



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

João Nuno Matos Avidago Laranjo Dos Santos

**APERFEIÇOAMENTO DO SISTEMA DE
CLIMATIZAÇÃO DE UMA CÂMARA CLIMÁTICA**

Dissertação no âmbito do Mestrado em Engenharia Mecânica na especialidade de Energia e Ambiente, orientada pelo Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar e pelo Professor Doutor Gonçalo Jorge Vieira Nunes Brites e apresentada no Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Outubro de 2021

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

APERFEIÇOAMENTO DO SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO DE UMA CÂMARA CLIMÁTICA

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

IMPROVEMENT OF THE HVAC SYSTEM OF A CLIMATE CHAMBER

Autor

João Nuno Matos Avidago Laranjo Dos Santos

Orientadores

Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar

Professor Doutor Gonçalo Jorge Vieira Nunes Brites

Júri

Presidente	Professor Doutor Amândio Manuel Cupido Santos
	Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Vogais	Professor Doutor Gonçalo Jorge Vieira Nunes Brites
	Professor Auxiliar Convidado da Universidade de Coimbra
	Professor Doutor Marco Alexandre dos Santos Fernandes Professor Auxiliar Convidado da Universidade de Coimbra

Coimbra, Outubro de 2021

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



AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores, Professor Doutor Adélio Gaspar e Professor Doutor Gonçalo Brites, pela permanente disponibilidade e dedicação prestada, assim como pelos preciosos ensinamentos e conselhos concedidos ao longo deste período, os quais foram determinantes para a realização deste trabalho.

Ao Filipe Dionísio, pela ajuda crucial na adaptação e familiarização com este projeto e pela serenidade transmitida nos momentos mais críticos.

À minha família e amigos, pela paciência, apoio e incentivo conferidos durante todo o meu percurso académico.

RESUMO

A manutenção do equilíbrio térmico do corpo humano é uma premissa essencial na preservação da salubridade e do bem-estar de um indivíduo. No entanto, são vários os fatores influenciadores desse conforto térmico. Deste modo, de forma a ser estudado o comportamento do organismo humano sujeito a diferentes ambientes térmicos, foi desenvolvida uma câmara climática (CC) no Laboratório da Aerodinâmica Industrial (LAI), da Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial (ADAI) da Universidade de Coimbra (UC), apta a reproduzir uma gama alargada de condições ambientais em termos de temperatura e humidade. Estas condições são criadas através de um sistema AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar condicionado) – responsável por controlar a temperatura, a humidade e a taxa de renovação de ar no interior da sala de testes – e de um sistema de controlo – responsável por controlar cada um desses processos através do *software* LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*). Atualmente, esta câmara é destinada a treinos de aclimação em climas quentes e húmidos de atletas de alta competição.

No âmbito desta dissertação, foi proposto ao autor o aperfeiçoamento do sistema de climatização da CC. Para tanto, no que concerne ao programa desenvolvido em LabVIEW, procedeu-se à adição de uma alternativa ao controlo dos níveis interiores de humidade, à melhoria da sua interface e à atualização do *software*, após ter sido adquirido e instalado um novo computador e monitor. Em paralelo, procedeu-se à devida calibração dos diferentes sensores presentes neste projeto e, posteriormente, à correção dos respetivos fatores de calibração. Por questões de instabilidade dos valores extraídos pelos sensores de temperatura e humidade e de CO₂, estes aparelhos sofreram uma alteração nas suas localizações dentro da sala de testes. De forma a garantir uma melhor qualidade do ar interior (QAI), diretamente influenciado pela situação pandémica da COVID-19, foi aplicado um aparelho portátil purificador e descontaminador do ar. Ademais, foi também instalado um barómetro de forma a conferir maior rigor e informação nas análises efetuadas. Por fim, realizou-se um estudo sobre a estanqueidade da CC em 3 diferentes condições, pelo qual se tiraram conclusões sobre a taxa de fornecimento de ar novo do sistema AVAC.

Neste momento, pode-se afirmar que o *software* de controlo da CC “corre” sem erros, os valores são retirados dos diferentes sensores com maior precisão e exatidão e existem ainda mais dados sobre as condições interiores da sala de testes. Porém, relativamente ao

diagnóstico realizado à estanqueidade da CC foram detetadas possíveis infiltrações indesejadas em virtude dos elevados valores de taxas de renovação de ar obtidos. Por último, e de modo a contribuir para o contínuo desenvolvimento e aperfeiçoamento da CC, importa referir que o autor apresentou algumas sugestões de melhoria que considerou relevantes.

Palavras-chave: Câmara climática; Sistema AVAC; LabVIEW; Temperatura; Humidade; Treinos de aclimação.

ABSTRACT

The maintenance of the human's body thermal balance is an essential premise in the preservation of a person's health and well-being. However, there are several factors that influence this thermal comfort. Thus, in order to study the behaviour of the human body subjected to different thermal environments, a climatic chamber (CC) was developed in the Industrial Aerodynamics Laboratory (LAI) of the Association for the Development of Industrial Aerodynamics (ADAI) of the University of Coimbra (UC), capable of reproducing a wide range of environmental conditions in terms of temperature and humidity. These conditions are created through an HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) system - responsible for controlling the temperature, humidity and air renewal rate inside the test room - and a control system - responsible for controlling each of these processes through LabVIEW software (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench). Currently, this chamber is intended for acclimatisation training in hot and humid environments of high competition athletes.

In the scope of this dissertation, it was proposed to the author the improvement of the acclimatization system of the CC. For that, in what concerns the program developed in LabVIEW, an alternative was added to control the indoor humidity levels, its interface was improved and the software was updated, after a new computer and monitor had been acquired and installed. At the same time, the different sensors present in this project were duly calibrated and, subsequently, the respective calibration factors were corrected. For reasons of instability of the values extracted by the temperature and humidity and CO₂ sensors, these devices suffered a change in their locations within the test room. In order to guarantee a better indoor air quality (IAQ), directly influenced by the pandemic situation of COVID-19, a portable air purifier and decontaminator device was applied. In addition, a barometer was also installed in order to provide greater accuracy and information in the analyses carried out. Finally, a study was done in order to evaluate the airtightness of the CC under 3 different conditions by which the fresh air supply rate from the HVAC system was determined.

At this moment, it can be said that the CC control software runs free of errors, the values are taken from the different sensors with more precision and accuracy and there is more data about the inside conditions of the test room. However, from the diagnosis performed on the CC airtightness, possible unwanted infiltrations were detected due to the

high values of air renewal rates obtained. Finally, and in order to contribute to the continuous development and improvement of the CC, it is important to mention that the author presented some improvement suggestions that he considered relevant.

Keywords: Climate chamber; HVAC system; LabVIEW; Temperature; Humidity; Acclimation training.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABELAS.....	xi
SIMBOLOGIA E SIGLAS.....	xiii
SIMBOLOGIA.....	xiii
SIGLAS E ACRÓNIMOS	xiv
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	5
2.1. BALANÇO TÉRMICO DO CORPO HUMANO	5
2.2. PERDAS DE CALOR PELO CORPO EM DIFERENTES ATIVIDADES.....	7
2.3. ATIVIDADE FÍSICA E ACLIMATAÇÃO EM AMBIENTES QUENTES E HÚMIDOS.....	9
2.4. SIMULADORES DA RESISTÊNCIA AERODINÂMICA E DA VELOCIDADE RELATIVA DO AR	12
3. CASO DE ESTUDO	17
3.1. CARATERIZAÇÃO DA CC.....	17
3.1.1. GTA I E GTA II.....	18
3.1.2. GTA III.....	20
3.1.3. GTA IV.....	22
3.2. SISTEMA DE CONTROLO.....	22
3.2.1. <i>SOFTWARE</i> LABVIEW.....	22
3.2.2. COMPONENTES DE CONTROLO.....	23
4. MATRIZ DESENVOLVIDA	31
4.1. RECONSTRUÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLO – LABVIEW.....	31
4.2. PURIFICADOR E DESCONTAMINADOR DO AR.....	31
4.3. REPOSICIONAMENTO DOS SENSORES VAISALA E E+E ELEKTRONIK	33
4.4. CALIBRAÇÃO DOS SENSORES	34
4.4.1. PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO.....	35
4.4.2. CALIBRAÇÃO E AQUISIÇÃO DO SINAL DO SENSOR DE CO ₂	35
4.5. NOVO <i>HARDWARE</i> E ATUALIZAÇÃO DO <i>SOFTWARE</i> DE CONTROLO	36
4.6. ESTUDO SOBRE A ESTANQUEIDADE DA CC	37
4.7. CONTROLO PELA HUMIDADE ESPECÍFICA	41
4.7.1. METODOLOGIA DE MUDANÇA DE CONTROLADOR.....	43
4.7.2. IMPLEMENTAÇÃO DE UM LIMITADOR NA HUMIDADE RELATIVA	46
4.8. OUTROS TRABALHOS REALIZADOS.....	46
5. CONCLUSÕES.....	49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53
ANEXO A.....	55
ANEXO B.....	57
ANEXO C.....	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Perdas de calor em vasos sanguíneos contraídos e dilatados para diferentes temperaturas ambiente.....	7
Figura 2 - Mecanismos de perdas de calor pelo corpo humano em diferentes atividades. ...	8
Figura 3 - Importância da evaporação nas perdas de calor, numa pessoa em atividade física exigente.	9
Figura 4 - Exemplo da evolução temporal da temperatura interna retal (\bullet), da frequência cardíaca (\circ) e das perdas de suor (Δ) de um grupo de homens expostos a uma aclimatização ao calor.	12
Figura 5 - Diagrama de forças de um corpo em movimento.	13
Figura 6 - Postura corporal de um atleta no arranque de uma prova de atletismo.	14
Figura 7 - Efeito da velocidade do ar na percentagem de perdas de calor por convecção. .	14
Figura 8 - Passadeiras e ventiladores no interior da sala de testes da CC do LAI.	15
Figura 9 - Planta da câmara climática do LAI.....	17
Figura 10 - Esquema 3D da câmara climática do LAI.	17
Figura 11 - Componentes e organização do GTA I e GTA II.	18
Figura 12 - Humidificador NOVAP série 3000.	19
Figura 13 - Difusor de ar presente na sala de testes da CC.	20
Figura 14 - Componentes e organização do GTA III.	21
Figura 15 - Esquema de funcionamento do ML 420.....	22
Figura 16 - Desumidificador ML 420.....	22
Figura 17 - Conversor de sinal PXU-20 da Brodersen.....	24
Figura 18 - Esquema de ligação de um PXT-10.....	24
Figura 19 - Esquema de ligação de um PXU-20.	24
Figura 20 - HMW60Y da VAISALA.	25
Figura 21 - Perfil de precisão da temperatura do sensor HMW60Y da VAISALA.....	25
Figura 22 - Perfil de precisão da humidade relativa do sensor HMW60Y da VAISALA. .	26
Figura 23 - Perfil de precisão da humidade relativa do sensor HMW60Y da VAISALA em função da temperatura.	26
Figura 24 - EE820-HV2A6E1 da E+E Elektronik.	27
Figura 25 - Placa do sensor EE820-HV2A6E1 salientando a possibilidade de mudança do sinal do output.	28
Figura 26 - PX2780-800B5V da Omega instalado na CC.	29
Figura 27 - Conexão do PX2780 através de 4 e 3 fios, respetivamente.....	30
Figura 28 - Introdução da equação de calibração do PX2780 no <i>software</i> LabVIEW.	30

Figura 29 - NPS CC Optimal na CC.	32
Figura 30 - Exemplos de erros de compensação e de ganho (a reta a vermelho corresponde à reta dos valores da grandeza de referência e a linha azul, a tracejado, a reta dos valores medidos pelo sensor a ser calibrado).	34
Figura 31 - Introdução da equação de calibração do EE820-HV2A6E1 no software LabVIEW.	35
Figura 32 - Computador antigo.	36
Figura 33 - Computador novo.	36
Figura 34 - Decaimento temporal da concentração de CO ₂ e respetiva taxa de renovação de ar nos 3 ensaios realizados.	39

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Taxas de renovação de ar e respetivos caudais de ar novo para cada um dos ensaios.	41
--	----

SIMBOLOGIA E SIGLAS

SIMBOLOGIA

C - Perdas de calor sensível pela pele por convecção [W/m^2]

$C(t)$ – Concentração instantânea do gás traçador [ppm]

C_{ext} – Concentração do gás traçador medido no exterior [ppm]

C_{res} – Perdas de calor sensível por convecção durante a respiração [W/m^2]

C_0 – Concentração inicial do gás traçador [ppm]

E_{dif} – Perdas de calor latente por evaporação da água transferida por difusão pela pele [W/m^2]

E_{res} – Perdas de calor latente por evaporação durante a respiração [W/m^2]

E_{rsw} – Perdas de calor latente por evaporação da transpiração [W/m^2]

E_{sk} – Perdas de calor latente pela pele [W/m^2]

f_{cl} – Fator de área do vestuário [-]

G – Geração do gás traçador num dado espaço interior [ppm/h]

h – Altura do corpo [m]

h_e – Coeficiente de transferência de calor por evaporação [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{kPa})$]

m – Massa do corpo [kg]

m_a – Massa de ar seco [kg]

m_v – Massa de vapor de água [kg]

M – Taxa metabólica [W/m^2]

M_a – Massa molar de ar seco [kg/mol]

M_v – Massa molar de vapor de água [kg/mol]

p – Pressão atmosférica [kPa]

p_a – Pressão parcial de ar seco [kPa]

p_{sk} – Pressão de vapor de água à superfície da pele [kPa]

p_v – Pressão parcial de vapor de água [kPa]

$p_{vs}(T)$ – Pressão de vapor saturado em função da temperatura [kPa]

Q_{an} – Caudal de ar novo [m^3/h]

Q_{res} – Taxa total de calor perdido pela respiração [W/m^2]

Q_{sk} – Taxa total de calor perdido pela pele [W/m^2]

R – Perdas de calor sensível pela pele por radiação [W/m^2]

$R_{e,cl}$ – Resistência evaporativa do vestuário [(m².kPa)/W]

S – Taxa de calor armazenada no corpo [W/m²]

S_d – Superfície de deposição [m²]

T_a – Temperatura do bolbo seco [°C]

T_{bh} – Temperatura do bolbo húmido [°C]

T_{ext} – Temperatura exterior [°C]

T_{in} – Temperatura interior [°C]

v_d – Taxa de deposição do gás traçador [ppm/h/m²]

V – Volume do compartimento [m³]

w – Fração de pele húmida [-]

W – Taxa de trabalho mecânico realizado [W/m²]

x_a – Fração molar de ar seco [-]

x_v – Fração molar de vapor de água [-]

ε_{ac} – Eficiência do purificador de ar [-]

ω – Humidade absoluta [g/kg_{as}]

ϕ – Humidade relativa [%]

λ – Taxa de renovação do ar [h⁻¹]

SIGLAS E ACRÓNIMOS

AC – Corrente Alternada (*Alternating Current*)

ADAI – Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial

AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

CC – Câmara climática

DAQ – Aquisição de Dados (*Data Acquisition*)

DC – Corrente Contínua (*Direct Current*)

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

DTU – Universidade Técnica da Dinamarca (*Danmarks Tekniske Universitet*)

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

GTA – Grupo de Tratamento de Ar

LAI – Laboratório da Aerodinâmica Industrial

MCC – Measurement Computing Corporation

PC – Computador Pessoal (*Personal Computer*)

QAI – Qualidade do Ar Interior

UC – Universidade de Coimbra

UTA – Unidade de Tratamento de Ar

VI – Instrumento Virtual (*Virtual Instrument*)

1. INTRODUÇÃO

Tendo como objetivo primordial o estudo do efeito de diferentes ambientes térmicos no corpo humano, uma equipa de professores e investigadores da Universidade de Coimbra (UC) e da *Danmarks Tekniske Universitet* (DTU) desenvolveram, nos anos 90, no Laboratório da Aerodinâmica Industrial (LAI) da Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial (ADAI) da UC, uma câmara climática (CC) capaz de simular diversos climas, ao alterar os valores de temperatura e humidade.

