

• U • C •

FCTUC

FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

# **Estudo experimental para a otimização e o controlo automático de uma cortina de ar**

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

**Autor**

**Simão Pedro Matos Veloso**

**Orientadores**

**Professor Doutor José Joaquim da Costa**

**Professor Doutor João Carlos Gonçalves**

**Júri**

<b>Presidente</b>	<b>Professor Doutor Manuel Carlos Gameiro da Silva</b> <b>Professor Associado com agregação da Universidade de Coimbra</b>
<b>Vogais</b>	<b>Professor Doutor António Manuel Gameiro Lopes</b> <b>Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra</b>
<b>Orientador</b>	<b>Professor Doutor José Joaquim da Costa</b> <b>Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra</b>

**Colaboração Institucional**

---



**Associação para o Desenvolvimento da  
Aerodinâmica Industrial**

**Coimbra, fevereiro, 2016**

*Para nós os grandes homens não são aqueles que resolveram os problemas, mas aqueles  
que os descobriram.*

Albert Schweitzer.

Aos meus pais e à Marta

## Agradecimentos

A realização desta dissertação apenas foi possível graças à contribuição e ao apoio de várias pessoas, às quais quero mostrar o meu agradecimento.

- Ao Professor Doutor José Joaquim da Costa e ao Professor Doutor João Carlos Gonçalves, pela contínua orientação prestada, não esquecendo o apoio, a amizade, a disponibilidade e a prontidão que sempre demonstraram.
- À Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial (ADAI), pelas condições de trabalho e pelo equipamento disponibilizado.
- A todos os meus colegas e investigadores da ADAI, pela ajuda e pelo apoio no decorrer desta dissertação e, em particular, ao Engenheiro João Carrilho e ao Doutor Mário Mateus.
- A todos os meus amigos que me acompanharam durante o meu percurso e, principalmente, aos que me apoiaram e incentivaram, de uma ou de outra forma, durante esta fase final do curso.
- A toda a minha família, principalmente os meus pais e irmã, que sempre estiveram a meu lado, ajudaram e apoiaram em tudo o que precisei. A eles ficarei sempre grato.



## Resumo

Sempre que se abre uma porta de acesso a um espaço climatizado ou a uma câmara frigorífica/refrigeração, ocorrem trocas de ar e de energia através dessa porta. Com o intuito de reduzir as perdas energéticas para o ambiente exterior, recorre-se frequentemente ao uso de dispositivos de cortinas de ar, utilizadas como barreiras aerodinâmicas. Estes equipamentos, quando corretamente dimensionados, são capazes de reduzir as trocas de energia em mais de 50%, e quando comparados com outros dispositivos, possuem a vantagem de permitir o livre acesso aos espaços climatizados/refrigerados.

Esta dissertação possui como objetivo, em primeiro lugar, o estudo experimental de um equipamento de cortina de ar de jato plano vertical e descendente, com vista à determinação da velocidade ótima do jato (que permite atingir a eficiência máxima de vedação), para diferentes configurações paramétricas; em seguida, pretende-se desenvolver e testar um sistema de controlo automático para a cortina de ar, com a capacidade de adaptação da velocidade do jato de ar às condições variáveis de cada lado da porta de acesso. Para tal, utilizou-se uma instalação laboratorial, constituída por duas salas contíguas de dimensões semelhantes, ligados por uma porta sobre a qual se encontra instalado um dispositivo de cortina de ar. Para o controlo e especificação das temperaturas ambiente nos espaços utilizou-se, na “sala fria”, uma unidade de refrigeração com o grupo evaporador/ventilador e um termoconvetor elétrico na “sala quente”, para simular o ambiente exterior de uma câmara refrigerada.

De forma a avaliar a capacidade de a cortina de ar minimizar as trocas de energia entre os dois espaços, *i.e.*, a fuga de frio da sala refrigerada, efetuaram-se ensaios experimentais com a cortina de ar acionada, tomando como referência os resultados dos ensaios com a cortina desligada, para cada configuração paramétrica. Neste estudo evidenciou-se que a velocidade ótima do jato depende significativamente da altura da porta e da diferença de temperatura entre as salas. Os resultados obtidos contribuíram para a proposta de uma correlação empírica para a velocidade ótima do jato em função destes dois parâmetros. Com base no estudo experimental, foi desenvolvido e testado um dispositivo eletrónico de controlo automático da velocidade do jato que permite que a cortina de ar se adapte autonomamente à variação das condições ambiente em simultâneo com um funcionamento próximo da eficiência máxima de vedação. Os ensaios realizados comprovaram os benefícios deste sistema, ainda que seja necessário efetuar melhorias.

**Palavras-chave:** Cortina de ar, Vedação aerodinâmica, Eficiência de vedação, Jato plano de ar, Velocidade ótima da cortina de ar, Controlo automático.



## Abstract

Every time a door is opened to access a climatized space or a freezing/refrigeration chamber, air and energy exchanges occur across the doorway. In order to reduce the energy losses to the outdoor ambient, air curtains are frequently used to act as aerodynamic barriers. When correctly dimensioned, these equipments are capable of reducing the energy exchanges over 50%, and when compared to other devices they have the advantage of allowing free access to climatized or refrigerated spaces.

The main objectives of the present dissertation are, first, to experimentally study a downward vertically-blowing air curtain device (ACD) aiming to determine the optimal jet velocity (that allows for the maximum sealing efficiency of a refrigerated chamber) in different parametric configurations; and then, to develop and test an automatic control system for the ACD that might adapt the jet velocity to variable conditions from each side of the doorway. For these purposes, a laboratorial set-up was used, composed by two contiguous rooms with similar dimensions, which are connected by a doorway having an air curtain device installed on top of it. For the control and specification of the ambient temperatures in the rooms, a refrigeration unit was used in the “cold room” with the evaporator/ventilator group, and an electric fan coil in the “warm room”, which simulates the outdoor ambient of a refrigerated chamber.

In order to evaluate the air curtain capacity of minimizing the energy exchanges between the two spaces, *i.e.*, the cold leakage from the refrigerated room, experimental tests were conducted with the ACD blowing, taking as a reference the results of the corresponding tests with the curtain turned off, for each parametric configuration. In this study, it was clear that the jet optimum velocity is significantly dependent on the doorway height and on the temperature difference between the two sides. The obtained results contributed to the proposal of an empiric correlation for the jet optimum velocity as a function of those two parameters. Based on this correlation, an electronic device was developed for the automatic control of the jet velocity, allowing the air curtain to adapt itself to variable ambient conditions while permanently work close to its optimal sealing efficiency. The tests conducted proved the benefits of this feature, although indicating the need of some improvements.

**Keywords** Air curtain, Aerodynamic sealing, Sealing efficiency, Plane air jet, Optimal velocity, Automatic control.



---

## Índice

Índice de Figuras .....	xi
Índice de Tabelas .....	xiii
Simbologia e Siglas.....	xv
Simbologia .....	xv
Siglas .....	xvi
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Enquadramento .....	1
1.2. Revisão bibliográfica .....	4
1.3. Motivação e objetivos .....	13
1.4. Estrutura do trabalho .....	13
2. INSTALAÇÃO E METODOLOGIAS EXPERIMENTAIS .....	15
2.1. Modelo laboratorial.....	15
2.1.1. Geometria e soluções construtivas .....	15
2.1.2. Equipamentos de tratamento do ar .....	16
2.2. Cortina de ar .....	17
2.2.1. Caracterização do equipamento .....	17
2.2.2. Sistema de controlo da velocidade do jato .....	18
2.3. Instrumentação e Técnicas .....	19
2.3.1. Medição da concentração de CO <sub>2</sub> .....	19
2.3.2. Sistema de aquisição de dados .....	23
2.3.3. Medição da temperatura do ar .....	24
2.4. Metodologia experimental .....	24
3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	27
3.1. Altura de porta de 1 m .....	28
3.2. Altura de porta de 1,5 m .....	29
3.3. Comparação e conjugação com resultados anteriores .....	32
3.4. Proposta de uma correlação empírica .....	33
4. SISTEMA DE CONTROLO AUTOMÁTICO DA CORTINA DE AR .....	37
4.1. Microprocessador.....	37
4.2. Desenvolvimento em Arduino .....	38
4.2.1. Controlo da velocidade do jato da cortina de ar .....	39
4.2.2. Medição da temperatura.....	40
4.3. Programação .....	41
4.4. Testes exploratórios .....	43
4.5. Notas conclusivas.....	46
5. CONCLUSÕES .....	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	49



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Cortina de jato vertical não recirculado: (a) descendente; (b) ascendente. ....	3
Figura 1.2. Cortina de ar horizontal, com jato (a) não recirculado e (b) recirculado (adaptada de Neto (2006)). ....	3
Figura 1.3. Desenvolvimento do escoamento do ar através do vão da porta, com indicação da linha neutra.....	5
Figura 1.4. Eficiência de cortinas de ar (de jato descendente não recirculado) para várias configurações (fonte: Longdill & Wyborn (1979)). ....	10
Figura 1.5. Esquema do dispositivo de cortina de ar, com do bocal de descarga de espessura variável. (a) Espessura do bocal menor; (b) Espessura do bocal maior (adaptada de Biddle Climate Solutions (2012 <sup>b</sup> )) .....	11
Figura 2.1. Instalação experimental: (a) Vista exterior; (b) Vão da porta. ....	16
Figura 2.2. Sistema de arrefecimento da sala fria: (a) Evaporador; (b) Compressor; (c) Controlo eletromecânico.....	16
Figura 2.3. Sistemas de aquecimento da sala quente: (a) Termoconvetor elétrico; (b) Ventoinha de pé. ....	17
Figura 2.4. Dispositivo de cortina de ar.....	18
Figura 2.5. (a) Variador de tensão; (b) SwemaAir 300; (c) Sonda SWA 31. ....	18
Figura 2.6. Analisador de CO <sub>2</sub> (PS32).....	19
Figura 2.7. Decaimento logarítmico da concentração de CO <sub>2</sub> para cortina desligada ( $V_j=0$ m/s) e $V_j=1,75$ m/s ( $\Delta T=10^\circ\text{C}$ ; $H_p=1\text{m}$ ). ....	21
Figura 2.8. Vista 3D da instalação experimental .....	22
Figura 2.9. Vistas em corte da instalação experimental: (a) Vista de topo; (b) Alçado lateral. ....	23
Figura 3.1. Rendimento de vedação, $\eta$ : (a) $\Delta T=5^\circ\text{C}$ e $H_p=1$ m; (b) $\Delta T=10^\circ\text{C}$ e $H_p=1$ m...28	28
Figura 3.2. Rendimento de vedação, $\eta$ : (a) $\Delta T=15^\circ\text{C}$ e $H_p=1$ m; (b) $\Delta T=20^\circ\text{C}$ e $H_p=1$ m.29	29
Figura 3.3. Rendimento de vedação, $\eta$ : (a) $\Delta T=5^\circ\text{C}$ e $H_p=1,5$ m; (b) $\Delta T=10^\circ\text{C}$ e $H_p=1,5$ m. .....	30
Figura 3.4. Rendimento de vedação, $\eta$ : (a) $\Delta T=15^\circ\text{C}$ e $H_p=1,5$ m; (b) $\Delta T=20^\circ\text{C}$ e $H_p=1,5$ m. ....	30
Figura 3.5. Evolução temporal da temperatura média das salas ( $\Delta T=20^\circ\text{C}$ , $H_p=1,5$ m e $V_j=0$ m/s) .....	31
Figura 3.6. Evolução temporal da temperatura média das salas ( $\Delta T=20^\circ\text{C}$ , $H_p=1,5$ m e $V_j=3,25$ m/s).....	31

Figura 3.7. Evolução temporal da temperatura média das salas. (a) $\Delta T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $H_p=1,5\text{ m}$ e $V_j=3,5\text{ m/s}$ ; (b) $\Delta T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $H_p=1,5\text{ m}$ e $V_j=3,75\text{ m/s}$ .....	32
Figura 3.8. Rendimento de vedação, $\eta$ , obtido por via experimental, no presente trabalho, e por via numérica (Gonçalves <i>et al</i> , 2016): (a) $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$ , $H_p=1,5\text{m}$ e $\Delta t= 60\text{s}$ ); (b) $\Delta T=15^{\circ}\text{C}$ , $H_p=1,5\text{m}$ e $\Delta t= 60\text{s}$ ; .....	33
Figura 3.9. Rendimento de vedação vedação, $\eta$ , obtido por por via experimental, no presente trabalho, e por via numérica (Gonçalves <i>et al</i> , 2016), para $\Delta T =15^{\circ}\text{C}$ , $H_p =1\text{m}$ e $\Delta t= 60\text{s}$ . .....	33
Figura 3.10. Rendimento de vedação, $\eta$ , para $H_p=1\text{m}$ e $\Delta t=60\text{s}$ .....	34
Figura 3.11. Rendimento de vedação $\eta$ , para $H_p=1,5\text{m}$ e $\Delta t=60\text{s}$ .....	34
Figura 3.12. Velocidade ótima do jato em função de $\Delta T$ . (a) $H_p=1\text{ m}$ ; (b) $H_p=1,5\text{ m}$ .....	35
Figura 3.13. Velocidade ótima do jato em função da $H_p$ para $\Delta T=15\text{ }^{\circ}\text{C}$ .....	35
Figura 4.1. Placa Arduino UNO. ....	38
Figura 4.2. Dispositivo de controlo da velocidade de rotação do motor (Dimmer). ....	39
Figura 4.3. Esquema do sistema de controlo da velocidade de rotação do motor. (a) Detetor de passagem por zero da onda corrente alternada (AC); (b) Controlo do TRIAC.	39
Figura 4.4. Deteção de passagem por zero da onda de corrente alternada (AC). ....	40
Figura 4.5. Variação do ângulo de disparo do TRIAC. ....	40
Figura 4.6. Esquema do sistema de medição e registo de temperatura.....	41
Figura 4.7. (a) LCD; (b) Sensores de temperatura TMP36.....	41
Figura 4.8. Calibração do sistema automático .....	42
Figura 4.9. Diagrama funcional do sistema de controlo automático .....	43
Figura 4.10. Evolução temporal do $\Delta T$ das salas e da $V_j$ utilizando o sistema de controlo automático.....	44
Figura 4.11. Evolução temporal do $\Delta T$ das salas e da $V_j$ utilizando o sistema de controlo automático.....	44
Figura 4.12. (a) Decaimento da concentração de $\text{CO}_2$ ; (b) Decaimento logarítmico da concentração de $\text{CO}_2$ .....	45

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Descrição das diferentes configurações dos ensaios experimentais realizados. ...	27
Tabela 2. Velocidade ótima do jato em função da $H_p$ para $\Delta T=15$ °C .....	36
Tabela 4.1. Lista de componentes e respetiva função.....	38
Tabela 4.2. Rendimento da cortina de ar com o sistema de controlo automático.....	46



## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

$b_0$	Espessura do bocal de descarga	[m]
$C$	Concentração do gás	[ppm]
$C_{ext}$	Concentração de gás no exterior	[ppm]
$C_{fin}$	Concentração de gás traçador no instante em que termina o ensaio	[ppm]
$C_{in}$	Concentração de gás traçador no instante em que inicia o ensaio	[ppm]
$D_m$	Módulo de deflexão	[-]
$D_{m,min}$	Valor mínimo do módulo de deflexão	[-]
$g$	Aceleração da gravidade	[m/s <sup>2</sup> ]
$H_p$	Altura do vão da porta	[m]
$n$	Taxa de renovação do ar	[h <sup>-1</sup> ]
$n_0$	Taxa de renovação de ar com a cortina desligada	[h <sup>-1</sup> ]
$n_t$	Taxa de renovação de ar num determinado regime de funcionamento	[h <sup>-1</sup> ]
$P$	Pressão	[N/m <sup>2</sup> ]
$P_{TRIAC}$	Valores de potência	[-]
$Q$	Quantidade de energia térmica	[J]
$Q_{ac}$	Energia térmica através da porta com cortina de ar ligada	[J]
$Q_0$	Energia térmica através da porta com cortina de ar desligada	[J]
$S(t)$	Caudal volúmico de gás traçador injetado no compartimento	[m <sup>3</sup> /h]
$t$	Tempo	[s]
$T$	Temperatura	[°C]
$V$	Volume	[m <sup>3</sup> ]
$V_j$	Velocidade (de descarga) do jato	[m/s]
$V_{j,ótima}$	Velocidade ótima do jato	[m/s]
$\dot{V}$	Caudal de ar através da porta	[m <sup>3</sup> /h]
$y_N$	Posição da linha neutra segundo a vertical	[m]

$\alpha_0$	Ângulo de orientação do bocal de descarga do jato	[°]
$\alpha_f$	Ângulo de impacto do jato no solo	[°]
$\eta$	Eficiência (rendimento) de vedação	[%]
$\rho_0$	Massa específica do ar aspirado pela cortina	[Kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_f$	Massa específica do ar da sala fria	[Kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_q$	Massa específica do ar da sala quente	[Kg/m <sup>3</sup> ]

## Siglas

DEM	Departamento de Engenharia Mecânica
FCTUC	Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
ADAI	Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial
ACD	<i>Air Curtain Device</i> (Dispositivo de cortina de ar)

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento

A redução das trocas de ar através de portas de espaços climatizados ou refrigerados pode conseguir-se recorrendo a diferentes métodos, tais como: portas de acionamento rápido, cortinas de plástico, antecâmaras, portas giratórias, entre outros. No entanto, estes métodos restringem, de certa forma, a livre passagem de pessoas ou de mercadorias. Uma solução alternativa, e cada vez mais utilizada, é a utilização de cortinas de ar.

Uma cortina de ar consiste num dispositivo mecânico capaz de gerar um jato de ar no plano da porta, atuando, desta forma, como uma barreira aerodinâmica para minimizar as trocas de energia e de massa entre dois espaços contíguos (Figura 1.1 e Figura 1.2). Estes dispositivos são compostos, essencialmente, por três componentes: uma grelha de aspiração, um ventilador (tangencial ou vários axiais) e um bocal de descarga (insuflação) orientável. Podem também ter incorporados sistemas adicionais de tratamento do ar (arrefecimento ou aquecimento). A utilização de cortinas de ar, quando devidamente selecionadas e ajustadas, pode contribuir para a diminuição significativa das trocas térmicas e, conseqüentemente, dos gastos energéticos e/ou, ainda de trocas, químicas entre dois espaços ou de um espaço com o exterior (Biddle Climate Solutions, 2012<sup>a</sup>).

