



MODERNIZAÇÃO E APERFEIÇOAMENTO DO SISTEMA DE CONTROLO DA CÂMARA CLIMÁTICA

Fernando Manuel Pinto Aires

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Júri

Presidente: Professor Doutor Pedro de Figueiredo Vieira Carvalheira

Orientadores: Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar

Professor Doutor Divo Augusto Alegria Quintela

Vogal: Professor Doutor Humberto Manuel Matos Jorge

Setembro de 2008

Ao meu avô, Augusto Pinto de Magalhães

“No esforço para compreender a realidade, somos como um homem a tentar entender o mecanismo de um relógio fechado. Ele vê o mostrador e os ponteiros, ouve o seu tiquetaque mas não tem meios para abrir a caixa. Se esse homem for habilidoso, poderá imaginar um mecanismo responsável pelos factos que observa, mas nunca poderá ficar completamente seguro de que sua hipótese seja a única possível”.

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

A elaboração de um trabalho desta natureza deve-se sempre a um conjunto de pessoas que, directa ou indirectamente, colaboraram com o autor, fazendo-lhe chegar a informação, experiência, incentivo e motivação para que se consiga o fim pretendido.

Ressalto os Professores Adélio Gaspar e Divo Quintela, pela sua dedicação, total disponibilidade e simpatia com que sempre me receberam, pelas suas sugestões sempre pertinentes, pelos seus ensinamentos e pelo seu apoio neste projecto. O meu obrigado a eles.

Agradeço também ao meu colega de câmara Vasco Branco, que me alertou para as dificuldades que se avizinhavam e aos meus grandes amigos Eng. Maciel Gonçalves e Eng. Sérgio Gamboa, que sempre se prontificaram para me ajudar.

Não poderia deixar de salientar o auxílio do meu colega Ricardo Heleno, que esteve presente nesta última etapa (de concretização do programa), dando todo o apoio possível, tanto moral, como técnico. Um muito obrigado por todo o tempo que despendeu comigo, em busca das melhores soluções.

Por último, *last but not the least*, quero agradecer à minha Família, amigos e à Ana pela presença, estímulo, apoio e paciência que tão fulcrais foram para terminar este ciclo.

O conforto térmico é, hoje, uma das principais necessidades humanas, daí a proliferação de estudos acerca de diferentes ambientes térmicos e a avaliação dos seus efeitos sobre o Homem.

Com o intuito de proceder a investigações nesse âmbito, foi criada, na década de 90, uma câmara climática, localizada na nave principal do Laboratório de Aerodinâmica Industrial (LAI) da Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial (ADAI), que, desde a sua colocação em funcionamento, tem sido de uma importância fundamental no estudo de ambientes térmicos interiores em diversificadas condições e para o ensaio de desempenho de sistemas de climatização.

A manipulação dos parâmetros fundamentais do ar húmido, tão importantes para o conforto/desconforto humanos, pode ser conseguida no interior dessa câmara, graças às características que os 4 Grupos de Tratamento de Ar (GTAs) presentes na mesma, possuem.

O ambiente térmico que se pretende criar no interior da câmara era controlado por um programa compilado em GENESIS Control Series, mas dado o seu estado de desactualização, foi proposto o seu melhoramento e modernização, cujo algoritmo de funcionamento teria de ser desenvolvido com um software contemporâneo que, no caso, se trata do LabVIEW.

O novo programa possibilita o controlo da temperatura tendo por base combinações entre diferentes modos de controlo, sendo eles o controlo proporcional (P) e o controlo proporcional-integrativo-derivativo (PID), beneficiando, ainda, de diversas melhorias, entre as quais o novo interface e a possibilidade de se fazer o controlo da câmara em função da variação da temperatura no tempo ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$).

Para implementar o controlo por taxas de aquecimento/arrefecimento, foram efectuados alguns ensaios na câmara climática, em situações específicas, daí resultando os valores máximos de variação da temperatura que podem ser introduzidos pelo utilizador nesses casos particulares.

Além disso, tiveram de se considerar e testar algumas hipóteses de métodos de monitorização da variação da temperatura, a fim de se escolher qual deles o mais adequado para comparar com o Setpoint.

Palavras-chave: ambiente térmico, temperatura, humidade, controladores, LabVIEW, câmara climática.

ABSTRACT

Thermal comfort is, nowadays, one of the major human needs, hence the proliferation of studies about different thermal environments and the evaluation of their effects on man.

In order to carry out investigations in this framework, it was created, in the 90's, a climatic chamber, located in the main nave of the Laboratory of Industrial Aerodynamics (LIA) of the Association for the Development of Industrial Aerodynamics (ADIA), that, since it began working, has been of fundamental importance in the study of internal thermal environments in diverse conditions and for the test performance of air conditioning.

The manipulation of the basic parameters of wet air, so important for the human comfort / discomfort, can be achieved within the chamber, thanks to the characteristics that the 4 Air Treatment Groups (ATGs), in it, have.

The thermal environment that is intended to be created within the chamber, was controlled by a program built with GENESIS Control Series, but as it is outdated, it has been proposed its improvement and modernization, which operating algorithm would have to be developed with a current software, that, in the case, is the LabVIEW.

The new program allows the monitoring of temperature based on combinations between different controllers, the proportional control (P) and the proportional-integrative-derivative control (PID), benefiting, also, of various improvements, including the new interface and the possibility of getting the control of the chamber according to the variation in temperature over time ($^{\circ}\text{C} / \text{min}$).

To implement the control by rates of heating / cooling, some tests were conducted in the climate chamber, in specific situations, there resulting the maximum variation in temperature that can be entered by the user, in those particular cases.

Moreover, it had to be considered and tested some hypotheses of monitoring methods of the temperature variation, to choose which of them is the most appropriate to compare with the Setpoint.

Keywords: thermal comfort, temperature, humidity, controllers, LabVIEW, climatic chamber.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
ÍNDICE	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE GRÁFICOS	xi
NOMENCLATURA	xii
CAPÍTULO UM	1
Introdução	1
<i>1.1.Generalidades</i>	1
<i>1.2.Objectivos</i>	2
CAPÍTULO DOIS	3
Parâmetros Fundamentais do Ar Húmido	3
<i>2.1. Introdução</i>	3
<i>2.1.1. Temperatura</i>	3
<i>2.1.2. Humidade</i>	5
<i>2.2. Caracterização do estado higrométrico do ar</i>	6
<i>2.2.1. Grandezas Higrométricas</i>	7
<i>2.2.2- Expressões do ar húmido</i>	8
<i>2.2.3 Relação entre Humidade Absoluta e Relativa</i>	10
CAPÍTULO TRÊS	12
Caracterização da Câmara Climática	12
<i>3.1. Introdução</i>	12
<i>3.2. Descrição dos grupos de tratamento de ar (GTA):</i>	13
<i>3.2.1. GTA I e GTA II</i>	13
<i>3.2.2. GTA III</i>	14
<i>3.2.3. GTA IV</i>	14
<i>3.3. Equipamentos de tratamento de ar</i>	14
<i>3.3.1. Unidades de Tratamento de Ar (UTA):</i>	14
<i>3.3.2. Humidificador</i>	16
<i>3.3.3. Desumidificador</i>	18
<i>3.4. Equipamentos de controlo da câmara</i>	19

3.4.1. Aquisição de sinal.....	20
3.4.2. Envio de sinal	21
CAPÍTULO QUATRO	22
Fundamentos de Controlo	22
4.1. Introdução	22
4.2. Modos de controlo isolados	23
4.2.1. Controlo proporcional (P).....	23
4.2.2 Controlo integral (I)	24
4.2.3. Controlo derivativo (D).....	24
4.3. Modos de controlo Combinados	25
4.3.1. Controlo proporcional-integral (PI)	25
4.3.2. Controlo proporcional-Derivativo (PD)	26
4.3.3. Controlo Proporcional-Integrativo-Derivativo (PID)	26
4.4-Controlo da Câmara.....	27
4.4.1-Controlo da Temperatura (GTA I e GTA II)	27
4.4.2. Controlo do humidificador	30
4.4.3. Controlo do desumidificador.....	31
CAPÍTULO CINCO	33
Modelo de Controlo Desenvolvido.....	33
5.1. Introdução	33
5.2. Etapas de Preparação do Software e Hardware	33
5.3. Estrutura do programa	35
5.4. Descrição das funcionalidades e procedimentos de utilização	
do programa desenvolvido.....	37
CAPÍTULO SEIS.....	39
Avaliação dos métodos de controlo.....	39
6.1. Introdução	39
6.2. Ensaio de Aquecimento	39
6.3. Ensaio de Arrefecimento	41
6.4. Métodos de monitorização e controlo da variação da temperatura.....	42
6.4.1. Primeiro Método.....	43
6.4.2. Segundo Método	43
6.4.3. Terceiro Método	44
6.4.4. Método escolhido.....	44

CONCLUSÃO	46
BIBLIOGRAFIA	48
ANEXOS	50
ANEXO I	51
ANEXO II	53
ANEXO III	55
ANEXO IV	59
ANEXO V	65

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO TRÊS

Figura 3.1. Esquema de circulação do ar desde os GTA até à câmara de teste.....	13
Figura 3.2. Esquema de disposição dos equipamentos do GTAI e GTAIL	15
Figura 3.3. Humidificador NOVAP série 3000.....	16
Figura 3.4. Esquema da formação de vapor de água no interior do cilindro.	17
Figura 3.5. Rede de aço inoxidável num cilindro com SC-System e num cilindro sem SC-System.....	18
Figura 3.6. Desumidificador MUNTERS ML420	18
Figura 3.7. Esquema de funcionamento do desumidificador MUNTERS DL420.....	19

CAPÍTULO QUATRO

Figura 4.1. Diagrama de blocos de um sistema de controlo (adaptado de Ogata (1993))	22
Figura 4.2. Diagrama de blocos de um controlador proporcional.....	23
Figura 4.3. Diagrama de blocos de um controlador integral.....	24
Figura 4.4. Diagrama de blocos de um controlador proporcional-integral	25
Figura 4.5. Diagrama de blocos de um controlador proporcional-derivativo	26
Figura 4.6. Diagrama de blocos de um controlador proporcional-integrativo-derivativo	27
Figura 4.7. Esquema de controlo da temperatura do GTA I e GTA II.....	29
Figura 4.8. Esquema de controlo do humidificador	30
Figura 4.9. Esquema de controlo do desumidificador.....	31

CAPÍTULO CINCO

Figura 5.1. Esquema de ligação entre placa, cabo e conector.....	34
Figura 5.2. Esquema de ligação tipo NRSE.....	34
Figura 5.3. a-Ferramenta que inicia os drivers, b-Valores pré definidos para um dos modos de controlo	35
Figura 5.4. DAQ ASSISTANT e filtros (da esquerda para a direita)	36
Figura 5.5. Estrutura responsável pela ordem de controlo dos GTAs I e II.....	36
Figura 5.6. Painel frontal do programa de controlo	37

ÍNDICE DE GRÁFICOS

CAPÍTULO DOIS

Gráfico 2.1. Estimação de agradabilidade (quadrados abertos), conforto (círculos abertos) e temperatura (círculos sólidos), por sujeitos jovens e em repouso, em função da temperatura do ar (adaptado de Landsberg, 1972).....	4
Gráfico 2.2. Zona óptima da humidade relativa para minimizar efeitos adversos à saúde humana (Arundel et al, 1986)	6

CAPÍTULO TRÊS

Gráfico 3.1. Relação entre a temperatura do ar e a capacidade de desumidificação (kg/h).....	19
--	----

CAPÍTULO SEIS

Gráfico 6.1. Comportamento característico de uma situação de aquecimento só com o GTA II ligado.....	40
Gráfico 6.2. Comportamento característico de uma situação de arrefecimento só com o GTA II ligado.....	41
Gráfico 6.3-Variação da temperatura utilizando diferentes métodos método numa situação de arrefecimento	44

NOMENCLATURA

<i>Símbolo</i>	<i>Significado</i>
μ	Grau de saturação
C_i	Constante do elemento i
$E(s)$	Erro do sistema pela função de transferência
$e(t)$	Erro do sistema
K_D	Constante de derivação
K_i	Constante de integração
K_p	Constante proporcional
m_a	Caudal mássico de ar seco
M_a	Massa molar de ar seco
m_v	Caudal mássico de vapor de água
M_v	Massa molar de vapor de água
N	Número total de moles numa mistura de ar
n_a	Moles de ar seco
n_i	Número de moles do componente i
n_v	Moles de vapor de água
p	Pressão
p_a	Pressão parcial de ar seco
p_v	Pressão parcial de vapor de água
p_{vs}	Pressão de vapor saturado
R	Constante de gases perfeitos
T	Temperatura
T	Tempo
T_d	Tempo de derivação
T_i	Tempo de integração
t_{po}	Temperatura de Orvalho
t_{ibh}	Temperatura termodinâmica de bolbo húmido
$U(s)$	Saída do controlador pela função de transferência
$u(t)$	Saída do controlador
v	Volume
V	Volt

W	Humidade absoluta
W_s	Humidade absoluta em estado de saturação
x_a	Fracção molar de ar seco
x_i	Fracção molar do componente i
x_v	Fracção molar de vapor de água contida no ar húmido
$x_{v,s}$	Fracção molar de vapor de água contida no ar húmido em estado de saturação
Φ	Humidade relativa

1.1. Generalidades

A qualidade dos edifícios e do conforto a eles associado tem aumentado ao longo dos tempos, particularmente nos últimos anos.

A aspiração das pessoas a melhores condições de salubridade, higiene e conforto nos edifícios em geral, e na sua própria habitação, em particular, tem feito com que, recentemente, tenha havido um aumento da procura de sistemas de climatização, que têm por objectivo promover condições térmicas e de qualidade do ar aceitáveis para o ser humano. Por outro lado, associado directamente ao bem-estar humano, está o vestuário que, quando relacionado com sistemas de climatização, permite inúmeras situações de conforto/desconforto, conforme a sensibilidade de cada um.

Assim, cria-se uma necessidade de tentar prever a resposta do indivíduo a diferentes ambientes térmicos. Tal origina investigações, onde se tentam interligar os diferentes factores que influenciam o conforto térmico.

Dada a carência de estudos sobre este tema, foi instalada uma câmara climática no Laboratório de Aerodinâmica Industrial (LAI), da Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial (ADAI), que, em conjunto com o manequim térmico “Maria”, têm como principal propósito o estudo de diferentes ambientes térmicos e a avaliação dos seus efeitos sobre o ser humano. Para tal, este equipamento dispõe de um sistema constituído por 4 grupos de tratamento de ar, que, funcionando em simultâneo, possibilitam a filtragem, o aquecimento / arrefecimento, a humedificação / desumidificação e controlo do caudal de ar, ou seja, permitem a execução de ensaios numa escala alargada de condições termo – higrométricas e de configuração de insuflação de ar, direccionados para a problemática do ambiente térmico interior.

Com a finalidade de se conseguirem executar algumas operações com isso relacionadas, foi criado um programa, nos anos 90, que permite controlar dois grupos de tratamento de ar (GTA I e GTA II) e em que o algoritmo de controlo usado foi implementado com o programa GENESIS Control Series (Gaspar, 2004).

Contudo, tem-se vindo a assistir a uma evolução tecnológica que deixou o sistema de controlo da câmara climática (componentes electrónicos e programa de controlo) desactualizado, visto que é incompatível com os sistemas operativos hoje existentes no

mercado. Neste contexto, surge o desafio de melhoramento e modernização do programa de controlo, usando, para tal, um algoritmo desenvolvido em LabVIEW, recorrendo a diferentes modos de controlo (proporcional, proporcional-integral-derivativo), com o intuito de controlar a temperatura e humidade do interior da sala de ensaios da câmara climática. Este “novo” programa abrange tanto o controlo de temperatura como o controlo da variação da temperatura.

1.2.Objectivos

Tendo em conta a desactualização já referida do programa de controlo da câmara climática, desenvolvido em GENESIS Control Series, pretende-se que o actual programa de controlo seja substituído por um em que o algoritmo seja desenvolvido em LabVIEW, constituindo isto o objectivo primordial a que se propõe o autor.

Este programa terá que permitir a monitorização dos parâmetros a impor na câmara e a actuação por parte do utilizador sobre 3 elementos dos 4 grupos de tratamento de ar (GTA). Os grupos GTA I, GTAIL e GTA III são os que vão sofrer a modernização, enquanto o GTA IV não será o mais relevante para este trabalho.

Além disso, foi sugerido que se desenvolvesse, no mesmo programa, um controlo da taxa de arrefecimento/aquecimento da câmara, tarefa a ser desenvolvida, unicamente, nos GTAs I e II.

Em paralelo, será feito um driver para as placas de envio de sinal, de modo a que este acessório seja reutilizado e aqui implementado. As placas de leitura de sinal serão, ainda, substituídas.

CAPÍTULO DOIS

Parâmetros Fundamentais do Ar Húmido

2.1. Introdução

De acordo com a norma ISO 7730 (1994), um ambiente é aceitável termicamente quando o mesmo apresenta combinações das variáveis físicas que o tornem desconfortável para o menor número de pessoas possível.

Entre as variáveis que influem no conforto térmico (temperatura do ar, humidade, velocidade do ar e temperatura média radiante), destacamos como principais, neste projecto, a temperatura e a humidade do ar, pois são os parâmetros a controlar pelo programa a implementar na câmara climática.

Ambos são fundamentais para avaliar situações de conforto/desconforto térmico, sofridas pelo ser humano, no interior de espaços fechados.

Assim, através do controlo das variáveis supra referidas, pretende-se criar uma atmosfera estável (com valores de temperatura e humidade constantes), de forma a conseguir ensaios, no seio da câmara, que produzam resultados fiáveis.

2.1.1. Temperatura

A temperatura do ar é, sem dúvida, a grandeza mais utilizada, pelo facto de ser uma das mais importantes nos processos que regem a transferência de calor entre dois corpos (Gaspar, 1996).

Este é o parâmetro mais importante no cálculo correcto da carga de arrefecimento de edifícios, no dimensionamento apropriado de sistemas AVAC, na integração de técnicas passivas e híbridas de arrefecimento e na selecção de componentes do edifício (Tselepidaki et Santamouris, 1991).

Convém perceber de que forma é que a temperatura afecta o conforto/desconforto de um sujeito, quando este é exposto a diferentes cargas térmicas, isto porque o programa a desenvolver e a implementar, servirá, essencialmente, para avaliar as reacções do sujeito, ou melhor, do seu corpo, quando a temperatura ambiente que o rodeia varia.

