



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Faculdade de Engenharia

Estudo experimental e simulação computacional do escoamento interior num armário de telecomunicações

Christopher Barrocas Delgado

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletromecânica
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Pedro Dinho da Silva
Co-orientador: Prof. Doutor Luís Carlos Carvalho Pires

Covilhã, outubro de 2016

Agradecimentos

A presente dissertação é o resultado de um trabalho extenso, que apenas foi possível com o apoio de diversas pessoas. Desejo desta forma, expressar o meu profundo agradecimento a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a concretização deste trabalho.

Quero expressar primeiramente, a minha gratidão aos professores que me orientaram ao longo desta dissertação. Ao meu orientador, Professor Doutor Pedro Nuno Dinho Pinto da Silva pelo seu apoio técnico-científico ao longo da orientação, pelos conselhos e pela motivação que me deu, nos diversos problemas que foram surgindo. Ao meu co-orientador, Professor Doutor Luís Carlos Carvalho Pires, pelos conselhos prestados e a sua boa disposição.

Gostaria igualmente de expressar um profundo agradecimento ao Professor Doutor Pedro Dinis Gaspar, que sempre se mostrou disponível para auxiliar, tendo dado recomendações bastante oportunas ao longo de toda a modelação computacional.

Agradeço igualmente ao técnico do Laboratório de Termodinâmica Aplicada e Transmissão de Calor da Universidade da Beira Interior, Sr. João Correia, pela sua disponibilidade e ajuda na construção da caixa dissipadora.

A todos os meus colegas que me acompanharam ao longo do meu percurso académico, com especial destaque para aqueles que intervieram e me ajudaram ao longo da realização da dissertação, um muito obrigado por todos os momentos que partilhámos.

Por último, mas não menos importante, quero agradecer especialmente à minha namorada, pelo apoio incondicional ao longo de todo o meu percurso académico e noutras etapas da minha vida, assim como o carinho e a força que sempre me transmitiu. Aos meus pais e aos pais da minha namorada, quero expressar o meu profundo agradecimento pela energia transmitida e pelos esforços que fizeram para me ajudar e motivar.

Muito OBRIGADO!

Resumo

O sector das tecnologias de informação e comunicação, nomeadamente das telecomunicações, tem crescido de uma forma incessante, conduzindo a um aumento do número de infraestruturas necessárias para garantir a prestação e a cobertura geográfica do serviço. Os armários exteriores de telecomunicações têm sido uma escolha cada vez mais preferencial deste tipo de infraestruturas, servindo de abrigo para os equipamentos de telecomunicações.

No que respeita aos armários exteriores, estes deverão ser capazes de manter a temperatura no seu interior, a um valor inferior ao limite máximo de +55 °C, através do funcionamento eficiente do sistema de arrefecimento instalado. Contudo, um arrefecimento eficaz depende diretamente do escoamento de ar no interior. Desta forma, o presente estudo propõe-se a construir e a ensaiar experimentalmente um elemento dissipador de calor, representativo de um equipamento de telecomunicações real, com o intuito de caracterizar o comportamento térmico do armário. A acrescentar a isto, pretende-se a obtenção dos valores de diferentes grandezas, como a velocidade do escoamento, mas também a visualização do mesmo, através de métodos experimentais e computacionais.

Os resultados obtidos, permitem concluir que a ventilação forçada é um método eficaz do arrefecimento do armário, aliado a um baixo consumo energético. O escoamento ocorre maioritariamente em regime turbulento, possuindo maior magnitude na região posterior do armário e na zona central do topo do mesmo. São notórias algumas zonas de recirculação e de elevada turbulência no interior, que podem constituir um agravamento da temperatura.

Através da otimização do modelo computacional e de mais estudos relativos ao comportamento térmico do armário, na presença de mais elementos dissipadores de calor, é possível caracterizar de uma forma mais completa a situação real de funcionamento deste tipo de armários.

Palavras-chave

Arrefecimento, escoamento de ar, armário de telecomunicações, estudo experimental, modelação numérica, dinâmica de fluidos computacional

Abstract

The sector of information and communication technologies, especially telecommunications, has grown in a relentless way, leading to an increase in the number of necessary infrastructure to ensure the provision and geographical coverage of the service. The outdoor telecom cabinets have been an increasingly preferred choice of this type of infrastructure, serving as a shelter for telecommunications equipment.

As regards external cabinets, they must be able to maintain the temperature therein, to a value below the maximum limit of +55 °C, with efficient operation of the cooling system installed. However, an effective cooling depends directly on the air flow inside. Thus, this study proposes to build and test experimentally an element with heat generation, representing a real telecommunications equipment, in order to characterize the thermal behavior of the cabinet. In addition to this, it is intended to obtain the values of different quantities, such as flow velocity and also the display of the same, by computational and experimental methods. Numerical studies are performed with Fluent.

The results obtained, allow us to conclude that the forced ventilation is an effective method of cabinet cooling, combined with low energy consumption. The flow occurs mainly in turbulent regime, possessing greater magnitude on the back of the cabinet area and in the central area of the top of it. They are notorious some recirculation zones and high turbulence inside, which can provide an increase in temperature.

By optimizing the computational model and more studies on the thermal behavior of the cabinet, in the presence of more elements with heat generation, it is possible to characterize more fully the actual situation of operation of this type of cabinets.

Keywords

Cooling, air flow, telecommunications cabinet, experimental study, numerical modeling, computational fluid dynamics

Índice

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Índice	ix
Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Tabelas	xviii
Nomenclatura.....	xix
1. Introdução	1
1.1. Perspetiva geral.....	1
1.2. O problema em estudo e a sua relevância	4
1.3. Revisão bibliográfica	6
1.3.1. Efeito da temperatura sobre equipamentos eletrónicos	6
1.3.2. Caracterização térmica e sistemas de arrefecimento em instalações exteriores de telecomunicações	7
1.4. Objetivos e contribuição da dissertação	13
1.5. Visão geral e organização da dissertação	14
2. Os armários de telecomunicações móveis.....	17
2.1. Introdução	17
2.2. Necessidade de arrefecimento	17
2.3. Tipos de arrefecimento.....	22
2.4. Nota conclusiva	33
3. Componente experimental	35
3.1. Introdução	35
3.2. O armário em estudo.....	35
3.2.1. Características construtivas	36
3.2.2. Equipamentos de telecomunicações no interior	38

3.2.3.	Sistema de arrefecimento do armário	41
3.3.	Estudo experimental	43
3.3.1.	Técnicas experimentais e equipamentos	43
	Anemometria de fio quente	44
	Termometria por termopares	45
	Visualização	47
	Equipamento de fornecimento de energia elétrica	49
	Equipamento de medição auxiliar	51
3.3.2.	Elementos construídos	52
	Parâmetros de escolha para a construção da caixa dissipadora	52
	Procedimento de construção	55
3.3.3.	Ensaio Experimentais	57
	Ensaio experimental para a obtenção do valor do caudal médio total de saída do armário	58
	Ensaio experimental para a obtenção do valor da velocidade média nas entradas do armário	61
	Ensaio experimental para a obtenção dos valores da velocidade do escoamento no interior do armário	62
	Ensaio para a visualização do escoamento interior	64
	Ensaio da evolução da temperatura interior	65
4.	Modelação computacional do escoamento interior	69
4.1.	Importância da computação	69
4.2.	Caracterização da ferramenta computacional	70
4.2.1.	Equação da continuidade	71
4.2.2.	Equação da conservação da quantidade de movimento	71
4.2.3.	Equação da conservação de energia	71
4.2.4.	Equação de estado	72
4.3.	Modelos de Turbulência	72
4.3.1.	Modelo de turbulência <i>Spalart-Allmaras</i>	73

4.3.2.	Modelo de turbulência <i>Standard k-ε</i>	74
4.3.3.	Modelo de turbulência <i>k-ε RNG</i>	75
4.3.4.	Modelo de turbulência <i>Realizable k-ε</i>	75
4.3.5.	Modelo de turbulência <i>Standard k-ω</i>	76
4.3.6.	Modelo de turbulência <i>k-ω SST (Shear-Stress Transport)</i>	77
4.4.	Funções de parede	77
4.4.1.	Funções de parede <i>Standard</i>	78
4.4.2.	Funções de parede <i>escaláveis (Scalable)</i>	79
4.4.3.	Funções de parede de Não-Equilíbrio.....	79
4.4.4.	Tratamento Realçado da Parede (<i>Enhanced Wall Treatment</i>)	80
4.5.	Modelo numérico	80
4.5.1.	Geometria	80
4.5.2.	Malha computacional	82
4.5.3.	Modelos de turbulência em estudo.....	84
4.5.4.	Condições de Fronteira.....	85
4.5.5.	Propriedades dos materiais/elementos intervenientes	88
4.5.6.	Métodos numéricos	89
4.5.7.	Fatores de sub-relaxação de variáveis para potenciar a convergência da solução numérica	90
5.	Análise e discussão de resultados	93
5.1.	Introdução	93
5.2.	Resultados provenientes dos ensaios experimentais	93
5.2.1.	Resultados do ensaio experimental para a obtenção do valor do caudal médio total de saída do armário	93
5.2.2.	Resultados do ensaio experimental para a obtenção do valor da velocidade média nas entradas do armário	94
5.2.3.	Resultados do ensaio experimental para a obtenção dos valores da velocidade do escoamento no interior do armário.....	96
5.2.4.	Resultados do ensaio experimental para a visualização do escoamento interior	99

5.2.5. Resultados dos ensaios da evolução da temperatura interior	102
5.3. Resultados das simulações computacionais do escoamento no interior do armário	106
5.4. Validação do modelo computacional	112
5.4.1. Validação através do cumprimento da lei da conservação de massa	113
5.4.2. Validação através da comparação visual do escoamento	114
5.4.3. Validação através da comparação dos valores da velocidade nos diversos pontos do interior	115
5.5. Nota conclusiva	117
6. Conclusão	119
6.1. Recapitulação	119
6.2. Sugestão para trabalho futuro.....	121
Referências Bibliográficas	123

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Subscrições de serviços móveis por milhares de milhões de subscritores, no período de 2011-2015 e com previsão até 2021 (Ericsson, 2016).	2
Figura 1.2 - Tráfego móvel mundial por tipo de utilização, desde 2011 até ao 1º trimestre (Q1) de 2016 (Ericsson, 2016).	3
Figura 1.3 - Previsão da evolução do tráfego móvel mundial por tipo de utilização, no período de 2015 até 2021 (Ericsson, 2016).	3
Figura 2.1 - Calor dissipado através da hierarquia de empacotamento de equipamentos eletrónicos (Nie e Joshi, 2006).	18
Figura 2.2 - Fatores que levam à ocorrência de avarias em equipamentos eletrónicos (adaptado de Shende e Mahalle, 2013).	18
Figura 2.3 - Evolução da temperatura média anual e do valor médio da temperatura máxima do ar, com os respetivos valores de referência a traço interrompido (IPMA, 2016a).	20
Figura 2.4 - Classificação climática de Portugal Continental para o ano de 2015 (IPMA, 2016a).	20
Figura 2.5 - Regimes de funcionamento para o controlo da temperatura na maioria dos equipamentos de telecomunicações (Comité técnico da ASHRAE, 2012).	21
Figura 2.6 - Representação dos 3 modos de transmissão de calor.	24
Figura 2.7 - Funcionamento com os diversos componentes e o fluxo de ar, de um sistema de ar condicionado (Purcell, 2012; Li e Alleyne, 2010).	26
Figura 2.8 - Armário exterior comportando uma unidade externa de ar condicionado (ESTEL, s.d.).	26
Figura 2.9 - Funcionamento de um sistema de arrefecimento por convecção forçada (recurso a ventiladores) (Purcell, 2012).	27
Figura 2.10 - Módulo termoelétrico para o arrefecimento de uma fonte quente (Purcell, 2012).	28

Figura 2.11 - Curva característica do funcionamento dos PCMs (Sutterlin, 2015).	29
Figura 2.12 - Termossifão bifásico de circuito fechado aplicado a um armário exterior (Samba, 2013).	30
Figura 2.13 - Sistemas de arrefecimento geotérmico, através de permutador ar-solo à esquerda; e água-solo à direita (Yuping, 2008; Hong, 2009).	31
Figura 3.1 - Vista explodida do armário (a); e imagem do armário em estudo presente no laboratório (b).	37
Figura 3.2 - Porta lateral amovível, com destaque para as ranhuras exteriores e a abertura da caixa de ar interior com o respetivo filtro de ar.	37
Figura 3.3 - Quadros elétricos, AC no topo e DC na posição inferior.	39
Figura 3.4 - Armário ABE_V2, comportando equipamentos de telecomunicações em funcionamento.....	41
Figura 3.5 - Curva característica do ventilador, com o caudal fornecido (V) em função da queda de pressão (Δp_f) (ebm-papst, 2006).	43
Figura 3.6 - Anemómetro de fio quente, Testo 425.	44
Figura 3.7 - <i>Data logger tc-08</i> da <i>Pico Technology</i> em funcionamento, com as respetivas ligações dos termopares utilizados.	46
Figura 3.8 - Caixa de cartão contendo a base com os paus de incenso no interior, com destaque para as aberturas superior e inferior.	47
Figura 3.9 - Sistema de injeção de fumo construído, com destaque para a abertura do plástico e consequente orientação para a entrada.	48
Figura 3.10 - Técnica de visualização através de filamentos de lã: entrada (a); saída da campânula (b).	48
Figura 3.11 - Fonte de alimentação modelo MA 4853 da MERTEL.	49
Figura 3.12 - Fonte de alimentação AC variável, presente no laboratório.	50
Figura 3.13 - Fonte de alimentação de um computador fixo, com interruptor ON/OFF do sistema de ventilação da caixa dissipadora.	50

Figura 3.14 - Multímetro Fluke, modelo 177.	51
Figura 3.15 - Desenho 3D da caixa com as respetivas dimensões.	52
Figura 3.16 - Esquematização do espaçamento existente entre os orifícios da perfuração, efetuada na caixa dissipadora.	53
Figura 3.17 - Desenho 3D representativo da caixa dissipadora com configuração de ventilação forçada.	54
Figura 3.18 - Desenho 3D da caixa com configuração de ventilação natural.	54
Figura 3.19 - Resistência elétrica de aquecimento utilizada como elemento dissipador de calor.	55
Figura 3.20 - Caixa construída sem furação.	55
Figura 3.21 - Realização da perfuração da superfície lateral da caixa.	56
Figura 3.22 - Caixa finalizada com a configuração de ventilação forçada.	56
Figura 3.23 - Caixa finalizada com a configuração de ventilação natural.	57
Figura 3.24 - Pormenor do isolamento da região de contacto entre os terminais da resistência e a caixa.	57
Figura 3.25 - Vedação das folgas existentes nas extremidades das caixas de ar (a) e da própria estrutura exterior do armário (b).	58
Figura 3.26 - Armário com a campânula localizada do topo da estrutura do armário.	59
Figura 3.27 - Representação esquemática dos pontos de medição de velocidade à saída da tubulação da campânula.	60
Figura 3.28 - Representação esquemática dos pontos de medição de velocidade das entradas do armário.	61
Figura 3.29 - Representação esquemática dos pontos de medição da velocidade no interior do armário: vista em perspetiva (a); e vista segundo o eixo x (b).	63
Figura 3.30 - Sonda do anemómetro de fio quente fixada ao tripé de suporte no interior do armário (a); Equipamentos utilizados no ensaio, localizados no exterior (b).	64
Figura 3.31 - Termopares e varetas de fixação, localizados no topo do armário.	66

Figura 3.32 - Equipamentos utilizados no ensaio da monitorização da temperatura interior do armário.....	67
Figura 4.1 - Representação da estrutura do modelo definido para o armário de telecomunicações.	81
Figura 4.2 - Geometria 3D com as medidas do interior do armário de telecomunicações.....	82
Figura 4.3 - Malha computacional (a); Malha computacional refinada (b)	84
Figura 4.4 - Modelos de turbulência existentes, com destaque para os modelos mais adequados para escoamentos em espaços interiores delimitados (Zhai <i>et al.</i> , 2007).	85
Figura 4.5 - Janela com os respetivos parâmetros para a condição de fronteira da entrada frontal.	87
Figura 4.6 - Janela com os respetivos parâmetros para a condição de fronteira da saída esquerda.	88
Figura 5.1 - Valor médio do caudal volúmico total extraído do armário, em função da tensão de alimentação dos ventiladores.....	94
Figura 5.2 - Conjunto de fotogramas representativos do escoamento proveniente da entrada lateral esquerda.....	100
Figura 5.3 - Conjunto de fotogramas representativos do escoamento proveniente da entrada frontal.....	101
Figura 5.4 - Conjunto de fotogramas representativos do escoamento proveniente da entrada lateral direita.....	102
Figura 5.5 - Evolução das temperaturas do interior do armário, para a caixa dissipadora com configuração de arrefecimento próprio por convecção natural.....	104
Figura 5.6 - Evolução das temperaturas do interior do armário, para a caixa dissipadora com configuração de arrefecimento próprio por convecção forçada.....	105
Figura 5.7 - Apresentação dos vários modelos computacionais elaborados e simulados.....	108
Figura 5.8 - Gráfico da evolução do valor da velocidade segundo o eixo z, na localização central do armário.....	109
Figura 5.9 - Relatório de caudal mássico das 3 entradas e das 2 saídas do armário.....	110

Figura 5.10 - Representação das linhas de corrente do escoamento de ar, proveniente das entradas laterais (a), ou frontal (b).111

Figura 5.11 - Representação dos vetores de velocidade do escoamento de ar no interior do armário.....111

Figura 5.12 - Representação de dois planos perpendiculares, possuindo contornos de velocidade do ar interior do armário.112

Figura 5.13 - Comparação entre a previsão numérica e o conjunto dos fotogramas representativos da injeção de fumo, para a entrada esquerda do armário.114

Figura 5.14 - Comparação entre a previsão numérica e o conjunto dos fotogramas representativos da injeção de fumo, para a entrada frontal do armário.114

Figura 5.15 - Comparação entre a previsão numérica e o conjunto dos fotogramas representativos da injeção de fumo, para a entrada direita do armário.115

Figura 5.16 - Gráfico da razão das velocidades para cada ponto, segundo a cota z, para a posição central do armário116

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Principais características das tecnologias de arrefecimento anteriormente apresentadas (adaptado de Purcell, 2012).	32
Tabela 3.1 - Principais componentes base, incorporados no armário.	38
Tabela 3.2 - Características dos ventiladores 4318 da ebm-papst (ebm-papst, 2006).	42
Tabela 3.3 - Principais especificações do anemómetro de fio quente, Testo 425 (Testo, 2005).	45
Tabela 3.4 - Especificações do <i>data logger tc-08</i> da <i>Pico Technology</i> (PicoTech, 2016).	46
Tabela 3.5 - Principais especificações do multímetro modelo 177 da Fluke (Fluke, 2008).....	51
Tabela 4.1 - Parâmetros estatísticos da malha computacional.....	83
Tabela 4.2 - Parâmetros estatísticos da malha computacional (refinada)	83
Tabela 4.3 - Propriedades termodinâmicas do ar a +25 °C (adaptado de Rogers e Mayhew, 1995).	89
Tabela 4.4 - Fatores de sub-relaxação das grandezas.....	91
Tabela 5.1 - Valor médio da velocidade para cada entrada do armário.	95
Tabela 5.2 - Número de Reynolds respetivo ao escoamento de ar em cada entrada.....	96
Tabela 5.3 - Valor médio da velocidade em cada ponto de medição no interior do armário [m/s].	96
Tabela 5.4 - Valor do número de Reynolds para cada posição do escoamento, baseado na velocidade média de cada ponto e no diâmetro hidráulico do armário.	98

Nomenclatura

Simbologia geral:

\dot{m}	Caudal mássico	[kg/s]
\dot{Q}	Caudal volúmico	[m ³ /s]
\dot{V}	Caudal fornecido pelo ventilador	[m ³ /h]
A	Área	[m ²]
C _p	Calor específico	[J/(kg.K)]
D _h	Diâmetro hidráulico	[m]
dT	Diferença de temperatura	[K]
dx	Espessura segundo x	[m]
E	Erro relativo	
e	Emissividade	
g	Aceleração gravítica	[m/s ²]
h	Coefficiente de convecção	[W/(m ² .k)]
I	Intensidade de corrente elétrica	[A]
I _t	Intensidade de turbulência	[%]
K	Condutibilidade térmica	[W/(m.k)]
k	Energia cinética turbulenta	[m ² /s ²]
O	Perímetro	[m]
P	Potência	[W]
p	Pressão	[Pa]
q	Taxa de calor transferido	[W]
R	Resistência Elétrica	[Ω]
r	Constante dos gases ideais	[J/(kmol.K)]
Re	Número de Reynolds	
S _T	Termo fonte da geração de calor	[W/m ³]
T	Temperatura	[K]
t	Tempo	[S]
U	Tensão Elétrica	[V]
u	Componente da velocidade	[m/s]
V	Velocidade	[m/s]
W _a	Massa molar do ar	[kg/kmol]
x	Coordenada cartesiana	[m]
Δp	Diferença de pressão	[Pa]

Índices inferiores:

∞	Fluido adjacente
cond	Condução
conv	Convecção
Dh	Diâmetro hidráulico
h	Hidráulico
i	Direção i
j	Direção j
m	Média
P	Efeito Peltier
r	Relativo
rad	Radiação
ref	Referência
s	Superfície
t	Turbulenta
viz	Vizinhança

Simbologia grega:

β	Coeficiente de expansão térmica	[K ⁻¹]
δ	Delta de Kroneckor	
ε	Taxa de dissipação turbulenta	[m ² /s ³]
λ	Fração do valor original do resíduo	
μ	Viscosidade dinâmica do fluido	[kg/(m.s)]
ν	Viscosidade cinemática	[m ² /s]
π	Coeficiente de Peltier	[W/K]
ρ	Massa volúmica	[kg/m ³]
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	[W/(m ² .k ⁴)]
ω	Taxa de dissipação específica	[s ⁻¹]

Acrónimos:

ABE	Armário Base Exterior
ABE_V2	Armário Base Exterior Versão 2
AC	Corrente alternada (Alternating Current)
BBU	Base Band Unit
CO2	Dióxido de Carbono
COP	Coefficient of Performance
DAC	Direct Air Cooling
DC	Corrente contínua (Direct Current)
DFC	Dinâmica dos Fluidos Computacional
EBT	Estação Base de Telecomunicações
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EUA	Estados Unidos da América
IPMA	Instituto Português do Mar e da Atmosfera
IT	Information Technology
IV	Infravermelho
LHSU	Latent Heat Storage Unit
LTE	Long-Term Evolution
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PCM	Phase Change Materials
PRESTO	PREssure STaggering Option
PT	Portugal Telecom
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
RMS	Root mean square
RNG	Re-Normalisation Group
RRU	Remote Radio Unit
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations
SIMPLEC	SIMPLE Consistent
SST	Shear Stress Transport
TIC	Tecnologias de Informação e Comunicação
UBI	Universidade da Beira Interior
USB	Universal Serial Bus
UV	Ultravioleta

1. Introdução

O primeiro capítulo pretende contextualizar a temática abordada na presente dissertação, enquadrando a mesma no seio da sociedade atual, através da apresentação de diversas investigações realizadas nesta área do conhecimento científico, que justifiquem a sua importância e que contribuam para uma compreensão mais detalhada da dissertação.

O crescimento das tecnologias de informação e comunicação (TIC), com destaque para o sector das telecomunicações, é fruto do crescimento abrupto da sociedade e da globalização. Este rápido desenvolvimento, agrega a si um aumento significativo do consumo de energia, o que acarreta consequências perniciosas para a sustentabilidade do planeta. Grande parte desse consumo está relacionado com o arrefecimento das tecnologias de transmissão de informação e de dados, sendo de uma notável pertinência, a investigação científica destinada à compreensão do processo de arrefecimento dessas tecnologias.

Neste capítulo será efetuado um enquadramento geral da temática e do trabalho em si, salientando a sua importância e relevância para a comunidade científica e para a sociedade em geral. Far-se-á uma revisão bibliográfica sobre os trabalhos e as investigações que têm sido efetuados nesta área, considerados de maior relevância para o estudo proposto. Apresentar-se-ão também os objetivos a cumprir e a consequente contribuição da investigação desenvolvida nesta dissertação. Na parte final do presente capítulo, mais concretamente na última secção do mesmo, será apresentada a estrutura da dissertação, servindo de guião ao trabalho efetuado, para que o leitor possa ter uma perceção mais clara e objetiva acerca do estudo em causa.

1.1. Perspetiva geral

A comunicação constitui-se como um dos aspetos mais importantes da coexistência humana, sendo o elemento chave na interação entre dois ou mais indivíduos. Além disso, é devido à comunicação que o conhecimento adquirido por uns, pode ser transmitido aos restantes indivíduos, levando a um crescimento contínuo do progresso científico e tecnológico.

Existem diversas formas de comunicar, quer seja por gestos, por palavras, por desenhos, por símbolos, pela escrita, entre outras. Desde os tempos da pré-história, que o Homem tem vindo a desenvolver formas e técnicas que permitam aumentar a distância a que consegue comunicar, deixando de ser necessário que esteja fisicamente presente num local. Um dos primeiros exemplos de comunicação a longas distâncias foram as cartas e os livros, fazendo uso da escrita

para a transmissão das mensagens. As distâncias de comunicação aumentaram com o aparecimento do telégrafo, tendo surgido posteriormente o código morse. Com a invenção do telefone, as telecomunicações evoluíram significativamente, culminando hoje nos *smartphones*, que permitem comunicar por voz, imagem e através da escrita, para qualquer local do mundo, assim como aceder à internet, rádio e televisão a partir de um único dispositivo.

A utilização das telecomunicações é assim uma prática cada vez mais indissociável do quotidiano, pelo que as sociedades se tornaram cada vez mais dependentes das mesmas, nomeadamente para fins pessoais, profissionais e económicos. Tendo em conta o que já foi referido, uma das características mais importantes ao nível das telecomunicações é a capacidade de se conseguir comunicar em qualquer local, ou seja, a cobertura geográfica do serviço, uma vez que a evolução dos transportes permitiu que as deslocações se tornassem cada vez mais facilitadas.

Essa realidade, segundo Sharma (2013), levou a um crescimento cada vez mais acentuado das subscrições de serviço móvel, sendo que no final de 2010, haviam quatro vezes mais subscrições de serviço de telemóvel do que telefones fixos. De acordo com o relatório do grupo Ericsson (2016), o número de subscrições de serviço móvel no final do primeiro trimestre de 2016 era de 7.4 mil milhões, agregando 3.7 mil milhões de subscrições de banda larga móvel e 3.4 mil milhões de subscrições de *smartphones*. Tendo em consideração o mesmo relatório, prevê-se que pelo 3º trimestre de 2016, o número de subscrições de *smartphones* exceda as subscrições de banda móvel dos telemóveis básicos, o que traduz uma crescente utilização destes dispositivos em detrimento dos telemóveis tradicionais, assim como o aumento das subscrições da tecnologia *Long-Term Evolution* (LTE). Na figura 1.1 encontram-se representadas as subscrições de serviços móveis por tecnologia utilizada, por milhares de milhões de subscritores, no período de 2011-2015, assim como a previsão da sua evolução até 2021, onde se observa o crescimento da tecnologia LTE.

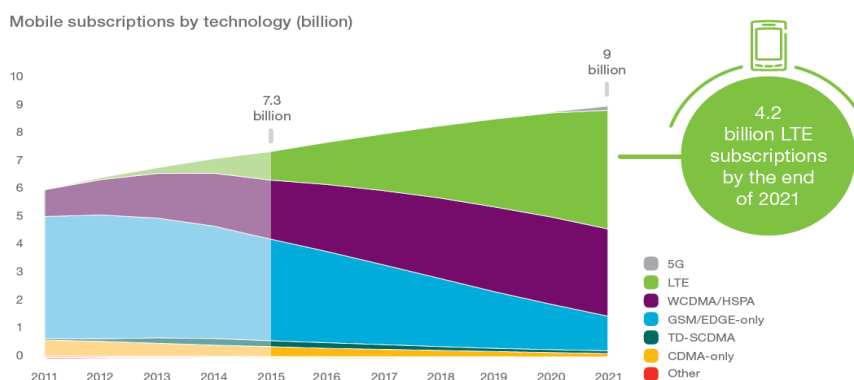


Figura 1.1 - Subscrições de serviços móveis por milhares de milhões de subscritores, no período de 2011-2015 e com previsão até 2021 (Ericsson, 2016).

Esse crescimento, traduz-se quase inevitavelmente num acréscimo do tráfego de dados móveis, impulsionados na sua maioria, pelo crescimento de subscrições agregadas a *smartphones* e pelo aumento do volume de dados associado a cada subscrição. A figura 1.2 mostra o aumento trimestral do tráfego móvel mundial por tipo de utilização, desde 2011 até ao primeiro trimestre (Q1) de 2016, onde se pode constatar que o crescimento se deve à utilização de dados, já que o tráfego de voz se manteve praticamente inalterado. A figura 1.3 representa a previsão do crescimento do tráfego móvel mundial por tipo de utilização, no período de 2015-2021, sendo bastante notória a contribuição dos *smartphones* na utilização de dados, chegando a representar 90% do tráfego móvel em 2021 (Ericsson, 2016).

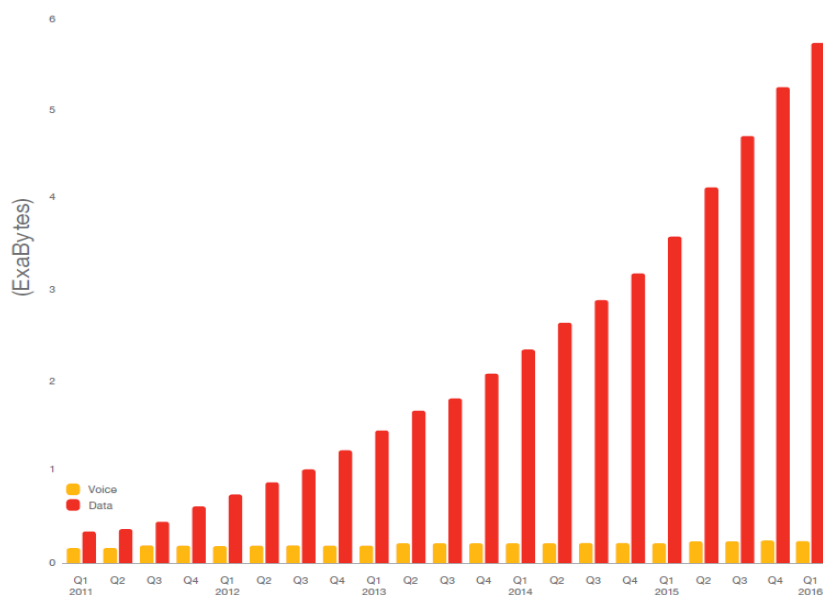


Figura 1.2 - Tráfego móvel mundial por tipo de utilização, desde 2011 até ao primeiro trimestre (Q1) de 2016 (Ericsson, 2016).

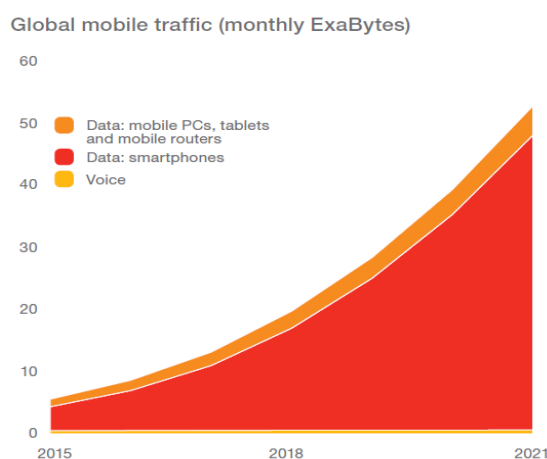


Figura 1.3 - Previsão da evolução do tráfego móvel mundial por tipo de utilização, no período de 2015 até 2021 (Ericsson, 2016).

Conforme Lubritto *et al.* (2011), o sucessivo desenvolvimento dos serviços de telecomunicações móveis com o conseqüente crescimento da utilização de tráfego móvel, levaram ao aumento do número de instalações de telecomunicações a nível global, com o intuito de garantir a cobertura geográfica do serviço e a sua qualidade. Isto traduz-se num aumento do consumo de energia por parte dessas instalações, com particular destaque para as Estações Base de Telecomunicações (EBT), sendo aquelas que mais energia consomem em todo o conjunto de infraestruturas de uma rede de telecomunicações móveis (Amadi *et al.*, 2015). No ano de 2008, haviam cerca de 4 mil milhões de EBT em todo o mundo, apresentando uma estimativa da taxa de crescimento na ordem dos dois dígitos (Roy, 2008).

Amadi *et al.* (2015) referem que, “a energia total consumida pelas infraestruturas das redes de telecomunicações móveis, redes de telecomunicações fixas e de internet, representa mais de 3% da energia elétrica mundialmente consumida” para o ano de 2008, sendo que a previsão é para que este consumo aumente progressivamente. As redes de telecomunicações constituem-se, assim, como um fator bastante importante a ter em consideração, tanto para a redução do consumo energético à escala mundial, como para a proteção do meio ambiente. Agregado ao consumo de energia, as redes de telecomunicações também são responsáveis por cerca de 2% do total de emissões de CO₂, tanto de forma indireta, devido à produção de energia necessária para o seu funcionamento, como também da receção e envio de sinais por parte das EBTs (Mugunthamala e Selvi, 2014).

A emissão excessiva de gases de efeito de estufa, tem sido um dos fenómenos mais preocupantes nos últimos anos, agravando o aquecimento global terrestre. De acordo com a NASA (2016), o mês de agosto de 2016 foi o mês mais quente dos últimos 136 anos, o que demonstra o efeito adverso do aquecimento global, causado pela emissão incessante e descontrolada desses mesmos gases.

1.2. O problema em estudo e a sua relevância

O mercado das telecomunicações, com destaque para os serviços móveis, apresenta uma acentuada tendência de crescimento para o futuro, agregando assim um aumento significativo no consumo de energia. Os elementos mais importantes, no que diz respeito às infraestruturas da rede de telecomunicações móveis, são as EBTs, tendo como função servir de interação entre a rede de telecomunicações fixa e os dispositivos móveis, sendo igualmente aquelas que mais energia consomem. Segundo Tu *et al.* (2011), as EBTs são responsáveis por cerca de um terço da energia total consumida pelas redes de telecomunicações.

A garantia da cobertura geográfica do serviço móvel contratado é uma das principais razões do aumento do número de EBT a nível global. Este aspeto leva a que estas estações sejam colocadas nos mais diversos locais, como nas coberturas dos edifícios, nas torres, nos descampados e em locais remotos, muitas das vezes sem acesso à rede elétrica (Lubritto *et al.*, 2011; Kaptein, 2014).

Para que os equipamentos de telecomunicações não sejam danificados pelas condições ambientais externas (humidade, pó, radiação solar e detritos), estes normalmente encontram-se alojados no interior de edifícios, em grandes cabines exteriores (*shelters*) ou em armários exteriores de telecomunicações (Wankhede, 2007; Lubritto *et al.*, 2008). À medida que os equipamentos eletrónicos, incluindo os equipamentos de telecomunicações, vão diminuindo o seu tamanho físico, os armários exteriores têm vindo a ser cada vez mais adotados.

O crescente empacotamento dos circuitos eletrónicos e a utilização de um espaço cada vez mais confinado para o seu alojamento, aliado ao desenvolvimento da complexidade e da potência dos equipamentos, conduzem a um aumento da dissipação térmica no interior dos armários de telecomunicações (Moore e Shi, 2014). Aliado a isso, por se tratar de um armário exterior, este encontra-se sob a influência da radiação solar, um fator bastante importante no que diz respeito à temperatura interior do armário (Patrício, 2015). As elevadas temperaturas são prejudiciais aos equipamentos de telecomunicações, podendo levar à ocorrência de falhas e mesmo de avarias, prejudicando o correto funcionamento do sistema de telecomunicações (Wankhede, 2007).

Para garantir um funcionamento apropriado de num armário exterior de uma EBT, existem limites máximos e mínimos para a temperatura interior que devem ser respeitados (ETSI, 2009). Além disto, os próprios equipamentos de telecomunicações possuem gamas de temperatura adequadas ao seu correto funcionamento. De forma a evitar o sobreaquecimento do sistema, diversas soluções têm sido empregues, tendo o ar condicionado sido uma das soluções mais recorrentes. Contudo, atualmente os sistemas alternativos de arrefecimento têm ganho relevo, como é o caso da ventilação mecânica ou natural, com vista à diminuição do consumo energético. De acordo com Lubritto *et al.* (2011) e Roy (2008), cerca de 25% da energia consumida por uma EBT é devido ao sistema de arrefecimento.

A otimização energética e de fiabilidade do sector das telecomunicações, passa assim em grande medida pela otimização da componente térmica das instalações, com destaque para os armários exteriores de telecomunicações. Os conhecimentos relativos à caracterização térmica do armário são por isso uma importante ferramenta, para que a necessidade de arrefecimento dos mesmos seja conseguida de uma forma eficiente. As ferramentas computacionais poderão auxiliar bastante nessa caracterização, permitindo uma melhoria contínua no funcionamento dos armários, assim como no seu projeto.

1.3. Revisão bibliográfica

A revisão bibliográfica da presente dissertação, visa expor um conjunto de estudos desenvolvidos sobre a caracterização e a otimização térmica de sistemas de telecomunicações. As investigações sobre esta temática têm vindo a ganhar bastante relevância, pois de acordo com Tu *et al.* (2011), a otimização da componente térmica potencia a poupança energética nas EBT, permitindo também melhorar as condições ambientais associadas.

Esta secção encontra-se dividida em duas partes (subsecções), para que se possa ter uma noção mais perceptível e esclarecedora do contexto do arrefecimento em equipamentos exteriores de telecomunicações. A primeira parte dá a conhecer os estudos relativos aos efeitos da temperatura sobre os componentes eletrónicos, de forma a compreender as necessidades de arrefecimento destes componentes. A segunda parte apresenta diversos estudos de carácter experimental e numérico, relativamente à caracterização térmica dos equipamentos e das instalações exteriores de telecomunicações, dando-se particular destaque aos métodos e às estratégias de arrefecimento dos mesmos.

1.3.1. Efeito da temperatura sobre equipamentos eletrónicos

Além da poupança energética e dos restantes benefícios associados, o controlo da temperatura é necessário para o correto funcionamento dos equipamentos eletrónicos do armário, assegurando a sua fiabilidade e maximizando o seu ciclo de vida (Rodgers e Eveloy, 2003; Ahmadi *et al.*, 2014). Ao longo dos anos, diversos têm sido os estudos que retratam este fenómeno e tentam encontrar soluções para minimizar os efeitos prejudiciais do sobreaquecimento de sistemas eletrónicos.

A temperatura é o principal fator que leva à ocorrência de avarias nestes equipamentos, sendo responsável por mais de metade das mesmas (Shende e Mahalle, 2013). Conforme Ahmadi *et al.* (2014), à medida que a temperatura de um componente eletrónico aumenta acima da sua temperatura de funcionamento, a probabilidade de ocorrência de falhas aumenta consecutivamente. De acordo com os trabalhos realizados por Lakshminarayanan e Sriraam (2014), Joshi *et al.* (2003), Lasance (2003) e Gurrum *et al.* (2004), de entre os efeitos prejudiciais causados pelo aumento da temperatura, destacam-se: a eletromigração; o aparecimento de circuitos abertos devido à degradação dos metais condutores; a fadiga térmica dos componentes, incluindo o aparecimento de fendas nas soldaduras; o acelerar das reações químicas nos componentes e a sua envolvente, potenciando a corrosão; e a alteração dos parâmetros originais

(frequência, corrente e tensão), podendo levar a picos que excedam os limites elétricos do componente eletrônico e por fim, a sua destruição.

A redução da temperatura é então, algo absolutamente necessário nos equipamentos de telecomunicações, para que estes não se danifiquem e os serviços móveis sejam prestados da forma mais eficaz possível. Segundo o estudo experimental de Alawadhi e Amon (2003), foi perceptível que ao se diminuir 1 °C na temperatura de um componente, a probabilidade de falha pode ser reduzida 4%.

1.3.2. Caracterização térmica e sistemas de arrefecimento em instalações exteriores de telecomunicações

A garantia da cobertura geográfica dos serviços de telecomunicações móveis, leva a que cada vez mais os equipamentos possam ser instalados no exterior. Nestas situações, os *shelters* e os armários exteriores são as estruturas adotadas para albergarem os equipamentos, pelo que a variação da temperatura interna não é apenas afetada pela dissipação térmica dos componentes eletrónicos, mas também pelas condições ambientais exteriores (Wankhede *et al.*, 2007). Desta forma, os estudos apresentados de seguida não se cingem apenas a armários exteriores de telecomunicações (apresentando uma forte evolução nos últimos anos, impulsionada pela microeletrónica), mas também incluem os *shelters*. É de salientar ainda, a escassez de estudos relativos ao comportamento térmico da envolvente de estruturas exteriores de telecomunicações, sendo este um assunto ainda pouco desenvolvido, em detrimento dos métodos de arrefecimento do ar no interior das mesmas.