O leque de aplicações de equipamentos de cortina de ar é bastante abrangente. Podem encontrar-se exemplos práticos em situações onde é necessário(a):

- O controlo de áreas e ambientes climatizados;
- A proteção de portas de acesso a espaços refrigerados;
- A redução de perdas de calor pelas portas de fornos industriais;
- O controlo de poeiras, de poluentes ou de humidade ambiental;
- O controlo do fluxo de ar em minas.

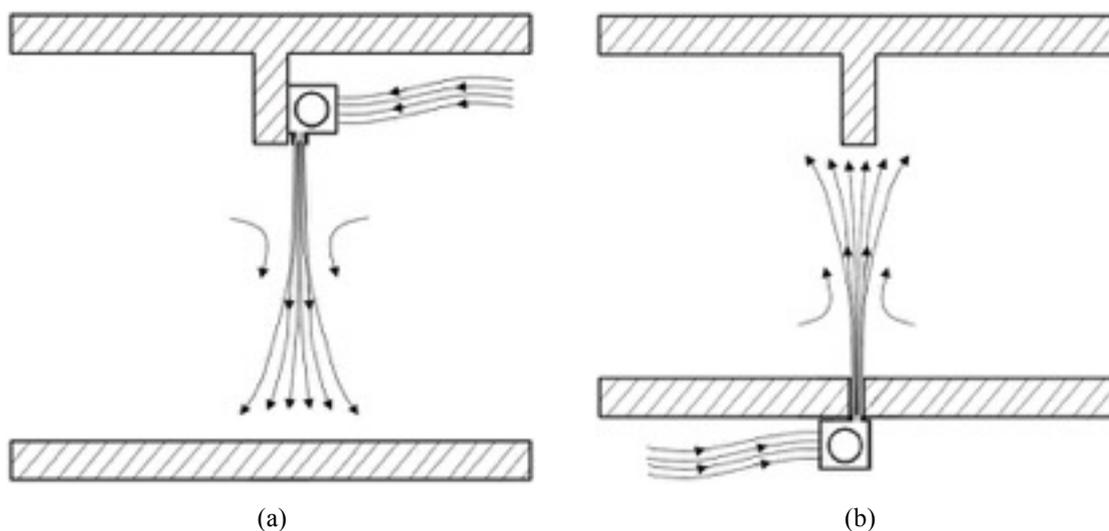
Dada a sua extensa aplicabilidade, ao ser efetuada uma pesquisa acerca de dispositivos de cortina de ar, é comum encontrar-se uma vasta variedade de equipamentos com características distintas. Por este motivo, torna-se importante estabelecer a sua classificação. De acordo com Neto (2006), a classificação das cortinas de ar pode ser feita essencialmente em dois tipos:

- **Com recirculação de ar:** o ar é aspirado através da grelha de aspiração situada no lado oposto ao do bocal de descarga. Após a passagem por uma conduta de filtragem (onde, por vezes, sofre aquecimento/arrefecimento), é efetuada a sua insuflação através do bocal de descarga, originando-se uma barreira aerodinâmica. O ciclo repete-se continuamente, retornando o ar ao bocal de descarga para ser novamente insuflado. Este tipo de cortina é mais utilizado quando existe a necessidade de aquecer/arrefecer o ar ou quando, por razões de conforto, é exigida uma velocidade de insuflação baixa, como é o caso de portas de acesso a grandes superfícies comerciais.
- **Sem recirculação de ar:** o ar é insuflado com uma determinada velocidade (sendo possível também definir a sua orientação) de forma a ser criada uma barreira aerodinâmica, mas, uma vez que a grelha de aspiração se encontra incorporada no próprio equipamento (usualmente na parte frontal), o jato de ar incide no solo formando uma cortina de ar contínua que abrange toda a secção do vão da porta. No seu desenvolvimento, o jato livre da cortina mistura-se com o ar ambiente de cada um dos lados e, ao incidir no solo, dispersa-se para ambos os lados do vão da porta. Estes mecanismos contribuem para a persistência de algumas trocas de energia, razão pela qual a vedação nunca é perfeita. Este é o tipo de cortina de ar mais comum, devido à fácil instalação e aos menores custos associados (aquisição, instalação e manutenção).

Outra característica que permite distinguir os tipos de cortinas de ar é a direção de descarga do jato de ar, podendo ser:

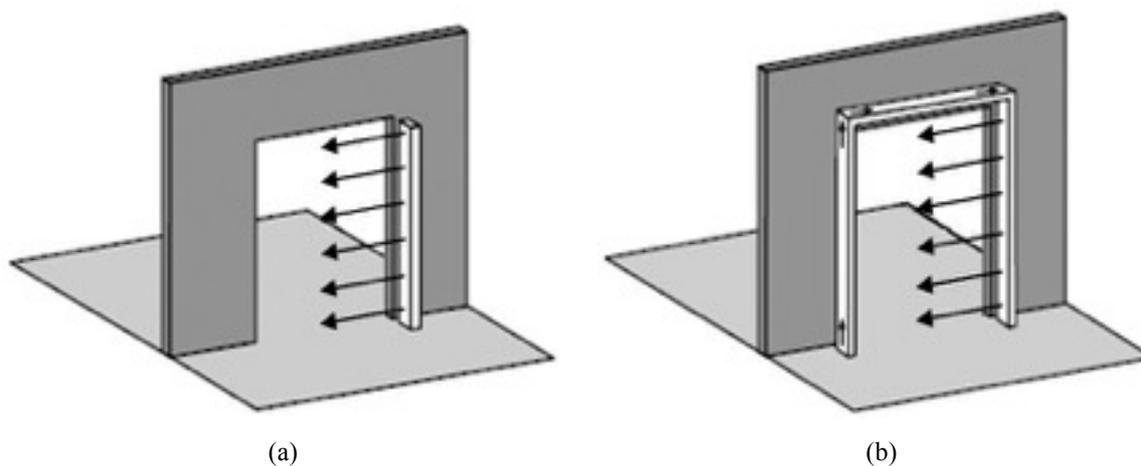
- **Vertical:** a cortina de ar pode ser instalada sobre o vão da porta (situação mais comum) e o jato de ar descarregado na vertical em direção ao solo (Figura 1.1(a)). Outra alternativa consiste em instalar a cortina ao nível do solo, obtendo-se um jato

ascendente (Figura 1.1(b)). Neste segundo caso, existem alguns inconvenientes óbvios, como por exemplo a obstrução do jato quando são colocados objetos sobre a cortina de ar; no entanto, em situações onde o ambiente exterior seja muito frio pode-se justificar a sua utilização.



**Figura 1.1.** Cortina de jato vertical não recirculado: (a) descendente; (b) ascendente.

- **Horizontal:** o dispositivo é instalado em uma ou em ambas ombreiras da porta, e o jato descarregado na horizontal (Figura 1.2).



**Figura 1.2.** Cortina de ar horizontal, com jato (a) não recirculado e (b) recirculado (adaptada de Neto (2006)).

De um modo geral, o dimensionamento de cortinas de ar é baseado na satisfação dos requisitos em termos da quantidade de movimento (Valkeapää, 2002).

A presente dissertação incide sobre o estudo de um dispositivo de cortina de ar de jato plano, descendente e sem recirculação. Esta tipologia possui particular interesse, pois, além de outros motivos, é a de utilização mais corrente.

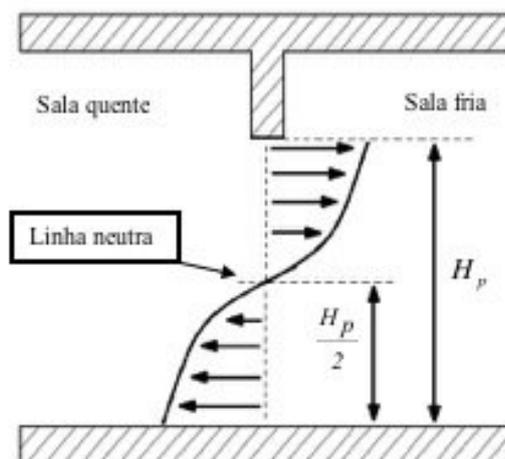
## 1.2. Revisão bibliográfica

A primeira referência feita a dispositivos de cortina de ar diz respeito a uma patente de um equipamento de vedação por jato de ar, cujo objetivo era reduzir as infiltrações de ar numa porta (Theophilus Van Kemmel, 1904). Contudo, segundo a mesma fonte, a primeira instalação só foi efetuada 12 anos mais tarde. Na Europa, verificou-se uma crescente popularidade das cortinas de ar durante o final das décadas 1940 e 1950. Em 1958 foi vendida a primeira cortina de ar no Canadá, pela empresa Miniveil Ltd., e utilizada para vedação da porta de uma câmara frigorífica (Miniveil, 2016). Atualmente, são de aplicação comum em zonas comerciais ou em zonas industriais.

Quando se abre uma porta de acesso a um espaço climatizado ou a uma câmara frigorífica, é inevitável a natural perda de calor ou de frio através do vão da porta. Em 1926, realizaram-se os primeiros estudos procurando explicar o escoamento de convecção natural do ar entre dois espaços inicialmente a temperaturas diferentes (Emswiler, 1926). Destes estudos, resultou o conceito fundamental de *linha neutra*, onde as pressões de ambos os lados se igualam, localizada no plano da abertura a uma cota  $y_N$  acima do solo. Para o caso de compartimentos com uma única abertura, a linha neutra situa-se a meia altura da porta, isto é,  $y_N = H_p/2$  (Figura 1.3).

A partir de então, foram vários os investigadores a dedicarem-se a aspetos relacionados com a transferência de calor e de massa em convecção natural através de vãos de porta, tendo os estudos resultado em diferentes modelos empíricos para o cálculo da taxa de infiltração de ar. São exemplo destes os modelos de Brown, Tamm, Fritzsche, Gosney e Tamm modified, assim designados em Foster *et al.*, (2003). Estes modelos foram confrontados com resultados experimentais por vários autores (Hendrix *et al.*, (1989), Foster *et al.*, (2003) e Gonçalves.,

(2010)), tendo-se concluído que, embora todos os modelos tendam a sobreavaliar a infiltração do ar, as melhores previsões são obtidas com os modelos de Gosney e Fritzsche.



**Figura 1.3.** Desenvolvimento do escoamento do ar através do vão da porta, com indicação da linha neutra.

Os primeiros estudos experimentais dedicados à vedação aerodinâmica por cortinas de ar remontam à década de 1960 (Takahashi & Inoh (1963), Hayes & Stoecker (1969)). Em 1963, Takahashi & Inoh (1963) realizam um estudo experimental em portas de acesso a câmaras frigoríficas, onde é feita a quantificação do desempenho de vedação de dispositivos em teste. Este estudo representou um avanço, já que em estudos anteriores os resultados eram apenas qualitativos. Partindo da perda de energia através da porta, rendimento de vedação do dispositivo de cortina de ar,  $\eta$ , foi definida por:

$$\eta = 1 - \frac{Q_{ac}}{Q_0} \quad (1.1)$$

onde  $Q_{ac}$  e  $Q_0$  representam as perdas de frio (ou ganhos de energia térmica) através da porta, com a cortina de ar em funcionamento e desligada, respetivamente. Com base nos resultados, constataram que não havia diferenças significativas entre os vários tipos de cortina de ar testadas, pelo que os autores recomendam a instalação dos dispositivos mais baratos, isto é, cortinas de jato plano descendente, montadas no lado exterior da câmara frigorífica. Concluíram também que, dada a facilidade inerente à sua aplicação e análise, o método mais expedito na determinação do efeito de vedação da cortina de ar é o método dos gases traçadores. Utilizando esta metodologia, concluíram que o rendimento de vedação da cortina de ar podia atingir valores de 60% a 80%. Resultados semelhantes foram também referidos

por outros autores: Costa *et al.*, (2006) e Gonçalves *et al.*, (2012<sup>a</sup>) referem rendimentos de vedação de até 80% para cortinas de jato de ar vertical descendente.

Hayes & Stoecker (1969) desenvolveram um modelo analítico capaz de prever a quantidade de energia transferida através de uma cortina de ar. Efetuaram também uma análise qualitativa do jato de ar da cortina, instalada no exterior e sobre o vão da porta de um compartimento estanque para duas configurações: isotérmica (temperatura do espaço igual à temperatura exterior) e não isotérmica.

Na primeira configuração (situação isotérmica), os autores começaram por explicar a diferença de pressão ( $\Delta P$ ) que se desenvolve na vizinhança da porta, apenas devido ao funcionamento do dispositivo de cortina de ar. Os autores mostraram que o jato deflete para o lado do compartimento onde se encontra instalado o dispositivo de cortina de ar. De facto, numa fase inicial o jato divide-se em duas partes iguais ao incidir no solo; no entanto, como o ar para alimentar o jato é aspirado do lado exterior, a divisão em duas partes junto ao solo provoca um aumento de pressão na sala interior, conduzindo à deflexão do jato e à divisão assimétrica junto ao solo. Consequentemente, o ângulo de impacto do jato com o solo ( $\alpha_f$ ) é alterado até que a quantidade de ar que entra no espaço seja compensada pela quantidade de ar que dele sai. O ângulo de impacto com o solo é dado por:

$$\sin \alpha_f = 2,4 \sqrt{\frac{b_0}{H_p}} \left( 1 - 2,56 \frac{b_0}{H_p} \right) \quad (1.2)$$

onde  $b_0$  é a espessura do bocal de descarga do jato e  $H_p$  a altura da porta. De notar, pela equação (1.2), que o ângulo de impacto do jato com o solo é independente do ângulo do bocal de descarga; contudo, a localização do ponto de impacto no solo varia, ao variar o ângulo do bocal de descarga. Ainda para a configuração isotérmica, no que diz respeito ao perfil de velocidade do jato, foram identificadas três regiões:

- Região I: a velocidade na linha central permanece constante. Localiza-se junto ao bocal de descarga e é denominada região de transição;
- Região II: a velocidade central do jato começa a sofrer um decréscimo. É denominada como zona de escoamento desenvolvido;

- Região III: diz respeito à zona de recompressão. Ocorre na zona de impacto do jato com o solo.

Relativamente à configuração não isotérmica, alguns dos critérios estabelecidos para a cortina permanecer contínua até ao solo são: a altura da porta ( $H_p$ ), a diferença de temperatura entre os espaços a vedar pela cortina de ar ( $\Delta T$ ), a velocidade de descarga do jato ( $V_j$ ), a espessura do bocal de descarga ( $b_0$ ) e o ângulo inicial do jato ( $\alpha_0$ ). Com base nestes critérios, constatou-se que a capacidade de vedação da cortina de ar é dependente do equilíbrio entre a quantidade de movimento inicial do jato do ar (imprimido pela cortina) e as forças transversais a neutralizar (naturais, associadas à impulsão térmica). O quociente entre estas duas grandezas foi designado pelos autores por módulo de deflexão ( $D_m$ ). Para uma cortina de ar de um só jato, vertical descendente e sem recirculação de ar, é dado por:

$$D_m = \frac{\rho_0 \times b_0 \times V_j^2}{g \times H_p \times (\rho_f - \rho_q)} \quad (1.3)$$

O numerador da equação (1.3) representa o fluxo de quantidade de movimento por unidade de comprimento do bocal de descarga e o denominador é proporcional às forças transversais (de convecção natural), as principais responsáveis pela deflexão do jato da cortina. Com a finalidade de assegurar um jato estável e contínuo até ao solo, a velocidade de descarga deve ser superior à correspondente a um valor mínimo,  $D_{m,min}$ . No entanto, dado que as trocas de calor se devem a mecanismos turbulentos do jato, velocidades de injeção superiores ao valor mínimo resultam numa mistura excessiva do jato com o ar circundante. Segundo Hayes & Stoecker (1969), a quantidade de movimento mínima,  $(\rho_0 b_0 V_j^2)_{min}$ , corresponde a duas hipóteses:

$$\begin{cases} \alpha_f \neq \alpha_0: D_{m,min} = \frac{-\sin\alpha_f - \sin\alpha_0 + 2 - 2 \times \sqrt{(1 - \sin\alpha_f) \times (1 - \sin\alpha_0)}}{2 \times (\sin\alpha_f - \sin\alpha_0)^2} \\ \alpha_f = \alpha_0: D_{m,min} = \frac{1}{8 \times (1 - \sin\alpha_0)} \end{cases} \quad (1.4)$$

com  $\alpha_f$  calculado pela equação (1.2). A partir das equações (1.3) e (1.4), é possível determinar a velocidade de descarga ótima para o jato.

Com a evolução dos meios de cálculo, na década de 1970 aplicam-se pela primeira vez os métodos computacionais no estudo de escoamentos desenvolvidos por dispositivos de cortina de ar através do uso a Mecânica dos Fluidos Computacional (CFD). Van & Howell (1976) foram pioneiros na utilização desta metodologia aplicada à vedação de espaços contíguos a temperaturas diferentes. Efetuando-o em simultâneo com um estudo laboratorial, os autores concluíram que o valor da turbulência inicial do jato, para velocidades de descarga entre 2 e 6 m/s, não afeta significativamente o nível de turbulência na região principal de desenvolvimento do jato.

Recentemente, os estudos numéricos continuam a ser muito utilizados, quer na modelação numérica bidimensional (Costa & Oliveira, 2002, Costa *et al.*, 2006), quer tridimensional (Jaramillo *et al.*, 2009 Gonçalves *et al.*, 2012<sup>b</sup>). A modelação numérica possui uma vantagem em relação aos modelos analíticos de cálculo de infiltração, uma vez que permitem uma fácil modificação da geometria ou a inclusão de dispositivos de vedação, como cortinas de ar (Foster *et al.*, 2002)). Quando aplicado ao estudo de dispositivos de cortina de ar, é possível através do cálculo numérico obter uma boa concordância entre os resultados fornecidos pelo programa e os registados em ensaios experimentais (Gonçalves *et al.*, 2012<sup>b</sup>).

Por recurso a análises experimentais e numéricas, essencialmente, é feita a avaliação da influência dos vários parâmetros e das diferentes configurações na aplicação de dispositivos de cortina de ar, bem como a comparação destes dispositivos em relação a outros métodos utilizados com finalidade semelhante. A subdivisão dos diferentes estudos realizados pode ser apresentada de acordo com as diferentes abordagens.