Relacionado com este aspecto, foi feito um ensaio, desenvolvido por Gagge et al. (1967), cujos resultados se traduzem no gráfico 2.1. e que se resumiu, nas palavras do autor, ao seguinte: “Temperature and sensory indicates of human response to the thermal

environment are often expressed in terms of the known response in a controlled laboratory environment, as a standard.” (Gagge, 1967)

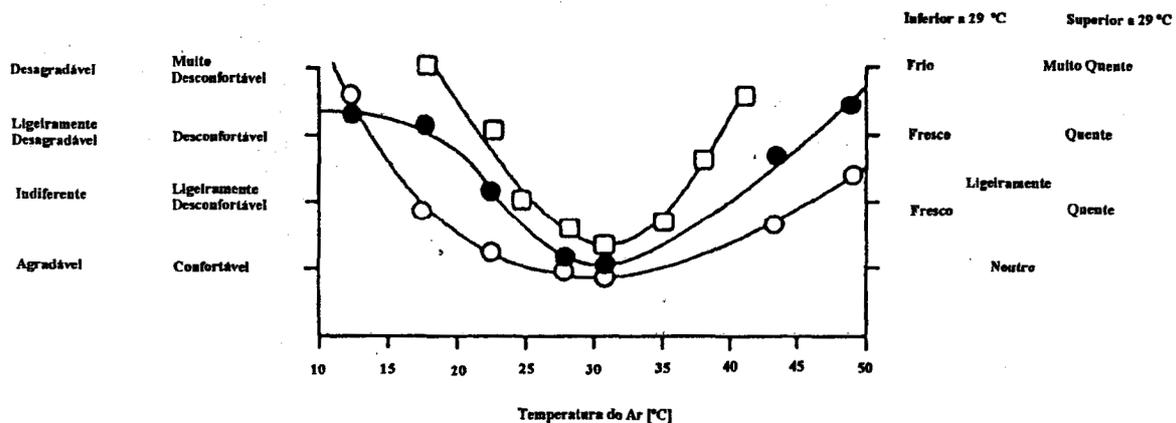


Gráfico 2.1. Estimação de agradabilidade (quadrados abertos), conforto (círculos abertos) e temperatura (círculos sólidos), por sujeitos jovens e em repouso, em função da temperatura do ar (adaptado de Landsberg, 1972)

Nesta “experiência”, depois de vários testes efectuados dentro de uma câmara climática, jovens saudáveis em repouso e com vestuário ligeiro, respondem a um questionário, donde se inferiu que a neutralidade térmica se verifica nas temperaturas entre 28°C e 30°C. A neutralidade térmica pode ser definida como “a situação onde uma pessoa não prefira nem mais calor nem mais frio no ambiente ao seu redor” (Fanger, 1970) ou “o estado da mente que expressa satisfação com a temperatura do corpo como um todo”(Tanabe, 1988). No ensaio referido, a situação analisada é correspondente ao Verão.

Para procedermos a uma efectiva e, sobretudo, análise concreta deste parâmetro, necessitamos de determinar os valores base, que diferem, claro está, com as diferentes estações do ano, vestuário, estado de repouso/actividade.

Os valores habitualmente usados situam-se entre 25°C e 28°C, como valores limites de temperatura no Verão (Tselepidaki et Santamouris, 1991) e 13°C a 18°C no Inverno (Oliveira Fernandes et Maldonado, 1990; Mendes et al, 1989).

Dentro desta temática do conforto térmico, em Portugal, foi implementado o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), aprovado pelo Decreto-Lei nº 80/2006, de 4 de Abril. Este instrumento legal impõe requisitos ao projecto de novos edifícios e de grandes remodelações para salvaguardar a satisfação das condições de conforto térmico nesses edifícios, sem necessidades excessivas de energia, quer no Inverno, quer no Verão.

Nos termos do artigo 14.º do RCCTE, as condições interiores de conforto de referência são: uma temperatura do ar de 20°C para a estação de aquecimento (Inverno) e uma temperatura do ar de 25°C e 50% de humidade relativa para a estação de arrefecimento (Verão), o que não diverge em grande escala dos valores acima referenciados.

2.1.2. Humidade

A humidade é essencial para o conforto e saúde humana. Esta variável tem, por isso, influência, tanto directa, como indirecta, sobre o bem-estar do Homem (Arundel et al, 1986). No entanto, a nível de conforto propriamente dito, as variações que não ultrapassem os limites de 10 a 20% de humidade relativa passam quase despercebidas ao Homem. Mais importantes são as situações em que sejam ultrapassados os valores de referência, em detrimento daquelas em que haja variações periódicas elevadas dos valores de humidade do ar (Gaspar, 1996).

A sensação de conforto/desconforto provocada pela humidade só se torna relevante quando nos afastamos da condição de neutralidade térmica e nos deparamos com situações de calor. Estas, associadas ao aumento da humidade, dão origem, a partir de determinados valores, ao *mormaço*, definido como “sensação de atmosfera pesada e abafada” (Gaspar, 1996). Contudo, podem ser relatados casos de desconforto (como sensações de secura no nariz, lábios e na pele de pessoas sensíveis) para valores inferiores a 20% de humidade relativa (Fanger, 1983).

Por outro lado, como já referido, a humidade também tem efeitos na saúde humana, já que influi nos processos fisiológicos, tendo impacto nos organismos causadores de doenças.

O gráfico 2.2 mostra qual a zona óptima de humidade relativa em que este parâmetro se deve centrar para minimizar efeitos prejudiciais à saúde humana. Representa o efeito da humidade relativa sobre factores biológicos e químicos. Os seus dados não são passíveis de serem quantitativos. Representam, somente, um aumento ou diminuição do efeito da humidade relativa. A maior parte dos efeitos na saúde apresentam-se nos casos em que a humidade ultrapassa valores acima de 60% e abaixo dos 40%. Exceptuam-se as interacções químicas que aumentam acima dos 30% e as condições em que se produz ozono, que aumenta consideravelmente com uma diminuição da humidade relativa.

A parte sombreada do gráfico 2.2 indica a zona óptima, aproximadamente, para minimizar os efeitos nocivos à saúde, atribuíveis à humidade relativa.

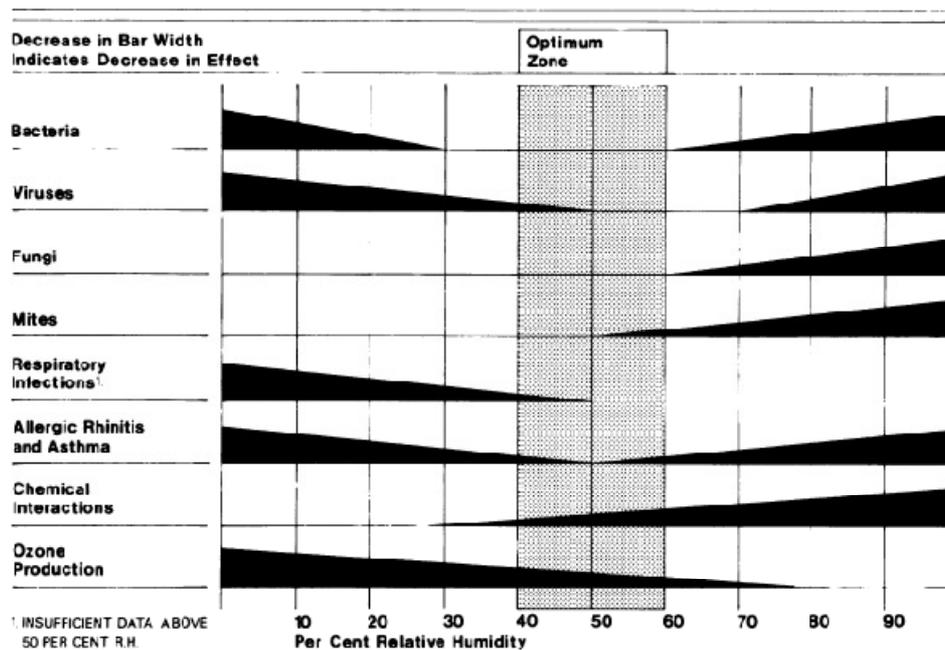


Gráfico 2.2. Zona óptima da humidade relativa para minimizar efeitos adversos à saúde humana (Arundel et al, 1986)

2.2. Caracterização do estado higrométrico do ar

A quantificação e a caracterização da humidade do ar impõem como grandezas higrométricas as que relacionam a humidade relativa, a humidade absoluta ou o estado de saturação (Gaspar, 1996).

Para além de se abordar a influência da manipulação de parâmetros como a temperatura e a humidade do ar sobre o conforto humano, torna-se essencial fazer a caracterização do estado higrométrico do ar.

Esta necessidade em nada se prende com a questão do conforto. Encontra-se, isso sim, relacionada com um dos próximos capítulos, dedicado às soluções que se ponderam optar para cumprir um dos objectivos propostos na realização do presente trabalho, mais especificamente com o controlo da humidade.

Antecipa-se, desde já, que para o controlo do desumidificador acoplado ao GTA III é necessário encontrar uma relação entre a humidade absoluta (W), humidade relativa (Φ) e temperatura (T). Tudo isto porque o valor de humidade a definir pelo utilizador é em humidade absoluta, enquanto o valor lido pelo sensor à saída do desumidificador é em humidade relativa. Recorre-se, então, à seguinte equação genérica para relacionar estas duas grandezas e a temperatura:

$$W = f(\Phi, T) \quad (2.1)$$

Portanto, nos seguintes pontos definir-se-ão algumas das grandezas que permitem caracterizar as propriedades do ar húmido sendo, também, apresentadas algumas considerações físicas e matemáticas geralmente adoptadas para relacionar as grandezas higrométricas, com o objectivo final de chegar a uma solução particular que obedeça à equação genérica (2.1).

Através da manipulação das propriedades termodinâmicas do ar húmido, a psicrometria é o ramo da termodinâmica dos fluidos que analisa as condições e os processos que envolvem o ar húmido.

Neste contexto, tendo em conta a natureza dos constituintes, as características termodinâmicas do ar húmido atmosférico serão estudadas como uma mistura de gases perfeitos: ar seco e vapor de água.

Neste tipo de mistura, o ar seco atmosférico é constituído por um elevado número de compostos, cujas concentrações variam de local para local e que, no mesmo local, podem variar ao longo do tempo. No entanto, como os constituintes principais (azoto, oxigénio e árgon) apresentam pequenas variações nas suas composições, pode definir-se como um ar seco de referência.

Ao contrário dos constituintes do ar seco, a concentração do vapor de água é bastante variável, daí a necessidade de determinar a sua concentração no ar, ou a sua humidade. A humidade pode variar desde um valor nulo, sendo a atmosfera, nesta situação, denominada de atmosfera seca, até um valor máximo admissível, para uma dada temperatura e pressão (que corresponde à atmosfera saturada).

2.2.1. Grandezas Higrométricas

As grandezas higrométricas são todas aquelas susceptíveis de caracterizar a humidade do ar. Tal como Gaspar (1996), reunir-se-ão estas grandezas em três grupos fundamentais, consoante a informação sobre o estado higrométrico do ar húmido.

Sendo assim:

I. Grandezas que caracterizam a Humidade Absoluta:

- a. *Humidade Absoluta* W , que para um dado volume de ar húmido é definida como a razão entre a massa de vapor de água presente na amostra m_v , e a massa de ar seco m_a :

$$W = \frac{m_v}{m_a} \quad (2.2)$$

- b. A *Pressão Parcial de Vapor de Água* p_v , de uma dada amostra de ar húmido é a pressão que o vapor de água exerceria se ele ocupasse sozinho o volume ocupado pelo ar húmido à mesma temperatura.

II. Grandezas que relacionam o estado higrométrico actual, com a saturação:

- a. A *Humidade relativa* Φ , é definida pela razão entre a fracção molar de vapor de água contida no ar húmido x_v , e a fracção molar de vapor de água que este conteria, se se encontrasse no estado de saturação x_{vs} , à mesma pressão e temperatura:

$$\Phi = \frac{x_v}{x_{vs}} \Big|_{p,t} \quad (2.3)$$

- b. O *grau de saturação* μ é a razão entre a *humidade absoluta* existente no ar e a que existiria no estado de saturação à mesma pressão e temperatura:

$$\mu = \frac{W}{W_s} \Big|_{p,t} \quad (2.4)$$

III. Grandezas que caracterizam o estado de saturação¹:

- a. A *Temperatura de Orvalho* t_{po} é a temperatura do ar húmido saturado à mesma pressão p e com a mesma *humidade absoluta* W , do ar húmido da amostra. É definida como a solução da equação:

$$W_s(p, t_{po}) = W \quad (2.5)$$

- b. A *temperatura Termodinâmica de Bolbo Húmido* t_{tbh} é definida segundo Harrison (1965) da seguinte forma: para qualquer estado do ar húmido, existe uma temperatura t_{tbh} , à qual a água líquida (ou sólida) por evaporação no ar húmido, o conduz ao estado de saturação a esta mesma temperatura e pressão.

2.2.2- Expressões do ar húmido

As expressões do ar húmido que serão apresentadas seguidamente, consideram que o ar atmosférico se comporta como uma mistura de dois gases perfeitos independentes, pois assim torna-se mais simples obterem-se expressões que relacionam as várias grandezas higrométricas, ou seja:

- Ar Seco:

$$p_a v = n_a RT \quad (2.6)$$

¹ A obtenção destas grandezas não será apresentada, pois não são consideradas fundamentais para objectivo principal do ponto 2.2 do Capítulo 2

- Vapor de Água:

$$p_v v = n_v RT \quad (2.7)$$

e, como se consideram independentes, a mistura também obedece à equação de estado dos gases perfeitos:

$$W = 0.62198 \frac{p_v}{p - p_v} \quad (2.8)$$

ou, atendendo à Lei de Dalton:

$$(p_a + p_v)v = (n_a + n_v)RT \quad (2.9)$$

Se utilizarmos a definição de fracção molar x_i , dada pela razão entre o número de moles n_i , do componente i , e número total de moles n , da mistura:

$$x_i = \frac{n_i}{n} \quad (2.10)$$

Sendo M_a e M_v as *massas molares de ar seco e de vapor de água*, respectivamente, tem-se:

$$W = \frac{M_v \times n_v}{M_a \times n_a} \quad (2.11)$$

ou,

$$W = \frac{M_v \times x_v}{M_a \times x_a} \quad (2.12)$$

obtendo-se uma nova expressão para a *humidade absoluta*²:

$$W = 0.62198 \frac{x_v}{x_a} \quad (2.13)$$

Recorrendo à equação de estado dos gases perfeitos, a fracção molar pode facilmente relacionar-se com as respectivas *pressões parciais*:

$$x_a = \frac{p_a}{p_a + p_v} = \frac{p_a}{p} \quad (2.14)$$

e

$$x_v = \frac{p_v}{p_a + p_v} = \frac{p_v}{p} \quad (2.15)$$

Substituindo em (2.13) obtém-se a relação entre a *humidade absoluta* e a *pressão parcial de vapor*:

$$p v = n RT \quad (2.16)$$

Da mesma forma, a *humidade absoluta* no estado de saturação W_s é dada pela expressão:

² Considerando $M_a=28.9645\text{g}$ e $M_v=18.01528\text{g}$ (ASHRAE, 1989)

$$W_s = 0.62198 \frac{p_{vs}}{p - p_{vs}} \quad (2.17)$$

A pressão de vapor p_{vs} é geralmente apresentada sobre a forma tabelar. No entanto, dada a sua dependência exponencial com a temperatura, na literatura encontram-se algumas expressões que a estimam com precisão suficiente. Hyland and Wexler (1983) desenvolveram a expressão:

- Para temperaturas de -100 a 0 °C (gelo):

$$\ln(p_{vs}) = \frac{C_1}{T} + C_2 + C_3T + C_4T^2 + C_5T^3 + C_6T^4 + C_7 \ln(T) \quad (2.18)$$

- Para temperaturas na gama de 0 a 200°C (água líquida):

$$\ln(p_{vs}) = \frac{C_8}{T} + C_9 + C_{10}T + C_{11}T^2 + C_{12}T^3 + C_{13} \ln(T) \quad (2.19)$$

Nas expressões anteriores as constantes C_i (com $i=1, \dots, 13$), são:

$$\begin{aligned} C_1 &= -5.674\ 535\ 9\ E3 & C_8 &= -5.800\ 220\ 6\ E3 \\ C_2 &= 6.392\ 524\ 7 & C_9 &= 1.391\ 499\ 3 \\ C_3 &= -9.677\ 843\ E-3 & C_{10} &= -4.864\ 023\ 9\ E-2 \\ C_4 &= 6.221\ 157\ 01\ E-7 & C_{11} &= 4.176\ 476\ 8\ E-5 \\ C_5 &= 2.074\ 782\ 5\ E-9 & C_{12} &= -1.445\ 209\ 3\ E-8 \\ C_6 &= -9.484\ 024\ E-13 & C_{13} &= 6.545\ 967\ 3 \\ C_7 &= 4.163\ 501\ 9 \end{aligned}$$

A *humidade relativa* Φ , pode também exprimir-se em função das pressões parciais, p_v e p_{vs} :

$$\Phi = \frac{p_v}{p_{vs}} \Big|_{p,t} \quad (2.20)$$

ou ser ainda relacionada com o *grau de saturação* μ , recorrendo a (2.4),(2.16),(2.17) e (2.20), resulta:

$$\Phi = \frac{\mu}{1 - (1 - \mu)(p_{vs}/p)} \quad (2.21)$$

2.2.3 Relação entre Humidade Absoluta e Relativa

He-Sheng Ren (2004), num artigo no “*International Journal of Mechanical Engineering Education*”, propõe a seguinte equação de relacionamento entre estas duas grandezas:

$$\frac{\Phi}{p} p_{vs}(T) = \frac{W}{0.62198 + W} \quad (2.22)$$

No entanto, e de acordo com as expressões descritas anteriormente, é possível obter e simplificar a equação (2.22). Para tal, resolve-se a equação (2.20) e resolve-se em ordem a p_v :

$$p_v = \Phi p_{vs}(T) \quad (2.23)$$

Substituindo a equação (2.23) na (2.16), o resultado é:

$$W = 0.61298 \left(\frac{\Phi \times p_{vs}(T)}{p - \Phi \times p_{vs}(T)} \right) \quad (2.24)$$

onde:

- $p_{vs}(T)$ representa a função exponencial resultante de (2.19), já que o funcionamento da câmara está restringido a uma gama de temperatura (5 a 45°C) pertencente ao intervalo (0 a 200°C) para o qual é utilizada a equação;
- $p=1atm=101300Pa$, que é a pressão atmosférica.

A equação (2.24) é a expressão concreta que respeita a genérica (2.1) e será a utilizada na parte do programa correspondente à desumidificação.

CAPÍTULO TRÊS

Caracterização da Câmara Climática

3.1. Introdução

A câmara climática localiza-se na nave principal do Laboratório de Aerodinâmica Industrial (LAI) do ADAI. É um equipamento que foi pensado para o estudo, à escala real, de ambientes térmicos interiores em condições diversas e para o ensaio de desempenho de sistemas de climatização (Gaspar 2004). Desde a sua colocação em funcionamento, este equipamento tem demonstrado uma importância primordial nestes campos.

Na base deste projecto, sob a coordenação do Prof. Divo Quintela, destaca-se o trabalho de Pina Amaral (1995) que contou com colaboração dos Profs. Arsen Melikov e Peder Kjerulf-Jensen da Universidade Técnica de Dinamarca, este último com grande experiência no projecto e implementação deste tipo de equipamento e que foi muito importante na concepção do controlo das unidades de tratamento de ar, que permitem recriar diferentes ambientes térmicos.