O trabalho levado a cabo por Wankhede *et al.* (2007), analisa a eficácia de diferentes técnicas de arrefecimento de equipamentos eletrónicos, localizados no exterior. Foi utilizada uma ferramenta de Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC), o “ICEPAK”, para a simulação de diferentes revestimentos e tintas na superfície exterior dos armários de telecomunicações, o bloqueio da radiação solar, a presença de paredes duplas, a ventilação no interior do armário e a utilização de permutadores de calor ar-ar. As simulações foram validadas experimentalmente, tendo-se concluído que a utilização de tinta de óleo branca superfície exterior do armário, permite reduzir em cerca de 25%, o impacto da radiação solar na temperatura interna. Também a utilização de ventiladores no interior se mostrou bastante eficaz, com uma redução de cerca de 50-55%. Os armários com parede dupla apresentaram temperaturas internas inferiores.

Muralidharan *et al.* (2009) estudaram a influência da parede dupla de um armário na temperatura interior do mesmo, quando sujeito à radiação solar, recorrendo à ferramenta de DFC, *FLOTHERM*. Foram simuladas e analisadas quatro configurações distintas, uma configuração base sem parede

dupla na envolvente, uma com parede dupla nas laterais, outra com parede dupla nas laterais e no teto, e uma com parede dupla possuindo ventilação forçada, para realizar a refrigeração do armário. Para todas as configurações, foi também variada a espessura da caixa-de-ar (25,4 mm até 88,9 mm). Os resultados obtidos indicam que a espessura tem pouca influência na temperatura interna do armário, sendo que das três configurações com parede dupla, a que permite menores temperaturas internas, é a que possui refrigeração por ventilação forçada na caixa-de-ar.

Uma investigação mais aprofundada sobre a parede dupla com ventilação forçada, foi desenvolvida por Muralidharan *et al.* (2010). Nesse estudo também foi utilizado o *software FLOTHERM*. Simularam-se duas configurações distintas para os ventiladores, uma com três ventiladores na caixa-de-ar do topo do armário, possuindo ranhuras no topo e duas entradas de ar na base das paredes, e outra posicionada na base da parede dupla do lado direito, com uma entrada de ar nesse local e com a saída de ar na base da parede dupla oposta. Foi estudada a evolução da temperatura interior do armário e a potência consumida pelos ventiladores, tendo variado a espessura da caixa-de-ar das paredes e o caudal de ar fornecido pelos ventiladores. O estudo concluiu que, a eficiência térmica do armário pode ser aumentada através da utilização da segunda configuração e com o aumento do caudal de ar, contudo o consumo energético é maior. Para o melhor compromisso entre a eficiência térmica e o consumo energético, recomenda-se um caudal de ar entre 127 e 170 m³/h.

O estudo realizado por Zhang *et al.* (2008), incide sobre a caracterização térmica da envolvente de uma EBT em Guangzhou, na China. Foi efetuada uma monitorização experimental de uma EBT típica nesse local, onde foram utilizados termopares, para a medição da temperatura do ar e da envolvente, e um anemómetro de fio quente, para a medição da velocidade do ar. A partir dos resultados obtidos na monitorização, os autores utilizaram o *software DeST*, para comparar várias configurações da envolvente. O estudo concluiu que, para o projeto de uma envolvente energeticamente eficiente, o fator preponderante recai na escolha do tipo de arrefecimento, sendo que a ventilação forçada permite maximizar a poupança energética, ao contrário do convencional sistema de ar condicionado. A combinação entre uma envolvente com elevada condutibilidade térmica e baixa absorvidade solar nas paredes e teto, também é fortemente recomendada.

Tu *et al.* (2011), efetuaram um estudo computacional semelhante ao anterior, não só em Guangzhou (clima mais quente), mas também em Harbin (clima mais frio). Foram simuladas quatro configurações distintas, em que se alteraram os valores da condutibilidade térmica da envolvente. Os resultados obtidos acrescentam às conclusões anteriores, que para climas mais frios e com pouca dissipação de calor pelos equipamentos de IT (Tecnologias de Informação), recomenda-se o uso de materiais com menor condutibilidade térmica na envolvente.

Dos métodos anteriormente explicitados para o arrefecimento dos armários ou *shelters* exteriores, a maioria utiliza a circulação direta de ar para o arrefecimento dos equipamentos eletrónicos. O ar é proveniente do exterior, podendo entrar diretamente no armário ou *shelter* por meio de grelhas, ou sendo previamente arrefecido, por exemplo, por uma unidade de ar condicionado. De qualquer das formas, é necessário que existam filtros nas entradas de ar, com a finalidade de evitar a entrada de poeiras e de sujidade para o interior dos armários ou *shelters* exteriores (Junpeng *et al.*, 2010).

Os autores supracitados, levaram ainda a cabo um estudo, com o objetivo de conceber uma unidade de autolimpeza para os filtros de armários exteriores, pretendendo avaliar a sua fiabilidade e a poupança económica, relativa aos custos de manutenção e à energia consumida pelo armário. O estudo concluiu que, a utilização da unidade de autolimpeza, permite a anulação da manutenção dos armários exteriores e consequentemente a redução dos custos de operação. O filtro construído no estudo possui um tempo de vida útil superior ao do armário, ao contrário das habituais esponjas.

Os artigos apresentados de seguida, incidem sobretudo nos métodos de extração do calor de armários e de *shelters* exteriores de telecomunicações. Sendo que na presente dissertação irá ser elaborada uma simulação computacional do escoamento de ar no interior de um armário de telecomunicações, os próximos estudos a apresentar, irão ser divididos segundo o carácter maioritariamente computacional ou experimental.

Os estudos numéricos efetuados por Mariam *et al.* (2009) recorreram à ferramenta de DFC, *FLOTHERM*, para simular um armário de telecomunicações. Foram testadas várias configurações, no que respeita ao projeto do armário e do seu sistema de arrefecimento, com o intuito de arrefecer eficientemente as baterias, alterando-se o número e o posicionamento dos ventiladores, assim como o caudal fornecido pelos mesmos. Concluiu-se que o aumento do caudal dos ventiladores e o aumento do número de ventiladores, permitiu uma redução nas temperaturas verificada no interior do armário. O aumento da altura da abertura de saída do ar, também permitiu uma diminuição das mesmas.

Chen *et al.* (2009), estudaram a utilização da ventilação forçada, como técnica de arrefecimento auxiliar, a qual permitiu o controlo eficiente da temperatura de um *shelter* em Guangzhou, China. Esta técnica recorre ao uso de ventiladores em complementaridade com os sistemas de ar condicionado convencionais. Foi utilizado o mesmo programa computacional e os mesmos dados da monitorização efetuada por Zhang *et al.* (2008). Além deste programa foi ainda utilizado o programa DFC, *PHOENICS*, para simular o escoamento de ar no interior da EBT, para otimizar a estratégia de controlo eficiente da temperatura. O estudo concluiu que a aplicação desta estratégia na cidade de Guangzhou, permite poupanças energéticas na ordem dos 49% e com um *payoff* de menos de dois anos. A otimização da organização do escoamento permite aumentar

bastante a eficiência desta estratégia. Os mesmos autores efetuaram um novo estudo (Chen *et al.*, 2012), onde propuseram um novo método de controlo da técnica de arrefecimento por ventilação presente acima, agora para diferentes EBTs e diferentes condições climáticas. Concluíram que a técnica tem maior aplicabilidade e eficiência: em regiões quentes; quanto mais elevada for a dissipação térmica interna da EBT; e quanto menor for a eficiência energética dos sistemas de ar condicionado.

O trabalho desenvolvido por Hendrix e Allen (2010), recorre à ferramenta numérica de DFC, de forma a comparar e otimizar três métodos de arrefecimento de *shelters* exteriores de telecomunicações, para diferentes condições climáticas. O estudo concluiu, que para climas mais frescos, o método de arrefecimento por convecção natural deve ser aplicado. Nos climas em que as temperaturas exteriores não permitem esse arrefecimento, a instalação de um sistema economizador auxiliar ao sistema de ar condicionado (método base), permite poupanças energéticas significativas, com um *payoff* de três anos para temperaturas de referência de +33 °C e de 1,9 anos para temperaturas de referência de +35 °C.

No artigo de Sisk (2014), é apresentado um sistema de arrefecimento da empresa Dantherm, que combina o arrefecimento por convecção natural com o tradicional sistema de ar condicionado. Foram efetuados ensaios em cinco situações reais, na cidade de Ontário no Canadá, no período anual mais quente, sendo este o caso mais desfavorável. Os resultados obtidos, indicam uma poupança energética média de aproximadamente 20% para os cinco locais. Quanto mais fresco for o clima, mais eficiente se torna o sistema de arrefecimento (menor tempo de utilização do sistema de ar condicionado), chegando a poupanças energéticas de 70-79%.

Diversos trabalhos numéricos e experimentais têm vindo a ser desenvolvidos no âmbito geotérmico, para o arrefecimento de armários e *shelters* exteriores de telecomunicações. Nesse âmbito Yuping *et al.* (2008a), desenvolveram um estudo numérico com recurso a uma ferramenta de DFC, para simular a temperatura no interior de um armário de telecomunicações, arrefecido pelo solo. Dois ventiladores situados na base do armário, permitem que o ar quente proveniente deste, seja arrefecido por uma cave subterrânea e o ar fresco seja forçado para o interior do armário. As simulações permitiram concluir que, para uma dissipação de 700 W pelos equipamentos e uma temperatura exterior de +45 °C, cerca de 60% do calor gerado é dissipado no solo, com uma poupança energética na ordem dos 70%, face aos permutadores de calor convencionais. Yuping *et al.* (2008b) estudaram uma solução semelhante, desta vez recorrendo a um permutador de calor subterrâneo. A ferramenta computacional utilizada foi o *FLOTHERM*, tendo sido efetuadas simulações de otimização do permutador, no estado estacionário e transitório, validadas experimentalmente num armário real. Para a mesma potência dissipada e para uma temperatura exterior de +30 °C, o permutador de calor mostrou-se bastante eficiente, com um Coeficiente de Performance (COP) de 110, assim como uma significativa diminuição do

ruído. O trabalho experimental levado a cabo por Hong *et al.* (2009), difere dos anteriores na configuração e no tipo de fluido presente no permutador de calor no subsolo. Neste caso o calor do armário é transferido para um permutador ar-água, sendo que esta água dissipa o calor acumulado para o subsolo, através das paredes do permutador aí situado. O protótipo conseguiu arrefecer eficazmente o armário, com um COP dez vezes superior a um tradicional sistema de ar condicionado.

Uma conjugação entre o sistema de arrefecimento geotérmico e uma torre solar foi estudada por Dokkar *et al.* (2010). Foi utilizado o software de DFC *Fluent*, efetuando-se simulações para o estudo do desempenho térmico e do escoamento no interior de uma EBT, na Argélia. Para a discretização numérica foi utilizado o esquema *Upwind* e na conjugação entre o campo de velocidade e da pressão foi utilizado o algoritmo *SIMPLE*. Foi imposta uma temperatura de +83 °C na condição de fronteira nas paredes da EBT. Foi estudado o efeito do aumento de caudal proveniente do permutador subterrâneo, através do aumento da velocidade do ar e do tamanho da abertura, na entrada (*inlet*) do armário. O estudo concluiu que a combinação entre estes dois sistemas permite uma temperatura de cerca de +29 °C na zona central da EBT, sendo que o aumento do caudal leva a uma diminuição das temperaturas interiores, não sendo necessária a existência de sistemas auxiliares de arrefecimento, como o ar condicionado.

Todos os estudos concluíram que a temperatura praticamente constante do solo, traz grandes vantagens energéticas, sendo que o aumento da profundidade permite temperaturas inferiores.

O arrefecimento por termossifão, também tem vindo a ser investigado e aplicado em armários e *shelters* exteriores de telecomunicações. Samba *et al.* (2013) efetuaram um trabalho experimental num armário de telecomunicações da France Telecom, onde foi aplicado um termossifão para o arrefecimento do mesmo. Neste estudo, foram utilizadas placas dissipadoras de calor com potência variável, entre 0 e 650 W, colocadas no interior de caixas, de forma a simular os equipamentos de telecomunicações. O evaporador do termossifão encontra-se no interior do armário, na zona mais quente do mesmo e o condensador encontra-se no exterior, permitindo assim que o calor produzido possa ser dissipado para o meio ambiente. O funcionamento do termossifão foi estudado para o regime estacionário e transitório, sendo comparada a sua eficiência com o sistema de arrefecimento padrão dos armários em questão (ventilação forçada). A temperatura interna dos armários exteriores de telecomunicações não deverá exceder os +55 °C, de acordo com o Instituto Europeu de Normalização das Telecomunicações (ETSI). Concluiu-se que para o limite máximo de temperatura, o sistema de arrefecimento por termossifão, permite que o calor total dissipado no interior do armário seja superior ao do sistema convencional, ou seja, 600 W, face aos 250 W com a ventilação forçada.

Zhang *et al.* (2013) e Zhou *et al.* (2013), efetuaram estudos semelhantes sobre a aplicabilidade do sistema de arrefecimento por termossifão, como sistema auxiliar do sistema de ar

condicionado convencional, em EBTs para diferentes climas na China. Foi utilizado o *software* DeST em ambos os estudos, para a obtenção da eficiência do sistema face ao sistema convencional, apenas com ar condicionado. Os estudos concluíram que a poupança energética da utilização do termossifão, como sistema auxiliar do sistema de ar condicionado, permite poupanças energéticas na ordem dos 30%, com um período de retorno do investimento de cerca de 4,3 anos. Esta combinação também se mostrou mais eficiente para climas mais frios, sendo que quanto mais quente for o clima, menor será a poupança energética e maior o período de retorno.

Outros sistemas de arrefecimento, com base em materiais de mudança de fase (PCM), têm vindo a ganhar relevo na área das telecomunicações. Sun *et al.* (2014) e Sun *et al.* (2015) efetuaram estudos experimentais, sobre a utilização de PCMs, como técnica de arrefecimento auxiliar dos sistemas de ar condicionado. Foi construído um protótipo do sistema, tendo sido posteriormente testado em cinco regiões climáticas distintas, na China. O sistema denomina-se por unidade de armazenamento de calor latente (LHSU), possuindo três modos de funcionamento: um modo de carga energética, em que o frio proveniente do exterior é armazenado nos PCM; um modo de arrefecimento direto pelo ar exterior (sem carga); e um modo de descarga, onde o calor latente armazenado é utilizado para arrefecer o armário. Durante o funcionamento da LHSU, o ar condicionado não se encontra em funcionamento. Os resultados médios alcançados para as cinco regiões climáticas, permitiram diminuir em 50% o consumo energético das EBTs, para um tempo médio de substituição do sistema de ar condicionado de 82,6%. O sistema apresenta os melhores resultados para climas moderados.

Sundaram *et al.* (2010) elaboraram um estudo experimental para uma solução de arrefecimento passivo, conjugando PCMs e termossifões bifásicos, para EBTs em climas tropicais e desérticos. Neste sistema, o calor dissipado pelos equipamentos nos períodos mais quentes do dia, é armazenado numa unidade de calor latente contendo água e os PCMs, sendo libertado para o ambiente no período noturno, pelos termossifões. Um protótipo do sistema foi construído e testado, no interior de uma câmara climática com dissipação de calor constante, tendo sido realizadas três experiências de 24 horas, para cada mês do ano. Os resultados permitiram concluir que o sistema é viável para as regiões tropicais e desérticas, devido à grande amplitude térmica entre o período diurno e noturno. O sistema não consome energia, pelo que a poupança energética é enorme e poderá ser utilizado em locais sem acesso à rede elétrica, permitindo eliminar 14 toneladas de emissões, face ao sistema de ar condicionado.

Devido à elevada capacidade térmica da água em detrimento do ar, um trabalho experimental foi elaborado por Nörtershäuser *et al.* (2014), onde um sistema de arrefecimento hidráulico para um armário de telecomunicações, foi construído e testado numa câmara climática. Para simular os equipamentos de telecomunicações, dez resistências de 220 Ω foram instaladas no interior do

armário, permitindo variar a potência térmica dissipada até um valor máximo de 2 kW. Dois tipos de permutadores foram testados, ambos com circulação interna de água, sendo esta arrefecida por um permutador água-ar, com um ventilador em funcionamento constante. A monitorização das temperaturas recorreu a termopares tipo k, tendo os resultados sido guardados em intervalos de 1 min. O estudo concluiu que o arrefecimento hidráulico permite um arrefecimento eficiente do armário, com uma redução no consumo energético face aos sistemas convencionais, permitindo assim um aumento da carga térmica no interior do armário, para o valor limite de +55 °C.

Le Masson *et al.* (2012), apresenta três métodos alternativos (já apresentados nesta subsecção) à utilização de sistemas de ar condicionado, de forma a reduzir ou eliminar o seu funcionamento. Estes métodos incluem o uso de ventilação forçada, de materiais de mudança de fase (PCMs) e de termossifões bifásicos de circuito fechado. Foram efetuados testes de âmbito experimental em que, da mesma forma que nos artigos anteriores, estes sistemas mostraram-se bastante eficientes no arrefecimento de EBTs, permitindo reduzir os custos energéticos associados.

Existem inúmeros estudos acerca de métodos e técnicas alternativas de arrefecimento no âmbito das telecomunicações, sendo que o uso de *softwares* numéricos, nomeadamente de DFC, se tornaram uma enorme vantagem e uma prática cada vez mais comum (Boukhanouf e Haddad, 2010). Os trabalhos anteriormente apresentados, sustentam a necessidade do arrefecimento neste sector, aliado à crescente importância do desenvolvimento de soluções cada vez mais eficientes, com a finalidade de substituir os sistemas de ar condicionado, comumente utilizados, ou diminuir o seu consumo energético.

1.4. Objetivos e contribuição da dissertação

O objetivo central da presente dissertação, incide sobre a caracterização do escoamento de ar no interior de um armário exterior de telecomunicações móveis e do seu comportamento térmico.

Pretende-se fazer uma conjugação entre o estudo experimental e numérico, relativamente ao estudo de diversos parâmetros do armário, a fim de caracterizar o escoamento de ar no seu interior e a sua influência no comportamento térmico do armário.

Os objetivos da dissertação são:

- A construção de uma caixa com um elemento de dissipação de energia térmica no interior, de forma a simular o comportamento de um equipamento de telecomunicações em condições reais de funcionamento;

- O estudo experimental do comportamento térmico do armário, na presença do elemento de dissipação de energia térmica;
- A medição de diversos parâmetros relativos ao escoamento interno, através da variação do caudal gerado pelos ventiladores;
- A visualização do escoamento no interior do armário, com recurso a uma técnica de injeção de fumo;
- A construção de um modelo numérico do escoamento interno do armário exterior de telecomunicações, com recurso à ferramenta computacional *Fluent*;
- A validação do modelo computacional recorrendo à informação experimental recolhida.

A dissertação em causa, visa assim contribuir para uma melhor compreensão sobre o escoamento de ar no interior deste género de armários exteriores, podendo a informação produzida ao longo do trabalho, ser utilizada como referência para estudos posteriores, no que respeita ao comportamento térmico do armário e à otimização do seu arrefecimento.

1.5. Visão geral e organização da dissertação

A elaboração da organização e da estrutura da presente dissertação, pretende uma compreensão clara e objetiva por parte do leitor, de todo o trabalho efetuado nesta área científica. Foi, por isso, adotada uma estrutura composta por seis capítulos, que descrevem diferentes fases da investigação e dos trabalhos realizados, embora todas essas fases estejam interligadas e contribuam para alcançar os vários objetivos delineados.

O primeiro capítulo serve de elemento introdutório e de contextualização da temática em estudo, apresentando-se os trabalhos já elaborados sobre o tema, assim como um enquadramento geral do mesmo. São definidos os objetivos a alcançar ao longo do desenvolvimento da investigação e o contributo científico desta, para a sociedade atual.

O segundo capítulo tem um carácter mais teórico, pretendendo elucidar o leitor por um lado, sobre a necessidade de arrefecimento dos equipamentos de telecomunicações e deste tipo de armários e por outro, sobre as técnicas de arrefecimento existentes. Descrevem-se os modos de transmissão de calor existentes, permitindo compreender a forma como o arrefecimento se processa e as possíveis soluções a adotar, para diminuir o consumo energético associado ao mesmo.

No terceiro capítulo é exibida a componente experimental do trabalho, com a apresentação inicial das principais características do armário em estudo e dos equipamentos de telecomunicações que este comporta. São relatados os vários ensaios experimentais realizados, com o intuito de caracterizar o escoamento de ar interior e o comportamento térmico do armário, servindo também de informação para a elaboração do modelo computacional e posteriormente, para a validação do mesmo.

Nessa sequência de ideias, o quarto capítulo destina-se à componente numérica do trabalho realizado, descrevendo o programa utilizado e as equações de governo nas quais o mesmo se baseia. Além disso são expostos os vários modelos de turbulência que foram alvo de testes e por fim, é apresentada de forma detalhada a construção da modelação computacional realizada.

Os resultados obtidos nos ensaios experimentais e nas simulações computacionais, são apresentados no quinto capítulo. Estes encontram-se sob a forma gráfica, não só para permitir a comparação entre os resultados experimentais e computacionais, para a consequente validação do modelo computacional elaborado, mas também para uma análise simples e precisa das diferentes propriedades em estudo, necessárias à caracterização do escoamento de ar no interior e o comportamento térmico, do armário.

Por fim, no sexto capítulo encontram-se descritas as conclusões relativas ao trabalho desenvolvido ao longo da presente dissertação, assim como a apresentação de algumas sugestões para trabalhos futuros a realizar sobre esta temática, com o intuito de aprofundar o conhecimento e a potencialidade desta área.

2. Os armários de telecomunicações móveis

2.1. Introdução

No presente capítulo vai ser estudada a necessidade de arrefecimento nos armários de telecomunicações, expondo as principais características térmicas dos equipamentos e a forma como estas influenciam o funcionamento e a própria fiabilidade dos mesmos. Será igualmente efetuada uma breve caracterização climática de Portugal Continental, no sentido de auxiliar numa melhor perceção relativa à influência do ambiente exterior no arrefecimento dos armários e de uma forma mais específica, para o presente armário em estudo.

Apresentar-se-ão os principais modos de transmissão de calor existentes, sendo através destes que o calor presente no ambiente interior do armário, poderá ser transmitido para o exterior. Para que o arrefecimento se processe da forma mais eficiente possível, existem diversos sistemas de arrefecimento, de tal modo que serão apresentados os principais sistemas implementados em armários exteriores, com a respetiva explicação do seu funcionamento. Por fim será efetuada uma comparação qualitativa dos sistemas apresentados, de forma a avaliar as suas principais vantagens e desvantagens.

2.2. Necessidade de arrefecimento

Os equipamentos de telecomunicações, têm passado por várias alterações nas últimas décadas, com uma tendência cada vez mais vincada, na diminuição do tamanho dos componentes eletrónicos e consequentemente da sua própria estrutura. Esta evolução deve-se ao sucessivo progresso na área dos materiais e o contínuo desenvolvimento das técnicas, processos e metodologias de desenho e conceção. Em apenas duas décadas, o tamanho dos dispositivos eletrónicos passou da micro escala, para a nano escala. Isto traduz-se num aumento da capacidade e de performance dos dispositivos eletrónicos, com o consequente aumento do calor dissipado por estes (Moore e Shi, 2014). A figura 2.1 demonstra o aumento do calor dissipado em pouco mais de uma década, através da hierarquia de enclausuramento de componentes eletrónicos.

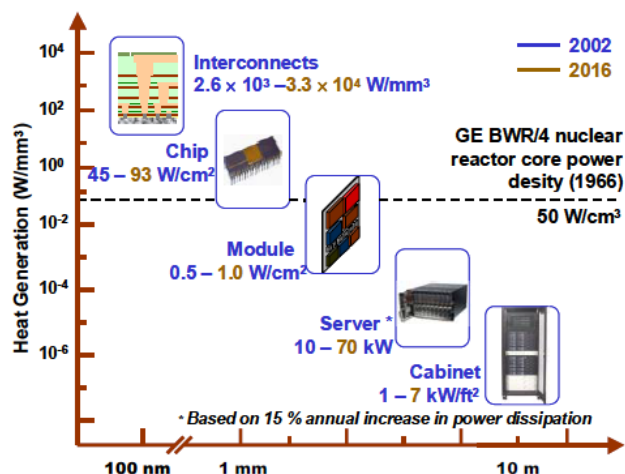


Figura 2.1 - Calor dissipado através da hierarquia de empacotamento de equipamentos eletrônicos (Nie e Joshi, 2006).

Com o sucessivo aumento do calor dissipado pelos equipamentos eletrônicos, advêm complicações e limitações ao seu funcionamento e durabilidade, pelo que devem ser tomadas as devidas precauções em termos do arrefecimento destes sistemas. A temperatura é o principal fator que leva ao incorreto funcionamento e à diminuição da vida útil dos componentes eletrônicos, sendo que mais de metade (55%) das avarias se devem à temperatura, como se pode observar na figura 2.2.

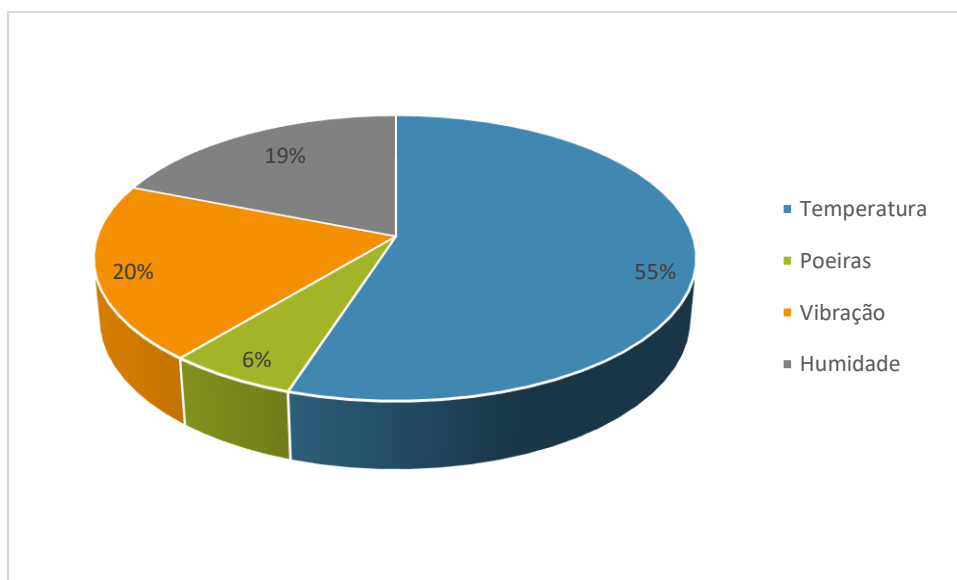


Figura 2.2 - Fatores que levam à ocorrência de avarias em equipamentos eletrônicos (adaptado de Shende e Mahalle, 2013).

Na mesma sequência, à medida que a temperatura aumenta acima da temperatura de operação, também aumenta a probabilidade de ocorrência de falhas ou de avarias, sendo que para cada aumento de 10 °C acima da temperatura de funcionamento, duplica-se a probabilidade de ocorrência de avarias (Ahmadi *et al.*, 2014). As reduzidas dimensões dos componentes eletrónicos atuais também pode levar a distribuições não-uniformes da dissipação do calor produzido ao longo da superfície dos mesmos, dando origem a pontos quentes (“hot spots”). Nestas regiões as temperaturas são bastante mais elevadas do que para a restante superfície, sendo com base nestas regiões que a probabilidade de falha é determinada (Moore e Shi, 2014).

Os pontos quentes (elevadas temperaturas localizadas) para além de poderem provocar fadigas térmicas e mecânicas nos componentes, promovendo a sua rutura, potenciam a ocorrência de outros efeitos prejudiciais nos componentes eletrónicos. A disparidade da temperatura do componente ao longo de toda a sua superfície, leva a alterações no seio dos próprios materiais (alterações de propriedades químicas e iónicas) e a oscilações nas propriedades elétricas do componente (Lakshminarayanan e Sriraam, 2014). Algumas destas e outras consequências nefastas do aumento da temperatura nos componentes eletrónicos, já foram mencionadas no capítulo anterior e encontram-se descritas de forma mais detalhada nos artigos de Lakshminarayanan e Sriraam (2014), Joshi *et al.* (2003), Lasance (2003) e Gurrum *et al.* (2004).

Além do aumento de temperatura provocado pela dissipação de calor dos componentes eletrónicos, também o aquecimento do ar no interior dos armários e a influência do clima exterior, levam ao aumento da temperatura dos equipamentos de telecomunicações (Comité técnico da ASHRAE, 2012). No que respeita às condições ambientais exteriores, nomeadamente a radiação solar, a influência na temperatura do interior do armário irá depender do tamanho deste, do isolamento térmico da envolvente e da orientação do armário relativamente ao sol, pelo que as temperaturas podem aumentar significativamente, quando este se encontra exposto à radiação solar (Wankhede, 2007).

Para o caso específico de Portugal Continental, a temperatura média anual e o valor médio da temperatura máxima do ar no ano de 2015, foram de +15,99 °C e +21,85 °C, respetivamente. Em relação ao valor médio da temperatura do ar entre 1971 e 2000, considerado o valor de referência, no ano de 2015 registou-se um aumento de 0,75 °C, acompanhando a tendência do aumento da temperatura média terrestre, causada pelo fenómeno ambiental denominado de aquecimento global. A figura 2.3 representa a evolução da temperatura média anual para Portugal Continental, no período compreendido entre 1931 e 2015, incluindo o valor médio anual de referência que se encontra representado a traço interrompido, assim como a evolução do valor médio da temperatura máxima anual, igualmente com o respetivo valor médio.

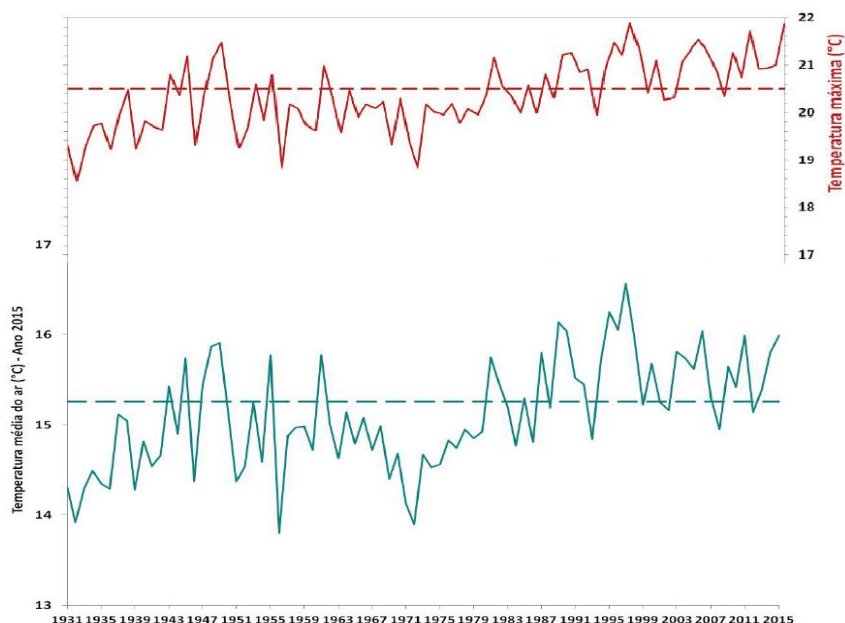


Figura 2.3 - Evolução da temperatura média anual e do valor médio da temperatura máxima do ar, com os respetivos valores de referência a traço interrompido (IPMA, 2016a).

Além disso, o valor médio da precipitação total anual nesse mesmo ano foi de 599,6 mm, um valor muito inferior ao valor normal, o que traduz um aumento do número de dias de exposição solar nas instalações, incluindo os armários exteriores de telecomunicações. Desta forma, o IPMA (2016a), classifica o clima português referente ao ano de 2015, como quente e seco, tal como se pode visualizar na figura 2.4.

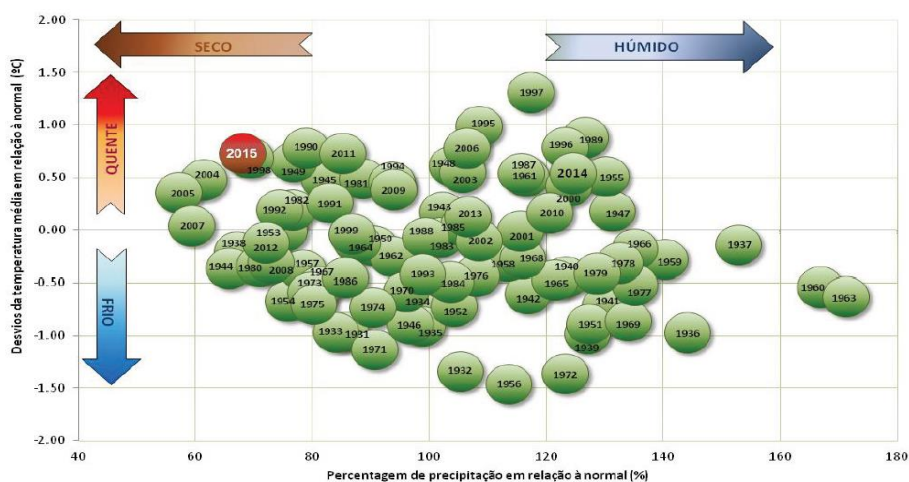


Figura 2.4 - Classificação climática de Portugal Continental para o ano de 2015 (IPMA, 2016a).

Apesar do valor médio da temperatura máxima anual do ar para 2015 se apresentar como uma temperatura amena, os meses do verão apresentam temperaturas bastante elevadas. Para esse mesmo ano, o mês de julho apresentou-se como o mês mais quente, com um valor médio da temperatura máxima do ar de +30,42 °C, tendo chegado ao valor de pico de +42,1 °C (IPMA, 2015). No caso específico do presente ano (2016), o mês mais quente foi o mês de agosto, com um valor médio da temperatura máxima do ar de +32,23 °C e um valor de pico de +44,8 °C (IPMA, 2016b).

Estes valores extremos da temperatura ambiente, aliados à crescente exposição solar dos armários exteriores e o aumento da potência térmica dissipada pelos componentes eletrónicos dos equipamentos, aumentam drasticamente a temperatura no interior dos armários.

O controlo da temperatura nos equipamentos eletrónicos, nomeadamente os de telecomunicações, é assim um fator vital para o correto funcionamento dos sistemas de comunicações, assim como o prolongamento do seu ciclo de vida útil, sendo que uma diminuição de 10 °C duplica o tempo médio sem ocorrência de avarias (*Mean Time Between Failure, MTBF*) (Purcell, 2012). Os equipamentos de telecomunicações especificam as temperaturas máximas e mínimas possíveis para o adequado funcionamento dos equipamentos, podendo possuir sistemas internos de arrefecimento (normalmente ventiladores) e diferentes modos de funcionamento, mediante a temperatura a que o equipamento se encontra sujeito. A figura 2.3 representa os regimes de funcionamento para o controlo da temperatura na maioria dos equipamentos de telecomunicações.

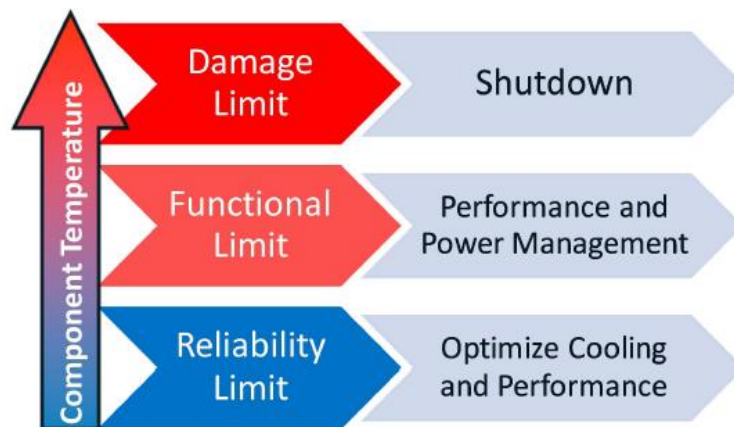


Figura 2.5 - Regimes de funcionamento para o controlo da temperatura na maioria dos equipamentos de telecomunicações (Comité técnico da ASHRAE, 2012).

Como se pode constatar pela figura, à medida que a temperatura aumenta, os equipamentos de telecomunicações podem diminuir a sua intensidade de funcionamento e inclusive desligar, com

a finalidade de proteger os mesmos dos efeitos adversos anteriormente mencionados, que levariam ao estado de avaria, ou até à danificação dos mesmos.

Apesar das empresas construtoras dos equipamentos especificarem os regimes de temperaturas anteriormente referidos, no caso dos armários exteriores de telecomunicações (para aplicação comercial), a norma europeia para as telecomunicações define os +55 °C como a temperatura máxima de operação nestes armários (ETSI, 2009). Além do caso europeu, também empresas certificadas, como a NEMA e a PENTAIR, dos Estados Unidos da América (EUA), estabelecem limites de temperatura, das próprias dimensões dos armários e as suas especificações e requisitos, dependendo das condições climáticas onde são aplicados.

É com base no que foi mencionado, que se torna absolutamente imprescindível que os equipamentos, assim como o ar no interior destes “abrigos” exteriores de telecomunicações, consigam ser arrefecidos de uma forma eficiente, protegendo assim os equipamentos e garantindo uma contínua prestação dos serviços de comunicações, com a melhor qualidade. A acrescentar ao que foi referido e atendendo às crescentes preocupações ambientais e energéticas, explicitadas no capítulo anterior, é cada vez mais uma necessidade, o desenvolvimento de sistemas e de técnicas energeticamente eficientes, para o arrefecimento.

2.3. Tipos de arrefecimento

Tal como foi referido anteriormente, o arrefecimento no interior dos armários de telecomunicações é um fator crítico, sendo o sobreaquecimento responsável por cerca de 55% das avarias em equipamentos eletrónicos. Ademais, a própria distribuição de temperaturas não é uniforme, existindo zonas de recirculação do ar, pontos quentes, ar quente proveniente de equipamentos a entrar noutros equipamentos, entre outros (Nörtershäuser *et al.*, 2014).

Os armários exteriores de telecomunicações, para além de terem como função a proteção dos equipamentos, seja das condições ambientais exteriores (pó, detritos, humidade, radiação solar, etc) ou do acesso indevido aos equipamentos (por animais ou pessoas não autorizadas, podendo danificar os mesmos), também deverão conseguir manter as temperaturas interiores dentro de gamas especificadas (no caso em estudo, dentro das normas anteriormente expressas pelo ETSI). Com o intuito de manter as temperaturas dentro dos valores recomendados, os armários de telecomunicações são munidos de sistemas de arrefecimento, pois como foi perceptível na secção anterior, o habitual é que o valor máximo de temperatura seja superado e não o contrário. A temperatura interior não depende somente do calor dissipado pelos equipamentos, mas também dos ganhos térmicos provenientes do exterior e da quantidade de calor dissipado pelo mesmo,

sendo importante perceber a forma como o calor é transferido no interior do armário (Comité técnico da ASHRAE, 2012; Purcell, 2012).

O arrefecimento consiste na transmissão de calor, de uma região mais quente para uma região mais fria. Esta transmissão pode ocorrer de três formas distintas, por condução, convecção e radiação (Silva, 2010; Hennon, 2010).