#### **I. Eficiência de diferentes tipos de dispositivos de vedação**

No estudo realizado por Hendrix *et al.*, (1989), é feita uma compilação dos resultados obtido por diferentes autores, relativamente à eficiência de vedação em diferentes dispositivos. Da análise efetuada constatou-se que a eficiência de vedação obtida por cortinas de tiras plástica podia atingir valores de 90%. No caso das cortinas de ar, a eficiência de vedação varia consoante o tipo de cortina utilizado, podendo variar desde os 36%, caso seja vertical com recirculação, até aos 83% no caso de cortina de jato duplo vertical e sem recirculação. Com o mesmo objetivo, Downing & Meffert (1993) avaliaram a eficiência de vedação de diferentes dispositivos (cortina de ar/plástica, de portas articuladas de acionamento rápido,

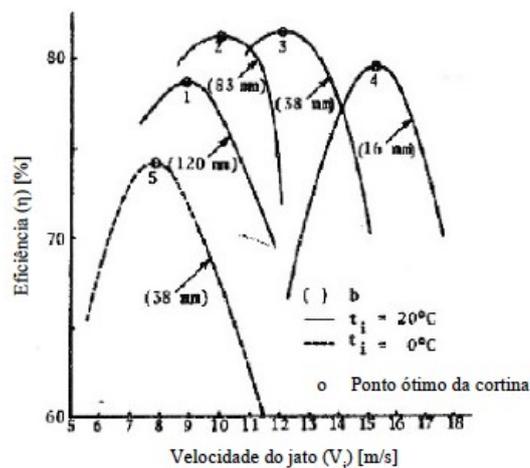
de portas deslizantes de fecho rápido). Para os sistemas de cortina de ar registaram eficiências máximas de vedação de 80,1%. No entanto, referem que os níveis de vedação obtidos por estes equipamentos apresentavam muitas variações. Obtiveram inclusive valores de rendimento de vedação negativos, em situações em que o jato estava orientado com um ângulo de 15° para o interior da câmara (lado frio). Para as cortinas plásticas registaram rendimentos de, aproximadamente, 90% e com a utilização de porta de fecho rápido valores a rondar os 95%. Embora o tipo de dispositivo de vedação utilizado dependa do tipo de instalação, estes autores também recomendam utilização de cortinas de ar de jato plano descendente sem recirculação.

## **II. Eficiência de vedação de tipos de cortina**

Como referido anteriormente, existem diferentes configurações de dispositivos de cortina de ar. No estudo realizado por Gonçalves *et al.*, (2012<sup>a</sup>) aplicando modelação numérica, é efetuada uma comparação qualitativa e quantitativa do desempenho de diferentes tipos de cortinas de ar, aplicados a uma mesma instalação. Constatou-se a existência de diferenças significativas entre as configurações testadas. No caso da cortina de ar vertical descendente, com recirculação de ar junto ao solo, a eficiência de vedação é da ordem dos 80%, enquanto que, no caso de não haver recirculação do ar, a eficiência é de cerca de 70%. Para as cortinas de jato de desenvolvimento na horizontal, a eficiência de vedação é de aproximadamente 55%. É ainda afirmado que, dada a elevada complexidade inerente à instalação e custos de instalação e manutenção, as cortinas de ar com recirculação são as menos utilizadas.

## **III. Influência de parâmetros na configuração das cortinas de ar**

Longdill & Wyborn (1979) apresentaram um estudo onde avaliam a influência da espessura ( $b_0$ ) e da velocidade de descarga do jato ( $V_j$ ) na eficiência de cortinas de ar de jato vertical não recirculado. Deste estudo concluíram a existência de uma velocidade de descarga ótima do jato (correspondente a um efeito de vedação máximo) para diferentes espessuras do jato e diferentes temperaturas interiores, conforme pode ser observado na Figura 1.4.



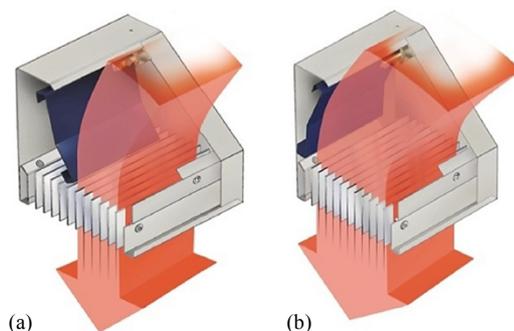
**Figura 1.4.** Eficiência de cortinas de ar (de jato descendente não recirculado) para várias configurações (fonte: Longdill & Wyborn (1979)).

Na sua dissertação de doutoramento, Neto (2006) avaliou a influência de diversos parâmetros geométricos e dinâmicos (altura da porta, diferença de temperatura entre as salas, velocidade de descarga do jato e orientação inicial do bocal de descarga) sobre o desempenho de um dispositivo de cortina de ar instalado por cima duma porta de ligação entre duas salas contíguas, de igual dimensão e mantidas a temperaturas diferentes. No mesmo estudo, constatou que a eficiência de vedação da cortina de ar pode ser maximizada para cada diferença de temperatura entre as salas, desde que selecionada a velocidade ótima do jato. Referiu também que o conhecimento detalhado da influência dos parâmetros geométricos é essencial para a seleção e instalação destes equipamentos. De forma a estimar o efeito da inclinação do jato no desempenho do dispositivo de cortina, foi ainda efetuado um conjunto de ensaios mantendo fixa a altura da porta e fazendo variar a velocidade de descarga do jato em conjugação com o ângulo do bocal de descarga (de 0° até 20°). Com estes ensaios foi possível verificar que, para cada orientação do bocal de descarga, existe uma velocidade ótima do jato que conduz a condições de rendimento de vedação máximo. Conclusões semelhantes resultaram de outros estudos anteriores (Costa & Oliveira, 2002). Além disto, confirmou-se a vantagem associada à orientação do bocal de descarga do jato de ar (com um ângulo entre 15° a 20°) para o lado oposto àquele em que se encontra instalado o dispositivo de cortina de ar. A mesma conclusão foi obtida por via numérica (Costa *et al.*, 2006).

Neto (2006) apresentou ainda um estudo da viabilidade económica, tendo concluído que o investimento inicial de aquisição e instalação de um equipamento de cortina de ar poder ser amortizado em aproximadamente 6 meses de funcionamento.

Na sua dissertação de doutoramento, Gonçalves (2010) apresentou um estudo experimental e numérico sobre a aplicação de cortinas de ar na vedação de portas de acesso a câmaras frigoríficas. Este utilizou uma instalação à escala laboratorial, composta por dois compartimentos contíguos ligados por uma porta, sobre a qual foi instalada uma cortina de ar (esta foi também a instalação experimental utilizada no presente trabalho). Nesse estudo, foi avaliada a influência de diferentes parâmetros (altura do vão da porta, diferença de temperatura entre os dois espaços, espessura do bocal de descarga e orientação inicial do bocal de descarga), sobre a velocidade ótima de descarga do jato da cortina (correspondente ao máximo efeito de vedação). O autor propõe, ainda, a incorporação de um dispositivo eletrónico de controlo automático da velocidade do jato na operação dos dispositivos de cortina de ar, para que a cortina tenha um funcionamento próximo das condições ótimas e, conseqüentemente, seja possível obter uma eficiência máxima de vedação. Propõe ainda uma correlação que permite o ajuste, de forma autónoma, da velocidade de descarga da cortina de ar, por forma a funcionar próxima da situação de máxima vedação.

Atualmente existe no mercado um dispositivo de controlo automático, integrado na cortina de ar, da marca *biddle* (modelo CA<sub>2</sub>), com a denominação *CHIPS – technology* (Biddle Climate Solutions, 2012<sup>b</sup>). Neste sistema de controlo, o caudal de ar descarregado pela cortina é mantido constante, e a velocidade do jato é ajustada através da variação da espessura do bocal de descarga. Estas cortinas possuem também a possibilidade de incorporar sistemas de climatização do ar.



**Figura 1.5.** Esquema do dispositivo de cortina de ar, com do bocal de descarga de espessura variável. (a) Espessura do bocal menor; (b) Espessura do bocal maior (adaptada de Biddle Climate Solutions (2012<sup>b</sup>))

Em Gil-Lopez *et al.*, (2013) e Gil-Lopez *et al.*, (2014) é efetuada uma análise experimental comparativa entre dispositivos de cortina convencionais e a cortina da marca *biddle* (com o sistema *CHIPS* incorporado, referido como dispositivo de cortina de ar de elevada eficiência), aplicados na vedação de uma porta de uma zona comercial e na porta de acesso a uma câmara frigorífica. Realizaram-se testes para um clima húmido e quente, tendo os dados experimentais demonstrado que, no uso de cortinas convencionais, o consumo elétrico do sistema de arrefecimento devido à potência extra exigida pelo ventilador, é praticamente igual ao consumo obtido sem o sistema (Gil-Lopez *et al.*, 2013). No entanto, com as cortinas de ar de alta eficiência, referem haver uma poupança energética de aproximadamente 32%. Quando aplicadas na vedação da porta de uma câmara frigorífica, as cortinas de alta eficiência promovem uma redução de 79% do consumo energético no consumo do sistema de refrigeração, enquanto que com as cortinas de ar convencionais apenas atingem uma redução de 39 % do consumo de energia. (Gil-Lopez *et al.*, 2014) .

Em suma, dos trabalhos de investigação disponíveis, é possível verificar que existem algumas condições e parâmetros comuns que é necessário tomar em consideração aquando da instalação de dispositivos de cortina de ar (de jato vertical descendente e não recirculado), tais como:

- A localização da cortina de ar: na vedação de espaços refrigerados, aconselha-se a instalação no exterior;
- A espessura do bocal de descarga ( $b_0$ ): usualmente, são recomendadas espessuras relativamente elevadas;
- O ângulo de descarga ( $\alpha_0$ ): idealmente, o jato deve ser dirigido para o lado oposto ao da aspiração, e com um ângulo entre 15° a 20° com a vertical;
- A velocidade de descarga do jato ( $V_j$ ): possivelmente o parâmetro com maior importância. Para a determinação da velocidade ótima, além da diferença de temperatura entre os espaços (Silva *et al.*, 2001), deve-se ter especial atenção à altura da porta (Foster *et al.*, 2003).

### **1.3. Motivação e objetivos**

As perdas térmicas através dos vãos de acesso frequente a espaços climatizados (edifícios, câmaras e expositores frigoríficos, etc.) podem ser reduzidas em mais de 50% pela utilização de equipamentos de cortina de ar, já bastante vulgares nos dias de hoje. Para uma boa eficiência de vedação, é importante que a velocidade de uma cortina de ar seja próxima do seu valor ótimo em cada configuração, o qual depende de diversos fatores (altura do “vão da porta”, espessura do jato, diferenças de temperatura e de pressão entre os espaços a vedar, etc.). Dada a variabilidade de alguns destes parâmetros, é essencial estabelecer uma correlação empírica que traduza a influência destes no estabelecimento da velocidade de descarga imposta ao jato. Desta forma, revela-se importante a necessidade de desenvolver um sistema automático de controlo que, incorporado no dispositivo de cortina de ar, module a velocidade de descarga do jato em função de parâmetros como a altura da porta e a diferença de temperaturas de ambos os lados da porta.

Como objetivos a alcançar com esta dissertação, estabeleceram-se:

- O estudo experimental de uma cortina de forma a determinar a velocidade ótima do jato para diferentes configurações (altura do vão da porta e diferença de temperatura entre os espaços);
- A definição de uma correlação empírica para a velocidade ótima do jato da cortina de ar;
- A conceção, especificações, construção e testes de um sistema de controlo automático.

### **1.4. Estrutura do trabalho**

Esta dissertação está dividida em 5 capítulos, com a seguinte estrutura:

- Presente capítulo: capítulo introdutório. Nele pode-se encontrar o enquadramento ao tema em estudo, uma exposição de trabalhos desenvolvidos anteriormente considerados relevantes para a compreensão dos capítulos seguintes, as motivações e os objetivos desta dissertação e, ainda, a estrutura do trabalho.

- Capítulo 2: encontram-se nele todos os pormenores relacionados com os ensaios experimentais. É onde se descreve o modelo laboratorial, os equipamentos de climatização, a cortina de ar, a instrumentação e, ainda, a metodologia utilizada nos ensaios experimentais.
- Capítulo 3: neste capítulo apresentam-se e analisam-se os resultados experimentais e faz-se uma comparação com resultados numéricos de estudos anteriores efetuados para o mesmo modelo laboratorial.
- Capítulo 4: descreve-se um sistema de controlo automático desenvolvido para a cortina de ar. No decorrer do capítulo, são especificados todos os componentes e pormenores de construção do sistema bem como o princípio de funcionamento. É ainda apresentado um diagrama de blocos que resume a programação do mesmo.
- Capítulo 5: este é o último capítulo e nele estão descritas as conclusões finais desta dissertação, assim como propostas de trabalhos futuros.

## 2. INSTALAÇÃO E METODOLOGIAS EXPERIMENTAIS

### 2.1. Modelo laboratorial

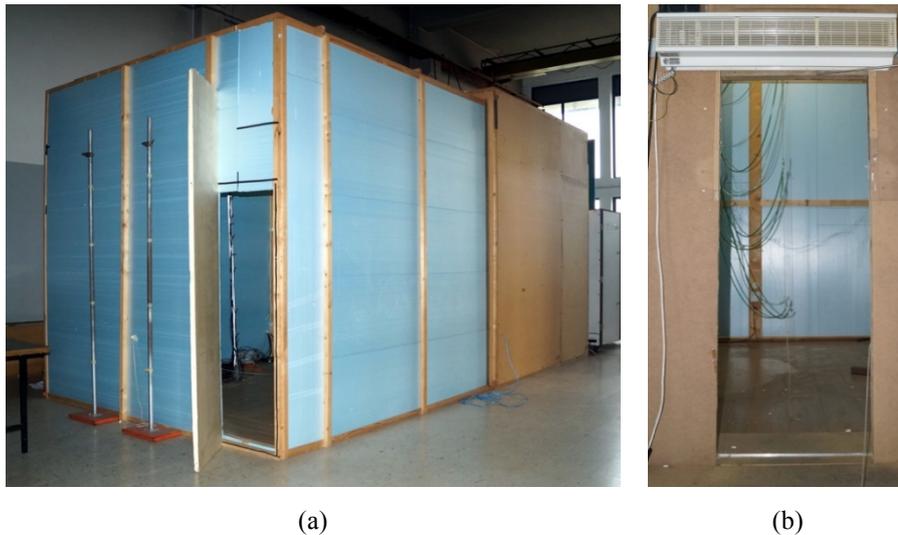
Para atingir os objetivos propostos neste trabalho, recorreu-se a uma instalação experimental que permitisse a reprodução dos fenómenos físicos de uma situação real de aplicação de cortinas de ar, permitindo variar alguns parâmetros geométricos (altura da porta) e térmicos (temperaturas das salas), bem como a velocidade do jato da cortina. Para tal, utilizou-se uma instalação existente no edifício do Laboratório de Aerodinâmica Industrial (LAI), em Coimbra. Esta instalação foi já utilizada em estudos anteriores (dissertação de doutoramento Gonçalves, 2010).

#### 2.1.1. Geometria e soluções construtivas

A instalação experimental é constituída por duas salas, com dimensões praticamente semelhantes, de  $3 \times 3 \times 3 \text{ m}^3$  (Figura 2.1 (a)). Uma das salas simula um espaço refrigerado (sala fria) e a outra, um ambiente exterior (sala quente).

Na construção das paredes da sala fria (espaço que se pretende vedar termicamente), utilizaram-se duas camadas de placas de poliestireno com 3 cm de espessura (material isolante) revestidas com contraplacado de 1 cm (MFD). Já nas paredes da sala quente utilizou-se uma só camada de material isolante. O chão de ambas as salas é composto por duas placas de material isolante, com acabamento em “chão flutuante”. A estrutura foi toda construída em madeira. Todas as frinchas detetadas foram vedadas com poliuretano expandido.

No interior da estrutura, na parede de ligação entre as duas salas existe uma abertura, centrada na meia largura das salas, com 60 cm de largura e altura variável (as alturas testadas neste trabalho foram  $H_p = 1 \text{ m}$  e  $H_p = 1,5 \text{ m}$  (Figura 2.1(b)). A abertura (ou vão da porta) é fechada através de uma porta de deslizamento horizontal composta por uma placa de poliestireno revestida com contraplacado fino. O dispositivo de cortina de ar encontra-se instalado no topo desta abertura, do lado da sala quente, representativa do ambiente exterior; o bocal de descarga do jato está centrado com o vão da porta.

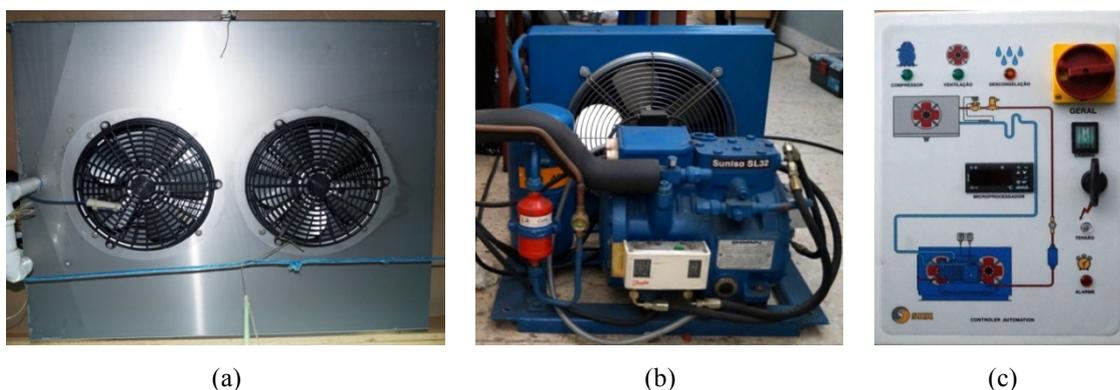


**Figura 2.1.** Instalação experimental: (a) Vista exterior; (b) Vão da porta.

### 2.1.2. Equipamentos de tratamento do ar

Na climatização dos espaços (arrefecimento da sala “fria” e aquecimento da sala “quente”) utilizaram-se os seguintes equipamentos de climatização:

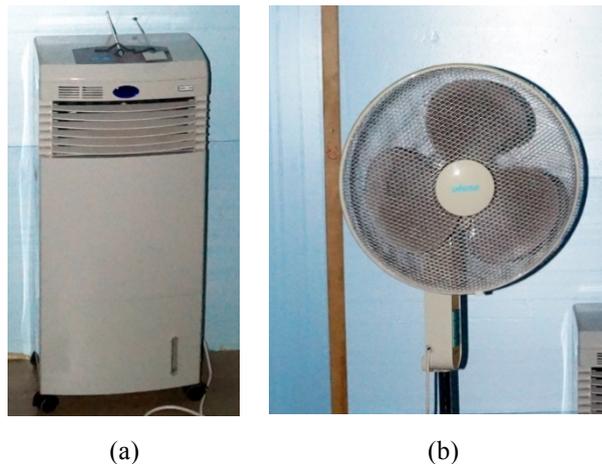
- Sala fria: um sistema de refrigeração capaz de manter a temperatura requerida e de alcançar temperaturas próximas dos 0 °C. Este é constituído por um evaporador do modelo DF-96 da marca Centauro (Figura 2.2 (a)), um compressor do modelo UA H 75 CC da marca Dorin, a funcionar com o fluido refrigerante R404A (Figura 2.2 (b)); e um equipamento de controlo eletromecânico (Figura 2.2 (c)).



