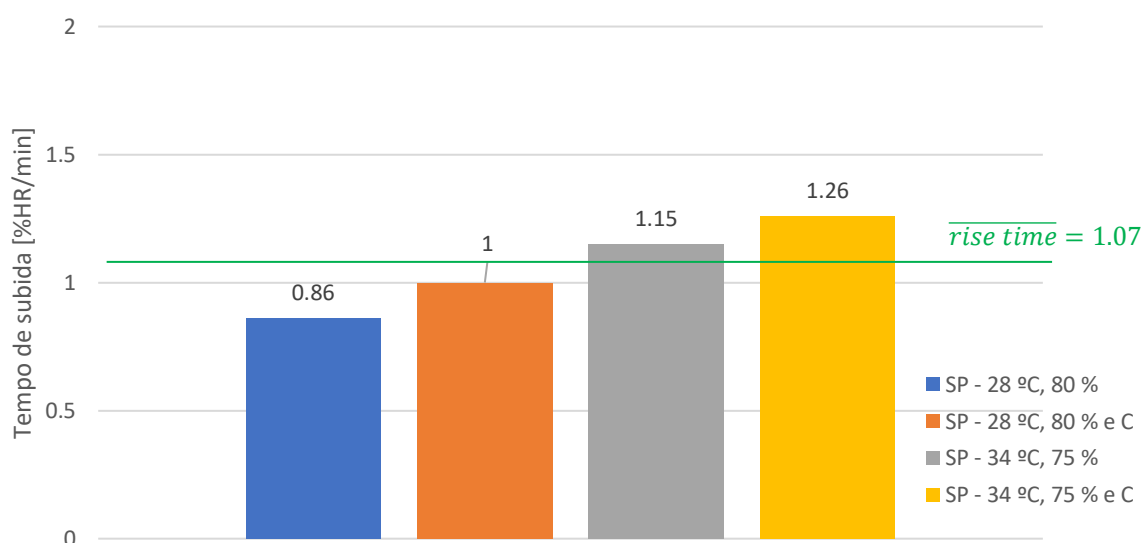


Figura 69 - Valores do tempo de subida registados nos ensaios de aquecimento e humedificação (valor médio assinalado a verde)

5.4 Teste aos controladores PID Autotuning

Como já foi referido, o meu colega colaborativo, António Pires [33], implementou, no programa original de controlo do sistema de AVAC da câmara climática, um modelo que permite configurar os ganhos dos controladores PID de forma automática, em inglês, Autotuning [33]. Apesar da sua implementação, não foi possível ser testado devido os atrasos sucessivos nas entregas dos vários componentes, devido aos vários confinamentos aquando da pandemia de COVID-19. Assim, o autor dispôs-se a testar este sistema para entender melhor o seu funcionamento e de forma, a facilitar futuras investigações no que diz respeito à configuração automática dos controladores.

Apesar das múltiplas opções apresentadas pelo *LabVIEW*, a elaboração do módulo Autotuning foi realizada através de dois VI: PID Autotuning e PID Autotuning Temperature VI. Os métodos de configuração utilizados por ambos os VIs são diferentes. O primeiro utiliza o método Ziegler-Nichols (ver secção 2.2.4.2), utilizando conjuntamente uma técnica PID Relay e o segundo utiliza o método Internal Model Control (ver secção 2.2.4.2), também em conjunto com uma técnica PID Relay. O VI, PID Autotuning, apresentado no parágrafo anterior, abre uma janela *pop-up*, *Autotuning Wizard* (Figura 54) quando convocado. Nesse momento, o utilizador configura o tipo de controlador que pretende (P, PI ou PID), o relay, o número de ciclos e o nível de ruído da variável de processo.

O processo de configuração por este VI provou ser bastante demorado. Como pode ser observado pela Figura 54, numa das tentativas de configuração do controlador PID de aquecimento do GTA I não foi possível obter ganhos (K_p , T_i e T_d) após 151 minutos, ou seja, 2 horas e 30 minutos depois de iniciar o Autotuning. Para além disso, o processo de configuração inicial, acima descrito, não se apresenta ser tarefa fácil para o utilizador comum.

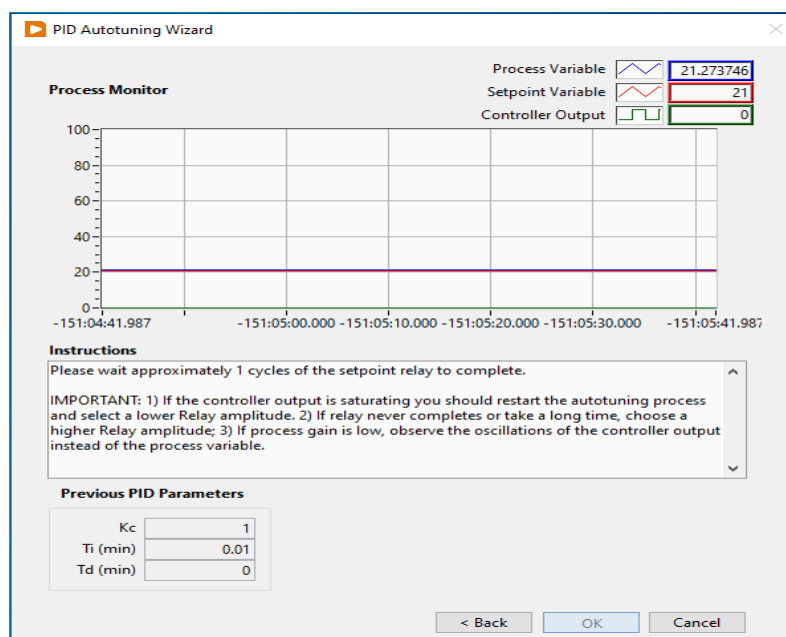


Figura 70 - Janela *pop-up*, *Autotuning Wizard* (PID Autotuning)

O VI, PID Autotuning Temperature, segue a mesma lógica que o anterior. Existe a necessidade de configurar os parâmetros pretendidos para ser possível a configuração inicial, sendo que estes se diferenciam do primeiro VI porque o método de configuração utilizado é diferente. Para este VI, é necessário definir: o tipo de controlador que se pretende (P, PI ou PID), o relay e a constante de tempo. Mais uma vez, o utilizado comum teria alguma dificuldade no processo de configuração inicial. Além do mais, e apesar deste VI apresentar um tempo de resposta bastante mais baixo que o primeiro (apenas alguns segundos a concluir), os valores dos ganhos não parecem ser adequados (Tabela 20). Isto pode sugerir uma incompatibilidade deste objeto Autotuning com o controlo de temperatura implementado na câmara climática. Após várias consultas em fóruns online da especialidade, outros utilizadores também referem que problemas de configuração neste VI podem estar a dever-se à incompatibilidade com o sistema.