A transmissão de calor por condução encontra-se associada a movimentos de natureza microscópica, ou seja, ao contacto direto das partículas, sendo que este se processa de forma aleatória nos fluidos e da combinação entre a vibração molecular e o fluxo de elétrons livres nos sólidos. Esta forma de transmissão, depende assim da diferença de temperatura entre as superfícies exterior e interior da parede e da sua espessura, admitindo neste caso a transmissão de calor apenas num sentido (segundo x). A equação (1) representa a fórmula matemática da taxa de calor transferido por condução, onde A representa a área da superfície de permuta, K representa a condutibilidade térmica, dT representa a diferença de temperaturas e dx representa a espessura da parede.

$$q_{cond(x)} = -AK \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

A transmissão de calor por convecção, ocorre entre uma superfície e um fluido adjacente, envolvendo o “efeito combinado da difusão de calor e do movimento macroscópico (ou global) do fluido” (Silva, 2010). Esta forma de transmissão de calor pode ocorrer por um lado, de forma natural (convecção natural), em que a movimentação do fluido se deve às variações de massa volúmica, causadas pelas variações de temperatura. Ou por outro lado, de forma forçada (convecção forçada), sendo que neste caso a movimentação do fluido é causada por um sistema mecanizado (ventilador, bomba, entre outros), o que faz com que este último caso se destaque como o mais utilizado no arrefecimento de armários exteriores de telecomunicações. A equação (2) representa a fórmula matemática correspondente a este processo, cuja diferença de temperaturas entre a superfície em questão (T_S) e o fluido adjacente (T_∞) é representada por ($T_S - T_\infty$), a área da superfície é representada por A e o coeficiente de transferência de calor por convecção é representado por h .

$$q_{conv} = Ah(T_S - T_\infty) \quad (2)$$

Por fim, a transmissão de calor por radiação, não necessita de um meio físico para ocorrer, pois a sua propagação estabelece-se através de ondas eletromagnéticas contidas no espectro ultravioleta (UV) e infravermelho (IV), contabilizando apenas uma pequena porção do arrefecimento no sector das telecomunicações. Tratando-se de uma superfície real, a taxa máxima de transmissão de calor por radiação encontra-se representada na equação (3), onde A representa a área da superfície exposta, e representa a emissividade da superfície, σ representa a constante de *Stefan-Boltzmann* e T_s representa a temperatura absoluta da superfície.

$$q_{rad} = Ae\sigma T_s^4 \quad (3)$$

Se a transmissão de calor por radiação ocorrer entre duas superfícies, a equação (3) toma a forma matemática representada na equação (4), onde T_{viz} representa a temperatura da superfície vizinha. A figura 2.6 representa os três modos anteriormente referidos de transmissão de calor.

$$q_{rad} = Ae\sigma(T_s^4 - T_{viz}^4) \quad (4)$$

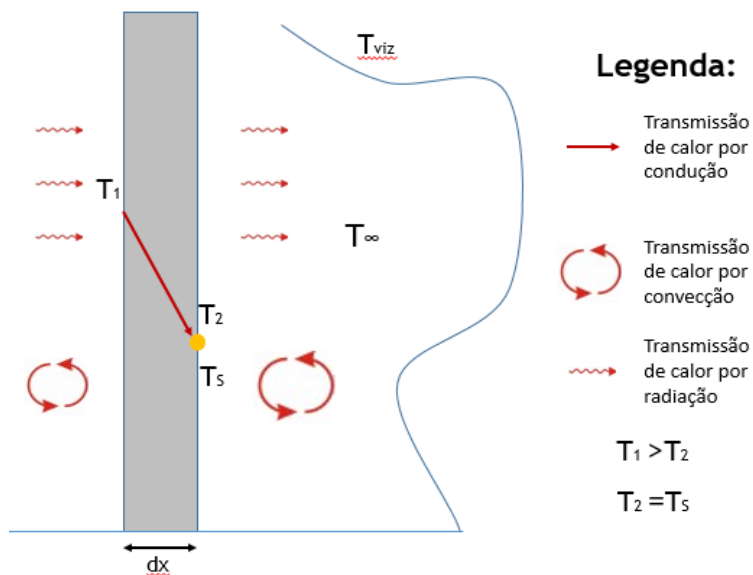


Figura 2.6 - Representação dos três modos de transmissão de calor.

No caso específico dos armários exteriores de telecomunicações, não sendo possível controlar a quantidade de tráfego móvel, que leva ao aumento do calor dissipado nos equipamentos, assim

como controlar as condições ambientais exteriores, salvo a radiação solar através de sombreamento, é necessário recorrer a métodos eficazes de arrefecimento. Estes métodos fazem uso das formas de transmissão de calor anteriormente apresentadas, por forma a conseguirem manter a temperatura interior do armário e dos equipamentos, dentro dos valores desejados. Consoante a existência de sistemas mecanizados, os métodos de arrefecimento podem ser agrupados em métodos passivos ou ativos, sendo que os métodos passivos não possuem sistemas mecanizados para assistir o arrefecimento, ao contrário dos métodos ativos que fazem uso desses sistemas, consumindo energia elétrica (Shende e Mahalle, 2013).

Os métodos ativos, consistem em sistemas que possuem uma elevada capacidade de arrefecimento, tendo por isso, sido a escolha primordial para o arrefecimento dos armários exteriores de telecomunicações. A grande vantagem, é que no geral permitem dissipar grandes quantidades de calor para o exterior e dependendo dos sistemas, manter a temperatura dos equipamentos abaixo da temperatura ambiente. Os sistemas de arrefecimento ativos mais utilizados nos armários exteriores, são os sistemas convencionais de ar condicionado, sendo igualmente responsáveis pelos maiores consumos de energia elétrica, dentro do conjunto total dos sistemas implementados no arrefecimento. Como consequência das crescentes preocupações ambientais e do aumento do custo da energia, os sistemas de ar condicionado, quando possível, começaram a ser substituídos por ventiladores (convecção forçada), ou de forma menos usual por jatos de água/ar, permutadores de calor com convecção forçada, módulos termoelétricos, entre outros (Shende e Mahalle, 2013).

O sistema de ar condicionado é a tecnologia com maior performance térmica, permitindo arrefecer o ar interior dos armários a temperaturas bastante inferiores às temperaturas exteriores, mesmo na presença de acentuadas cargas térmicas, assim como controlar o nível de humidade aí existente. Apesar da elevada performance térmica, esta tecnologia é bastante dispendiosa, não só pelo próprio custo de aquisição, mas também pelo consumo energético e pelos regulares atos de manutenção, devido às elevadas temperaturas e às pressões associadas ao seu funcionamento. Os ares condicionados na sua maioria, são sistemas de circuito fechado em que o arrefecimento se processa por ciclo de compressão de vapor, onde o gás refrigerante vai absorvendo o calor no evaporador existente no interior, através da passagem de ar forçado por um ventilador aí existente, sendo que esse calor acumulado no gás irá ser libertado para o exterior, através da passagem de ar forçado pelo condensador (Purcell, 2012). A figura 2.7 representa o funcionamento de um sistema de ar condicionado. Na figura 2.8 pode observar-se uma unidade de ar condicionado montada num armário exterior de telecomunicações.

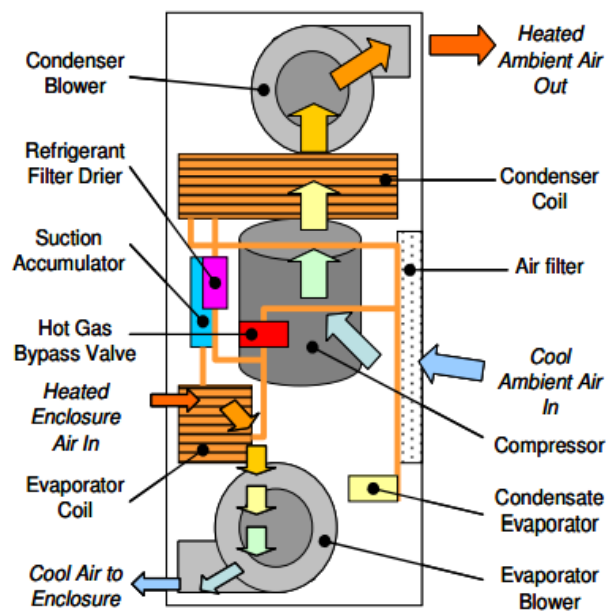


Figura 2.7 - Funcionamento com os diversos componentes e o fluxo de ar, de um sistema de ar condicionado (Purcell, 2012; Li e Alleyne, 2010).



Figura 2.8 - Armário exterior comportando uma unidade externa de ar condicionado (ESTEL, s.d.).

No sentido de diminuir o consumo energético pelos motivos anteriormente mencionados, a implementação de tecnologias que permitem o arrefecimento direto pela passagem de ar (DAC - Direct Air Cooling) tem crescido substancialmente. Estes sistemas caracterizam-se por serem sistemas de circuito aberto, em que o ar proveniente do exterior é utilizado para o arrefecimento dos equipamentos, através da transmissão de calor por convecção forçada, sendo que quanto maior o caudal de ar, maior a capacidade de arrefecimento. O único sistema de consumo de energia são os ventiladores, que forçam a entrada de ar mais fresco do exterior, ao mesmo tempo que o ar quente é retirado para o ambiente. Têm por isso baixos consumos energéticos e um período de manutenção bastante mais alargado que os sistemas de ar condicionado, sendo a manutenção destinada apenas à limpeza ou à substituição dos filtros presentes nas entradas. Apesar destes inconvenientes, este sistema depende fortemente do diferencial de temperaturas existente, pelo que o arrefecimento do ar interior só é possível se a temperatura do ambiente exterior for mais baixa. Além disso, o ruído produzido pelo funcionamento dos ventiladores também é tido como um dos principais inconvenientes (Purcell, 2012). Apesar dos inconvenientes anteriormente referidos, este tipo de sistemas tem-se mostrado como uma alternativa bastante viável aos convencionais sistemas de ar condicionado, sobretudo em regiões onde as condições climáticas são amenas (Lubritto *et al.*, 2011). O armário em estudo na presente dissertação, possui um sistema de arrefecimento por convecção forçada, constituído por dois ventiladores axiais. A figura 2.9 representa o funcionamento deste tipo de sistemas.

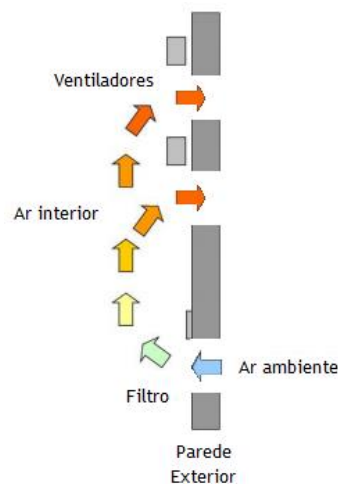


Figura 2.9 - Funcionamento de um sistema de arrefecimento por convecção forçada (recurso a ventiladores) (Purcell, 2012).

Além destes dois sistemas de arrefecimento ativo, os módulos termoelétricos também são uma solução que permite o arrefecimento do ar interior dos armários exteriores. Estes funcionam com base no Efeito Peltier, em que uma corrente elétrica ao percorrer dois materiais semicondutores

ou condutores distintos num circuito fechado, produz um gradiente de temperatura. Podem assim ser utilizados para o arrefecimento ou o aquecimento mediante o sentido da corrente elétrica, sendo a energia térmica dissipada ou absorvida diretamente proporcional à intensidade da corrente elétrica (Véras, 2014; Lineykin e Ben-Yaakov, 2007). Na equação (5) encontra-se a formulação matemática da taxa de calor transferido pelo módulo termoelétrico com base no Efeito Peltier, onde π representa o coeficiente de Peltier e I representa a intensidade de corrente elétrica.

$$q_p = \pi \cdot I \quad (5)$$

Apesar de ser necessária a passagem de corrente elétrica, o custo energético associado ao funcionamento destes sistemas é inferior ao do ar condicionado, possuindo também um intervalo de manutenção bastante mais alargado e uma maior fiabilidade. Contudo, o custo de aquisição e de implementação é elevado e a performance do sistema é maior para situações de baixos incrementos de temperatura, tendo o sistema de ser aplicado na envolvente do armário (Purcell, 2012). Na figura 2.10 encontra-se representado o funcionamento de um módulo termoelétrico para o arrefecimento.

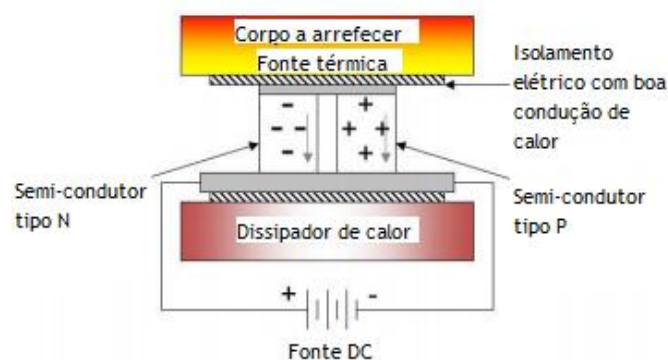


Figura 2.10 - Módulo termoelétrico para o arrefecimento de uma fonte quente (Purcell, 2012).

Os métodos passivos, na sua maioria, por não possuírem sistemas mecanizados para a movimentação dos fluidos (líquidos ou gases), baseiam-se na transferência de calor por radiação e convecção natural. Nesta última, o movimento dos fluidos é causado pelas variações de massa volumica a partir das variações de temperatura, transferindo no caso dos armários, o calor das superfícies “quentes” para o ambiente em redor. Para que o arrefecimento possa ocorrer através de métodos exclusivamente passivos, é necessário que a temperatura exterior seja inferior à

temperatura no interior do armário (com exceção dos sistemas geotérmicos), sendo que estes sistemas são geralmente aplicados em climas mais frios. Além da radiação e da convecção natural, também a mudança de fase de um dado elemento constitui um método passivo, sendo que tanto a liquidificação como a evaporação necessitam de calor, podendo arrefecer os armários exteriores de telecomunicações. Como exemplos de sistemas de arrefecimento passivos têm-se, os materiais de mudança de fase (PCMs), os termosifões bifásicos de circuito fechado, as tubulações de calor, os permutadores de calor por convecção natural (como alguns permutadores geotérmicos), as superfícies alhetadas, entre outros (Shende e Mahalle, 2013; Samba, 2013).

Os materiais de mudança de fase (PCMs) têm sido alvo de uma forte investigação no que respeita ao arrefecimento de equipamentos eletrónicos. No caso da aplicabilidade destes materiais em instalações exteriores de telecomunicações, a investigação tem incidido fundamentalmente no arrefecimento dos *shelters*, podendo igualmente aplicar-se aos armários exteriores. Os PCMs são materiais com características específicas, conhecidos como unidades de armazenamento de calor latente ou sensível, pois permitem armazenar quantidades consideráveis de energia térmica sob a forma latente ou sensível, através da mudança de fase sólido/líquido ou líquido/sólido (figura 2.11). Deste modo, quando a temperatura exterior for inferior à temperatura de solidificação do material e à temperatura interior da instalação, este armazena essa energia sob a forma de calor sensível ou latente, através da mudança de fase líquido/sólido. Quando a temperatura é superior, os PCMs absorvem a energia térmica dissipada pelos equipamentos, provocando a mudança de fase inversa (sólido/líquido) e arrefecendo o ar interior. Este sistema permite assim o arrefecimento sem consumo de energia, mas encontra-se diretamente dependente da temperatura exterior e do gradiente térmico, nomeadamente no período noturno para o arrefecimento do ar interior e a solidificação dos PCMs (Sundaram, 2010; Sutterlin, 2015).

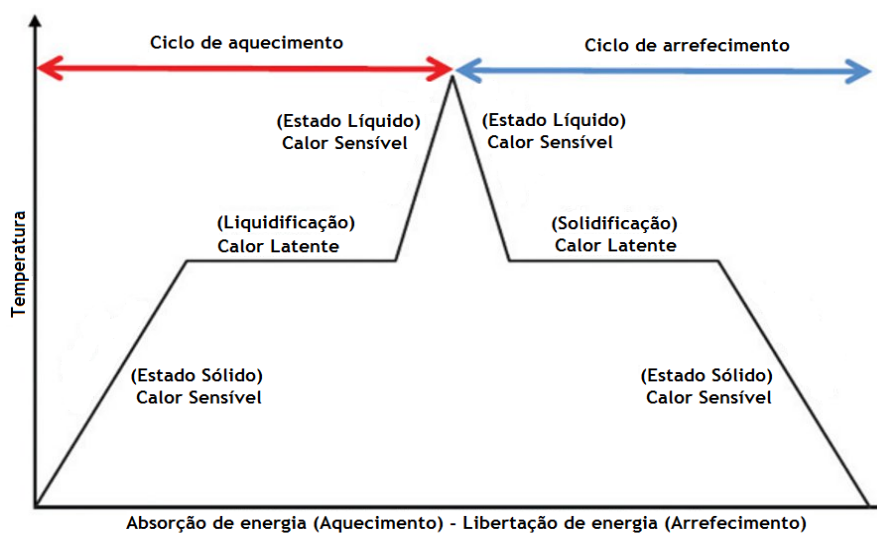


Figura 2.11 - Curva característica do funcionamento dos PCMs (Sutterlin, 2015).

Outro método passivo, podendo também ser utilizado em conjugação com o sistema anterior (Sundaram, 2010), são os termossifões, nomeadamente os termossifões bifásicos de circuito fechado. Nestes últimos, tal como o nome indica, a presença de um circuito fechado possibilita que o fluido circule por convecção natural, à medida que absorve o calor existente no interior e o transmite para o exterior, ocorrendo durante esse processo, a mudança de fase (estado líquido para o estado gasoso e vice-versa) do próprio fluido, aumentando a capacidade de arrefecimento do sistema. O fluido circulante passa para o estado gasoso no evaporador existente no interior do armário, através da absorção do calor aí existente, deslocando-se no interior do circuito pela variação de massa volúmica com o aumento da temperatura. Posteriormente transmite esse calor absorvido para o exterior no condensador, mudando do estado gasoso para o estado líquido, entrando conseqüentemente mais fresco no armário. A performance térmica do sistema depende também do gradiente térmico entre o interior e o exterior, sendo que quanto maior for esse gradiente, maior será a eficiência do sistema, não consumindo energia elétrica ao longo do seu funcionamento (Samba, 2013). A figura 2.12 representa um termossifão bifásico de circuito fechado aplicado a um armário exterior.

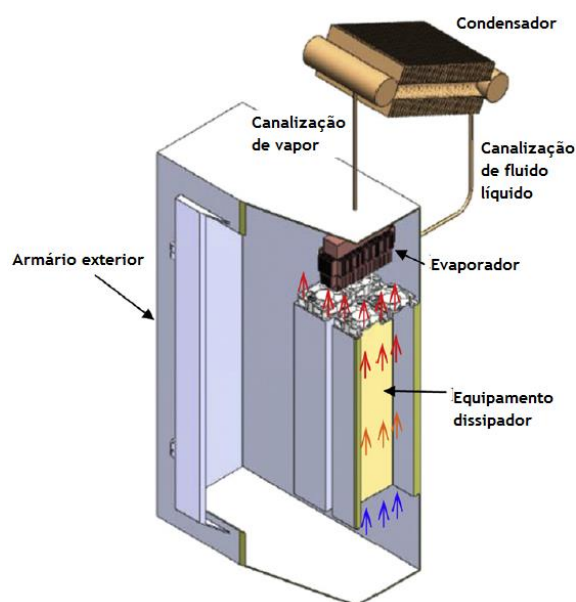


Figura 2.12 - Termossifão bifásico de circuito fechado aplicado a um armário exterior (Samba, 2013).

A potencialidade da inércia térmica do solo a partir de uma determinada profundidade, também se constitui como um método passivo para o arrefecimento do ar interior dos armários de telecomunicações. Com o aumento da profundidade do solo, o valor da temperatura vai-se tornando mais estável, sendo que a uma profundidade de 5 m se mantém praticamente inalterado ao longo de todo o ano (Hong, 2009). No período mais crítico no que respeita às necessidades de arrefecimento (elevadas temperaturas exteriores), o recurso a esta fonte fria permite assim

dissipar o calor produzido no interior do armário, seja através da circulação direta do ar do armário pelo subsolo, seja através da troca de calor com um permutador geotérmico contendo um fluido no interior (gás ou líquido). Apesar da convecção natural ser possível, o recurso a ventiladores ou bombas é uma prática bastante comum, com o intuito de aumentar a eficácia de arrefecimento do sistema, passando a ser um método semi-ativo (Hong, 2009; Yuping, 2008; Dokkar, 2014). A figura 2.13 representa dois sistemas de arrefecimento pelo solo: à esquerda um armário com uma tubulação de calor situada no solo, em que o ar quente do interior do armário é forçado a entrar no subsolo, trocando calor com a envolvente e entrando novamente para o interior, através de um sistema de ventiladores situado na base; à direita um armário com permutador geotérmico onde o fluido circulante é água, sendo que o arrefecimento do ar interior ocorre pelo contacto do ar quente com o permutador geotérmico, através de convecção forçada.

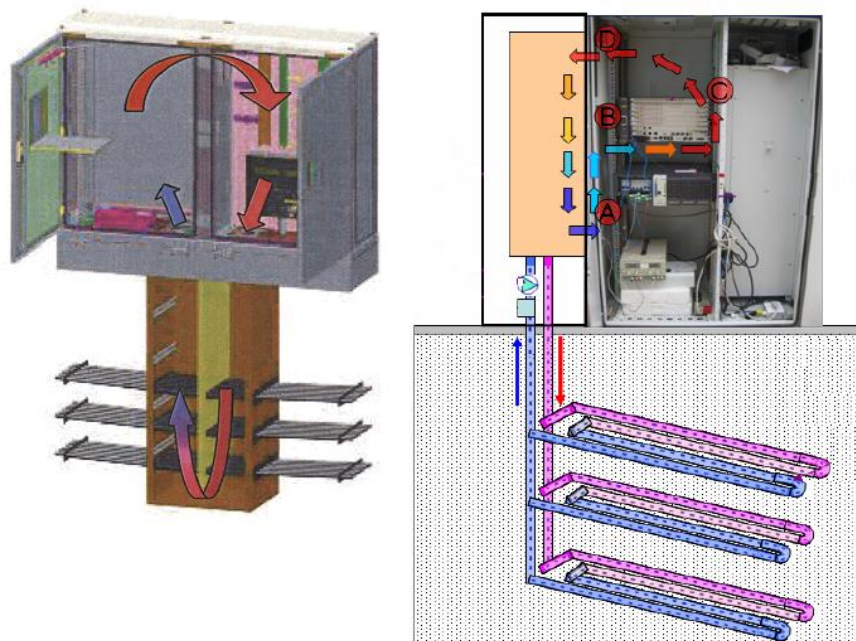


Figura 2.13 - Sistemas de arrefecimento geotérmico, através de permutador ar-solo à esquerda; e água-solo à direita (Yuping, 2008; Hong, 2009).

A tabela 2.1 resume as principais características dos sistemas de arrefecimento anteriormente apresentados, avaliando qualitativamente essas mesmas características, de forma a elucidar quais as principais vantagens e inconvenientes, associadas a cada tecnologia.

Tabela 2.1 - Principais características das tecnologias de arrefecimento anteriormente apresentadas (adaptado de Purcell, 2012).

	Consumo energético	Custo de aquisição	Arrefecimento abaixo da temperatura ambiente	Frequência de manutenção	Potência térmica dissipada admissível	Circuito fechado
Ar condicionado	Elevado	Elevado	Sim	Elevada	Elevada	Sim/Não
DAC (Ventiladores)	Reduzido	Reduzido	Não	Reduzida	Média	Não
Módulos Termoelétricos	Médio	Elevado	Sim	Reduzida	Média / Reduzida	Sim
PCMs	Não	Reduzido	Não	Reduzida	Média / Reduzida	Não
Termossifão bifásico de circuito fechado	Não	Médio	Não	Média	Reduzido	Sim
Permutador Geotérmico	Reduzido (Ventiladores / bomba)	Médio	Sim (temperatura exterior acima da temperatura do solo)	Reduzida	Médio / Reduzido	Sim/Não

Como se pode observar na tabela 2.1 e no capítulo anterior, existe uma crescente tendência para se optar por métodos passivos, de forma a diminuir o consumo energético das EBTs. Contudo, à medida que a potência térmica dissipada pelos equipamentos vai aumentando, estes métodos vão-se tornando insuficientes para extrair por si só, todo o calor gerado no interior dos armários

de telecomunicações, encontrando-se igualmente dependentes das condições climáticas. Desta forma, em muitas situações recorre-se à conjugação entre estes dois métodos, em que os sistemas passivos podem funcionar por um lado, como equipamentos auxiliares dos sistemas de arrefecimento ativos (elevadas cargas térmicas) ou por outro, como sistema de substituição, quando por si só são suficientes para o arrefecimento. Esta conjugação permite a diminuição dos consumos energéticos relativos ao arrefecimento das EBTs e de uma forma mais específica, do consumo dos convencionais sistemas de ar condicionado.

2.4. Nota conclusiva

Foi perceptível que o aumento da temperatura acima dos valores recomendados, pode levar a falhas no funcionamento dos equipamentos de telecomunicações e até a danos nos mesmos, o que poderá levar a acréscimos monetários com despesas de manutenção ou mesmo substituição dos equipamentos. Desta forma, é necessária a utilização de sistemas de arrefecimento que façam um uso eficiente dos processos de transmissão de calor, com o menor consumo energético possível, sendo que a taxa de remoção da energia térmica do interior do armário deve ser superior à totalidade da energia térmica produzida e dos ganhos térmicos provenientes do exterior.

Os métodos ativos no geral, permitem a dissipação de cargas térmicas bastante acentuadas, contudo consomem energia durante o seu funcionamento, sendo que o consumo energético é tanto maior quanto a carga térmica dissipada. Já os métodos passivos não possuem consumo energético associado, mas dependem fortemente de energia térmica dissipada e das próprias condições climáticas. Posto isto, é necessário um consenso entre a capacidade de dissipação térmica do sistema de arrefecimento e o consumo energético associado, optando-se geralmente pela conjugação entre os dois métodos, ou pela utilização de sistemas ativos com baixo consumo de energia.

O recurso a sistemas DAC, nomeadamente os ventiladores axiais, têm-se mostrado promissores. Nestes sistemas, não existindo um controlo sobre as condições ambientais, o caudal varrido pelos ventiladores assume uma importância vital para o controlo da temperatura, sendo que este é condicionado pela configuração interna do armário e dos componentes existentes no seu interior.

O estudo do desempenho térmico do armário é assim um fator crucial, por forma a garantir um controlo eficaz da temperatura interior e garantir a integridade dos equipamentos de telecomunicações, aumentando a sua fiabilidade e garantindo a qualidade do serviço prestado. Para efetuar este tipo de estudos, os ensaios experimentais permitem obter os resultados reais e exatos, do comportamento térmico do armário segundo as condições ambientais impostas, podendo-se prever o comportamento de armários semelhantes nas mesmas condições de

funcionamento. Por outro lado, as ferramentas computacionais, nomeadamente de Dinâmica de Fluidos Computacional, têm vindo a ser cada vez mais adotadas, sendo uma ferramenta rápida e de baixo custo relativamente à experimentação, com a obtenção de resultados bastante próximos da realidade (Ahmadi *et al.*, 2014; Boukhanouf e Haddad, 2010).

3. Componente experimental

3.1. Introdução

Tendo sido apresentada no capítulo anterior, a necessidade de arrefecimento dos equipamentos de telecomunicações situados em armários exteriores, assim como as diversas tecnologias de arrefecimento possíveis, torna-se necessário perceber a forma como esse arrefecimento se processa no caso específico do armário em estudo.

Posto isto, no presente capítulo será ainda feita uma descrição do armário utilizado no estudo, o Armário Base Exterior Versão 2 (ABE_V2) e dos equipamentos de telecomunicações que este comporta, indicando as temperaturas máximas de funcionamento dos mesmos e do próprio armário, mas também uma caracterização do sistema de arrefecimento do mesmo. Posteriormente será efetuada uma descrição do estudo experimental, com a descrição sumária dos equipamentos utilizados, das técnicas experimentais utilizadas e a descrição dos ensaios experimentais realizados.

Os resultados decorrentes dos ensaios experimentais serão apresentados e analisados no capítulo 5, sendo que alguns dos mesmos também servirão não só como fonte de informação necessária para as condições fronteira da modelação computacional, mas também como ferramenta de validação das simulações computacionais efetuadas.

3.2. O armário em estudo

O armário em estudo na presente dissertação é o ABE_V2, comercializado e aplicado pela empresa Viatel. Segundo a empresa, o armário em questão deverá ser capaz de manter a temperatura interior entre os $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ e os $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esta gama de temperaturas será mantida através de convecção natural, para uma potência térmica máxima dissipada de 250 W. Acima desse valor, a convecção forçada através de um sistema de arrefecimento constituído por dois ventiladores situados no topo, permitirá aumentar a potência térmica dissipada até ao limite máximo de temperatura. O armário também permite a instalação de um sistema de ar condicionado, para situações que necessitem de uma taxa de dissipação acrescida.

3.2.1. Características construtivas

O Armário Base Exterior (ABE) começou a sua implementação em 2011 pela empresa Viatel, sendo o armário em estudo uma segunda versão desta tipologia, o ABE_V2. Este é constituído por Aluzinc com uma espessura de 1 mm, uma liga metálica composta por 55% de alumínio com 43,4% de zinco e 1,6% de silicone. A superfície externa da envolvente encontra-se pintada de cor branca, de forma a refletir o máximo da radiação solar incidente e assim diminuir os ganhos térmicos resultantes dessa mesma radiação.

No que respeita à estrutura física do armário, esta pode ser dividida em três partes essenciais, consoante o posicionamento e a função desempenhada. O armário possui assim:

- Um pedestal (chão falso) com 150 mm de altura, possuindo aberturas com tampas removíveis nos quatro lados, permitindo a passagem de cabos para o interior.
- Imediatamente acima encontra-se a estrutura propriamente dita do armário, possuindo uma porta frontal e duas portas laterais removíveis, facilitando o acesso ao espaço útil interior do armário, onde se encontram os equipamentos de telecomunicações. Todas as portas e inclusive a parede posterior, possuem parede dupla com uma caixa de ar de 20 mm de espessura, estabelecendo a ligação entre o ar exterior e interior do armário. Na superfície exterior destas, existem ranhuras na região do fundo e do topo, sendo ligeiramente inclinadas para evitar a entrada de chuva enquanto permitem a entrada e circulação do ar, removendo o ar quente por convecção natural e atenuando os ganhos térmicos. Na base da superfície interior das paredes duplas das portas (laterais e frontal), existem aberturas com filtros de ar, o que possibilita a entrada de ar “limpo” para o espaço interior, com o intuito de arrefecer os equipamentos, seja por convecção forçada (por ação dos ventiladores) ou por convecção natural.
- Por fim o armário possui um cabeçote, onde no interior se encontram os dois ventiladores numa posição central, fazendo a ligação entre o espaço interior do armário e o cabeçote. Por sua vez, em ambas as extremidades inferiores do cabeçote existem orifícios para permitir a saída do ar, sem que ocorra a entrada de agentes ambientais prejudiciais, como é o caso da chuva.

Na figura 3.1 encontra-se uma vista explodida do armário (a), onde se observam as três partes principais; e uma imagem que demonstra o armário em estudo (b). A figura 3.2 apresenta uma das portas laterais amovíveis, com destaque para as ranhuras exteriores e para a abertura da caixa-de-ar interior com o respetivo filtro de ar.

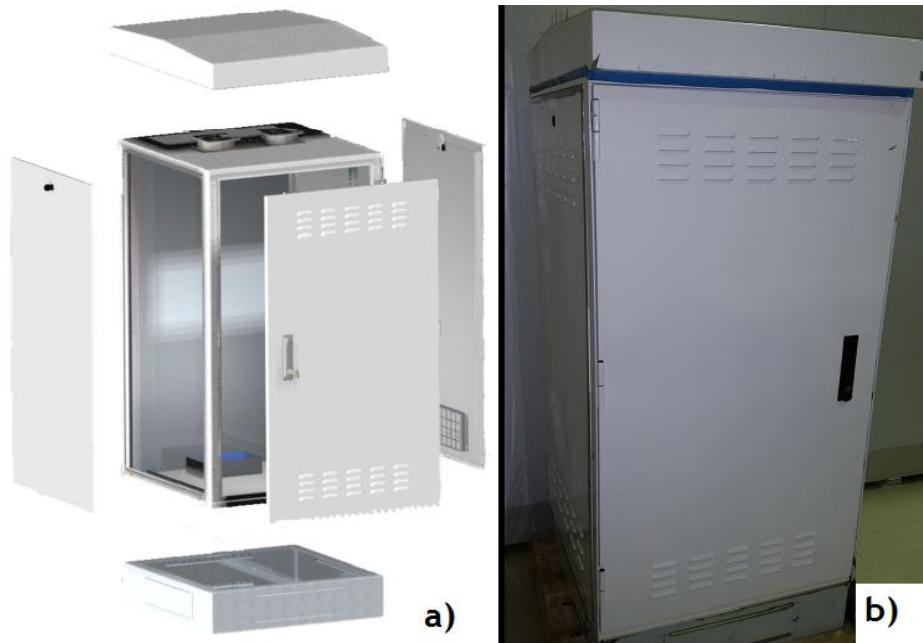


Figura 3.1 - Vista explodida do armário (a); e imagem do armário em estudo presente no laboratório (b).



Figura 3.2 - Porta lateral amovível, com destaque para as ranhuras exteriores e a abertura da caixa de ar interior com o respetivo filtro de ar.

No que respeita às dimensões exteriores do armário, este apresenta uma altura total de 1480 mm, largura de 638 mm e profundidade de 644 mm. Quanto ao espaço útil interior, a unidade de medida padrão utilizada para a indicação da altura por parte do sector das telecomunicações, é a unidade de rack, onde 1U = 44.45 mm. Esta unidade serve para indicar a altura disponível para a instalação de equipamentos com base na rack (régua de fixação dos equipamentos), pois também a altura destes é definida tendo como referência este sistema de medida, sendo igualmente estandardizada uma medida padrão de 19" (482.6 mm) para a largura de instalação dos equipamentos. No caso do armário, o espaço útil interior possui assim uma altura de 25U (1111.25 mm), largura de 19" (482.6 mm) e profundidade de 550 mm (Viatel, s.d).

3.2.2. Equipamentos de telecomunicações no interior

Os equipamentos de telecomunicações instalados no interior dos armários, são da inteira responsabilidade e preferência pelo tipo de serviço, das empresas concessionárias das EBTs, havendo, porém, uma gama de equipamentos típica para a prestação de serviços de comunicações móveis. Apesar da livre escolha sobre os equipamentos de telecomunicações utilizados, os armários exteriores já possuem equipamentos e componentes eletrónicos básicos no seu interior. No caso do armário em estudo, este possui os seguintes componentes de origem (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 - Principais componentes base, incorporados no armário.

ITEM	Quantidade (Un.)
Quadro Elétrico AC	1
Quadro Elétrico DC	1
Roxtec CF10/17	2
Microswitch (alarme de porta aberta)	1
Relé de deteção de tensão baixa (AC)	1
Régua 6 tomadas	1
Limitador de potência	1
Termostato de alarme de temperatura alta	1
Ventiladores 48 VDC (170 m3/h)	2

O armário possui dois quadros elétricos distintos, um de corrente alternada (AC) e um de corrente contínua (DC), pois nem todos os equipamentos funcionam com o mesmo tipo de corrente elétrica. Esta separação tem o intuito de proteger e de controlar eficazmente o funcionamento dos diversos equipamentos, sendo que a corrente alternada chega inicialmente ao armário proveniente da rede elétrica. Esta é distribuída pelos equipamentos que funcionam com este tipo de alimentação elétrica, pelo que a restante energia consumida no armário é retificada externamente e distribuída pelo quadro DC, pelos restantes equipamentos, a uma tensão nominal de -48 V. Apesar de haver geração de calor nos quadros elétricos, a magnitude da dissipação térmica é pequena face aos equipamentos de telecomunicações, pelo que foi desprezada no estudo térmico da presente dissertação. A figura 3.3 representa os dois quadros elétricos, estando o quadro AC na posição superior e o quadro DC na posição inferior.



Figura 3.3 - Quadros elétricos, AC no topo e DC na posição inferior.

Como foi mencionado, os equipamentos de telecomunicações necessários à prestação do serviço móvel, são escolhidos pela empresa concessionária da EBT, neste caso a Viatel. Sendo o estudo incidente sobre o comportamento térmico do armário ABE_V2, os equipamentos de telecomunicações habitualmente instalados, irão ser sucintamente descritos nesse sentido.

O principal equipamento dissipador de calor é o BBU3900 da Huawei, com uma taxa máxima de energia térmica dissipada de 295 W. Este equipamento é a unidade de processamento de banda base (BBU - *Base Band Unit*), estabelecendo o contacto entre a EBT e as unidades

remotas de rádio (RRU - *Remote Radio Unit*), através de cabos de fibra ótica, fazendo também o processamento dos sinais e de temporização da EBT. Este equipamento possui 442 mm de largura, 310 mm de profundidade e 86 mm de altura, podendo ser instalado num armário exterior com mais de 2U (caso do presente armário em estudo), sendo com base neste equipamento que será construída uma caixa dissipadora térmica, para a 2ª parte da validação experimental (subsecção 3.3.2). O BBU3900 é alimentado a -48 VDC, permitindo uma temperatura de funcionamento entre os -20 °C e os +50 °C por grandes períodos de tempo e entre os +50 °C e os +55 °C durante pequenos intervalos de tempo, incorporando ventiladores para o seu arrefecimento interno e admitindo uma humidade relativa entre 5% e 95% (Huawei, 2012).

No caso de não ser aplicado o equipamento da Huawei, a empresa recorre ao RBS6601 da Ericsson, tendo exatamente as mesmas funcionalidades, com a diferença na temperatura de funcionamento e na humidade relativa, sendo neste caso de +5 °C a +45 °C e de 5% a 85%, respetivamente (Ericsson, 2010).

O segundo equipamento que mais calor dissipa durante o seu funcionamento, é o EMILO_SNT da antiga PT Inovação (atualmente Altice Labs), com uma potência térmica máxima dissipada de 120 W. Este equipamento tem como função possibilitar a ligação e comunicação entre várias redes, sendo um sistema modular do tipo *Multi-Service Provisioning Platform* (PT, 2006).

O último dos equipamentos é o *Router 7705* da empresa Alcatel-Lucent, tendo como função transmitir os sinais entre a rede móvel e fixa, ou seja, entre a EBT e a central de telecomunicações, permitindo assim a troca de dados. A dissipação térmica deste equipamento de telecomunicações é de 60 W, sendo a mais baixa de todo o conjunto. Da mesma forma que no equipamento da Huawei, também este possui um sistema de arrefecimento interno, constituído por cinco ventiladores que são acionados consoante a temperatura. Este acionamento ocorre, no caso de a temperatura exterior ao equipamento exceder +40 °C, ou no caso da temperatura interior exceder +55 °C. Além da monitorização da temperatura acionar os ventiladores quando estes limites são excedidos, ou os desligar quando a temperatura fica abaixo de +30 °C para a temperatura interna ou +15 °C para a temperatura externa, o *software* de controlo também desliga o próprio equipamento, de forma a evitar que se danifique (como foi referido na secção 2.1), ocorrendo quando a temperatura interna excede +85 °C (Alcatel-Lucent, 2009).

A potência térmica dissipada no conjunto total dos equipamentos é de 475 W, sendo que para um adequado funcionamento dos equipamentos e segundo a norma EN 300 019-1-3 da ETSI, a temperatura interna do armário não deverá exceder +55 °C.

A figura 3.4 apresenta um armário em funcionamento real, comportando os equipamentos anteriormente referidos.



Figura 3.4 - Armário ABE_V2, comportando equipamentos de telecomunicações em funcionamento.

3.2.3. Sistema de arrefecimento do armário

Para um controlo eficaz da temperatura interior do armário, este possui dispositivos que permitem monitorizar a mesma (termostatos) e inclusive enviar um sinal de alarme, caso esta exceda os limites máximos permitidos (+55 °C).

A remoção da energia térmica acumulada no interior, ocorre numa primeira fase através de convecção natural, devendo o armário ser capaz de manter a temperatura abaixo de +50 °C para uma potência térmica dissipada máxima de 250 W. Numa segunda fase e de forma a garantir uma temperatura inferior a +55 °C quando a energia térmica dissipada é superior, um sistema de arrefecimento por convecção forçada é empregue, constituído por dois ventiladores axiais, modelo 4318 da marca EBM PAPST. Estes funcionam num regime ON/OFF, dependendo da temperatura indicada pelo respetivo sensor existente na região superior do armário, sendo a temperatura escolhida pela empresa concessionária do armário

exterior, que no caso do armário em estudo é de +35 °C. A tabela 3.2 apresenta as principais características dos ventiladores.

Tabela 3.2 - Características dos ventiladores 4318 da ebm-papst (ebm-papst, 2006).

Característica	Valor
Caudal nominal [m ³ /h]	170
Tensão nominal [V]	48
Potência consumida [W]	5,1
Ruído [dB]	45
Temperatura máxima ambiente [°C]	75

Durante o funcionamento dos ventiladores, o ar quente existente no interior do armário é forçado a sair do mesmo através dos orifícios existentes em cada extremidade do cabeçote, através da ação dos ventiladores que fazem a ligação entre o espaço interior do armário e o cabeçote. Isto cria um gradiente de pressão, que por sua vez força o ar exterior a entrar pelas ranhuras inferiores das paredes laterais e frontal do armário, passando através da caixa-de-ar e sendo posteriormente filtrado antes de entrar para o interior, com a finalidade de arrefecer os equipamentos de telecomunicações.