Da experiência presenciada do autor, a utilização deste equipamento, associado ao manequim térmico “Maria”, tem sido utilizado para diversos estudos de avaliação do isolamento térmico do vestuário. Desta forma, é possível estabelecer a existência de conforto/desconforto térmico humano, quando são executados testes com o manequim, provido de um determinado tipo de vestuário (seja ele para uso laboral ou quotidiano) e este exposto a diferentes ambientes térmicos no interior da câmara.

Até à data, a câmara não tem sido utilizada nas suas plenas capacidades, aí tendo só sido instalado o sistema de controlo de temperatura, que se pretende que seja modernizado e melhorado. Para que sejam aproveitadas a maior parte das funcionalidades que a câmara possibilita, vai-se tentar implementar um sistema de controlo que permita a humedificação/desumidificação desta.

A câmara pode ser descrita como sendo uma estrutura modular construída em madeira, dividida em dois compartimentos. A divisão maior destina-se à realização propriamente dita dos ensaios, tem uma área de pavimento de $4.8 \times 4.8 \text{ m}^2$ e dispõe de um tecto móvel que permite variar o pé direito entre 2.1m e os 4.4 m. A outra divisão, com as dimensões típicas de um gabinete individual, funciona como sala de apoio, onde se instalam os diversos dispositivos de monitorização e controlo da câmara de teste (Gaspar, 2004).

3.2. Descrição dos grupos de tratamento de ar (GTA):

As condições no interior da sala de testes são garantidas por quatro grupos de tratamento de ar (leia-se daqui para a frente GTA). O sistema integrado de climatização foi projectado para permitir recriar na câmara de teste ambientes com temperaturas na gama dos 5°C aos 45°C e humidades relativas entre os 20 e os 90% (Gaspar, 2004).

3.2.1. GTA I e GTA II

As unidades GTA I e GTA II têm como função tratar o ar em temperatura e caudal e encaminhá-lo para o interior do compartimento reservado a ensaios no interior da câmara climática, de acordo com o esquematizado na figura 3.1.

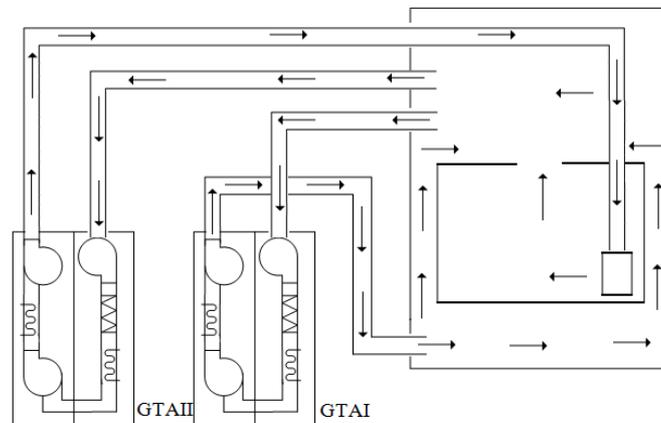


Figura 3.1. Esquema de circulação do ar desde os GTA até à câmara de teste.

Como ilustrado, no GTA I, o ar, depois de tratado, é introduzido para um plenum situado sob o pavimento que, no caso do pavimento instalado ser perfurado, permite criar ambientes extremamente uniformes em termos de temperatura, com velocidades de ar muito baixas e, no caso de ser estanque, força o ar a passar por uma caixa-de-ar, criada por painéis metálicos que revestem as paredes interiores da câmara de teste.

De acordo com a mesma figura, no GTA II, o ar, depois de tratado, é encaminhado directamente para o interior da sala de ensaio, actualmente, através de um difusor mural.

Com o GTAI e GTAII a funcionar em simultâneo, é possível reproduzir situações com temperaturas das paredes diferentes das impostas para o ar interior. As condições de projecto foram impostas tendo em vista o estabelecimento de diferenças de 5 °C entre as temperaturas média radiante e do ar.

3.2.2. GTA III

Esta unidade é a responsável por inserir ar novo e limpo nos circuitos que alimentam o GTA I e GTA II. Neste grupo, o ar, antes de ser introduzido nas condutas, é desumidificado e filtrado até ao teor de humidade pretendido para o ensaio no interior da câmara.

3.2.3. GTA IV

A quarta unidade de tratamento de ar, o GTA IV, destina-se, exclusivamente, à climatização autónoma da sala de apoio, possibilitando o estudo de condições de trabalho sujeitas a regimes transitórios. Este grupo é de pouco interesse para o trabalho a produzir, portanto não será considerado.

3.3. Equipamentos de tratamento de ar

O ar insuflado no interior da câmara climática tem de ser temperado, humidificado e filtrado, com vista a satisfazer as condições pretendidas para o ensaio a realizar. Para que este tratamento do ar seja feito, recorre-se a um conjunto de UTAs (GTA I e GTA II), a um humidificador que fornece vapor de água às duas UTAs (às quais está acoplado) e a um sistema de desumidificação do ar (conectado ao GTA III), o qual também capta o ar exterior de forma a manter o caudal constante.

3.3.1. Unidades de Tratamento de Ar (UTA):

Os GTA I e GTA II, não são mais do que unidades de tratamento de ar, conhecidas como UTAs.

Como qualquer outra unidade de tratamento de ar, foram concebidas para responder às necessidades de climatização e renovação de ar em espaços interiores, que neste caso é o interior da câmara climática. Estas encontram-se associadas a outro tipo de equipamentos, o que possibilita, para além do aquecimento, arrefecimento e variação do caudal do ar, a regulação do teor de humidade do ar. Nestes grupos de tratamento de ar, cada um possui filtros, uma bateria de arrefecimento, uma bateria de aquecimento, dois ventiladores com motores de velocidade variável e um ventilador com motor de velocidade constante, que se encontram dispostos de acordo com o seguinte esquema:

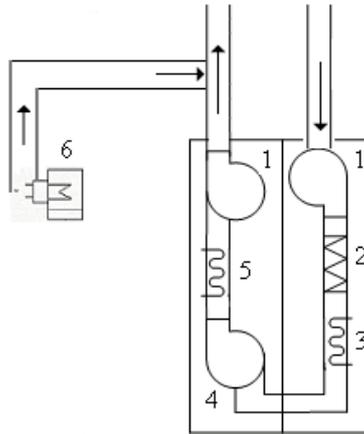


Figura 3.2. Esquema de disposição dos equipamentos do GTAI e GTAIH

Legenda:

- | | |
|---------------------------------------|--|
| 1-ventiladores de velocidade variável | 4-ventiladores de velocidade constante |
| 2-filtros | 5-bateria de aquecimento |
| 3-bateria de arrefecimento | 6-humidificador |

O filtro tem como função reter partículas minúsculas presentes no ar, de modo a evitar a contaminação do ar e a proteger os equipamentos que constituem a UTA das acumulações excessivas de partículas.

A bateria de arrefecimento é um permutador de calor utilizado para arrefecer o caudal de ar que o atravessa. Enquanto o ar arrefece quando entra em contacto com o permutador, o fluido que circula no interior desse aquece. No interior deste permutador, circula água, que é arrefecida num “chiller”. A bateria de arrefecimento, para estes dois casos, possui uma potência de arrefecimento de -11,6 KW.

O aquecimento do ar é efectuado por um permutador de calor designado genericamente por bateria de aquecimento. No caso em estudo, o ar é aquecido ao atravessar um conjunto de resistências eléctricas, com uma potência máxima de aquecimento de 15,8 KW.

A circulação do ar no interior das UTAs é da responsabilidade de um conjunto de ventiladores.

Em cada UTA existem dois ventiladores com velocidade variável e uma potência absoluta de 0,24 KW, podendo atingir uma velocidade de rotação máxima de 780 rpm. Esses ventiladores são accionados por motores eléctricos de frequência variável com 0,37 KW de potência e com uma velocidade de rotação que pode atingir as 1380 rpm.

Existe também, por cada uma, um ventilador que funciona a velocidade constante de potência absoluta de 0,93 KW e uma velocidade de rotação de 1530 rpm. O ventilador é accionado por um motor de 1,1 KW de potência e com velocidade de rotação de 1400 rpm.

Em ambos os conjuntos a transmissão de potência entre motor e o ventilador é efectuada por correias, escolhidas de acordo com as características da montagem entre órgão motor e órgão movido.

A humificação é efectuada exteriormente por um único humidificador, que introduz vapor de água simultaneamente no GTA I e no GTA II. O funcionamento deste será descrito no próximo ponto.

Tal como na humificação, a desumificação do ar é executada exteriormente ao GTA I e ao GTA II. É efectuada por um desumificador associado ao GTA III, cujo método de funcionamento posteriormente se explicitará.

O GTA III também é uma UTA, tal como os dois grupos de tratamento de ar referidos até aqui, só que de menores dimensões. Tem uma potência de arrefecimento de -7,9 KW e uma potência de aquecimento de 9 KW.

O motor que acciona o seu único ventilador tem uma potência de 0,37 KW e uma velocidade de rotação de 2800 rpm. Estes accionam um ventilador com uma potência absoluta de 0,2 KW e que roda a uma velocidade de 2250 rpm.

3.3.2. Humidificador

O humidificador, como a própria palavra indica, é o equipamento responsável por humidificar o ar a ser injectado, fazendo isto de forma constante, para manter a humidade relativa pretendida no interior da câmara. Para tal, produz vapor de água que é misturado com o ar à saída, tanto do GTA I, como do GTA II.

O aparelho em questão é o NOVAP série 3000, fabricado pela NORDMANN.



Figura 3.3. Humidificador NOVAP série 3000

O humidificador gera vapor através do aquecimento de água corrente, (que se encontra no depósito), por meio de dois eléctrodos, imersos naquela, usando energia eléctrica, como se vislumbra na seguinte figura.

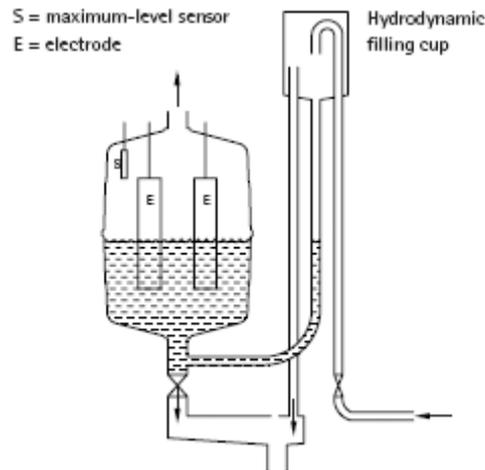


Figura 3.4. Esquema da formação de vapor de água no interior do cilindro.

A vaporização ocorre à pressão atmosférica.

A nível da manutenção, a água do depósito deve ser drenada e este deve ser alvo de uma limpeza regular, de forma a manter um nível de condutividade da água aceitável e a fim de evitar a presença de bactérias que proliferam em águas sujas e estanques.

A água da rede consiste numa mistura de água pura (H_2O) com substâncias solúveis e insolúveis, onde grande percentagem é ocupada pelo calcário (carbonato de cálcio, $CaCO_3$). De modo a que parte deste calcário não fique retida no cilindro, no momento da evaporação da água, e para que o nível de condutividade da água permaneça razoável, este humidificador drena automaticamente a água, ficando uma quantidade significativa do calcário e outras substâncias no cilindro, sob a forma de incrustações.

O humidificador em causa é portador de um sistema de redução da formação de minerais, o “SC-System”. Este, introduz ar na parte inferior do cilindro, fazendo com que os minerais fiquem em suspensão e possam ser removidos, na sua maioria, durante a operação de drenagem normal. Desta forma, a vida do cilindro é consideravelmente aumentada.

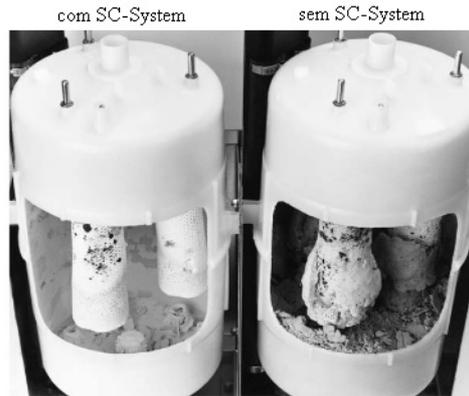


Figura 3.5. Rede de aço inoxidável num cilindro com SC-System e num cilindro sem SC-System.

De salientar que este humidificador possui um sistema de controlo, com micro-controlador de alta precisão integrado, que regula o processo de vaporização, que permite ao humidificador adaptar-se, automaticamente, à qualidade e quantidade de água usada para produzir vapor, mudando, por isso os níveis de saída deste. Isto possibilita, ainda, uma drenagem perfeita.

3.3.3. Desumidificador

O desumidificador acoplado ao GTA III trata-se de um Munters ML 420.



Figura 3.6. Desumidificador MUNTERS ML420

Este equipamento possibilita a desumidificação do ar exterior até mesmo quando este possui uma taxa de humidade relativa baixa. É altamente eficiente, mesmo a temperaturas abaixo dos 0°C.

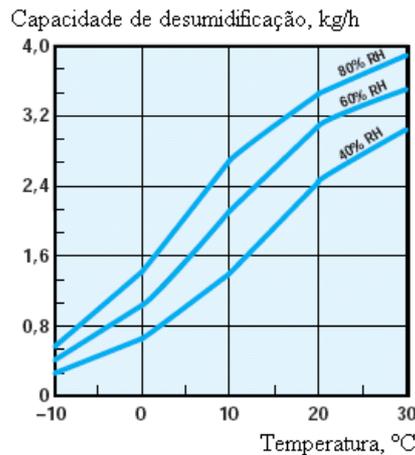


Gráfico 3.1. Relação entre a temperatura do ar e a capacidade de desumidificação (kg/h)

Destaca-se, desde já, o facto de possuir dois rotores, em vez de um só, concebidos de um material compósito rugoso, o que faz aumentar a eficácia a atrair e a reter o vapor de água e a diminuir as perdas de calor. Ora, isto reflecte-se numa redução significativa da energia eléctrica requerida. Além disso, possui um inovador sistema de controlo que maximiza essa eficiência energética e um sistema eléctrico que suporta 690V e 60°C.

O funcionamento deste aparelho encontra-se esquematizado na seguinte figura:

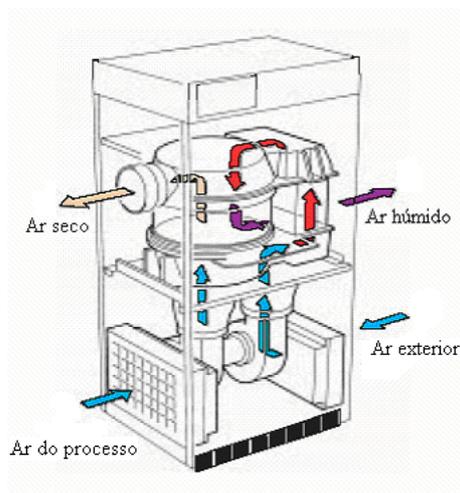


Figura 3.7. Esquema de funcionamento do desumidificador MUNTERS DL420

3.4. Equipamentos de controlo da câmara

Para além dos mencionados anteriormente, a câmara possui um conjunto de equipamentos que permitem o seu controlo. Estes podem dividir-se em duas categorias: os de aquisição de sinal e os de envio de sinal (ou de controlo propriamente dito).

Enquanto os primeiros são responsáveis pela leitura de temperatura, humidade e caudal do ar, os segundos são responsáveis por regular a abertura das válvulas (caso haja necessidade de arrefecimento do ar), as resistências térmicas (no caso de se pretender o aquecimento do ar) e o caudal do ar. Podem, ainda, regular a quantidade de humidade no ar, através do controlo do humidificador e desumidificador.

3.4.1. Aquisição de sinal

Na aquisição de sinal, como já referido, pode obter-se a leitura de temperatura, de humidade e de caudal ao longo do sistema de ar, que alimenta a sala de ensaios da câmara. Nos locais onde se pretendem recolher informações, estão colocados sensores de temperatura, de humidade e de caudal, o que representa o início da aquisição de sinal.

A temperatura é adquirida por termo resistências. Estes sensores operam quando existe variação da resistência eléctrica do material sensível (normalmente metal) devido à mudança da temperatura. A resistência eléctrica aumenta com o aumento da temperatura.

A humidade e a temperatura no interior da sala são medidas com uma sonda da Vaisala (do modelo HMD 60Y), que permite leituras com grande precisão de temperaturas entre -5°C a 55°C e de humidades relativas entre 0% a 95% (deve-se evitar teores de humidade superiores a 85%, para não danificar a sonda). O sinal de saída é de 4 a 20 mA.

Este conjunto de sensores será ligado ao computador através de duas placas PCI-6220 adquiridas à NI (National Instruments). Como características fundamentais para este projecto, destacam-se as 16 entradas de sinal analógico, que podem ser configuradas em modo bipolar de -5V a 5V .

O sinal que chega às placas vindo dos sensores vem em corrente, de 4mA a 20mA (de forma a minimizar interferências³), pelo que têm que ser convertidos em tensão. O sinal lido nas placas corresponde à queda de tensão provocada por resistências de precisão de 250Ω , resultando numa amplitude de sinal de 1V a 5V.

Após a leitura do sinal, este é convertido em valores de temperaturas e humidade, que serão assimilados pelo programa de controlo da câmara, que, por sua vez, os compara com o pretendido pelo utilizador, como se poderá observar nos próximos capítulos.

³ A transmissão de sinal em tensão em longas distâncias é afectada pela resistência do fio condutor, o que não se verifica quando o sinal é transmitido em corrente, eliminando as interferências.

3.4.2. Envio de sinal

Com o envio de sinal, ambiciona-se controlar os equipamentos que compõem o sistema que trata o ar fornecido à câmara, de acordo com as características definidas para o seio da zona de ensaios, ou seja, de acordo com os valores temperatura e humidade do ar exigidos.

O sinal provém das saídas analógicas de duas placas DT-2815, adquiridas à DATA TRANSLATION, que totalizam 16 saídas analógicas (8 por cada placa) e estão configuradas de forma a enviar um sinal em corrente numa gama que vai de 4mA a 20mA. Este sinal é recebido pelos equipamentos controlados, que são: as válvulas reguladoras de caudal, as resistências termoeléctricas, variadores de frequência, os humidificadores e o desumidificador.

Quando é necessário arrefecer o ar, o sinal é enviado às válvulas reguladoras de caudal presentes no GTA I e GTA II, que vão abrindo progressivamente, aumentando o caudal de água que passa pela bateria de arrefecimento, até se obter a temperatura desejada no ar. Estas válvulas são do modelo M3B25GY, fabricadas pela SIEMENS. Caracterizam-se por terem um sinal de entrada compreendido entre 4mA a 20mA, ou seja o sinal de controlo tem que chegar em corrente.