**Figura 2.2.** Sistema de arrefecimento da sala fria: (a) Evaporador; (b) Compressor; (c) Controlo eletromecânico.

À exceção do evaporador, que se encontra centrado no teto da sala fria, todos os outros componentes encontram-se instalados no exterior da instalação.

- Sala quente: um sistema termoconvetor elétrico (Figura 2.3 (a)), utilizado apenas quando a temperatura da nave do laboratório (onde se encontra esta instalação) é muito baixa, e uma ventoinha de pé (Figura 2.3 (b)) para minimizar a estratificação térmica e obter uma temperatura o mais homogênea possível no início de cada ensaio.



**Figura 2.3.** Sistemas de aquecimento da sala quente: (a) Termoconvetor elétrico; (b) Ventoinha de pé.

## 2.2. Cortina de ar

Conforme já referido, imediatamente acima do vão da porta, na sala quente, encontra-se instalado o dispositivo de cortina de ar comercial (Figura 2.1 (b)) responsável por gerar um jato de ar plano, descendente e não recirculado, através do bocal de descarga. Uma vez que o bocal de descarga do equipamento tem um comprimento de 70 cm, o dispositivo foi instalado por forma que o bocal abarcasse toda a largura do vão da porta (60 cm).

### 2.2.1. Caracterização do equipamento

Nos ensaios experimentais utilizou-se um dispositivo de cortina de ar da marca Centauro, modelo CC-90 (Figura 2.4), composto por um motor elétrico monofásico de 120 W, localizado na extremidade esquerda, responsável por acionar um ventilador do tipo tangencial com palhetas em alumínio.

A admissão do ar é feita através de uma grelha de aspiração, localizada na parte frontal do dispositivo de cortina de ar, com as dimensões (70×10) cm<sup>2</sup>. Depois de passar pelo

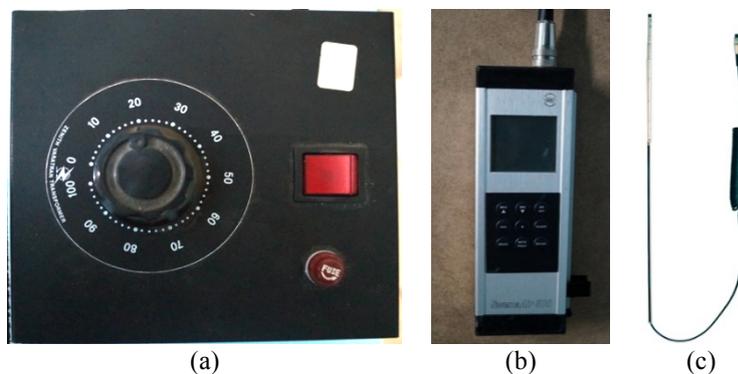
ventilador, o ar é injetado pelo bocal de descarga, situado na parte inferior e com  $(70 \times 4)$   $\text{cm}^2$ . O bocal de descarga ( $b_0=0,04$  m) possui um conjunto de lâminas em plástico que, além de permitirem alterar o ângulo do jato de ar, também permitem uniformizar o escoamento, diminuindo a turbulência inicial do jato.



**Figura 2.4.** Dispositivo de cortina de ar.

### 2.2.2. Sistema de controlo da velocidade do jato

Para a variação e a especificação da velocidade do jato, foi utilizado um variador de tensão analógico (Figura 2.5 (a)). Estabelecendo uma conexão entre este dispositivo e a cortina é possível variar a velocidade do motor através da seleção de um dos 100 valores (100 escalões disponíveis) e, conseqüentemente, a velocidade de descarga do jato.



**Figura 2.5.** (a) Variador de tensão; (b) SwemaAir 300; (c) Sonda SWA 31.

Para efetuar a medição da velocidade de descanga do jato utilizou-se um equipamento multifunções da marca SWEMA, modelo SwemaAir 300 (Figura 2.5 (b)), equipado com uma sonda com suporte telescópico (SWA 31). Este sistema permite a leitura de valores instantâneos da velocidade e da temperatura do ar. A sonda telescópica SWA 31, unidirecional, contém um termo-anemómetro de fio quente (Figura 2.5 (c)) capaz de medir valores da velocidade de 0,1 até 30 m/s, com uma precisão de  $\pm 0,05$  m/s para velocidades de 0,1 até 1,33 m/s e de  $\pm 4,5$  % do valor registado, para velocidades de 1,33 até 30 m/s.

## 2.3. Instrumentação e Técnicas

Para a medição das propriedades físicas revelantes (temperatura e concentração do gás traçador) durante a realização dos ensaios experimentais, foi necessário proceder à instrumentação de ambas as salas, de acordo com o pretendido.

### 2.3.1. Medição da concentração de CO<sub>2</sub>

Utilizou-se como gás traçador o dióxido de carbono, CO<sub>2</sub>. Para efetuar a sua monitorização, recorreu-se a um analisador de CO<sub>2</sub> da marca SENSOTRON, o modelo PS32 (Figura 2.6). Este analisador permite efetuar medições e gravá-las num ficheiro de texto (.txt), com um intervalo mínimo de aquisição de 10 segundos e possui uma gama de medição entre 0 e 5000 ppm, com uma precisão de  $\pm 1$  ppm.



Figura 2.6. Analisador de CO<sub>2</sub> (PS32).

#### I. Técnica dos gases traçadores

A técnica dos gases traçadores é usualmente utilizada na determinação da taxa de renovação de ar ( $n$  [ $\text{h}^{-1}$ ]). Esta técnica consiste na introdução de um gás num compartimento, geralmente não fazendo parte intrínseca da mistura interior, registando-se a sua evolução temporal em termos de concentração. Existem três métodos experimentais que usam a técnica dos gases traçadores: o método da emissão constante, o método da concentração constante e o método da concentração decrescente. Neste estudo, optou-se por utilizar o método da concentração decrescente, dado ser utilizado quando se pretende medir a taxa de renovação de ar de um espaço, num curto espaço de tempo e, por esse motivo, ser o que melhor se adequa ao pretendido.

O número de renovações de ar por hora  $n$  é dado pela razão entre o caudal volúmico de ar “novo” que entra num determinado espaço ( $\dot{V}$ ) e o volume efetivo desse espaço ( $V$ ):

$$n = \frac{\dot{V} [m^3 / h]}{V [m^3]} \quad (2.1)$$

A equação da conservação do gás traçador no interior de um compartimento é dada por Sherman (1989):

$$\underbrace{V \times \frac{dC(t)}{dt}}_{\text{Variação da quantidade de gás no compartimento}} = \underbrace{\left[ S(t) + \dot{V}(t) \times C_{ext} \right]}_{\text{Quantidade de gás traçador introduzido no compartimento}} - \underbrace{\left[ \dot{V}(t) \times C(t) \right]}_{\text{Quantidade de gás traçador que sai do compartimento}} \quad (2.2)$$

onde  $V [m^3]$  é o volume de ar do compartimento,  $C(t) [m^3/m^3]$  a concentração em volume de gás traçador existente no ar do compartimento,  $t [h]$  o tempo,  $S(t) [m^3/h]$  o caudal volúmico de gás traçador injetado no compartimento,  $C_{ext} [m^3/m^3]$  a concentração de gás traçador existente no compartimento (ambiente) exterior e  $\dot{V}(t) [m^3/h]$  o caudal volúmico de ar que sai do compartimento.

O caudal volúmico de renovação de ar pode ser calculado através da equação (2.3):

$$\dot{V}(t) = \frac{S(t) - V \times \frac{dC(t)}{dt}}{[C(t) - C_{ext}]} \quad (2.3)$$

O método da concentração decrescente baseia-se nas seguintes condições:

- Existe uma boa mistura do gás traçador com o ar ambiente do compartimento em estudo;
- É feita a monitorização da concentração exterior, visto o gás traçador utilizado ser o  $CO_2$ ;
- Não é introduzido gás traçador durante a realização do ensaio.

Tomando estes pontos em consideração, é possível simplificar a equação (2.3):

$$\dot{V}(t) = \frac{-V \times \frac{dC(t)}{dt}}{C(t) - C_{ext}} \quad (2.4)$$

O caudal instantâneo pode ser determinado recorrendo à equação (2.4), mas também pode ser, igualmente, utilizada para calcular o caudal médio durante o período de medida ( $\Delta t$ ):

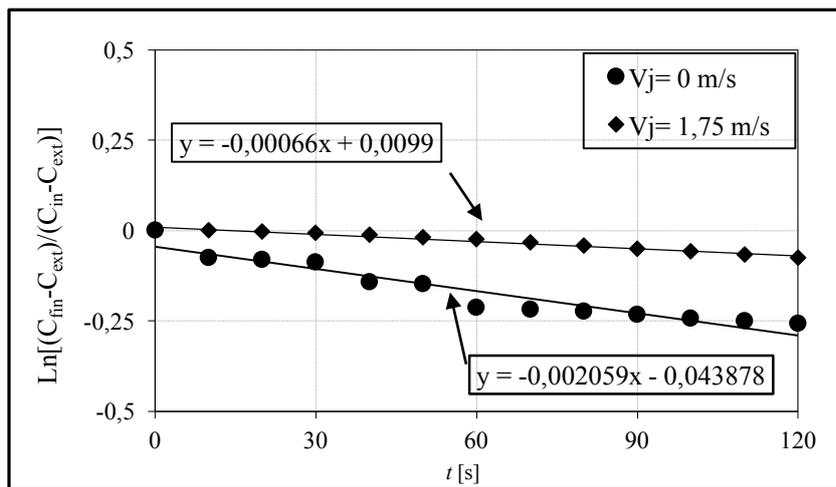
$$\bar{V} = -\frac{V}{\Delta t} \times \ln \left( \frac{C_{fin} - C_{ext}}{C_{in} - C_{ext}} \right) \quad (2.5)$$

sendo  $C_{final}$  a concentração de gás traçador no instante em que se termina o ensaio,  $C_{in}$  a concentração de gás no instante inicial do ensaio e  $\Delta t$  o tempo total do ensaio.

Assim, partindo da equação (2.5), o valor médio de renovações de ar num compartimento é determinado pela equação:

$$\bar{n} = \frac{-1}{\Delta t} \times \ln \left( \frac{C_{fin} - C_{ext}}{C_{in} - C_{ext}} \right) \quad (2.6)$$

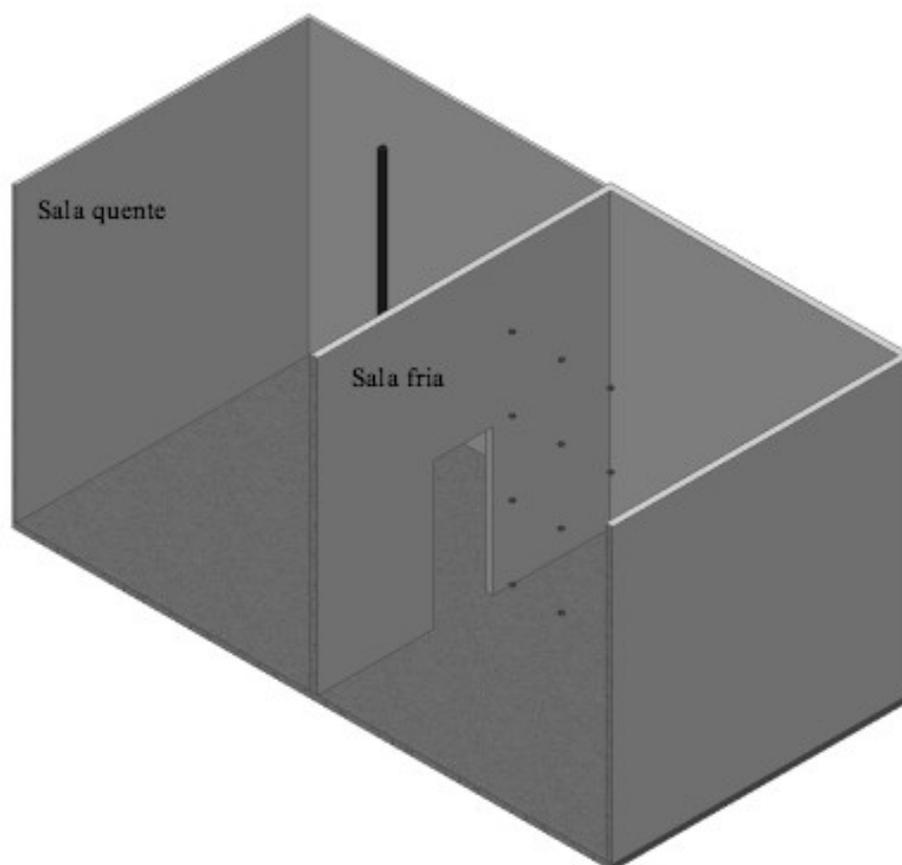
Na prática, a determinação do valor médio do número de renovações de ar consiste em fazer uma regressão linear no gráfico da representação logarítmica das evoluções temporais da concentração (Figura 2.7).



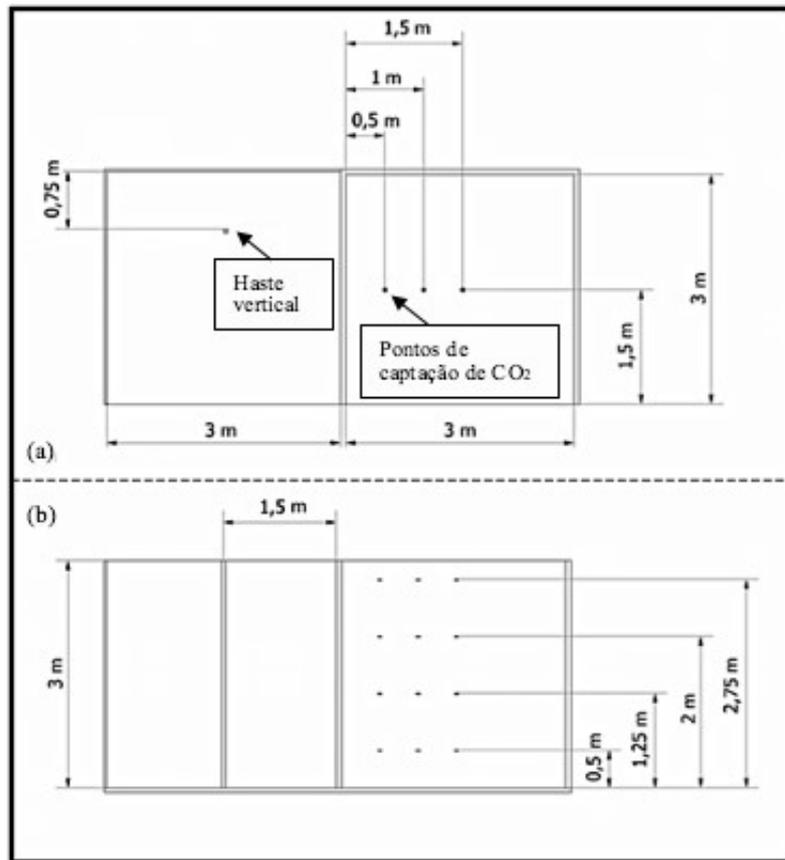
**Figura 2.7.** Decaimento logarítmico da concentração de CO<sub>2</sub> para cortina desligada ( $V_j=0$  m/s) e  $V_j=1,75$  m/s ( $\Delta T=10^\circ\text{C}$ ;  $H_p=1\text{m}$ ).

## II. Metodologia usada na medição da concentração de CO<sub>2</sub>

De forma a conseguir determinar com maior exatidão o valor médio da concentração de CO<sub>2</sub> na sala fria (sala que se pretende vedar), o gás traçador foi captado (em simultâneo) em 12 pontos da sala, cuja localização se encontra representada nas Figura 2.8 e 2.9. O gás traçador era depois canalizado através de tubagem para o analisador (PS32). Para que a medição fosse o mais precisa possível, procurou-se que o caudal aspirado fosse igual em todos os pontos. Assim, utilizaram-se dois conjuntos de 6 tubos de igual comprimento, cada conjunto ligado a uma bomba (de aquário) que aspirava o ar e posteriormente o conduzia ao analisador de gases (PS32). As bombas e o analisador de CO<sub>2</sub> encontram-se no exterior da instalação experimental.



**Figura 2.8.** Vista 3D da instalação experimental



**Figura 2.9.** Vistas em corte da instalação experimental: (a) Vista de topo; (b) Alçado lateral.

Uma vez que o gás traçador é o  $\text{CO}_2$  (um dos constituintes do ar atmosférico), antes de cada ensaio foi necessário medir, também, a sua concentração na sala quente.