Quanto maior o caudal de ar varrido e quanto menor for a temperatura exterior face à temperatura interior do armário, maior será a quantidade de calor extraído do mesmo. Apesar do caudal nominal de cada ventilador ser de 170 m³/h, o caudal real extraído por ambos os ventiladores é inferior. Isto deve-se à existência de diversos obstáculos e constrangimentos no interior do armário, à passagem do ar pelo interior dos equipamentos de telecomunicações, assim como os próprios orifícios de saída no cabeçote, as ranhuras das portas laterais, as aberturas das caixas-de-ar e os filtros de ar que vão acumulando sujidade, o que leva à existência de perdas de carga com a conseqüente diminuição do caudal de ar. Na figura 3.5 encontra-se representada a curva característica do caudal varrido por cada ventilador em função da queda de pressão.

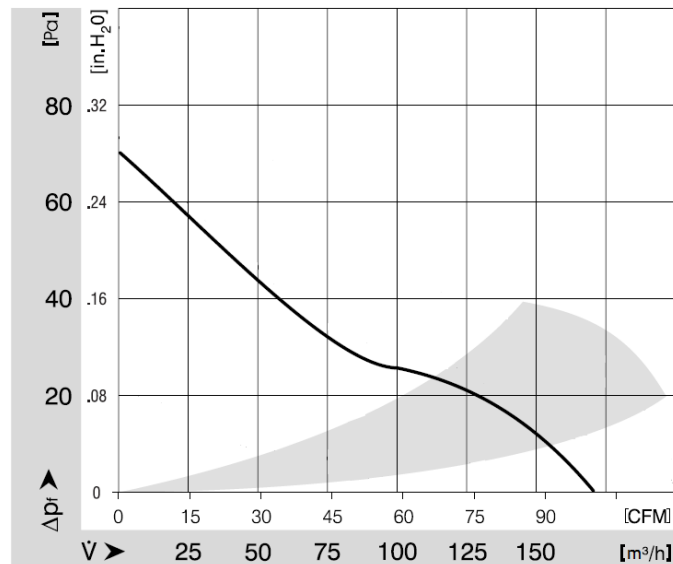


Figura 3.5 - Curva característica do ventilador, com o caudal fornecido (\dot{V}) em função da queda de pressão (Δp) (ebm-papst, 2006).

3.3. Estudo experimental

O objetivo do estudo experimental efetuado, assenta numa primeira fase, na caracterização do escoamento no interior do armário, através da monitorização das grandezas físicas presentes no mesmo, como é o caso da velocidade. Os resultados provenientes desta fase serão posteriormente utilizados na modelação numérica e para a validação das respetivas simulações. Numa fase posterior, o estudo experimental tem como objetivo verificar a capacidade de remoção térmica do calor dissipado no interior do armário, através da monitorização da temperatura em diversos pontos localizados no seu interior.

3.3.1. Técnicas experimentais e equipamentos

De forma a caracterizar o escoamento no interior do armário, diversas técnicas experimentais e os respetivos equipamentos foram utilizados, consoante a grandeza a medir ou a observar. A escolha das diversas técnicas experimentais e dos respetivos equipamentos associados, foi realizada tendo em consideração a facilitação das medições e a ordem de grandeza dos valores dos parâmetros físicos em estudo. Além disso, a localização dos diversos pontos de medição teve em conta uma distribuição uniforme pelo interior do armário e as respetivas restrições geométricas aí presentes.

Anemometria de fio quente

Esta técnica foi utilizada na fase inicial e de monitorização térmica do estudo experimental, para a medição da velocidade em diversos pontos situados no interior do armário, nas três entradas de ar do mesmo e na saída da campânula, cuja respetiva construção e procedimento experimental se encontram descritos na subsecção seguinte. O anemómetro utilizado foi o modelo 425 da marca Testo (figura 3.6).



Figura 3.6 - Anemómetro de fio quente, Testo 425.

Este dispositivo permite extrair os valores da temperatura e da velocidade do escoamento do ar, através da monitorização da resistência elétrica do elemento sensível (fio quente e termistor NTC), que varia com a velocidade do escoamento de ar que o atravessa, proveniente da transmissão do calor gerado pelo filamento quente para o ar. Uma das grandes vantagens da utilização deste tipo de anemómetros consiste nas reduzidas dimensões do elemento sensível, não introduzindo perturbações significativas no escoamento (Monteiro, 2015). O equipamento possui um mostrador na parte frontal para a observação dos valores medidos, permitindo obter os valores instantâneos da velocidade e da temperatura, ou o valor médio consoante um intervalo de tempo ou um conjunto de pontos de medição, ambos controlados pelo utilizador. Na tabela 3.3 encontram-se algumas das especificações do anemómetro, dentro das quais se salientam a resolução e a exatidão.

Tabela 3.3 - Principais especificações do anemómetro de fio quente, Testo 425 (Testo, 2005).

Parâmetros a medir:	Velocidade [m/s] e Temperatura [°C / °F]
Gama de medição:	0 ... +20 m/s (-20 ... +70 °C / -4 ... +158 °F)
Resolução:	0.01 m/s / 0.1 °C / 0.1 °F
Exatidão (± 1 dígito):	± 0.03 m/s + 5% do v.m. ± 0.5 °C / ± 0.9 °F (0 ... +60.0 °C / 32 ... +140 °F) ± 0.7 °C / ± 1.3 °F (resto da gama)
Sonda:	Sonda telescópica de velocidade/temperatura (sonda de fio quente) com termistor NTC de temperatura
Intervalo de medição:	2 s
Temperatura de funcionamento:	-20 ... +50 °C / -4 ... +122 °F

Termometria por termopares

Sendo um dos principais objetivos do presente trabalho a caracterização térmica do ar interior do armário, a fim de verificar a capacidade de dissipação do calor existente no seu interior, é necessário efetuar uma análise da evolução da temperatura do ar nessa região.

Para a monitorização experimental da temperatura, foram utilizados termopares tipo T (termoelementos Cobre (100%)/Constantan (Cobre 55% + Níquel 45%)), caracterizados pela sua elevada estabilidade e repetibilidade entre os -200 °C e os +200 °C. A sua gama de temperaturas de utilização é de -270 °C a +400 °C, correspondendo a uma gama de tensões de -6,258 mV a +20,872 mV respetivamente, possuindo uma exatidão de aproximadamente $\pm 0,03$ °C, sendo esta influenciada pela temperatura e pelo equipamento de aquisição de dados (NIST, 2008). No total foram utilizados sete termopares, sendo a sua localização apresentada na descrição do procedimento experimental presente na subsecção seguinte.

Os valores da temperatura provenientes dos termopares, são obtidos através de um sistema de aquisição de dados, o *data logger* TC-08 da *Pico Technology*. Trata-se de um *logger* de medição da temperatura através de termopares, com comunicação ao computador através de USB, sendo também alimentado por este, dispensando assim uma fonte externa de energia. Consiste num sistema de gravação de temperaturas por tempo programável, que possui compensação da junção fria de forma a minimizar os erros de leitura, permitindo a ligação de oito termopares em simultâneo (oito entradas). Na tabela 3.4 poderão constatar-

se as especificações do sistema de aquisição (PicoTech, 2016). Uma imagem do respetivo *data logger* com os termopares conectados encontra-se na figura 3.7.

Tabela 3.4 - Especificações do *data logger tc-08* da *Pico Technology* (PicoTech, 2016).

Resolução:	20 bits (16,25 NFR)
Tipos de termopares:	B,E,J,K,N,R,S,T
Número de canais de entrada:	8
Tensão de entrada:	+/- 70 mV
Gama de temperaturas:	-270 °C a +1820 °C (-270°C a +400 °C para Termopares tipo T)
Tempo de conversão (Taxa de leituras):	100 ms (10 leituras por segundo)
Exatidão (°C):	+/- 0,2% v.m. e +/- 0,5 °C
Condições de funcionamento	
Temperatura:	0 a +50 °C (+20 a +30 °C, para garantir a exatidão mencionada);
Humidade:	5% a 80% HR sem condensação.

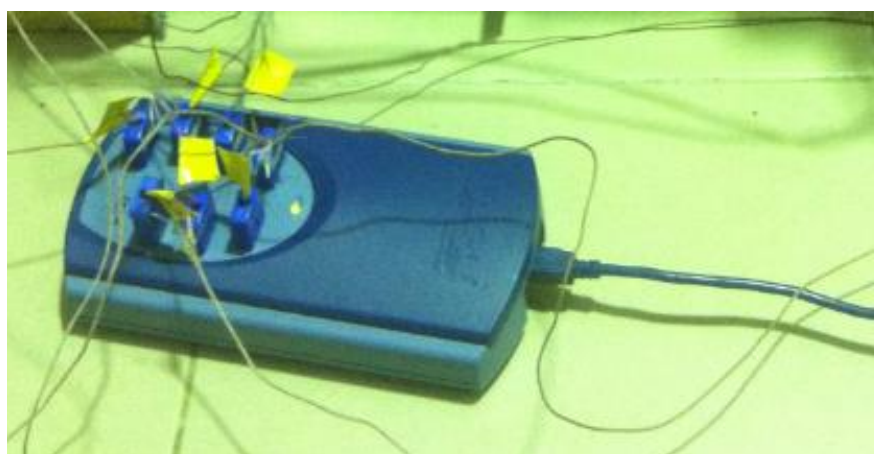


Figura 3.7 - *Data logger tc-08* da *Pico Technology* em funcionamento, com as respetivas ligações dos termopares utilizados.

Este dispositivo é utilizado em conjunto com o *software* de aquisição de dados *PicoLog*, da mesma empresa. Uma vez conectado o *data logger* ao computador, por intermédio de um cabo USB, este programa permite visualizar e gravar os valores da temperatura proveniente dos termopares, sob a forma de tabela ou de gráfico ao longo tempo, sendo os valores registados em intervalos de tempo definidos pelo utilizador (PicoTech, 2016).

Visualização

No sentido de ter uma perceção acerca do desenvolvimento do escoamento no interior do armário, recorreu-se à técnica da visualização do escoamento por injeção de fumo. Para a produção do fumo recorreu-se à queima de incenso, sendo o fumo produzido acumulado no interior de uma caixa de cartão, aberta na sua base para poder alojar o suporte com os paus de incenso. O fumo produzido é acumulado, com o intuito de reunir a quantidade de fumo necessária para uma visualização adequada das linhas de corrente produzidas pelo escoamento. A caixa possui igualmente uma abertura no topo que se encontra bloqueada com um plástico transparente removível. Consoante a quantidade de fumo necessária para a visualização, o plástico pode encontrar-se a bloquear a abertura ou pode estar aberto, servindo neste último caso como elemento direcional do fumo, para a respetiva entrada do armário. Nas figuras 3.8 e 3.9 encontram-se as imagens correspondentes ao sistema de injeção de fumo construído.



Figura 3.8 - Caixa de cartão contendo a base com os paus de incenso no interior, com destaque para as aberturas superior e inferior.



Figura 3.9 - Sistema de injeção de fumo construído, com destaque para a abertura do plástico e consequente orientação para a entrada.

Além da injeção de fumo, recorreu-se também a filamentos de lã como técnica de visualização do escoamento, nas três entradas do armário (figura 3.10(a)) e na saída da campânula (figura 3.10(b)), a fim de visualizar o sentido do escoamento e de forma qualitativa, o nível da turbulência do mesmo.

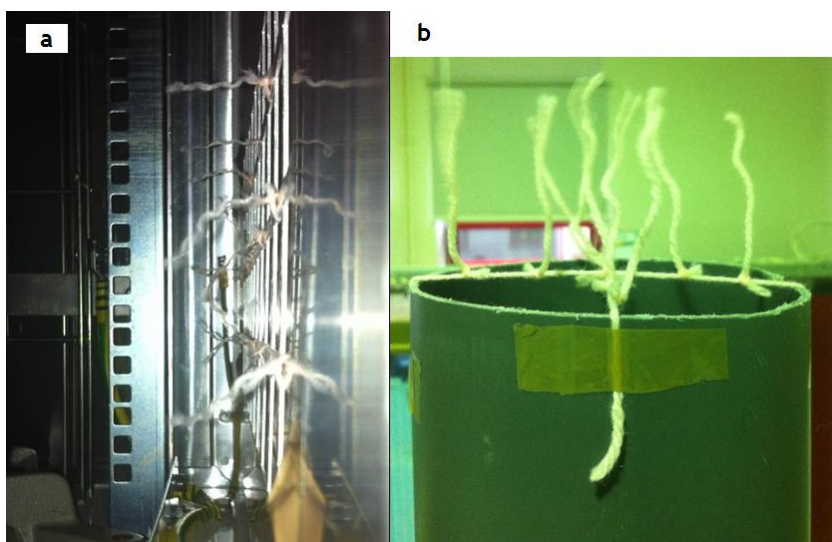


Figura 3.10 - Técnica de visualização através de filamentos de lã: entrada (a); saída da campânula (b).

Equipamento de fornecimento de energia elétrica

O consumo de energia elétrica encontra-se presente tanto no sistema de arrefecimento do armário, como nos próprios equipamentos de telecomunicações (para o seu funcionamento e próprio arrefecimento interno). Não estando o armário ligado à rede elétrica é fundamental fornecer a energia elétrica necessária para o funcionamento dos diversos componentes intervenientes no estudo.

No caso do sistema de arrefecimento do armário, como foi referido anteriormente, este tem uma tensão nominal de funcionamento de -48 VDC, pelo que se utilizou uma fonte de tensão contínua, que consiga fornecer uma tensão equivalente. A fonte de alimentação escolhida foi o modelo MA 4853 da METREL (figura 3.11), alimentada a 230 VAC pela rede elétrica e que fornece tensão alternada ou contínua, até um limite especificado de +46 VDC e 6 A DC/AC^{ef}. Apesar do limite especificado possuir um valor inferior, ao efetuar a medição da tensão de saída real com um multímetro digital descrito abaixo, foi possível verificar um fornecimento de uma tensão máxima de +48 VDC, necessária para as condições nominais de funcionamento dos ventiladores (MERTEL, 2013).



Figura 3.11 - Fonte de alimentação modelo MA 4853 da MERTEL.

No que respeita à alimentação da resistência elétrica de aquecimento, utilizada para simular os componentes dissipadores de calor do equipamento de telecomunicações, foi utilizada uma fonte de tensão alternada variável, com uma tensão máxima de saída de 250 VAC, apresentada na figura 3.12. Desta forma é possível simular várias potências térmicas dissipadas, para o estudo térmico do armário.



Figura 3.12 - Fonte de alimentação AC variável, presente no laboratório.

Quanto aos ventiladores presentes na caixa dissipadora construída, por forma a simular o sistema de arrefecimento interno do equipamento de telecomunicações, estes são alimentados a uma tensão de 24 V, proveniente de uma fonte de alimentação de computador, apresentada na figura 3.13. Foi também instalado um interruptor ON/OFF para controlar o funcionamento dos ventiladores da caixa dissipadora.



Figura 3.13 - Fonte de alimentação de um computador fixo, com interruptor ON/OFF do sistema de ventilação da caixa dissipadora.

Equipamento de medição auxiliar

No sentido de garantir um correto fornecimento energético aos equipamentos referidos anteriormente, foi utilizado um multímetro digital da marca *Fluke* modelo 177 (figura 3.14), para a medição do valor exato da tensão fornecida pelas diversas fontes, assegurando-se assim as condições de funcionamento pretendidas. As especificações mais importantes do multímetro encontram-se apresentada na tabela 3.5.



Figura 3.14 - Multímetro Fluke, modelo 177.

Tabela 3.5 - Principais especificações do multímetro modelo 177 da Fluke (Fluke, 2008).

Tensão máxima suportada:	1000 VDC ou AC RMS
Gama da temperatura de funcionamento:	-10 °C a +50 °C
Exatidão	+/- [(% de leitura) + (contagem)]
Tensão AC:	2,0% + 3
Tensão DC:	0,09% + 2
Corrente AC:	1,5% + 3
Corrente DC:	1,0% + 3

3.3.2. Elementos construídos

Nesta subsecção será descrito o processo de construção do equipamento dissipador de calor, de forma a simular o calor gerado e transferido pelos equipamentos de telecomunicações reais. Inicialmente serão justificadas as dimensões escolhidas para a construção, assim como a potência térmica considerada para o estudo.

Parâmetros de escolha para a construção da caixa dissipadora

Dentro do conjunto dos equipamentos de telecomunicações anteriormente descritos (subsecção 3.2.2.), o equipamento que mais calor dissipa é o *Huawei BBU3900* ou o *Ericsson RBS6601*, com uma potência térmica dissipada máxima de 295 W. A potência térmica máxima proveniente do conjunto total dos equipamentos é de 475 W, contudo, a temperatura máxima admissível é de +55 °C, como já foi referido anteriormente.

Face ao exposto, a construção da caixa dissipadora teve como modelo base de comparação, o equipamento da *Huawei*, cujas dimensões foram referidas anteriormente. Desta forma, as dimensões exteriores escolhidas para a caixa dissipadora foram: 90 mm de altura, 415 mm de largura e 312 mm de profundidade (figura 3.15). As medidas escolhidas para a caixa não são as medidas exatas do equipamento da *Huawei*, mas sim, uma aproximação das mesmas, pois a caixa dissipadora pretende simular, não só o funcionamento deste último equipamento, que possui um sistema de arrefecimento próprio constituído por ventiladores, mas também de alguns equipamentos de telecomunicações cujo arrefecimento se processa por convecção natural (embora não sejam tão comercializados).

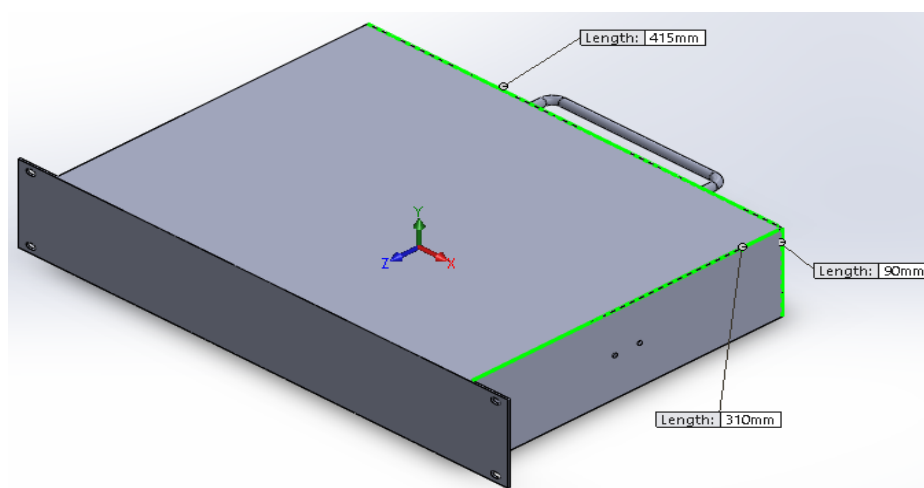


Figura 3.15 - Desenho 3D da caixa com as respetivas dimensões.

No sentido de simular os dois tipos de equipamentos anteriormente mencionados, a perfuração da caixa para a passagem de ar pelo interior da mesma, foi efetuada não só lateralmente (situação presente no equipamento da *Huawei*, em que ambas as superfícies laterais possuem uma grelha de perfuração circular, semelhante ao formato em favo de abelha), mas também no topo e na base (situação presente nos equipamentos arrefecidos por convecção natural, potenciando o varrimento do interior do equipamento). Não existindo informação acerca do tamanho dos orifícios das grelhas, optou-se por uma perfuração de 6 mm de diâmetro, espaçada lateral e verticalmente de 1 cm, existindo um deslocamento lateral de 0,5 cm de uma linha de perfuração relativamente à outra. Para uma melhor compreensão do espaçamento entre os orifícios da perfuração, foi elaborada a esquematização presente na figura 3.16 abaixo.

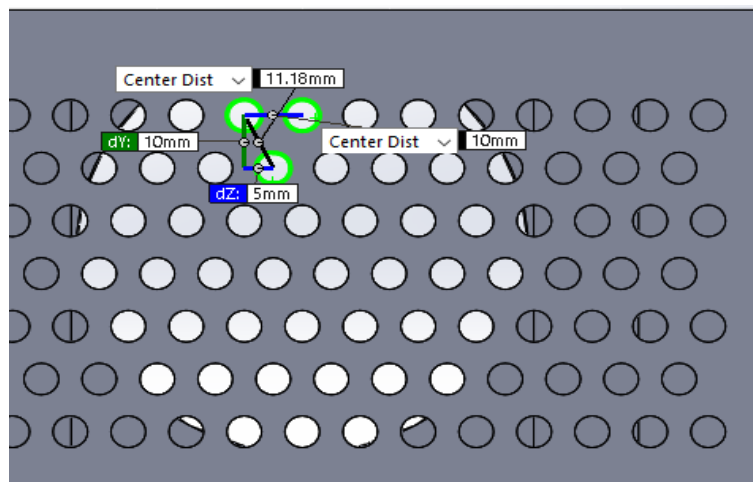


Figura 3.16 - Esquematização do espaçamento existente entre os orifícios da perfuração, efetuada na caixa dissipadora.

Relativamente à perfuração existente no topo, esta situa-se na região mais posterior da caixa, enquanto que a perfuração existente na base se situa na região mais frontal da mesma, levando a que o ar varra o interior e entre em contacto com o elemento dissipador térmico. Quanto à perfuração lateral, foram instalados dois ventiladores axiais de pequenas dimensões na superfície exterior lateral esquerda, sendo neste local que os ventiladores do equipamento da *Huawei* se situam, estabelecendo-se assim um varrimento lateral do ar interior da caixa.

Na figura 3.17 podem observar-se os desenhos 3D para a caixa dissipadora, com a configuração de ventilação forçada: do lado esquerdo, pode observar-se a furação e geometria referente aos ventiladores; e do lado direito, a perfuração para permitir a entrada do ar na caixa, com a furação diferente alusiva ao elemento dissipador no centro.

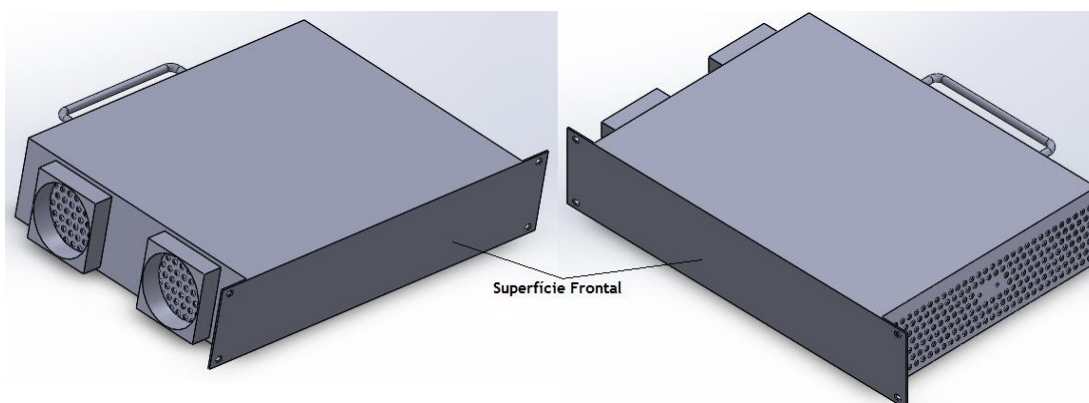


Figura 3.17 - Desenho 3D representativo da caixa dissipadora com configuração de ventilação forçada.

Na figura 3.18 podem observar-se os desenhos 3D para a caixa dissipadora com a configuração de ventilação natural: do lado esquerdo, pode observar-se a furação na região mais posterior do topo; e do lado direito, a perfuração na região mais frontal da base.

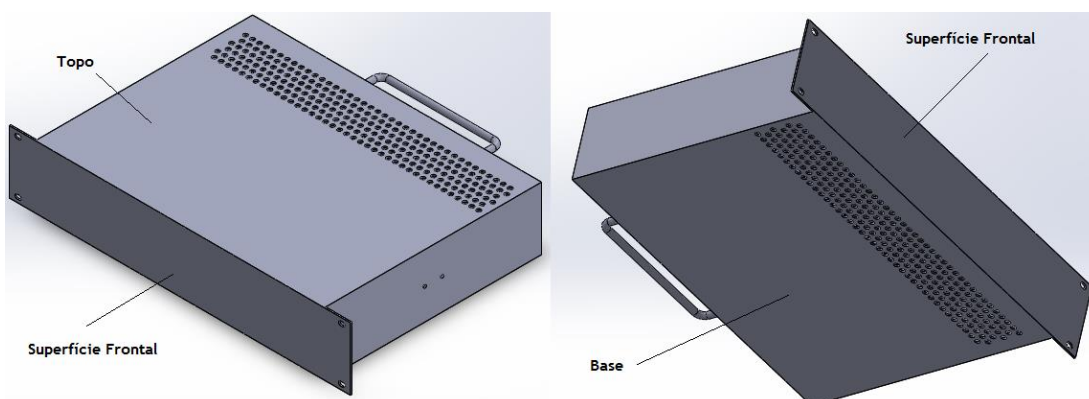


Figura 3.18 - Desenho 3D da caixa com configuração de ventilação natural.

Por fim, quanto ao elemento gerador de calor, por forma a simular a dissipação térmica do equipamento de telecomunicações considerado (295 W para o *BBU3900* da *Huawei*), recorreu-se a uma resistência elétrica de aquecimento (figura 3.19). Esta possui uma resistência elétrica de 50 Ω , pelo que a tensão elétrica a fornecer é dada pela equação (6), considerando-se um rendimento térmico de 1, onde U representa a tensão elétrica fornecida e R representa a resistência elétrica (Silva, 2015).

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (6)$$



Figura 3.19 - Resistência elétrica de aquecimento utilizada como elemento dissipador de calor.

Procedimento de construção

Para a construção da caixa, representativa do equipamento de telecomunicações anteriormente referido, foi utilizada uma chapa de aço de 2 mm de espessura. Foram recortadas três chapas distintas para a construção da caixa, uma para a parte frontal e de fixação à rack, outra para o corpo central da caixa e por fim, uma para a construção de uma tampa posterior removível para o acesso ao interior. As chapas recortadas para o corpo central e a tampa posterior, foram dobradas a fim de dar a forma desejada à caixa, procedendo-se posteriormente à união das várias extremidades e chapas, através da soldadura por arco elétrico MIG-MAG. Adicionalmente soldou-se uma pega metálica à tampa posterior, para permitir a sua colocação e remoção. Na figura 3.20, encontra-se a caixa elaborada ainda sem o processo de furação concretizado.

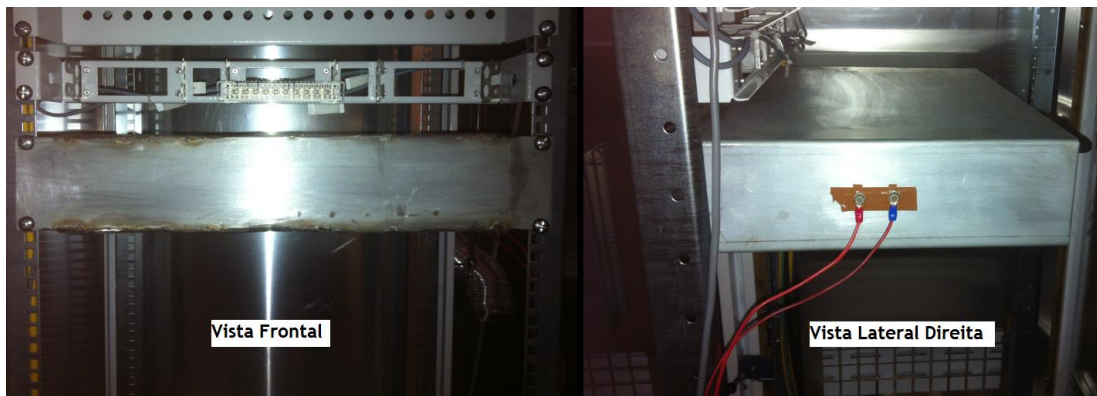


Figura 3.20 - Caixa construída sem furação.

Após a elaboração da estrutura da caixa em si, procedeu-se à marcação dos locais a furar, tanto nas superfícies laterais, como no topo e na base da caixa. Os orifícios foram elaborados com recurso a um berbequim e uma broca para metal HSS constituída por uma liga de cobalto, com diâmetro de 6 mm (M6). Na figura 3.21, pode visualizar-se o processo de furação da caixa.



Figura 3.21 - Realização da perfuração da superfície lateral da caixa.

Procedeu-se seguidamente à fixação de dois ventiladores axiais de pequenas dimensões, no exterior da superfície lateral esquerda. Ambos os ventiladores instalados, possuem a mesma geometria e a mesma potência e tensão de alimentação, para que o caudal varrido pelos mesmos seja idêntico. Foi considerada a divisão simétrica na vertical da superfície lateral esquerda, pelo que os ventiladores foram colocados no centro geométrico dessas divisões, com o intuito de potenciar uma distribuição de caudal igual por cada ventilador. Para a fixação dos mesmos à superfície exterior, utilizou-se fita-cola de alumínio, evitando assim qualquer deslocação posicional dos ventiladores, devido ao aumento da temperatura superficial da caixa, o que poderia ocorrer com a fita adesiva, utilizada no isolamento do armário. Consoante a escolha da configuração de arrefecimento a ensaiar experimentalmente, os orifícios que não correspondam a essa configuração são bloqueados, também com o recurso à fita-cola de alumínio. Nas figuras 3.22 e 3.23, poderá visualizar-se a caixa dissipadora com a configuração de ventilação forçada e de ventilação natural, respetivamente.



Figura 3.22 - Caixa finalizada com a configuração de ventilação forçada.



Figura 3.23 - Caixa finalizada com a configuração de ventilação natural.

No interior da caixa situa-se a resistência eléctrica de aquecimento, de forma a simular a dissipação térmica dos componentes electrónicos do equipamento de telecomunicações. Esta é alimentada externamente à caixa na superfície lateral direita da mesma, pela fonte de tensão alternada descrita acima. A região de contacto entre os terminais da resistência e a caixa foi protegida com fita isoladora (figura 3.24), evitando-se assim contactos eléctricos que provocariam a danificação do fusível de segurança da fonte.

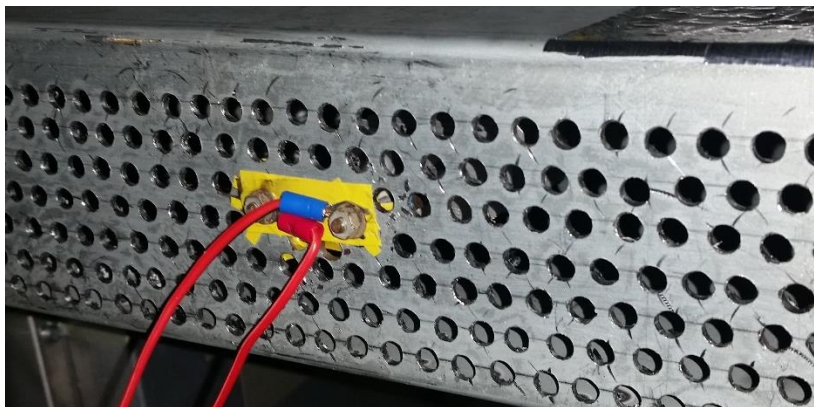


Figura 3.24 - Pormenor do isolamento da região de contacto entre os terminais da resistência e a caixa.

3.3.3. Ensaios Experimentais

Nesta subsecção serão apresentados os ensaios experimentais efetuados, com a conseqüente explicação do procedimento experimental, sendo os resultados obtidos apresentados no capítulo 5, como foi explicitado anteriormente.

Ensaio experimental para a obtenção do valor do caudal médio total de saída do armário

Numa fase inicial do estudo experimental do escoamento do armário, pretendeu-se obter o caudal total de saída proveniente de ambas as aberturas existentes no cabeçote, medindo-se para isso a velocidade do ar à saída, com o anemómetro de fio quente apresentado anteriormente (Testo 425). Contudo, a admissão de ar para o interior do armário não se restringe apenas às aberturas (entradas) anteriormente mencionadas, devido às próprias portas e caixas-de-ar do armário não serem completamente estanques. Posto isto e de forma a minimizar os possíveis erros que seriam introduzidos por estas intrusões, vedaram-se as extremidades das caixas-de-ar com recurso a fita-cola (figura 3.25(a)); a folga existente entre as portas e a estrutura do armário; e por fim, a folga existente entre o cabeçote e a estrutura anterior (figura 3.25(b)).



Figura 3.25 - Vedação das folgas existentes nas extremidades das caixas de ar (a) e da própria estrutura exterior do armário (b).

Para facilitar a medição e a extração do valor da velocidade do ar à saída, optou-se por construir uma estrutura de confinamento do escoamento, uma espécie de campânula, através da colocação de um plástico em todo o redor da parte superior do armário, de forma a recolher todo o ar de ambas as saídas do chapéu. Este ar é posteriormente confinado para um tubo circular (diâmetro da secção interior, $d = 0,105$ m) situado no topo da campânula, com área de secção circular interna superior à área conjunta das ranhuras de saída do chapéu, no sentido de evitar quaisquer perdas de carga adicionais ao próprio escoamento. O tubo possui um comprimento considerável, para que o escoamento possa estabilizar ao percorrer o mesmo, permitindo medições estáveis da velocidade. De forma semelhante ao processo anterior e para garantir a estanqueidade da saída de ar, fixou-se a extremidade do

plástico ao armário e isolou-se o mesmo com fita-cola, assim como a abertura de comunicação com o tubo. Por sua vez, este último foi fixado a uma estrutura de suporte de cabos existente no laboratório, numa posição central relativamente ao armário e nivelado verticalmente, no sentido de obter medições com o menor erro possível. Na figura 3.26, encontra-se uma imagem do armário com a campânula construída no topo.



Figura 3.26 - Armário com a campânula localizada do topo da estrutura do armário.

As medições foram efetuadas em dois planos diferentes (xy e yz) e em sentidos opostos em cada plano (positivo e negativo), cuja origem do referencial se encontra localizada no centro do armário (figura 3.29 situada mais abaixo). Além disso, por forma a obter um conjunto significativo de valores, foram efetuadas onze medições em cada sentido, uma no ponto central de secção interior da tubagem e as restantes dez, espaçadas de 1 em 1 cm a partir das extremidades da mesma. Para a medição dos respetivos valores da velocidade em cada ponto, visto que estes possuíam algumas oscilações decorrentes do comportamento do escoamento, efetuou-se uma leitura contínua ao longo do período de 1 minuto, obtendo-se o valor médio da velocidade diretamente no anemómetro, referente a esse período. A figura 3.27 possui uma representação esquemática dos pontos de medição.

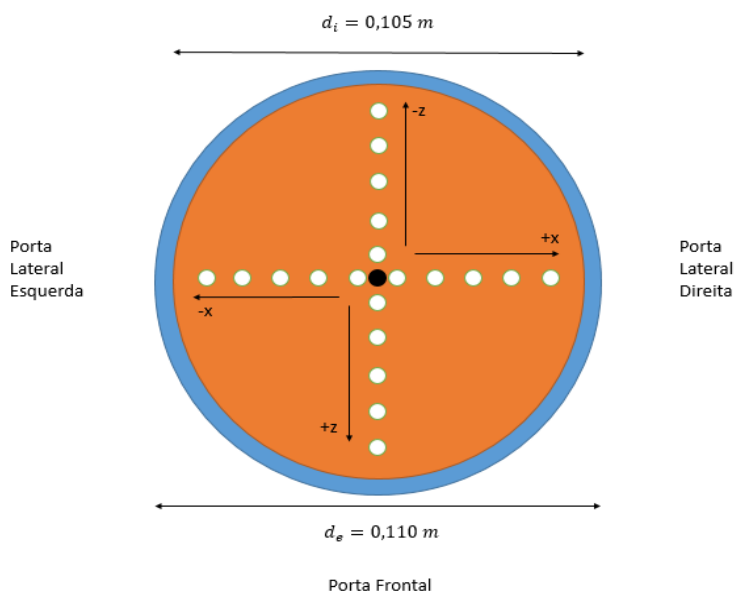


Figura 3.27 - Representação esquemática dos pontos de medição de velocidade à saída da tubulação da campânula.

A partir dos valores medidos, efetuou-se uma média da velocidade total, que serviu para calcular o valor do caudal volúmico total de saída do armário, através da seguinte formulação matemática (equação (7)), onde \dot{Q} representa o caudal volúmico, V_m representa a velocidade média e A representa a área da secção interna da tubagem.

$$\dot{Q} = V_m \times A \quad (7)$$

As medições foram concretizadas para diferentes valores de caudal varrido pelos ventiladores, sendo este regulado pela tensão de alimentação dos mesmos, medindo-se os valores de velocidade para 48 V, 44 V, 40 V, 36 V, 30 V e 24 V. Além do caudal volúmico, também foi calculado o caudal mássico, pela equação (8) abaixo, onde \dot{m} representa o caudal mássico, \dot{Q} representa o caudal volúmico e ρ representa a massa volúmica do ar.

$$\dot{m} = \dot{Q} \times \rho \quad (8)$$

Ensaio experimental para a obtenção do valor da velocidade média nas entradas do armário

Numa primeira fase, o caudal total de saída obtido anteriormente, foi dividido pela área de cada uma das três entradas, a fim de se obter um valor simplificado e aproximado da velocidade em cada uma, para introduzir como condição fronteira de velocidade imposta na modelação. Posteriormente, de modo a obter valores mais rigorosos para cada uma das entradas, efetuaram-se novos ensaios experimentais, para a obtenção de valores da velocidade média em cada uma das três entradas. Tendo já obtido as informações relativas ao efeito da evolução do caudal, o ensaio em questão foi realizado a uma tensão de alimentação dos ventiladores fixa de 48 VDC (tensão de alimentação do armário).

Foi retirada a campânula no sentido de não induzir possíveis perdas de carga e utilizou-se o mesmo anemómetro que no caso anterior, pelas suas características anteriormente mencionadas e pela elevada fiabilidade de medição. Pelo facto de as três entradas serem iguais em dimensão, os pontos de medição foram seleccionados no sentido de obter uma influência global da entrada de ar. Considerou-se por isso, uma divisão da entrada em três partes iguais ao longo do seu comprimento, tendo-se dividido cada uma dessas três partes pela metade, situando-se por fim cada ponto na região central das divisões, o que perfaz um total de seis pontos de medição para cada entrada. A figura 3.28 representa a divisão da geometria e a localização dos pontos de medição, para as três entradas.

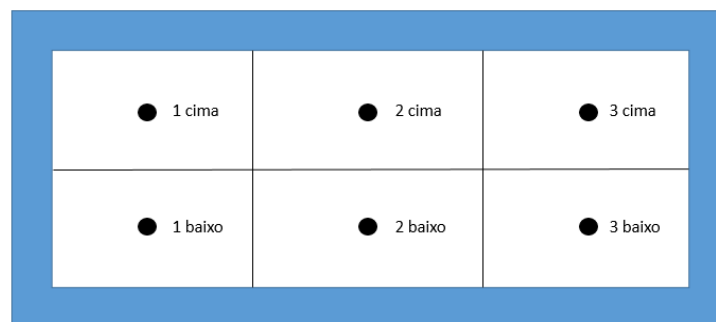


Figura 3.28 - Representação esquemática dos pontos de medição de velocidade das entradas do armário.

Pelo mesmo motivo da oscilação do valor instantâneo das velocidades, também aqui foi efetuada a média da velocidade no período de um minuto, de forma automática através do próprio anemómetro. Para cada ponto foram efetuadas oito medições, totalizando quarenta e oito medições para cada entrada.

Ensaio experimental para a obtenção dos valores da velocidade do escoamento no interior do armário

O ensaio experimental teve em vista a caracterização do regime do escoamento interior, para a escolha do modelo de turbulência na modelação numérica, assim como servir de ferramenta de validação das respetivas simulações computacionais. O procedimento experimental é semelhante ao anterior, tendo também sido efetuado na ausência da campânula, de forma a evitar quaisquer constrangimentos no escoamento interior, indo igualmente ao encontro da geometria elaborada na modelação.