Com o intuito de superar o *stress* térmico e, conseqüentemente, melhorar a *performance* de atletas de alta competição, esta câmara é, atualmente, um espaço destinado à aclimação de atletas a ambientes térmicos idênticos aos que enfrentarão nos locais das suas próximas competições, ao mesmo tempo que desenvolvem “ações próprias da sua modalidade” (Campos, 2021). Dada a elevada exigência física aliada ao clima hostil que se pode vir a sentir no interior deste compartimento, não são descartadas possíveis reações adversas do organismo, estando, desta forma, garantida uma contínua monitorização nestes treinos (Lusa, 2021).

O sistema AVAC desta instalação laboratorial é composto por 4 Grupos de Tratamento de Ar (GTAs). Estes são responsáveis por filtrar o ar à passagem, aquecer/arrefecer, humidificar/desumidificar e por regular o caudal de ar a ser insuflado na CC. O controlo destes processos é feito através de um programa computacional desenvolvido com base no *software* LabVIEW.

Dando, então, sequência aos trabalhos de aperfeiçoamento do referido projeto, esta dissertação almeja, entre outros aspetos, a otimização do sistema de controlo, a reparação, substituição e/ou aquisição de novos componentes do sistema AVAC e o acompanhamento dos treinos de aclimação de atletas que competiram em *Tóquio 2020*¹, onde se esperava

¹ Os Jogos Olímpicos de Tóquio foram realizados apenas no verão de 2021, pois, como consequência da pandemia da Covid-19, foi necessário o seu adiamento.

que fossem atingidos recordes de valores máximos de temperatura e humidade em edições de Jogos Olímpicos² (Watts, 2021).

Importa mencionar que diversos atletas de diferentes modalidades requisitaram e realizaram treinos de aclimação prévias aos Jogos Olímpicos de Tóquio 2020, nomeadamente, atletas portugueses, bem como dois atletas da Seleção Francesa de marcha (um deles campeão e recordista do mundo dos 50 km de marcha) o que, desde já, revela o reconhecimento neste projeto e a elevada importância desta preparação. Refira-se ainda que a CC já havia sido utilizada na preparação do marchador João Vieira para o Campeonato do Mundo de Atletismo de 2019 em Doha (Catar), tendo este conseguido um histórico segundo lugar na sua prova. Como expõe (MadreMedia & Lusa, 2019): “«Achamos que [a aclimação] foi fundamental na preparação para enfrentar a dura competição de 50 km e estou grato por ter treinado dentro desta sala, com muito sofrimento e muito suor, mas chegámos a Doha e estávamos melhor adaptados àquele clima», sublinhou”.

Assim sendo, e como já referido, a presente dissertação tem como desiderato alcançar a otimização do sistema de controlo da CC. Para tanto, o autor propõe-se a fazer melhorias na interface do programa – designadamente na correção dos gráficos indicadores das condições interiores de temperatura e humidade, na adição de percentagens de aquecimento, arrefecimento, humedificação e desumidificação, na redução dos tempos de aquisição de sinal, etc.–, a concluir a instalação do sensor de dióxido de carbono e a apresentar uma alternativa ao controlo dos níveis de humidade do ar.

Por outro lado, pretende-se fazer um estudo sobre a estanqueidade da CC, determinar a taxa de renovação de ar pelo sistema AVAC, calibrar os vários sensores presentes na instalação e, dada a instabilidade nos resultados obtidos pelos sensores de temperatura, humidade e CO₂, alterar as suas localizações no interior da sala de testes. Ademais, dada a situação pandémica que hoje vivemos, a instalação de um aparelho purificador e descontaminador do ar tornou-se necessária, qualificando-se como outro objetivo a ser realizado, bem como a aplicação de um barómetro. O autor propõe-se também a reparar e/ou

² Como se pode observar em diversas notícias da comunicação social, os Jogos Olímpicos de Tóquio foram, de facto, um dos mais quentes, tendo a temperatura atingido os 34°C e a humidade relativa aproximado dos 70%, de acordo com o *The Guardian* (disponível em: «<https://www.theguardian.com/environment/2021/aug/05/olympic-athletes-and-volunteers-in-tokyo-tortured-by-heat>»). Ainda segundo a mesma fonte: “Summer Olympics in Los Angeles, Athens, Atlanta, Sydney, Beijing and Rio de Janeiro all registered peak temperatures in the mid 30Cs. But Tokyo is more relentlessly warm and humid, the two elements in wet bulb globe temperature (WGBT), which is the key measurement for heat-stress risk”.

substituir os demais componentes desta instalação laboratorial (desde a aquisição e aplicação de um mini PC e respetivo monitor, substituição de sondas e/ou conversores de sinal que se encontrem danificados, limpeza do humidificador, etc.) e a aplicar uma nova bomba no sistema de arrefecimento que, de momento, se encontra inoperacional. Por fim, e devido aos treinos de aclimatação de atletas que competiram nos Jogos Olímpicos neste verão, coube igualmente ao autor acompanhar e prestar o auxílio que se demonstrasse necessário.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. BALANÇO TÉRMICO DO CORPO HUMANO

O Homem é um ser homeotérmico, isto é, tem a capacidade de manter a temperatura corporal relativamente constante independentemente da temperatura do meio que o rodeia. Este equilíbrio térmico é mantido graças a termorreguladores. Depreendem-se como termorreguladores o conjunto de mecanismos responsáveis por regular e manter a temperatura corporal interna de um indivíduo. Os termorreceptores, distribuídos por toda a superfície da pele, revelam variações na temperatura cutânea e são encarregues de transmitir impulsos nervosos ao centro regulador de temperatura – o hipotálamo, a região responsável por coordenar várias atividades fisiológicas que determinam o aquecimento ou arrefecimento do corpo. Recebidos os sinais, e caso se verifique que o corpo não se encontra à temperatura dita “normal” (aproximadamente 37 °C), este irá responder de forma a restabelecer o equilíbrio térmico do indivíduo, através da produção de hormonas destinadas a estabelecer os mecanismos termorreguladores necessários.

Caso o corpo esteja sobreaquecido, as glândulas sudoríparas são estimuladas e inicia-se o processo de sudação, isto é, o corpo perde calor através da transpiração (ou seja, por evaporação do suor produzido). Ocorre, também, o processo de vasodilatação, ou seja, os vasos sanguíneos dilatam, aumentando o fluxo sanguíneo e, conseqüentemente, a taxa de transferência de calor para o exterior.

No caso do corpo necessitar de ser aquecido, mecanismos como a vasoconstrição e tremores a nível muscular são os indicados na produção de calor no corpo. A vasoconstrição (oposto de vasodilatação) provoca uma diminuição do calibre dos vasos sanguíneos e, desta forma, o fluxo sanguíneo junto à pele é diminuído, reduzindo, portanto, a dissipação de calor do corpo para o exterior. Os tremores musculares ocorrem quando o processo anterior não se manifesta suficiente para aumentar a temperatura interna corporal (Guyton, 1977).

São vários os fatores preponderantes na manutenção da temperatura corporal do ser humano, sendo alguns desses exemplos: a temperatura, a humidade, a velocidade relativa do ar, a taxa de metabolismo e o isolamento térmico do vestuário. O equilíbrio térmico é obtido quando a quantidade de calor produzida (pelo metabolismo e recebida do ambiente) é igual à quantidade de calor cedida para o ambiente (através da pele (Q_{sk}) e da respiração (Q_{res})). A quantidade de calor produzida é definida pela diferença entre a taxa metabólica (M) e o

trabalho mecânico realizado (W). Este processo é explicitado através da seguinte relação matemática:

$$M - W = Q_{sk} + Q_{res} + S \quad (1)$$

Da superfície da pele para o ambiente ocorrem os mecanismos de transferência de calor sensível por convecção (C) e por radiação (R). As perdas de calor latente pela pele, que dependem tanto da humidade presente à sua superfície como da diferença entre a pressão de vapor de água pele - ar ambiente, manifestam-se pela evaporação do suor segregado (E_{rsw}) e pela evaporação da água transferida por difusão pela pele (E_{dif}) (cf. equação 2).

Aquando da respiração, o ar é expirado praticamente saturado e a uma temperatura ligeiramente inferior à temperatura interna corporal. Deste modo, estão em causa dois processos de perdas de calor, as perdas de calor latente (E_{res}) e sensível (C_{res}), respetivamente (cf. equação 3).

$$Q_{sk} = C + R + E_{rsw} + E_{dif} \quad (2)$$

$$Q_{res} = C_{res} + E_{res} \quad (3)$$

Diz-se que o corpo humano está em equilíbrio térmico quando a taxa de calor nele armazenada é nula ($S=0$), isto é, “quando a velocidade de produção de calor é exatamente igual à velocidade de perda” (Guyton, 1977). Quando $S>0$ o corpo armazena um “excesso” de calor, provocando o seu aquecimento. Por fim, quando $S<0$ existe um “défice” de calor no corpo, provocando o seu arrefecimento.

De salientar que os termos das equações 1, 2 e 3 são expressos em unidades de potência térmica por unidade de área superficial do corpo nu, determinada através da equação proposta por Dubois e Dubois (1916) (ASHRAE, 2017):

$$A_{Du} = 0,202 \times m^{0,425} \times h^{0,725} \quad (4)$$

A figura 1 representa o efeito dos mecanismos termorreguladores de vasoconstrição e de vasodilatação no corpo humano, sendo evidente a maior taxa de transferência de calor em vasos sanguíneos dilatados (cerca de 8 vezes superior) (Guyton, 1977).

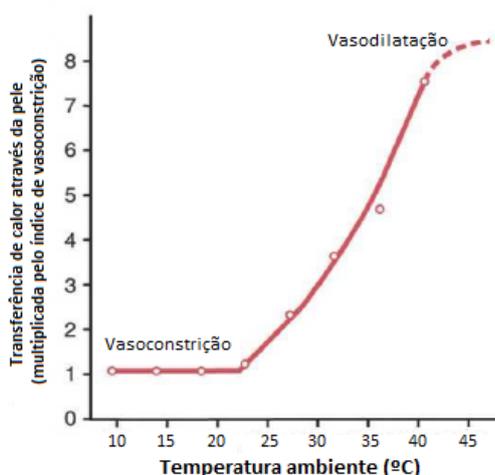


Figura 1 - Perdas de calor em vasos sanguíneos contraídos e dilatados para diferentes temperaturas ambiente.

Fonte: (Guyton, 1977)

2.2. PERDAS DE CALOR PELO CORPO EM DIFERENTES ATIVIDADES

O corpo humano realiza as trocas de calor com o meio ambiente através de vários mecanismos, conforme se observa pela figura 2. Para um indivíduo sentado, dentro de uma divisão a uma temperatura normal, admite-se que 60% das perdas totais de calor se dão por radiação, 20% por evaporação e os restantes 20% por convecção. De referir que ocorrem também perdas de calor por condução, por exemplo, como as representadas na figura 2 entre o corpo humano e a máquina de remo, contudo corresponde a uma componente normalmente desprezável. A perda de calor por radiação ocorre sob a forma de ondas eletromagnéticas, sendo que qualquer corpo que não esteja à temperatura do zero absoluto as emite. Desta forma, o corpo humano irradia calor em todas as direções, assim como também o recebe através da radiação emitida pelas paredes e pelos objetos que se encontrem à sua volta. As perdas de calor latente devido à respiração (o ar é expirado praticamente saturado) e a evaporação do suor, pela transferência de calor latente de vaporização para a superfície da pele, representam 20% das perdas de calor num indivíduo em atividade sedentária. A restante percentagem é referente à transferência do ar por correntes de convecção que “transportam” o calor para longe do corpo.

O exercício físico aumenta a produção de calor e, desta forma, provoca uma elevação na temperatura interna corporal. Assim, a evaporação do suor torna-se no principal mecanismo de dissipação de calor já que, nestes casos, a radiação e a convecção não se manifestam suficientes. Deste modo, 80% das perdas de calor num indivíduo em atividade

física são da responsabilidade da evaporação do suor produzido, estando também contabilizada a evaporação pela respiração nesta percentagem (Pelly, 2018).



Figura 2 - Mecanismos de perdas de calor pelo corpo humano em diferentes atividades.

Fonte: «<https://www.cibsejournal.com/technical/fit-for-purpose-cooling-gym-facilities/>»

A figura 3 comprova o que foi explicitado nos parágrafos anteriores. No eixo das abcissas está representado o consumo de oxigénio em L/min, enquanto que no eixo das ordenadas as perdas de calor em kcal/h.

Sendo o menor consumo de oxigénio o correspondente a uma atividade baixa ou sedentária, verifica-se que, nesses casos, as maiores perdas de calor se dão por radiação e convecção. Em atividades exigentes, em que o consumo de oxigénio atinge os 3 L/min, a evaporação é responsável por cerca de 3,5 vezes mais dos restantes mecanismos de perdas de calor.

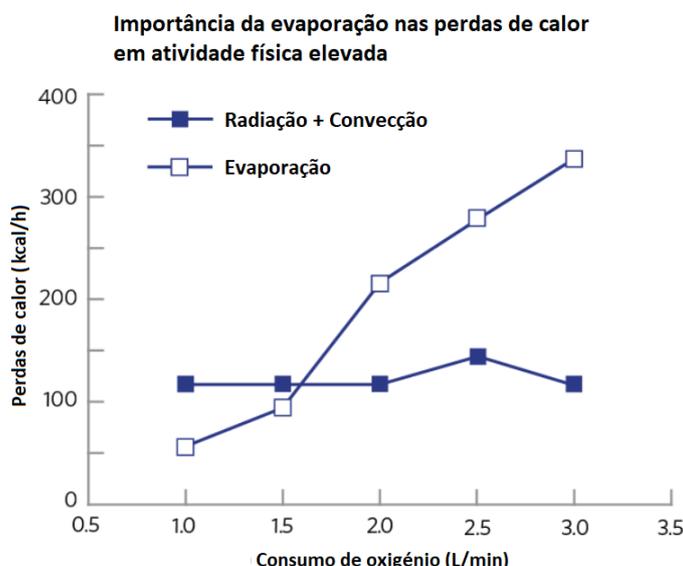


Figura 3 - Importância da evaporação nas perdas de calor, numa pessoa em atividade física exigente.