### 2.3.2. Sistema de aquisição de dados

O sistema de medição e aquisição de dados é constituído por duas placas de aquisição *DAS 1600*, uma placa de expansão *EXP32*, um computador e um programa de aquisição de dados, especificado em seguida:

- Programa de aquisição: a aquisição de dados fez-se com base num programa executado em linguagem TestPoint, adaptado a partir do programa original de Brites (2004). O programa permite registar os dados e efetuar o tratamento dos sinais recebidos pelas sondas (13 termo-anemómetros e 13 termopares), mostrando em tempo real as temperaturas no interior dos compartimentos, enquanto regista os valores em ficheiro no formato (.txt).

- Placa de aquisição (EXP32): permite receber simultaneamente 32 sinais com diferentes valores de tensão. Complementada com duas placas de aquisição DAS 1600, cada uma capaz de adquirir 16 sinais independentes.

### 2.3.3. Medição da temperatura do ar

Para efetuar a medição da temperatura da sala quente utilizaram-se 13 termo-anemómetros (omnidirecionais esféricos) do modelo HT-412, da marca SENSOR. Estes sensores foram dispostos ao longo de uma haste na vertical, na localização representada na Figura 2.9. O seu funcionamento passa pela receção de sinais de tensão (segundo a segundo) e conversão dos mesmos em valores de temperatura e velocidade, gravados em dois ficheiros (.txt) e posteriormente convertidos para uma folha de cálculo em Excel.

Na sala fria, a temperatura foi medida por recurso a 13 termopares (do tipo K). Tal como nos termo-anemómetros é feita uma conversão dos valores de tensão, neste caso, apenas para temperatura e a gravação é feita num ficheiro de texto. Dado o fenómeno ser bastante transiente e ser difícil aferir a temperatura média da sala, os termopares encontram-se distribuídos uniformemente por todo o volume da sala fria. Isto porque, principalmente para os casos em que não existe vedação aerodinâmica, verifica-se uma taxa de renovação de ar muito elevada e, conseqüentemente, uma elevada movimentação de ar de uma sala para a outra.

## 2.4. Metodologia experimental

Os ensaios experimentais realizados tinham como propósito a quantificação do rendimento de vedação ( $\eta$ ) do dispositivo de cortina de ar para diferentes configurações. Este foi calculado pela seguinte equação:

$$\eta = \frac{n_0 - n_t}{n_0} \quad (2.7)$$

onde  $n_0$  é a taxa de renovações de ar para o caso de referência (cortina desligada) e  $n_t$  é a taxa de renovações para um dado regime de funcionamento da cortina.

O procedimento dos ensaios baseou-se nas seguintes etapas:

- i. Estabelecimento da velocidade de descarga do jato da cortina que se pretende (ensaios de referência com a cortina desligada);
- ii. Fecho da porta de ligação entre a sala fria e a sala quente;
- iii. Colocação do analisador na sala quente e anotação da concentração de CO<sub>2</sub>;
- iv. Fecho da porta de ligação da sala quente com o exterior;
- v. Colocação do analisador a registar a concentração de CO<sub>2</sub> da sala fria (método descrito no capítulo 2.3.1);
- vi. Monitorização das temperaturas das salas;
- vii. Climatização das salas (até se conseguir o  $\Delta T$  pretendido);
- viii. Juntamente com o passo anterior, efetuar a libertação de CO<sub>2</sub> para a sala fria (sempre com o cuidado de não se ultrapassar a concentração máxima medida pelo equipamento);
- ix. Interrupção do funcionamento dos ventiladores, assim como de todo o equipamento de climatização, quando atingido a  $\Delta T$  e a concentração de CO<sub>2</sub> pretendida;
- x. Colocação de todos os equipamentos de aquisição em modo de registo, aguardando cerca de 30 segundos (condições estacionárias);
- xi. Colocação da cortina de ar em funcionamento;
- xii. Abertura da porta de ligação das salas;
- xiii. Passados aproximadamente 3 minutos, cessar do registo de todo o equipamento de aquisição, assim como o funcionamento da cortina de ar.
- xiv. Fecho da porta de ligação das salas e “limpeza” do CO<sub>2</sub> da sala quente (recorrendo a uma ventoinha).



### 3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com o intuito de estabelecer uma velocidade ótima do jato do dispositivo de cortina de ar, para cada uma das configurações testadas procedeu-se à realização de diversos ensaios experimentais. Assim, fez-se variar a altura do vão da porta,  $H_p$ , do vão da porta de ligação da sala fria com a sala quente, a diferença de temperatura,  $\Delta T$ , entre ambas as salas e a velocidade de descarga do jato,  $V_j$ .

**Tabela 1.** Descrição das diferentes configurações dos ensaios experimentais realizados.

$H_p$ [m]	$\Delta T$ [°C]	$V_j$ [m/s]	$H_p$ [m]	$\Delta T$ [°C]	$V_j$ [m/s]
1	5	0	1,5	5	0
		1			1,5
		1,25			2
		1,5			2,25
		1,75			2,5
		2			2,75
		–			3
		0			0
	10	1,5		2	
		1,75		2,5	
		2		2,75	
		2,25		3	
		2,5		3,25	
		15		0	0
				1,5	2,5
	1,75			3	
	2			3,25	
	2,25			3,5	
	2,5			3,75	
	3			4	
	20	0		0	
		2		3	
		2,25		3,25	
		2,5		3,5	
		2,75		3,75	
		3		4	
		3,5		4,5	

Registou-se o rendimento de vedação para cada uma das velocidades de jato testadas, considerando três intervalos de tempo (60, 90 e 120 segundos) após o início do ensaio. Os

testes efetuados encontram-se identificados na Tabela 1. Os ensaios com  $V_j = 0$  m/s, que servem de base ao cálculo da eficiência da cortina, foram realizados em duplicado, certificando um bom desenvolvimento do ensaio.

Em todos os ensaios realizados o jato era descarregado na vertical, isto é,  $\alpha_0 = 0^\circ$ .

### 3.1. Altura de porta de 1 m

Em cada série de ensaios, tentou-se determinar a velocidade de descarga do jato correspondente ao máximo efeito de vedação.

Na Figura 3.1 mostram-se os resultados dos ensaios para  $\Delta T = 5^\circ\text{C}$  e  $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ , representando o rendimento de vedação ( $\eta$ ) para as diferentes velocidades de descarga impostas ao jato da cortina ( $V_j$ ).

De um modo geral, verifica-se que, para baixas velocidades de descarga, o jato não consegue atingir o solo (defletindo para a sala fria), deixando a porta desprotegida, que se traduz num baixo rendimento do efeito de vedação aerodinâmica. Verifica-se também a existência de uma velocidade do jato ótima ( $V_{j,\text{ótima}}$ ), correspondente ao rendimento máximo. Para velocidades de descarga superiores à ótima, observa-se um decréscimo do rendimento, fruto das trocas turbulentas com o ar ambiente de um e de outro lado do jato, e também do maior espalhamento do ar do jato na zona de impacto com o solo.

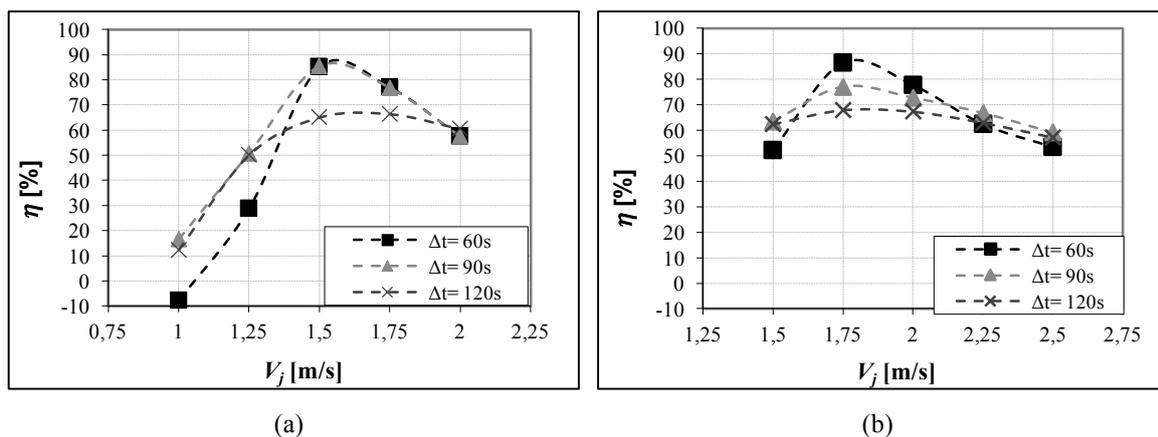


Figura 3.1. Rendimento de vedação,  $\eta$ : (a)  $\Delta T = 5^\circ\text{C}$  e  $H_p = 1$  m; (b)  $\Delta T = 10^\circ\text{C}$  e  $H_p = 1$  m.

Por outro lado, verifica-se que o rendimento de vedação decresce com o aumento do intervalo de tempo considerado para a porta aberta, exceto para  $V_j$  mais baixas que a  $V_{j,\text{ótima}}$ . O decréscimo do rendimento de vedação deve-se ao facto de, ao longo do tempo, a diferença

de temperatura das salas também diminuir. Para valores de  $V_j$  baixos, os valores maiores de rendimento observados para os intervalos de tempo maiores ( $\Delta t=90$  s e  $\Delta t=120$  s) deve-se à instabilidade do jato gerado pela cortina de ar, não conseguindo atingir de imediato o solo; isto é, o jato precisa de algum tempo para conseguir superar a forças transversais provocadas pela diferença de temperatura das salas estabilizando ao longo do tempo. Em alguns casos, se a velocidade imposta for muito baixa, pode-se obter um rendimento negativo, devido ao facto de a cortina de ar contribuir para o aumento das trocas de ar entre as salas (Figura 3.1(a), para  $V_j=1$  m/s).

Resultados com tendência semelhante são observados para maiores diferenças de temperatura entre as salas,  $\Delta T=15$  °C e  $\Delta T=20$  °C (Figura 3.2). Contudo, para  $\Delta T=20$  °C (Figura 3.2(b)), os resultados experimentais apresentam uma variação não esperada. Suspeita-se que este resultado se deva ao facto de os pontos escolhidos para as tomadas de  $\text{CO}_2$  não reproduzirem com suficiente precisão a distribuição de  $\text{CO}_2$  no interior do compartimento, para estas condições em particular ( $\Delta T=20$  °C;  $H_p=1$  m).

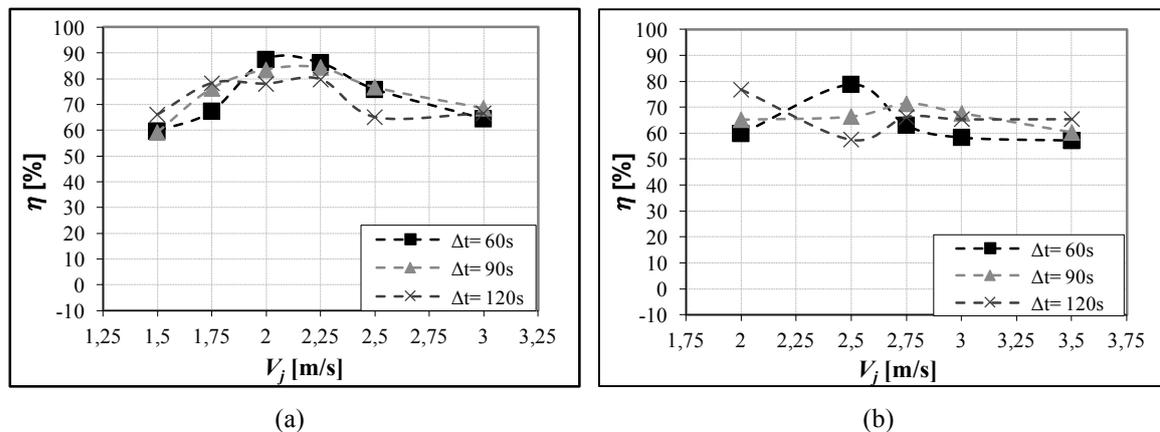


Figura 3.2. Rendimento de vedação,  $\eta$ : (a)  $\Delta T=15$  °C e  $H_p=1$  m; (b)  $\Delta T=20$  °C e  $H_p=1$  m.

### 3.2. Altura de porta de 1,5 m

Os resultados obtidos para  $H_p=1,5$  m apresentam um comportamento semelhante aos analisados anteriormente ( $H_p=1$  m). Como consequência, as conclusões para ambos os casos são semelhantes.

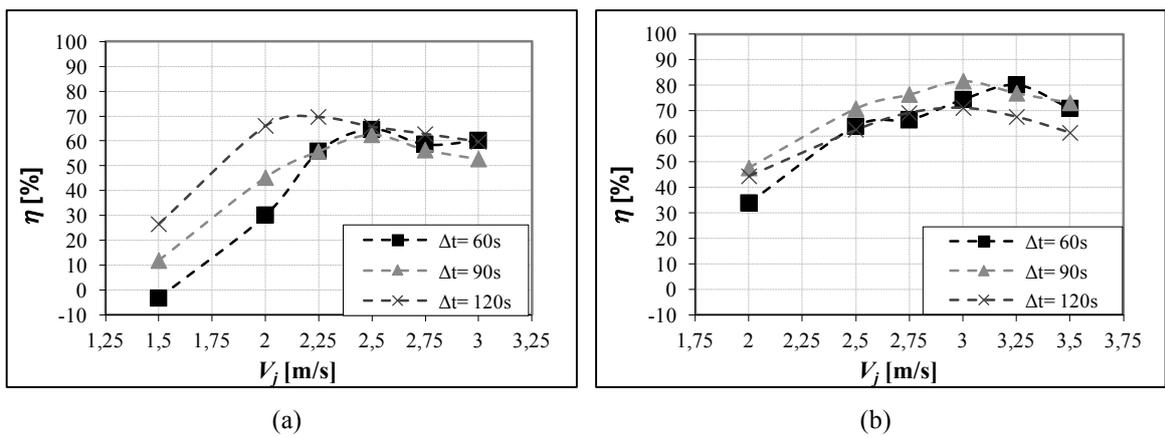


Figura 3.3. Rendimento de vedação,  $\eta$ : (a)  $\Delta T=5^\circ C$  e  $H_p=1,5 m$ ; (b)  $\Delta T=10^\circ C$  e  $H_p=1,5 m$ .

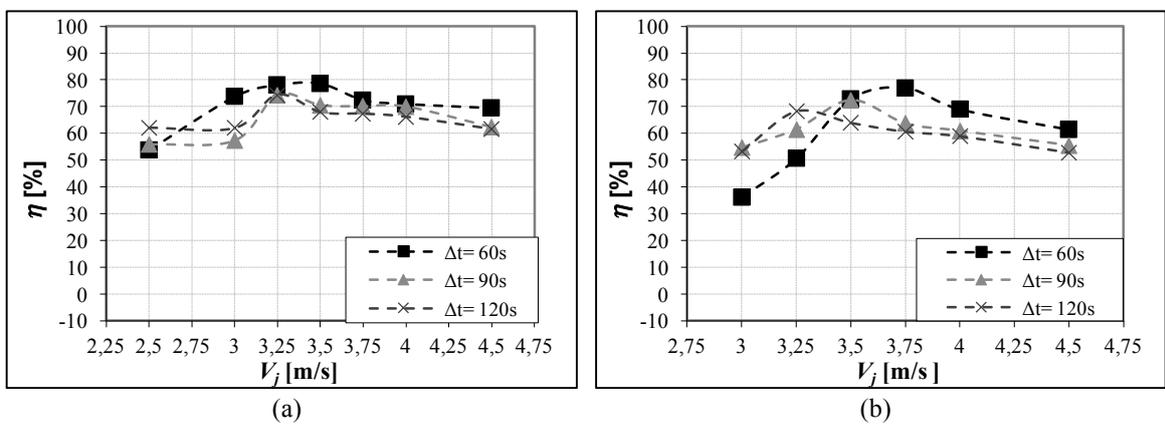
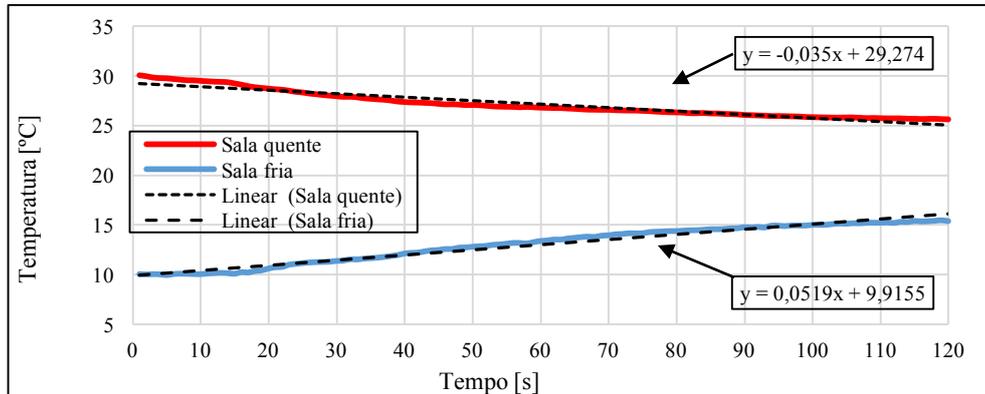


Figura 3.4. Rendimento de vedação,  $\eta$ : (a)  $\Delta T=15^\circ C$  e  $H_p=1,5 m$ ; (b)  $\Delta T=20^\circ C$  e  $H_p=1,5 m$ .

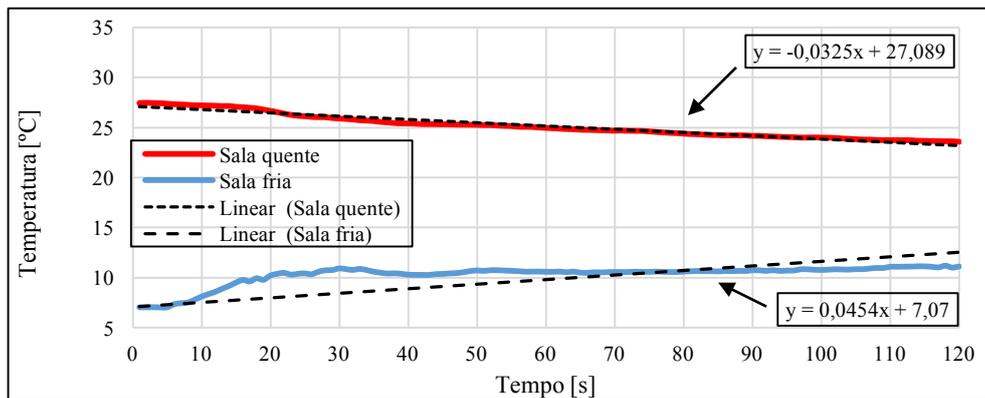
Contudo, uma vez que a altura da porta é maior ( $H_p=1,5 m$ ), verifica-se um acréscimo da taxa de renovação de ar,  $n$ , sendo também mais acentuado o aumento de temperatura na sala fria, e a correspondente diminuição na sala quente (vd. Figuras 3.5 e 3.6). Como seria de esperar, este comportamento é mais significativo para  $\Delta T=20^\circ C$ .