A escolha dos pontos de medição da velocidade no interior do armário, visou a construção de uma “espécie” de malha interna do mesmo, abrangendo a globalidade do escoamento de ar e a influência dos diversos componentes aí situados. Na totalidade foram escolhidos trinta e nove pontos no espaço disponível do interior do armário, sendo que as dimensões deste espaço são: 1220 mm de altura, 598 mm de largura e 595 mm de profundidade. A origem do referencial encontra-se no centro geométrico do mesmo, equidistante de todas as superfícies interiores. Dentro do espaço disponível foram definidos três planos verticais xy , situando-se um no centro ($z=0$ mm) e os restantes dois planos à mesma distância do centro e das superfícies interiores, um na região frontal e outra na região posterior ($z=+148,75$ mm e $z=-148,75$ mm, relativamente ao centro). O mesmo procedimento foi tido em conta para a definição de outros três planos verticais, neste caso planos yz , situando-se também um no centro ($x=0$) e os restantes dois à mesma distância do centro e da superfície interior, um na região esquerda e outro na região direita ($x=+149,5$ mm e $x=-149,5$ mm, relativamente ao centro). Por fim definiram-se cinco planos horizontais xz , de forma a abranger a progressão vertical do escoamento desde as entradas até aos ventiladores. Os planos horizontais xz possuem as seguintes localizações relativamente ao centro: $y=-509$ mm; $y=-245$ mm; $y=+19$ mm; $y=+310$ mm; $y=+490$ mm. Para a definição do primeiro plano horizontal a contar da base do armário ($y=-509$ mm), foi considerado um plano que desde logo abrangesse o efeito das entradas de ar. Os pontos de medição situam-se nos locais de interseção dos vários planos anteriormente definidos, excetuando-se a interseção com o plano vertical xy situado a $z=+148,75$ mm, a partir de uma altura de $y=+100$ mm, relativamente ao centro, pois nessa região localizam-se as caixas que contêm os quadros elétricos AC e DC. A localização dos pontos encontra-se esquematizada na figura 3.29 apresentada de seguida.

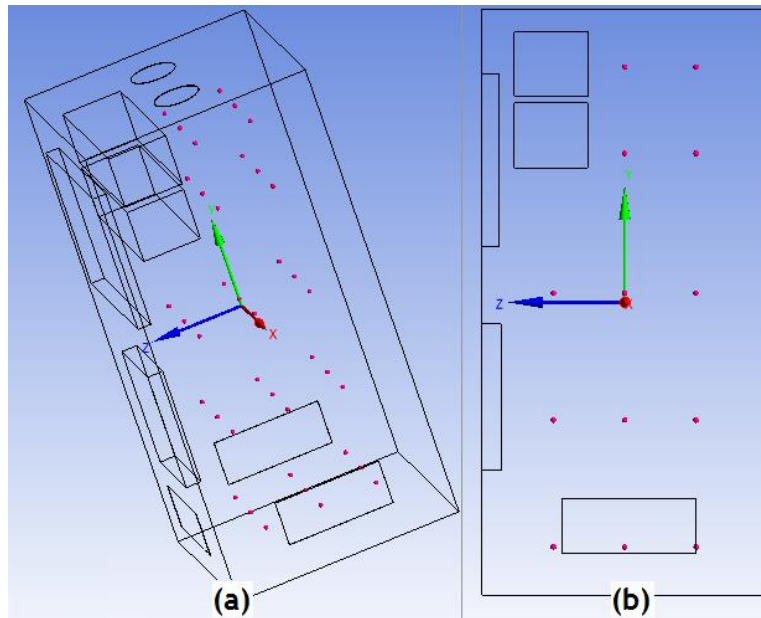


Figura 3.29 - Representação esquemática dos pontos de medição da velocidade no interior do armário: vista em perspetiva (a); e vista segundo o eixo x (b).

Foram realizadas oito medições da velocidade média para cada um dos trinta e nove pontos do interior do armário, ao longo do período de um minuto para cada medição, tendo a sonda do anemómetro sido fixada a um tripé, para que o elemento sensível de medição se mantivesse imóvel na localização exata do ponto a medir, ao longo das oito medições realizadas. O posicionamento da sonda, nomeadamente do elemento sensível de medição, foi efetuado com auxílio de uma fita métrica, garantindo a distância adequadas a todas as superfícies anteriores. As medições foram realizadas a temperatura constante, evitando a variação da massa volúmica do ar.

A unidade controladora do anemómetro localiza-se no exterior do armário, permitindo o controlo do processo de medição, ao mesmo tempo que se garante a estanquidade do armário às intrusões do ar pelas folgas, através da presença da fita-cola nesses locais. O único elemento que comunica com o interior é o cabo de ligação da unidade de controlo com a sonda, através do passa cabos existente na base do armário, também devidamente isolado. Na figura 3.30 pode observar-se o tripé de suporte da sonda, com o cabo de comunicação a passar pelo passa cabos (a), permitindo a monitorização da velocidade pelo exterior e os equipamentos necessários à realização do ensaio, presentes no exterior (b).

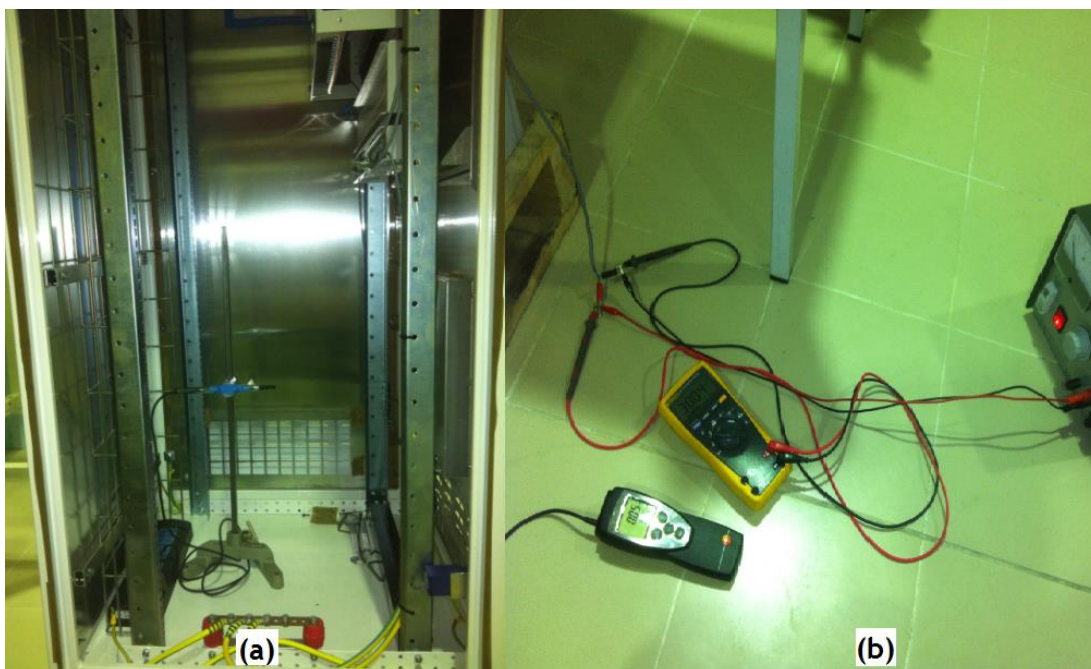


Figura 3.30 - Sonda do anemómetro de fio quente fixada ao tripé de suporte no interior do armário (a); Equipamentos utilizados no ensaio, localizados no exterior (b).

Ensaio para a visualização do escoamento interior

A visualização do escoamento de ar, no interior do armário, foi elaborada com recurso à injeção de fumo através de cada uma das entradas em separado. Para uma correta visualização do percurso do fumo, é necessária a existência de uma iluminação adequada do mesmo com um plano posterior de contraste, geralmente uma superfície escura. Nesse sentido, fixou-se uma cartolina preta em cada uma das superfícies interiores, situadas no lado oposto da entrada utilizada no ensaio de visualização do escoamento.

Para uma adequada visualização e gravação das imagens do percurso do fumo no interior do armário, retirou-se a porta lateral àquela por onde é injetado o fumo, tendo sido substituída por uma placa de acrílico. Isolou-se igualmente a folga existente entre a placa e o armário com recurso a fita-cola, evitando quaisquer entradas de ar adicionais. Esta placa permitiu também a incidência adequada de luz no fumo. O sistema de ventilação do armário foi alimentado a 48 VDC, para cada um dos três ensaios de visualização concretizados.

Para cada uma das três entradas, foram acendidos vários paus de incenso e tapados com a caixa de cartão descrita acima. Atingindo-se a quantidade de fumo necessária, o plástico foi removido e encostado ao armário, inclinando ligeiramente a caixa no sentido da entrada e direcionando a maior quantidade de fumo possível para o interior. Foram registadas imagens

de vídeo para cada uma das três entradas do armário em separado, para análise posterior e comparação com os resultados das simulações computacionais, presente no capítulo 5.

Ensaio da evolução da temperatura interior

O último dos ensaios efetuados destinou-se à monitorização da evolução da temperatura no interior do armário, na presença de um elemento dissipador de calor. Para essa monitorização, foram instalados sete termopares tipo T no interior do mesmo.

A localização específica dos termopares, relativamente ao referencial anteriormente definido (figura 3.29), depende da configuração da caixa dissipadora em estudo, excetuando-se os termopares situados nas posições $(x=0; y=-305 \text{ mm}; z=0)$, $(x=0; y=+90 \text{ mm}; z=+200 \text{ mm})$, $(x=0; y=+280 \text{ mm}; z=0)$, $(x=-59 \text{ mm}; y=+560 \text{ mm}; z=0)$ e $(x=+59 \text{ mm}; y=+560 \text{ mm}; z=0)$. O primeiro dos pontos anteriormente indicados, subsidia a monitorização da temperatura do ar interior antes da entrada na caixa, denominado por “ambiente interior”. O segundo possibilita a monitorização da temperatura da superfície do topo da caixa, designado por “superfície caixa”. Já o terceiro permite a monitorização da temperatura do ar, numa posição intermédia entre a saída da caixa e os ventiladores, intitulado por “superior”. Por fim, os dois últimos fornecem informação sobre a temperatura à entrada de cada ventilador, sendo que aquele que se encontra deslocado para o lado esquerdo relativamente ao centro do armário, recebe o nome de “ventilador armário esquerdo”, enquanto que o outro se denomina por “ventilador armário direito”. Para a fixação dos termopares anteriormente mencionados, utilizaram-se varetas de alumínio, mantendo os termopares nas posições definidas, ao longo de todo o ensaio. A acrescentar, foram colocados pequenos canudos de fita de alumínio na extremidade de cada termopar, por forma a evitar a influência da radiação proveniente da superfície aquecida da caixa, na medição de temperatura por parte dos termopares, excetuando-se aqueles para medição das temperaturas da superfície e do ar à saída, da caixa. Na figura 3.31, encontram-se representados os termopares com os canudos elaborados e as varetas de fixação, na parte superior do armário.

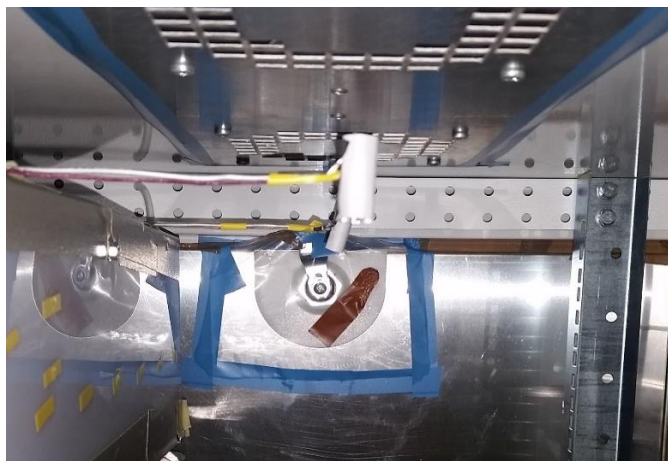


Figura 3.31 - Termopares e varetas de fixação, localizados no topo do armário.

No caso da configuração do arrefecimento da caixa por convecção natural, existe um termopar localizado no centro da perfuração do topo, indicando a temperatura do ar à saída de um dos orifícios da mesma, denominando-se por “ar caixa”. Já na configuração de ventilação forçada, os dois termopares encontram-se localizados à saída de cada um dos ventiladores, monitorizando a temperatura do ar à saída da caixa para este tipo de arrefecimento, denominando-se aquele que se encontra à saída do ventilador mais próximo da região frontal do armário por “ventilador caixa frontal”, enquanto que o outro se designa por “ventilador caixa posterior”. A fixação destes termopares efetuou-se com recurso a fita-cola, na superfície livre da caixa.

Para a monitorização da evolução das temperaturas, utilizou-se o *data logger tc-08* da *Pico Technology* descrito anteriormente. Este foi conectado ao computador portátil, para a alimentação do mesmo e para o registo e gravação dos valores lidos, tendo estes sido registados a cada 5 segundos, de forma a permitir o acompanhamento detalhado da evolução da temperatura. A alimentação dos ventiladores do armário é proveniente da fonte de tensão DC, enquanto que os ventiladores da caixa (quando ensaiada a configuração de ventilação forçada) são alimentados por uma fonte de tensão de 24 VDC (fonte de alimentação de um computador fixo). A tensão aplicada aos terminais da resistência de aquecimento é fornecida pela fonte de tensão alternada. Na figura 3.32, podem observar-se os equipamentos anteriormente referidos, utilizados no ensaio de monitorização da temperatura interior do armário.

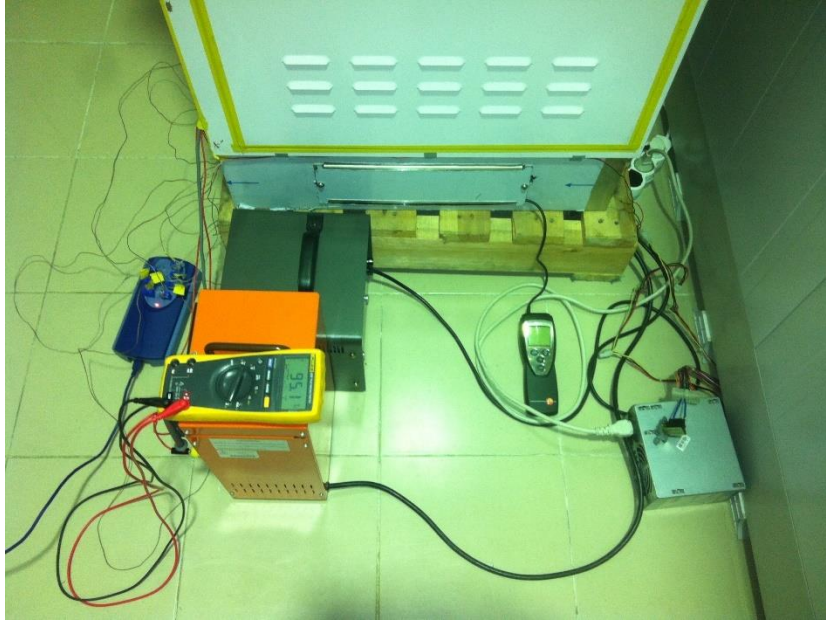


Figura 3.32 - Equipamentos utilizados no ensaio da monitorização da temperatura interior do armário.

Foi ainda escolhido um ponto de monitorização de velocidade, proveniente do ensaio das velocidades interiores, tendo o valor da temperatura e da velocidade sido registado com o anemómetro *Testo 425*, para constatação do efeito da temperatura no escoamento.

No caso da configuração de ventilação natural da caixa, numa fase inicial não foram acionados os ventiladores do armário, nem alimentada a resistência, o que permitiu monitorizar a temperatura ambiente a que o armário se encontra, assim como medir a velocidade de escoamento sem qualquer influência. Seguidamente, alimentou-se a resistência de aquecimento e posteriormente acionaram-se os ventiladores (alimentação de 48 VDC). O valor da tensão aplicada à resistência foi gradualmente aumentado, para a obtenção de uma temperatura do ar à saída da caixa de +55 °C (temperatura máxima admissível do equipamento da *Huawei*), registando-se uma tensão equivalente de 57,6 VAC. No final de todos os ajustes efetuou-se um ensaio com o mesmo procedimento, alimentando-se a resistência com o valor anteriormente mencionado. Neste caso os ventiladores só foram acionados quando a temperatura à saída da caixa atingiu os +40 °C, no sentido de averiguar o efeito da ventilação nas temperaturas medidas. Ainda com os ventiladores acionados, diminui-se o valor da tensão de alimentação, com a finalidade de verificar a influência na temperatura.

Para a configuração de ventilação forçada da caixa, o procedimento foi realizado de forma semelhante ao anterior, tendo a tensão acertada de alimentação da resistência neste caso, sido de 95 VAC. Numa fase inicial do ensaio, foi registado o valor da temperatura ambiente

durante algum tempo, sendo depois alimentada a resistência com a tensão mencionada e com nenhum dos sistemas de ventilação (caixa e armário) em funcionamento, observando-se o aumento da temperatura registada. Atingidos os +40 °C à saída dos ventiladores da caixa, estes foram acionados, com recurso ao botão construído na fonte de alimentação de computador, simulando o acionamento dos ventiladores do equipamento real (*BBU3900* da *Huawei*), a partir desse valor de temperatura. Uma vez atingido o valor de +35 °C no interior do armário, os ventiladores deste foram também acionados, simulando assim o princípio de funcionamento real do sistema de arrefecimento do armário. Registou-se ainda o tempo de arrefecimento, com os sistemas de arrefecimento em funcionamento, mas sem a alimentação da resistência.

4. Modelação computacional do escoamento interior

O capítulo em questão, apresenta de forma abrangente a modelação numérica, mais concretamente o seu contexto e a sua aplicação, mas também as vantagens e as desvantagens inerentes à sua utilização.

É apresentada a ferramenta de dinâmica dos fluidos computacional (DFC), utilizada para a realização deste estudo, o *Fluent* da *Ansys*, no sentido de elucidar as suas principais características e facultades, para o estudo proposto. No decorrer da exposição, explicitam-se igualmente as equações de governo associadas ao programa de DFC utilizado e os vários modelos de turbulência existentes, para o cálculo do escoamento do armário.

O modelo numérico desenvolvido, assim como todos os pormenores considerados relevantes para a sua elaboração e as simplificações efetuadas no estudo em causa, também são apresentados.

Por fim, é efetuada uma validação experimental relativa às simulações do armário, de forma a atestar a veracidade e o comportamento característico do modelo, em função do que ocorre na realidade. Esta validação é necessária para confirmar as simulações e introduzir os ajustes necessários, de modo a melhorar a simulação do comportamento do fluido e aproximá-lo ao comportamento real do mesmo.

4.1. Importância da computação

De acordo com Oliveira (2001), existem diversos processos que podem influenciar direta ou indiretamente a vida humana, sendo que estes podem ocorrer nos próprios organismos, na natureza e ambiente envolvente, ou mesmo nos equipamentos utilizados no quotidiano das pessoas. A compreensão destes processos, nomeadamente através da sua previsão, é de todo o interesse para que possam ser evitadas situações indesejadas e introduzidas possíveis melhorias.

Para que estas previsões possam ser efetuadas e para um maior conhecimento dos fenómenos relacionados com a dinâmica dos fluidos e com a transferência de calor, no caso em específico deste trabalho, pode-se recorrer a métodos experimentais ou teóricos. Contudo, segundo o mesmo autor e Gaspar (2008), apesar da investigação experimental ser

o método mais fiável no que diz respeito a estes fenómenos, esta pode apresentar diversas dificuldades, introduzir erros e aumentar consideravelmente os custos na investigação. No que se refere à investigação teórica, esta faz uso de modelos matemáticos relacionados com os fenómenos em estudo, a partir da resolução de equações diferenciais (equações de governo), podendo fazer uso de métodos analíticos ou numéricos.

Os métodos analíticos, devido à complexidade dos problemas matemáticos associados à maioria dos fenómenos supracitados, tornam-se impossíveis de serem realizados, sendo nestas situações que os métodos numéricos têm um importante contributo, com a “transformação das equações às derivadas parciais em equações algébricas” (Oliveira, 2001). Apesar desta vantagem face ao método anterior, estas equações podem tornar-se segundo Wendt (2009) incrivelmente extensas, tornando a sua resolução “humanamente impossível”. Com o aparecimento do computador digital, este problema deixou de ser um impasse, sendo atualmente a modelação numérica, um dos métodos mais utilizados no projeto e melhoramento de equipamentos e de infraestruturas, apresentando imensas vantagens, das quais se salientam segundo Oliveira (2001) e Zhai et al. (2007), o menor tempo despendido e os custos associados, a estes processos.

4.2. Caracterização da ferramenta computacional

A ferramenta computacional utilizada para a realização do estudo apresentado na dissertação, é o *Fluent* da *Ansys*, sendo uma ferramenta de dinâmica dos fluidos computacional, ou seja, uma ferramenta que utiliza equações de governo na forma de equações diferenciais, por forma a simular o comportamento de fluidos sobre determinadas situações, incluindo transferência de calor e de variações de pressão (Kannan, 2011). Estas equações de governo, segundo Norton e Sun (2006), são formulações matemáticas das leis de conservação da mecânica dos fluidos, mais conhecidas como equações de Navier-Stokes. Aplicadas a um fluido Newtoniano, traduzem a taxa de deformação das propriedades deste, aquando da aplicação de forças externas ao fluido. Deste modo e de acordo com Wendt (2009) e Norton e Sun (2006), as equações de governo, nas quais todas as ferramentas computacionais de dinâmica dos fluidos se baseiam, são: a equação da continuidade ou lei da conservação de massa; equação da conservação da quantidade de movimento ou 2ª lei de Newton; e por fim, a equação da conservação de energia ou 1ª lei da termodinâmica.

De seguida será efetuada uma descrição acerca das equações de governo e apresentadas as respetivas expressões matemáticas.

4.2.1. Equação da continuidade

A equação da continuidade ou lei da conservação de massa, determina que o fluxo de massa que entra num determinado volume de controlo do elemento fluido é igual ao que sai. A equação (9) traduz o que foi mencionado, através da fórmula matemática apresentada abaixo, em que ρ é a massa volúmica, t é o tempo, x é a coordenada cartesiana (neste caso segundo a direção i) e u é o componente da velocidade (neste caso segundo a direção j).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_j) = 0 \quad (9)$$

4.2.2. Equação da conservação da quantidade de movimento

Também conhecida como 2ª Lei de Newton, a equação da quantidade de movimento enuncia que o somatório das forças externas que atuam sobre uma partícula de fluido, é proporcional à taxa de deformação do seu momento linear. Este fenómeno encontra-se representado na equação (10), sendo t o tempo, ρ a massa volúmica, u o componente da velocidade (neste caso segundo a direção i e j), x a coordenada cartesiana (neste caso também segundo i e j), p a pressão, δ o delta de Kroneckor, μ a viscosidade dinâmica e g a aceleração gravítica (neste caso segundo a direção i) (Norton e Sun, 2006).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[-p \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i \quad (10)$$

4.2.3. Equação da conservação de energia

Por sua vez, a equação da conservação de energia também conhecida como a 1ª lei da termodinâmica, declara que o balanço de energia numa partícula de fluido é constante, pelo que a taxa de transferência de energia dessa mesma partícula, é igual ao calor e ao trabalho transferidos para esta. Na equação (11) encontra-se reproduzida a fórmula matemática referente a esta realidade, onde t é o tempo, ρ é a massa volúmica, C_p é o calor específico, T é a temperatura, x é a coordenada cartesiana (neste caso segundo j), u é a componente da velocidade (neste caso também segundo j), K é a condutibilidade térmica e S_T é o termo fonte de geração de calor (Norton e Sun, 2006).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j C_p T) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(K \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = S_T \quad (11)$$

4.2.4. Equação de estado

Existem diversos fatores que podem levar à variação da massa volúmica de um fluido e como tal, no que respeita à dinâmica dos fluidos computacional, existem duas formas distintas de modelar essas mesmas variações.

Uma dessas formas encontra-se relacionada com a equação da quantidade de movimento exposta acima, sendo que a variação de massa volúmica depende desta. Esta aproximação denomina-se por aproximação de Boussinesq e a expressão matemática correspondente encontra-se representada na equação (12), sendo ρ a massa volúmica, ρ_{ref} a massa volúmica de referência, β o coeficiente de expansão térmica, T a temperatura e T_{ref} a temperatura de referência (Norton e Sun, 2006).

$$\rho = \rho_{ref} [1 - \beta(T - T_{ref})] \quad (12)$$

Esta aproximação é bastante utilizada, contudo, começa a perder a sua fiabilidade na presença de elevadas amplitudes térmicas.

Além desta, existe uma segunda forma que considera que a variação de massa volúmica depende, além da constituição do fluido, da temperatura e não da pressão, assumindo-se para isso que o fluido é um gás ideal incompressível. Esta aproximação recorre assim à equação dos gases ideais, representada na equação (13) abaixo, onde ρ é a massa volúmica, p_{ref} é a pressão de referência, W_a é a massa molar do ar, r é a constante dos gases ideais e T é a temperatura (Norton e Sun, 2006).

$$\rho = \frac{p_{ref} W_a}{rT} \quad (13)$$

4.3. Modelos de Turbulência

Os escoamentos podem ocorrer em diferentes regimes consoante o número de Reynolds (Re), sendo que para escoamentos internos de fluidos incompressíveis onde o número de Reynolds

se situa abaixo de 2300, o escoamento ocorre em regime laminar e acima desse valor, o escoamento pode ocorrer em regime turbulento. A grande diferença entre estes dois regimes consiste nas flutuações existentes no próprio escoamento. No regime laminar têm-se camadas de fluido adjacentes, em que o fluido não se mistura entre essas mesmas camadas. Já no regime turbulento, as partículas de fluido possuem trajetórias e velocidades bastante diferentes, intersetando-se e dando-se assim a mistura de fluido, havendo flutuações na velocidade, na quantidade de movimento e na energia acima referidas (ANSYS, 2011b; Mendes, 2000; Oliveira e Lopes, 2010). O número de Reynolds depende de uma série de fatores, os quais são a massa volúmica do fluido (ρ), a velocidade média do escoamento (V_m), o diâmetro hidráulico (D_h) e a viscosidade dinâmica do fluido (μ) (Mendes, 2000). A respetiva fórmula matemática encontra-se apresentada na equação (14).

$$Re = \frac{\rho V_m D_h}{\mu} \quad (14)$$

De acordo com as medições de velocidade do escoamento efetuadas em diversos pontos no interior do armário em estudo, constatou-se que o escoamento ocorre em regime turbulento. Este regime introduz uma complexidade acrescida nos cálculos referentes ao escoamento, pelo que na modelação numérica também foi tido em conta este aspeto. Foram por isso, elaborados os modelos de turbulência de forma a dar resposta a estas questões com relativa precisão, através da introdução de formulações matemáticas, com o intuito de simplificar os aspetos característicos do regime de turbulência. Desta forma, é de todo o interesse que sejam explicitados os diversos modelos de turbulência existentes, para uma melhor compreensão da simulação computacional efetuada no presente estudo, pois não existe um único modelo de turbulência adequado a todas as situações, pelo que deverá existir um consenso entre o tempo de computação, os recursos computacionais disponíveis e a precisão pretendida. Os respetivos modelos numéricos encontram-se disponíveis no *ANSYS FLUENT Theory Guide 14.0* (ANSYS, 2011a).

4.3.1. Modelo de turbulência *Spalart-Allmaras*

É caracterizado por ser o modelo de turbulência que requer menor esforço computacional. Este modelo resolve uma equação diferencial em que a variável de transporte $\tilde{\nu}$, se encontra relacionada com a viscosidade cinemática turbulenta, sendo idêntica a esta última, com exceção das camadas em que a viscosidade tem bastante influência, ou seja, nas zonas perto das paredes. O modelo encontra-se apresentado na formulação matemática presente na

equação (15), onde G_ν corresponde à criação da viscosidade turbulenta, Y_ν corresponde por sua vez à destruição da viscosidade turbulenta nas regiões próximas das paredes, ν corresponde à viscosidade cinemática, $\sigma_{\tilde{\nu}}$ e C_{b2} são as constantes e, $S_{\tilde{\nu}}$ é o termo fonte definido pelo utilizador (ANSYS, 2011a).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\tilde{\nu}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\tilde{\nu}u_i) = G_\nu + \frac{1}{\sigma_{\tilde{\nu}}} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\mu + \rho\tilde{\nu}) \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right\} + C_{b2}\rho \left(\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right)^2 \right] - Y_\nu + S_{\tilde{\nu}} \quad (15)$$

Por sua vez, a viscosidade turbulenta provém de,

$$\mu_t = \rho\tilde{\nu}f_{v1} \quad (16)$$

onde

$$f_{v1} = \frac{\chi^3}{\chi^3 + C_{v1}^3}; \quad e \quad \chi = \frac{\tilde{\nu}}{\nu} \quad (17)$$

4.3.2. Modelo de turbulência *Standard k-ε*

O modelo de turbulência *Standard k-ε* é caracterizado por ser um dos modelos de turbulência mais populares e utilizados na área da engenharia, devido à sua robustez, economia e precisão razoável, quando aplicados a uma ampla gama de escoamentos turbulentos. Da mesma forma que os restantes elementos da família *k-ε*, este é um modelo de turbulência que resolve separadamente duas equações de transporte, uma para a energia cinética turbulenta (k) e outra para a sua taxa de dissipação (ϵ). Este modelo é apenas válido para escoamentos totalmente turbulentos. No caso da equação de transporte para k , esta é derivada da equação física exata. Já a equação de transporte para ϵ , é obtida através de modelação, pelo que $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$ e $C_{3\epsilon}$ correspondem às constantes. As formulações matemáticas correspondentes às equações de transporte para k e ϵ encontram-se representadas abaixo, respetivamente nas equações (18) e (19) (ANSYS, 2011a).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho\epsilon - Y_M + S_{\bar{k}} \quad (18)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (19)$$

A viscosidade turbulenta, μ_t , provém da combinação de k e ε , onde C_μ é uma constante (equação (20)).

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (20)$$

4.3.3. Modelo de turbulência k - ε RNG

Este modelo é proveniente do modelo de turbulência *standard* k - ε , sendo semelhante ao mesmo, mas possuindo alguns refinamentos a partir da utilização da teoria do grupo de renormalização. Este modelo torna-se assim mais fiável e preciso para uma gama mais ampla de escoamentos que o anterior, destacando-se o facto de permitir ter presente os efeitos de números de Reynolds mais baixos, entre outras vantagens presentes no *ANSYS FLUENT Theory Guide* 14.0 (ANSYS, 2011a).

No modelo de turbulência k - ε RNG as constantes são diferentes relativamente ao modelo *standard*, sendo também introduzidos novos termos nas equações de transporte apresentadas anteriormente.

4.3.4. Modelo de turbulência *Realizable* k - ε

Este novo modelo de turbulência é distinto do modelo *standard* por duas razões essenciais. Por um lado, detém uma formulação alternativa da viscosidade turbulenta e por outro, porque possui uma equação de transporte para a taxa de dissipação (ε), proveniente de uma equação exata para o transporte da flutuação média da vorticidade. Este modelo vai ao encontro de alguns constrangimentos matemáticos das tensões de Reynolds, permitindo uma melhor aproximação aos fenómenos físicos dos escoamentos turbulentos, diferindo neste aspeto dos dois modelos anteriores (ANSYS, 2011a).

Neste modelo, em relação ao modelo *standard*, a equação de transporte para a energia cinética turbulenta (k) mantém-se praticamente idêntica, já a equação de transporte para a taxa de dissipação (ε) difere ligeiramente, no que diz respeito aos termos de produção e difusão. O termo C_μ também difere dos dois modelos anteriores, sendo agora obtido computacionalmente a partir da equação (21).

$$C_{\mu} = \frac{1}{A_0 + A_S \frac{kU^*}{\varepsilon}} \quad (21)$$

4.3.5. Modelo de turbulência *Standard k- ω*

Este modelo difere do modelo *k- ε* , pois inclui modificações para os efeitos de baixos números de Reynolds, de compressibilidade e tem em conta as tensões de corte no escoamento. É um modelo empírico baseado nas equações de transporte para a energia cinética turbulenta (*k*) (de forma semelhante aos modelos *k- ε*) e agora no caso deste modelo, da taxa de dissipação específica (ω), podendo ser considerada como a razão de ε em relação a *k*. As formulações matemáticas correspondentes às equações de transporte para *k* e ω encontram-se representadas abaixo, respetivamente nas equações (22) e (23), onde G_k corresponde à geração da energia cinética turbulenta, G_{ω} representa a geração de ω , Γ_k e Γ_{ω} representam a difusividade de *k* e ω , Y_k e Y_{ω} representam a dissipação de *k* e ω , e S_k e S_{ω} representam os termos fonte definidos pelo utilizador (ANSYS, 2011a).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (22)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_{\omega} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_{\omega} - Y_{\omega} + S_{\omega} \quad (23)$$

Por sua vez a difusividade para *k* e ω , é dada respetivamente pelas equações (24) e (25), onde σ_k e σ_{ω} representam os números de Prandtl turbulentos de *k* e ω e, μ_t é obtido a partir da equação (26).

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (24)$$

$$\Gamma_{\omega} = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega}} \quad (25)$$

$$\mu_t = \alpha^* \frac{\rho k}{\omega} \quad (26)$$

4.3.6. Modelo de turbulência k- ω SST (Shear-Stress Transport)

Este modelo é caracterizado por ser uma conjugação do modelo preciso e robusto *standard k- ω* nas regiões próximas das paredes, com o modelo *standard k- ϵ* nas regiões mais afastadas destas, tendo para isso, este último, de ser convertido numa formulação *k- ω* . Com base nestas modificações, este modelo pode ser aplicado a uma gama mais alargada de escoamentos, com uma precisão e fiabilidade mais acentuadas que o modelo *standard* (ANSYS, 2011a).

As equações de transporte para k e ω mantêm-se praticamente inalteradas. Na primeira, o termo G_k é substituído pelo termo \widetilde{G}_k , também corresponde à geração da energia cinética turbulenta, mas sendo calculado a partir do termo original. Na segunda, é acrescentado o termo D_ω , que representa o termo de difusão múltipla, necessário a conjugar os dois modelos referidos anteriormente. Esta conjugação, assim como a descrição detalhada de todos os modelos aqui referidos, encontra-se explicitada no *ANSYS FLUENT Theory Guide* 14.0 (ANSYS, 2011a).

4.4. Funções de parede

Tal como já foi perceptível ao longo do presente capítulo, a presença de paredes numa modelação computacional influencia claramente um escoamento que ocorra em regime turbulento, como é o caso estudado na presente dissertação. Este aspeto deve-se ao facto de ser nas zonas próximas das paredes que os gradientes são maiores, devido às forças viscosas, sendo estas a principal fonte de turbulência num escoamento. Posto isto, a aplicação deste tipo de funções pode ser vantajosa, na medida que poderá aumentar significativamente a fiabilidade e a precisão das previsões do escoamento, podendo de igual forma reduzir o peso computacional agregado ao processamento da modelação numérica.

A região próxima da parede pode assim ser dividida em três camadas: a camada mais interna, denominada de “*subcamada viscosa*” (escoamento ocorre num regime praticamente laminar); a camada mais externa, designada por “*camada completamente turbulenta*” (o regime turbulento é dominante); e uma camada intermédia entre as duas anteriores, intitulada de “*camada de mistura*” (tem em conta os efeitos viscosos e turbulentos na mesma medida). Estas camadas dependem do parâmetro de distância adimensional à

parede, y^+ , que é dado pela equação (27), onde u_τ representa a velocidade de fricção (ANSYS, 2011a).

$$y^+ = \frac{\rho u_\tau y}{\mu}; \quad u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (27)$$

Existem várias funções de parede possíveis, sendo que umas se encontram mais aplicadas a uns modelos de turbulência que outras, informação essa que se encontra apresentada de forma mais detalhada no *ANSYS FLUENT Theory Guide 14.0* (ANSYS, 2011a). De seguida serão apresentados algumas das funções de parede existentes no *Fluent*.

4.4.1. Funções de parede *Standard*

As funções de parede *standard* são a opção padrão no programa *ANSYS Fluent*. Estas funções produzem bons resultados para uma gama alargada de escoamentos nas camadas limite, mas na presença de gradientes acentuados, ou seja, fora das condições ideais do escoamento, as previsões obtidas tendem a diminuir a sua precisão e fiabilidade. A lei de parede logarítmica para a velocidade média é dada pela equação (28).

$$U^* = \frac{1}{k} \ln(Ey^*) \quad (28)$$

Em que y^* , é a distância adimensional da parede, dada pela equação (29), onde P representa o nó no centro da célula próxima da parede, k_P representa a energia cinética turbulenta no nó P , y_P representa a distância do nó P até à parede e μ representa a viscosidade dinâmica do fluido (ANSYS, 2011a).

$$y^* \equiv \frac{\rho C_\mu^{1/4} k_P^{1/2} y_P}{\mu} \quad (29)$$

4.4.2. Funções de parede *escaláveis*

As funções de parede em questão, evitam o deteriorar das funções de parede *standard*, quando o refinamento se situa abaixo de $y^* < 11$. Têm como função, impor a utilização da lei logarítmica em conjunto com a função *standard*, através de um limite máximo nos cálculos de y^* , como se pode verificar na equação (30). O termo y^* é assim substituído por $y^{\tilde{*}}$ no cálculo de U^* (ANSYS, 2011a).

$$y^{\tilde{*}} = \text{MAX}(y^*, y^*_{\text{limit}}), \text{ onde } y^*_{\text{limit}} = 11.225 \quad (30)$$

4.4.3. Funções de parede de Não-Equilíbrio

As funções de parede de não-equilíbrio, em relação às funções de parede *standard*, diferem uma da outra, pois no novo caso existem duas camadas. Estas camadas são utilizadas no cálculo da energia cinética de turbulência nas regiões da parede, mais concretamente nas células adjacentes à mesma. As camadas repartem-se numa “*subcamada laminar*” e uma “*camada completamente turbulenta*”. A formulação anteriormente apresentada é essencial para o cálculo da equação k nessas regiões (ANSYS, 2011a).

A lei da parede para a temperatura média permanece inalterada face ao modelo *standard*. Já a lei da parede para a velocidade média é influenciada pelos efeitos dos gradientes de pressão, permitindo o cálculo da produção, assim como da dissipação, da energia cinética turbulenta, sendo a lei dada pela equação (31).

$$\frac{\tilde{U} C_{\mu}^{1/4} k^{1/2}}{t_w / \rho} = \frac{1}{k} \ln \left(E \frac{\rho C_{\mu}^{1/4} k_P^{1/2} y}{\mu} \right) \quad (31)$$

Onde,

$$\tilde{U} = U - \frac{1}{2} \frac{dp}{dx} \left[\frac{y_v}{\rho k \sqrt{k}} \ln \left(\frac{y}{y_v} \right) + \frac{y - y_v}{\rho k \sqrt{k}} + \frac{y_v^2}{\mu} \right] \quad e \quad y_v \equiv \frac{\mu y_v^*}{\rho C_{\mu}^{1/4} k_P^{1/2}} \quad (32)$$

Com $y_v^* = 11.225$.

4.4.4. Tratamento Realçado da Parede

O *tratamento realçado da parede*, mais conhecido como *Enhanced Wall Treatment*, constitui-se como um método de modelação que combina um modelo de duas camadas, com funções de parede de maior relevo e precisão.

Este modelo comporta-se de uma forma semelhante ao modelo de duas camadas, se a malha for suficientemente refinada na região próxima às paredes, de forma a resolver a subcamada laminar (1º nó colocado a $y^+=1$). Contudo, uma malha demasiado refinada pode levar a um esforço computacional mais alargado, não sendo por vezes viável no que respeita aos resultados obtidos. Assim, este *tratamento realçado da parede* permite a sua aplicação, tanto para malhas refinadas, como malhas grosseiras (conhecidas como “malhas de funções de parede”) sem uma perda significativa de precisão (ANSYS, 2011a).

4.5. Modelo numérico

No presente subcapítulo encontram-se apresentada a geometria elaborada do armário em estudo, assim como as respetivas malhas computacionais utilizadas nas simulações, os métodos e os modelos numéricos utilizados e por fim, as condições de fronteira impostas na respetiva simulação.

A modelação numérica desenvolvida ao longo da dissertação, consiste na modelação do escoamento no interior do armário, sem qualquer tipo de equipamento de telecomunicações aí presente e sem dissipação de temperatura. O objetivo relaciona-se com o estudo de vários modelos de turbulência aplicados ao escoamento no interior do armário, tendo os modelos implementados sido escolhidos com base no artigo de Zhai *et al.* (2007).

4.5.1. Geometria

A geometria utilizada foi construída no programa *SolidWorks*, tendo sido posteriormente importada para o *software Ansys*, a fim de se proceder à construção da respetiva malha computacional. A elaboração do modelo geométrico relativo ao armário sem equipamentos de telecomunicações no seu interior, visou um compromisso entre o esforço computacional e a aproximação possível à realidade física. Procurou-se assim a construção de uma geometria 3D, representativa do ar existente na parte interior do armário, desprezando as caixas-de-ar das portas (frontal e laterais) e da parede traseira. Além disso, também não foram consideradas quatro estruturas verticais constituintes da *rack* de suporte dos

equipamentos no interior do mesmo, assim como a estrutura de suporte de cabos na parte posterior do armário, por forma a simplificar a geometria e conseqüentemente a construção da malha computacional. Por fim, como o estudo se destina à parte interior do armário onde são instalados os equipamentos de telecomunicações (a *rack*), tanto o pedestal como o cabeçote não foi considerados na geometria 3D.