Fonte: «<https://www.cibsejournal.com/technical/fit-for-purpose-cooling-gym-facilities/>»

2.3. ATIVIDADE FÍSICA E ACLIMATAÇÃO EM AMBIENTES QUENTES E HÚMIDOS

Um indivíduo em atividade física, sujeito a um ambiente térmico hostil, tem dificuldade em manter a sua temperatura corporal interna normal. A exposição ao calor, ao frio, ao vento, à humidade e à chuva pode causar danos severos e irreversíveis no ser humano, podendo mesmo, em certos casos, resultar em morte. Em setembro de 2016, em Setúbal, numa prova de Comandos sob calor extremo – tendo a temperatura do ar atingido os 40 °C – e privação de água, dois instruendos morreram devido a uma onda de calor que atingiu Portugal e outros tantos sofreram lesões graves (tendo sido sujeitos a internamento hospitalar)³ (Matos, 2021).

A elevada presença de vapor de água no ar atmosférico, condição típica de um clima quente e húmido, é responsável por uma diminuição na taxa de evaporação de suor produzido por um corpo. Deste modo, ter-se-á uma limitação na termorregulação, o que provocará uma

³ De referir ainda que, como observa (Matos, 2021), se tratavam de condições extremamente agressivas, em que a prova nem sequer dispunha “de uma tenda médica com refrigeração, nem outras condições necessárias para acolher tantos recrutas debilitados e desidratados devido ao racionamento de água”.

elevação da temperatura interna corporal que, caso o indivíduo seja exposto a essas condições em atividade física, poderá culminar em consequências graves para a sua saúde.

Durante o exercício físico, a produção de calor pelo corpo humano pode atingir valores extremamente elevados e, desta forma, a temperatura corporal pode aumentar consideravelmente. Essa produção de calor provém maioritariamente da energia libertada pelos músculos mais requeridos pelo exercício (em atividade física essa produção é cerca de 15 a 20 vezes superior à de um corpo em repouso). Outro fator preponderante no aumento da taxa de produção de energia térmica é a exposição à radiação solar, isto se o indivíduo estiver a realizar o seu exercício físico no exterior e exposto diretamente ao sol.

É possível constatar que a temperatura e a humidade são dois fatores determinantes na condição física de um atleta. Competir sob ambientes quentes e húmidos provoca no indivíduo, para além do sobreaquecimento do seu corpo, um aumento da frequência cardíaca, maiores perdas de líquidos, dificuldade em manter o fluxo sanguíneo para os músculos, diminuição da capacidade de produzir força e, ainda, uma maior sensação da fadiga. Pode-se, portanto, afirmar que a atividade física sujeita a elevadas temperaturas prejudica diretamente a *performance* de um atleta (Reis, 2019).

Atletas que presenciem climas quentes e húmidos cujo os próprios mecanismos de termorregulação não se manifestem suficientes para manter as suas performances podem, através de treinos de aclimação⁴, tentar contrariar os efeitos desse *stress* térmico, habituando e adaptando o seu organismo a esses ambientes.

Deste modo, a aclimação ao calor e à humidade é uma técnica que se tem vindo a revelar recorrente e essencial na preparação para uma competição de um atleta de alto rendimento. Consiste num processo de exposição e adaptação contínua do corpo a um ambiente quente e húmido, mitigando gradualmente o impacto dessas condições no rendimento do atleta.

Quando atingido o sobreaquecimento do corpo humano, uma elevada taxa de suor é excretada na superfície da pele através das glândulas sudoríparas, de forma a promover o arrefecimento do indivíduo (evaporação). Uma pessoa saudável, sujeita a condições normais de temperatura e humidade, raramente produz mais de 1 L/h de suor. Se essa mesma pessoa for exposta a um clima mais quente e húmido durante umas semanas, isto é, se for aclimatada

⁴ Importa referir que na CC do LAI, tendo como base um breve estudo das condições climatéricas previstas para Tóquio nas datas de competição (23 de julho a 8 de agosto deste ano), foram estabelecidos os valores de 34 °C e 75% de humidade relativa como os *setpoints* para os treinos de preparação para o referido evento.

a esse ambiente mais severo, a sua produção de suor poderá duplicar ou mesmo triplicar. Esse aumento na sudorese promove uma maior eficácia na realização das trocas térmicas humano-ambiente, removendo o calor do corpo numa velocidade 10 vezes superior à velocidade anterior ao processo de aclimação. De notar que o efeito deste método não se reflete apenas na maior produção de suor, mas também na diminuição da concentração de cloreto de sódio extraído pela transpiração. Vários estudos revelam que um indivíduo não aclimatado liberta cerca de 15 a 30 gramas de NaCl por dia, sendo que essa perda pode ser reduzida para 3 a 5 g/dia em, aproximadamente, 6 semanas de aclimação.

Na figura 4, o dia 0 corresponde a uma exposição a um clima ameno, enquanto nos dias 1 a 9 a exposição foi feita sobre um clima quente e seco a uma T_a de 48,9 °C e uma T_{bh} de 26,7 °C, com um tempo de exposição de 100 min por dia e um gasto energético de 30 kcal/h.

A diferença de 22,2 °C entre a temperatura ambiente e a temperatura do bolbo húmido é indicadora de um ambiente pouco húmido, dada a elevada taxa de evaporação da humidade do bolbo para o exterior.

Da análise da figura 4 é possível constatar que, ao fim de 9 dias de aclimação ao calor, a temperatura interna retal decresceu aproximadamente 1,2 °C em relação à medida no 1º dia e a frequência cardíaca registou cerca de menos 37 batimentos por minuto relativamente à frequência cardíaca do individuo no 1º dia. Em sentido contrário, as perdas por transpiração do suor, ao fim de 9 dias, aumentaram, promovendo uma melhor resposta do organismo em termos de termorregulação (Parsons, 2010).

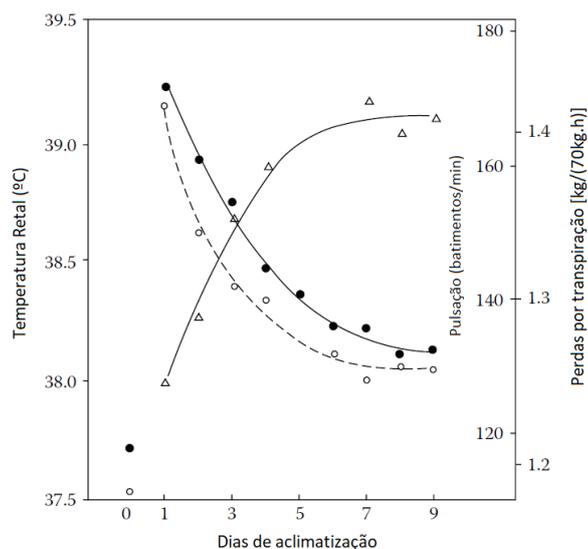


Figura 4 - Exemplo da evolução temporal da temperatura interna retal (•), da frequência cardíaca (o) e das perdas de suor (Δ) de um grupo de homens expostos a uma aclimatização ao calor.

Fonte: (Parsons, 2010)

De notar que aclimatação difere de aclimatização na medida em que a segunda se refere a uma adaptação devido a uma mudança natural de um determinado clima, enquanto que a primeira ocorre devido a uma mudança ambiental imposta e controlada com uma dada duração e intensidade (isto é, induzida). No processo de aclimatização o indivíduo está sujeito às variações naturais das condições ambientais, enquanto na aclimatação, visto que é um método controlado laboratorialmente, permite as condições ambientais desejadas sem grandes variações nos fatores impostos.

2.4. SIMULADORES DA RESISTÊNCIA AERODINÂMICA E DA VELOCIDADE RELATIVA DO AR

Relativamente a um corpo em movimento, a resistência aerodinâmica – ou força de arrasto –, é uma força que atua na mesma direção, mas no sentido contrário ao deslocamento (cf. figura 5). Por outras palavras, é uma força de resistência que desacelera o corpo em movimento.

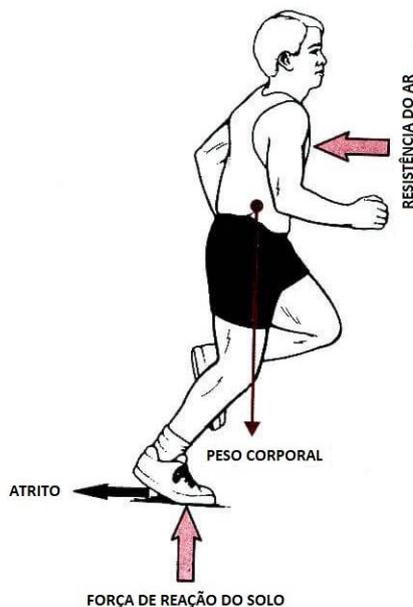


Figura 5 - Diagrama de forças de um corpo em movimento.

A força de arrasto (D) depende da velocidade relativa do corpo (v), da densidade do meio (ρ), do coeficiente de arrasto (C) e da área da secção transversal do corpo (A), sendo determinada a partir da seguinte equação:

$$D = \frac{1}{2} \times \rho \times C \times A \times v^2 \quad (5)$$

Quanto maior a velocidade atingida pelo corpo, maior a resistência aerodinâmica a que o corpo estará sujeito. Por outro lado, um atleta mais alto terá mais dificuldade em atingir maiores velocidades que um atleta de estatura menor, visto que o coeficiente de arrasto (C) é superior em corpos maiores. Quanto mais denso estiver o ar atmosférico, maior é a força de arrasto que atua no indivíduo. Note-se que o atleta, durante uma prova de atletismo, aquando da fase de arranque, mantém o seu corpo inclinado para a frente, diminuindo a área corporal exposta, de modo a vencer a resistência do ar e atingir velocidades mais elevadas (figura 6).



Figura 6 - Postura corporal de um atleta no arranque de uma prova de atletismo.

A velocidade relativa do ar é tanto maior quanto mais rápida for a velocidade de deslocamento do corpo humano. Por sua vez, o seu aumento provoca uma maior sensação de arrefecimento na pessoa (apesar da temperatura atmosférica se manter constante). Tal facto é justificado pela camada de ar junto à pele (ar mais quente) ser constantemente substituída por ar novo, promovendo uma maior taxa de transferência de calor por convecção com o ambiente.

Conforme observado por leitura direta da figura 7, é possível verificar que quanto maior a velocidade do ar, maior a percentagem de calor perdido por convecção. Para uma velocidade de 6 km/h o efeito de arrefecimento do ar, isto é, a taxa de perdas de calor pelo corpo nestas condições, é cerca de duas vezes mais eficiente do que para uma velocidade de aproximadamente 1 km/h.

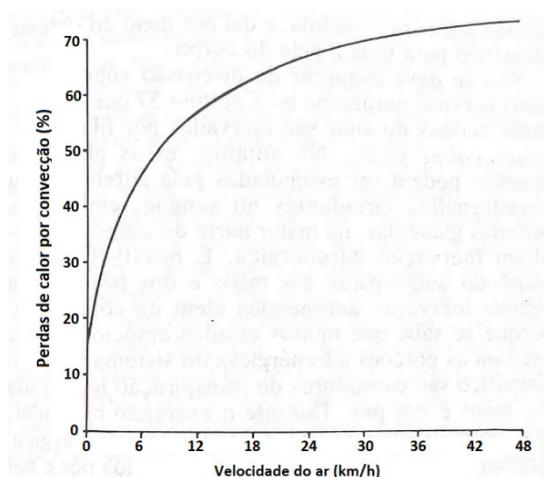


Figura 7 - Efeito da velocidade do ar na percentagem de perdas de calor por convecção.

Fonte: (Guyton, 1997).

Os ventiladores, colocados à frente de cada uma das passadeiras elétricas da sala de testes da CC (figura 8), têm o propósito de simular o efeito da força de arrasto no atleta e o de criar uma velocidade relativa do ar representativa do seu deslocamento numa prova ao ar livre. Desta forma, pretende-se que o treino realizado na CC tenha as condições o mais idênticas possíveis à prova para a qual o atleta está a treinar.



Figura 8 - Passadeiras e ventiladores no interior da sala de testes da CC do LAI.

3. CASO DE ESTUDO

3.1. CARATERIZAÇÃO DA CC

Localizada em Coimbra, no LAI, a CC permite realizar ensaios para aclimatar atletas de alto rendimento e analisar o seu comportamento corporal sujeito a condições de temperatura e humidade (controladas), idênticas às que encontrarão no local das provas que irão realizar. Trata-se de uma construção em madeira dividida em duas divisões (uma sala de controlo e uma sala de testes) e 4 GTAs (cf. figura 9).

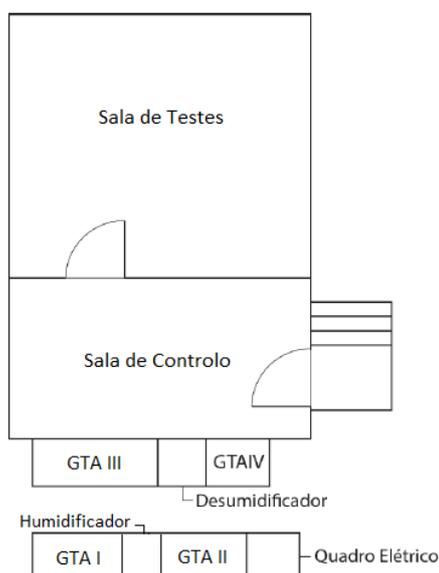


Figura 9 - Planta da câmara climática do LAI.

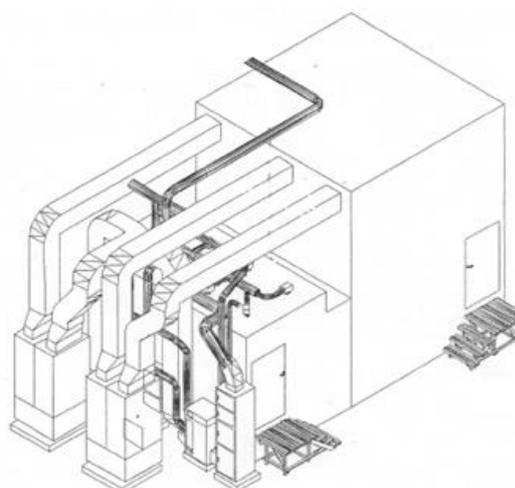


Figura 10 - Esquema 3D da câmara climática do LAI.

A sala de controlo, com uma área de aproximadamente 16 m², caracteriza-se por ser a sala de apoio aos testes/treinos. É o local onde ocorre o controlo e a monitorização dos ensaios pelo programa desenvolvido em LabVIEW, bem como onde se encontram os aparelhos responsáveis por realizar as análises fisiológicas dos atletas em ação.

Já a sala de testes corresponde a uma divisão climatizada de 4,8 x 4,8 m² de área de pavimento e com um teto móvel que pode ser configurado desde os 2,1 aos 4,4 m de pé direito. Caracteriza-se por ser a sala onde ocorrem as sessões de aclimação. Para este efeito, no seu interior, podem ser instaladas 2 passadeiras elétricas ou outros aparelhos, que podem variar mediante a modalidade do atleta que está a ser treinado.

Por fim, os 4 GTAs constituem o sistema AVAC da CC. É através deles que são garantidas as condições de temperatura e humidade na sala de testes. Deste modo, permitem obter temperaturas dos 5 aos 45 °C e humidades relativas entre os 20 e os 90%, no interior da sala.