As figuras que se seguem apresentam a evolução da temperatura média em ambas as salas ao longo do tempo,  $t$ , para  $\Delta T=20^\circ C$  e  $H_p=1,5 m$ . O declive da linha de tendência da sala fria (sala que se pretende vedar) permite determinar o acréscimo da temperatura média por segundo.

Uma vez que o objetivo é manter a condição térmica da sala fria, a partir dos perfis temporais da temperatura média da sala fria, é também possível concluir que o efeito de vedação aerodinâmica é mais eficiente para valores de declive mais baixos. A Figura 3.5 mostra os perfis de temperatura das salas para o ensaio de referência ( $V_j=0 m/s$ ), enquanto que a Figura 3.6 mostra os resultados para  $V_j=3,25 m/s$ .

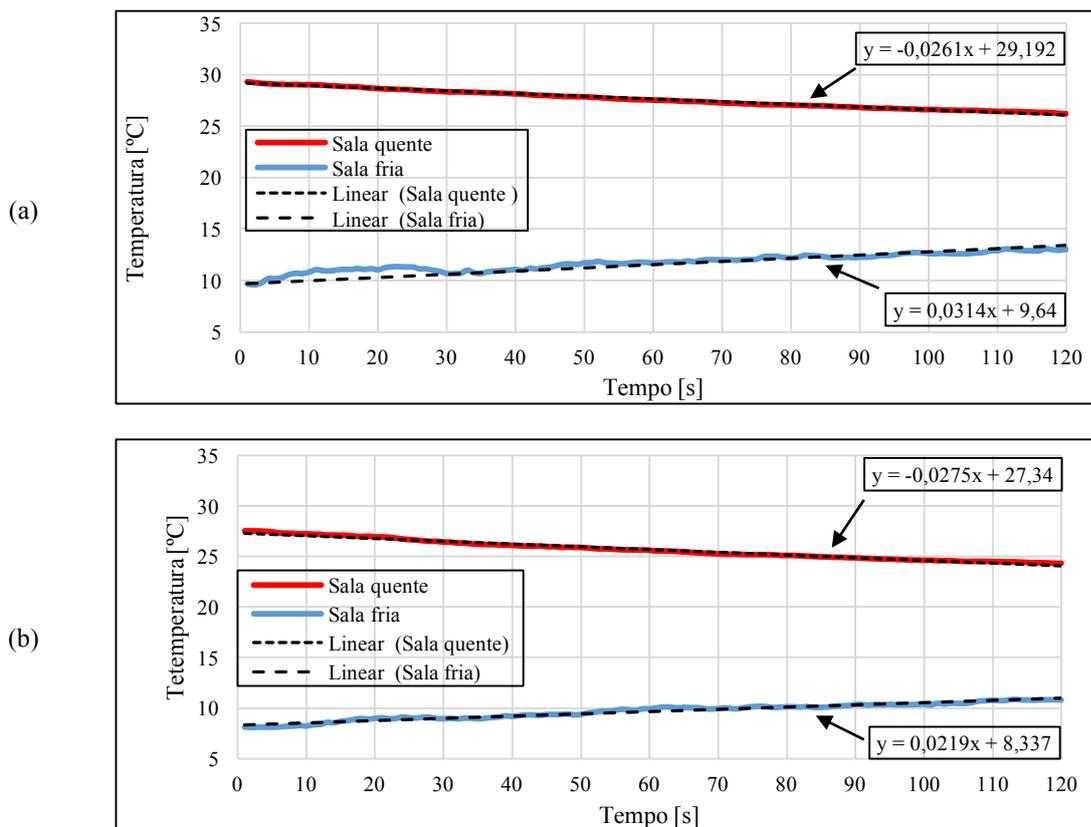


**Figura 3.5.** Evolução temporal da temperatura média das salas ( $\Delta T=20$  °C,  $H_p=1,5$  m e  $V_j=0$  m/s)



**Figura 3.6.** Evolução temporal da temperatura média das salas ( $\Delta T=20$  °C,  $H_p=1,5$  m e  $V_j=3,25$  m/s)

Partindo da observação da Figura 3.6 ( $\Delta T=20$  °C), é possível confirmar que, para velocidades do jato inferiores à velocidade ótima ( $3,25 < V_j < 3,75$  m/s, *cf.* Figura 3.4 (b)), se verifica uma instabilidade do jato da cortina de ar durante os primeiros instantes de funcionamento que, inevitavelmente, resulta num aumento considerável da temperatura da sala fria (para esses primeiros instantes, até  $t \approx 50$  s). À medida que a velocidade de descarga do jato se aproxima da velocidade ótima, o tempo de instabilidade do jato vai diminuindo. Tal é visível na Figura 3.7 (a) para  $V_j=3,5$  m/s, em que demora aproximadamente 30 segundos a estabilizar.



**Figura 3.7.** Evolução temporal da temperatura média das salas. (a)  $\Delta T=20$  °C,  $H_p=1,5$  m e  $V_j=3,5$  m/s; (b)  $\Delta T=20$  °C,  $H_p=1,5$  m e  $V_j=3,75$  m/s

Pela Figura 3.7 (b), verifica-se que o perfil temporal da temperatura da sala fria é praticamente linear, quase coincidindo com a linha de tendência. O rendimento máximo para  $\Delta t = 60$  s é obtido para a velocidade do jato inerente à respetiva figura ( $V_j = 3,75$  m/s), como já tinha sido mostrado pela Figura 3.4 (b)).

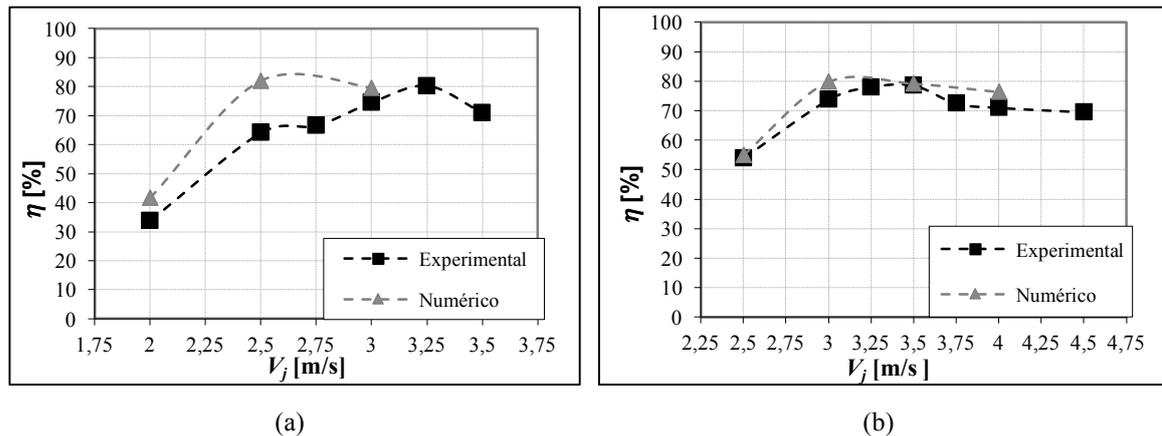
### 3.3. Comparação e conjugação com resultados anteriores

Neste subcapítulo confrontam-se os resultados apresentados anteriormente, obtidos por via experimental, com resultados numéricos obtidos para a mesma configuração em estudos anteriores (Gonçalves *et al*, 2016). Apenas são mostrados os resultados, considerando os primeiros 60 segundos após a abertura da porta ( $\Delta t=60$  s).

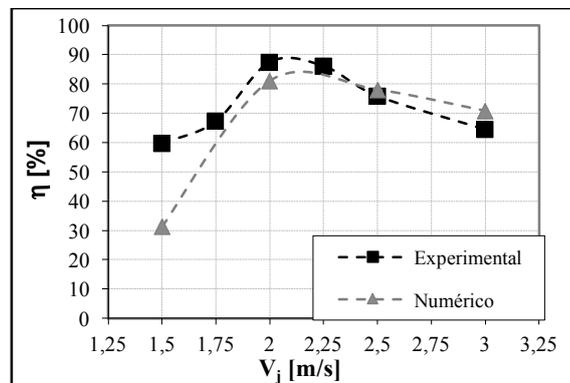
A Figura 3.8 mostra o confronto dos resultados para  $H_p=1,5$  m, e a Figura 3.9 os correspondentes resultados para  $H_p=1$ m. Na globalidade verifica-se uma boa concordância entre os resultados obtidos por ambas as vias (experimental e numérica). No caso de

$H_p=1,5\text{m}$ , verifica-se que os valores da velocidade ótima são ligeiramente inferiores aos apurados experimentalmente.

De um modo geral, pode concluir-se que a modelação numérica fornece boas previsões para a velocidade ótima a impor ao jato da cortina.



**Figura 3.8.** Rendimento de vedação,  $\eta$ , obtido por via experimental, no presente trabalho, e por via numérica (Gonçalves *et al*, 2016): (a)  $\Delta T=10^\circ\text{C}$ ,  $H_p=1,5\text{m}$  e  $\Delta t= 60\text{s}$ ; (b)  $\Delta T=15^\circ\text{C}$ ,  $H_p=1,5\text{m}$  e  $\Delta t= 60\text{s}$  ;

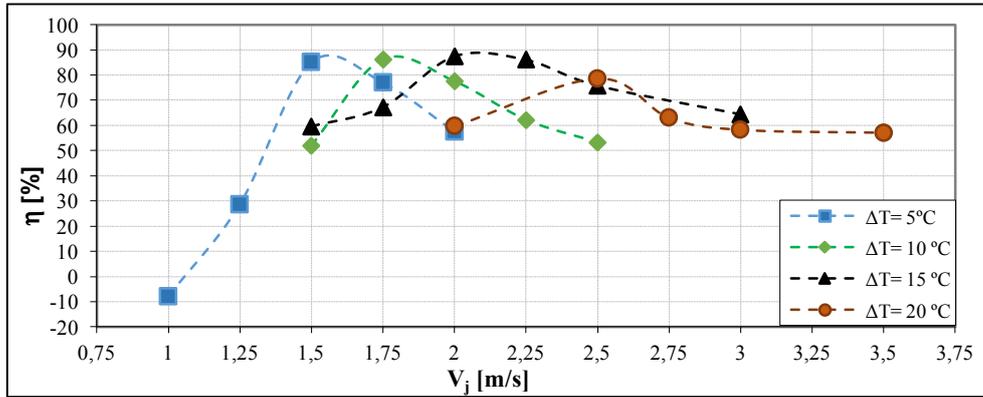


**Figura 3.9.** Rendimento de vedação vedação,  $\eta$ , obtido por por via experimental, no presente trabalho, e por via numérica (Gonçalves *et al*, 2016), para  $\Delta T=15^\circ\text{C}$ ,  $H_p=1\text{m}$  e  $\Delta t= 60\text{s}$ .

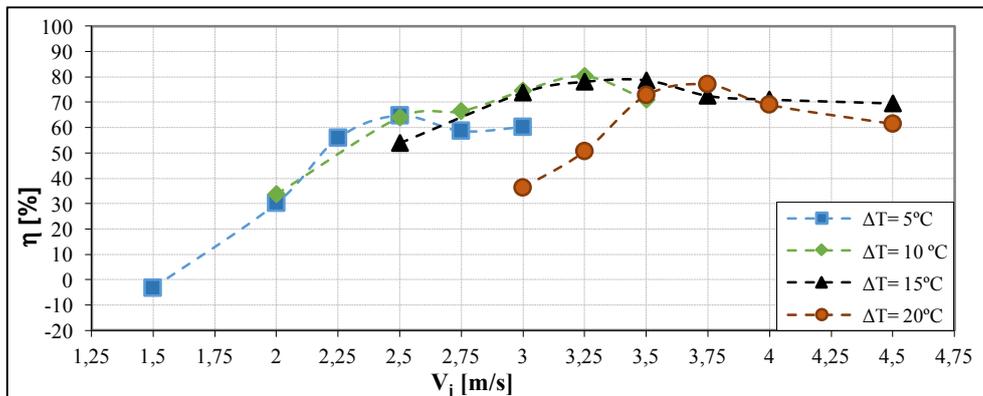
### 3.4. Proposta de uma correlação empírica

Como referido nos objetivos iniciais, pretende-se propor uma relação empírica para a velocidade a impor ao jato da cortina de ar em função dos parâmetros relevantes. Esta correlação será posteriormente incorporada no sistema automático de controlo da cortina de ar. Interessa, por isso, efetuar uma análise do comportamento da cortina nos primeiros 60 segundos de ensaio já que, dependendo da configuração de utilização, é desejado que o jato seja estável desde os instantes iniciais após a abertura da porta.

Na Figura 3.10 e na Figura 3.11 apresentam-se as curvas do rendimento de vedação aerodinâmica,  $\eta$ , em função da velocidade de descarga do jato,  $V_j$ , para diferentes  $\Delta T$  nos primeiros 60 segundos. Estas compilam os resultados experimentais apresentados anteriormente, para as duas alturas de porta consideradas.



**Figura 3.10.** Rendimento de vedação,  $\eta$ , para  $H_p=1\text{m}$  e  $\Delta t=60\text{s}$ .



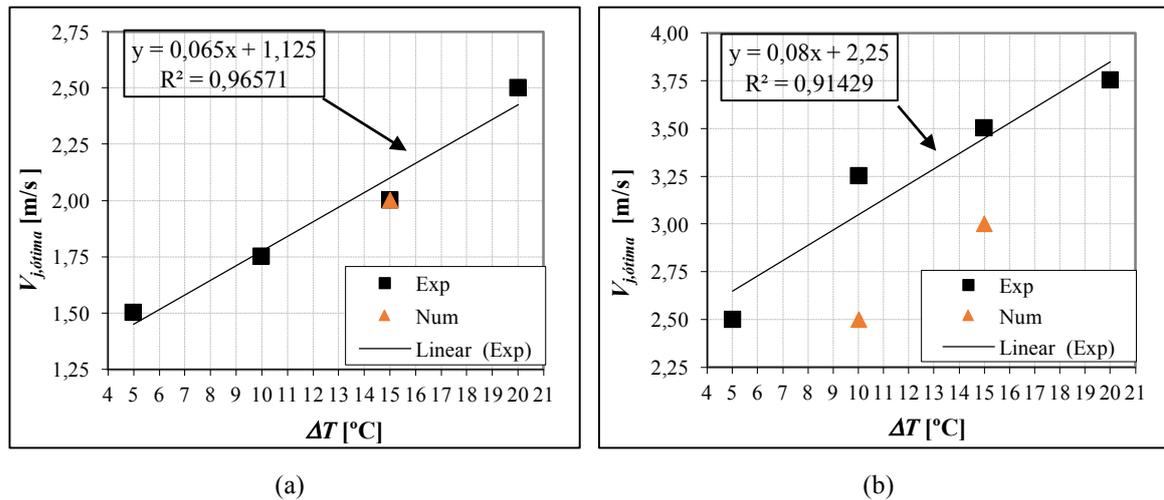
**Figura 3.11.** Rendimento de vedação  $\eta$ , para  $H_p=1,5\text{m}$  e  $\Delta t=60\text{s}$ .

Pela análise da Figura 3.10 e da Figura 3.11, constata-se que a velocidade ótima do jato aumenta para valores de  $\Delta T$  superiores, evidenciando assim a necessidade de ajustar a velocidade do jato consoante o valor ou a variação de  $\Delta T$ .

Na Figura 3.12 compilam-se os resultados dos valores da velocidade do jato ótima ( $V_{j,\text{ótima}}$ ), para os quais se obtiveram os valores de rendimento máximo (Figura 3.10 e 3.13), para  $H_p=1\text{m}$  e  $H_p=1,5\text{m}$  (Figura 3.12 (a) e (b), respetivamente). A estes valores ajustou-se uma linha de tendência linear (traduzida por uma equação do tipo  $y=mx + b$ ). Verifica-se que os

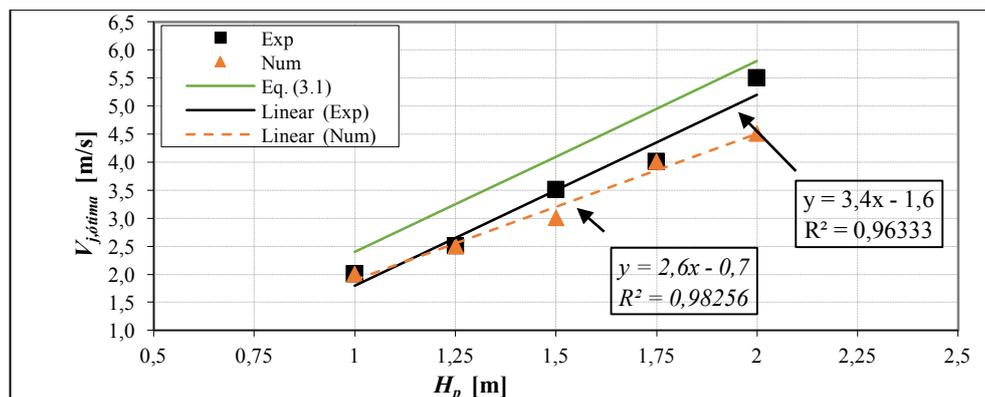
declives da regressão linear representada nas Figura 3.12 (a) e (b) apresentam valores relativamente próximos para as ambas as alturas de porta.

Nestes gráficos mostram-se também os resultados da modelação numérica, que, para  $H_p=1,5$  m, apresentam valores mais baixos do que os obtidos no presente estudo experimental.