No aquecimento, o sinal não chega directamente às resistências térmicas, chegando em primeiro lugar aos tiristores, que as comandam, de acordo com a ordem que recebem. Os tiristores presentes, fornecidos pela UNITED AUTOMATION (modelo FC36M) possuem uma entrada de sinal em corrente na gama de 4mA a 20mA.

Os variadores de frequência regulam a velocidade de rotação dos motores que accionam os ventiladores. Um sinal em corrente (entre 4mA a 20mA) entra, em primeiro lugar, nos variadores de frequência (adquiridos à ABB), que, consoante o sinal de chegada, regulam a velocidade de rotação dos motores (de 4mA para 20mA - neste sentido a velocidade de rotação aumenta), possibilitando regular o caudal dos GTA I e GTA II, conforme a velocidade de escoamento do ar pretendida no interior da câmara.

O humidificador e o desumidificador, se se pretender fazer o controlo através do programa a implementar, vêm equipados de fábrica com microprocessadores, que estão programados para receberem sinais em corrente (entre 4mA a 20 mA), como é mais aconselhável.

CAPÍTULO QUATRO

Fundamentos de Controlo

4.1.Introdução

Desde o nosso lar até às unidades industriais, a necessidade de sistemas de controlo estão sempre presentes. Tanto o sistema de aquecimento das nossas casas, como um tanque de mistura de diferentes substâncias de uma unidade industrial, possuem sistemas de controlo que têm a mesma função, independentemente da sua complexidade. Assim como nestes dois casos, também o programa de controlo dos grupos de tratamento de ar da câmara possui um sistema de controlo.

Em ambos, o que é executado pelos sistemas de controlo é a comparação entre o valor actual de saída (output) e o valor de referência (Setpoint), produzindo um sinal de controlo através de um dado método, de maneira a que o erro seja minimizado, tendendo a ser nulo, para que o valor de saída seja tendencialmente igual ao valor de referência, o que pode ser exemplificado pela seguinte figura:

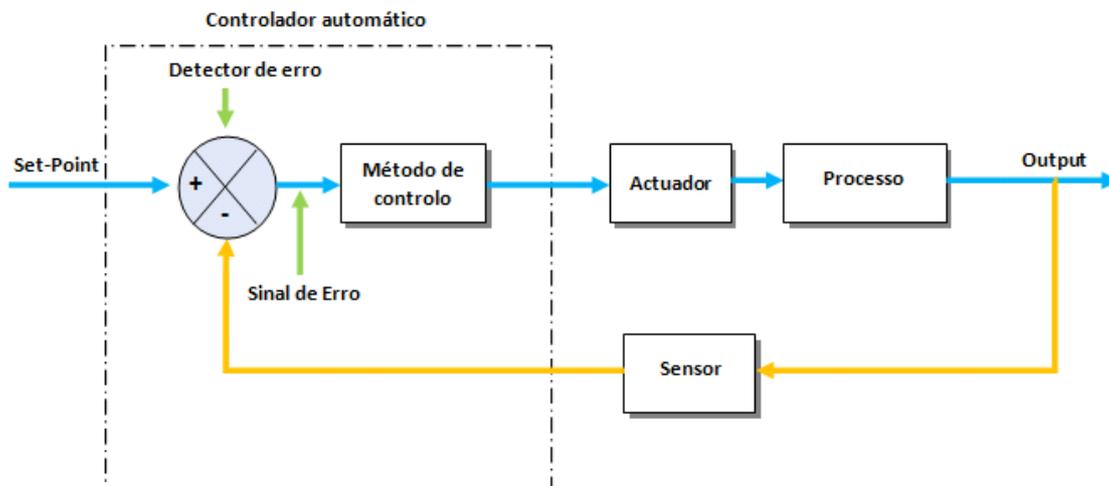


Figura 4.1. Diagrama de blocos de um sistema de controlo (adaptado de Ogata (1993))

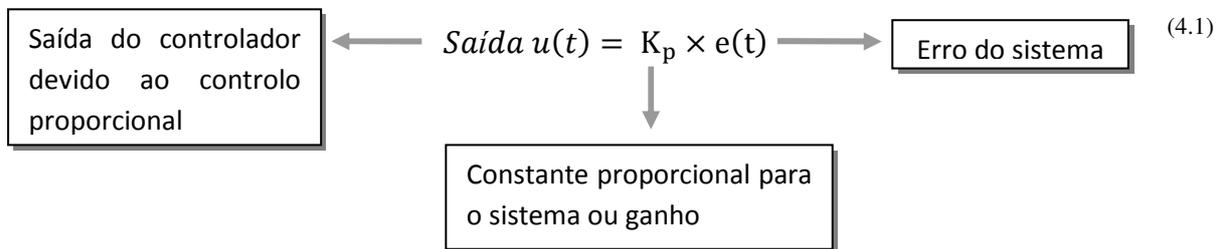
Importa, aqui, compreender os diferentes métodos de controlo: como funcionam em separado e como podem funcionar quando relacionados uns com os outros. Recorreu-se, para tal, a Ogata (1993) e Curtis (1990). Interessa também entender em que parte deste trabalho é que serão integrados.

4.2. Modos de controlo isolados

Dentro da acção dos controladores, vulgarmente, encontramos modos de controlo contínuos isolados, como o controlo proporcional (P), o controlo integral (I) e o controlo derivativo (D). Para uma escolha mais eficaz do modo de controlo, é necessário perceber quais são as vantagens, as limitações e em que situações se podem aplicar. É o que se pretende fazer de seguida.

4.2.1. Controlo proporcional (P)

No modo de controlo proporcional, existe uma relação contínua entre a saída do controlador $[u(t)]$ e o erro⁴ $[e(t)]$, que é expressa da seguinte forma:



Ou, pela transformada de Laplace:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (4.2)$$

Este modo de controlo pode ser representado pelo diagrama de blocos:

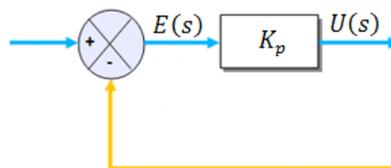


Figura 4.2. Diagrama de blocos de um controlador proporcional

Geralmente, o controlo proporcional é usado em processos em que não são prováveis grandes variações de carga ou com atrasos de processos médios a pequenos.

Para um ganho elevado o modo proporcional provoca oscilações do erro.

No caso de atrasos pequenos, a banda proporcional pode-se fazer muito pequena (K_p grande) o que reduz o erro do desvio⁵ (ou erro residual). Essencialmente, este controlador é um amplificador de ganho ajustável.

⁴ Erro = (Setpoint) - (Variável do processo), ou genericamente: $E = SP - VP$.

⁵ Desvio ou erro residual aparece em sistemas de controlo proporcional, quando há alteração de carga.

4.2.2 Controlo integral (I)

No controlo integral, o sinal de erro é variado num valor proporcional à taxa de variação do sinal de erro, como se subentende da expressão que descreve este modo de controlo:

$$\frac{du(t)}{dt} = K_i \times e(t) \rightarrow u(t) = K_i \times \int_0^t e(t)dt \quad (4.3)$$

Ou, pela função de transferência:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (4.4)$$

Este controlador pode ser representado no próximo diagrama:

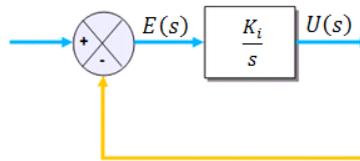


Figura 4.3. Diagrama de blocos de um controlador integral

Nas equações (4.3) e (4.4), o K_i é uma constante integral, ajustável. Se o seu valor for grande, significa que um erro pequeno produz uma taxa de variação grande do valor à saída do controlador e vice-versa. Neste tipo de controlador, a taxa de variação do sinal de erro começa por variar muito rapidamente, mas, na parte final, o erro é levado a zero, com variações cada vez mais baixas dessa taxa.

No caso de existirem atrasos no processo⁶ muito grandes, o erro pode oscilar em torno de zero ou mesmo ser cíclico, sendo esta uma das razões apontadas para não se usar este controlador isoladamente. Todavia, pode ser utilizado sozinho em sistemas com pequenos atrasos e correspondentes pequenas capacidades.

4.2.3. Controlo derivativo (D)

Nesta acção de controlo, a saída do controlador depende da taxa de variação do erro. Este modo não pode ser utilizado isoladamente, pois quando o erro é constante ou igual a zero, a saída do controlador é indefinida, como se pode analisar pela expressão que relaciona o erro com a saída do controlo:

$$u(t) = K_D \times \frac{de(t)}{d(t)} \quad (4.5)$$

⁶ O atraso no processo é o tempo necessário ao ajustamento do processo, quando existe uma variação súbita de uma variável dinâmica que provoca alterações da variável controlada

No entanto, como se observará mais à frente, traz algumas vantagens em combinação com outros modos de controlo.

4.3. Modos de controlo Combinados

Quando se combinam diferentes modos de controlo podem-se obter os seguintes resultados: proporcional-integral (PI), proporcional-derivativo (PD) ou, ainda, proporcional-integrativo-derivativo (PID). Este tipo de combinações permite conciliar as vantagens de cada um, de forma a tornar a resposta por parte do sistema mais rápida e eficaz. Em alguns casos a vantagem adicional é a eliminação das desvantagens que têm quando usados separadamente.

Em seguida, e tomando as combinações apresentadas anteriormente, deseja-se discutir resumidamente os méritos e inconvenientes que eles possam apresentar.

4.3.1. Controlo proporcional-integral (PI)

O modo de controlo proporcional-integral (PI), combina a acção proporcional com a integral. Pode ser definido pela equação:

$$u(t) = K_p \times e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (4.6)$$

Ou, pela função de transferência:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \times \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (4.7)$$

Esta última função pode ser representada pelo diagrama:

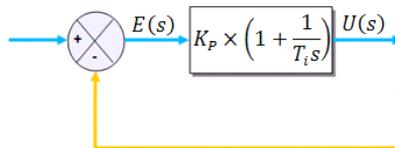


Figura 4.4. Diagrama de blocos de um controlador proporcional-integral

Neste conjunto de equações, o K_p (constante proporcional) e o T_i (tempo de integração), são o conjunto de constantes ajustáveis.

Este modo de controlo elimina o problema do desvio dos controladores proporcionais. Por isso, este controlador pode ser usado em sistemas com variações de carga frequentes ou grandes. Porém, devido ao tempo de integração, o processo deve ter variações de carga relativamente lentas, para evitar oscilações induzidas pela «ultrapassagem» integral.

É, também, desvantajoso usar este modo de controlo em processos descontínuos, porque a acção integral provoca ultrapassagens consideráveis do erro e da saída antes de estabilizar no ponto de operação.

4.3.2. Controlo proporcional-Derivativo (PD)

Da combinação de um controlador proporcional e um derivativo, surge o controlo proporcional-derivativo (PD), definido pela expressão:

$$u(t) = K_P e(t) + K_P T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.8)$$

Ou, pela função de transferência:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_P (1 + T_d s) \quad (4.9)$$

Esta acção de controlo pode ser interpretada pelo diagrama:

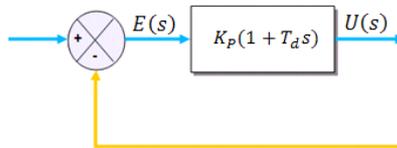


Figura 4.5. Diagrama de blocos de um controlador proporcional-derivativo

Neste controlador os parâmetros ajustáveis são a constante proporcional (K_p) e o tempo derivativo (T_d).

Este sistema não elimina o desvio dos controladores proporcionais, mas pode lidar com variações rápidas de carga do processo desde que seja aceitável o erro de desvio por variação de carga. Tem o efeito de antecipar a resposta do sistema. Não deve ser usado em processos que apresentam muito ruído.

4.3.3. Controlo Proporcional-Integrativo-Derivativo (PID)

Este tipo de acção de controlo resulta da combinação dos três modos de controlo, o proporcional, o integrativo e o derivativo. Este modo possui as vantagens de cada uma das três acções de controlo individual. A equação deste controlo é dada por:

$$u(t) = K_P e(t) + \frac{K_P}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_P T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.10)$$

Ou, pela função de transferência:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_P \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (4.11)$$

Que figura no próximo diagrama:

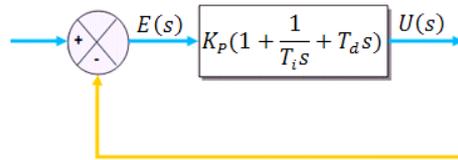


Figura 4.6. Diagrama de blocos de um controlador proporcional-integrativo-derivativo

De todos os modos de controlo, este é o mais poderoso, mais complexo e pode ser usado praticamente para quaisquer características do processo.

Resumindo, este controlador ao possuir o modo integral elimina o erro estacionário, causado por grandes variações de carga. Com o modo derivativo, devido ao seu efeito estabilizador, permite um aumento do ganho e atenua a tendência para as oscilações (causado pelo modo integrativo), o que conduz a uma velocidade de resposta superior quando comparado com P e PI.

4.4-Controlo da Câmara

Nos próximos pontos, será explicado o modo de funcionamento do programa de controlo da câmara a ser implementado, sendo, também, possível vislumbrar onde as acções de controlo, expostas precedentemente, integraram o programa.

As sugestões para o programa de controlo, posteriormente indicadas, estão de acordo com o projecto da câmara.

Para se conseguir explicar melhor como a câmara será controlada, dividir-se-á o controlo da câmara em três grupos de controlo: da temperatura, do humidificador e do desumidificador. Estes grupos de controlo pertencerão ao mesmo programa de controlo, onde podem ser utilizados em conjunto ou separadamente, de acordo com as necessidades do utilizador da câmara.

4.4.1-Controlo da Temperatura (GTA I e GTA II)

O aquecimento ou arrefecimento do ar insuflado na câmara é efectuado pelo GTA I como pelo GTA II, que podem funcionar em simultâneo ou isoladamente.

As ordens para aquecimento ou arrefecimento do ar descritas no parágrafo anterior serão executadas através dos programas de controlo a implementar que serão idênticos, tanto

para o GTA I, como para o GTA II, dado que estes correspondem a duas UTAs com as mesmas características.

No controlo da temperatura, o valor inicial é introduzido pelo operador do programa (SP(1)). Esse valor é, desde logo, comparado com o valor de temperatura lido no interior da câmara, AI(0), donde resulta o primeiro erro, E(1). Este erro é inserido num controlador proporcional-integral-derivativo, ou só proporcional, se o ganho do ciclo for suficientemente elevado.

A saída do primeiro controlador, OP(1), será o Setpoint 2, SP(2), ou seja, o valor de entrada do segundo controlador, que será comparado com o valor de temperatura lido no interior da UTA, AI(1) (o sensor de leitura da temperatura encontra-se à saída da bateria de aquecimento). Desta comparação, resulta o 2.º erro, E(2), introduzido no 2.º controlador, proporcional.

De acordo com o sinal de saída, OP(2), gerado pelo erro (ao passar o controlador proporcional), executa-se uma acção de aquecimento ou arrefecimento: se for positivo ($OP(2) > 0$), inicia-se uma acção de aquecimento; se for negativo ($OP(2) < 0$), inicia-se, por sua vez, uma acção de arrefecimento. O trajecto da ordem de aquecimento é demonstrado na figura pelo traço a vermelho e o de arrefecimento pelo traço a azul.

A ordem de saída de OP(2) torna-se o Setpoint 3, SP(3), que, perante o caso de aquecimento, é inserido, directamente, num controlador proporcional, gerando um sinal de saída, SQ, que será enviado ao Tiristor, responsável pelo comando das resistências térmicas.

No caso de arrefecimento, o SP(3) é comparado com a leitura da temperatura da água à entrada da bateria de arrefecimento, AI(2), originando, novamente, um erro, E(3), que será inserido num controlador proporcional, promovendo o sinal, SF, que vai regular a abertura da válvula da bateria de arrefecimento.

O controlo da temperatura pode ser ilustrado pela figura 4.7.:

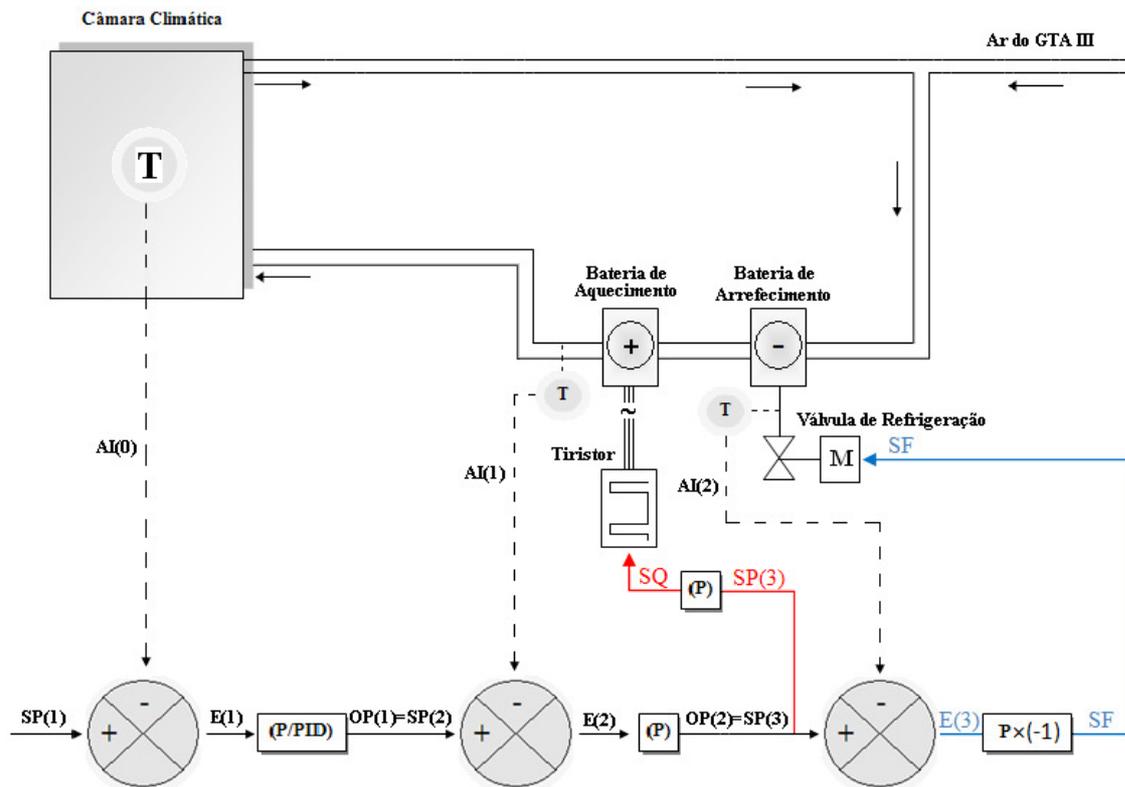


Figura 4.7. Esquema de controlo da temperatura do GTA I e GTA II

Legenda:

Símbolos	Definição	Equações
SP(1)	Setpoint definido pelo utilizador	
SP(2)	Setpoint 2	$SP(2) = OP(1)$
SP(3)	Setpoint 3	$SP(3) = OP(3)$
AI(0)	Temperatura do ar lida na câmara	
AI(1)	Temperatura do ar à saída da bateria de aquecimento	
AI(2)	Temperatura da água à entrada da bateria de arrefecimento	
E(1)	Erro 1	$E(1) = SP(1) - AI(0)$
E(2)	Erro 2	$E(2) = SP(2) - AI(1)$
E(3)	Erro 3	$E(3) = SP(3) - AI(2)$
OP(1)	Saída do 1.º controlador	v. equações 4.1 ou 4.11
OP(2)	Saída do 2.º controlador	v. equação 4.1
SF	Saída de controlo para a refrigeração	v. equação 4.1
SQ	Saída de controlo para o aquecimento	v. equação 4.1

4.4.2. Controlo do humidificador

Quando existe necessidade de aumentar a humidade do ar, o utilizador da câmara terá disponível, no programa, uma opção que lhe permitirá aumentá-la.