3.1.1. GTA I E GTA II

Estas unidades são caracterizadas em simultâneo pois apresentam função e estrutura semelhantes, ou seja, garantem a ventilação e a climatização da sala de testes. Ambos são responsáveis por aquecer, arrefecer e regular o caudal de ar a insuflar no compartimento a ser climatizado. Cada unidade é constituída por dois ventiladores centrífugos de velocidade variável, um ventilador centrífugo de velocidade constante, um sistema de filtragem (pré-filtro e filtros de bolsa, responsáveis por filtrar partículas de maior e menor dimensão, respetivamente), uma bateria de aquecimento e uma bateria de arrefecimento (cf. figura 11).

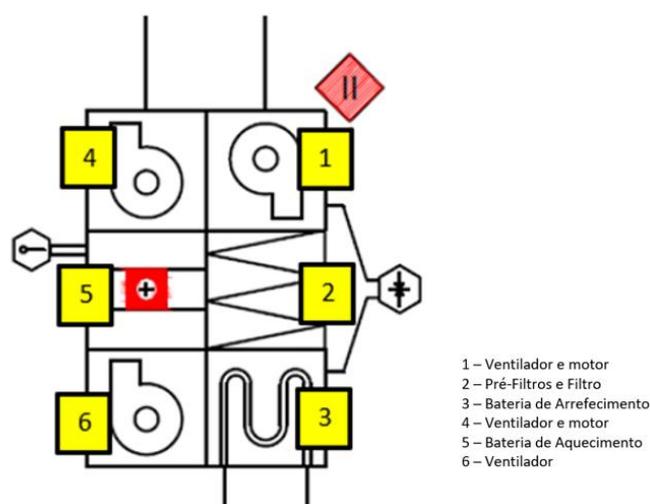


Figura 11 - Componentes e organização do GTA I e GTA II.

Fonte: (Dionísio, 2021)

Acoplado à conduta de saída de ar da GTA I existe um humidificador de eléctrodos imersos: o NOVAP série 3000 (figura 12). Este humidificador, fabricado pela NORDMANN, destina-se a produzir vapor de água para o interior da sala de testes, em caso de necessidade de aumentar o teor de humidade no interior da sala de ensaios.



Figura 12 - Humidificador NOVAP série 3000.

O ar tratado pelo GTA I é insuflado na câmara através do pavimento. O chão da sala de testes é constituído por grelhas que podem ou não estar tapadas. Caso estejam destapadas, é permitida a normal ascensão do ar pela câmara; caso contrário, o ar é forçado a seguir por uma caixa de ar criada na face interior das paredes da sala, onde realiza as trocas de calor com o interior do compartimento.

Do GTA II, o ar tratado é insuflado diretamente na câmara de testes através de um difusor de ar de baixa velocidade. Construído em chapa de aço e com um tampo frontal retangular perfurado em furos de 3 mm, o difusor encontra-se junto a uma parede da câmara (figura 13).



Figura 13 - Difusor de ar presente na sala de testes da CC.

3.1.2. GTA III

O GTA III foi desenvolvido com a finalidade de injetar ar novo no interior da CC. Este possui uma configuração estrutural diferente dos GTAs I e II. Quando comparados, saltam de imediato à vista as diferenças relativas às suas dimensões. É possível, portanto, constatar que o GTA III é manifestamente mais pequeno, pois apresenta na sua constituição apenas um ventilador centrífugo de velocidade constante, um sistema de filtragem (pré-filtro e filtros de bolsa), uma bateria de aquecimento e uma bateria de arrefecimento (cf. figura 14).

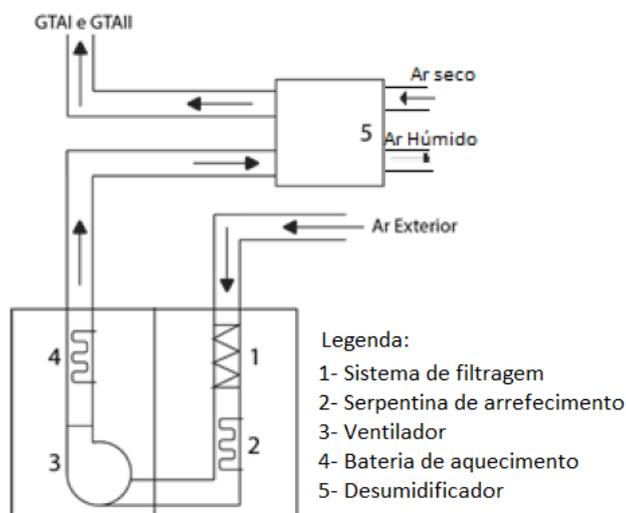


Figura 14 - Componentes e organização do GTA III.

Associado a este GTA, o ML 420 da Munters (figura 16) é o equipamento responsável por desumidificar o ar exterior antes da sua junção ao ar previamente tratado pelos GTAs I e II (o esquema de princípio do sistema AVAC encontra-se representado no Anexo A). O ar de processo, saído do GTA III, é forçado a atravessar um rotor revestido por sílica gel (meio exsicante) destinado a adsorver o vapor de água contido no ar húmido. Simultaneamente, ocorre a entrada de ar de reativação (ar que é previamente aquecido por resistências instaladas no aparelho), que é conduzido até ao rotor e que atua como agente facilitador no processo de secagem, regenerando o material higroscópico (a sílica gel). O produto final deste método é ar seco, sendo que o produto indesejado (vapor de água) é expelido através de uma conduta de ar para o exterior (MUNTERS, 2016). A figura 15 demonstra o referido processo.

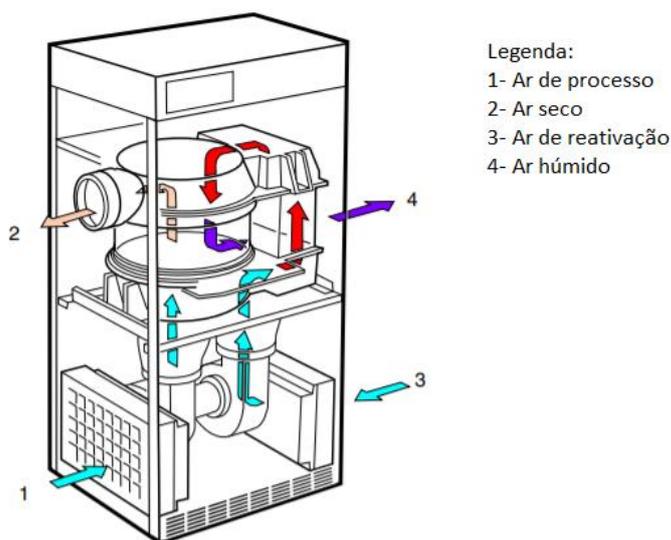


Figura 15 - Esquema de funcionamento do ML 420.



Figura 16 - Desumidificador ML 420.

3.1.3. GTA IV

Este GTA é o responsável por climatizar a sala de controlo da CC. No entanto, por não se encontrar em utilização, não será analisado nesta dissertação.

3.2. SISTEMA DE CONTROLO

3.2.1. SOFTWARE LABVIEW

O LabVIEW é uma linguagem de programação gráfica (G) criada em 1986 pela *National Instruments*. Trata-se de um *software* compatível com os Sistemas Operativos Macintosh, Linux, Solaris e Windows.

Atualmente, os sistemas industriais encontram-se cada vez mais automatizados, sendo o recurso a sensores essencial na aquisição de dados em tempo real. No entanto, é necessária a interação destes aparelhos com um *software* capaz de adquirir, analisar, apresentar e armazenar esses dados. O LabVIEW tem essa capacidade, pois possibilita, de forma eficiente, a análise e o processamento dos sinais emitidos em tempo real mediante a integração de *hardwares* de aquisição e envio de sinal – os módulos da MCC. Esta é uma

plataforma cujo as linhas de código correspondem a diagramas de blocos, sendo desta forma mais fácil a visualização e a compreensão do sistema automatizado – linguagem de programação gráfica.

As rotinas de programação executadas pelo LabVIEW são denominadas de VIs (*Virtual Instruments*). Ao ser criado um novo VI, são de imediato abertas duas janelas: um painel frontal e um diagrama de blocos. O primeiro representa a interface do projeto; é neste espaço que se consegue visualizar, em tempo real, os resultados pretendidos através de indicadores (sinais de saída), controladores (sinais de entrada), gráficos, etc. Já o diagrama de blocos, como referido no parágrafo anterior, contém o código do programa. Nesta janela é possível adicionar funções, fórmulas, constantes, *case structures*, etc (Instruments, n.d.).

3.2.2. COMPONENTES DE CONTROLO

3.2.2.1. CONVERSORES DE SINAL

Os conversores de sinal são aparelhos cuja função é a de converter o sinal recebido de um dado sensor numa mesma ou outra grandeza, de acordo com as necessidades de receção e processamento do sistema de aquisição de sinal. São responsáveis por converter um sinal analógico em outro sinal analógico. Por terem a particularidade de isolar galvanicamente um circuito elétrico são, por vezes, instalados com este propósito. De referir que os dispositivos em utilização neste projeto são os modelos PXT-10.024 e o PXU-20.024, ambos produzidos pela Brodersen.

O PXT-10.024 é um conversor de sinal de termorresistências⁵ num sinal analógico. O seu *output* pode ser configurado para dois tipos de sinais analógicos, corrente ou tensão, e diferentes gamas consoante o terminal selecionado pelo utilizador : 0 a 10 V DC, 2 a 10 V DC, 0 a 20 mA ou de 4 a 20 mA. A tensão de alimentação deste dispositivo é de 24 V AC. Tanto os valores de *input* como de *output* deste aparelho são selecionados mediante a configuração estabelecida pelo utilizador (figura 18) (BRODERSEN, n.d.-b).

Por outro lado, o PXU-20.024 (cf. figura 17⁶) é um conversor de um sinal analógico num outro sinal do mesmo ou de outro tipo. De forma a proteger o circuito elétrico de

⁵ Nesta instalação adotaram-se sondas PT100, que é uma termorresistência de elevada precisão, compatível com este tipo de conversor, com configuração para leitura na gama de -50 a 100 °C ou de -50 a 300 °C.

⁶ O conversor de sinal PXU-20, representado na figura 17, e o conversor de sinal PXT-10 são fisicamente idênticos.

grandes diferenças de potencial (capazes de danificar o sistema de controlo da CC), não permitindo o fluxo constante de corrente, o PXU-20.024 é também utilizado como isolador galvânico. O *input* deste dispositivo pode ser um sinal analógico em tensão ou em corrente. Tal como no PXT-10.024, o *output* pode ser expresso nas gamas de 0 a 10 V DC, 2 a 10 V DC, 0 a 20 mA ou de 4 a 20 mA (cf. figura 19). Relativamente à tensão de alimentação, este aparelho está também preparado para receber 24 V AC (BRODERSEN, n.d.-a).

Cada um destes dois modelos pode ser ajustado em termos de compensação (*offsets*) e ganho (*gain*) em $\pm 5\%$, condição importante para ajudar na calibração do conjunto sensor-sistema de aquisição.



Figura 17 - Conversor de sinal PXU-20 da Brodersen.

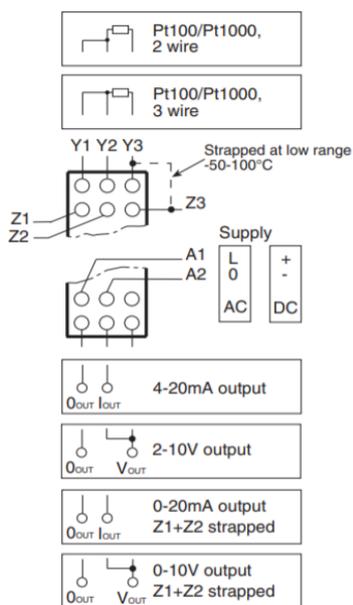


Figura 18 - Esquema de ligação de um PXT-10.

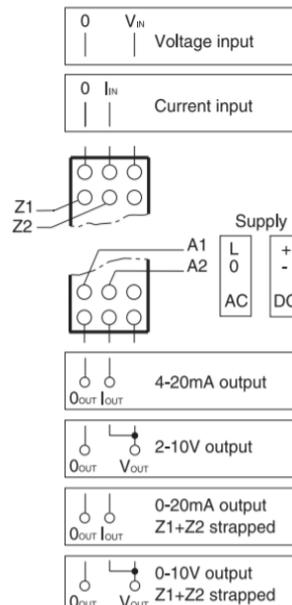


Figura 19 - Esquema de ligação de um PXU-20.

3.2.2.2. SENSOR DE TEMPERATURA E HUMIDADE

O modelo HMW60Y da VAISALA (figura 20) é um sensor capaz de medir temperatura e humidade relativa. Este dispositivo é alimentado por uma fonte DC num intervalo de 10 a 35 V. O *output* é um sinal em corrente numa gama de 4 a 20 mA.



Figura 20 - HMW60Y da VAISALA.

A temperatura é medida por uma sonda PT1000 (IEC 751 class B) incorporada na placa deste aparelho. Esta permite ler valores num intervalo de -5 a 55 °C, sendo o perfil de precisão desta grandeza apresentado na figura 21:

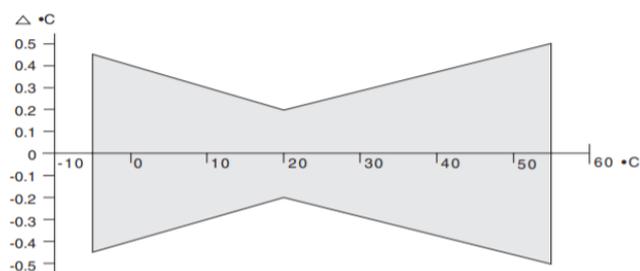


Figura 21 - Perfil de precisão da temperatura do sensor HMW60Y da VAISALA.

Fonte: (VAISALA, 2009).

Por interpretação do perfil da figura 21 a temperatura atinge erros de medição entre $\pm 0,2$ e $\pm 0,5$ °C. Assim, para uma temperatura de 20 °C lida por este sensor, existe uma gama

de erro até aos $\pm 0,2$ °C. Por outro lado, quanto mais extrema for a temperatura lida pelo HMW60Y maior será o intervalo de erro de medição associado (para uma leitura de 55 °C pode estar associado um erro até $\pm 0,5$ °C).

No que diz respeito à humidade relativa, o HUMICAP 180 é um sensor polimérico, que se encontra incorporado na placa do HMW60Y, responsável por medir a humidade relativa do meio que o rodeia numa gama de 0 a 95%. Comparativamente à temperatura, esta grandeza manifesta uma maior instabilidade na sua leitura. É importante que se atinja um equilíbrio da temperatura e que esta esteja devidamente calibrada. Suponhamos que o sensor está a ler uma temperatura de 20 °C e uma humidade relativa de 50%; caso exista um erro de medição de 1 °C, a humidade relativa apresentará um erro de $\pm 3\%$. Para valores de humidade relativa superiores o erro será ainda maior ($\pm 5,4\%$), bem como para valores extremos de temperatura (de -5 a 10 °C e de 40 a 55 °C).

Nas figuras 22 e 23 apresentam-se os perfis de precisão da humidade relativa deste sensor.

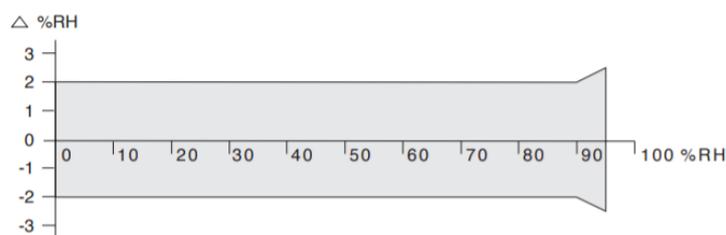


Figura 22 - Perfil de precisão da humidade relativa do sensor HMW60Y da VAISALA.