O modelo geométrico assume um formato paralelepípedo com uma altura de 1220 mm, largura (medida da parte frontal) de 598 mm e comprimento (medida das laterais) de 595 mm. A esse paralelepípedo foram extraídos pequenos blocos, perfazendo espaços vazios, também de forma a simplificar a malha e a diminuir o número de elementos da mesma. Esses espaços em vazio correspondem a dois blocos de disjuntores no interior do armário, assim como um porta papéis e um tabuleiro, situados na porta frontal.

Nas três entradas (*inlets*) foram construídas pequenas saliências de 1 mm de espessura e de forma paralelepípedica, representando as aberturas das caixas-de-ar. É de salientar que as entradas não se encontram posicionadas numa posição central em cada um dos três lados, estando as entradas laterais ligeiramente deslocadas no sentido posterior, com o intuito de compensar a ausência de entrada posterior. No que se refere à entrada frontal, esta encontra-se ligeiramente deslocada para a esquerda, devido ao mecanismo de fecho da porta frontal se situar do lado direito. As duas saídas foram construídas da mesma forma, sendo que neste caso possuem formato circular, com diâmetro correspondente à carcaça exterior dos ventiladores. Na figura 3.1 encontra-se representada uma vista da estrutura do modelo do armário e na figura 3.2 encontra-se uma imagem correspondente à visualização sólida da mesma, com a respetivas medidas do interior.

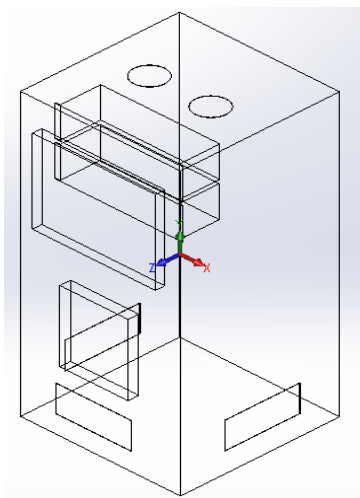


Figura 4.1 - Representação da estrutura do modelo definido para o armário de telecomunicações.

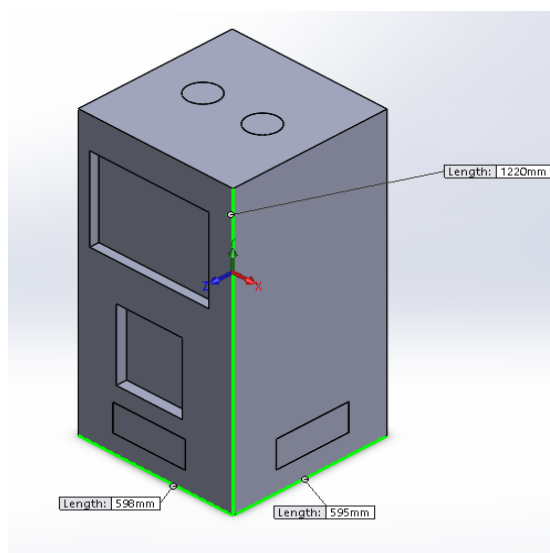


Figura 4.2 - Geometria 3D com as medidas do interior do armário de telecomunicações

4.5.2. Malha computacional

A malha computacional é um dos aspetos que mais influência tem na obtenção da solução numérica. De uma forma geral, a precisão, a estabilidade e a credibilidade dos resultados aumenta com o refinamento da malha computacional. Contudo, ao aumentar o refinamento, aumenta-se também o processamento necessário para o cálculo da solução e consequentemente, o tempo necessário para a obtenção dos resultados. Este acréscimo no esforço computacional deve-se ao facto da malha ser constituída por pequenos volumes de controlo, que dividem a geometria numa quantidade adequada, para que sejam resolvidas as equações anteriormente apresentadas. Posto isto, é de todo o interesse que seja encontrado um consenso, entre a complexidade da malha e o esforço computacional necessário para a obtenção dos resultados.

Existem várias geometrias para a construção de uma malha computacional 3D, sendo estas: os tetraedros (escolha padrão no programa); os hexaedros; as pirâmides; e os prismas. Na construção da malha podem, contudo, surgir volumes de controlo deformados, pelo que se torna essencial a avaliação da qualidade da mesma. A qualidade de uma malha depende fundamentalmente de três parâmetros, sendo eles a *orthogonal quality*, o *aspect ratio* e a *skewness*. No que respeita à *orthogonal quality* para as diferentes células da malha computacional, o seu valor mínimo deve ser superior a 0,01, sendo que o valor médio deverá ser bastante superior, visto que quanto mais próximo do valor 1, melhor será a qualidade das células. Quanto ao *aspect ratio*, este reproduz a razão entre o valor máximo e o valor mínimo, da distância normal entre o centróide da célula e o centróide da face, e entre o

centróide da célula e os nós. Da mesma forma, também no caso do *aspect ratio*, quanto mais próximo do 1 melhor será a qualidade da malha computacional. Por fim, no que concerne à *skewness* da malha, esta representa o desvio geométrico de uma célula em relação ao formato geométrico original da mesma. Deste modo, quanto mais elevado for este valor, pior será a qualidade da malha, sendo que o valor máximo para este parâmetro deverá situar-se abaixo de 0,95, com um valor médio bastante inferior (ANSYS, 2011a).

A malha construída para a modelação computacional teve em conta os fatores acima mencionados, sendo constituída por tetraedros através do método automático para a elaboração da malha existente no programa. Na tabela 3.1 encontram-se os parâmetros estatísticos da malha elaborada. Foi também construída uma malha mais refinada, a fim de se estudar a influência do refinamento na solução numérica. Os respetivos parâmetros estatísticos desta última, encontram-se na tabela 3.2. Por sua vez, na figura 3.3. encontra-se uma representação da malha elaborada (a) e do seu refinamento (b).

Tabela 4.1 - Parâmetros estatísticos da malha computacional

Parâmetros	Valor
Numero de nós:	366 097
Número de elementos	1 967 652
<i>Aspect ratio</i> (médio / máximo):	1,884 / 11,452
<i>Skewness</i> (médio / máximo):	0,246 / 0,899
<i>Orthogonal Quality</i> (médio / máximo):	0,850 / 0,996

Tabela 4.2 - Parâmetros estatísticos da malha computacional (refinada)

Parâmetros	Valor
Numero de nós:	722 907
Número de elementos	4 177 799
<i>Aspect ratio</i> (médio / máximo):	1,869 / 14,948
<i>Skewness</i> (médio / máximo):	0,240 / 0,850
<i>Orthogonal Quality</i> (médio / máximo):	0,854 / 0,997

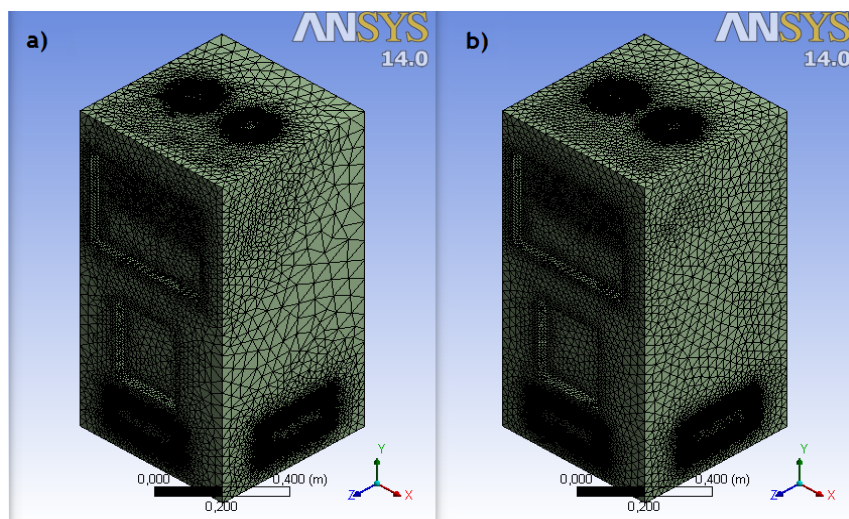


Figura 4.3 - Malha computacional (a); Malha computacional refinada (b)

4.5.3. Modelos de turbulência em estudo

De seguida comparam-se os diversos modelos de turbulência, por forma a verificar a validade e a aplicabilidade desses modelos ao escoamento interno do armário, assim como efetuar os ajustes necessários para a obtenção de resultados, o mais próximos possível dos valores reais. Estes dados poderão posteriormente, servir de ferramenta de análise e de otimização do desempenho térmico do armário, com as inerentes vantagens da utilização de DFC apresentadas na parte inicial do presente capítulo.

Existindo uma vasta gama de modelos de turbulência disponíveis, a escolha sobre os modelos a testar, teve como referência o artigo de Zhai *et al.* (2007). Segundo estes autores, para o estudo do escoamento no interior de espaços delimitados, os parâmetros médios do ar têm maior influência que os parâmetros instantâneos de turbulência, pelo que a utilização de equações médias de *Navier-Stokes* (ou de *Reynolds*), mais conhecidas por equações *RANS* (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*), se torna uma ferramenta vantajosa. Existem diversos modelos que utilizam estas equações, sendo que os mais conhecidos e recorrentes na literatura, são aqueles que foram sucintamente descritos na secção 4.3.

O artigo anteriormente referido faz assim, uma breve análise dos diversos modelos de turbulência existentes, destacando-se os modelos considerados mais adequados à modelação de escoamentos de ar em espaços interiores delimitados. A acrescentar a isto, foram tidos igualmente em conta diversos estudos existentes na literatura ao longo dos anos, embora não existam modelos universalmente preferenciais para este tipo de escoamentos. A figura 4.4 representa a tabela elaborada pelos autores, com os diversos modelos de turbulência existentes e os modelos mais adequados para este tipo de escoamento.

Model Classification		Primary Turbulence Models Used in Indoor-Air Simulations	Prevalent Models Identified	
RANS	EVM	Zero-equation	Zero-equation (Chen and Xu 1998)	Indoor zero-equation
		Two-equation	Standard $k-\varepsilon$ (Launder and Spalding 1974) RNG $k-\varepsilon$ (Yakhot and Orszag 1986) Realizable $k-\varepsilon$ (Shih et al. 1995)	RNG $k-\varepsilon$
			LRN-LS (Launder and Sharma 1974) LRN-JL (Jones and Launder 1973) LRN-LB (Lam and Bremhorst 1981)	LRN-LS
			LRN $k-\omega$ (Wilcox 1994) SST $k-\omega$ (Menter 1994)	SST $k-\omega$
	Multiple-equation	$\nu 2f$ -dav (Davidson et al. 2003) $\nu 2f$ -lau (Laurence et al. 2004)	$\nu 2f$ -dav	
	RSM	RSM-IP (Gibson and Launder 1978) RSM-EASM (Gatski and Speziale 1993)	RSM-IP	
	LES	LES-Sm (Smagorinsky 1963) LES-Dyn (Germano et al. 1991; Lilly 1992) LES-Filter (Zhang and Chen 2000, 2005)	LES-Dyn	
	DES	DES (S-A) (Shur et al. 1999) DES (ASM) (Batten et al. 2002)	DES-SA	

Figura 4.4 - Modelos de turbulência existentes, com destaque para os modelos mais adequados para escoamentos em espaços interiores delimitados (Zhai *et al.*, 2007).

Com base no que foi mencionado, os modelos testados nesta modelação computacional foram os modelos *Standard k-ε*, *RNG k-ε*, *Realizable k-ε*, *Standard k-ω*, *SST k-ω*, *SST k-ω* com baixo número de *Reynolds*. Além destes modelos e de forma a ter em consideração o efeito das paredes do armário no escoamento do ar interior, com base no *Theory Guide do Fluent* (ANSYS, 2011a), foram também testadas as funções de parede descritas na secção 4.3, neste caso para o modelo *RNG k-ε*.

4.5.4. Condições de Fronteira

O presente estudo trata o escoamento do armário vazio, com os ventiladores a funcionar segundo as condições nominais, causando a entrada de ar proveniente do exterior, através das três entradas situadas na base do armário, tal como a conseqüente saída do ar na região superior do mesmo, nomeadamente após os ventiladores. Nesse sentido, foram utilizadas condições de velocidade fixa nas três entradas e de pressão de saída na região superior dos ventiladores.

Estas condições de fronteira e os respetivos valores introduzidos, tiveram por base uma monitorização experimental efetuada na fase inicial da investigação, tendo sido descrita no

capítulo anterior, permitindo recolher os valores da velocidade e caudal necessários para a simulação, além de servir como ferramenta de validação da simulação computacional efetuada.

No que respeita à condição de fronteira para as entradas do armário (lateral esquerda, frontal e lateral direita), optou-se pela condição fronteira de velocidade imposta (*velocity inlet*) para as três entradas. Numa fase inicial foi considerada uma distribuição de caudal igualitária, através da divisão da média do caudal total de saída por cada entrada. Através da divisão deste último valor pela área da entrada respetiva, obteve-se um valor aproximado e idêntico da velocidade média para cada uma das três entradas. Numa segunda fase, utilizaram-se os valores da velocidade média resultantes do respetivo ensaio experimental para a sua medição (segundo ponto da subsecção 3.3.3). Esses valores da velocidade média são: 0,827 m/s para a entrada lateral esquerda, 0,704 m/s para a entrada frontal e 0,757 m/s para a entrada lateral direita.

Além das velocidades médias, existem parâmetros relativos à turbulência que necessitam de ser especificados. Estes parâmetros são necessários para a modelação da energia cinética turbulenta (k) e a taxa de dissipação (ϵ) ou a taxa de dissipação específica (ω). Do conjunto total de parâmetros, os que foram escolhidos para esta 1ª parte da simulação numérica, foram o diâmetro hidráulico (D_h) e a intensidade de turbulência (I).

O diâmetro hidráulico é amplamente utilizado no cálculo do número de Reynolds, para escoamentos no interior de geometrias não circulares. Da mesma forma que nos estudos efetuados por Gaspar (2008) e Romkes et al. (2003), também no presente estudo foi utilizado o diâmetro hidráulico para o cálculo do número de Reynolds do escoamento, tanto no caso das três entradas, como nas duas saídas do armário. Além do cálculo do número de Reynolds, este parâmetro também serviu para a modelação numérica das condições de fronteira nas entradas (*inlets*) e saídas (*outlets*) do modelo (ANSYS, 2011b). O diâmetro hidráulico pode ser calculado a partir da formulação matemática presente na equação (33) abaixo, onde A representa a área da secção e O representa o perímetro da mesma.

$$D_h = 4 \frac{A}{O} \quad (33)$$

No que respeita à intensidade de turbulência, esta representa a razão entre a raiz quadrada das flutuações de velocidade e a velocidade média do escoamento. Conforme Chin (2013) e ANSYS (2011b), uma intensidade de turbulência abaixo de 1% é considerada baixa e acima de 10% é considerada alta. Para velocidades baixas (com baixo número de Reynolds), a intensidade de turbulência situa-se na gama entre 1% e 5%. Já em escoamentos a altas

velocidades e em geometrias complexas, como no caso dos ventiladores, a intensidade de turbulência situa-se entre 5% e 20%. Para escoamentos em regimes turbulentos completamente desenvolvidos, a intensidade de turbulência pode ser calculada pela fórmula matemática presente na equação (34), onde Re_{D_h} representa o número de Reynolds calculado com base no diâmetro hidráulico.

$$i_t = 0,16(Re_{D_h})^{-1/8} \quad (34)$$

A partir da fórmula anterior obteve-se um valor de aproximadamente 5%, para cada uma das 3 entradas do armário. Na figura 4.5 encontra-se representada a janela relativa à condição de fronteira para a entrada frontal, sendo que para as entradas laterais só muda a direção do escoamento de entrada.

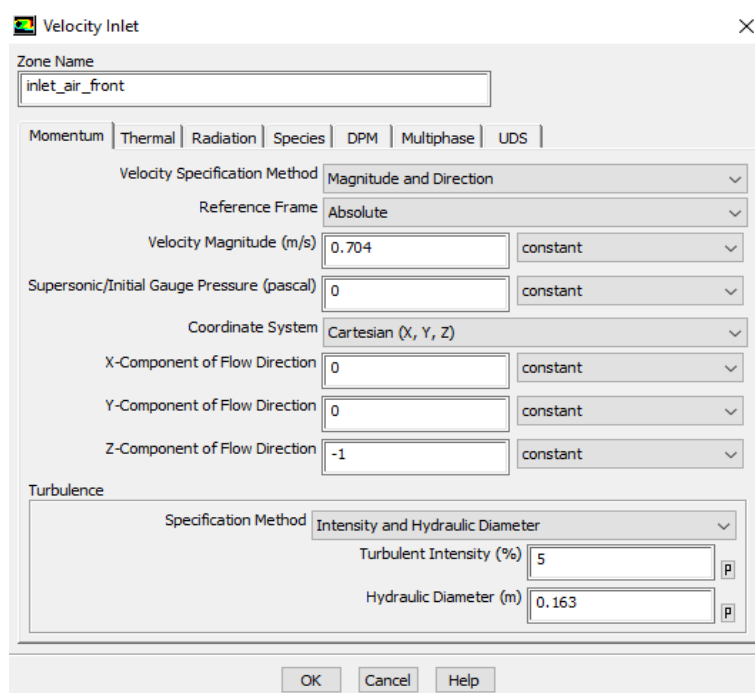


Figura 4.5 - Janela com os respetivos parâmetros para a condição de fronteira da entrada frontal.

As condições de fronteira, respeitantes às duas saídas do armário (*oulets*), são condições de saída de pressão. Também nestas condições de fronteira foram escolhidos os parâmetros de turbulência de diâmetro hidráulico e de intensidade de turbulência. Não havendo dados experimentais relativos à velocidade à saída dos ventiladores, assumiu-se uma intensidade de turbulência de 15%, segundo Chin (2013) e ANSYS (2011b). O diâmetro hidráulico assume o valor do diâmetro externo dos ventiladores (0,116 m), sendo a direção do escoamento

para ambas as saídas segundo +y, ou seja, na vertical ascendente. Na figura 4.6 encontra-se apresentada a janela respetiva à condição de fronteira para a saída esquerda.

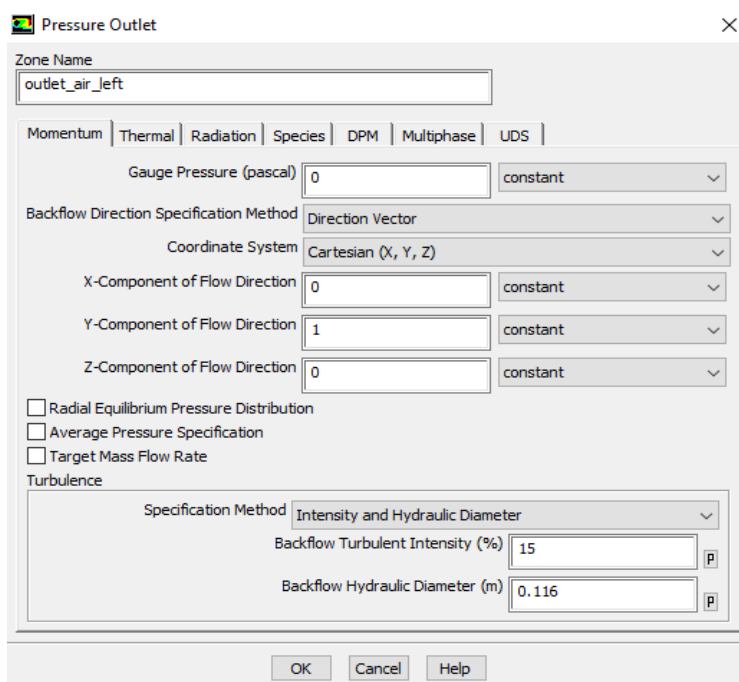


Figura 4.6 - Janela com os respetivos parâmetros para a condição de fronteira da saída esquerda.

Além das condições de fronteira de saída de pressão (*pressure outlet*), foram elaboradas 2 simulações com condições de saída de caudal mássico (*outflow*). O intuito desta condição de fronteira é impor uma distribuição de saída de caudal, neste caso igual, em cada uma das entradas.

As paredes do armário, assim como dos disjuntores e dos restantes elementos da porta frontal, foram consideradas como estando à temperatura ambiente de +25 °C.

4.5.5. Propriedades dos materiais/elementos intervenientes

O único fluido existente no modelo computacional em estudo é o ar, sendo que é nesta zona fluida que são resolvidas as equações de governo anteriormente apresentadas. Da mesma forma que para os modelos de turbulência, considerou-se o ar como um fluido incompressível. As propriedades termodinâmicas do ar no estado gasoso, dependem da temperatura a que o fluido se encontra, tendo sido considerada, no presente caso, a temperatura ambiente de +25 °C (298,15 K). De acordo com Rogers e Mayhew (1995), através

de uma interpolação linear, foram introduzidos os valores apresentados na tabela 4.3, referente às propriedades termodinâmicas do ar a +25°C.

Tabela 4.3 - Propriedades termodinâmicas do ar a +25 °C (adaptado de Rogers e Mayhew, 1995).

Propriedade	Valor
Massa volúmica	1,185 Kg/m ³
Viscosidade dinâmica	1,837x10 ⁻⁵ Kg/(m*s)

4.5.6. Métodos numéricos

O presente programa de DFC baseia-se na discretização em volumes finitos para a resolução das equações de governo. É por essa razão que é elaborada a malha computacional, por forma a dividir o domínio geométrico em volumes de controlo, para posteriormente serem resolvidas as equações em cada volume, mantendo o princípio de conservação.

No que respeita ao algoritmo de acoplamento pressão-velocidade foi escolhido, numa primeira fase da modelação, o algoritmo *SIMPLE* (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*), sendo este o algoritmo standard do programa. Após a realização desta primeira fase, foi testado o algoritmo *SIMPLEC* (*SIMPLE Consistent*), por forma a verificar a influência deste algoritmo face ao anterior. A diferença reside na expressão para a correção de caudal mássico na face do volume de controlo, servindo para acelerar a convergência, considerando as variações de velocidade nos nós vizinhos como bastante semelhantes. Este algoritmo possui um fator de correção da *skewness*, que se pode tornar bastante vantajoso para malhas com *skewness* elevada, ou seja, com elevada distorção (Oliveira, 2001; Patankar, 1980; ANSYS, 2011a).

Quanto ao gradiente utilizado na discretização espacial, recorreu-se ao teorema de Green-Gauss com base nos nós que definem as faces dos volumes de controlo, sendo que este teorema é geralmente mais preciso que o mesmo teorema baseado na face dos volumes, isto para malhas não estruturadas com elevada *skewness*. O teorema baseado nas faces (cell based) também foi alvo de modelação, a fim de se compararem os resultados provenientes de cada um (Ferziger e Perić, 2002; ANSYS, 2011a).

Em termos do método de interpolação para a discretização espacial da pressão, foi modelado e comparado o método standard do *Fluent* e o método *PRESTO* (*PREssure STaggering Option*). Este último permite controlar as variações severas de pressão entre os centros dos

volumes de controlo, através do balanço da equação da continuidade (Patankar, 1980; ANSYS, 2011a).

Para os restantes métodos de discretização, optou-se pelo método de diferenças a montante de 2º ordem (*Second Order Upwind*), potenciando uma maior precisão dos resultados obtidos, através da expansão da série de Taylor da solução centrada relativamente ao centróide do volume de controlo (Ferziger e Perić, 2002; Patankar, 1980; ANSYS, 2011a).

4.5.7. Fatores de sub-relaxação de variáveis para potenciar a convergência da solução numérica

De acordo com *ANSYS FLUENT Users Guide 14.0* (ANSYS, 2011b), Gaspar (2008) e Ferziger e Perić (2002), a diminuição dos resíduos normalizados significa que o processo iterativo se está a processar no sentido da convergência da solução numérica. Existem critérios de paragem do processo iterativo baseados nestes resíduos, pelo que os valores padrão do programa são de $\lambda=1 \times 10^{-3}$ para todas as variáveis, excetuando-se a energia com $\lambda=1 \times 10^{-6}$ (λ representa a fração do valor original do resíduo), sendo que quando os resíduos atingem estes valores, diz-se que a solução convergiu. Todavia, nem sempre a convergência é atingida, pois o próprio processo de cálculo numérico possui erros, podendo a solução divergir (aumento dos valores dos resíduos), ou após uma diminuição dos resíduos, ocorrer a sua estabilização em torno de um valor, sem a existência de oscilações de amplitude significativa. Neste último caso deverá considerar-se que o nível de convergência possível da solução numérica foi atingido, sendo esta uma prática recorrente em diversas investigações computacionais.

Um dos fatores que influenciam a convergência do processo iterativo são os fatores de sub-relaxação, podendo auxiliar na diminuição dos valores dos resíduos e consequentemente potenciar o alcançar da convergência. Apesar do programa possuir valores padrão, nem sempre são adequados ao problema em estudo. Cada modelação possui os seus fatores ideais, selecionados de forma empírica, sendo que a prática recorrente consiste na diminuição destes fatores seguido do aumento gradual dos mesmos. No decorrer deste processo, são efetuados inúmeros ajustes de simulação para simulação, até chegar ao melhor valor para esses fatores (ANSYS, 2011b; Ferziger e Perić, 2002). O procedimento levado a cabo na modelação computacional seguiu esta metodologia, tendo-se estabelecido os seguintes fatores de sub-relaxação (tabela 4.4).

Tabela 4.4 - Fatores de sub-relaxação das grandezas.

Grandeza	Fator de sub-relaxação
Pressão	0,3
Massa volúmica	1
Forças de corpo	0,6
Quantidade de movimento	0,6
Energia cinética turbulenta	0,7
Taxa de dissipação de energia cinética turbulenta	0,6
Viscosidade turbulenta	0,7

Tendo-se definido um valor inicial de 10 000 iterações para o processo iterativo e observado o comportamento de convergência, definiu-se o mesmo para 2000 iterações. A modelação e a respetiva simulação computacional, foram efetuadas num computador fixo com processador i7 de 3.40 GHz e 8 GB de memória RAM, tendo o processo de cálculo iterativo demorado cerca de 8 horas.

5. Análise e discussão de resultados

5.1. Introdução

O presente capítulo apresenta e analisa os resultados provenientes dos ensaios experimentais e das simulações numéricas realizadas, explicitados nos dois capítulos anteriores.

É feita ainda a confrontação entre os resultados experimentais e os numéricos, de modo a poder validar o modelo computacional empregue.

5.2. Resultados provenientes dos ensaios experimentais

Nesta secção são apresentados os resultados oriundos dos ensaios experimentais efetuados e anteriormente descritos no capítulo 3. À medida que os resultados vão sendo apresentados, será efetuada uma análise dos mesmos, no intuito de caracterizar o escoamento interno do armário e o comportamento térmico do mesmo.

5.2.1. Resultados do ensaio experimental para a obtenção do valor do caudal médio total de saída do armário

Este ensaio experimental visou a análise da variação da tensão de alimentação dos ventiladores, examinando o seu efeito no caudal total varrido pelos ventiladores (caudal de saída do armário). Os valores de tensão testados foram: 30, 36, 40, 44 e 48 VDC. Na figura 5.1, pode visualizar-se o gráfico correspondente à variação do valor médio do caudal volumico total que sai do armário, em função da variação da tensão fornecida aos ventiladores do mesmo.

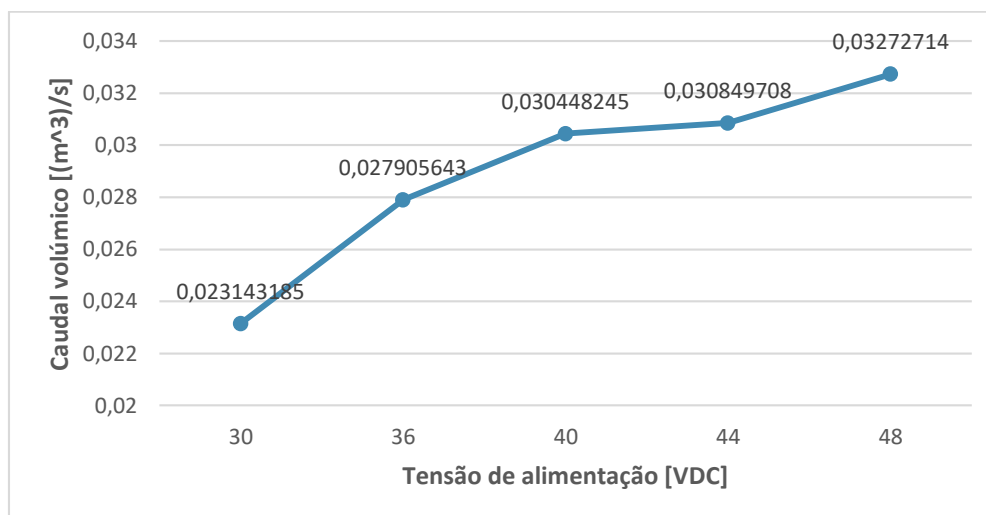


Figura 5.1 - Valor médio do caudal volumétrico total extraído do armário, em função da tensão de alimentação dos ventiladores.

Através do gráfico apresentado acima, pode observar-se que à medida que se aumenta a tensão de alimentação dos ventiladores, o caudal varrido por estes também aumenta, o que seria espetável e se verifica na restante literatura (Muralidharan *et al.*, 2010) onde estes sistemas são utilizados, traduzindo-se consequentemente num aumento do valor médio do caudal volumétrico total extraído do armário. Para a tensão nominal dos ventiladores presentes no armário, sendo também a tensão da sua alimentação no armário (48 VDC), o valor médio do caudal volumétrico total de saída do armário é aproximadamente $32,727 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$.

Admitindo que se verifica o princípio da conservação de massa no interior do armário e que em cada uma das três aberturas inferiores do mesmo entra uma quantidade de ar igual (mesmo caudal), dividiu-se o caudal volumétrico médio anterior por cada entrada, de forma a obter uma estimativa inicial da velocidade para as condições de fronteira a introduzir no programa.

5.2.2. Resultados do ensaio experimental para a obtenção do valor da velocidade média nas entradas do armário

O presente ensaio teve como objetivo a obtenção dos valores da velocidade média em cada uma das três entradas. Estes valores específicos de velocidade servem não só como ferramenta de caracterização do escoamento do armário, mas também para o refinamento das condições fronteira do programa.

O objetivo deste ensaio é assim averiguar se existe uma distribuição de caudal de ar igual em cada entrada, através do valor da velocidade média. Na tabela 5.1, encontra-se o valor médio de cada entrada.

Tabela 5.1 - Valor médio da velocidade para cada entrada do armário.

Localização	Valor médio da velocidade [m/s]
Entrada Lateral Esquerda	0,827
Entrada Frontal	0,704
Entrada Lateral Direita	0,757

A partir dos valores médios das velocidades, presentes na tabela acima, constata-se que a velocidade do escoamento de ar não é igual nas três entradas do armário, havendo consequentemente diferenças no caudal de ar admitido para o interior do mesmo (equação (7)), por cada uma das entradas.

Estes distintos valores de velocidade (e consequentemente de caudal), justificam-se pela distribuição não simétrica das entradas, relativamente à superfície do armário onde se encontram, pelo que ambas as entradas laterais se encontram deslocadas no sentido de -z (relativamente ao referencial da figura 3.29), por forma a tentar compensar a ausência de uma abertura na parede posterior, enquanto que a entrada frontal se encontra deslocada no sentido -x e +y, motivada pela presença do sistema de fecho da porta frontal do armário. Estas diferenças contribuem para a ocorrência de zonas de recirculação e de maior turbulência do escoamento no interior.

Possuindo os valores médios das velocidades das três entradas, pode calcular-se o número de Reynolds a fim de se verificar o regime de turbulência. Para o cálculo em questão, foi utilizada a equação (14) anteriormente apresentada na secção 4.3, sendo que a escolha pelo diâmetro hidráulico como variável para o cálculo do número de Reynolds, é sustentada na literatura, particularmente pelos trabalhos efetuados por Beitelmal *et al.* (2000), Romkes *et al.* (2003) e Gaspar (2008). A fórmula matemática para o cálculo do diâmetro hidráulico encontra-se na equação (33) presente na subsecção 4.5.4, tendo-se obtido o valor de $D_h = 0.163$ m para as três entradas do armário. Os respetivos valores do número de Reynolds para cada entrada encontram-se na tabela 5.2 abaixo, podendo-se constatar que o escoamento de ar em cada uma das entradas ocorre no regime turbulento.

Estes valores também são utilizados no cálculo da intensidade de turbulência, presente nas condições de fronteira de velocidade imposta na subsecção 4.5.4.

Tabela 5.2 - Número de Reynolds respetivo ao escoamento de ar em cada entrada.

Localização	Número de Reynolds
Entrada Lateral Esquerda	8996,425
Entrada Frontal	7660,263
Entrada Lateral Direita	8236,143

5.2.3. Resultados do ensaio experimental para a obtenção dos valores da velocidade do escoamento no interior do armário

Para que o escoamento de ar no interior possa ser devidamente caracterizado, no que respeita ao regime de turbulência, é essencial obter informação sobre a velocidade em diversas posições do mesmo, ao longo do seu percurso pelo interior do armário. Os pontos de medição da velocidade mencionados na subsecção 3.3.2, encontram-se organizados por planos horizontais na tabela 5.3 abaixo, com o respetivo valor médio da velocidade. O primeiro termo da designação de cada ponto, indica a posição em altura segundo o sentido de +y a que cada ponto se encontra ($y=-509$ mm corresponde à designação inferior; $y=-245$ mm corresponde à designação meio; $y=+19$ mm à designação superior; $y=+310$ mm à superior1; e por fim $y=+490$ mm à superior2); o segundo termo indica a posição em profundidade relativamente à origem ($z=-148,75$ mm corresponde à designação posterior, $z=0$ não tem designação; e $z=+148,75$ mm corresponde à designação frontal); o último termo indica a posição lateral, também relativamente à origem ($x=-149,5$ mm corresponde à designação esquerdo, $x=0$ à designação central; e $x=+149,5$ mm à direito). Desta forma o ponto de medição inferior posterior esquerdo, corresponde à posição ($x=-149,5$ mm, $y=-509$ mm, $z=-148,75$ mm) relativamente ao referencial considerado para o armário (figura 3.29). Esta organização permite referir cada ponto em específico, da forma mais simples e precisa possível, para uma melhor compreensão por parte do leitor.

Tabela 5.3 - Valor médio da velocidade em cada ponto de medição no interior do armário [m/s].

Inferior ($y=-509$ mm)			
Velocidade [m/s]	Esquerdo	Central	Direito
Posterior	0,116	0,098	0,186
($z=0$)	0,212	0,180	0,173
Frontal	0,534	0,218	0,454
Meio ($y=-245$ mm)			
Velocidade [m/s]	Esquerdo	Central	Direito
Posterior	0,239	0,287	0,243
($z=0$)	0,373	0,340	0,328
Frontal	0,164	0,128	0,130

Superior (y=+19 mm)			
Velocidade [m/s]	Esquerdo	Central	Direito
Posterior	0,304	0,329	0,192
(z=0)	0,3418	0,258	0,120
Frontal	0,173	0,098	0,098
Superior1 (y=+310 mm)			
Velocidade [m/s]	Esquerdo	Central	Direito
Posterior	0,320	0,320	0,234
(z=0)	0,326	0,196	0,158
Superior2 (y=+490 mm)			
Velocidade [m/s]	Esquerdo	Central	Direito
Posterior	0,323	0,287	0,188
(z=0)	0,459	0,365	0,340

Analisando a tabela 5.3 pode observar-se em primeiro lugar, relativamente ao valor médio das velocidades em cada uma das entradas (tabela 5.1), uma diminuição considerável do mesmo para cada ponto na posição inferior, fruto da expansão do escoamento motivada por um aumento da área de secção (área da base do armário). Ainda para o nível inferior (y=-509mm) pode observar-se que na região frontal, que os valores médios da velocidade são bastante superiores aos valores da região posterior, pois é nesta região que a influência das entradas é mais notória, havendo aí uma concentração do escoamento. À medida que o escoamento vai percorrendo o armário (aumento da posição segundo +y), a velocidade global do escoamento aumenta, resultante da aproximação do mesmo aos ventiladores situados no topo. É de notar uma convergência do escoamento para a região posterior a partir do plano “meio” até ao plano “superior1”, decorrente da inércia do próprio escoamento, sendo que no último plano, “superior2”, o mesmo converge para o plano vertical xy central (z=0), pela ação dos ventiladores, que expulsam o ar para o exterior. Por fim, é notória a influência da posição das entradas relativamente à origem do referencial e as diferentes velocidades do fluido nas mesmas, pelo que a velocidade do escoamento no plano “esquerdo” do armário é sempre superior, influenciando a velocidade do plano “central”, que exceto algumas regiões (nomeadamente a inferior), é superior à do “direito”. Os resultados provenientes do ensaio, relativo à visualização do escoamento apresentado no ponto seguinte da presente subsecção, permitem constatar visualmente o comportamento descrito.

Tendo sido obtidos os valores médios da velocidade do escoamento nesses pontos do interior, procede-se ao cálculo do número de Reynolds dos mesmos, da mesma forma que no ponto anterior, com o propósito de verificar o regime de turbulência em que o escoamento se desenvolve. A partir desses valores foi elaborada a tabela 5.4, apresentada de seguida.

Nesta situação o diâmetro hidráulico considerado para o cálculo foi o do próprio armário, com base na sua área da base.

Tabela 5.4 - Valor do número de Reynolds para cada posição do escoamento, baseado na velocidade média de cada ponto e no diâmetro hidráulico do armário.

Inferior (y=-509 mm)			
Reynolds (Re)	Esquerdo	Central	Direito
Posterior	1260,584	1070,136	2022,378
(z=0)	2303,524	1958,899	1877,278
Frontal	5813,218	2376,068	4942,596
Meio (y=-245 mm)			
Reynolds (Re)	Esquerdo	Central	Direito
Posterior	2602,800	3119,732	2639,072
(z=0)	4053,833	3700,143	3564,108
Frontal	1786,592	1396,619	1414,760
Superior (y=+19 mm)			
Reynolds (Re)	Esquerdo	Central	Direito
Posterior	3310,180	3582,250	2085,868
(z=0)	3709,208	2802,314	1305,933
Frontal	1877,278	1070,136	1061,070
Superior1 (y=+310 mm)			
Reynolds (Re)	Esquerdo	Central	Direito
Posterior	3482,487	3482,487	2548,386
(z=0)	3545,966	2131,206	1714,037
Superior2 (y=+490 mm)			
Reynolds (Re)	Esquerdo	Central	Direito
Posterior	3518,76	3199,732	2049,585
(z=0)	4997,01	3972,212	3700,143

A partir da tabela 5.4, pode observar-se que o escoamento possui vários regimes (laminar, transitório e turbulento), contudo, tendo em conta a média total do conjunto das velocidades ($v=0,252$ m/s), o número de Reynolds correspondente é de 2742,784, o que se situa acima do valor de 2300, limite máximo até ao qual um escoamento de um fluido incompressível no interior de uma estrutura pode ser considerado laminar (Oliveira e Lopes, 2010; Mendes, 2000).

O escoamento situa-se desta forma, no regime transitório ou turbulento, sendo que a presença de diversos componentes e obstáculos estruturais no interior do armário, induzem perturbações no escoamento à medida que este se vai desenvolvendo, pelo que o

escoamento no interior do armário é tido como turbulento, tendo sido este o regime considerado para a modelação computacional.

5.2.4. Resultados do ensaio experimental para a visualização do escoamento interior

Tendo sido obtidos os valores da velocidade do escoamento de ar em vários pontos no interior do armário e calculados os respectivos valores do número de Reynolds, para a caracterização do escoamento quanto ao regime, procede-se à visualização do escoamento propriamente dito. Nesse sentido, foram realizados ensaios de visualização do mesmo por injeção de fumo através das entradas do armário, para constatar o comportamento anteriormente descrito do escoamento, através de cada uma das entradas. Desta forma, o efeito isolado de cada entrada pode ser observado, permitindo uma noção das zonas de maior turbulência e uma ideia geral do escoamento completo no interior do armário, quando conjugadas as três entradas. Nas figuras 5.2 a 5.4, encontram-se os fotogramas mais relevantes dos vídeos elaborados para cada uma das entradas, estando representado em cada fotograma a linha de tendência do escoamento ao longo do seu percurso no interior do armário.