O controlo da humidade será efectuado de acordo com o esquema desta figura:

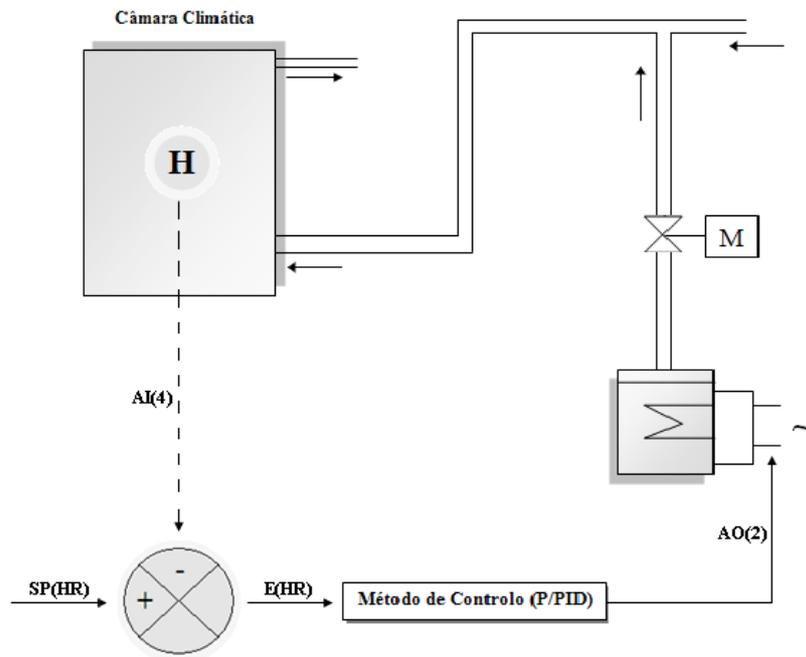


Figura 4.8. Esquema de controlo do humidificador

Legenda:

Símbolos	Definição	Equações
SP(HR)	Setpoint de humidade relativa definido pelo utilizador	
AI(4)	Humidade relativa lida na câmara	
E(HR)	Erro	$E(HR) = SP(HR) - AI(4)$
AO(2)	Sinal de saída de controlo para o humidificador	v. equações 4.1 ou 4.11.

A humidade lida na câmara, AI(4), é comparada com o valor inserido pelo utilizador do programa, SP(HR), que terá de ser em humidade relativa, pois, tanto o sensor, como o humidificador, funcionam com valores de humidade relativa.

Dessa comparação resulta um erro, E(HR), que será introduzido num controlador proporcional ou proporcional-integrativo-derivativo, conforme o ganho do ciclo.

O sinal AO(2), resultante da operação anterior, configura a ordem que o humidificador irá receber, para gerar vapor de água, que será misturado com o ar do GTA I e/ou GTA II.

4.4.3. Controlo do desumidificador

O desumidificador também terá um lugar no painel do programa de controlo, de forma a poder ser administrado pelo utilizador.

Os valores de humidade e de temperatura nada têm a ver com os valores anteriormente referidos, nos pontos 4.4.1 e 4.4.2, sendo o controlo deste aparelho, efectuado independentemente dos outros três (GTA I, GTA II e humidificador).

A humidade relativa e a temperatura são medidas numa zona em que o caudal volúmico é relativamente constante. Dado que é necessário convertermos estas duas grandezas em uma só, na humidade absoluta, teremos que recorrer a uma equação que relacione estas três medidas. Para tal, deduziu-se, anteriormente, a equação (2.24).

Assim sendo, obtemos uma variável do processo, $VP(W)$, em humidade absoluta, que se comparará com o valor definido pelo utilizador, $SP(W)$, também em humidade absoluta. Desta operação, resulta um sinal de erro, $E(W)$, que, havendo acção de controlo, proporcional ou proporcional-integrativo-derivativo, aí será introduzido. Após a passagem pela acção de controlo, resulta duas possibilidades de sinais de controlo: $AO(3)$, sinal de controlo do desumidificador e $AO(4)$, sinal de controlo de abertura da válvula de refrigeração.

O controlo sugerido para o desumidificador é o representado na figura seguinte:

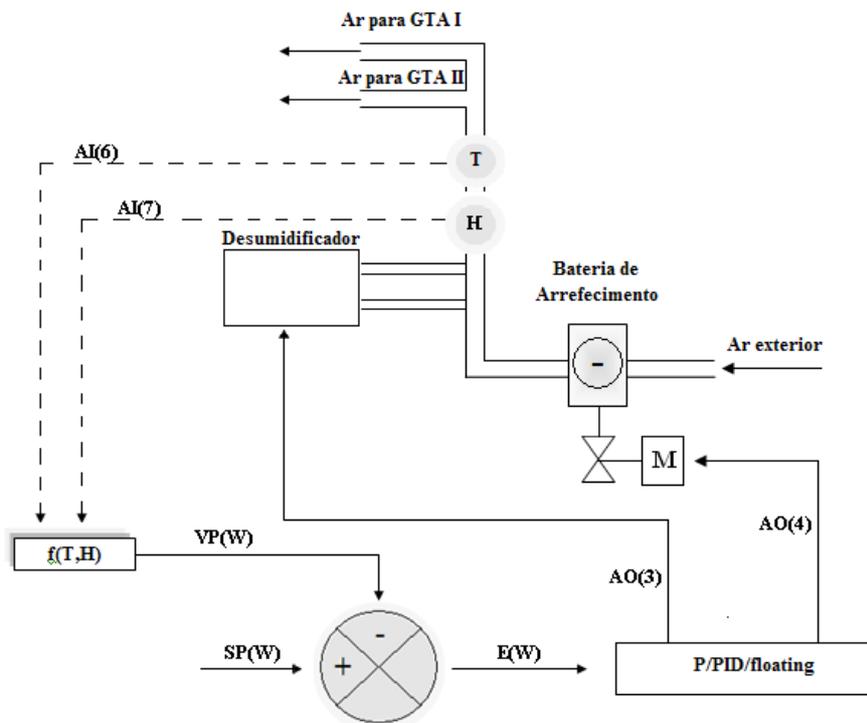


Figura 4.9. Esquema de controlo do desumidificador

Legenda:

Símbolos	Definição	Equações
SP(W)	Setpoint definido pelo utilizador em humidade absoluta	
AI(6)	Temperatura lida à saída do GTA III	
AI(7)	Humidade relativa lida à saída do GTA III	
VP(W)	Variável do processo em humidade absoluta	v. equação (2.24)
E(W)	Erro	$E(W) = SP(W) - VP(W)$
AO(3)	Sinal de saída de controlo para o desumidificador	v. equações 4.1 ou 4.11.
AO(4)	Sinal de saída para a válvula da bateria de arrefecimento	v. equações 4.1 ou 4.11.

Segundo o Prof. Peder Kjerulf-Jensen, o controlo da bateria de arrefecimento deve ser executado da mesma forma acima descrita para o controlo dos GTA I e II, para o mesmo elemento. Também sugere que o desumidificador deve ser activado sempre que a bateria de arrefecimento é completamente utilizada e a sua temperatura se encontre no mínimo ($>0^{\circ}\text{C}$).

CAPÍTULO CINCO

Modelo de Controlo Desenvolvido

5.1.Introdução

O algoritmo de controlo foi concebido em LabVIEW (acrónimo para *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) que, tal como o GENESIS Control Séries (ICONICS, 1993), utiliza uma linguagem de programação gráfica, ou seja, o programa é feito na forma de um diagrama de blocos.

Esta ferramenta utiliza uma estrutura hierárquica de programação, orientada pelo fluxo de dados, tornando simples a implementação de sistemas complexos que englobem aquisição e manipulação de dados ou, ainda, o controlo de equipamentos através do computador. Além disso, o LabVIEW inclui diversas bibliotecas contendo componentes com funções para aplicações específicas (algoritmos de análise estatística, processamento e geração de sinais, etc.). Permite, ainda, utilizar livrarias de funções programadas noutras linguagens (C, Visual Basic, Pascal, entre outras).

Qualquer programa desenvolvido em LabVIEW é chamado de instrumento virtual (VI – *virtual instrument*) já que a sua aparência e operação assemelham-se às de instrumentos reais. Um VI, assim como um programa usual, é composto por um conjunto de instruções que fazem a manipulação e fluxo dos dados, e por uma interface com o usuário, na qual se encontram as entradas e saídas necessárias. Basicamente, podem-se identificar num VI duas partes que o compõem:

- **Diagrama de blocos** – é a estrutura do programa propriamente dita que contém o código fonte construído de forma gráfica;
- **Painel frontal** – constitui a interface com o usuário, apresentando de forma visual todos os controlos, gráficos e indicadores formando uma tela que simula o painel físico de um instrumento. Este pode ser formado por botões, *leds*, *knobs* e indicadores que permitem a interacção através do rato ou do teclado do computador.

5.2.Etapas de Preparação do Software e Hardware

No primeiro passo procedeu-se à instalação do LabVIEW e dos drivers das placas de aquisição no computador, seguindo as instruções indicadas pelo fabricante. De seguida,

conectou-se a placa de aquisição de sinal (PCI 6220) ao computador e ao bloco de conectores, através de um cabo, seguindo o seguinte esquema:

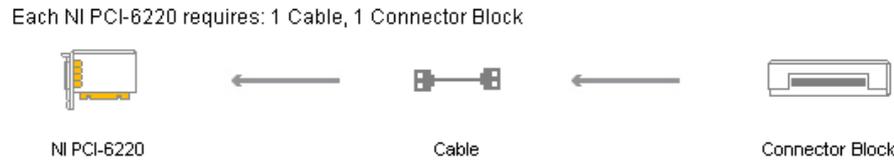


Figura 5.1. Esquema de ligação entre placa, cabo e conector

A parte mais minuciosa desta tarefa restringe-se à ligação dos sensores ao bloco de conectores (TBX68 DIN RAIL), na qual se respeitou a lista de canais existente para as placas anteriores. No entanto, como o material implementado é diferente do que foi substituído, houve necessidade de alterar a ordem dos pinos (de acordo com a configuração da NI), daí incluir-se, em anexo (Anexo I), uma nova tabela de ligações.

A ligação dos sensores aos pinos podia ser executada de três formas diferentes: pelas ligações RSE, NRSE e DIFERENCIAL:

- A ligação RSE consiste em ligar o GND da placa ao comum do sensor e ligar o positivo numa das entradas analógicas.
- O modelo NRSE difere, em relação ao modelo anterior, no facto do comum do sensor ser ligado à AI SENSE da placa.
- Por último, o método DIFERENCIAL consiste em ligar os terminais do sensor a dois canais da placa, ocupando, deste modo, o dobro dos canais que os métodos anteriores.

Neste caso, optou-se pela ligação do tipo NRSE que, embora não seja tão estável como uma ligação DIFERENCIAL no que respeita a ruído eléctrico, permite poupar canais, visto que só precisa de metade destes. Contudo, encontra-se dentro de parâmetros de estabilidade aceitáveis em relação à primeira (RSE).

Na próxima figura pode-se visualizar o esquema de ligação implementado:

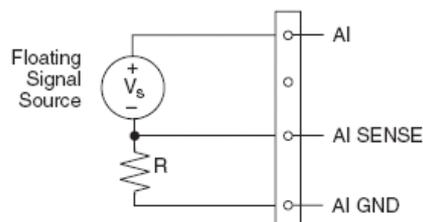


Figura 5.2. Esquema de ligação tipo NRSE

No que respeita às placas de controlo de sinal, foram mantidas as mesmas, mas, para poderem funcionar com o LabVIEW no sistema operativo do WINDOWS XP, foi desenvolvido um driver implementado no programa (a lista de canais de saída de sinal também se encontra em anexo, Anexo II).

Por último, procedeu-se à conversão do sinal de aquisição, utilizando o Measurement & Automation (uma das várias ferramentas do LabVIEW), seguindo as rectas de conversão utilizadas no programa anterior. Esta ferramenta permitiu, ainda, configurar os canais de entrada de sinal utilizados no programa.

5.3.Estrutura do programa

O programa de controlo foi inicialmente desenhado para cumprir as mesmas funções de controlo e aquisição de dados que o já existente, programado pelo professor Adélio Gaspar, executava. O código fonte, que se encontra no bloco de diagramas, está dividido em três partes: a parte de inicialização, a de controlo e a de paragem. A primeira parte existe porque há necessidade de iniciar os drivers para as placas de controlo. É também aqui que se guardam os valores pré-definidos para algumas funções do programa. Na próxima figura mostram-se duas das estruturas definidas para o efeito.

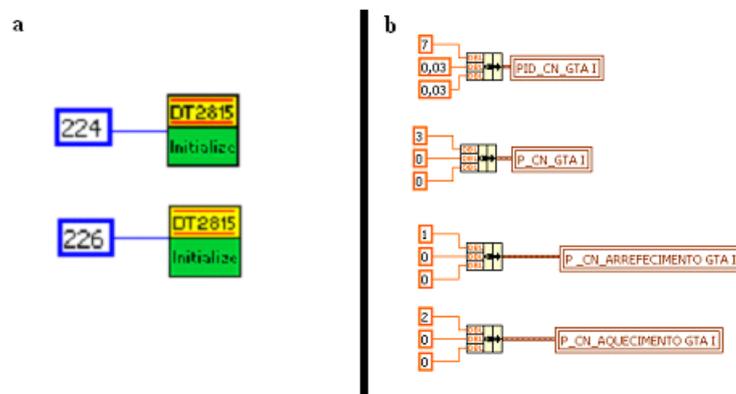


Figura 5.3. a-Ferramenta que inicia os drivers, b-Valores pré definidos para um dos modos de controlo

Na figura 5.3. parte a, os números no interior do quadrado azul correspondem ao endereço de inicialização das placas de controlo. Na figura 5.3.parte b, os valores dentro dos quadrados laranja, correspondem a valores pré-definidos de um dos controladores. Em ambos os casos, por qualquer motivo, sempre que se reinicie o programa, são estes os valores reconhecidos por defeito.

Na parte do controlo, que é a principal parte deste programa, houve o cuidado de se construir a estrutura obedecendo a etapas, cronologicamente ordenadas. Dentro desta estrutura, em primeiro lugar, adquirem-se os dados através do DAQ ASSISTANT e estes são filtrados, recorrendo a funções pré-definidas, como se observa na figura 5.4.

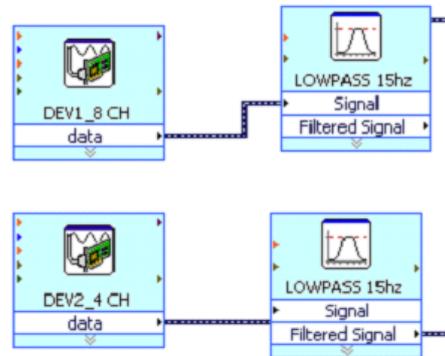


Figura 5.4. DAQ ASSISTANT e filtros (da esquerda para a direita)

Esses dados são encaminhados para a etapa seguinte, sendo comparados, através dos modos de controlo aí presentes, com os valores definidos pelo utilizador, processando-se, assim, uma ordem de controlo. A figura 5.5 é um excerto do algoritmo (que se encontra, na sua totalidade, no Anexo V) implementado que obedece ao esquema de controlo delineado na figura 4.7 do capítulo quatro.

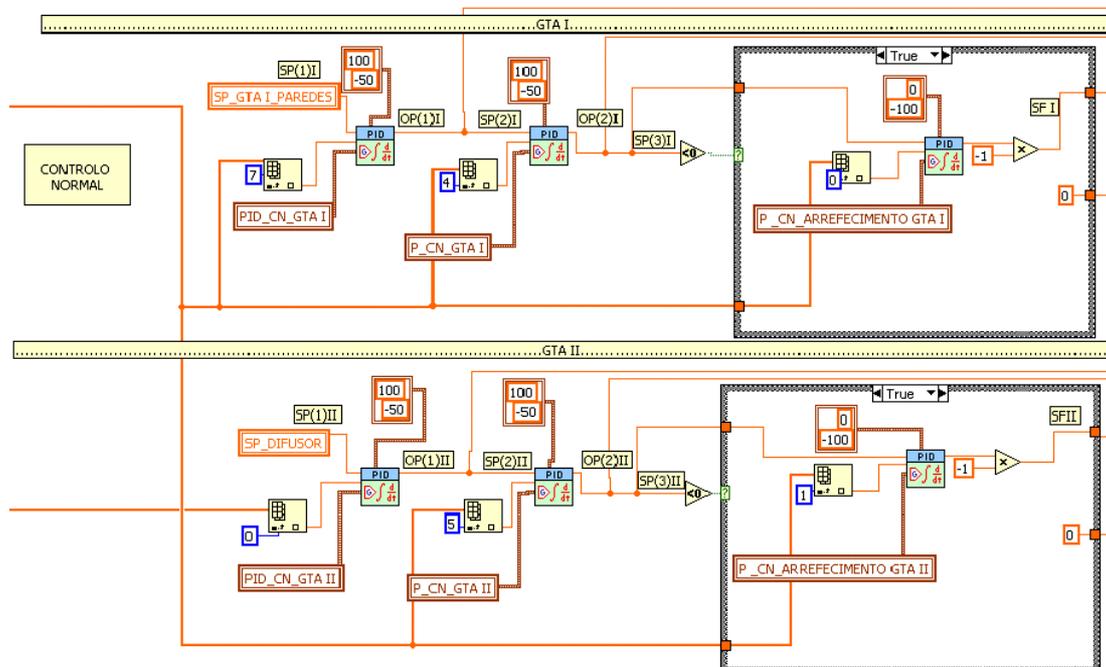


Figura 5.5. Estrutura responsável pela ordem de controlo dos GTAs I e II

Em seguida, o sinal processado é enviado para as placas de controlo, de forma a actuar sobre os equipamentos pretendidos. No final, os dados respeitantes a este ciclo são guardados.

A terceira e última parte do programa é a responsável pela paragem do mesmo, bastando, para o efeito, seleccionar o botão “STOP” no painel frontal (vd. Figura 5.6).