Fonte: (VAISALA, 2009).

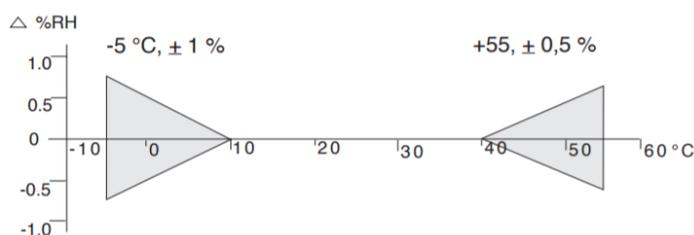


Figura 23 - Perfil de precisão da humidade relativa do sensor HMW60Y da VAISALA em função da temperatura.

Fonte: (VAISALA, 2009).

Da figura 22, para valores de humidade relativa até aos 90% o erro de leitura permanece nos $\pm 2\%$, enquanto que no intervalo de 90 a 95% esse mesmo erro aumenta linearmente até aos $\pm 3\%$. Na figura 23 considera-se a influência da temperatura na precisão da humidade relativa. Consta-se que valores de temperatura dos 10 aos 40 °C não afetam a precisão da humidade relativa. No entanto, dos -5 aos 10 °C e dos 40 aos 55 °C tal já não se verifica, sendo possível atingir erros de medição até $\pm 1\%$.

Por fim, outro facto importante relativo ao HUMICAP 180 é ter um tempo de resposta de 15 segundos a uma temperatura ambiente de 20 °C, sem qualquer movimentação natural ou forçada de ar (VAISALA, 2009).

3.2.2.3. SENSOR DE CO₂

O sensor EE820-HV2A6E1, da E+E Elektronik (figura 24), é o responsável por medir a concentração de dióxido de carbono presente no interior da sala de testes da CC. Apresenta uma faixa de medição de 0 a 5000 ppm e o sinal analógico enviado pode ser tanto em tensão como em corrente. A figura 25 demonstra essa possibilidade de escolha, que é feita manualmente, sendo “I” o sinal em corrente numa gama de 4 a 20 mA e “U” em tensão de 0 a 10 V. Para este projeto o *output* selecionado foi o sinal em tensão, dada a deteção de uma incoerência nos valores enviados em corrente. A alimentação deste aparelho é fornecida em corrente alternada, com uma tensão de 24 V. O erro de medição associado a este dispositivo, a uma temperatura média de 25 °C e pressão de 1013 mbar, é de 50 ppm ($\pm 3\%$ do valor medido). O tempo de resposta deste sensor é de 300 s, isto é, 5 minutos (ELEKTRONIK, 2018).

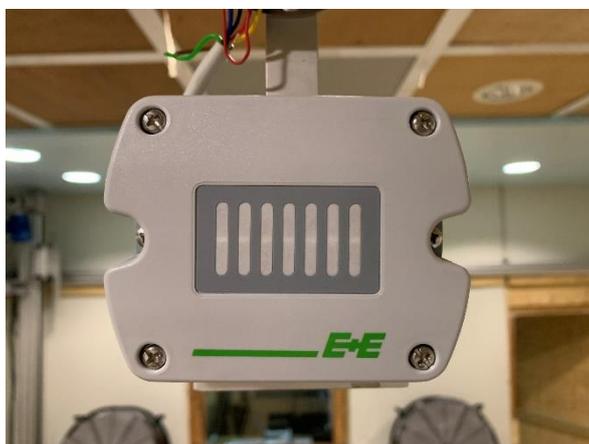


Figura 24 - EE820-HV2A6E1 da E+E Elektronik.

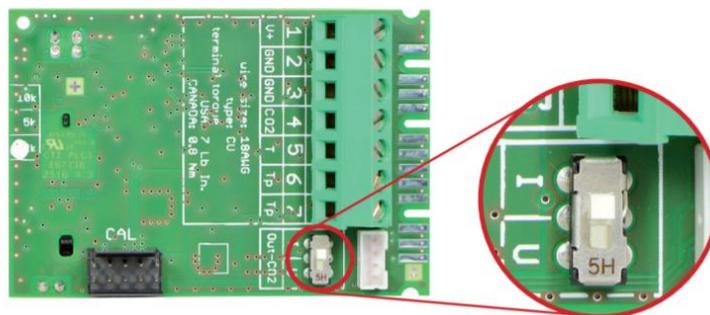


Figura 25 - Placa do sensor EE820-HV2A6E1 salientando a possibilidade de mudança do sinal do output.

Fonte: (ELEKTRONIK, 2018).

3.2.2.4. BARÔMETRO

De modo a aperfeiçoar a CC do LAI, decidiu-se adquirir e instalar um barômetro no seu interior. Assim, passará a existir uma informação adicional que permitirá analisar possíveis variações de pressão no interior da sala de testes. Por outro lado, sendo a pressão do ar um dos parâmetros presentes nas formulações matemáticas responsáveis pela conversão da humidade relativa em humidade absoluta (subcapítulo 4.7.1.), esta melhoria possibilitou que o valor inserido nessa fórmula seja o valor real de pressão lido dentro da câmara, ao contrário do que acontecia até à data, em que se assumia o valor da pressão atmosférica padrão (101325 Pa).

O modelo PX2780-800B5V da Omega (figura 26) foi o equipamento escolhido para este projeto. Este aparelho deteta o valor de pressão absoluta presente na sala de testes e, posteriormente, converte-o num sinal de saída analógico de 0 a 5 V DC. É alimentado por uma corrente contínua de 24 V, tolera humidades relativas até aos 95%, temperaturas desde os -60 aos 40 °C e permite ler valores dos 800 aos 1100 hPa⁷. Este produto veio calibrado de fábrica, não necessitando de qualquer ajuste por parte do utilizador.

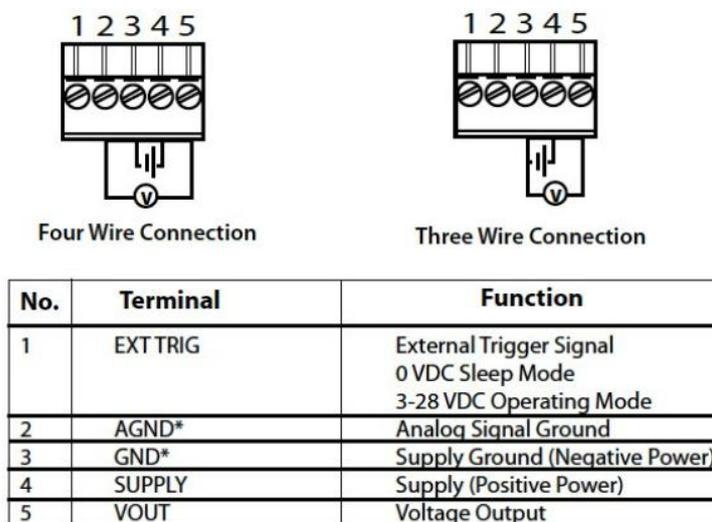
⁷ 1hPa=100Pa



Figura 26 - PX2780-800B5V da Omega instalado na CC.

Relativamente ao modo de operação, este dispositivo possui dois modos: um *Sleep Mode* e um *Operating Mode*. O *Sleep Mode* caracteriza-se por ser um modo em que o aparelho apenas promove uma leitura praticamente instantânea, consumindo cerca de 1 mA. O *Operating Mode* permite que o aparelho esteja em contínuo funcionamento e, portanto, possibilita leituras contínuas de pressão. No ato da instalação, optou-se por escolher este último modo.

Como observado pela figura 27, o aparelho dispõe de 5 terminais elétricos para estabelecer a sua configuração. Com objetivo de evitar uma possível queda de tensão na linha negativa do circuito, optou-se, em detrimento da ligação a 3 fios, por fazer a conexão do dispositivo através de 4 fios (“Four Wire Connection”). Deste modo, a alimentação e o *output* do dispositivo passam a ter dois fios-terra independentes.



*Both grounds (AGND and GND) are in the same electrical potential in the transducer.

Figura 27 - Conexão do PX2780 através de 4 e 3 fios, respectivamente.

Fonte: (OMEGA, 2009).

A instalação de um novo sensor requereu a posterior conexão do sinal enviado ao programa de controlo, através da placa de aquisição de sinal – o módulo USB-1608GX da *Measurement Computing Corporation* (MCC). A tabela atualizada dos canais de entrada e saída encontra-se no Anexo B. Por conseguinte, estabeleceu-se a equação de calibração deste sensor, exatamente pelo mesmo método adotado na correção do fator de calibração do CO₂ (subcapítulo 4.4.2.). Deste modo, os conjuntos de pontos do certificado de calibração fornecido com o sensor (x[V]; y[hPa]): (1;800) e (5;1100) permitiram concluir analiticamente a seguinte expressão de calibração: $y = 75x + 725$. Tal fórmula foi, então, introduzida no *software* de controlo, designadamente na aquisição do sinal proveniente do conversor associado ao PX2780 (cf. figura 28).

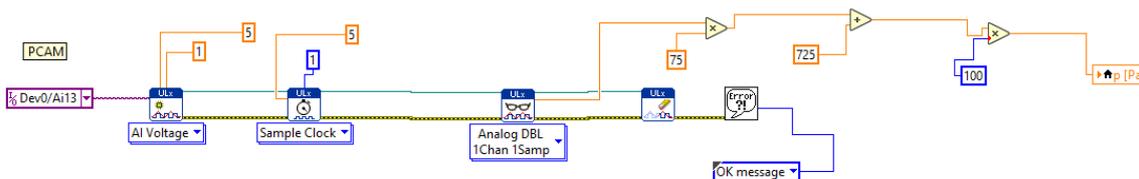


Figura 28 - Introdução da equação de calibração do PX2780 no *software* LabVIEW.

4. MATRIZ DESENVOLVIDA

4.1. RECONSTRUÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLO – LABVIEW⁸

Dada a existência de um erro no sistema de controlo deste projeto, que o impedia de “correr” corretamente sem um constante supervisionamento, bem como em razão da dificuldade em identificá-lo, foi considerado necessário e pertinente reconstruir o programa de raiz.

Sendo este tema de dissertação de mestrado um projeto de continuidade e tendo a CC sido bastante utilizada dada a simultaneidade temporal com a realização dos Jogos Olímpicos de Tóquio, o tempo de aprendizagem e entrosamento revelou-se curto. Assim, e apesar do erro encontrado no *software* se ter revelado, inicialmente, uma preocupação e um obstáculo no decorrer dos primeiros treinos de aclimatação, acabou por, de certo modo, se tornar numa mais-valia para o autor, uma vez que este contratempo lhe proporcionou uma maior familiarização com o programa desenvolvido em LabVIEW.

Após a sua reconstrução total o erro desapareceu, ficando o programa perfeitamente operacional.

4.2. PURIFICADOR E DESCONTAMINADOR DO AR

A manutenção da QAI é indispensável para a preservação da saúde e do bem-estar do ser humano. A situação pandémica que hoje vivemos veio reforçar ainda mais esta máxima. O coronavírus SARS-COV-2 é um vírus altamente transmissível, passível de atingir qualquer pessoa, que foi recentemente descoberto e rapidamente se alastrou por todo o mundo. Deste modo, a OCRAMClima desenvolveu um equipamento capaz de preservar a QAI em espaços onde é crucial evitar a sua contaminação (hospitais, lares, etc.), sendo um progresso importante na luta contra esta infeção.

A CC do LAI tem vindo a receber atletas de várias partes do mundo. Deste modo, é importante manter a sala de testes descontaminada, garantindo ao atleta segurança e qualidade no serviço prestado. Por conseguinte, os responsáveis por este projeto

⁸ Tarefa realizada em conjunto com o meu colega Filipe Dionísio (Dionísio, 2021).

consideraram essencial a utilização da nova tecnologia projetada e trabalhada pela OCRAMClima: o NPS CC Optimal (figura 29).



Figura 29 - NPS CC Optimal na CC.

O NPS CC Optimal é um dispositivo portátil de recirculação destinado a prevenir a contaminação de um certo espaço interior, desinfetando e filtrando o ar que o atravessa. É composto por 2 lâmpadas UV-C (germicidas), não geradoras de ozono e com uma duração de 9000 horas, 2 filtros HEPA de elevada eficiência e 1 ventilador centrífugo.

As lâmpadas UV-C, através de reações fotoquímicas, atuam eficazmente na eliminação de vírus, bactérias e outros agentes biológicos do ar à passagem, numa área até 60 m². Considerando os filtros limpos, o NPS CC Optimal possui um caudal volúmico nominal de 600 m³/h e máximo de 825 m³/h, sendo que, para este último, o nível sonoro atinge os 58 dB (a 1,5 m de distância do equipamento). É, então, viável constatar que se trata de um produto com um nível de ruído bastante tolerável. Apresenta um controlador com *display*, o qual permite sinalizar possíveis avarias nas lâmpadas ou avisar sobre uma possível colmatação dos filtros. Permite, ainda, ajustar o caudal desejado e fazer uma programação diária para esta unidade.

4.3. REPOSICIONAMENTO DOS SENSORES VAISALA E E+E ELEKTRONIK

Durante os primeiros treinos de aclimação dos atletas olímpicos detetaram-se discrepâncias significativas entre os valores lidos pelo sensor de temperatura e humidade da VAISALA e pelo sensor de CO₂ da E+E Elektronik, comparativamente aos lidos pelos diferentes aparelhos portáteis que se encontravam dentro da CC. Aliada a esta inexatidão, a imprecisão destes valores também se fazia notar pela instabilidade na sua leitura.

Foi possível concluir que, devido ao facto destes sensores se encontrarem fixos na parede, isto é, na camada limite da parede, tal estaria a perturbar a leitura correta dos valores extraídos por cada um deles. Assim, resolveu-se alterar a sua localização para o centro da CC (a uma altura que não prejudicasse o treino dos atletas), de modo a serem lidos valores mais estáveis, precisos e representativos das condições médias da CC. Para tal:

- Foi construído um suporte para os sensores (cf. figuras 20, 24 e 26);
- Os cabos elétricos que estavam colocados sob o pavimento foram mudados para o exterior da câmara e orientados sobre uma calha até ao topo da mesma;
- Foi reestabelecida a correta alimentação dos sensores e as respetivas conexões aos conversores de sinal.

Após esta mudança, detetou-se, nos testes posteriores, uma melhoria nos resultados lidos através do *software* de controlo, bem como uma maior exatidão nos valores obtidos, tendo sido, portanto, uma alteração vantajosa para este projeto.

4.4. CALIBRAÇÃO DOS SENSORES

Após uma análise comparativa entre os valores obtidos pelos sensores de controlo da CC e os lidos por uma sonda de referência (devidamente calibrada), verificou-se a existência de ligeiras discrepâncias nos resultados. Ora, dada a exigência na precisão dos valores medidos, considerou-se necessário proceder às devidas calibrações dos aparelhos. Deste modo, procedeu-se criteriosamente ao ajuste dos valores lidos pelo LabVIEW. Esse ajuste foi feito nos conversores de temperatura (PXT-10.024) e nos conversores de sinal (PXU-20.024).