**Figura 3.12.** Velocidade ótima do jato em função de  $\Delta T$ . (a)  $H_p=1$  m; (b)  $H_p=1,5$  m

Na Figura 3.13 encontram-se representados os valores de  $V_{j,ótima}$  em função da altura da porta,  $H_p$ , e para um  $\Delta T=15$  °C.



**Figura 3.13.** Velocidade ótima do jato em função da  $H_p$  para  $\Delta T=15$  °C

Uma vez que os ensaios experimentais para esta configuração (a amarelo na Tabela 2) eram insuficientes para permitir definir uma regressão linear, foi necessário recorrer a resultados experimentais anteriores para outros valores de altura de porta, disponíveis em Gonçalves *et al.*, (2016). Com base nesta consideração, constatou-se uma boa aproximação da regressão linear aos resultados experimentais, traduzida pelo elevado valor do coeficiente de

correlação ( $R^2=0,96333$ ). Observa-se ainda que, para os resultados numéricos, a aproximação é ligeiramente melhor.

**Tabela 2.** Velocidade ótima do jato em função da  $H_p$  para  $\Delta T=15$  °C

$H_p$ [m]	1	1,25	1,5	1,75	2
$V_{j,ótima}$ [m/s]	2	2,5	3,5	4	5,5

Tendo em conta o conjunto de todos estes resultados experimentais (Figura 3.12 e Figura 3.13), propõe-se a seguinte correlação empírica para a variação da velocidade de descarga do jato em função da diferença de temperatura,  $\Delta T$ , e da altura da porta,  $H_p$ :

$$V_{j,ótima} = (3,4 \times H_p) + (0,0725 \times \Delta T) - 2,0875 \quad (3.1)$$

Na Figura 3.13 mostra-se também o resultados da previsão da Equação 3.1. Conforme se pode observar, esta correlação estima valores ligeiramente superiores aos da velocidade ótima obtida pelos ensaios experimentais. Isto traduz-se numa margem de segurança, para melhor garantia da continuidade do jato da cortina de ar até ao solo.

## 4. SISTEMA DE CONTROLO AUTOMÁTICO DA CORTINA DE AR

Para um controlo eficaz da cortina de ar, revelou-se necessário recorrer à utilização de um sistema de controlo automático capaz de controlar a velocidade do jato, por forma a garantir um funcionamento sempre próximo das condições ótimas, isto é, capaz de alterar a velocidade de rotação do motor do ventilador consoante o valor medido de  $\Delta T$  (diferença entre as temperaturas medidas de ambos os lados da cortina), para uma dada altura de porta  $H_p$ . Adicionalmente, pretendia-se que fosse de fácil implementação e instalação, quer em termos de *software*, quer de *hardware*. Com este objetivo em mente, selecionou-se um microprocessador e um conjunto de periféricos, descritos nos subcapítulos que se seguem.

### 4.1. Microprocessador

Durante a conceção e a construção do sistema de controlo automático, utilizou-se uma placa da marca Arduino Uno (Figura 4.1) com um microprocessador da ATmega328P. A motivação inerente à seleção deste dispositivo deveu-se ao facto de este:

- Possibilitar o desenvolvimento de controlo de sistemas interativos, a baixo custo;
- Permitir enviar e receber informação de, praticamente, todos os sistemas eletrónicos, tornando simples, por exemplo, a construção de um sistema de captação de dados de sensores;
- Ser um sistema *open-source*, isto é, que pode ser usado por todos sem custos adicionais pós aquisição.

As especificações técnicas do equipamento são as seguintes (“ArduinoBoardUno@www.arduino.cc”):

- |                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Microcontrolador ATmega328P;</li><li>• Tensão de operação de 5 V;</li><li>• Tensão de entrada entre 7 a 12 V;</li><li>• 14 Entradas/Saídas (6 pins PWM);</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>• 6 Pins de entrada analógicos;</li><li>• Memória Flash de 32 KB (ATmega328P), com 0,5 KB para <i>bootloader</i>;</li><li>• Velocidade de <i>clock</i> de 16 MHz.</li></ul> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

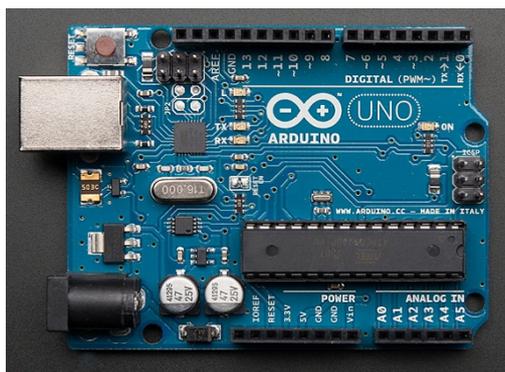


Figura 4.1. Placa Arduino UNO.

Este microprocessador faz uso da linguagem C/C++. O fabricante disponibiliza ainda uma série de bibliotecas que simplificam a escrita da programação.

## 4.2. Desenvolvimento em Arduino

Além da utilização de uma placa para processamento de informação (Figura 4.1), houve necessidade de construir uma outra placa para controlo do motor, de instrumentar as salas com sensores de temperatura e de adquirir um ecrã LCD para monitorizar a temperatura de cada sala. Os componentes utilizados e as respetivas finalidades encontram-se definidos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Lista de componentes e respetiva função.

Componentes	Função	
	Secundária	Principal
Resistência 12 k $\Omega$ ; ½ W	Deteção de passagem por zero	Controlo da velocidade do motor da cortina de ar
Resistência 27 k $\Omega$ ; 2 W		
Ponte retificadora		
Octocoplador H11AA1		
Resistência 180 $\Omega$	Controlo do TRIAC	
Resistência 1,5 k $\Omega$ ; ½ W		
Resistência 210k $\Omega$ ; ½ W		
Octocoplador MOC3020		
TRIAC BTA12-600		
Condensador 10 nF		
2· TMP36	–	Medição de temperatura
2· Condensadores 0,1 $\mu$ F		
LCD 16·2	–	Exibição da temperatura

#### 4.2.1. Controlo da velocidade do jato da cortina de ar

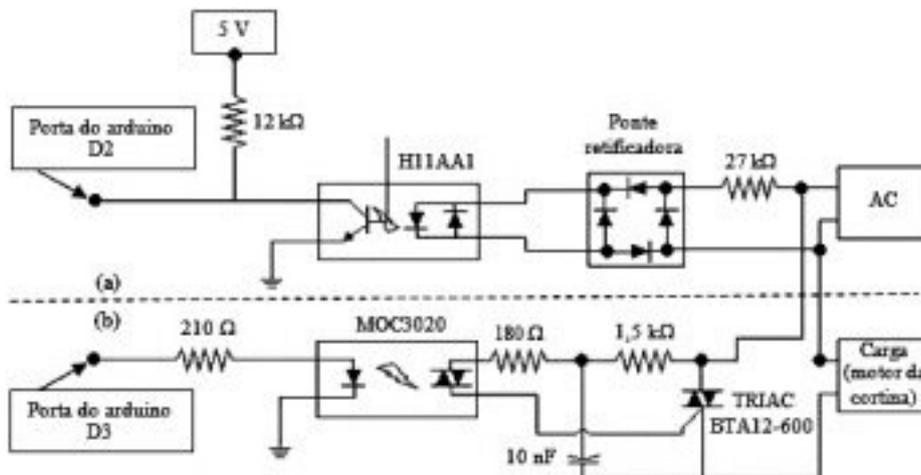
O controlo da velocidade de rotação do motor é feita através de um dispositivo designado Dimmer (Figura 4.2). Este dispositivo recorre ao TRIAC para fazer variar a tensão média que alimenta a carga com maior ou menor retardamento, disponibilizando, desta forma, maior ou menor potência ao motor da cortina de ar e, assim, variar a velocidade de descarga do jato.



**Figura 4.2.** Dispositivo de controlo da velocidade de rotação do motor (Dimmer).

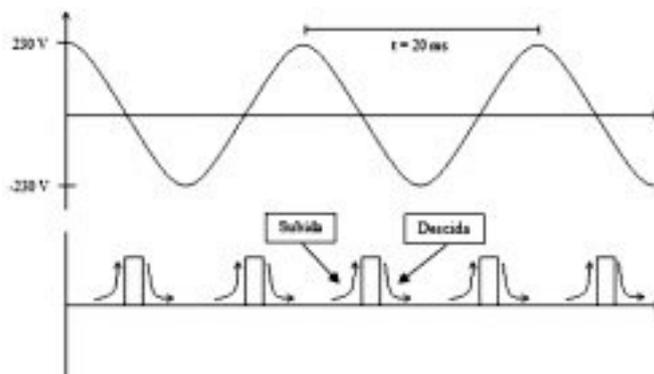
A potência fornecida ao motor é tanto maior quanto menor for o tempo,  $t$ , entre a passagem por zero da onda da corrente alternada (AC) e o disparo do TRIAC, ou seja, quanto maior o tempo, maior é parcela de tensão que não chega à carga (motor da cortina de ar) (Figura 4.5). Para que haja um bom funcionamento deste tipo de sistemas, o tempo de disparo do TRIAC é calculado em relação à passagem por zero (Figura 4.4).

Na Figura 4.3 é apresentada uma ilustração do esquema de construção do sistema de controlo.



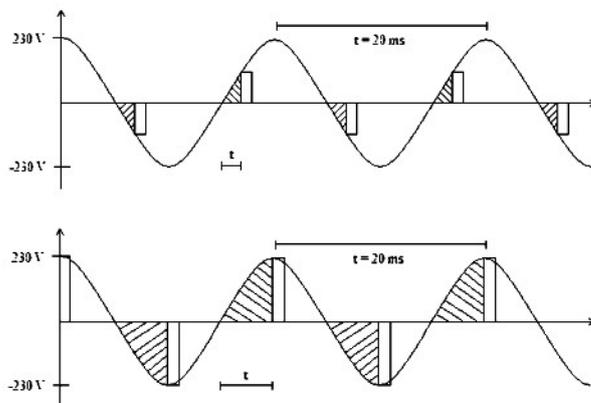
**Figura 4.3.** Esquema do sistema de controlo da velocidade de rotação do motor. (a) Detetor de passagem por zero da onda corrente alternada (AC); (b) Controlo do TRIAC.

A parte acima da linha a tracejado (Figura 4.3 (a)) tem como objetivo detetar a passagem por zero da onda de corrente alternada (AC), enviando, a cada passagem, um impulso para o Arduino (“subida” e “descida”) pela entrada D2, conforme a representada na Figura 4.4.



**Figura 4.4.** Detecção de passagem por zero da onda de corrente alternada (AC).

Assim que o impulso é recebido (subida), o microprocessador inicia a contagem do tempo,  $t$ , ao fim do qual enviará um sinal pela saída D3 (Figura 4.5), ativando a passagem de corrente pelo circuito de controlo do TRIAC (Figura 4.3 (b)).



**Figura 4.5.** Variação do ângulo de disparo do TRIAC.

Na Figura 4.5 estão representados dois ângulos de disparo diferentes do TRIAC, com a zona a tracejado a representar a tensão que não chega à carga.

#### 4.2.2. Medição da temperatura

Para a medição da temperatura utilizaram-se dois sensores de temperatura TMP36. Estes proporcionam uma saída em tensão, diretamente proporcional à temperatura em °C (10

mV/°C), e são capazes de efetuar a medição de temperaturas entre os  $-40\text{ °C}$  e  $125\text{ °C}$ , com um erro de  $\pm 1\text{ °C}$ . O esquema do sistema de medição e registo de temperatura é apresentado na Figura 4.6.

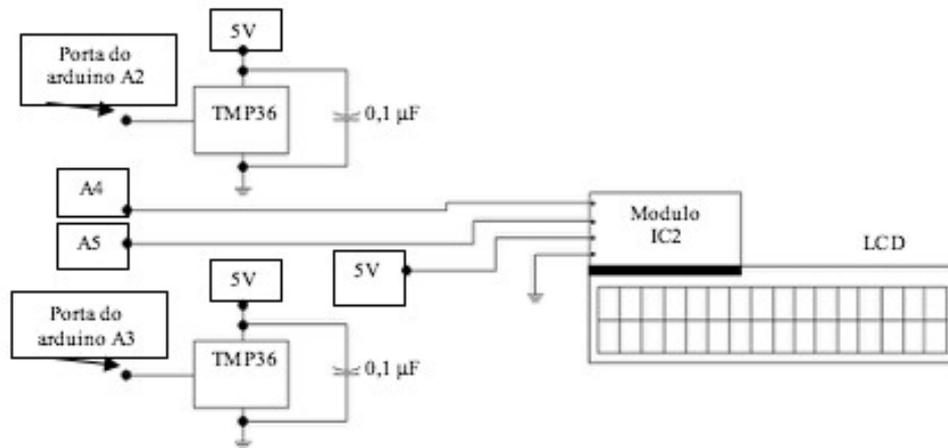


Figura 4.6. Esquema do sistema de medição e registo de temperatura.

Um dos sensores referidos (Figura 4.7 (b)) é colocado na sala fria e o outro na sala quente, com o intuito de aferir a  $\Delta T$  entre as salas. O valor de temperatura medido pelos mesmos é exibido num LCD (Figura 4.7 (a)), para informação do utilizador.



(a)



(b)

Figura 4.7. (a) LCD; (b) Sensores de temperatura TMP36.

### 4.3. Programação

A colocação do sistema em funcionamento requer a introdução, pelo utilizador, do valor da altura de instalação da cortina de ar,  $H_p$ , a colocação de um sensor de temperatura em cada

uma das salas e, finalmente, a conexão do dispositivo de controlo ao motor da cortina de ar. Posto isto, o sistema é capaz de fazer variar automaticamente a velocidade do jato através de um cálculo sistemático (de 2 em 2 segundos), baseado na equação (3.1).

O sistema de controlo permite variar a velocidade do jato entre 0 a 99 patamares. Os valores obtidos para este intervalo designaram-se por Potência do TRIAC,  $P_{TRIAC}$ .

Para que o sistema seja capaz de controlar automaticamente a velocidade do jato, foi necessário calibrar previamente o sistema de controlo automático. Com este objetivo em vista, programou-se o microprocessador de maneira a introduzir o  $P_{TRIAC}$  que se pretendia. Aquando da inserção dos valores de  $P_{TRIAC}$  (0, 1, 5 e, posteriormente, com incrementos de 5 até 99), efetuou-se o registo da velocidade do jato correspondente. Os valores obtidos para as duas medições realizadas encontram-se representados na Figura 4.8.

Nas duas medições efetuadas, os valores registados são próximos e apresentam um coeficiente de correlação próximo de 1. Assim, através da equação(4.1) é possível obter uma boa aproximação do  $P_{TRIAC}$  em relação a  $V_j$  pretendida.

$$P_{TRIAC} = 15,719 \times V_j - 4,34145 \tag{4.1}$$

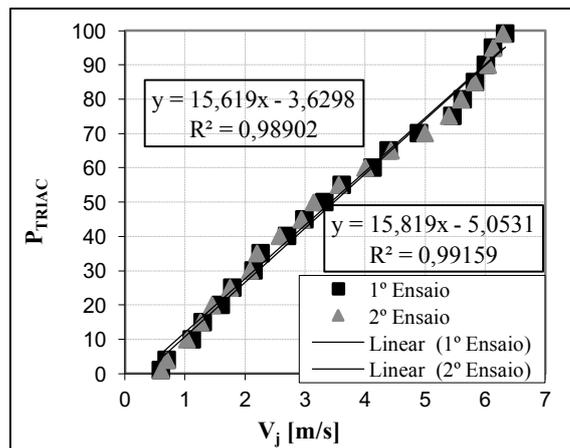


Figura 4.8. Calibração do sistema automático

Feita a calibração, procedeu-se à programação do sistema de controlo automático de acordo com o diagrama funcional representado na Figura 4.9.

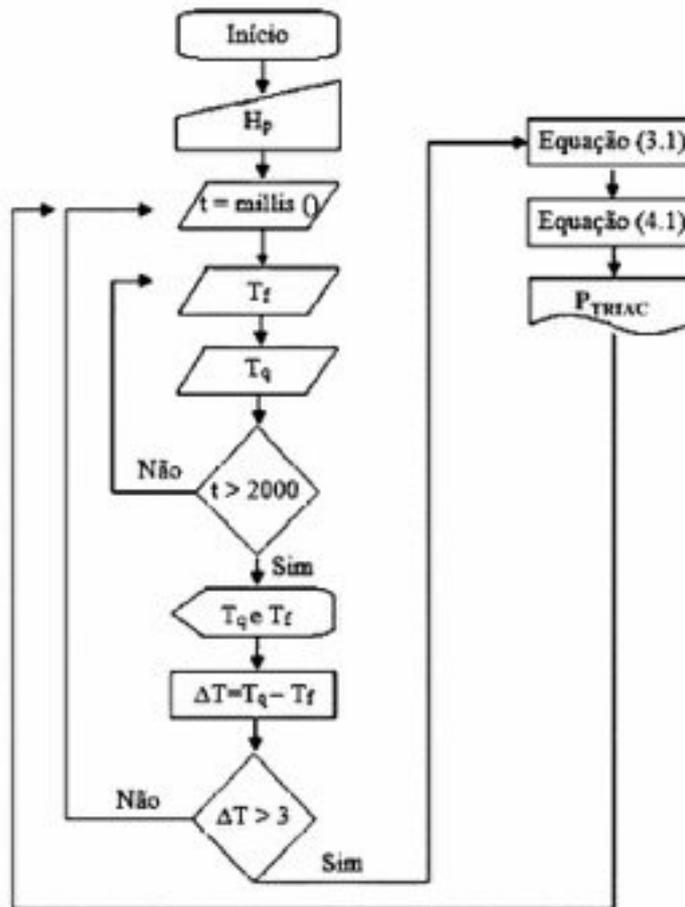
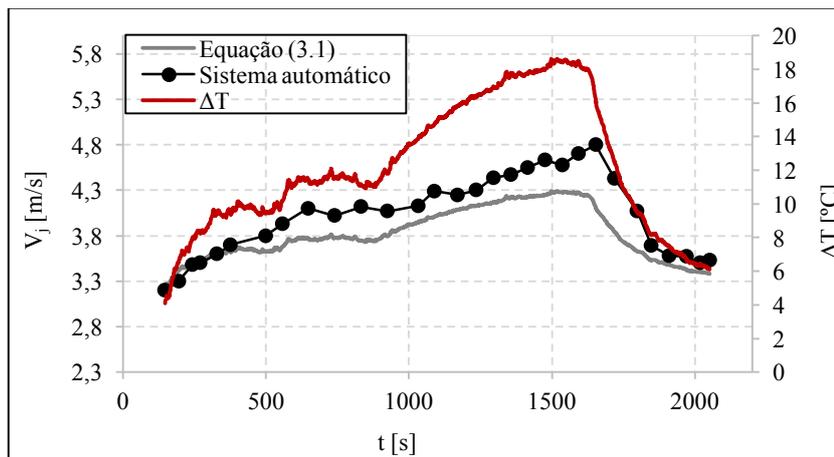


Figura 4.9. Diagrama funcional do sistema de controlo automático

#### 4.4. Testes exploratórios

De modo a testar o sistema automático realizaram-se quatro ensaios, para  $H_p = 1,5$  m.