5.4. Descrição das funcionalidades e procedimentos de utilização do programa desenvolvido

Neste programa é possível observar várias melhorias em relação ao até aqui existente.

Ressalta, desde logo, o novo aspecto gráfico, melhorado, como se pode observar pelo painel frontal, apresentado na figura 5.5. Este painel foi concebido com o intuito de permitir ao utilizador, mesmo que pouco familiarizado com os equipamentos, uma fácil utilização e monitorização.

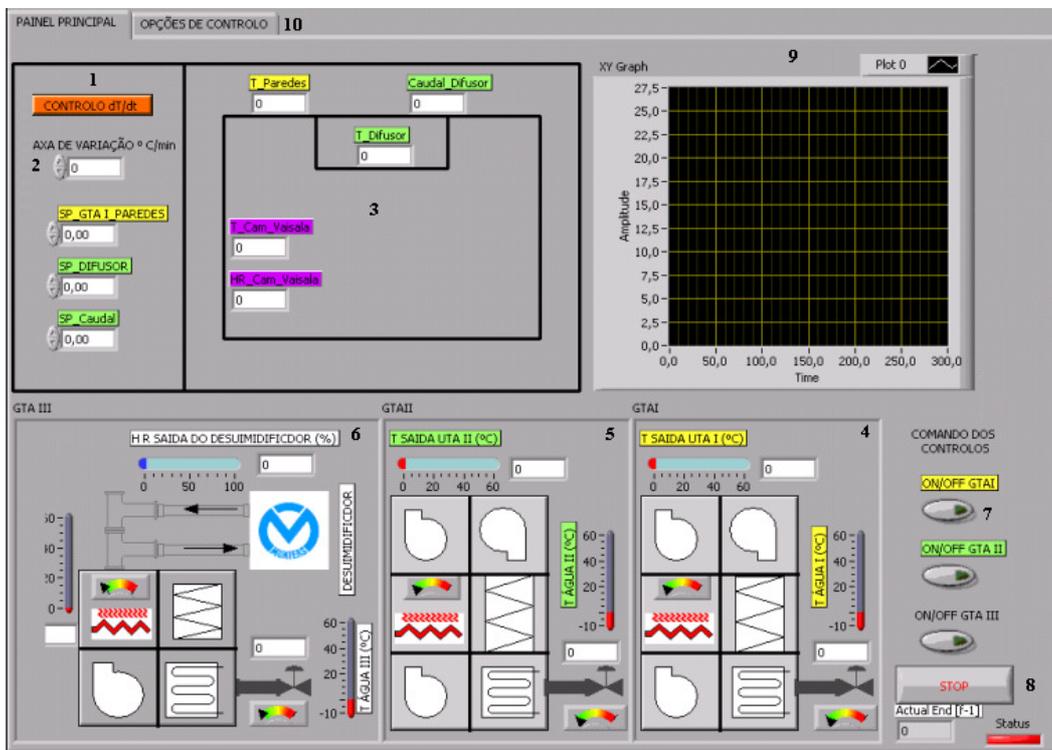


Figura5.6. Painel frontal do programa de controlo

Legenda:

- 1 Botão de controlo onde se opta pelo controlo de temperatura ou controlo da variação de temperatura
- 2 Botões de setpoint dos diferentes parâmetros a controlar na câmara
- 3 Conjunto de indicadores referente aos valores dos parâmetros lidos no interior da câmara
- 4 Mostrador no qual se monitoriza o GTA I
- 5 Mostrador no qual se monitoriza o GTA II
- 6 Mostrador no qual se monitoriza o GTA III
- 7 Conjunto de botões onde se accionam os GTAs I, II e III
- 8 Botão de STOP, responsável pela paragem do programa
- 9 Indicador gráfico da evolução da temperatura no interior da câmara
- 10 Separador de acesso às constantes dos modos de controlo

O modo de operar com este painel de controlo é bastante simples, devendo-se, para o efeito, seguir os próximos passos:

1. Seleccionar entre o modo de controlo de temperatura e o de controlo por variação de temperatura, clicando no botão 1 indicado na figura 5.5;
2. Introduzir os valores de Setpoint dos parâmetros que se pretende controlar, utilizando os botões assinalados pelo número 2 na figura anterior;
3. Seleccionar, recorrendo ao conjunto de botões referentes ao número 7 da figura 5.5, os equipamentos que se pretendem controlar e monitorizar.

Só após este procedimento é que é aconselhável iniciar o programa, clicando no botão “run” do “front panel”, pondo assim em funcionamento o ciclo de controlo.

Para além deste interface mais agradável e de fácil manuseamento, foram implementadas algumas melhorias no que respeita à aquisição de dados e na parte responsável pelo controlo, como se poderá observar de seguida.

De forma a melhorar a aquisição de sinal, tentando diminuir as oscilações provocadas por outros equipamentos eléctricos, foi implementado um filtro (um dos objectos pré-definidos no LabVIEW), para eliminar as frequências superiores a 50 Hz, responsáveis por este fenómeno.

São adquiridas 250 amostras por segundo, a uma taxa de aquisição de sinal de 1kHz por canal, o que leva a que a aquisição seja efectuada em $\frac{1}{4}$ segundo, podendo ser o processamento de dados e o controlo executados em $\frac{3}{4}$ de segundo. Assegura-se, assim, que o ciclo se cumpra em 1 segundo, aproximadamente.

Em relação à parte de controlo do programa propriamente dita, a melhoria mais significativa é o facto de se implementar uma rotina que possibilita o controlo da variação da temperatura em função do tempo, ou seja, o utilizador em vez de definir como Setpoint uma temperatura (°C), pode escolher usar uma taxa de aquecimento/arrefecimento (°C/min).

Existe, igualmente, a possibilidade de guardar ficheiros, relativos ao comportamento térmico dos equipamentos, que podem ser utilizados para tratamento posterior.

CAPÍTULO SEIS

Avaliação dos métodos de controlo

6.1. Introdução

O novo programa de controlo possibilita ao utilizador actuar sobre a temperatura da câmara, através da variação de temperatura. Este desafio surgiu com a necessidade de se realizarem ensaios na câmara em situações de regime transitório.

Neste modo de controlo, o utilizador, em vez de definir um Setpoint de temperatura para aquecer ou arrefecer a câmara (°C), impõe uma taxa de aquecimento/arrefecimento (°C/min). Isto tem como finalidade permitir o aquecimento/arrefecimento da câmara de forma constante.

De forma a estabelecerem-se valores limites da taxa aquecimento/arrefecimento a impor ao utilizador, foram realizados alguns ensaios de aquecimento e arrefecimento na câmara climática. É importante, desde já, referir que os valores limite estabelecidos são referentes às condições em que se realizam os ensaios, não sendo obrigatório limitar as taxas a estes valores, em situações de utilização diferentes.

Para além disso, estes ensaios permitem observar o comportamento da câmara e dos seus equipamentos, nas situações de aquecimento e arrefecimento.

6.2. Ensaio de Aquecimento

No ensaio de aquecimento efectuado na câmara climática presente no LAI só foi utilizado o GTA II, dado que os outros grupos se encontravam indisponíveis por motivos técnicos. Este ensaio foi realizado num dia de Verão ameno, com a temperatura no exterior e interior da câmara a rondar os 25° C e os 23,6 °C, respectivamente. De salientar, ainda, que o pavimento da câmara se encontrava parcialmente removido

Neste teste utilizou-se o programa de controlo de variação da temperatura, por forma a testar a sua funcionalidade. Para que os equipamentos de aquecimento do ar funcionem na sua máxima potência, introduziu-se, como valor de Setpoint uma taxa de aquecimento suficientemente elevada, de 1°C/min.

O ensaio durou cerca de 88 minutos e dos resultados obtidos, que se encontram no ANEXO III, foi possível obter o seguinte gráfico de temperaturas:

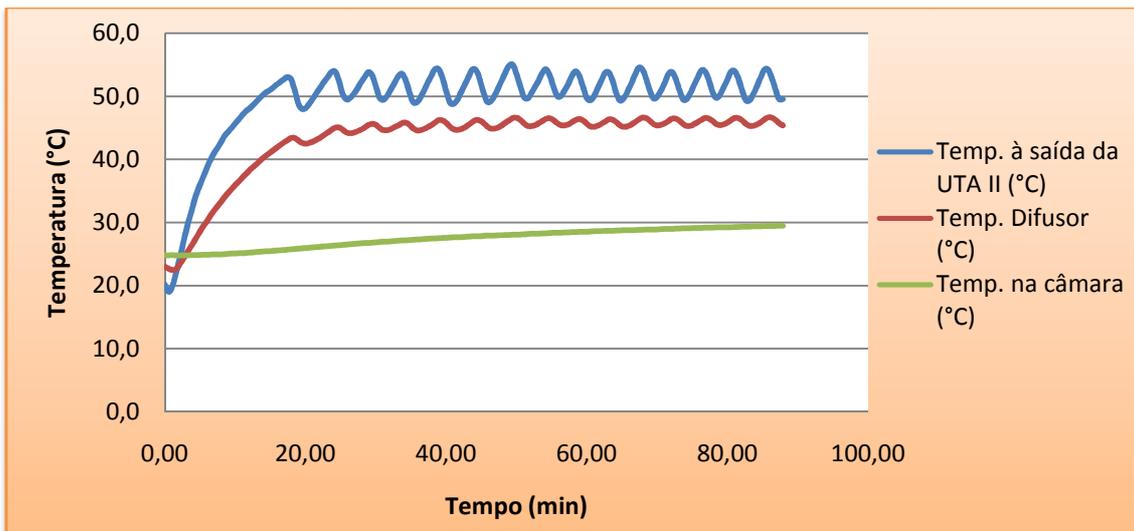


Gráfico 6.1. Comportamento característico de uma situação de aquecimento só com o GTA II ligado.

Da análise do gráfico é possível observar que, aproximadamente, a partir dos 17 minutos, a temperatura à saída da UTA varia periodicamente, até ao fim do ensaio, entre os 49°C e os 53°C. Tal fenómeno verifica-se porque o sistema de segurança das resistências, que é independente do programa, é activado em situações de aquecimento extremo, sendo desactivado posteriormente, quando as resistências arrefecem. Essa oscilação também se reflecte no difusor, dado que é um equipamento de pequenas dimensões.

As temperaturas entre a saída da UTA II e o difusor apresentam diferenças de temperatura na ordem dos 10°C, o que ocorre porque a temperatura no interior das condutas, que ligam a UTA II e o difusor, é maior que a temperatura do exterior, originando perdas térmicas.

Relativamente ao aumento da temperatura da câmara, quando comparado com o aquecimento do difusor, verifica-se que o aquecimento é muito mais lento: a câmara demora 88 minutos a aquecer 4,7°C, enquanto que o difusor demora 18,5 minutos a aquecer 23,4°C. Tal é consequência da câmara possuir um volume muito superior ao do difusor e, então, necessita que se insuffle ar quente para o seu interior durante mais tempo.

Tendo por base estes resultados, conclui-se que, utilizando unicamente o GTA II para aquecer a câmara, seria necessário que este funcionasse muito mais tempo para elevar a temperatura acima dos 30°C. Esta situação seria completamente diferente se o GTA II funcionasse em conjunto com o GTA I, o que possibilitaria o aumento da taxa de aquecimento, em cerca do dobro, em relação à situação presenciada.

6.3. Ensaio de Arrefecimento

O ensaio de arrefecimento, utilizando apenas o GTA II, realizou-se depois do ensaio de aquecimento, quando se registavam temperaturas de 29,2 °C no interior da câmara climática. A temperatura exterior era bastante próxima da registada no primeiro ensaio e o piso da câmara encontrava-se disposto da mesma forma.

De igual modo também se utilizou o programa de controlo de variação da temperatura, só que desta vez, impôs-se uma taxa de arrefecimento, como setpoint bastante baixa, de -1°C/min, possibilitando, desta forma, que os equipamentos responsáveis pelo arrefecimento do ar funcionem na sua máxima capacidade de refrigeração.

A duração do ensaio foi de aproximadamente 123 minutos e, dos valores registados, que se podem consultar no ANEXO IV, obteve-se o seguinte gráfico:

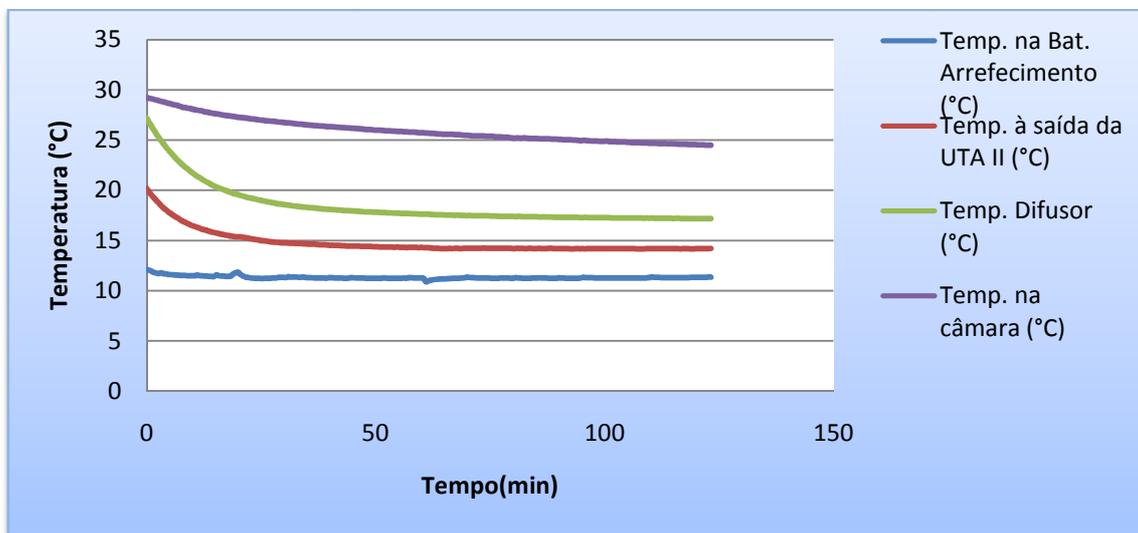


Gráfico 6.2. Comportamento característico de uma situação de arrefecimento só com o GTA II ligado

Numa primeira análise, pode-se dizer que a temperatura à saída da UTA II decresce rapidamente nos primeiros 30 minutos, pois a diferença de temperatura entre o ar oriundo da câmara é muito superior à temperatura a que se encontra a bateria de arrefecimento, ou seja, nesse primeiro momento, o ar tem perdas térmicas mais acentuadas dada a diferença de temperaturas que existe. Após esse momento inicial, a temperatura, à saída da UTA II, tende a estabilizar, fruto de uma menor diferença de temperaturas entre o ar de retorno e a bateria de arrefecimento. A situação ocorrida reflecte-se na temperatura à saída do difusor, que apresenta uma linha de tendência semelhante à da linha de arrefecimento que caracteriza a evolução do arrefecimento do ar à saída da UTA II.

Numa situação ideal, quando existe um certo equilíbrio térmico, a temperatura à saída da UTA II e do difusor deveria ser próxima da temperatura da bateria de arrefecimento. No

entanto, a temperatura à saída da UTA II difere cerca de 4°C em relação ao valor lido na bateria de arrefecimento. Isto ocorre, em parte, porque os motores responsáveis pela recirculação do ar libertam calor, aquecendo-o. O difusor apresenta diferenças, em média, de 4°C e 8 °C em relação ao valor de temperatura registado à saída da UTA II e da bateria de arrefecimento, respectivamente, pois adicionam-se os ganhos térmicos originados pelas trocas de calor entre as condutas e o ar exterior.

Quando se compara o arrefecimento existente no difusor com o que ocorre na câmara, pode-se dizer que o difusor demora 33 minutos a arrefecer 8,8°C, numa situação de arrefecimento rápido, enquanto a câmara demora 123 minutos a arrefecer 4,7°C. Mais uma vez esta disparidade de valores é consequência da câmara possuir um maior volume que o difusor.

Por último, e não menos importante, note-se que a bateria de arrefecimento estava a funcionar apenas a 11°C, influenciando os resultados aqui obtidos, pois pretendia-se que esta funcionasse com valores de temperatura mais baixos.

6.4. Métodos de monitorização e controlo da variação da temperatura

A par da realização dos últimos ensaios, em que se pretendiam encontrar os valores limite de variação de temperatura para a situação descrita, foram testados alguns métodos de monitorização de variação da temperatura, com o intuito de calcular a taxa de aquecimento/arrefecimento que seria o valor de comparação com o Setpoint de variação de temperatura, previamente definido, i. e., o erro do primeiro controlador seria dado pela diferença entre o Setpoint (em taxa de aquecimento/arrefecimento) e o valor de variação de temperatura calculado pelo método escolhido para a monitorização da variação da temperatura.

Desde logo, na escolha dos métodos a utilizar para monitorizar a variação da temperatura, encontraram-se algumas dificuldades devidas às pequenas oscilações existentes, resultantes de ruído e erros de conversão analógica/digital. Tentou-se encontrar um valor que minimizasse todas estas interferências, de forma a encontrar o valor mais próximo de uma conversão ideal.

Supondo que, no comportamento da câmara numa situação de aquecimento a 100%, a taxa média de aquecimento é, aproximadamente, de 0,001 °C/s, o que, em tensão, corresponde a cerca de $2,67 \times 10^{-5}$ V, considerando o sistema estável, demora entre 3s a 6s a registar uma variação de temperatura significativa, isto porque o incremento mínimo de temperatura

monitorizado no computador está dependente da resolução⁷ máxima da placa ou seja o range a dividir pela resolução:

$$resolução = \frac{V}{2^{n \text{ bit}}} = \frac{(5 - (-5))}{2^{16}} \approx 1,526 \times 10^{-4}(V) \quad (6.1)$$

Para evitar tais situações e de acordo com o método utilizado, havia duas opções: uma era calcular um valor de referência, para utilizar no ciclo de controlo, baseado na média aritmética da temperatura dos últimos 6s, considerando-se este como o intervalo de tempo adequado para retirar os números de pontos a utilizar; outra era criar uma lista com um número de pontos a partir da leitura directa e, assim, possibilitar vários registos de forma a poder notar-se as variações de temperatura significativas. Para tal, tem de se ter sempre em atenção o número de pontos que se vai usar, devendo ser o menor possível, para evitar que o estado actual do sistema perca influência, porque, senão, poderia existir uma reacção inadequada na ordem de controlo.

Testaram-se então os métodos para obter a taxa de aquecimento/arrefecimento do sistema que será utilizada para comparar com o valor de referência (Setpoint).

6.4.1. Primeiro Método

Utilizou-se a função do método dos mínimos quadrados pré-definida no LabVIEW, para a qual se construiu uma lista de pontos, que constitui um historial de temperaturas nos últimos n segundos. Esta lista é inserida na função referida para obter a taxa de aquecimento em função do tempo decorrido (declive da recta).