As temperaturas do ar insuflado pelo difusor e do ar junto às paredes são medidas através de termorresistências (sondas PT100). Nestes casos, é convertido um sinal de temperatura num sinal analógico de 4 a 20 mA através de um conversor do tipo PXT. No caso da temperatura e humidade da sala de testes, os valores medidos pelo sensor HMW60Y são enviados numa gama de 4 a 20 mA a um conversor de sinal do tipo PXU. De forma a poder ser lido pelo módulo de aquisição de sinal e, posteriormente, pelo *software*, o sinal recebido pelo PXU foi convertido num sinal em tensão de 1 a 5 V através de resistências de 250 Ω .

Os diferentes sensores do sistema de monitorização e controlo da CC podem ser calibrados através do ajuste da compensação e do ganho dos respetivos conversores de sinal. O ajuste da compensação (ou do erro constante) está associado ao desfasamento entre o valor real e o medido pelo sensor a ser calibrado. O ajuste do ganho (ou erro linear) está associado ao erro de inclinação da reta de calibração (cf. figura 30). De referir que estes parâmetros são ajustados de acordo com os valores medidos através de uma sonda de referência de elevada precisão (valores reais).

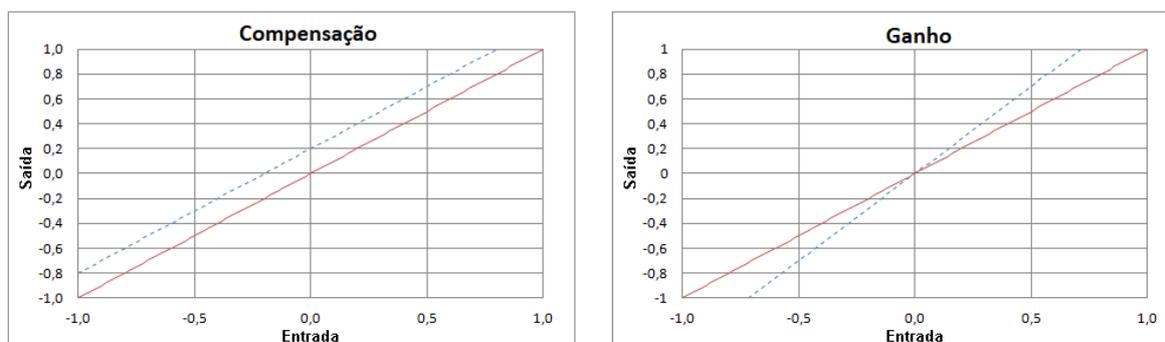


Figura 30 - Exemplos de erros de compensação e de ganho (a reta a vermelho corresponde à reta dos valores da grandeza de referência e a linha azul, a tracejada, a reta dos valores medidos pelo sensor a ser calibrado).

4.4.1. PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO

Optou-se por uma calibração a dois pontos: uma primeira, com a câmara a uma temperatura de 25 °C e humidade relativa a 60% e, uma segunda, com a CC a uma temperatura e humidade elevadas (T=35 °C e HR=90%). Tratou-se de um processo iterativo, já que qualquer ajuste num dos parâmetros involuntariamente desajustava o outro. Deste modo, o processo só ficou concluído com sucesso quando, por iterações sucessivas, os valores obtidos pelo sensor e pela sonda de referência convergiram (tendo o desvio e o erro de inclinação da reta sido anulados).

4.4.2. CALIBRAÇÃO E AQUISIÇÃO DO SINAL DO SENSOR DE CO₂

A seguir a uma análise das linhas de código, outrora implementadas, do controlo sobre o CO₂ no LabVIEW, detetou-se um erro na sua equação de calibração. Deste modo, após algumas relações matemáticas, determinou-se a fórmula correta (do tipo $y = ax + b$) e procedeu-se à respetiva alteração. O método analítico usado baseou-se na seguinte regra de correspondência: 1 V correspondendo a 0 ppm e 5 V correspondendo a 5000 ppm. Assim, resultou a equação $y = 1250x - 1250$ (sendo y [ppm] e x [V]) (cf. figura 31). Note-se que o intervalo de 0 a 5000 ppm corresponde à faixa de medição do EE820-HV2A6E1, enquanto que o intervalo de 1 a 5 V corresponde à gama de valores lida pelo sistema de controlo (o sinal enviado numa gama de 4 a 20 mA pelo PXU-20.024 é convertido, através de uma resistência de 250 Ω, num sinal de 1 a 5 V de forma a poder ser lido pelo módulo de aquisição de sinal).

Por último, ajustou-se a compensação e o ganho do respetivo conversor de sinal com o auxílio de um sensor de referência, ficando o programa com a informação correta do nível de concentração de dióxido de carbono dentro da sala de testes.

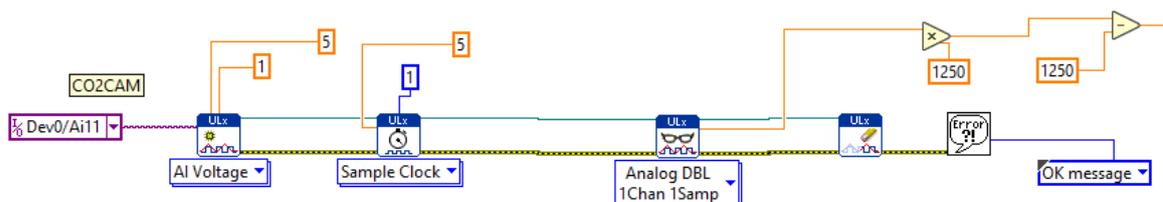


Figura 31 - Introdução da equação de calibração do EE820-HV2A6E1 no software LabVIEW.

4.5. NOVO *HARDWARE* E ATUALIZAÇÃO DO *SOFTWARE* DE CONTROLO

Com o propósito de adquirir novas e (consideradas) importantes funcionalidades ao sistema de controlo deste projeto, revelou-se necessária a atualização do *software* LabVIEW. Para tal, dada as características do computador em utilização, foi preciso renovar o *hardware* da CC.

Optou-se pela aquisição de um mini PC, o Cubi 5 10M da MSI, que, para além de conferir melhores especificações que o anterior (em termos de processador, placa gráfica, armazenamento, etc.), tem a vantagem de conseguir apresentar todas estas competências num “Hand-Palm sized PC”. Ademais, foi também adicionado ao *hardware* da CC um rato e um teclado *bluetooth*.

Complementou-se esta compra com a instalação de um novo monitor, o modelo VP 247 da ASUS – um ecrã panorâmico de 24 polegadas e painel LCD com uma resolução máxima de 1920x1080.

Como se pode constatar pela figura 33, o computador encontra-se oculto por detrás do monitor. Salienta-se, desta forma, a melhoria no espaço e na organização da secretária comparativamente ao que anteriormente era apresentado (figura 32).



Figura 32 - Computador antigo.

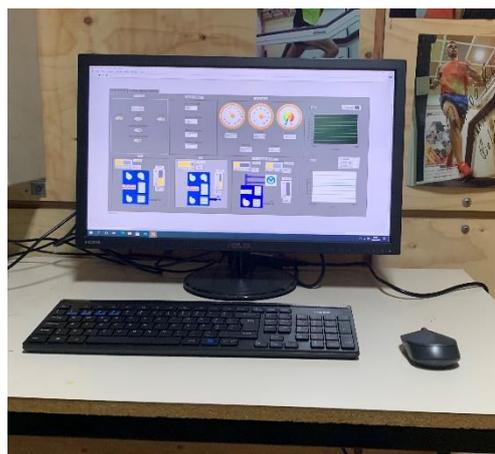


Figura 33 - Computador novo.

De salientar que, para além do sistema operativo e da nova versão do LabVIEW, foi instalado todo o *software* DAQ da *Measurement Computing Corporation* (MCC) compatível

com os módulos de aquisição e envio de sinal instalados e imprescindíveis ao sistema de controlo da CC.

4.6. ESTUDO SOBRE A ESTANQUEIDADE DA CC

Com o intuito de fazer uma análise sobre a estanqueidade da CC, estudou-se o decaimento da concentração de dióxido de carbono dentro da sala de testes. Assim, recorrendo a uma botija contendo CO₂, elevou-se a sua concentração até atingir um valor preestabelecido e analisou-se o seu decaimento ao longo do tempo de exposição. Com o auxílio dos ventiladores foi possível homogeneizar o compartimento, estabelecendo-se assim uma concentração inicial uniforme do gás traçador (C_0). Este teste foi realizado em 3 situações diferentes: a primeira sem a ação do sistema de climatização, a segunda apenas com recirculação de ar e temperatura controlada (GTA I e GTA II ligados) e a terceira com as 3 Unidades de Tratamento de Ar (UTAs) em funcionamento, ou seja, com entrada de ar novo no sistema AVAC. Consequentemente, foi também possível determinar a taxa de renovação de ar pelo GTA III. Importa referir que, no segundo e terceiro ensaios, isto é, nos ensaios com recirculação de ar e entrada de ar novo no sistema, foram medidas e registadas (com auxílio do WolfSense – um aparelho portátil medidor de concentrações de gases colocado no exterior, ao lado da sala de testes) e posteriormente tratadas (através das funcionalidades do *Microsoft Excel*), as concentrações de CO₂ no exterior da CC ao longo do tempo de cada teste ($C_{ext}(t)$).

Para esta avaliação aplicou-se o método do decaimento. O dióxido de carbono foi o gás utilizado visto existirem, neste projeto, aparelhos capazes de medir a sua concentração e, obviamente, por ser um gás que apresenta as características indicadas para exercer esta função. Tem uma densidade ligeiramente superior à do ar (cerca de 1,53 vezes (Abreu, 2010)), não é tóxico, é incolor, inodoro e insípido. Após ser libertado para o compartimento em questão, o CO₂ rapidamente constitui uma mistura homogénea com o ar (Han, 2012).

De salientar que os 3 ensaios foram realizados com as portas devidamente fechadas, de forma a não permitir fugas de ar por este meio, e sem ocupação humana no interior da câmara, de modo a não ocorrer produção extra de dióxido de carbono, o que prejudicaria esta avaliação.

Através de algumas deduções da equação diferencial que relaciona a evolução temporal da concentração de um poluente num espaço interior (equação 6) determinou-se a equação 7 (Gonçalves, 2011):

$$\frac{dC}{dt} = \frac{G}{V} + \lambda \times C_{ext} - \lambda \times C(t) - v_d \times \frac{S_d}{V} - \frac{Q_{ac}}{V} \times C \times \varepsilon_{ac} \quad (6)$$

$$-\lambda \times t = \ln \left(\frac{C(t) - C_{ext}}{C_o - C_{ext}} \right) \quad (7)$$

Optou-se pela representação logarítmica da equação, visto que esta permite determinar a taxa de renovação de ar (λ) de forma mais simplificada relativamente à representação exponencial (uma alteração no declive de uma reta do tipo $y = ax + b$ é mais fácil de detetar que uma alteração no expoente de uma equação exponencial). As relações lineares, apresentadas na figura 33, são traduzidas numa equação do tipo $y = ax + b$, sendo a o valor dessa taxa. O caudal de ar novo (Q_{an}) é calculado através da expressão $Q_{an} = \lambda \times V$, sendo V o volume do compartimento onde o teste é efetuado – neste caso, a sala de testes da CC. Esta sala, como referido anteriormente, tem uma área de pavimento de 4,8x4,8 m² e um teto móvel que permite variar o seu pé direito desde os 2,1 até aos 4,4 m. No entanto, é importante frisar que as medições foram efetuadas com um pé direito de 3 m sendo, portanto, o volume da divisão igual a 69,12 m³.

Os valores instantâneos das concentrações de dióxido de carbono presentes no interior da sala ($C(t)$) foram retirados através do *software*, pelo sensor de CO₂, e posteriormente tratados e analisados recorrendo às funcionalidades do *Microsoft Excel*.

- 1º Ensaio - Sem ventilação (CC sem qualquer GTA ativo):

Procedeu-se à libertação de CO₂ no interior da CC, deixando-se elevar a sua concentração até um máximo preestabelecido (≈ 4100 ppm) e, posteriormente, fechou-se a porta da sala até se verificar que, pela leitura dos dados do sensor, esta concentração atingiu valores estáveis e semelhantes à concentração medida no exterior pelo WolfSense (C_{ext}) – 532 ppm.

- 2º Ensaio – Com recirculação de ar (GTAs I e II em funcionamento):

Para este ensaio foram ativadas as resistências de aquecimento e os ventiladores dos GTAs I e II. Definiu-se um *setpoint* de controlo de 25 °C, homogeneizou-se a sala de testes,

recorrendo aos ventiladores presentes no seu interior, e deixou-se libertar CO_2 até ser atingido um máximo preestabelecido de ≈ 3000 ppm (C_0). No decorrer do teste o aparelho portátil medidor das concentrações do gás no exterior da câmara permaneceu ligado, visto que ocorreu recirculação de ar pelas condutas exteriores ao compartimento em estudo. Alcançada a concentração inicial do gás traçador para este teste, fechou-se a válvula da botija e deixou-se decair a sua concentração.

- 3º Ensaio – Com entrada de ar novo (GTA III em funcionamento):

Por último, realizou-se o ensaio com o sistema AVAC em completo funcionamento. O GTA III foi ativado e foram definidos, no *software* LabVIEW, os *setpoints* de controlo de 25 °C e 60% de humidade relativa. Pelo mesmo método adotado nos outros testes, elevou-se a concentração deste gás traçador até um máximo de aproximadamente 3400 ppm (C_0) e deixou-se decair essa mesma concentração. Tal como no 2º ensaio, foram registados e tratados os *outputs* do aparelho colocado no exterior da câmara visto que, para além de haver recirculação de ar pelas condutas, existe introdução de ar novo (exterior) no sistema de climatização aquando da necessidade de desumidificação do compartimento.

No segmento da realização dos 3 ensaios referidos, e após extração e tratamento dos resultados, é possível constatar graficamente, através da figura 34, o decaimento temporal da concentração de CO_2 em cada um dos ensaios.

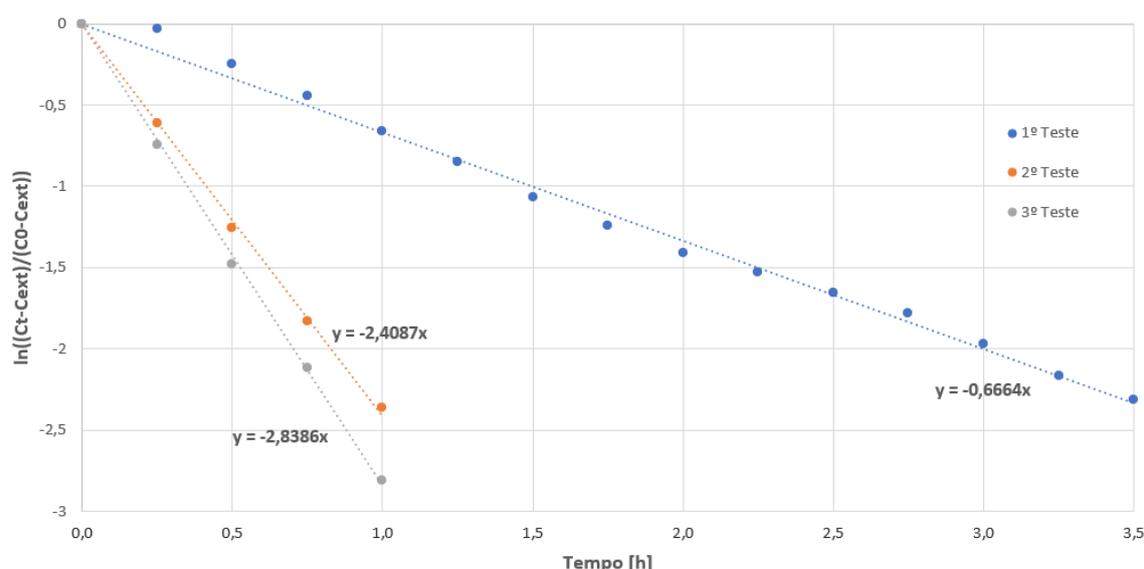


Figura 34 - Decaimento temporal da concentração de CO_2 e respetiva taxa de renovação de ar nos 3 ensaios realizados.