Para cada uma das três imagens que possuem o conjunto de fotogramas do percurso do escoamento no interior do armário proveniente da entrada respetiva (esquerda, frontal ou direita), pode examinar-se que o escoamento tende a deslocar-se para a superfície oposta àquela por onde é admitido, confinando na região superior para o centro, devido à ação dos ventiladores. Posto isto, o efeito combinado das três entradas tenderá a confinar o escoamento para a região posterior do armário e no topo do mesmo, para o centro. Isto comprova o que anteriormente foi constatado através dos valores médios da velocidade, contribuindo igualmente para a classificação do escoamento como turbulento, pois ao longo do percurso do mesmo, visualizaram-se vários remoinhos e perturbações, como é possível comprovar em alguns dos fotogramas apresentados de seguida. A evolução do escoamento no interior do armário encontra-se representada segundo a ordem crescente dos algarismos.

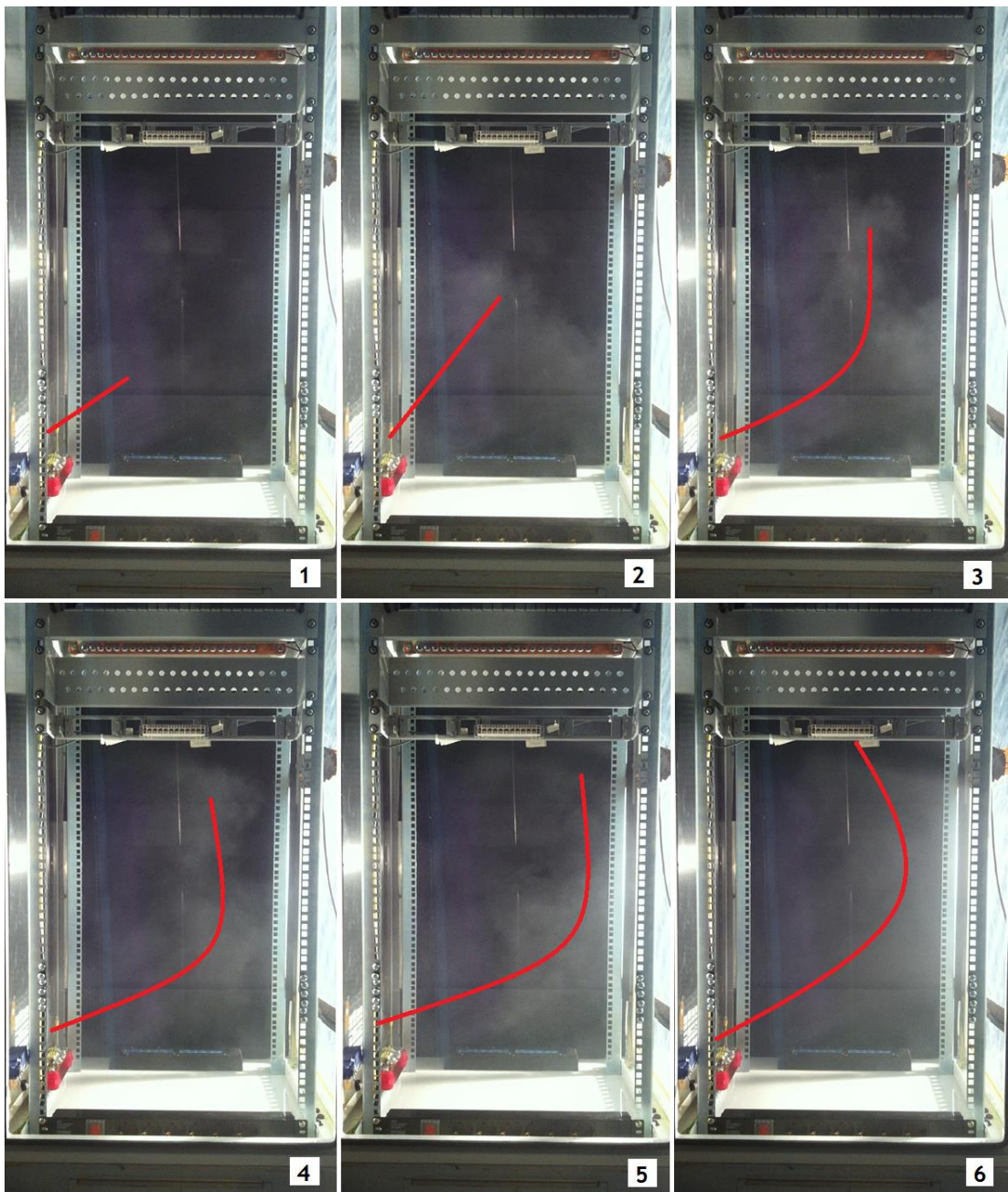


Figura 5.2 - Conjunto de fotogramas representativos do escoamento proveniente da entrada lateral esquerda.

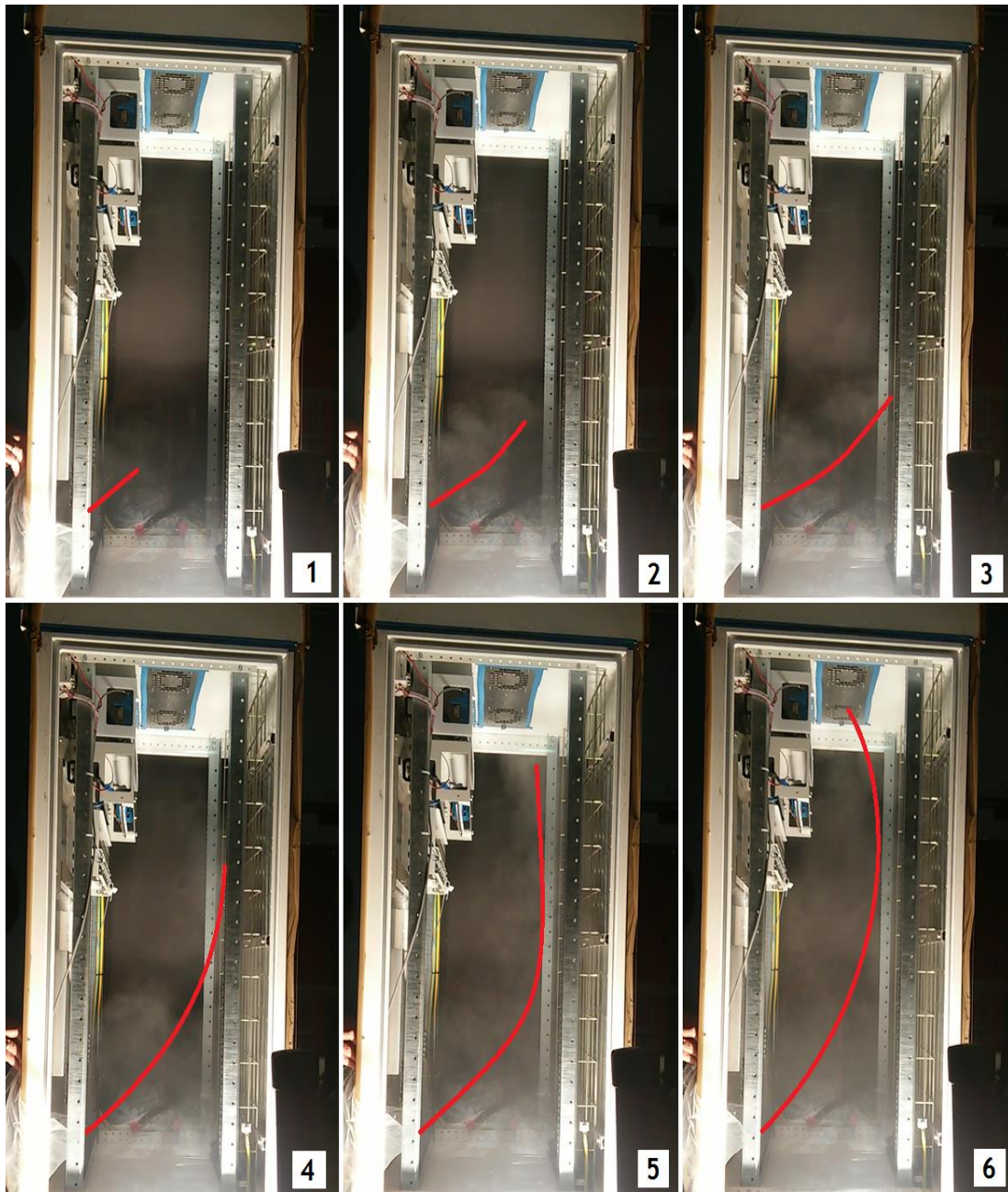


Figura 5.3 - Conjunto de fotogramas representativos do escoamento proveniente da entrada frontal.

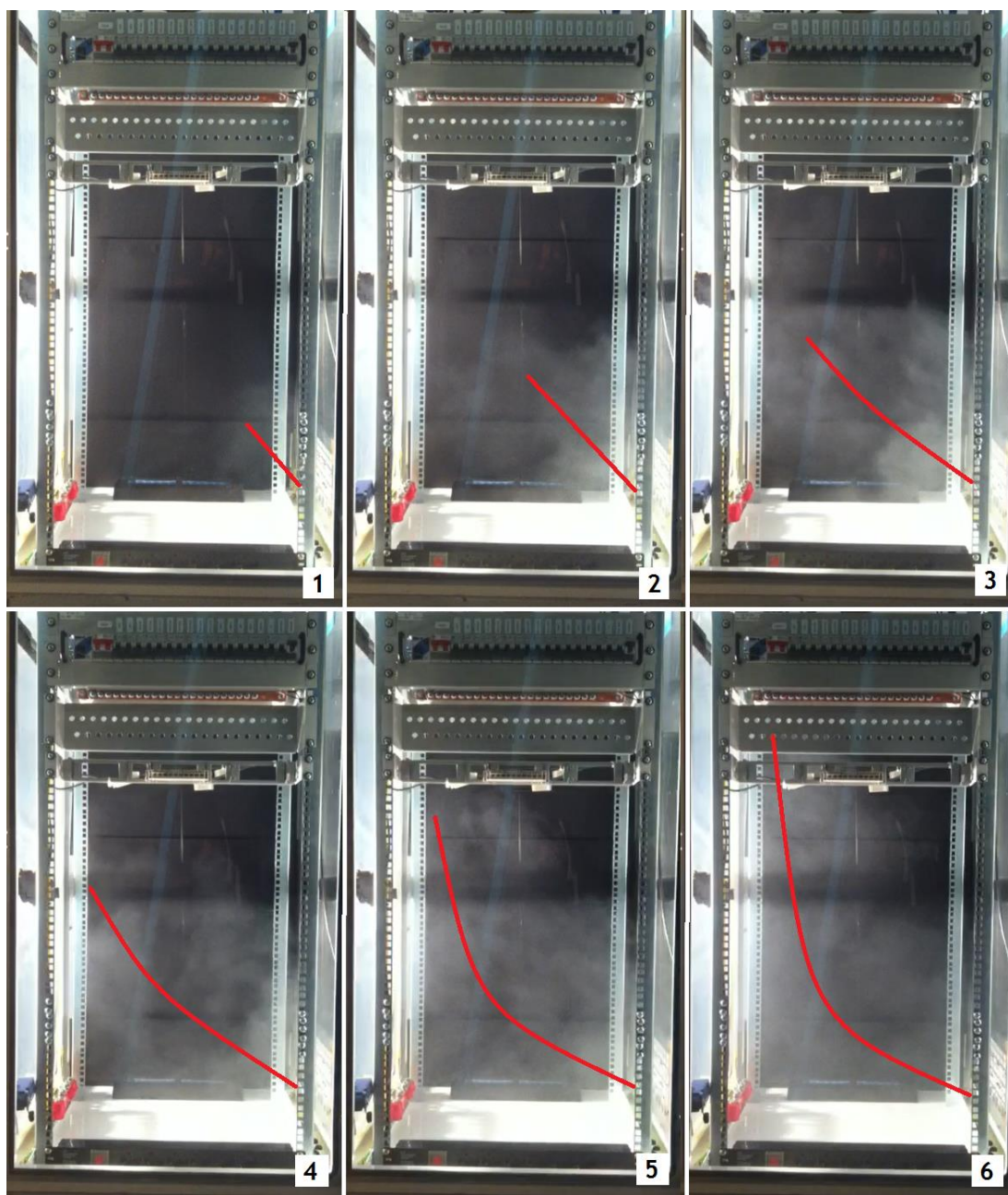


Figura 5.4 - Conjunto de fotogramas representativos do escoamento proveniente da entrada lateral direita.

5.2.5. Resultados dos ensaios da evolução da temperatura interior

Com o propósito de se verificar o comportamento térmico do armário, a partir da capacidade de arrefecimento do sistema de ventilação, foram realizados dois ensaios experimentais distintos. O primeiro incidiu sobre o arrefecimento do ar interior do armário, quando o equipamento presente não possui qualquer sistema de arrefecimento próprio, fazendo uso

da convecção natural para o mesmo. O segundo recaiu sobre o arrefecimento do armário, quando o equipamento possui um sistema de arrefecimento próprio, neste caso ventiladores axiais, fazendo uso da convecção forçada para arrefecer o equipamento. Em ambos os casos foi ajustada a tensão aplicada aos terminais da resistência, por forma a obter a temperatura máxima admissível (+55 °C) do ar no interior da caixa, 57,6 VAC para a configuração de convecção natural e 95 VAC para a configuração de convecção forçada. Esta diferença na alimentação da resistência, para a mesma temperatura ambiente de aproximadamente +25 °C, mostra por si só o efeito benéfico do aumento do caudal de ar que passa pelo equipamento a arrefecer, aumentando a capacidade de arrefecimento e consequentemente permitindo aumentar a potência térmica dissipada para a mesma temperatura do ar interior. Os respetivos gráficos dos ensaios encontram-se presentes nas figuras 5.5 (configuração de convecção natural) e 5.6 (configuração de convecção forçada), apresentadas mais abaixo.

O gráfico presente na figura 5.5 representa a evolução da temperatura nos vários pontos mencionados na subsecção 3.3.3, para a configuração de arrefecimento da caixa por convecção natural. Pode constatar-se uma temperatura ambiente de aproximadamente +25 °C e uma temperatura máxima atingida (neste caso à saída da caixa) de aproximadamente +57 °C. Numa fase inicial não há dissipação térmica, tendo sido alimentada a resistência com 57,6VAC após 5 minutos do início do ensaio, começando a temperatura a aumentar na globalidade do interior. Atingidos os +40 °C à saída da caixa, são acionados os ventiladores do armário com o intuito de arrefecer o ar no interior da mesma. Contudo, esse efeito não se verificou, tendo a temperatura diminuído apenas para os restantes pontos de medição. Atingidos os +57 °C, diminui-se a tensão de alimentação da resistência para 40 VAC, provocando uma descida acentuada da temperatura do ar à saída da caixa e com menor amplitude, para os restantes pontos. Por fim, desligou-se a alimentação da resistência, registando-se uma diminuição da temperatura em todo o interior. Quanto ao valor da velocidade no ponto de monitorização, registou-se um acréscimo de aproximadamente +0,01 m/s, correspondente ao aumento de temperatura de +24,6 °C para +28,2 °C nesse local.

Estes resultados permitem concluir, relativamente à configuração de arrefecimento da caixa por convecção natural, que a ação dos ventiladores do armário não tem influência significativa na temperatura do interior da caixa. Porém, diminui a temperatura do ar existente no armário e consequentemente da superfície da caixa, esta última por um pequeno período de tempo. A diminuição da potência térmica dissipada, de 66,35 W correspondentes à alimentação de 57,6 VAC, considerando um rendimento térmico de 100% (Silva, 2015), para 32 W correspondentes à alimentação de 40 VAC, influenciam significativamente a temperatura do ar no interior da caixa. No caso da velocidade do escoamento, o aumento de temperatura não tem uma influência significativa na mesma.

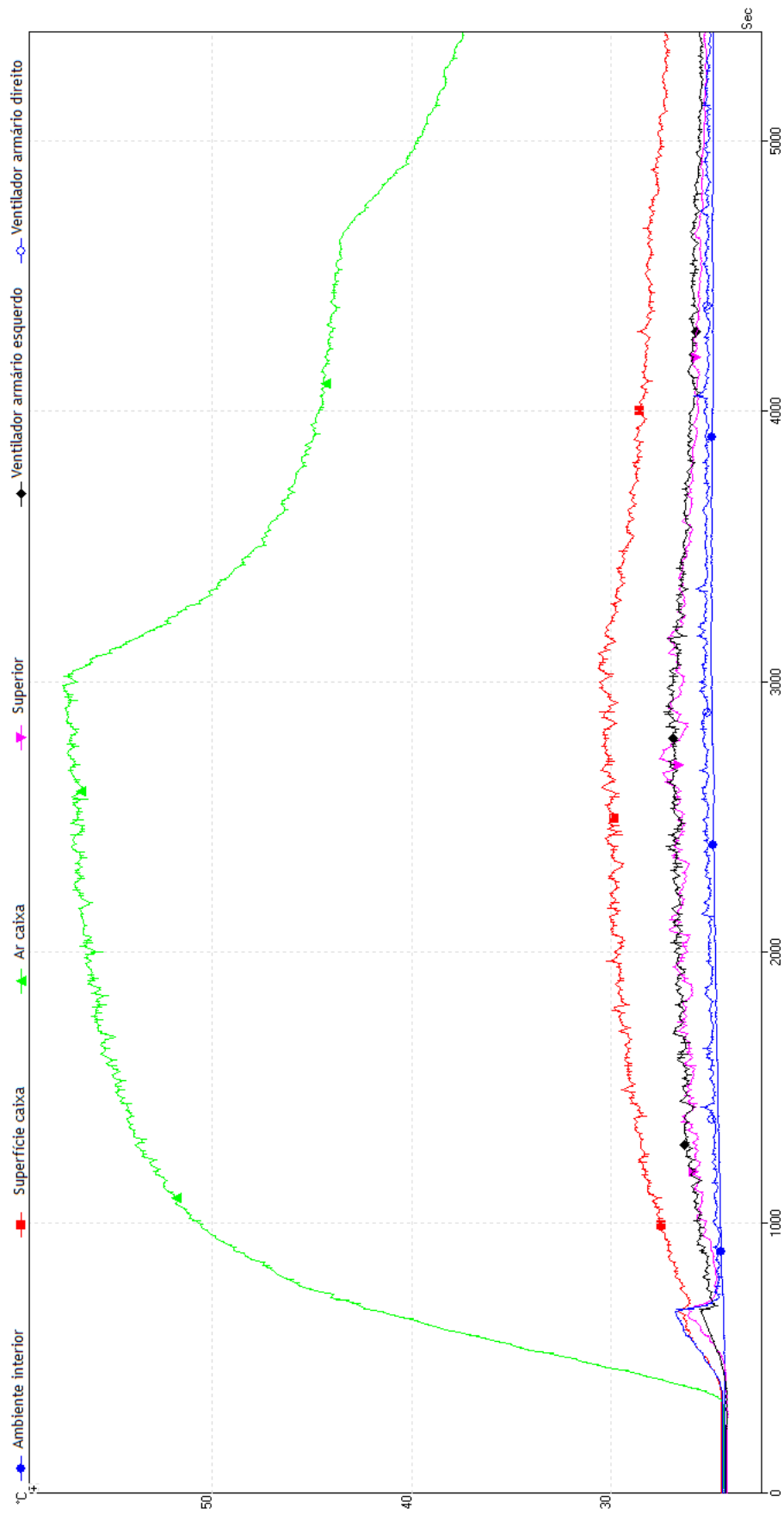


Figura 5.5 - Evolução das temperaturas do interior do armário, para a caixa dissipadora com configuração de arrefecimento próprio por convecção natural.

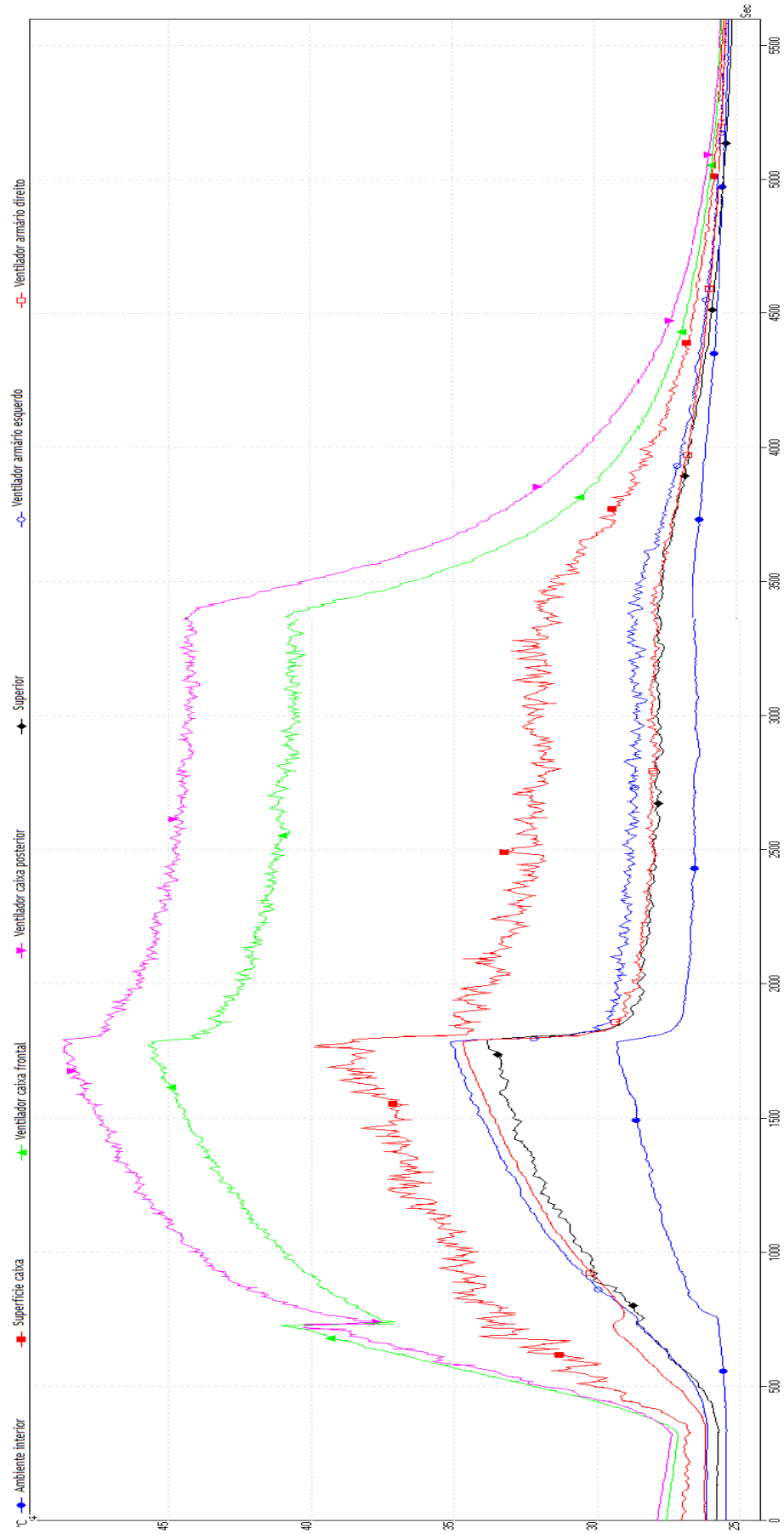


Figura 5.6 - Evolução das temperaturas do interior do armário, para a caixa dissipadora com configuração de arrefecimento próprio por convecção forçada.

Relativamente ao segundo ensaio, pretendeu-se com ele simular o funcionamento real do sistema de arrefecimento do equipamento da *Huawei* e do próprio armário. A temperatura ambiente, no início do ensaio, era também de aproximadamente +25 °C, sendo que após 5 minutos foi alimentada a resistência a 95 VAC (correspondente a 180,5 W), a partir do qual se verificou uma subida acentuada da temperatura, principalmente à saída dos ventiladores e da superfície, da caixa. Atingidos os +40 °C à saída dos ventiladores da caixa, estes foram acionados, registando-se uma queda significativa da temperatura nesse local, seguida de um progressivo aumento. Alcançando-se os +35 °C no interior do armário, os ventiladores deste foram acionados (48 VDC), provocando uma diminuição acentuada da temperatura, seguida de uma estabilização da mesma. Por fim, desligou-se a alimentação da resistência, atuando apenas os sistemas de arrefecimento da caixa e do armário, que demoraram cerca de 35 minutos a arrefecer a temperatura interior geral do armário e da caixa, até ao valor da temperatura ambiente (aproximadamente +25 °C). Da mesma forma que no caso anterior, quanto ao valor da velocidade no ponto de monitorização, registou-se um acréscimo de aproximadamente +0,01m/s, correspondente ao aumento de temperatura de +26,5 °C para +31,2 °C nesse local. A acrescentar, verificou-se que a ação dos ventiladores da caixa induziu um escoamento interior do armário, passando a velocidade nesse mesmo ponto de 0,0 m/s para 0,06 m/s e com a ação dos ventiladores do armário para 0,26 m/s.

Pode assim concluir-se novamente, que o aumento do caudal de ar, que passa através de um elemento dissipador, permite aumentar a eficácia do arrefecimento do mesmo e do ar ambiente. A simulação do funcionamento do sistema de arrefecimento do equipamento real e do próprio armário, permitem concluir que para a temperatura ambiente de +25 °C e uma potência dissipada de 180,5 W, o sistema de arrefecimento do armário é perfeitamente capaz de manter a temperatura do interior, dentro dos valores desejados. É ainda notória a preponderância da influência do gradiente de pressão, causado neste caso, pelo efeito dos ventiladores, face às variações da massa volúmica do fluido com o aumento da temperatura, indo ao encontro do que é referido por Hughes *et al.* (2012).

5.3. Resultados das simulações computacionais do escoamento no interior do armário

Os programas de simulação numérica, neste caso de dinâmica dos fluidos computacional (DFC), permitem obter previsões mais ou menos precisas do comportamento de um fluido em estudo, mediante as condições de fronteira impostas, assim como dos métodos e dos fatores de discretização utilizados. Uma vez verificada a convergência, neste caso através da obtenção de valores residuais de magnitude inferior a 0,001, ou de estabilizações dos

mesmos em torno de um valor fixo, é possível extrair uma quantidade de informação bastante alargada relativamente ao comportamento do escoamento.

Os resultados aqui apresentados, são relativos à condição de fronteira nas entradas com os valores médios de velocidade, resultantes do ensaio experimental efetuado com esse propósito (segundo ponto da subsecção 3.3.3).

O objetivo primordial das simulações efetuadas, foi a representação mais aproximada possível, do escoamento no interior de um armário de telecomunicações. Deste modo, foram comparados e testados vários modelos de turbulência, de acordo com Zhai *et al.* (2007): $k-\varepsilon$, $k-\varepsilon RNG$, $k-\varepsilon Realizable$, $k-\omega SST$ e $k-\omega SST$ com baixo número de Reynolds. A acrescentar a isto e com o intuito de aperfeiçoar os resultados obtidos, das simulações que melhor representam o escoamento do armário em causa, foram utilizadas diversas funções de parede, além da função de parede standard: a função de parede escalável (*Scalable*), a função de parede de não equilíbrio (*Non-Equilibrium*) e a função de tratamento realçado da parede (*Enhanced Wall Treatment*). Verificou-se também o efeito do refinamento de malha e dos diferentes métodos/funções de discretização das equações de governo.

No total foram elaborados 21 modelos computacionais do escoamento de ar no interior do armário de telecomunicações em estudo (figura 5.7). As designações atribuídas a cada simulação, representam o modelo de turbulência testado, com exceção da designação “*Mass flow Outlet*”, em que as alterações efetuadas relativamente ao modelo anterior do conjunto apresentado, consistem na escolha do modelo de turbulência $k-\varepsilon RNG$ e a condição de fronteira de fluxo (caudal mássico) imposto nas saídas. No modelo computacional que possui a designação “*k-ε RNG mais refinado*”, foi utilizada a malha mais refinada, mencionada anteriormente na subsecção 4.5.2. Todos os modelos apresentados, que não contêm na designação, a função de parede escolhida (que se encontra entre parênteses), possuem a função de parede padrão (*Standard Wall Function*). Relativamente aos últimos 10 modelos do conjunto apresentado na figura 5.7, todos contêm a função de parede de não-equilíbrio (*Non-Equilibrium Wall Fn*), tendo sido utilizados dois modelos de turbulência diferentes, o modelo $k-\varepsilon$ (primeiros 5 modelos) e o modelo $k-\varepsilon RNG$ (últimos 5 modelos). O 1º e o 6º modelo desse subconjunto (10 últimos modelos da figura), possuem o teorema de Green-Gauss com base nos nós para a discretização das equações, sendo que nas designações dos modelos seguintes (à direita dos mesmos), encontra-se indicada a alteração efetuada (após o subtraço), com o propósito de estudar a sua influência nos resultados obtidos. O termo “10%”, relativo aos 2 modelos computacionais desse subconjunto, apresenta a diminuição da intensidade da turbulência na condição de fronteira das saídas do armário, tendo passado de 15% para 10%.

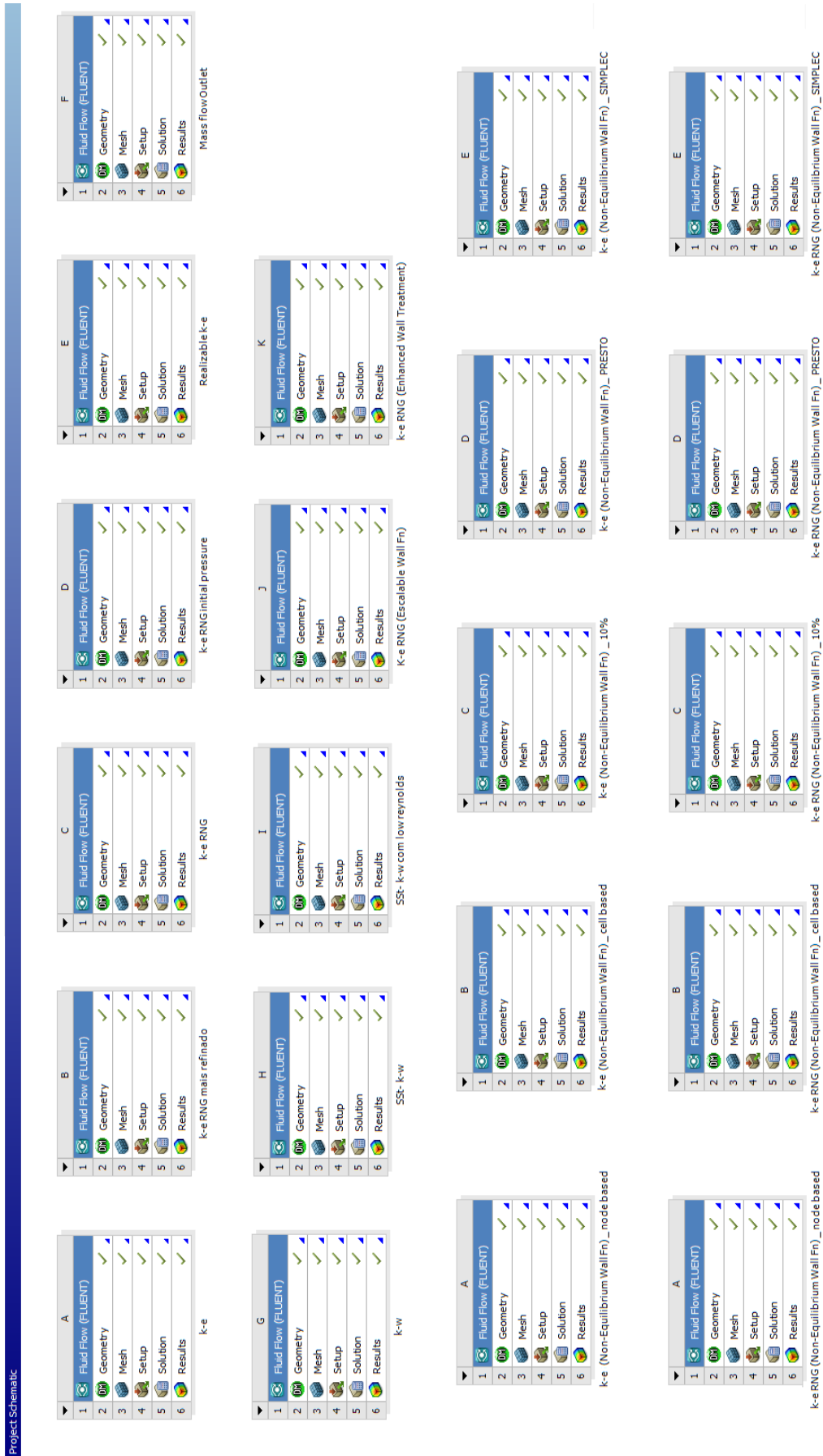


Figura 5.7 - Apresentação dos vários modelos computacionais elaborados e simulados.

De seguida serão apresentados os resultados das simulações efetuadas, pelo que ao nível da representação gráfica do escoamento, verificou-se uma certa coerência de umas simulações para as outras, sendo que uma comparação direta entre as várias simulações, será efetuada na secção seguinte.

No caso específico em estudo, foram extraídos os valores de velocidade em cada um dos pontos anteriormente mencionados, diretamente a partir da interface do *Fluent*, sendo também possível a obtenção desses valores numa determinada região ou ao longo de um percurso definido, como é visível na figura 5.8. Desta forma, obtém-se uma previsão da magnitude da velocidade em localizações específicas do escoamento, incluindo aquelas onde a realização de medições experimentais não é possível.

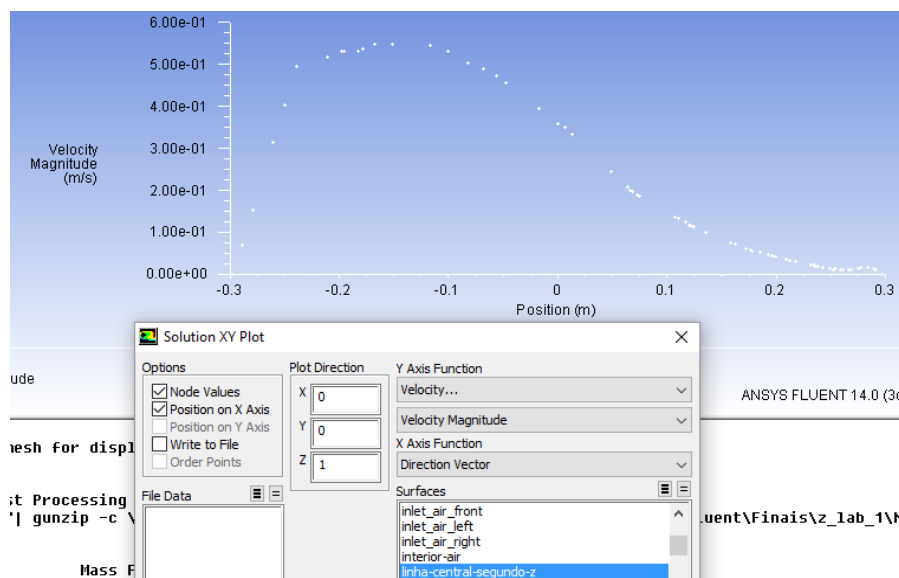


Figura 5.8 - Gráfico da evolução do valor da velocidade segundo o eixo z, na localização central do armário.

Ainda na interface do *Fluent*, é possível obter vários relatórios acerca do escoamento do armário, como é o caso do caudal mássico (figura 5.9), tendo sido verificada a conservação da equação da continuidade para todas as simulações efetuadas, em que o caudal que entra no armário, através das três aberturas situadas na região inferior do mesmo, tem de ser igual ao caudal que sai, neste caso através das duas aberturas do topo. Constatou-se deste modo, uma conservação do caudal de ar entre as três entradas e as duas saídas do armário, para todas as simulações efetuadas, com exceção: do modelo de turbulência $k-\omega$; o modelo $k-\epsilon$ com função de parede de não equilíbrio e teorema de Green-Gauss baseado nos nós; e o modelo $k-\epsilon$ RNG com função de parede escalável.

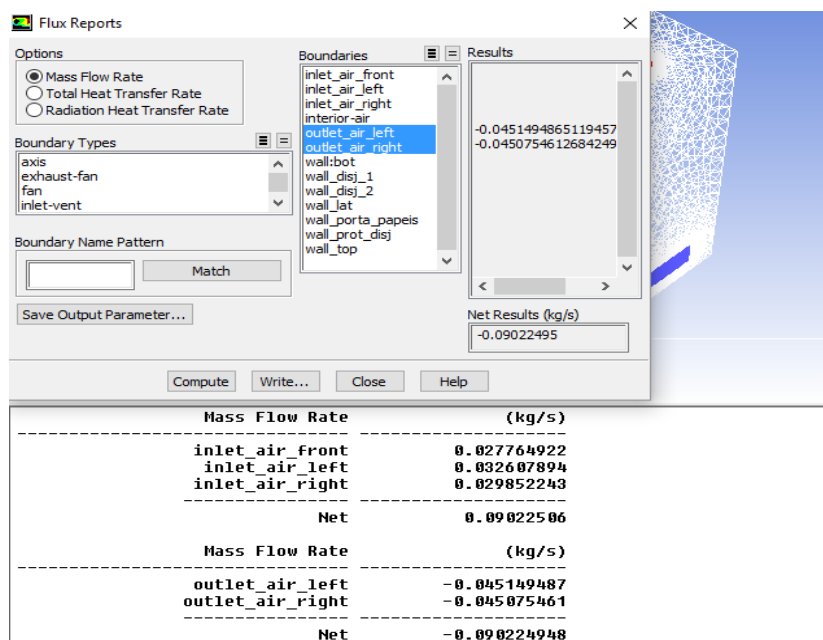


Figura 5.9 - Relatório de caudal mássico das três entradas e das duas saídas do armário.

Além do *Fluent*, a partir da interface gráfica *CFD Post*, foi possível obter informação adicional relativa ao escoamento. Na figura 5.10 é possível visualizar as linhas de corrente características do escoamento, (a) para o efeito do escoamento vindo da entrada lateral e (b) para as entradas laterais, assim como algumas zonas de recirculação ao longo do percurso do mesmo pelo interior do armário em estudo. Esta visualização permite aferir que o escoamento tende a confinar para a região posterior, tal como já foi constatado através dos resultados dos ensaios experimentais, representando igualmente que na região do topo, próxima às saídas do armário (ventiladores), existe uma aproximação do mesmo para a região central de cada abertura. Para além da representação das linhas do escoamento, é possível obter informação sobre a magnitude, concentração do escoamento em diversas localizações e a direção deste, através da representação do mesmo por vetores de velocidade (figura 5.11). Esta representação pode ser escolhida para a globalidade do ar interior, ou para um plano específico. Através da figura, pode-se atestar que as regiões do interior do armário onde existe uma maior concentração de caudal de ar e uma maior magnitude, são as regiões inferiores, junto aos quadros elétricos e aos ventiladores (saídas do armário). A partir de uma observação mais pormenorizada de ambas as figuras, é possível comprovar algumas localizações de maior turbulência no escoamento, destacando-se a região antes dos ventiladores e os remoinhos ao longo do percurso pelo interior.

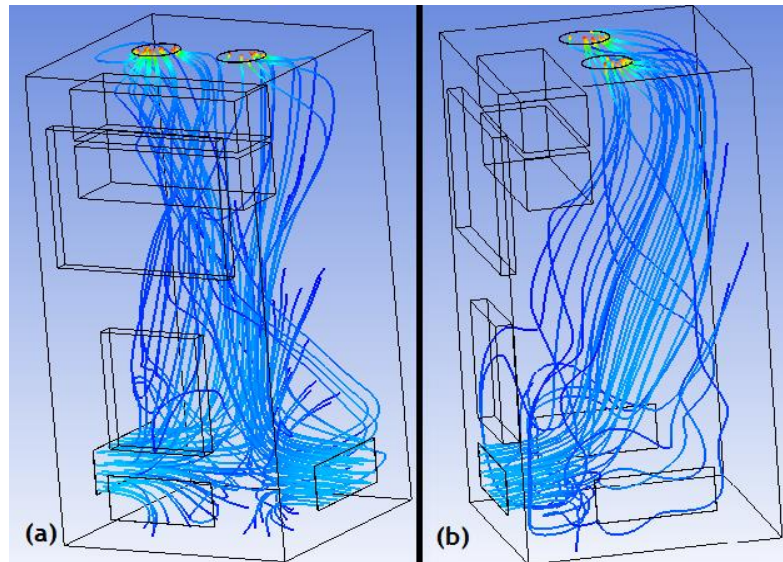


Figura 5.10 - Representação das linhas de corrente do escoamento de ar, proveniente das entradas laterais (a), ou frontal (b).