Tabela 20 - Comparação entre valores obtidos pelo método tentativa-erro e pelo PID Autotuning Temperature VI

	Ganhos PID Manuais ¹³	Ganhos PID Autotuning Temperature	
K_p	100	-0,011	-0,304
T_i	0,01	-0,0056	-12,304
T_d	0,01	0	NaN ¹⁴

Devido à indisponibilidade temporal do autor, a avaliação do sistema Autotuning implementado resumiu-se a apenas alguns testes elementares. Ainda assim, apesar dos (primeiros) resultados negativos, o autor sugere que este processo de configuração automática dos ganhos prossiga, na tentativa de estudar a fundo esta metodologia.

¹³ Estes valores foram obtidos pelo método tentativa-erro (ver secção 2.2.4.2), que apresentam resultados aceitáveis (ver secção 5.2 e 5.3). Esta configuração foi realizada pelo Professor Doutor Adélio Gaspar e Professor Doutor Marco Fernandes.

¹⁴ Not a Number

6. Conclusão

Atendendo aos objetivos enumerados no início desta dissertação, conclui-se que se conseguiu desenvolver e otimizar o sistema de AVAC da câmara climática e seu controlo com relativo sucesso. Foi ativado o sistema de controlo da humidade procedeu-se à sua automatização, através do desenvolvimento de metodologias de controlo adequadas, tendo sido implementado um controlador limitador do humidificador e desumidificador para proteger o funcionamento dos dois atuadores. O sistema de humidade foi otimizado com valores limitadores de 100 EGU/min e 70 EGU/min para o humidificador e desumidificador respetivamente. Além disso, a programação de uma condicionante de 15% no sinal de envio para o humidificador conseguiu melhorar, ainda mais, a otimização efetuada. Por seu lado, o sistema de temperatura beneficiou de melhorias ao nível dos componentes e das metodologias de controlo, tendo também sido levantado os seus parâmetros característicos.

A ferramenta Autotuning esboçada e desenvolvida pelo meu colega António Pires [33] não obteve os melhores resultados, que pode sugerir uma incompatibilidade dos VI's idealizados com o sistema de controlo da câmara.

A grande novidade é, para além dos sistemas de controlo desenvolvidos, a instalação de uma nova versão LabVIEW, assim como a modernização dos elementos de controlo: módulos de aquisição e de envio de sinal, com o programa já preparado para a sua utilização e um novo computador com características superiores.

Foi também implementado um sistema de controlo para a insuflação de ar novo correlacionado com o nível de CO₂, garantido a qualidade do ar no interior da câmara durante os treinos de aclimação. Contudo, não foi possível testar este sistema.

Em termos de melhorias gráficas, foi implementada uma nova interface do programa permitindo uma maior facilidade de utilização, como o desenvolvimento do controlo remoto, viabilizando o controlo das variáveis dentro da sala de testes, o que permite um melhor acompanhamento dos atletas durante o treino. Foi ainda criada uma versão do programa simplificada e personalizada para os treinos de aclimação.

Em suma e apesar dos vários contratempos encontrados, o autor considera que o trabalho realizado foi bastante satisfatório, visto que foi possível a reativação de vários elementos do sistema de AVAC da câmara climática e melhorar o seu funcionamento em várias vertentes que possibilitarão uma melhor qualidade do serviço prestado aos atletas, para realizarem treinos de aclimação, etapa fulcral na sua preparação para os Jogos Olímpicos na capital japonesa, cujo clima será mais um obstáculo a bater na busca de uma medalha e reconhecimento eterno.

Como é comum em projetos práticos de Dissertação de Mestrado, muitas adaptações e ideias ficaram por implementar devido à falta de tempo e/ou recursos. Assim, no seguimento deste trabalho, propõem-se algumas tarefas para desenvolvimento futuro:

- Planificação e desenvolvimento de um sistema que permita treino de aclimação à altitude, que pode ser alcançado através de um sistema de redução do conteúdo de oxigénio presente no interior da sala de testes. É da opinião do autor que esta ideia valorizaria bastante a câmara climática e permitiria exponenciar a sua utilização;
- Isolamento das condutas dos GTAs da câmara climática. Isto permitiria reduzir as perdas térmicas e por isso, tornaria o sistema de AVAC mais eficiente;
- Um sistema que viabilizasse o controlo remoto do PC, sistemas de controlo e aos atuadores, o que permitiria, por exemplo, ativar o sistema com a antecipação necessária para atingir as condições ideais aquando dos testes de aclimação;
- Aquisição de transdutores adicionais. Vários transdutores avariaram no decorrer desta dissertação e apesar de não haver transdutores em falta para a medição de sinais de aquisição ou para sinais de envio, não existem transdutores de reserva caso exista, de novo, avaria destes equipamentos.
- Aquisição e instalação de uma bomba de circulação. Uma das bombas de circulação do sistema secundário encontra-se danificada. Além disso, é necessário a proteção das bombas circulatórias do sistema de arrefecimento, que se encontram expostas às condições meteorológicas;
- Calibração dos sensores VAISALA usados para a medição da temperatura e humidade no interior da câmara (modelo HMW60Y) e à saída do GTA III (HMW60Y);
- Aquisição de uma nova RTD PT1000 para o difusor como substituta da atual, que se encontra danificada.

Para investigação futura, o autor recomenda a continuação do desenvolvimento do programa simplificado, a continuação do trabalho desenvolvido em relação à configuração automática dos controladores PID, a implementação de um programa utilizando a lógica Fuzzy (no seguimento do trabalho que acompanhou [33]) e um estudo intensivo do efeito do sinal de envio nas resistências térmicas que evitam a saturação do desumidificador. Outra investigação pertinente seria o estudo da contribuição das serpentinas de arrefecimento e do desumidificador no processo de desumidificação.