Da análise da equação da linha de tendência linear referente ao 1º teste realizado, determinou-se uma taxa de renovação de ar igual a $0,6664 \text{ h}^{-1}$, valor este que aparenta ser relativamente elevado para uma divisão sem infiltrações evidentes e tendo o ensaio sido efetuado sem qualquer GTA ativo e a sala ter estado sempre fechada, isto é, sem abertura de portas durante a medição. Nestas condições, $Q_{an} = 46,06 \text{ m}^3/\text{h}$.

No 2º teste, obteve-se uma taxa de renovação de ar superior à obtida no 1º ensaio dada a recirculação do ar, gerada através das condutas do sistema de climatização deste projeto (ventilação forçada). Deste modo, este valor mais elevado pode ser indicativo de certas frinchas ou outras aberturas informais no trajeto desde a sala de testes até aos GTAs que, por força das diferenças de pressão entre o exterior e o interior desta instalação, permitem a natural penetração do ar exterior. Foi obtida uma taxa de renovação de ar de $2,4087 \text{ h}^{-1}$, o que perfaz um Q_{an} igual a $166,49 \text{ m}^3/\text{h}$.

Dada a insuflação de ar vindo do exterior pelo desumidificador do GTA III, registou-se, no 3º ensaio, o maior valor de taxa de renovação de ar dentre os 3. A linha de tendência linear associada permite determinar o valor de $\lambda = 2,8386 \text{ h}^{-1}$. Este valor significa que, por hora, o volume de ar presente no interior da câmara ($69,12 \text{ m}^3$) foi totalmente renovado cerca de 3 vezes. O caudal de ar novo introduzido, nestas condições, foi de $196,20 \text{ m}^3/\text{h}$.

A taxa de renovação de ar proveniente do GTA III tomará o mesmo valor que a taxa de renovação de ar determinada no último ensaio. Ao ser introduzido ar novo no sistema de climatização da CC, esta ficará em sobrepressão relativamente à nave do LAI (visto que não existe qualquer sistema de extração de ar implementado). Assim, por força da maior pressão existente nesta instalação, assume-se que apenas ocorrerá exfiltração de ar pelas frinchas ou por outro tipo de abertura informal. Deste modo, toda a renovação de ar está associada à introdução de ar novo, sendo possível concluir sobre a sua taxa de fornecimento ($2,8386 \text{ h}^{-1}$).

Em suma:

Tabela 1 - Taxas de renovação de ar e respetivos caudais de ar novo para cada um dos ensaios.

Ensaio	Taxa de renovação de ar - λ [h ⁻¹]	Caudal de ar novo - Q_{an} [m ³ /h]
1 (sem ventilação)	0,6664	46,06
2 (só recirculação de ar)	2,4087	166,49
3 (com ar novo)	2,8386	196,20

Desta análise foi possível constatar que o GTA III apenas impõe cerca de mais 0,4 renovações de ar por hora em relação ao ensaio só com recirculação de ar, diferença esta muito residual.

4.7. CONTROLO PELA HUMIDADE ESPECÍFICA

As perdas de calor latente pela pele (E_{sk}) – isto é, a evaporação do suor produzido pelo indivíduo (E_{rsw}) e a evaporação da água transferida por difusão pela pele (E_{dif}) (equação 8) – dependem da diferença entre a pressão de vapor de água à superfície da pele do corpo humano e a do meio que o rodeia. É possível afirmar que estes mecanismos de transferência de calor ocorrem quando existe uma maior pressão de vapor de água à superfície da pele (p_{sk}) comparativamente à pressão de vapor de água existente no ambiente (p_v) (Parsons, 2010). A veracidade desta afirmação é constatada pelo termo $(p_{sk} - p_v)$ presente no numerador da equação representativa das perdas evaporativas de calor pela pele (E_{sk}) [equação 9 (ASHRAE, 2017)].

$$E_{sk} = E_{rsw} + E_{dif} \quad (8)$$

$$E_{sk} = \frac{w \times (p_{sk} - p_v)}{R_{e,cl} + \frac{1}{f_{cl} \times h_e}} \quad (9)$$

Por outras palavras, quando a pressão de vapor de água no ar se aproxima à pressão de vapor de água existente ao nível da pele, a taxa de evaporação diminui e, por sua vez, menos eficiente se torna o processo de termorregulação do corpo humano. Assim, é possível afirmar que o conteúdo de humidade é um fator determinante no rendimento de um atleta (Vihma, 2010).

Cumpra referir que a humidade relativa⁹ [ϕ], habitualmente apresentada em forma de percentagem [%], define a relação entre a quantidade de vapor de água existente numa determinada amostra de ar e a quantidade máxima de vapor de água que essa mesma amostra pode conter a uma dada temperatura e pressão (ponto de saturação). Ou seja, é a razão entre a pressão de vapor de água existente num dado volume de ar (p_v) e a pressão de vapor de água no estado de saturação à mesma temperatura e pressão (p_{vs}) (cf. equação 10).

$$\phi = \frac{p_v}{p_{vs}} \quad (10)$$

Assim sendo, a humidade relativa é uma grandeza dependente de um valor específico de temperatura, por influenciar p_{vs} (cf. equação 19). Deste modo, e aliado às perdas de calor pelo corpo dos atletas em exercício físico (subcapítulo 2.2.), sabendo que durante os treinos de aclimação existe a necessidade de circulação de pessoas entre a sala de controlo e a sala de testes, ou seja, ocorre a abertura e fecho da porta de separação destas duas divisões, é inevitável alguma perturbação no valor da temperatura dentro da câmara. Isto é, um valor de humidade relativa elevado pode significar um aumento no conteúdo de humidade dentro da sala de testes – designadamente no que concerne à pressão de vapor –, como pode também significar uma diminuição da temperatura do ar, sem que se verifique alteração do conteúdo de humidade no ar.

Por isso, numa lógica de impor condições higrotérmicas estáveis, que tenham também como consequência uma estabilidade nas trocas de calor latente entre o corpo humano e o ambiente, torna-se interessante fazer o controlo da humidade do ar através de uma grandeza que caracterize o conteúdo de humidade no ar atmosférico.

A humidade absoluta (ou específica) [ω] é uma grandeza higrométrica definida como a razão entre a massa de vapor de água (m_v) e a massa de ar seco (m_a) de uma determinada amostra de ar (cf. equação 11). Por outras palavras, representa a quantidade de vapor de água

⁹ Grandeza utilizada como controladora dos níveis de humidade no interior da CC.

existente numa certa amostra de ar. Normalmente, é expressa em gramas de vapor de água por quilograma de ar seco [g/kg_{as}] e não é afetada por alterações de pressão ou temperatura – ao contrário da humidade relativa. Por outro lado, relaciona-se diretamente com pressão de vapor de água (p_v) [equação 17 – obtida a partir da equação 11, através de conjugações das equações 12, 13, 14, 15 e 16 – (ASHRAE, 2001)]. Diante do que foi exposto, foi possível concluir que a humidade absoluta é a grandeza mais usada e que permite uma melhor perceção do conteúdo de humidade do ar.

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} \quad (11) \qquad m_v = x_v \times M_v \quad (12)^{10}$$

$$m_a = x_a \times M_a \quad (13)^{11} \qquad x_v = \frac{p_v}{p} \quad (14)$$

$$x_a = \frac{p_a}{p} \quad (15) \qquad p = p_v + p_a \quad (16)$$

$$\omega = 0,621945 \times \left(\frac{p_v}{p - p_v} \right) \quad (17)$$

4.7.1. METODOLOGIA DE MUDANÇA DE CONTROLADOR

Não sendo a humidade absoluta uma grandeza mensurável, houve a necessidade de recorrer a relações capazes de converter ϕ (lida pelo sensor de temperatura e humidade da CC) em ω , conforme representado na equação 18.

$$\omega = 0,621945 \times \left(\frac{\phi \times p_{vs}(T)}{p - \phi \times p_{vs}(T)} \right) \quad (18)^{12-13}$$

Ainda no que diz respeito à mesma equação, a pressão de vapor saturado [$p_{vs}(T)$] foi determinada através de uma expressão desenvolvida por Hyland e Wexler (1983b) [equação 19 (ASHRAE, 2001)]. A fórmula, seguidamente apresentada, é válida para uma gama de

¹⁰ $M_v = 18,015268 \text{ Kg/mol}$

¹¹ $M_a = 28,966 \text{ Kg/mol}$

¹² Note que a equação 18 resulta da combinação entre a equação 10 e 17.

¹³ A pressão atmosférica (p) toma o valor lido pelo barómetro instalado na CC (ponto 3.2.1.4.)

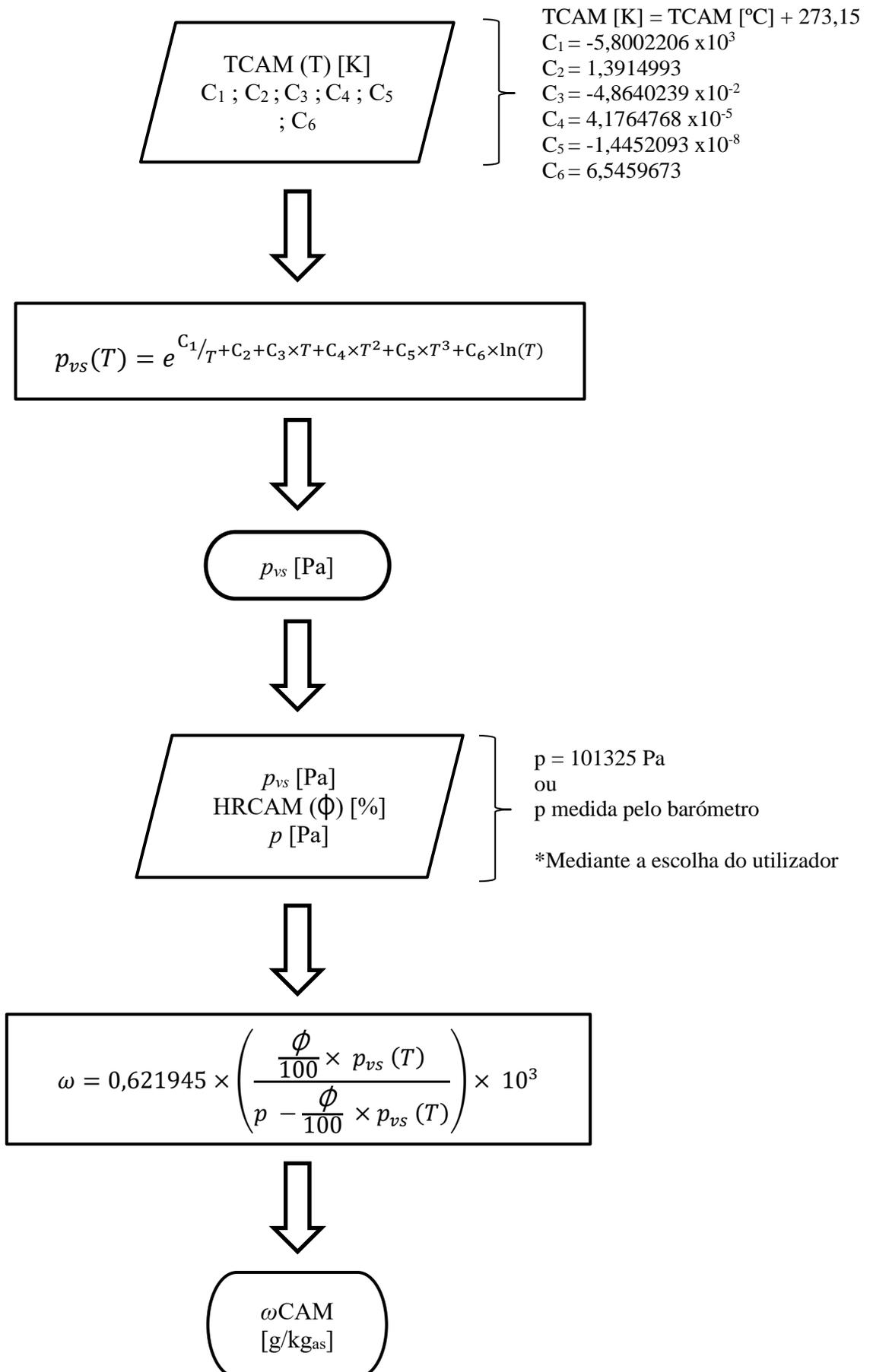
temperaturas de 0 a 200 °C, sendo o indicado para o projeto em questão (já que o sistema AVAC instalado permite temperaturas interiores dos 5 a 45 °C).

$$p_{vs}(T) = e^{C_1/T + C_2 + C_3 \times T + C_4 \times T^2 + C_5 \times T^3 + C_6 \times \ln(T)} \quad (19)$$

Sendo:

- $C_1 = -5,8002206 \times 10^3$
- $C_2 = 1,3914993$
- $C_3 = -4,8640239 \times 10^{-2}$
- $C_4 = 4,1764768 \times 10^{-5}$
- $C_5 = -1,4452093 \times 10^{-8}$
- $C_6 = 6,5459673$

No LabVIEW, as equações 18 e 19 foram introduzidas segundo o raciocínio do fluxograma abaixo apresentado.



Foi feita a consequente alteração no controlo da ordem de humidificação e desumidificação pela humidade absoluta. Caso o *setpoint* da ω_{CAM} seja superior à ω_{CAM} , esta necessita de ser humidificada. Caso contrário, existe a necessidade de a desumidificar.

Contudo, considerou-se importante deixar ao utilizador a opção de escolher o tipo de controlo que, de certa forma, considera mais viável. Assim, introduziu-se uma *ComboBox* intitulada de “CONTROLO” com as opções “Humidade Relativa”, caso pretenda o controlo pela humidade relativa, e “Humidade Absoluta”, caso pretenda o controlo pela humidade absoluta.

4.7.2. IMPLEMENTAÇÃO DE UM LIMITADOR NA HUMIDADE RELATIVA

Através do controlo pela humidade absoluta, a CC pode, em certos conjuntos de pontos (T , ω) até alcançados os *setpoints* predefinidos, atingir valores de humidade relativa bastante elevados, ou mesmo a saturação. Ora vejamos, num ensaio efetuado pelo autor ao novo controlador, ao ser definido um *setpoint* de 25,1 g/kg_{as} e 34 °C (o correspondente a uma humidade relativa de 75%), verificou-se que até atingir esse valor, como o processo de humidificação é manifestamente mais rápido que o de aquecimento, a câmara chegou a apresentar humidades relativas muito próximas de 90% (no controlo pela humidade relativa, no momento em que o *setpoint* é atingido, automaticamente é iniciado o processo de desumidificação). Assim, de modo a evitar possíveis condensações nas condutas de ar e no pavimento da CC, limitou-se, através do *software* de controlo LabVIEW, a humidade relativa a um máximo de 90%.