6.4.2. Segundo Método

De igual modo, tal como no método anterior, recorreu-se a uma função pré-definida no LabVIEW. Essa função calcula a derivada da temperatura em ordem ao tempo (dT(t)/dt). Utilizou-se a mesma lista feita anteriormente para o método dos mínimos quadrados e, para tal, dentro da função, optou-se por fazer-se a análise por segmento, pois só assim se pode executar esta tarefa.

Neste método, apenas são incluídos valores de temperatura, o que leva a que se considerem os pontos inseridos como equidistantes, sendo, assim, perdida a referência de tempo em que estes valores foram adquiridos, uma vez que a própria função define o tempo

⁷ Resolução é o menor incremento do sinal de entrada que provoca oscilações no sinal de saída (Gameiro 2007).

de entrada dos pontos. Esta solução, actuando deste modo, adultera os valores das taxas, tornando-as menos precisas.

6.4.3. Terceiro Método

Foi elaborada uma função no programa de controlo, que calcula o declive (m) de uma recta que passa por dois pontos distintos: um ponto dado no instante e um ponto anterior, que se distanciam n segundos. Esta função define-se pela seguinte equação:

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{T_i - T_{(i-n)}}{t_i - t_{(i-n)}} \text{ (}^\circ\text{C/s)} \quad (6.2)$$

Este método tem como inconveniente de, caso existam perturbações no sistema, as replicar n segundos depois, mesmo que este já tenha recuperado o equilíbrio.

6.4.4. Método escolhido

Dos três métodos apresentados, aquele que apresentar as leituras de variação da temperatura deve mais estáveis, deve ser o escolhido e, por conseguinte, o que deve ser implementado no programa. Nos ensaios realizados com os diferentes métodos estão representados no seguinte gráfico:

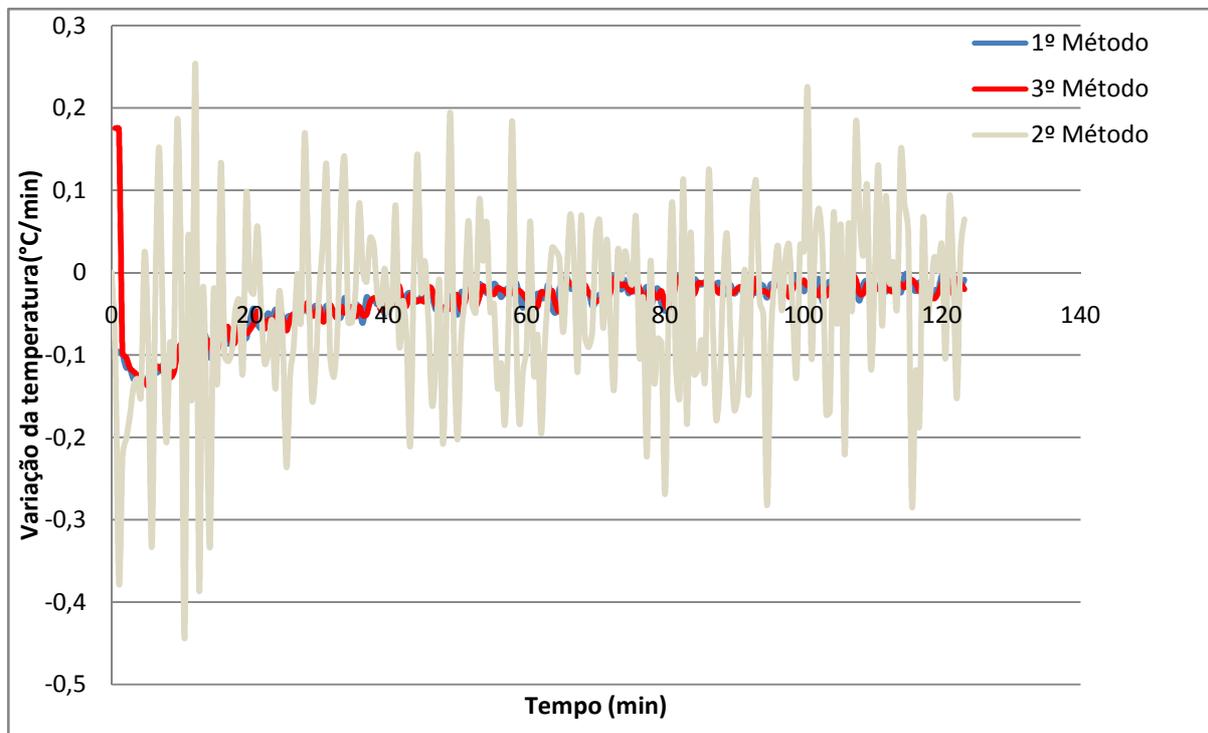


Gráfico 6.3-Varição da temperatura utilizando diferentes métodos método numa situação de arrefecimento

O que se deseja é que o valor de variação da temperatura de saída calculado pelo método seja o mais estável e que reflecta, o melhor possível, o momento actual de resposta do sistema. Por isso, e fazendo uma primeira análise dos resultados exclui-se de imediato o segundo método, porque nesta situação de arrefecimento, quase ciclicamente, alternava entre valores positivos e negativos, em vez de manter valores negativos que é o que se pretende quando se obtêm taxas de arrefecimento.

Da observação do gráfico pode-se admitir que, tanto o 1º método, como o 2º método, poderiam ser implementados no programa. Todavia, a escolha recaiu sobre o 1º método, o método dos mínimos quadrados, visto que, de um modo geral, será aquele que apresenta menos oscilações. A exclusão do terceiro método deve-se, sobretudo, ao facto de, como já foi dito anteriormente, ter como inconveniente, no caso de existirem perturbações no sistema, as replicar n segundos depois, mesmo que este já tenha recuperado o equilíbrio.

Porém, há que ter em atenção que, para o método escolhido, deve-se usar um número adequado de elementos na lista que se cria para dar entrada nesta função, pois, relembra-se, um número muito elevado de números na lista faz com que o estado actual do sistema perca influência. O oposto, i.é., uma lista reduzida de números, origina oscilações frequentes na taxa de comparação com o Setpoint. Considera-se razoável uma lista com a dimensão de 60 pontos.

CONCLUSÃO

Atentos os objectivos primeiros deste trabalho, pode dizer-se que o programa beneficiou de algumas melhorias substanciais, quer gráficas, quer estruturais e que facultam um melhor aproveitamento na óptica do utilizador.

O programa, essencialmente, tal como o anterior, só ficou a controlar os GTAs I e II, não sendo possível, por motivos alheios ao autor, estender a sua aplicação ao controlo do GTA III (que se encontra em manutenção), desumidificador (que se encontra acoplado ao GTA III e que, por isso, não funciona sem ele) e humidificador (que não se encontra ligado às condutas de admissão de ar para o interior da câmara).

Dado que o programa se encontra compilado em LabVIEW, isso, só por si, constitui uma vantagem, pois, além de ser um instrumento moderno e utilizado pela indústria, permitiu melhorar a forma de controlo dos GTAs I e II.

O algoritmo construído possibilitou organizar todo o programa em função da sequência que o autor achou mais apropriada para a execução do controlo: 1.º - aquisição de dados; 2.º - processamento da ordem de controlo; 3.º - envio da ordem de controlo; 4.º - gravação de dados, o que tornou o programa muito mais funcional.

Na parte referente aos modos de controlo usados, não foi necessário fazer qualquer tipo de alteração em relação aos que já existiam, ou seja, não foi forçoso encontrar novas constantes de controlo (PID – K_p , T_i , T_d ; P - K_p), pois verificou-se que as que aí se encontravam eram adequadas a qualquer tipo de desempenho.

A grande novidade é, para além do controlo de temperatura já existente, a implementação de uma opção de controlo por taxa de aquecimento/arrefecimento em função do tempo, possibilitando, então, aquecer/arrefecer sem necessidade de impor um patamar de temperatura. No que concerne ao uso desta funcionalidade, faltam testar as taxas máximas de aquecimento e arrefecimento, que são possíveis de implementar, quando os GTAs I e II trabalham em simultâneo, já que, infelizmente, ocorreu uma avaria no GTA I que inviabilizou a realização destes testes e que não foi possível sanar até ao momento de entrega desta dissertação.

Uma vez que as condutas não possuem o isolamento adequado, nota-se que todo o sistema tem grandes perdas térmicas, que se transformam no grande obstáculo na tentativa de implementar um sistema de controlo totalmente eficiente em razão da taxa de aquecimento/arrefecimento.

Outra das limitações deste sistema consiste no facto dos valores de monitorização da variação da temperatura, os quais são utilizados para comparar com o Setpoint, serem “gerados” pelo método dos mínimos quadrados (ferramenta pré-definida do LabVIEW), que utilizam uma lista de n pontos, respeitante a n segundos anteriores. Por conseguinte, o ciclo de controlo é atrasado, mesmo que se usem poucos pontos.

Em suma, apesar das limitações materiais com que se deparou, o autor considera que o trabalho executado foi bastante proveitoso e que fará com que sejam mais e melhor aproveitadas as potencialidades da câmara, sendo certo que só o serão em pleno quando todos os seus componentes se encontrarem totalmente funcionais. Sugere-se que, quando este estado de funcionamento se verificar, sejam feitas novas calibrações aos sensores, melhorias no isolamento das condutas que estão ligadas à câmara e que se execute uma manutenção mais periódica em alguns equipamentos.

BIBLIOGRAFIA

- Arundel, Anthony V. et al. “*Indirect Health effects of relative humidity in indoor environments*”. Environmental Health Perspectives, vol. 65, pp.351-361, 1986.
- ASHRAE. “*ASHRAE Handbook off Fundamentals*”. ASHRAE, Atlanta, 1989.
- Curtis, D. Johnson. “*Controlo de Processos: Tecnologia da Instrumentação*”. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, Janeiro de 1990.
- Decreto-Lei nº 80/2006 de 4 de Abril. “*Regulamento das características de comportamento térmico dos edifícios*”
- Gagge, A. P.; J. A. J. Stolwijk; J. D. Hardy. *Comfort and thermal sensations and associated physiological responses at various ambient temperatures*. Environmental Research, vol. 1 (1), 1967, pp. 1-20 (citado por Landsberg, 1972).
- Gameiro, M. “*Texto didáctico*”, cadeira de Instrumentação e medida, MCGS, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Portugal, 2007.
- Gaspar, A. M. R. “*Integração de parâmetros do clima no estudo do habitat – Caracterização bioclimática. Elaboração de um ano climático de referência. Modelação de condições de ocorrência de stress térmico.*”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica na especialidade de Climatização e Ambiente, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Portugal, 1996.
- Gaspar, A. M. R. “*Contribuição para o estudo de ambiente térmicos interiores – A dimensão do indivíduo e do edifício: da experimentação à modelação*”, Dissertação de Doutoramento em Engenharia Mecânica na especialidade de Climatização e Ambiente, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Portugal, 2004.

- Harrison, L. P. *Fundamental Concepts and definitions relating to humidity. In humidity and moisture measurement and control in science and industry*, 3:289. A. Wexler and W. H. Wildhack, eds. New York, Reinhold Publishing Corp., 1965(citado por Gaspar 1996).
- Hyland, R. W. et A. Wexler. *Formulations for the Thermodynamic properties of the Saturated Phases of H₂O from 173.15 K to 473.15 K*. ASHRAE Transactions 89 (2A), 1983, pp. 500-519(citado por ASHRAE, 1989).
- ISO 7730. “*Moderate thermal environments - Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort*”, 1994.
- Landsberg, H. E. *The Assessment of Human Bioclimate*. Technical Note n° 123, Geneva, WMO, 1972(citado por Gaspar 1996).
- Mendes, J. C. ; M. R. Guerreiro; C. A. Santos; J. A. Paiva. *Temperaturas Exteriores de Projecto e Números de Graus- Dias*. Lisboa, Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica/Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1989 (citado por Gaspar 1996).
- Ogata, K. “*Engenharia de Controlo Moderno*”, Prentice-Hall, 1993.
- Oliveira Fernandes, E. et E. Maldonado. *Características de Comportamento Térmicos dos Edifícios*. Porto, INEGI, 1990 (citado por Gaspar 1996).
- P. O. Fanger. *Air Humidity, Comfort and health*. XVI International Congress of Refrigeration, Proceedings Tome V, Paris, 1983 (citado por Gaspar 1996).
- Ren, He-Sheng. “*Construction of a generalized psychrometric chart for different pressures*”. The International Journal of Mechanical Engineering Education, Volume 32, Julho 2004, pp. 212-222.
- Tselepidaki, I. et M. Santamouris. *Statistical and persistence analysis of high summer ambient temperatures in Athens for cooling purposes*. Energy and Buildings, vol. 18, 1991, pp.243-251. (citado Gaspar 1996).

ANEXOS

Tabela I. 1 – Sinais de entrada no sistema de controlo (DEV1)

FONTE	TIPO DE SINAL	DESIGNAÇÃO	CONDUTORES	LIGADORES	TERMINAIS	CANAL NA PLACA	TIPO DE LIGAÇÃO	ESTADO
GTA I	Temperatura da água à saída da bateria de arrefecimento I	Tag I	VERDE	A-1	68	AI0	NRSE	LIGADO
			AZUL	GND	AI-SENSE-62			
GTA II	Temperatura da água à saída da bateria de arrefecimento II	Tag II	VERDE	A-3	33	AI1	NRSE	LIGADO
			AZUL	GND	AI-SENSE-62			
GTA III	Temperatura da água à saída da bateria de arrefecimento III	Tag III	VERDE	A-5	65	AI2	NRSE	LIGADO
			AZUL	GND	AI-SENSE-62			
GTA IV	Temperatura da água à saída da bateria de arrefecimento IV	Tag IV	VERDE	A-7	30	AI3	NRSE	LIGADO
			AZUL	GND	AI-SENSE-62			
GTA I	Temperatura do ar à saída do GTA I	Tar I	LARANJA	A-9	28	AI4	NRSE	LIGADO
			AMARELO	GND	AI-SENSE-62			
GTA II	Temperatura do ar à saída do GTA II	Tar II	LARANJA	A-11	60	AI5	NRSE	LIGADO
			AMARELO	GND	AI-SENSE-62			
GTA III	Temperatura do ar à saída do GTA III	Tar III	LARANJA	A-13	25	AI6	NRSE	LIGADO
			AMARELO	GND	AI-SENSE-62			
GTA I	Temperatura das paredes da câmara	T Paredes	LARANJA	A-15	57	AI7	NRSE	LIGADO
			AMARELO	GND	AI-SENSE-62			
GTA I	Caudal do ar na conduta II	Cd I		A-2	34	AI8	NRSE	DESLIGADO
				GND	AI-SENSE-62			
GTA II	Caudal do ar na conduta I	Cd II		A-4	66	AI9	NRSE	DESLIGADO
				GND	AI-SENSE-62			
				A-6	31	AI10	NRSE	DISPONIVEL
				GND	AI-SENSE-62			
				A-8	63	AI11	NRSE	DISPONIVEL
				GND	AI-SENSE-62			
				A-10	61	AI12	NRSE	DISPONIVEL
				GND	AI-SENSE-62			
				A-12	26	AI13	NRSE	DISPONIVEL
				GND	AI-SENSE-62			
				A-14	58	AI14	NRSE	DISPONIVEL
				GND	AI-SENSE-62			
				A-16	23	AI15	NRSE	DISPONIVEL
				GND	AI-SENSE-62			

Tabela I. 2 - Sinais de entrada no sistema de controlo (DEV2)

FONTE	TIPO DE SINAL	DESIGNAÇÃO	CONDUTORES	LIGADORES	TERMINAIS	CANAL NA PLACA	TIPO DE LIGAÇÃO	ESTADO
GTA I	Temperatura à saída do difusor da câmara	Tdif	VERMELHO	B-1	68	AI0	NRSE	LIGADO
			AZUL	GND	AI-SENSE-62			
GTA II	Caudal à saída do difusor	Cdif	CINZENTO	B-3	33	AI1	NRSE	LIGADO
			BRANCO	GND	AI-SENSE-62			
				B-5	65	AI2	NRSE	DISPONIVEL
				GND	AI-SENSE-62			
				B-7	30	AI3	NRSE	DISPONIVEL
				GND	AI-SENSE-62			
				B-9	28	AI4	NRSE	DISPONIVEL
				GND	AI-SENSE-62			
				B-11	60	AI5	NRSE	DISPONIVEL
				GND	AI-SENSE-62			
				B-13	25	AI6	NRSE	DISPONIVEL
				GND	AI-SENSE-62			
				B-15	57	AI7	NRSE	DISPONIVEL
				GND	AI-SENSE-62			
				B-2	34	AI8	NRSE	DISPONIVEL
				GND	AI-SENSE-62			
				B-4	66	AI9	NRSE	DISPONIVEL
				GND	AI-SENSE-62			
				B-6	31	AI10	NRSE	DISPONIVEL
				GND	AI-SENSE-62			
				B-8	63	AI11	NRSE	DISPONIVEL
				GND	AI-SENSE-62			
				B-10	61	AI12	NRSE	DISPONIVEL
				GND	AI-SENSE-62			
				B-12	26	AI13	NRSE	DISPONIVEL
				GND	AI-SENSE-62			
Câmara	Humidade da Câmara (Sonda Vaisala)	Hcâm	Azul	B-14/24V	58	AI14	NRSE	LIGADO
			Verde	GND	AI-SENSE-62			
			Neutro					
Câmara	Temperatura da Câmara (Sonda Vaisala)	Tcâm	Vermelho	B-16	23	AI15	NRSE	LIGADO
			Amarelo	GND	AI-SENSE-62			
			Neutro					

ANEXO II

Tabelas II. 1, II.2, II.3, II.4 – Tabelas de sinais de saída do sistema de controlo

Placa A
Ref.ª 2815
Endereço Base 224 J1

Destino	Tipo de Sinal	Designação	Condutores	Terminais	Canal/LabVIEW
GTA I	Controlo da abertura da válvula reguladora de caudal do GTA I	Válv. I	Preto	1	0
			Vermelho	9	
GTA II	Controlo da abertura da válvula reguladora de caudal do GTA II	Válv. II	Preto	3	1
			Vermelho	9	
GTA III	Controlo da abertura da válvula reguladora de caudal do GTA III	Válv. III	Preto	5	2
			Vermelho	9	
GTA IV	Controlo da abertura da válvula reguladora de caudal do GTA IV	Válv. IV	Preto	7	3
			Vermelho	9	

Placa A
Ref.ª 2815
Endereço Base 224 J2

Destino	Tipo de Sinal	Designação	Condutores	Terminais	Canal/LabVIEW
				1	4
				9	
GTA I	Controlo da potência da resistência de aquecimento do GTA I	Re I	Amarelo	3	5
			Laranja	9	
GTA II	Controlo da potência da resistência de aquecimento do GTA II	Re II	Azul	5	6
			Verde	9	
				7	7
				9	