Refira-se ainda que, durante o período que levou a realização deste trabalho, o autor desenvolveu competências a nível de controlo e automação, eletrónica, informática e de climatização.

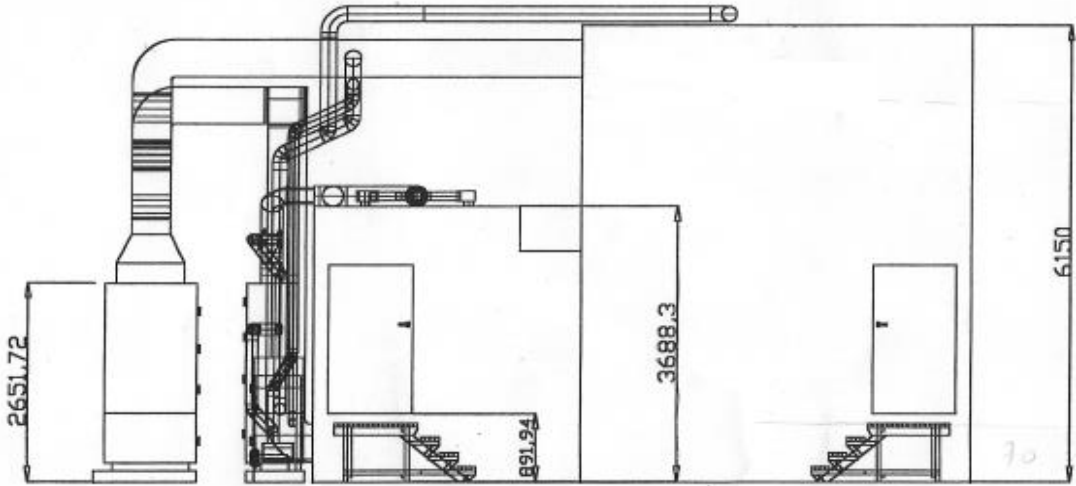
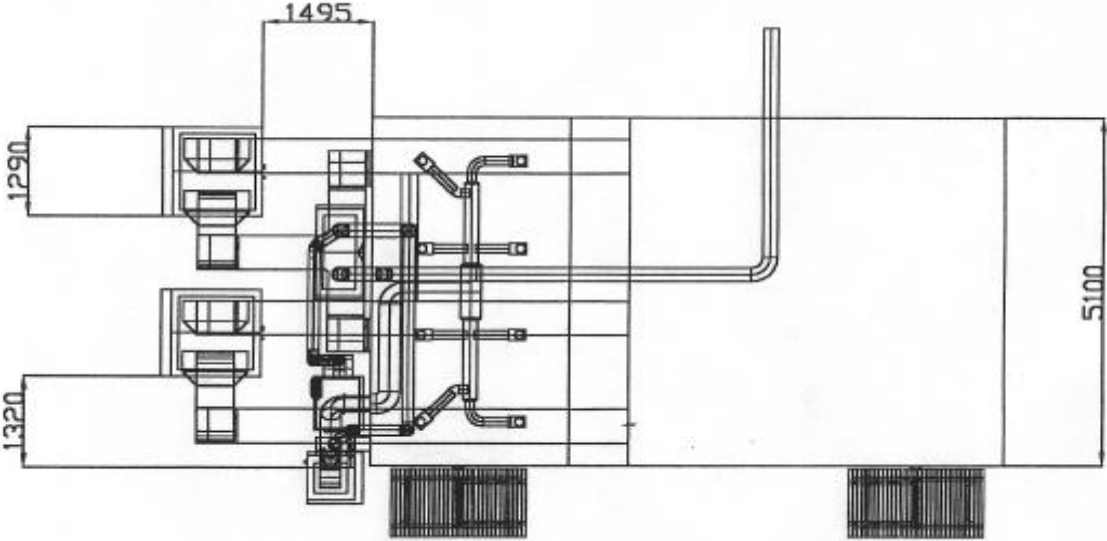
7. Bibliografia