4.8. OUTROS TRABALHOS REALIZADOS

Durante esta dissertação foram ainda realizados alguns trabalhos relacionados com melhorias tanto no sistema AVAC como no sistema de controlo que envolve este projeto. Deste modo, salienta-se:

- Aplicação de uma nova sonda no difusor de ar (uma sonda PT100);
- Substituição do conversor de sinal associado ao difusor de ar, devida a deteção de uma anomalia no equipamento anteriormente implementado;
- Limpeza do humidificador, devida a entrada em curto-circuito do equipamento;

- Melhorias no *software* de controlo – nomeadamente a adição de indicadores de percentagens de aquecimento, arrefecimento, humidificação e desumidificação, redução dos tempos de aquisição de sinal e melhorias na *interface* do programa (cf. Anexo C).

5. CONCLUSÕES

Diante do que foi exposto, o autor considera que a proposta de aperfeiçoamento do sistema de climatização da CC do LAI foi realizada com sucesso. Neste momento, pode-se afirmar que a CC sofreu alterações vantajosas e enriquecedoras tanto ao nível do *software* de controlo e do sistema AVAC, como também dos demais componentes presentes no seu interior. Salienta-se ainda que foi prestado o auxílio necessário aos treinos de aclimação a atletas de alta competição realizados durante a elaboração desta dissertação, nesta mesma câmara, com vista à preparação dos Jogos Olímpicos de Tóquio.

Os treinos de adaptação do organismo a ambientes termicamente exigentes é uma técnica cada vez mais integrada nos planos de treino de um atleta de alta competição, pois, de facto, a aclimação tem-se tornado num processo importante e decisivo na busca da desejada medalha. Atualmente, é possível constatar que para um atleta subir ao pódio não basta apenas ser mais dotado tecnicamente que os seus adversários, é exigido aliar essa mais-valia a uma boa condição física. Como relatado ao longo desta dissertação, o calor e humidade extremos são dois fatores prejudiciais à saúde e à *performance* de um desportista.

Relativamente ao trabalho executado, foi adicionado um novo controlo sob a humidade (neste momento, consoante a preferência do utilizador do programa de controlo, os níveis de humidade podem ser controlados tanto por valores de humidade relativa como por valores de humidade absoluta), foram adquiridos e instalados um barómetro e um aparelho purificador e descontaminador do ar no interior da sala de testes e foi concluída instalação do sensor de CO₂. Dada a instabilidade nos valores lidos pelo sensor de temperatura e humidade e pelo sensor de CO₂, alterou-se as suas localizações para o centro da sala de testes e verificou-se uma maior uniformidade dos respetivos *outputs*. Foram feitas melhorias no programa de controlo, mais concretamente no que diz respeito à adição de novos indicadores, à correção de gráficos, à redução dos tempos de aquisição de sinal, etc. Procedeu-se à calibração dos vários sensores da CC e, posteriormente, à respetiva retificação dos seus fatores de calibração. Atualizou-se o *software* do sistema de controlo e o *hardware* deste projeto com a aquisição de um mini PC e monitor, o que veio, de certo modo, modernizar a sala de controlo, tornando-a também esteticamente mais apelativa. Por último, fez-se um estudo da estanqueidade da CC.

Com a introdução do controlo pela humidade absoluta na CC, é necessário que exista um conhecimento sobre as gamas de valores de ω (em g/kg_{as}) a introduzir no *software*. O

utilizador pode recorrer ao diagrama psicrométrico de forma a determinar, para as condições que deseja, o valor de humidade absoluta a introduzir no programa de controlo.

Do estudo da estanqueidade da CC pelo decaimento da concentração de CO₂ no seu interior, determinaram-se valores elevados de taxas de renovação de ar em diferentes condições, o que permite ao autor concluir que existem nesta instalação infiltrações prejudiciais ao bom funcionamento deste projeto. Para o futuro, é recomendada a análise desses pontos de fugas de ar e que se proceda ao respetivo isolamento, tanto no interior da sala de testes como nas condutas de ar do sistema AVAC, de modo a serem minimizadas as perdas ou os ganhos térmicos e eliminadas as entradas de ar não tratado. Foi também determinada a taxa de renovação de ar pelo GTA III, tendo-se chegado ao valor de 2,8386 h⁻¹.

Terminada a prestação nos Jogos Olímpicos de Tóquio, o autor constatou que os atletas treinados na CC reconheceram a mais-valia dos treinos de aclimação realizados. No entanto, relataram que as componentes da radiação solar direta e refletida pelo pavimento tiveram um grande impacto nas suas *performances*. De facto, esta não é uma condição estudada e aplicada na CC sendo, do ponto de vista do autor, um fator a introduzir no futuro deste projeto.

Durante a realização desta dissertação, o autor anotou algumas sugestões de melhoria para o projeto em causa, designadamente: (i) sugere-se a manufatura ou aquisição de um suporte para os módulos de aquisição e envio de sinal, de modo a prevenir possíveis quedas destes dispositivos, maus contatos e, obviamente, para melhorar esteticamente o projeto; (ii) é importante proceder à organização do quadro elétrico inserido dentro da sala de controlo, a fim de facilitar qualquer alteração/manutenção nos conversores de sinal associados aos diferentes sensores, ou mesmo com o intuito de criar espaço para introduzir outro(s) aparelho(s); (iii) propõe-se dar sequência ao estudo dos controladores de configuração automática disponíveis no *software* LabVIEW (PID *Autotuning*) e à lógica *Fuzzy*¹⁴; (iv) sugere-se uma investigação sobre as diversas câmaras climáticas espalhadas pelo mundo (no que diz respeito aos tipos de trabalhos que executam, que ferramentas utilizam, etc.), de modo a integrar novos conteúdos, tentando rentabilizar ao máximo a CC do LAI; (v) adicionar indicadores de temperatura, humidade relativa e pressão exteriores à câmara,

¹⁴ Trabalho iniciado pelos meus colegas António Pires (Pires, 2020) e Filipe Dionísio (Dionísio, 2021).

informações estas que poderão vir a ser importantes na realização de novos testes; (vi) implementar um sistema remoto que possibilite o controlo à distância da CC.

Deixa-se a ressalva de que as bombas circuladoras do circuito da água fria da CC foram substituídas, ficando o sistema de arrefecimento deste projeto em completo funcionamento. Desta forma, a eficiência do sistema de climatização certamente será aumentada com a redução de *overshootings*, *deadtimes* e tempos de resposta, e, conseqüentemente, haverá uma melhoria na rapidez do estabelecimento das condições térmicas desejadas. Com este avanço, poder-se-á pensar em introduzir ambientes térmicos frios na CC, tendo em vista, porventura, a realização de treinos de aclimatação nessas condições.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

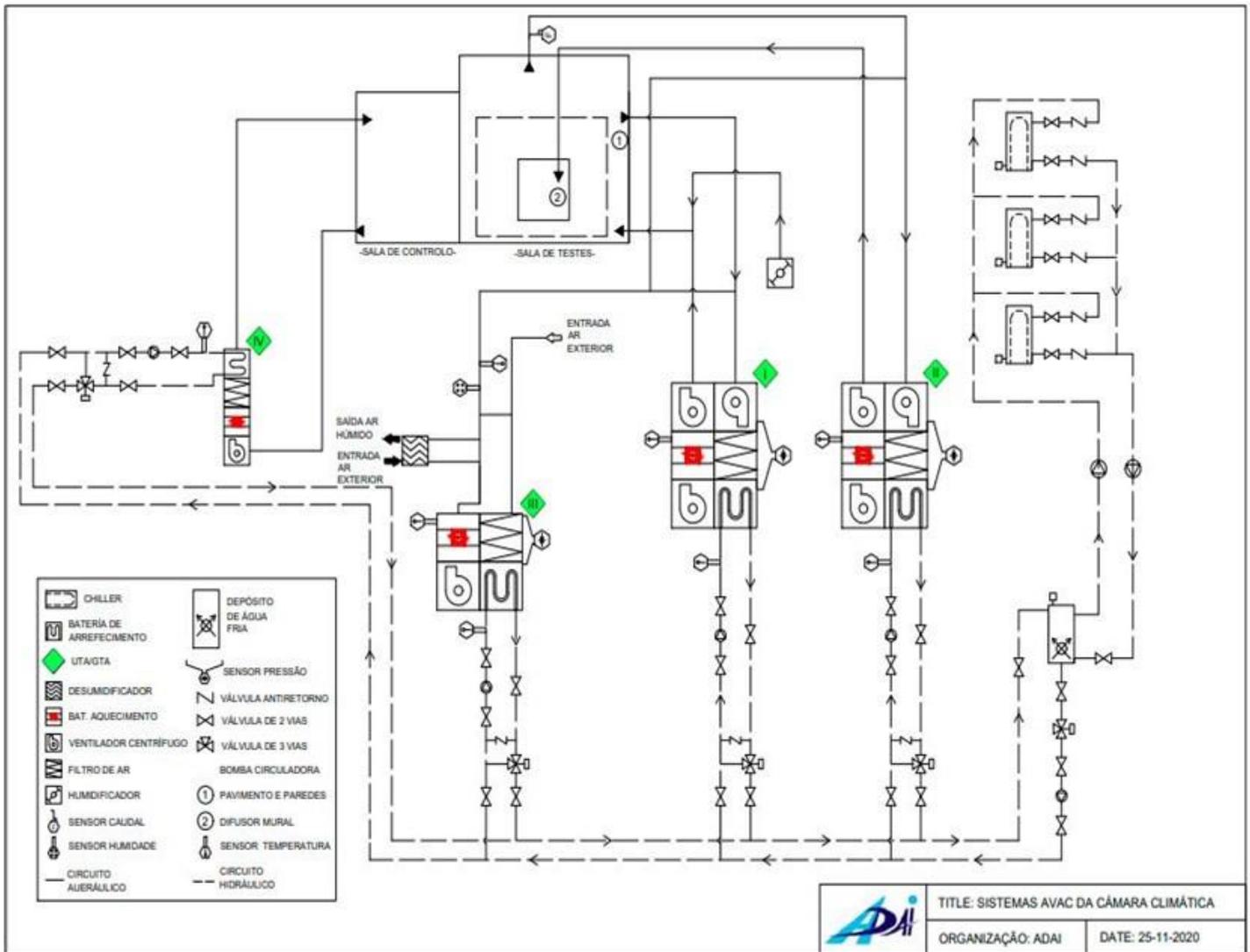
- ABREU, C. (2010). O Ambiente Interior e a Saúde dos Ocupantes de Edifícios de Habitação. *Capítulo 5 - Ensaio, Métodos de Avaliação e Monitorização Da Qualidade Do Ar Interior*, 105–132.
- ASHRAE. (2001). Psychrometrics. *ASHRAE Handbook - Fundamentals*.
- ASHRAE. (2017). Chapter 9: Thermal Comfort. In *ASHRAE Handbook Online - Fundamentals* (pp. 1–58).
- BRODERSEN. (n.d.-a). *Process Signal Converter PXU-20*. 10–11.
- BRODERSEN. (n.d.-b). *Temperature Converter PXT-10*. 10–11.
- CAMPOS, A. L. (2021). A Ciência dos Campeões. *National Geographic*.
<https://nationalgeographic.pt/ciencia/grandes-reportagens/2718-a-ciencia-dos-campeoes>
- DIONÍSIO, F. M. R. (2021). *Desenvolvimento e Teste de Modelos de Controlo do Sistema de Climatização de uma Câmara Climática*. Universidade de Coimbra.
- ELEKTRONIK, E. (2018). *CO2 Sensor for Demanding Applications*.
- GONÇALVES, A. P. M. (2011). *Aplicação do Método dos Gases Traçadores para avaliar a taxa de renovação do ar em Bibliotecas do Pólo II*. Universidade de Coimbra.
- GUYTON, A. C. (1977). *Tratado de Fisiologia Médica* (Interamericana (ed.); 5ª).
- HAN, H. (2012). Ventilation Effectiveness Measurements Using Tracer Gas Technique. *Fluid Dynamics, Computational Modeling and Applications*.
<https://doi.org/10.5772/26294>
- INSTRUMENTS, N. (n.d.). *LabVIEW Environment Basics - National Instruments*. Retrieved October 31, 2021, from <https://www.ni.com/getting-started/labview-basics/environment>
- LUSA, A. (2021). Investigadores da UC ajudam atletas a superar o “stress” térmico nos Jogos Olímpicos. *Diário As Beiras*. <https://www.asbeiras.pt/2021/06/investigadores-da-uc-ajudam-atletas-a-superar-o-stress-termico-nos-jogos-olimpicos/>
- MADREMEDIA, & LUSA, A. (2019). *A preparação em câmara térmica foi fundamental para o marchador João Vieira conquistar a prata no Mundial de Atletismo. E ele não está sozinho*. Sapo. <https://24.sapo.pt/desporto/artigos/preparacao-em-camara-termica-foi-fundamental-para-o-marchador-joao-vieira-conquistar-a-prata-no-mundial-de>

atletismo

- MATOS, R. (2021). Adiada leitura do acórdão no caso da morte de recrutas dos Comandos. *Jornal de Notícias*. <https://www.jn.pt/justica/adiada-leitura-do-acordao-no-caso-da-morte-de-recrutas-dos-comandos-14093646.html>
- MUNTERS. (2016). *Original instructions User manual Desiccant dehumidifier*.
- OMEGA. (2009). *PX2780 SERIES*. 1–8.
- PARSONS, K. C. (2010). Human thermal environments. In *Human Thermal Environments*. https://doi.org/10.4324/9780203302620_chapter_1
- PELLY, H. (2018). *Fit for purpose – how best to keep cool in exercise spaces – CIBSE Journal*. CIBSE Journal. <https://www.cibsejournal.com/technical/fit-for-purpose-cooling-gym-facilities/>
- PIRES, A. F. V. D. (2020). *Estudo de Modelos de Controlo de uma Câmara Climática*. Universidade de Coimbra.
- REIS, J. (2019). A competir para Tóquio. *Observador*. <https://observador.pt/opiniao/a-aquecer-para-toquio/>
- VAISALA. (2009). *HMW60/70 Humidity and Temperature Transmitters for wall mounting in HVAC applications*. www.vaisala.com
- VIHMA, T. (2010). Effects of weather on the performance of marathon runners. *International Journal of Biometeorology*, 54(3), 297–306. <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0280-x>
- WATTS, J. (2021). *Olympic athletes and volunteers in Tokyo ‘tortured’ by hottest Games ever | Tokyo Olympic Games 2020 | The Guardian*. The Guardian. <https://www.theguardian.com/environment/2021/aug/05/olympic-athletes-and-volunteers-in-tokyo-tortured-by-heat>

ANEXO A

ESQUEMA DE PRINCÍPIO DO SISTEMA AVAC



ANEXO B

¹⁵ MÓDULO MCC USB-1608GX

SINAIS DE ENTRADA

	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		
CÂMARA	Pressão do ar interior da Câmara	PCAM	Azul	A10	13	CH5L

¹⁵ Lista atualizada

ANEXO C