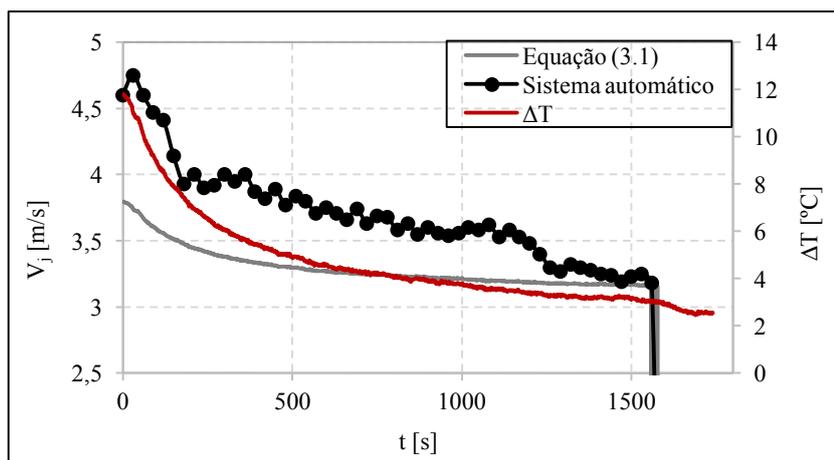
No primeiro (Figura 4.10), mantendo fechada a porta de ligação entre as duas salas, com auxílio do sistema de climatização, procedeu-se ao arrefecimento da sala fria e aquecimento da sala quente, aumentando desta forma a diferença de temperaturas entre as salas, tendo depois sido desligado o sistema de climatização e aberto a porta de ligação. Em simultâneo, procedeu-se à medição da velocidade do jato e ao registo da diferença de temperatura das salas. Os valores obtidos estão representados na Figura 4.10.



**Figura 4.10.** Evolução temporal do  $\Delta T$  das salas e da  $V_j$  utilizando o sistema de controlo automático.

Tal como esperado, verificou-se que a velocidade de descarga do jato sofreu um acréscimo gradual com o aumento da diferença de temperatura entre as salas,  $\Delta T$ . No entanto, o valor registado é ligeiramente superior ao valor obtido através da equação (3.1) (valor pretendido).

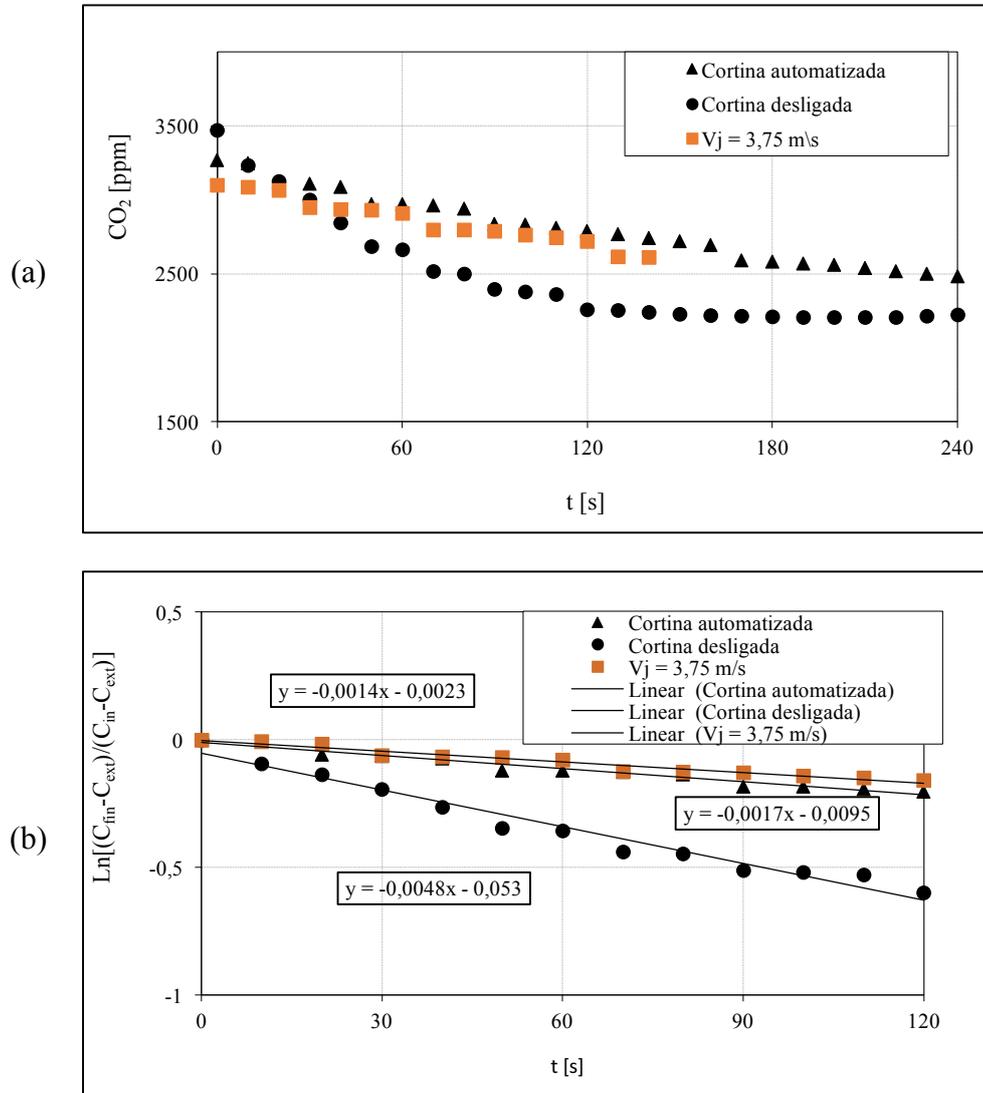
O segundo ensaio (Figura 4.11) consistiu na colocação das salas a uma  $\Delta T = 12\text{ }^\circ\text{C}$ ; assim que se atingiu o  $\Delta T$  pretendido, abriu-se a porta e deu-se início ao registo dos valores da velocidade do jato de 30 em 30 segundos. O comportamento da cortina de ar foi semelhante ao registado anteriormente. Este ensaio serviu ainda para verificar se a cortina à especificação de desligar automaticamente para  $\Delta T < 3\text{ }^\circ\text{C}$ , facto este que se confirmou.



**Figura 4.11.** Evolução temporal do  $\Delta T$  das salas e da  $V_j$  utilizando o sistema de controlo automático.

No terceiro e quarto ensaios, recorreu-se ao uso da metodologia referida no capítulo 2.4 e registou-se o decaimento do  $\text{CO}_2$ . Num dos ensaios, a cortina a ser controlada pelo sistema automático e, no outro, com a cortina desligada (para a condições iniciais de  $\Delta T = 20\text{ }^\circ\text{C}$  e

$H_p=1,5$  m), na Figura 4.12 estão representados os pontos do decaimento de  $\text{CO}_2$  registados para estes dois caso e ainda para o caso  $V_j=3,75$  m/s (velocidade de descarga ótima do para  $\Delta T=20$  °C e  $H_p=1,5$  m nos primeiros 60s).



**Figura 4.12.** (a) Decaimento da concentração de  $\text{CO}_2$ ; (b) Decaimento logarítmico da concentração de  $\text{CO}_2$ .

Pela Figura 4.12 (a) verifica-se que, com a cortina desligada, passados aproximadamente 120 s deixa de haver decaimento de  $\text{CO}_2$ , o que significa que o ar das salas se encontra completamente misturado. Por seu turno, no ensaio com a cortina automatizada, o decaimento da concentração de  $\text{CO}_2$  é bastante mais suave. Pode-se observar ainda que o decaimento da concentração de  $\text{CO}_2$  no caso de utilizar cortina automatizada é semelhante ao decaimento de  $\text{CO}_2$  para uma velocidade de descarga de 3,75 m/s, pelo que se pode concluir que o sistema automático está a funcionar próximo das condições ótimas.

Através da técnica dos gases traçadores, calculou-se o rendimento da vedação aerodinâmica para os primeiros 60, 90 e 120 segundos de porta aberta. Os dados obtidos são apresentados na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2.** Rendimento da cortina de ar com o sistema de controlo automático

$\Delta t$ [s]	60	90	120
$\eta$	64,31	66,17	64,04

É possível observar que o rendimento de vedação pouco varia para os diferentes tempos de porta aberta, mantendo-se próximo de 65%. No entanto, este valor é ligeiramente inferior à média do rendimento máximo de vedação para  $H_p=1,5$  m, que é sensivelmente 75%.

#### 4.5. Notas conclusivas

Ainda que o sistema automático tenda a sobredimensionar a velocidade de descarga do jato, de um modo geral, responde ao aumento da diferença de temperatura entre espaços com o necessário aumento da velocidade do jato; e, igualmente, em sentido contrário, desligando a cortina de ar quando  $\Delta T < 3$  °C, conforme especificado.

O rendimento de vedação obtido por recurso ao sistema automático é ligeiramente inferior ao valor médio do rendimento máximo para a mesma altura de porta ( $H_p=1,5$  m). Ainda assim, a eficiência da vedação mantém-se aproximadamente constante ao longo dos 120 segundos de porta aberta, o que não se verificou anteriormente, com velocidade do jato constante.

Apesar de o do sistema de controlo carecer ainda de melhorias e alguns desenvolvimentos, foi possível verificar que se encontra operacional, demonstrou-se a sua utilidade e pode concluir-se que os objetivos inicialmente traçados para este trabalho foram alcançados.

## 5. CONCLUSÕES

Ao chegar ao fim desta dissertação pode-se afirmar que os objetivos inicialmente propostos foram cumpridos.

Do estudo experimental do dispositivo de cortina de ar, confirmou-se que existe, para diferentes configurações, uma velocidade de descarga do jato à qual o rendimento de vedação é máximo. Contudo, a velocidade do jato deverá ser sempre ligeiramente superior, de forma a garantir que o jato de ar tem estabilidade suficiente para resistir a eventuais perturbações. No entanto, velocidades de jato muito superiores à velocidade ótima, resultam em trocas de energia maiores e, conseqüentemente, numa menor eficiência de vedação da cortina de ar.

Do confronto dos resultados numéricos anteriores com os obtidos experimentalmente neste estudo, resultou uma boa concordância, pelo que se pode concluir que é possível ter boas previsões da velocidade ótima a impor ao jato recorrendo à simulação numérica (CFD).

Contatou-se ainda que o aumento da altura da porta, assim como o aumento da diferença de temperatura entre os dois lados da cortina, resulta num aumento da taxa de infiltração. No entanto, a altura da porta parece ter uma maior influência neste efeito.

Do mesmo modo, verificou-se que tanto a altura de vão da porta como a diferença de temperatura entre as salas influenciam a velocidade ótima do jato, podendo a influência destes parâmetros ser expressa, simultaneamente, por uma correlação empírica (equação (3.1)), a qual inclui uma margem de segurança.

Recorrendo a esta equação, foi possível desenvolver e testar um sistema para o controlo automático da cortina. Este dispositivo, embora careça de algumas melhorias quer a nível de software como de hardware, revelou-se capaz de cumprir os objetivos estabelecidos. Uma outra característica a realçar referente a este dispositivo de controlo é a possibilidade de ser adaptado, com relativa facilidade, a outras cortinas de ar, bastando fornecer ao software a correlação empírica adequada.

Finalmente, pode-se deixar algumas pistas para desenvolvimentos futuros a este trabalho:

- Seria interessante, avaliar a influência do ângulo inicial do jato e da espessura do bocal de descarga sobre a velocidade ótima do jato;
- Realizar um estudo mais aprofundado ao sistema automático de controlo da cortina de ar e aplicar possíveis melhorias;
- Seria também de grande interesse aplicar o sistema automático a uma instalação real e comparar os gastos energéticos antes e depois da sua utilização;

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Miniveil (2016), "A Brief History of the Air Curtain", <http://www.miniveil.com/history.html>, acesso em 2016-01-01.
- ArduinoBoardUno, em <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>
- Biddle Climate Solutions, B. (2012<sup>a</sup>). "Technical Tips for Instalating Air Curtains. *Annals of the Royal College of Surgeons*", 84(5), pp. 357–360.
- Biddle Climate Solutions, B. (2012<sup>b</sup>). "The Green and Friendly Entrance".
- Brites, G. J. V. N. (2004). "Estudo laboratorial do escoamento de ar associado a um sistema de ventilação por deslocamento". Tese de Mestrado, Universidade de Coimbra, Portugal.
- Costa, J.J., & Oliveira, L.A. (2002). "Vedação aerodinâmica: Parametrização numérica do isolamento de duas divisões", *Proc. V Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia* (pp. 1–20). Madrid, Espanha.
- Costa, J.J., Oliveira, L.A. & Silva, M.C.G. (2006). "Energy savings by aerodynamic sealing with a downward-blowing plane air curtain-A numerical approach". *Energy and Buildings*, 38(10), pp. 1182–1193.
- Downing, C. C., & Meffert, W.A. (1993). "Effectiveness of cold-storage door infiltration protective devices." *ASHRAE Transactions*, 99(2), pp. 365–366.
- Emswiler, J. E. (1926). "The neutral zone in ventilation." *Journal of the American Society of Heating and Ventilation Engineers*, 32(1), pp. 1–16.
- Foster, A.M., Barrett, R., James, S.J. & Swain, M.J. (2002). "Measurement and prediction of air movement through doorways in refrigerated rooms", *International Journal of Refrigeration*, 25(8), pp.1102–1109.
- Foster, A.M., Swain, M.J., Barrett, R. & James, S.J. (2003). "Experimental verification of analytical and CFD predictions of infiltration through cold stoer entrances.", *International Journal of Refrigeration*, 26(8), pp. 918–925.
- Gil-Lopez, T., Castejon-Navas, J., Galvez-Huerta, M.A. & O'Donohoe, P.G. (2014). "Energetic, environmental and economic analysis of climatic separation by means of air curtains in cold storage rooms". *Energy and Buildings*, 74, 8–16.
- Gil-Lopez, T., Galvez-Huerta, M. A., Castejon-Navas, J., & Gomez-Garcia, V. (2013). "Experimental analysis of energy savings and hygrothermal conditions improvement by means of air curtains in stores with intensive pedestrian traffic". *Energy and Buildings*, 67, pp. 608–615.
- Gonçalves, J.C., Costa, J.J., Figueiredo, A.R. & Lopez, A.M.G. (2016). "Empirical correlation to estimate the optimum jet velocity of an air curtain". submetido ao VII Congresso Ibérico e VI Congresso Ibero Americano Ciencias e Técnicas do Frio. Realizado em Combra - Portugal, 3 – 6 de maio de 2016.

- Gonçalves, J. C. (2010). "Estudo numérico e experimental da vedação aerodinâmica em espaços refrigerados". Tede de Doutoramento, Universidade de Coimbra, Portugal.
- Gonçalves, J.C., Costa, J.J., Figueiredo, A.R. & Lopes, A.M.G. (2012<sup>a</sup>). "CFD modelling of aerodynamic sealing by vertical and horizontal air curtains". *Energy and Buildings*, 52, pp. 153–160.
- Gonçalves, J.C., Costa, J.J., Figueiredo, A.R. & Lopes, A.M.G. (2012<sup>b</sup>). "Study of the Aerodynamic Sealing of a Cold Store—Experimental and Numerical Approaches". *Energy and Buildings*, 55, pp. 779–789.
- Hayes, F. C., & Stoecker, W. F. (1969). "Heat transfer characteristics of the air curtain: A plane jet subjected to transverse pressure and temperature gradients". *ASHRAE Transactions*, 75(2), pp. 153–167.
- Hendrix, W. A., Henderson, D. R., & Jackson, H. Z. (1989). "Infiltration heat gains through cold storage room doorways." *ASHRAE Transactions*, 95(2), pp. 1155–1168.
- Jaramillo, J. E., Pérez-Segarra, C. D., Oliva, a., & Oliet, C. (2009). "Analysis of the Dynamic Behavior of Refrigerated Spaces Using Air Curtains". *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 55(6), pp. 553–573.
- Longdill, G. R., & Wyborn, L. G. (1979). "Performance of air curtains in single storey cold stores". *Proc. XV International Congress of Refrigeration* (pp. 77–88). Venice.
- Neto, L. P. C. (2006). "Estudo de sistemas de vedação aerodinâmica do tipo cortina de ar." Tese de Dooutoramento, Universidade de Coimbra, Portugal.
- Sherman, M. H. (1989). "Air infiltration measurement techniques". *Proc. 10th AIVC Conference*, Vol. 1, pp. 63–88. Espoo, Finland.
- Silva, M. G., Neto, L., & Brites, G. (2001). "Vedação Aerodinâmica por Cortina de Ar – Ensaios Experimentais". *Proc. I Jornadas Técnicas de Primavera da EFRIARC*. Porto, Portugal.
- Takahashi, K., & Inoh, M. (1963). "Some measurements on air curtain efficiency for cold rooms". *Proc. 11th International Congress of Refrigeration*, Vol. II, pp. 1035–1039, Munich.
- Valkeapää, A. (2002). "Effect of design parameters of unheated twin air jets on thermal conditions near the doorway." *Proc. 8th International Conference on Air Distribution in Rooms (RoomVent'2002)*, pp. 677–680. Copenhagen, Denmark.
- Van, N. Q., & Howell, R. H. (1976). "Influence of initial turbulence intensity on the development of plane air curtains jets." *ASHRAE Transactions*, 82(1), pp. 208–228.