- [1] M. N. Sawka, J. D. Périard, and S. Racinais, "Heat Acclimatization to Improve Athletic Performance in Warm-Hot Environments," *Sport. Sci. Exch.*, vol. 28, no. 153, pp. 1–6, 2015.
- [2] C. J. Gore, S. A. Clark, and P. U. Saunders, "Nonhematological mechanisms of improved sea-level performance after hypoxic exposure," *Med. Sci. Sports Exerc.*, vol. 39, no. 9, pp. 1600–1609, 2007.
- [3] J. D. Périard, S. Racinais, and M. N. Sawka, "Adaptations and mechanisms of human heat acclimation: Applications for competitive athletes and sports," *Scand. J. Med. Sci. Sport.*, vol. 25, no. S1, pp. 20–38, 2015.
- [4] Gustavo Gonzales, "Hemoglobin and testosterone: importance on high altitude acclimatization and adaptation," *Rev. Peru. Med. Exp. Salud Publica*, 2011.
- [5] J. P. Wehrin, P. Zuest, J. Hallén, and B. Marti, "Live high-train low for 24 days increases hemoglobin mass and red cell volume in elite endurance athletes," *J. Appl. Physiol.*, vol. 100, no. 6, pp. 1938–1945, 2006.
- [6] P. Bärtsch, B. Saltin, and J. Dvorak, "Consensus statement on playing football at different altitude.," *Scand. J. Med. Sci. Sports*, vol. 18 Suppl 1, pp. 96–99, Aug. 2008.
- [7] O. Wallach, "The 50 Highest Cities in the World," *Vis. Capital.*, 2020.
- [8] International Olympic Committee, "No Title," 2021. [Online]. Available: <https://www.olympic.org/mexico-1968>[Accessed 23/10/2020].
- [9] R. J. Shephard, "The athlete at high altitude," *Can. Med. Assoc. J.*, vol. 109, no. 3, pp. 207–209, 1973.
- [10] A. M. Wrynn, "'A debt was paid off in tears': Science, IOC politics and the debate about high altitude in the 1968 Mexico City Olympics," *Int. J. Hist. Sport*, vol. 23, no. 7, pp. 1152–1172, Nov. 2006.
- [11] M. Kottek, J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf, and F. Rubel, "World map of the Köppen-Geiger climate classification updated," *Meteorol. Zeitschrift*, vol. 15, no. 3, pp. 259–263, 2006.
- [12] Nations United, *World Urbanization Prospects*. 2018.
- [13] A. Suzuki-Parker, H. Kusaka, and Y. Yamagata, "Assessment of the impact of metropolitan-scale urban planning scenarios on the moist thermal environment under global warming: A study of the Tokyo metropolitan area using regional climate modeling," *Adv. Meteorol.*, vol. 2015, no. December, 2015.
- [14] K. Hayashida, K. Shimizu, and H. Yokota, "Severe heatwave in Japan," *Acute Med. Surg.*, vol. 6, no. 2, pp. 206–207, 2019.
- [15] "No Title," *National Institute for Environmental Studies*. [Online]. Available: <https://www.nies.go.jp/index-e.html>.
- [16] INMET, "Weather information for the Olympic and Paralympic Games in Rio de Janeiro," *Natl. Inst. Meteorology*, no. January, 2015.
- [17] International Organization for Standardization (ISO), "Ergonomics of the thermal environment — Assessment of heat stress using the WBGT (wet bulb globe temperature) index," vol. 3rd Editio, 2017.
- [18] S. Racinais *et al.*, "Consensus recommendations on training and competing in the heat," *Scand. J. Med. Sci. Sport.*, vol. 25, no. S1, pp. 6–19, 2015.
- [19] G. Havenith and D. Fiala, "Thermal indices and thermophysiological modeling for heat stress," *Compr. Physiol.*, vol. 6, no. 1, pp. 255–302, 2016.
- [20] L. E. Armstrong, D. J. Casa, M. Millard-Stafford, D. S. Moran, S. W. Pyne, and W. O. Roberts, "Exertional heat illness during training and competition," *Med. Sci. Sports Exerc.*, vol. 39, no. 3, pp. 556–572, 2007.
- [21] T. Kakamu, K. Wada, D. R. Smith, S. Endo, and T. Fukushima, "Preventing heat illness in the anticipated hot climate of the Tokyo 2020 Summer Olympic Games," *Environ. Health Prev. Med.*, vol. 22, no. 1, pp. 10–15, 2017.
- [22] F. M. P. Aires, "Modernização e aperfeiçoamento do sistema de controlo da câmara climática," 2008.

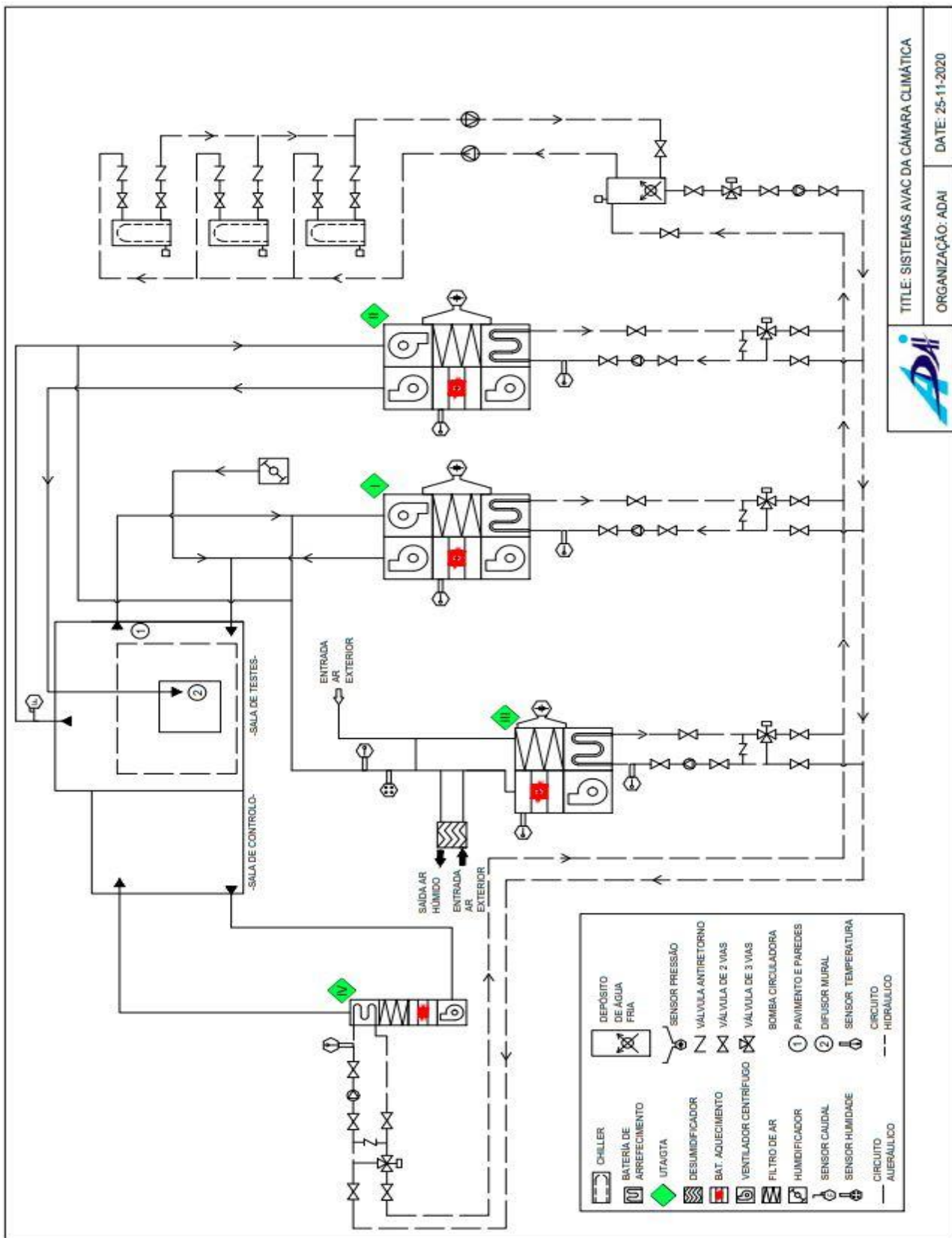
-
- [23] A. M. R. Gaspar, "Contribuição para o estudo de ambientes térmicos interiores. A dimensão do indivíduo e do edifício: da experimentação à modelação," Univeridade de Coimbra, 2005.
- [24] T. Vihma, "Effects of weather on the performance of marathon runners," *Int. J. Biometeorol.*, vol. 54, no. 3, pp. 297–306, 2010.
- [25] N. El Helou *et al.*, "Impact of environmental parameters on Marathon running performance," *PLoS One*, vol. 7, no. 5, pp. 1–9, 2012.
- [26] J. de Cañete, C. Galindo, and I. G. Moral, "Introduction to Control Systems," in *System Engineering and Automation: An Interactive Educational Approach*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 137–165.
- [27] *Handbook Fundamentals*. ASHRAE, 2017.
- [28] N. Instruments, "PID Control."
- [29] W. J. Palm, "Basic Control Systems Design," *Eshbach's Handb. Eng. Fundam. Fifth Ed.*, pp. 760–801, 2009.
- [30] S. Skogestad, "Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning," *J. Process Control*, vol. 13, no. 4, pp. 291–309, 2003.
- [31] G. J. V. N. Brites, "Estudo laboratorial do escoamento de ar associado a um sistema de ventilação por deslocamento," 2004.
- [32] A. Agarwal, *Foundations of Analog and Digital Electronic Circuits. Department of Electrical Engineering and Computer Science*. Massachusetts Institute of Technology, 2005.
- [33] António Filipe Vieira Dias Pires, "Câmara, Estudo de Modelos de Controlo de Uma Climática," Univeridade de Coimbra, 2020.
- [34] J. Williams, "37 - Slew rate verification for wideband amplifiers: The taming of the slew," in *Analog Circuit Design*, B. Dobkin and J. Williams, Eds. Oxford: Newnes, 2011, pp. 868–878.
- [35] & V. L. K. W.D. McArdle, F. I. Katch, *Exercise Physiology: Nutrition, Energy, and Human Performance*. Lippincott Williams & Wilkins, 2010.
- [36] & V. L. K. W.D. McArdle, F. I. Katch, *Exercise Physiology: Nutrition, Energy, and Human Performance*, 8th editio. Lippincott Williams & Wilkins, 2018.
- [37] S. J. Brown, A. Raman, Z. Schlader, and S. R. Stannard, "Ventilatory efficiency in juvenile elite cyclists," *J. Sci. Med. Sport*, vol. 16, no. 3, pp. 266–270, 2013.
- [38] X. G. Sun, J. E. Hansen, N. Garatachea, T. W. Storer, and K. Wasserman, "Ventilatory efficiency during exercise in healthy subjects," *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*, vol. 166, no. 11, pp. 1443–1448, 2002.
- [39] J. Kwon, G. Ahn, G. Kim, J. C. Kim, and H. Kim, "A study on NDIR-based CO2 sensor to apply remote air quality monitoring system," *ICCAS-SICE 2009 - ICROS-SICE Int. Jt. Conf. 2009, Proc.*, pp. 1683–1687, 2009.
- [40] E. e S. S. Ministérios do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, da Saúde e da Solidariedade, "Portaria nº 353-A/2013 de 4 de dezembro: REGULAMENTO DE DESEMPENHO ENERGÉTICO DOS EDIFÍCIOS DE COMÉRCIO E SERVIÇOS (RECS) REQUISITOS DE VENTILAÇÃO E QUALIDADE DO AR INTERIOR," *Diário da República*, vol. 1, no. 235, pp. 6644-(2)-6644-(9), 2013.
-