Placa B
 Ref.º 2815
 Endereço Base 226 J1

Destino	Tipo de Sinal	Designação	Condutores	Terminais	Canal/LabVIEW
GTA I	Controlo do caudal do ventilador do GTA I	V I	Preto	1	0
			Vermelho	9	
GTA II	Controlo do caudal do ventilador do GTA II	V II	Branco	3	1
			Cinzento	9	
GTA III				5	2
				9	
GTA IV				7	3
				9	

Placa B
 Ref.º 2815
 Endereço Base 226 J2

Destino	Tipo de Sinal	Designação	Condutores	Terminais	Canal/LabVIEW
GTA I				1	0
				9	
GTA II				3	1
				9	
GTA III				5	2
				9	
GTA IV				7	3
				9	

Tabela III.1 - Dados relativos ao ensaio de aquecimento da câmara

Temp. à saída da UTA II (°C)	Temp. Difusor (°C)	Temp. na câmara (°C)	Tempo (min)
20,2	23,0	24,8	0,00
19,0	22,7	24,8	0,57
19,9	22,5	24,8	1,09
22,0	22,7	24,8	1,62
24,4	23,4	24,8	2,15
27,0	24,3	24,8	2,68
29,4	25,3	24,8	3,20
31,5	26,3	24,8	3,73
33,6	27,2	24,8	4,25
35,4	28,2	24,9	4,78
36,8	29,1	24,9	5,30
38,2	30,0	24,9	5,83
39,6	30,8	24,9	6,36
40,8	31,8	24,9	6,91
41,7	32,5	25,0	7,44
42,7	33,2	25,0	7,96
43,7	34,0	25,0	8,49
44,4	34,7	25,0	9,01
45,0	35,4	25,1	9,54
45,7	36,0	25,1	10,06
46,4	36,6	25,1	10,59
47,1	37,2	25,2	11,12
47,7	37,8	25,2	11,64
48,2	38,4	25,3	12,17
48,8	38,9	25,3	12,69
49,4	39,4	25,3	13,22
50,0	40,0	25,4	13,74
50,5	40,5	25,4	14,27
50,9	40,9	25,5	14,80
51,3	41,4	25,5	15,32
51,8	41,8	25,6	15,85
52,2	42,3	25,6	16,37
52,7	42,7	25,7	16,90
53,0	43,0	25,7	17,43
52,7	43,4	25,8	17,95
51,0	43,4	25,8	18,48
48,8	43,0	25,9	19,00
48,0	42,6	25,9	19,53
48,1	42,5	26,0	20,05

48,9	42,6	26,0	20,58
49,7	42,9	26,1	21,11
50,6	43,2	26,1	21,63
51,5	43,5	26,2	22,16
52,3	43,9	26,2	22,68
53,1	44,3	26,3	23,21
53,9	44,7	26,3	23,74
53,9	45,0	26,4	24,26
52,4	45,1	26,4	24,79
50,3	44,7	26,4	25,31
49,5	44,3	26,5	25,84
49,7	44,2	26,6	26,36
50,4	44,3	26,6	26,89
51,3	44,5	26,6	27,42
52,3	44,7	26,7	27,95
53,1	45,1	26,7	28,47
53,8	45,5	26,8	28,99
53,2	45,6	26,8	29,52
51,5	45,5	26,9	30,04
49,7	45,0	26,9	30,57
49,4	44,6	27,0	31,10
50,1	44,6	27,0	31,62
51,0	44,8	27,0	32,15
52,1	45,1	27,1	32,67
53,1	45,4	27,1	33,20
53,6	45,7	27,2	33,72
52,5	45,8	27,2	34,25
50,7	45,5	27,2	34,78
49,1	44,9	27,3	35,30
49,0	44,6	27,3	35,83
49,8	44,6	27,3	36,35
51,0	44,8	27,4	36,88
52,2	45,1	27,4	37,41
53,3	45,5	27,5	37,93
54,3	45,9	27,5	38,46
54,2	46,3	27,5	38,98
52,8	46,2	27,6	39,51
50,8	45,8	27,6	40,03
49,0	45,2	27,6	40,56
48,8	44,8	27,7	41,09
49,5	44,7	27,7	41,61
50,6	44,8	27,7	42,14
51,9	45,1	27,7	42,66

53,1	45,5	27,8	43,19
54,2	45,9	27,8	43,71
54,2	46,3	27,8	44,24
52,8	46,2	27,8	44,77
50,7	45,8	27,9	45,29
49,2	45,2	27,9	45,82
49,2	44,9	27,9	46,34
50,1	44,9	28,0	46,87
51,2	45,1	28,0	47,40
52,5	45,4	28,0	47,92
53,8	45,8	28,0	48,45
54,8	46,2	28,0	48,97
55,0	46,6	28,1	49,50
53,5	46,6	28,1	50,02
51,6	46,3	28,1	50,55
49,9	45,7	28,2	51,08
49,6	45,3	28,2	51,60
50,4	45,3	28,2	52,13
51,5	45,4	28,2	52,65
52,5	45,7	28,3	53,18
53,8	46,1	28,3	53,70
54,3	46,4	28,3	54,23
53,2	46,5	28,3	54,76
51,5	46,2	28,4	55,28
50,0	45,7	28,4	55,81
50,0	45,4	28,4	56,33
50,9	45,4	28,4	56,86
52,0	45,6	28,5	57,38
53,2	45,9	28,5	57,91
53,9	46,3	28,5	58,44
53,2	46,4	28,5	58,96
51,5	46,2	28,6	59,49
49,7	45,7	28,6	60,01
49,4	45,2	28,6	60,54
50,1	45,2	28,6	61,07
51,3	45,4	28,6	61,59
52,6	45,7	28,7	62,12
53,7	46,0	28,7	62,64
53,7	46,4	28,7	63,17
52,4	46,3	28,7	63,69
50,4	45,9	28,7	64,22
49,3	45,4	28,8	64,75
49,7	45,2	28,8	65,27

50,7	45,3	28,8	65,80
52,0	45,5	28,8	66,32
53,3	45,9	28,8	66,85
54,5	46,3	28,9	67,37
54,3	46,6	28,9	67,90
52,9	46,6	28,9	68,43
51,0	46,2	28,9	68,95
49,7	45,6	28,9	69,48
49,9	45,4	28,9	70,00
50,9	45,5	29,0	70,53
52,1	45,7	29,0	71,05
53,4	46,1	29,0	71,58
53,9	46,5	29,0	72,11
52,8	46,5	29,0	72,63
51,0	46,2	29,1	73,16
49,5	45,6	29,1	73,68
49,5	45,3	29,1	74,21
50,5	45,3	29,1	74,74
51,8	45,6	29,1	75,26
53,0	45,9	29,1	75,79
54,1	46,3	29,2	76,31
53,9	46,6	29,2	76,84
52,6	46,5	29,2	77,37
50,7	46,1	29,2	77,89
49,7	45,6	29,2	78,42
50,2	45,4	29,3	78,94
51,4	45,6	29,3	79,47
52,6	45,8	29,3	80,00
53,9	46,2	29,3	80,52
54,0	46,6	29,3	81,05
52,8	46,5	29,3	81,58
50,9	46,2	29,3	82,10
49,4	45,7	29,3	82,63
49,3	45,3	29,4	83,15
50,3	45,3	29,4	83,68
51,6	45,5	29,4	84,20
52,9	45,9	29,4	84,73
54,2	46,3	29,4	85,25
54,2	46,7	29,5	85,78
52,9	46,6	29,5	86,31
51,1	46,3	29,5	86,84
49,6	45,8	29,5	87,36
49,5	45,4	29,5	87,88

Tabela IV. 1. Dados relativos ao ensaio de arrefecimento

Temp. na Bat. Arrefecimento (°C)	Temp. à saída da UTA II (°C)	Temp. Difusor (°C)	Temp. na câmara (°C)	Tempo (min)
12,1	20,2	27,2	29,2	0,00
12,0	19,9	26,8	29,2	0,53
11,9	19,5	26,4	29,1	1,05
11,8	19,3	26,0	29,1	1,58
11,7	19,0	25,6	29,0	2,10
11,7	18,7	25,3	28,9	2,63
11,8	18,5	24,9	28,9	3,16
11,7	18,3	24,6	28,8	3,69
11,7	18,1	24,3	28,7	4,21
11,6	17,9	24,0	28,7	4,74
11,6	17,7	23,8	28,6	5,26
11,6	17,5	23,5	28,5	5,79
11,6	17,4	23,2	28,5	6,31
11,5	17,2	23,0	28,4	6,84
11,5	17,1	22,7	28,4	7,36
11,5	16,9	22,5	28,3	7,89
11,5	16,8	22,3	28,2	8,42
11,5	16,7	22,1	28,2	8,94
11,5	16,6	21,9	28,2	9,47
11,5	16,5	21,8	28,1	9,99
11,5	16,4	21,6	28,0	10,52
11,5	16,3	21,4	28,0	11,05
11,5	16,2	21,3	27,9	11,57
11,5	16,1	21,1	27,9	12,10
11,5	16,1	21,0	27,8	12,62
11,4	16,0	20,8	27,8	13,15
11,4	15,9	20,7	27,7	13,68
11,4	15,9	20,6	27,7	14,20
11,4	15,8	20,4	27,7	14,73
11,6	15,7	20,3	27,6	15,25
11,5	15,7	20,2	27,6	15,78
11,5	15,6	20,1	27,5	16,31
11,4	15,6	20,1	27,5	16,83
11,4	15,5	20,0	27,4	17,36
11,4	15,5	19,9	27,4	17,88
11,5	15,4	19,8	27,4	18,41
11,7	15,4	19,7	27,4	18,93
11,8	15,4	19,6	27,3	19,46
11,8	15,4	19,6	27,3	19,99

11,6	15,4	19,5	27,3	20,51
11,5	15,3	19,4	27,2	21,04
11,4	15,3	19,4	27,2	21,56
11,3	15,3	19,3	27,2	22,09
11,3	15,2	19,2	27,1	22,61
11,2	15,2	19,2	27,1	23,14
11,2	15,1	19,1	27,1	23,67
11,2	15,1	19,1	27,0	24,19
11,2	15,0	19,0	27,0	24,72
11,2	15,0	19,0	27,0	25,24
11,2	15,0	18,9	27,0	25,77
11,2	14,9	18,9	26,9	26,30
11,2	14,9	18,8	26,9	26,82
11,3	14,9	18,8	26,9	27,35
11,3	14,8	18,7	26,9	27,87
11,3	14,8	18,7	26,8	28,40
11,3	14,8	18,6	26,8	28,92
11,3	14,8	18,6	26,8	29,45
11,3	14,8	18,6	26,8	29,98
11,3	14,8	18,5	26,7	30,50
11,4	14,7	18,5	26,7	31,03
11,3	14,7	18,5	26,7	31,55
11,4	14,7	18,4	26,7	32,08
11,4	14,7	18,4	26,6	32,60
11,3	14,7	18,4	26,6	33,13
11,3	14,7	18,4	26,6	33,66
11,4	14,7	18,3	26,6	34,18
11,3	14,7	18,3	26,5	34,71
11,3	14,6	18,3	26,5	35,23
11,3	14,6	18,3	26,5	35,76
11,3	14,6	18,3	26,5	36,29
11,3	14,6	18,2	26,4	36,81
11,3	14,6	18,2	26,4	37,34
11,3	14,6	18,2	26,4	37,86
11,3	14,6	18,1	26,4	38,39
11,2	14,6	18,1	26,4	38,91
11,2	14,5	18,1	26,3	39,44
11,3	14,5	18,1	26,3	39,97
11,3	14,5	18,1	26,3	40,49
11,3	14,5	18,1	26,3	41,02
11,3	14,5	18,0	26,3	41,54
11,3	14,5	18,0	26,3	42,07
11,2	14,5	18,0	26,3	42,59

11,2	14,5	18,0	26,2	43,12
11,2	14,5	18,0	26,2	43,65
11,2	14,5	18,0	26,2	44,18
11,3	14,5	18,0	26,2	44,70
11,3	14,5	17,9	26,2	45,22
11,3	14,4	17,9	26,2	45,75
11,3	14,4	17,9	26,1	46,28
11,3	14,4	17,9	26,1	46,80
11,2	14,4	17,9	26,1	47,33
11,2	14,4	17,9	26,1	47,85
11,2	14,4	17,9	26,0	48,38
11,2	14,4	17,8	26,0	48,90
11,2	14,4	17,8	26,0	49,43
11,2	14,4	17,8	26,0	49,95
11,2	14,4	17,8	26,0	50,48
11,2	14,4	17,8	26,0	51,01
11,2	14,4	17,8	26,0	51,53
11,2	14,4	17,8	25,9	52,06
11,2	14,4	17,8	25,9	52,58
11,2	14,3	17,8	25,9	53,11
11,2	14,3	17,7	25,9	53,64
11,2	14,3	17,7	25,9	54,16
11,2	14,4	17,7	25,9	54,69
11,2	14,3	17,7	25,9	55,21
11,2	14,3	17,7	25,9	55,74
11,2	14,3	17,7	25,8	56,26
11,2	14,3	17,7	25,8	56,79
11,3	14,3	17,7	25,8	57,32
11,3	14,3	17,7	25,8	57,84
11,3	14,3	17,7	25,8	58,37
11,3	14,3	17,7	25,8	58,89
11,2	14,3	17,6	25,7	59,42
11,2	14,3	17,6	25,7	59,95
11,2	14,3	17,6	25,7	60,47
10,9	14,3	17,6	25,7	61,00
11,0	14,3	17,6	25,7	61,52
11,0	14,3	17,6	25,7	62,05
11,1	14,2	17,6	25,7	62,57
11,1	14,2	17,6	25,6	63,10
11,1	14,2	17,6	25,6	63,63
11,2	14,2	17,6	25,6	64,15
11,2	14,2	17,6	25,6	64,68
11,2	14,2	17,6	25,6	65,20

11,2	14,2	17,5	25,6	65,73
11,2	14,2	17,5	25,6	66,26
11,2	14,2	17,5	25,6	66,78
11,2	14,2	17,5	25,5	67,31
11,2	14,2	17,5	25,5	67,83
11,2	14,2	17,5	25,5	68,36
11,3	14,2	17,5	25,5	68,90
11,3	14,2	17,5	25,5	69,43
11,3	14,2	17,5	25,5	69,95
11,3	14,2	17,5	25,5	70,48
11,3	14,2	17,5	25,4	71,01
11,3	14,2	17,5	25,4	71,53
11,3	14,2	17,5	25,4	72,06
11,3	14,2	17,5	25,4	72,58
11,3	14,2	17,5	25,4	73,11
11,3	14,2	17,5	25,4	73,63
11,2	14,2	17,5	25,4	74,16
11,2	14,2	17,5	25,4	74,69
11,2	14,2	17,4	25,4	75,21
11,2	14,2	17,4	25,4	75,74
11,2	14,2	17,4	25,3	76,26
11,2	14,2	17,4	25,3	76,79
11,3	14,2	17,4	25,3	77,32
11,3	14,2	17,4	25,3	77,84
11,3	14,2	17,4	25,3	78,37
11,2	14,2	17,4	25,3	78,89
11,2	14,2	17,4	25,2	79,42
11,2	14,2	17,4	25,2	79,94
11,3	14,2	17,4	25,2	80,47
11,3	14,2	17,4	25,2	81,00
11,2	14,2	17,4	25,2	81,52
11,2	14,2	17,4	25,2	82,05
11,2	14,2	17,4	25,2	82,57
11,2	14,2	17,4	25,2	83,10
11,2	14,2	17,4	25,2	83,62
11,3	14,2	17,4	25,2	84,15
11,3	14,2	17,4	25,2	84,68
11,2	14,2	17,4	25,2	85,20
11,3	14,2	17,4	25,1	85,73
11,3	14,2	17,4	25,1	86,25
11,2	14,2	17,4	25,1	86,78
11,2	14,2	17,3	25,1	87,31
11,2	14,2	17,4	25,1	87,83

11,2	14,2	17,3	25,1	88,36
11,2	14,2	17,3	25,1	88,88
11,2	14,2	17,3	25,1	89,41
11,3	14,2	17,3	25,1	89,94
11,3	14,2	17,3	25,1	90,46
11,2	14,2	17,3	25,0	90,99
11,2	14,2	17,3	25,0	91,51
11,2	14,2	17,3	25,0	92,04
11,2	14,2	17,3	25,0	92,56
11,2	14,2	17,3	25,0	93,09
11,2	14,2	17,3	25,0	93,62
11,2	14,2	17,3	25,0	94,14
11,2	14,2	17,3	24,9	94,67
11,3	14,2	17,3	25,0	95,20
11,3	14,2	17,3	25,0	95,74
11,3	14,2	17,3	24,9	96,26
11,3	14,2	17,3	24,9	96,80
11,3	14,2	17,3	24,9	97,33
11,3	14,2	17,3	24,9	97,86
11,3	14,2	17,3	24,9	98,39
11,3	14,2	17,3	24,9	98,93
11,3	14,2	17,3	24,9	99,47
11,3	14,2	17,3	24,9	100,00
11,3	14,2	17,3	24,9	100,54
11,3	14,2	17,3	24,8	101,08
11,3	14,2	17,3	24,9	101,62
11,3	14,2	17,3	24,8	102,16
11,3	14,2	17,3	24,8	102,69
11,3	14,2	17,2	24,8	103,22
11,3	14,2	17,3	24,8	103,75
11,3	14,2	17,2	24,8	104,29
11,3	14,2	17,2	24,8	104,83
11,2	14,2	17,2	24,8	105,36
11,2	14,2	17,2	24,8	105,90
11,3	14,2	17,2	24,8	106,44
11,3	14,2	17,2	24,8	106,98
11,3	14,2	17,2	24,7	107,52
11,3	14,2	17,2	24,7	108,05
11,3	14,2	17,2	24,7	108,59
11,3	14,2	17,2	24,7	109,13
11,3	14,2	17,2	24,7	109,67
11,4	14,2	17,2	24,7	110,22
11,3	14,2	17,2	24,7	110,76

11,3	14,2	17,2	24,7	111,30
11,3	14,2	17,2	24,7	111,84
11,3	14,2	17,2	24,7	112,38
11,3	14,2	17,2	24,7	112,92
11,3	14,2	17,2	24,6	113,46
11,3	14,2	17,2	24,6	114,00
11,3	14,2	17,2	24,6	114,54
11,3	14,2	17,2	24,6	115,08
11,3	14,2	17,2	24,6	115,61
11,3	14,2	17,2	24,6	116,16
11,3	14,2	17,2	24,6	116,69
11,3	14,2	17,2	24,6	117,24
11,3	14,2	17,2	24,6	117,77
11,3	14,2	17,2	24,6	118,31
11,3	14,2	17,2	24,5	118,86
11,3	14,2	17,2	24,5	119,40
11,3	14,2	17,2	24,5	119,94
11,3	14,2	17,2	24,5	120,47
11,3	14,2	17,2	24,5	121,01
11,3	14,2	17,2	24,5	121,56
11,3	14,2	17,2	24,5	122,10
11,3	14,2	17,2	24,5	122,65
11,3	14,2	17,2	24,5	123,19

Algoritmo do Programa de Controlo da Temperatura