ANEXOS

Anexo I



Anexo II

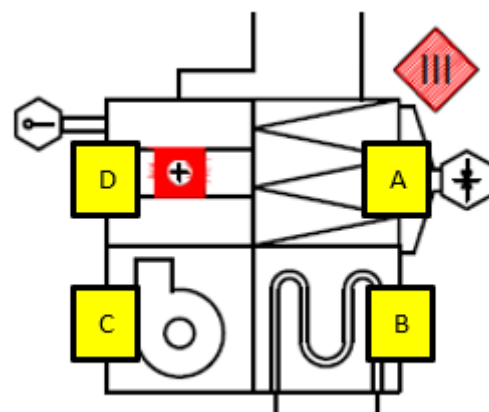
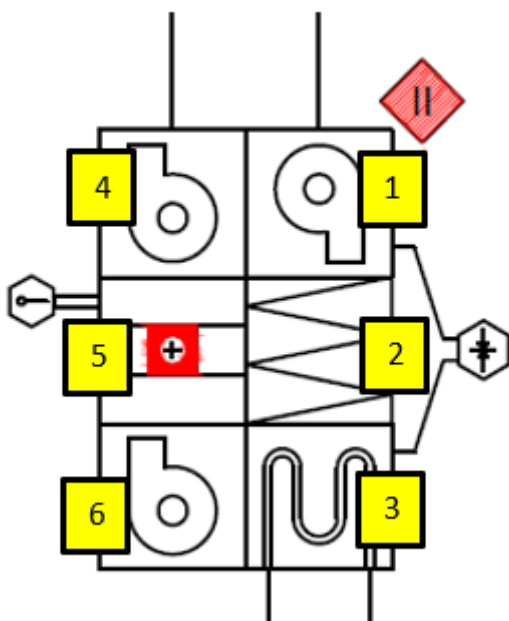


TITLE: SISTEMAS AVAC DA CÁMARA CLIMÁTICA
 ORGANIZAÇÃO: ADAI
 DATE: 25-11-2020

Anexo III

GTA I /GTA II	SECÇÃO	MODELO	ESPECIFICAÇÕES
Ventilador	1, 6	9.9-14 1/2CV	$w_{m\acute{a}x} = 780 \text{ rpm}$
Motor eléctrico	1		$P = 0,37 \text{ KW}$
Ventilador	4	9.9-14 1/2CV	$w_{m\acute{a}x} = 1530 \text{ rpm}$
Motor eléctrico	4		$P = 1,1 \text{ KW}$
Bateria de Aquecimento	5		+15,8 KW
Bateria de arrefecimento	3		-11,6 KW
Pré-Filtro	2	FA 280	$\Delta P = 40 \text{ Pa}$
Filtro	2	PURAPAK 95	$\Delta P = 175 \text{ Pa}$

GTA III	SECÇÃO	MODELO	ESPECIFICAÇÕES
Ventilador	C	9.9-14 1/2CV	$w_{m\acute{a}x} = 1530 \text{ rpm}$
Motor eléctrico	C		$P = 0,37 \text{ KW}$
Bateria de Aquecimento	D		+7,9 KW
Bateria de arrefecimento	B		-9 KW
Pré-Filtro	D	FA 280	$\Delta P = 20 \text{ Pa}$
Filtro	A	PURAPAK 95	$\Delta P = 110 \text{ Pa}$



Anexo IV

Parâmetro medido	Tipo de funcionamento	Princípio de funcionamento	Condições de operação	Gama de precisão	Tempo de resposta	Tempo de vida
Temperatura	Termostato	Um termostato é um dispositivo de controlo que funciona com base no princípio de expansão térmica e permite ligar ou desligar um sistema de aquecimento ou de arrefecimento. Este sensor de temperatura consiste numa tira bimetalica composta por dois metais com dois coeficientes de expansão diferentes. Quando este sensor está conectado com um “objeto” frio, os dois metais fecham o circuito elétrico e a corrente passa pelo sensor. Quando fica quente, um dos metais expande mais do que o outro, conseqüentemente a tira flexiona para cima ou para baixo abrindo o circuito e impedindo o fluxo de corrente.	-	Baixa-Média	-	-
	Termistor	Termístores são sensores em que ocorre uma mudança física na sua estrutura quando sujeitos a uma variação de temperatura. A maioria dos termístores tem coeficiente de temperatura negativo (NTC), isto significa que a resistência do material diminui com o aumento da temperatura. Contudo, também são usados termístores que possuem um coeficiente de temperatura positivo (PTC), ou seja, a sua resistência aumenta com o aumento da temperatura.	-40 a 250 °C	Média	Média-Rápida	Fraca
	Termoresistências	Termoresistências ou RTD são sensores que se baseiam no princípio de variação da resistência térmica em função da temperatura (relação de proporcionalidade).	-240 a 650 °C	Alta	Média	Boa
	Termopar	Um termopar funciona com base no efeito Seebeck que enuncia que se dois condutores de materiais diferentes forem unidos num ponto e colocados perto de uma fonte de calor externa, uma EMF (força eletromotriz) é criada entre a extremidade aberta, que depende da temperatura da junção. À medida que T_1 aumenta, também V aumenta. A junção de extremidades abertas (T_2) é chamada de junção de referência. A tensão (V) é diretamente proporcional à temperatura.	-212 a 1760 °C ¹⁵	Média	Média-Rápida	Excelente

¹⁵ Depende do tipo de termopar (E, J, K, N, T, U, ...). Os tipos de termopar mais utilizados são Tipo J, Tipo T, Tipo K

Parâmetro medido	Tipo de funcionamento	Princípio de funcionamento	Condições de operação	Gama de precisão	Tempo de resposta	Tempo de vida
Humidade relativa	Capacitivo	A configuração deste tipo de sensor é uma estrutura em sanduiche com dois eléctrodos condutores em cada lado e uma camada fina de material dieléctrico depositado entre eles (polímero ou óxido de metal cerâmico) que irá funcionar como elemento sensorial. À medida que a humidade do ar se altera, também a constante dieléctrica se alterará a par com a sua capacitância. Esta constante dieléctrica é inversamente proporcional à humidade relativa e à permeabilidade a corrente eléctrica (relações lineares).	0-100 % < 200 °C	< ± 2 % ¹⁶ HR	30-60 [s] para atingir 63% do valor real	-
	Resistivo/Impedância	Este tipo de sensores de humidade medem a variação da impedância ou da resistência eléctrica de um meio higroscópico, como um polímero condutor. A resistência é inversamente proporcional à humidade. A alteração da impedância é uma relação exponencialmente inversa com a humidade.	0-100 % -40 a 100 °C	± 2-3 % HR	10-30 [s] para atingir 63% do valor real	>5 anos ¹⁷
Humidade absoluta	Térmico	Dois sensores térmicos (termístores NTC) conduzem electricidade de acordo com a humidade do ar ambiente. Um dos sensores é envolvido numa atmosfera de nitrogénio seco enquanto o outro é envolvido pelo ar ambiente através de pequenos orifícios de ventilação. A diferença entre os valores de temperatura é directamente proporcional à Humidade absoluta.	< 300 °C Ambientes corrosivos	± 3 g/m ³ ¹⁸	-	-

¹⁶ Causado por erro de linearidade ou por histerese, propriedade de um material ou sistema físico em manter suas propriedades mesmo sem haver continuidade dos estímulos que as provocaram (erro sistemático)

¹⁷ Em ambientes residenciais e comerciais. Este valor pode diminuir devido a exposição de vapores químicos e outros contaminantes

¹⁸ Isto converte para ±5% RH a 40°C and ±0.5% HR a 100°C.

Anexo V

NI-DAQmx Version	2020	2019	2018	2017	2016	2015	2014	2013	2012	2011	2010	2009	8.6	8.5	8.2	8.0	7.1	7.0
17.6																		
17.5																		
17.1.1																		
17.1																		
17.0																		
16.1																		
16.0.1																		
16.0																		
15.5.1																		
15.5																		
15.1.1																		
15.1																		
15.0.1																		
15.0																		
14.5.1																		
14.5																		
14.2																		
14.1																		
14.0																		
9.9																		
9.8																		
9.7.5																		
9.7																		
9.6.2																		
9.6.1																		
9.6																		
9.5.5																		
9.5.1																		
9.5																		
9.4																		
9.3.5																		
9.3																		
9.2.3																		
9.2.2																		
9.2.1																		
9.2																		
9.1.5																		
9.1.1																		

Anexo VI

LabVIEW Version	Windows OS						
	10	8.1	8	7	Vista	XP (SP3)	XP
2020.0							
2019 SP1							
2019							
2018 SP1							
2018							
2017 SP1							
2017							
2016							
2017 SP1							
2017							
2014							
2017 SP1							
2017							

Anexo VII

Módulo MCC USB-1608GX

Sinais de Entrada

Fonte	Sinal medido	Designação LabVIEW	Condutores	Ligadores	Canal	Terminal
GTA I	Temperatura da água à saída do chiller I	TAG I	Verde	A1	0	CH0H
			Azul	GND		
GTA II	Temperatura da água à saída do chiller II	TAG II	Verde	A3	1	CH1H
			Azul	GND		
GTA III	Temperatura da água à saída do chiller III	TAG III	Verde	A5	2	CH2H
			Azul	GND		
GTA I	Temperatura do ar na conduta I	TAR I	Amarelo	A9	3	CH3H
			Laranja	GND		
GTA II	Temperatura do ar na conduta II	TAR II	Amarelo	A11	4	CH4H
			Laranja	GND		
GTA III	Temperatura do ar na conduta III	TAR III	Azul	A4	5	CH5H
			Castanho	GND		
CÂMARA	Temperatura do ar nas paredes	TPAR	Verde	A15	6	CH6H
			Azul	GND		
DIFUSOR	Temperatura do ar à saída do difusor*	TDIF	Laranja	A2	7	CH7H
			Amarelo	GND		
DIFUSOR	Caudal do ar na conduta II	CAUDAL II	Cinzento	B3	8	CH0L
			Branco	GND		
CÂMARA	Humidade relativa na Câmara	HRCAM	Cinzento	B10	9	CH1L
			Branco	GND		
CÂMARA	Temperatura na Câmara	TCAM	Vermelho	B12	10	CH2L
			Preto	GND		
CÂMARA	Concentração de dióxido de carbono no ar interior da Câmara	CO2CAM	Laranja	B7	11	CH3L
			Amarelo	GND		
GTA III	Humidade relativa na conduta III	HRDES	Azul	A6	12	CH4L
			Castanho	GND		

*O sinal assinalado a VERMELHO não se encontra operacional, porque o sensor RDT encontra-se danificado e não foi possível o substituir a tempo da conclusão da dissertação.

Modelo sensor	Nº referencial ¹⁹	Designação LabVIEW	Canal
Vaisala HMW60Y	Y1	TCAM	10
		HRCAM	9
Vaisala HMD60Y	Y2	TAR III	5
		HRDES	12
IT DBTC-3090	T1	TAG I	1
IT DBTC-3090	T2	TAG II	2
IT DBTC-3090	T3	TAG III	3
IT DBTC-3090	T4	TAR I	4
IT DBTC-3090	T5	TAR II	5
IT DBTC-3090	T6	TAR III	6
IT DBTC-3090	T7	TDIF	7
IT DBTC-3090	T8	TPAR	9
TROX VMR	C1	CAUDAL II	8
E+E Elektronik EE820	Q1	CO2CAM	11

*O sinal assinalado a VERMELHO não se encontra operacional, porque o sensor RDT encontra-se danificado e não foi possível o substituir a tempo da conclusão da dissertação.

Anexo VIII

Módulo MCC USB-3106

Sinais de Saída

Destino	Sinal enviado	Designação LabVIEW	Condutores	Terminal
GTA I	Controlo da abertura da válvula reguladora de caudal (chiller I)	ARR I	Preto	VOUT0
			Vermelho	
GTA II	Controlo da potência da resistência de aquecimento do GTA II	ARR II	Preto	VOUT1
			Vermelho	
GTA I	Controlo da potência da resistência de aquecimento do GTA I	AQ I	Laranja	VOUT5
			Amarelo	
GTA II	Controlo da abertura da válvula reguladora de caudal (chiller II)	AQ II	Azul	VOUT6
			Verde	
GTA II	Controlo do caudal do ventilador do GTA II	CAUDAL II	Cinzento	VOUT9
			Branco	
			Preto	

¹⁹ Sensor responsável por: T- medição temperatura; H - medição humidade; C - Caudal; Y - medição Temperatura e Humidade; Q- medição nível de CO₂

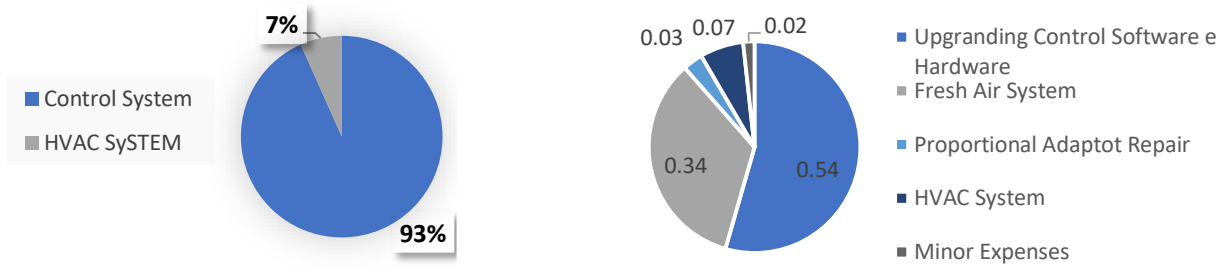
GTA III	Controlo da abertura da válvula reguladora de caudal (chiller III)	ARR III	Vermelho	VOUT10
GTA III	Controlo da potência da resistência de aquecimento do GTA III*	AQ III		VOUT11
HUMIDIF.	Controlo do volume de vapor produzido pelo humidificador	HUM	Vermelho	VOUT12
			Preto	
GTA III	Controlo do caudal do ventilador do GTA III**	CAUDAL III		VOUT13
DESUMID.	Controlo da capacidade de desumidificação	DESUMI	Vermelho	VOUT14
			Preto	
GTA I	Controlo do caudal do ventilador do GTA I	CAUDAL I	Vermelho	VOUT15
			Preto	

*O sinal assinalado a AZUL CLARO não se encontra operacional, visto que não existe placa de circuito e tirístores para o acionamento da bateria de aquecimento (resistências).

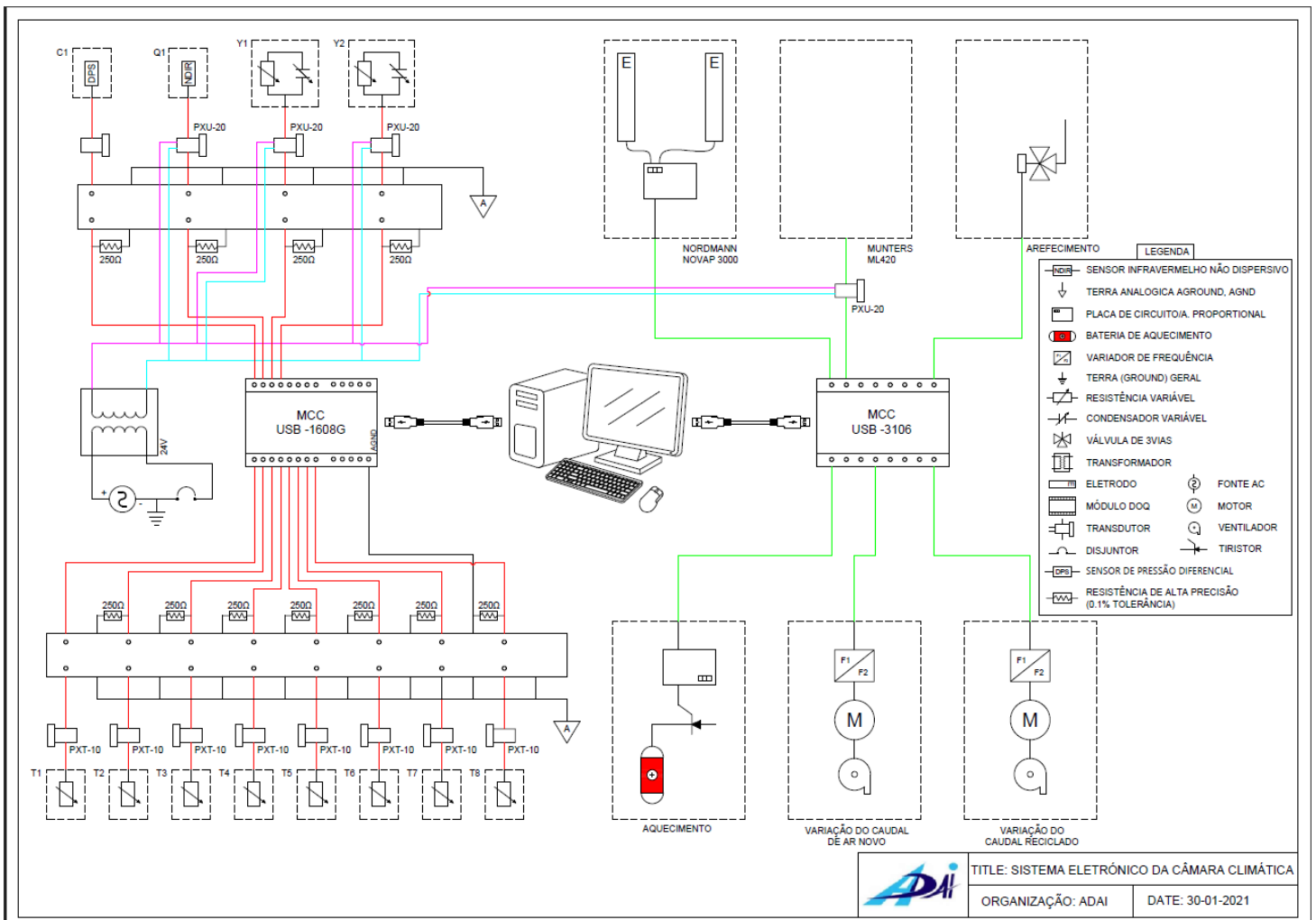
*O sinal assinalado a AZUL ESCURO não se encontra operacional, visto que o variador de frequência ainda não se encontra acoplado ao motor do GTA III

Anexo IX

Data de Aquisição	Quantidade	Elemento adquirido	Descrição (Fabricante e Modelo)	Fornecedor	Categoria	Nº fatura	Preço**	
01/11/2020	1000	Capacitor e Resistencia (Adaptador proporcional*)	ROXBURGH EMC RE120033	Mixtrónica, Lda	Sistema de Controlo	FR 2020A19/6496	67.40 €	
06/11/2020	1	Antena WiFi -USB	TPLINK TL-WN821N	-	Sistema de Controlo	FS AUC004/160194	14.99 €	
10/11/2020	1	Módulo de Envio de Sinal	MCC USB-3106	Instrumentos de Medida S.L (Madrid)	Sistema de Controlo	286/20	715.00 €	
10/11/2020	1	Sensor CO2	E+E Elektronik EE820-HV2A6E1	Inovação, Gases, Sistemas e Engenharia Lda	Sistema de Controlo	FA 2020/2200044	434.19 €	
17/11/2020	2	Fios condutores/Cabos	LEXMAN	-	Sistema de Controlo	FT 202000904/011610	11.98 €	
20/11/2020	1	Módulo de Aquisição de Sinal	MCC USB-1608G	Instrumentos de Medida S.L (Madrid)	Sistema de Controlo	290/20	481.00 €	
28/11/2020	1	Variador de Frequência e Consola Avançada	ACS310/A	Fenix Silver Eletrical Lda	Sistema de Controlo	4301 LV/105654	314.31 €	
21/01/2021	3	Filtro	F.MET. ZIG ZAG 592X490X500 6B M5	Electroclima, Electricidade e Climatização, Lda	Sistema AVAC		66.00 €	
21/01/2021	3	Filtro	FILTRO 592X490X500 6B M5	Electroclima, Electricidade e Climatização, Lda	Sistema AVAC		120.00 €	
							2 224.87 €	
		*Elemento de controlo do Humidificador (Nordmann NOVAP serie 3000)						
		** IVA e Shipping incluidos						
							Id. Portuguesa	
							Id. Espanhola	
Data de Aquisição	Quantidade	Elemento adquirido	Descrição (Fabricante e Modelo)	Fornecedor	Categoria	Nº fatura	Preço**	
21/01/2021	3	Resistencias de alta precisão, 250 ohms	DALE RN60C	Mixtrónica, Lda	Sistema de Controlo	FR 2021A19/387	11.07 €	
							2 235.94 €	



Anexo X



Anexo XI