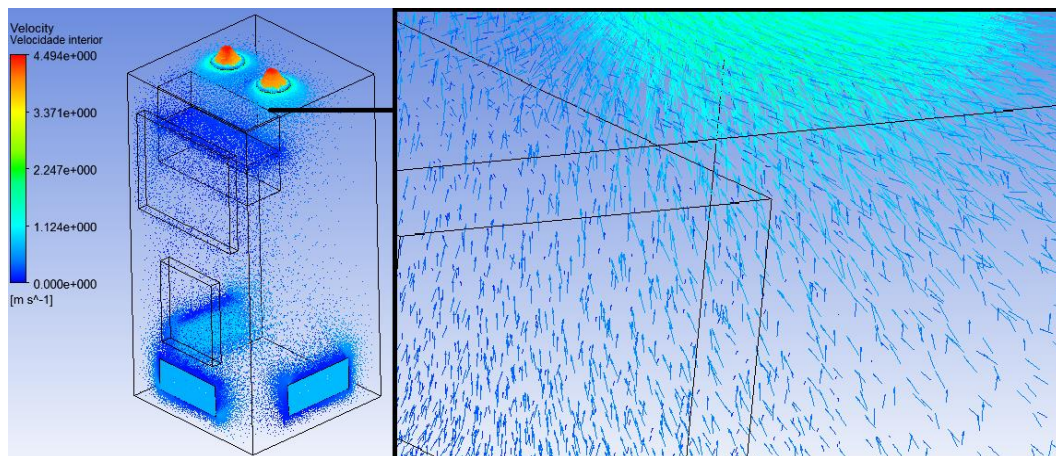


Figura 5.11 - Representação dos vetores de velocidade do escoamento de ar no interior do armário.

Por fim, através da interface gráfica em questão, foi possível obter uma representação da velocidade do escoamento, através de contornos de velocidade (figura 5.12), nos diversos planos anteriormente referidos na subsecção 3.3.3, o que facilita a interpretação da magnitude e do percurso do escoamento no interior. Através dos diversos contornos com igual magnitude de velocidade, pode-se ainda constatar que as regiões onde o fluido possui maior intensidade, são a região inferior e posterior do armário, havendo ainda algumas regiões, principalmente entre o centro e a base, onde a existência de recirculação de ar é bastante notória.

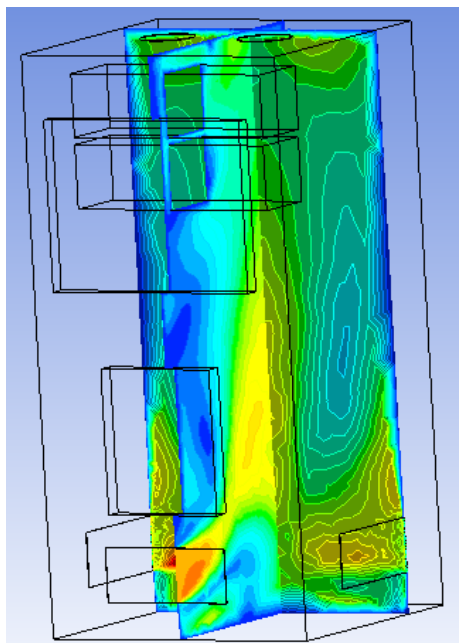


Figura 5.12 - Representação de dois planos perpendiculares, possuindo contornos de velocidade do ar interior do armário.

Através das simulações computacionais realizadas, pode-se comprovar que o programa de DFC utilizado (*Fluent*), permite a representação do escoamento no interior do armário de telecomunicações em estudo. O percurso do escoamento no interior é semelhante ao caso real, confinando para a superfície posterior do armário. No topo este confina a região central do armário e de ambas as saídas. Verificam-se algumas zonas de recirculação do mesmo, nomeadamente na região inferior do armário e junto aos quadros elétricos do mesmo. Por fim, o refinamento da malha computacional e a alteração de parâmetros relativos aos métodos de discretização, permitiu melhorar as previsões das grandezas e a representação do próprio escoamento. A diminuição de alguns dos fatores de sub-relaxação, facilitaram a convergência do modelo, diminuindo conseqüentemente o tempo computacional requerido.

5.4. Validação do modelo computacional

A correta validação de um modelo numérico, permite que as previsões numéricas resultantes das simulações, possam ser utilizadas como um elemento credível. Como foi mencionado na secção 4.5, foram testados vários modelos de turbulência, assim como os efeitos de vários ajustes ao longo da modelação, tendo-se obtido diferentes resultados para cada simulação.

Estas simulações do escoamento terão de ser alvo de validação, através: da verificação da lei da conservação de massa (equação da continuidade), da comparação dos valores da velocidade nos vários pontos do interior, com os valores resultantes das medições experimentais; e da própria comparação visual do escoamento. Será ainda considerado o erro relativo entre os resultados computacionais e os resultados experimentais, através da equação (35) abaixo (Hoang *et al.*, 2000).

$$E_r = \frac{|Valor\ numérico - Valor\ experimental|}{|Valor\ experimental|} \quad (35)$$

Existem diversas condicionantes que afetam os valores tanto numéricos como experimentais. No que concerne aos valores experimentais, estes possuem sempre um erro inerente, proveniente: da própria incerteza dos equipamentos de medição; das condições em que as medições são efetuadas; e do manuseamento dos equipamentos. Já os valores numéricos, são afetados: pela qualidade da malha computacional; pelas simplificações aplicadas à geometria; pela escolha das condições de fronteira impostas; pelo modelo de turbulência utilizado; e ainda pelos métodos de discretização.

5.4.1. Validação através do cumprimento da lei da conservação de massa

Para cada uma das três entradas do armário, assim como para as duas saídas do mesmo (assumindo uma distribuição igual em cada ventilador), foram extraídos os valores do caudal mássico, através da obtenção de um relatório de fluxo para cada uma das simulações efetuadas, apresentado anteriormente na figura 5.9. Todas as simulações garantiram a continuidade com exceção de três (anteriormente mencionadas), pelo que foram automaticamente excluídas.

Além dos resultados numéricos, foi calculado manualmente o caudal mássico para cada uma das três entradas, através da equação (35), obtendo-se $3,26 \times 10^{-2}$ kg/s para a entrada esquerda, $2,77 \times 10^{-2}$ kg/s para a entrada frontal e $2,99 \times 10^{-2}$ kg/s para a entrada direita, totalizando um caudal mássico de $9,03 \times 10^{-2}$ kg/s. O valor numérico obtido nas diversas simulações, do caudal mássico total tanto no conjunto das três entradas como das duas saídas, ronda os $9,02 \times 10^{-2}$ kg/s, pelo que se comprova nesta situação a validação das previsões numéricas.

5.4.2. Validação através da comparação visual do escoamento

O comportamento do escoamento, nas previsões numéricas, é bastante semelhante ao longo das várias simulações. Por comparação das previsões numéricas com os resultados do ensaio de visualização por injeção de fumo, presentes nas figuras 5.13, 5.14 e 5.15 abaixo, considerando igualmente o efeito conjunto das três entradas em simultâneo, pode-se comprovar que os resultados numéricos, permitem uma representação bastante aproximada do percurso do escoamento pelo interior do armário, o que coincide com o confinamento do escoamento na região posterior e superior do armário.

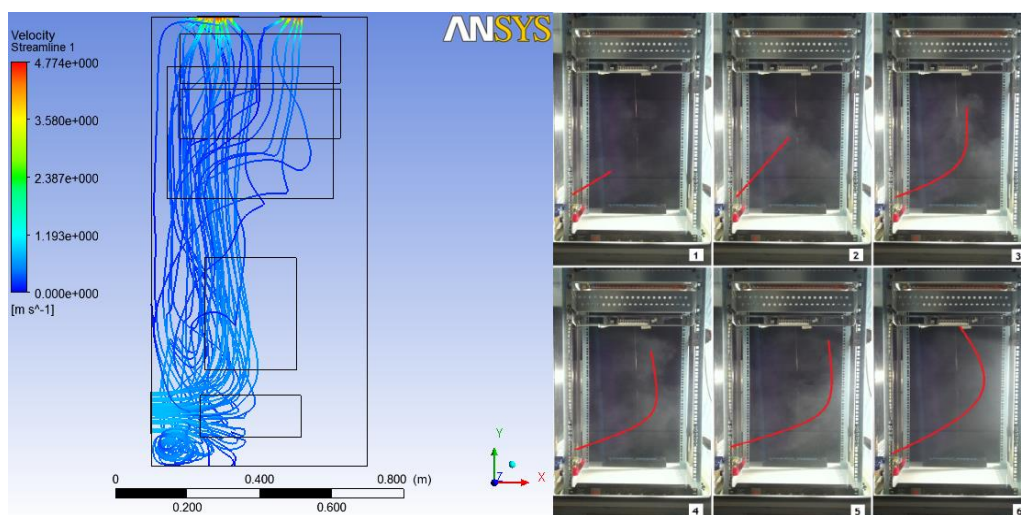


Figura 5.13 - Comparação entre a previsão numérica e o conjunto dos fotogramas representativos da injeção de fumo, para a entrada esquerda do armário.

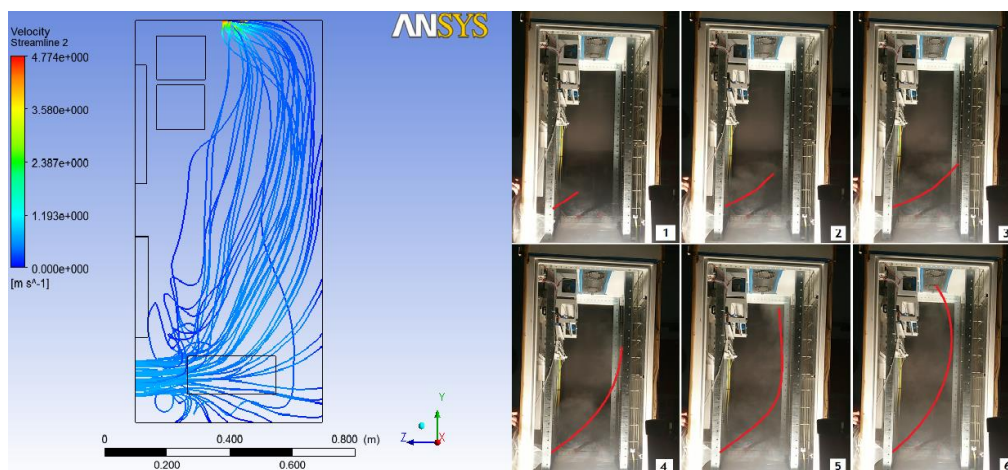


Figura 5.14 - Comparação entre a previsão numérica e o conjunto dos fotogramas representativos da injeção de fumo, para a entrada frontal do armário.

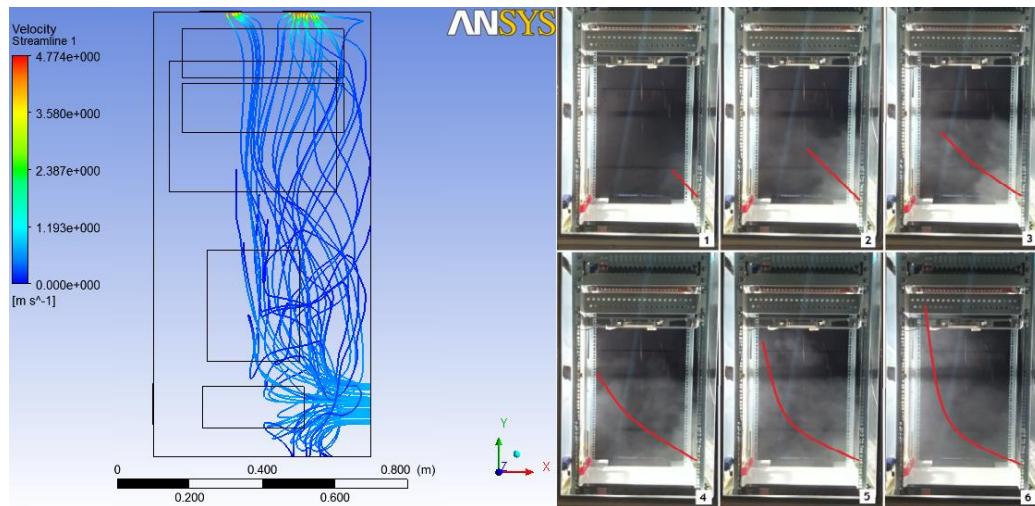


Figura 5.15 - Comparação entre a previsão numérica e o conjunto dos fotogramas representativos da injeção de fumo, para a entrada direita do armário.

5.4.3. Validação através da comparação dos valores da velocidade nos diversos pontos do interior

Para verificar o crescimento relativo da função ao longo do escoamento, adimensionalizou-se o valor da velocidade. Dividiu-se desta forma, tanto os valores das velocidades obtidas numericamente, como os valores da velocidade obtidos experimentalmente, pelo valor médio da velocidade das três entradas no conjunto. Com base nestes valores, foi possível verificar a evolução do escoamento no interior do armário. Além disso, calculou-se o valor do erro relativo entre os dados numéricos e experimentais, para cada um dos trinta e nove pontos apresentados na subsecção 3.3.3. Após este cálculo para cada ponto, obteve-se a média desses mesmos erros para cada simulação computacional, de modo a comparar os vários modelos entre si.

O valor máximo do erro relativo médio das simulações foi 0,9022 (90,22%), correspondente ao modelo “*k-ε (Non-Equilibrium Wall Fn) _ SIMPLEC*”, enquanto que o valor mínimo foi 0,6997 (69,97%), correspondente ao modelo “*k-ε Realizable*”. Os 6 modelos que mostraram na globalidade, um menor valor médio do erro relativo, por ordem decrescente do mesmo, foram: o “*k-ε Realizable*”, o “*k-ε RNG (Non-Equilibrium Wall Fn) _ PRESTO*”, o “*Mass flow Outlet*”, o “*k-ε RNG (Non-Equilibrium Wall Fn) _ 10%*”, o “*k-ε RNG (Non-Equilibrium Wall Fn) _ Cell based*” e o “*k-ε (Non-Equilibrium Wall Fn) _ 10%*”. Na figura 5.16, encontra-se o gráfico com os valores adimensionalizados da velocidade, dos modelos anteriormente descritos, em conjunto com os valores experimentais, a fim de se comparar a tendência dos mesmos, segundo o aumento da cota *z*, no centro do armário.

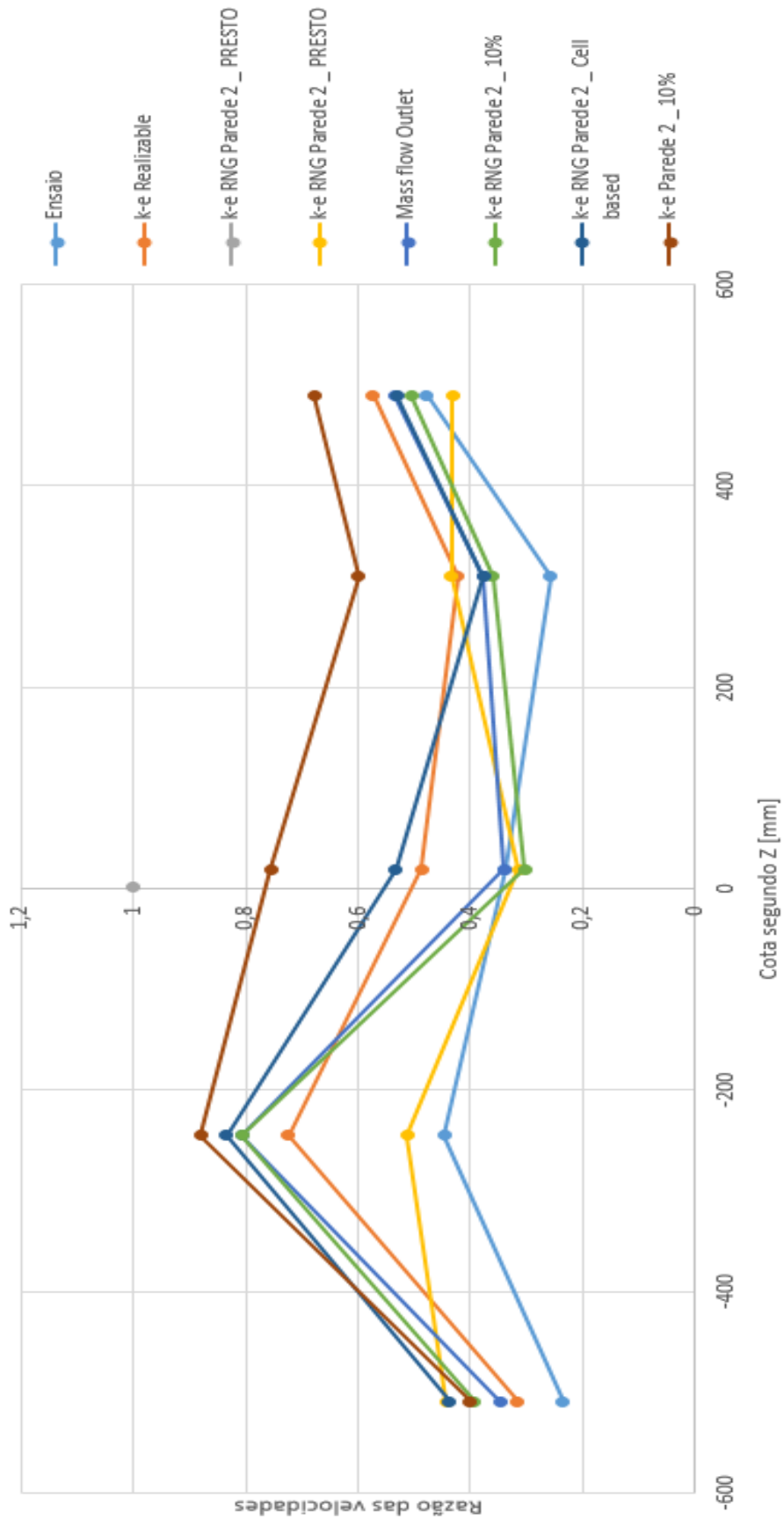


Figura 5.16 - Gráfico da razão das velocidades para cada ponto, segundo a cota z, para a posição central do armário.

A partir do gráfico é notório, que apesar dos valores da razão das velocidades, possuírem alguma divergência em relação à razão das velocidades experimentais, a tendência da maioria dos modelos computacionais é bastante similar à do ensaio experimental. O plano com maior divergência nos resultados é o plano inferior ($y=-509$ mm), pois a esta altura da base, o efeito combinado do ar proveniente de cada uma das entradas é bastante mais significativo, introduzindo uma maior turbulência e discrepância nos resultados. Contudo, este plano não tem grande significância, no que respeita ao comportamento térmico do armário, como se constatou pelos resultados do ensaio experimental da componente térmica. Assim, ao suprimir este plano no conjunto dos pontos considerados para o interior, os resultados obtidos numérica e experimentalmente aproximam-se muito mais, sendo que o valor máximo do erro médio neste caso, passa para 0,5563 (55,63%). Quanto ao modelo “*k-ε Realizable*”, o valor médio do erro passa a ser de 0,3432 (34,32%), sendo um valor bastante aceitável, visto que o comportamento visual do escoamento anteriormente apresentado, é bastante aproximado ao real.

5.5. Nota conclusiva

A partir dos resultados apresentados anteriormente, comprova-se que a modelação numérica permite representar o escoamento no interior do armário, de uma forma bastante aproximada, servindo assim como ferramenta de estudo para a caracterização e otimização de um armário exterior de telecomunicações. Numa primeira fase, a utilização de uma distribuição igualitária de caudal e conseqüentemente o mesmo valor de velocidade média em cada uma das três entradas, permitiu, embora nalgumas regiões de forma não tão significativa, a representação do escoamento interior do armário. Posteriormente, no intuito de refinar a modelação, prática bastante recorrente e necessária em DFC, utilizaram-se os valores médios da velocidade, resultantes das medições em cada uma das entradas, o que permitiu melhorar os resultados da simulação. A acrescentar, o refinamento da malha computacional também permite obter valores mais aproximados aos valores experimentais, embora não de uma forma tão significativa como a escolha por um modelo de turbulência mais adequado (neste caso o *k-ε Realizable*), além de aumentar o tempo de simulação computacional. O teorema de Green-Gauss baseado nas faces das células (*cell based*), permite obter melhores resultados numéricos do escoamento em estudo, face ao teorema baseado nos nós (*node based*). De uma forma similar, também o método de interpolação para a discretização PRESTO, permite melhorar os resultados e aproximar o escoamento, à situação real verificada no armário.

O escoamento de ar no interior do armário em estudo, ocorre maioritariamente no regime turbulento, havendo algumas zonas de recirculação na região inferior e central do mesmo, bem como locais onde a concentração do escoamento é mais notória (junto das entradas e dos quadros elétricos). Este tende a deslocar-se para a região posterior do armário por influência das respetivas entradas, confinando para o centro do armário na região superior, por ação dos ventiladores.

Relativamente ao desempenho térmico do armário, o aumento do caudal de ar através da instalação de ventiladores na caixa, permite aumentar a transferência de calor, amplificando a capacidade de arrefecimento do ar no interior da mesma, face à configuração de arrefecimento por convecção natural. O que foi referido, possibilita deste modo aumentar a potência térmica dissipada para a mesma temperatura no interior. O sistema de arrefecimento do armário mostrou-se eficiente, permitindo manter a temperatura interna do armário, abaixo dos limites indicados pelo ETSI (+55 °C), isto para uma temperatura ambiente de +25 °C e uma potência térmica dissipada de 180,5 W.

6. Conclusão

O trabalho desenvolvido ao longo da presente dissertação, consistiu no estudo do escoamento no interior de um armário exterior de telecomunicações, assim como da caracterização do comportamento térmico do mesmo. Para isso, foi realizado um estudo experimental, com o intuito de recolher informação sobre os parâmetros da velocidade e do caudal presentes no interior do armário, mas também visualizar o próprio escoamento. Além disso, foi igualmente estudado o comportamento térmico do armário, através de medições experimentais das temperaturas em diversos pontos do interior, mediante duas configurações distintas para o arrefecimento dos equipamentos de telecomunicações. Realizou-se equitativamente um estudo numérico do escoamento interno do armário, tendo este sido otimizado e validado, para o caso específico do armário em causa.

No presente capítulo, encontram-se apresentadas as principais conclusões do trabalho desenvolvido ao longo da dissertação, de uma forma breve e precisa. Com base nas conclusões obtidas, serão sugeridos alguns trabalhos que possam efetivamente contribuir para um conhecimento mais aprofundado nesta área.

6.1. Recapitulação

O aumento do número de instalações de telecomunicações móveis, tem sido uma constante nos últimos anos, motivado em grande parte pelo aumento do tráfego de dados móveis, cuja previsão é que continue a crescer de uma forma exponencial. Através do crescimento científico relacionado com a área da nanotecnologia, a tendência é para que continue a existir um “*down sizing*” dos componentes eletrónicos e conseqüentemente dos respetivos equipamentos, incluindo os equipamentos de telecomunicações. Esta diminuição do tamanho, aliado a uma crescente procura pelos serviços de comunicações móveis, promove a implementação de armários exteriores para albergar os equipamentos, mas acarreta consigo complicações relativas ao arrefecimento dos mesmos. Além disso, a falta de informação relativa ao escoamento interior nestas estruturas, leva a que geralmente os sistemas de arrefecimento empregues sejam insuficientes ou sobredimensionados, relativamente à potência térmica dissipada no interior. A quantidade de energia consumida pelo sector das telecomunicações, corresponde a 3% da energia mundialmente consumida, pelo que a otimização do arrefecimento e o conhecimento detalhado, relativo ao escoamento interno dos armários exteriores de telecomunicações, apresenta-se bastante pertinente.

Os ensaios experimentais possibilitaram concluir, que o aumento do caudal varrido pelos ventiladores do armário, permite aumentar a taxa de dissipação térmica para o exterior. A utilização de ventiladores nos próprios equipamentos de telecomunicações, também demonstra este efeito benéfico, diminuindo a temperatura interna, para uma mesma potência térmica dissipada, face aos equipamentos que não possuem qualquer sistema próprio para o seu arrefecimento. A acrescentar, a instalação de equipamentos de telecomunicações com sistema de arrefecimento próprio constituído por ventiladores, provoca um aumento da temperatura interna do armário superior, comparativamente com equipamentos sem qualquer sistema de arrefecimento próprio. Para uma temperatura ambiente de +25 °C e uma potência térmica dissipada de 180,5 W, o sistema de arrefecimento do armário, constituído por dois ventiladores axiais, permitiu manter a temperatura no interior do mesmo, muito abaixo do valor máximo definido pelo ETSI (+55 °C). Neste sentido, revelou-se um sistema eficiente do controlo da temperatura, aliado ao facto de ser um método de extração de calor bastante simples e económico.

O ensaio experimental da visualização do escoamento por injeção de fumo, permitiu comprovar a tendência demonstrada pelos valores da velocidade do ar no interior, relativamente à deslocação do escoamento para a região posterior do armário, resultante do efeito conjunto das aberturas laterais e frontal, situadas na base. Esta tendência possibilita indicar os locais no interior, onde o escoamento possui uma maior magnitude e onde poderão ser instalados os equipamentos de telecomunicações, por forma a tirar partido dessas localizações e permitir um arrefecimento mais eficaz. Os valores da velocidade nos diversos pontos de monitorização experimental, permitem igualmente aferir essas mesmas localizações, além de permitirem caracterizar globalmente o escoamento como turbulento, através do respetivo cálculo do número de Reynolds e das perturbações estruturais existentes no interior do armário.

Aliado aos resultados experimentais, também a utilização do programa de DFC *Fluent*, permite corroborar o que anteriormente foi concluído pelos resultados experimentais, através da escolha de um refinamento de malha adequado, bem como de um modelo de turbulência apropriado ao escoamento e às condições de fronteira em causa. O estudo do desempenho de diversos modelos de turbulência, para o escoamento no interior do armário de telecomunicações em causa, foi um dos objetivos propostos, tendo-se verificado que dentro do conjunto de modelos testados, aquele que providencia melhores resultados é o modelo de turbulência *k-ε Realizable*. Também a utilização do método de interpolação para a discretização PRESTO, permite melhorar significativamente a previsão dos resultados, em conjugação com o teorema de Green-Gauss baseado nas faces das células (*cell based*).

O recurso à informação proveniente deste tipo de *softwares*, quando devidamente validada, possibilita o estudo de diversas condições de funcionamento e a influência de distintos parâmetros e de variáveis para o escoamento interior, de uma forma rápida em detrimento dos ensaios experimentais, trazendo por isso poupanças económicas à investigação. Dentro desse conjunto, o *Fluent* mostra-se assim, uma ferramenta bastante versátil no estudo do escoamento interior dos armários de telecomunicações, podendo ser utilizado para a otimização do desempenho térmico dos mesmos.

6.2. Sugestão para trabalho futuro

Finalizado o trabalho em causa e tendo sido cumpridos os objetivos propostos, surgem novas necessidades de estudo sobre o tema em questão, visto que este é bastante abrangente e possibilita a investigação sobre diversas condicionantes. A contínua necessidade do desenvolvimento de estudos científicos sobre os armários exteriores de telecomunicações móveis, justifica-se não só pela escassez de literatura sobre os mesmos, principalmente no que respeita à caracterização do escoamento interior e o respetivo desempenho térmico dos armários, mas também o contínuo desenvolvimento e crescimento desta área, cada vez mais designada como o sector quaternário da atividade económica.

Uma sugestão, passa pela utilização do *Fluent* para o estudo numérico do desempenho térmico do armário com um elemento dissipador de calor, como é o caso da caixa construída e utilizada no ensaio experimental, permitindo a utilização dos dados aqui obtidos tanto para a modelação computacional, como para a comparação com as previsões do modelo. Este estudo poderá conceder informação sobre as regiões mais críticas em termos de temperatura e o comportamento térmico do armário, na presença de mais elementos dissipadores de calor no seu interior.

A influência de diferentes condições ambientais no desempenho térmico do armário, através do ensaio experimental do armário numa câmara climática, complementado com a consequente modelação computacional do mesmo, seria outra possibilidade de estudo. Este permitirá caracterizar o desempenho térmico do armário, tendo em consideração os requisitos térmicos de diversas localizações geográficas ou de funcionamento.

Por último a alteração das características físicas do armário ou o estudo do desempenho térmico de armários similares, para a comparação entre os mesmos, também suscita bastante interesse. Pode ser alterada a disposição dos equipamentos de telecomunicações no interior, com vista à diminuição da temperatura interna ou o aumento da eficiência dos

Conclusão

ventiladores, bem como a utilização de diferentes materiais na envolvente para auxiliar o arrefecimento, tendo como exemplo os PCMs.

Referências Bibliográficas

- Ahmadi, M., Gholami, A. e Bahrami, M. (2014), “*Passive Cooling of Outside Plant Power Systems, a Green Solution to Reduce Energy Consumption*”, IEEE 36th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC).
- Alawadhi, E.M. e Amon, C.H. (2003), “*PCM Thermal Control Unit for Portable Electronic Devices: Experimental and Numerical Studies*”, IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS AND PACKAGING TECHNOLOGIES, 26, 116-125.
- Alcatel-Lucent. (2009), “*Alcatel-Lucent 7705, SERVICE AGGREGATION ROUTER | RELEASE 2.1, SAR-F CHASSIS INSTALLATION GUIDE*”, Alcatel-Lucent.
- Amadi, E.C., Oluigbo, I.V., Eze, U.F. e Egonu, J.C. (2015), “*Energy Efficient Networks: A Critical Review*”, International Journal of Research 2(10), pp. 176-182.
- ANSYS, INC (2011a), “*ANSYS FLUENT Theory Guide*”, 14^a ed.
- ANSYS, INC (2011b), “*ANSYS FLUENT User’s Guide*”, 14^a ed.
- ASHRAE, Comité Técnico (TC) 9.9 (2012), “*IT Equipment Thermal Management and Controls*”, ASHRAE 9.9 Mission Critical Facilities, Technology Spaces, and Electronic Equipment.
- Beitelmal, A.H., Saad, M.A. e Patel, C.D. (2000), “*The effect of inclination on the heat transfer between a flat surface and an impinging two-dimensional air jet*”, International Journal of Heat and Fluid Flow 21, pp. 156-163.
- Boukhanouf, R. e Haddad, A. (2010), “*A CFD analysis of an electronics cooling enclosure for application in telecommunication systems*”, Applied Thermal Engineering 30, pp. 2426-2434.
- Chen, Y., Zhang, Y. e Meng, Q. (2009), “*Study of ventilation cooling technology for telecommunication base stations in Guangzhou*”, Energy and Buildings 41, pp. 738-744.
- Chen, Y., Zhang, Y. e Meng, Q. (2012), “*Study of ventilation cooling technology for telecommunication base stations: Control strategy and application strategy*”, Energy and Buildings 50, pp. 212-218.

- Chin, C.S. (2013), *“Computer-aided control systems design”*, Boca Raton, FL: CRC Press.
- Dokkar, B., Negrou, B., Chenouff, N., Settou, N. e Benmhidi, A. (2010), *“Passive cooling of telecom shelter using solar chimney with Earth-air heat exchanger”*, Recent Advances in Energy, Environment, Biology and Ecology, pp. 134-138.
- Ebm-papst. (2006), *“4300 Series”*, ebm-papst Inc., Farmington, EUA.
- Ericsson. (2010), *“RBS Description, RBS 6601”*, Ericsson AB.
- Ericsson. (2016), *“ERICSSON MOBILITY REPORT”*, Ericsson, Estocolmo, Suécia.
- ETSI, European Standard: ETSI EN 300 019-1-3. (2009), *“Environmental Engineering (EE) - Environmental conditions and environmental tests for telecommunications equipment”*. Disponível em:
http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300001_300099/3000190103/02.03.02_60/en_3000190103v020302p.pdf
- Ferziger, J.H. e Perić, M. (2002), *“Computational methods for fluid dynamics - 3rd edition”*, Springer-Verlag, Berlim, Alemanha.
- Fluke. (2008), *“Model 175, 177 & 179 True RMS Multimeters, Users Manual”*, Fluke Corporation, Washington, EUA.
- Gaspar, P.D. (2008), *“Otimização do Desempenho e da Eficiência Energética de Equipamentos de Refrigeração”*. Covilhã, Portugal: Universidade da Beira Interior.
- Gurram, S.P., Suman, S.K., Joshi, Y.K. e Fedorov, A.G. (2004), *“Thermal Issues in Next-Generation Integrated Circuits”*, Device and Materials Reliability 4, pp. 709-714.
- Hendrix, M. e Allen, L. (2010), *“CFD Modeling and Thermal Test Results for Telecommunications Shelter Cooling Systems”*, IEEE 32nd International Telecommunications Energy Conference (INTELEC).
- Hernon, D. (2010), *“Enhanced Energy Efficiency and Reliability of Telecommunication Equipment with the Introduction of Novel Air Cooled Thermal Architectures”*, Bell Labs Technical Journal 15(2), pp. 31-51.
- Hoang, M.L., Verboven, P., De Baerdemaeker, J. e Nicolai, B.M. (2000), *“Analysis of the air flow in a cold store by means of computational fluid dynamics”*, International Journal of Refrigeration 23, pp. 127-140.

- Hong, Y., Li, Y. e Shi, J. (2009), “*Geothermal Cooling Solution Research For Outdoor Cabinet*”, IEEE 15th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC).
- Huawei. (2012), “*BBU3900 Description*”, Huawei Technologies CO., Ltd., Shenzhen, China.
- Hughes, B.R., Calautit, J.K. e Ghani, S.A. (2012), “*The development of commercial wind towers for natural ventilation: A review*”, Applied Energy 92, pp. 606-627.
- IPMA, I.P. (2015), “*Boletim Climatológico Mensal - julho 2015*”.
- IPMA, I.P. (2016a), “*Boletim Climatológico Anual - 2015, Portugal Continental*”.
- IPMA, I.P. (2016b), “*Boletim Climatológico Mensal - agosto 2016*”.
- Joshi, Y., Azar, K., Blackburn, D., Lasance, C. J., Mahajan, R. e Rantala, J. (2003), “*How well can we assess thermally driven reliability issues in electronic systems today? Summary of panel held at the Therminic 2002*”, Microelectronics Journal 34, pp. 1195-1201.
- Junpeng, H., Dong, H., Wu, Z., Haifeng, W., Yushan, Z., Hong, G., Gemma, P., Griffa, G., Cuchiatti, F. e Bianco, C. (2010), “*Autocleaning Filter Used on Air Direct Cooling System Outdoor Cabinet*”, IEEE 32nd International Telecommunications Energy Conference (INTELEC).
- Kannan, N. (2011), “*DESIGN AND MODELING TECHNIQUES FOR COOLING OF TELECOMMUNICATION SYSTEMS*”, Arlington, Estados Unidos da América: University of Texas.
- Kaptein, R., Luo, S., Wei, Q. e Wang, O. (2014), “*Smart Management of LTE Outdoor Site Support Cabinet- Migrate Towards Simplicity*”, IEEE 36th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC).
- Lakshminarayanan, V. e Sriraam, N. (2014), “*The Effect of Temperature on the Reliability of Electronic Components*”, IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (IEEE CONECCT).
- Lasance, C.J.M. (2003), “*Thermally driven reliability issues in microelectronic systems: status-quo and challenges*”, Microelectronics Reliability 43, pp. 1969-1974.

- Le Masson, S., Nörtershäuser, D., Mondieig, D. e Louahlia-Gualous, H. (2013), “*Towards passive cooling solutions for mobile access network*”, *Annales des télécommunications*, pp. 125-132.
- Li, B. e Alleyne, A.G. (2010), “*A dynamic model of a vapor compression cycle with shut-down and start-up operations*”, *INTERNATIONAL JOURNAL OF REFRIGERATION* 33, pp. 538-552.
- Lineykin, S., e Ben-Yaakov, S. (2005), “*Modeling and Analysis of Thermoelectric Modules*”, IEEE 20th Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC).
- Lubritto, C., Petraglia, A., Vetromile, C., Caterina, F., D'Onofrio, A., Logorelli, M., Marsico, G. e Curcuruto, S. (2008), “*Telecommunication power systems: energy saving, renewable sources and environmental monitoring*”, IEEE 30th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC).
- Lubritto, C., Petraglia, A., Vetromile, C., Curcuruto, S., Logorelli, M., Marsico, G. e D'Onofrio, A. (2011), “*Energy and environmental aspects of mobile communication systems*”, *Energy* 36, pp. 1109-1114.
- Mariam, F., Raju, U., Mulay, V., Agonafer, D., Sivanandan, D. e Hendrix, M. (2009), “*Thermal design considerations of air-cooled high powered telecommunication cabinets*”, IEEE 25th Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM).
- Mendes, A.C. (2000), “*Introdução à Mecânica dos Fluidos*”, Covilhã: Universidade da Beira Interior.
- METREL. (2013), “*Equipment for Laboratories and Schools*”, METREL d.d., Horjul, Eslovénia.
- Monteiro, L.H. (2015), “*ESTUDO E MODELAGEM DE UM ANEMÔMETRO A FIO QUENTE OPERANDO EM TEMPERATURA CONSTANTE*”. Rio de Janeiro, Brasil: Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Moore, A.L. e Shi, L. (2014), “*Emerging challenges and materials for thermal management of electronics*”, *Materials Today* 17(4), pp. 163-174.
- Mugunthamala, S. e Selvi, S.T. (2014), “*Energy Saving Transmission for Green Communication*”, *International Journal of Research in Science & Technology* 1(2).

- Muralidharan, B., Mariam, F. A., Mulay, V., Agonafer, D. e Hendrix, M. (2009). “*Impact of Double Walled Telecommunication Cabinet on Solar Load: Natural and Forced Convection*”, ASME, InterPACK.
- Muralidharan, B., Mariam, F. A., Karajgikar, S., Agonafer, D. e Hendrix, M. (2010). “*Energy Minimization Based Fan Configuration for Double Walled Telecommunication Cabinet with Solar Load*”, IEEE 26th Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM).
- NASA (2016), “*Data.GISS: GISTEMP Update: NASA Analysis Finds August 2016 Another Record Month*”. Consultado a setembro 20, 2016. Disponível em: <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/news/20160912/>
- Nie, Q. e Joshi, Y. (2006), “*Multi-scale Thermal Modeling Methodology for Electronics Cabinets*”, 10th Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronics Systems (ITHERM '06).
- Nist (2008), “*Coefficients for type T thermocouples*”. Consultado a outubro 03, 2016. Disponível em: http://srdata.nist.gov/its90/download/type_t.tab
- Nörtershäuser, D., Masson, S. L., Volkov, T., Huttunen, J. e Douchet, F. (2014), “*LIQUID COOLING FOR MOBILE BASE STATION*”, IEEE 30th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC).
- Oliveira, P.d. (2001), “*Mecânica Computacional*”, Covilhã: Universidade da Beira Interior.
- Oliveira, L.A e Lopes, A.G. (2010), “*Mecânica dos Fluidos*”, 3^a ed. LIDEL, Lisboa.
- Patrício, C.M.R. (2015), “*Caracterização do comportamento térmico de um armário exterior de telecomunicações móveis*”. Covilhã, Portugal: Universidade da Beira Interior.
- PicoTech. (2016), “*USB TC-08 Temperature Logger, User's Guide*”, Pico Technology Ltd., Cambridgeshire, Reino Unido.
- PT Inovação. (2006), EMIL0-SNT, [Suporte.ptinovacao.pt](http://suporte.ptinovacao.pt). Consultado a Julho 26, 2016. Disponível em: <http://suporte.ptinovacao.pt/produtos-1/produtos/sdh/emilong/emilosnt>.
- Purcell Systems (2012), “*Selecting Outdoor Enclosures for Wireless and Cellular Communications*”.

- Rodgers, P. e Eveloy, V. (2003) "*Prediction of Microelectronics Thermal Behavior in Electronic Equipment: Status Challenges and Future Requirements*", International Conference on Thermal and Mechanical Simulation and Experiments in Micro-Electronics and MicroSystems.
- Rogers, G.F.C. e Mayhew, Y.R. (1995), "*Thermodynamic and transport properties of fluids*", Oxford, UK: B. Blackwell.
- Romkes, S., Dautzenberg, F., van den Bleek, C. e Calis, H. (2003). "*CFD modelling and experimental validation of particle-to-fluid mass and heat transfer in a packed bed at very low channel to particle diameter ratio*", Chemical Engineering Journal 96, pp. 3-13.
- Roy, S.N. (2008), "*Energy Logic: A Road Map to Reducing Energy Consumption in Telecommunications Networks*", IEEE 30th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC).
- Samba, A., Louahli-Gualous, H., Le Masson, S. e Nörterhäuser, D. (2013), "*Two-phase thermosyphon loop for cooling outdoor telecommunication equipments*", Applied Thermal Engineering 50, pp. 1351-1360.
- Sharma, P. (2013), "*Evolution of Mobile Wireless Communication Networks - 1G to 5G as well as Future Prospective of Next Generation Communication Network*", International Journal of Computer Science and Mobile Computing, pp. 47-53.
- Shende, M.D. e Mahalle, A. (2013), "*Cooling Of Electronic Equipments with Heat Sink: A Review of Literature*", IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering 5(2), pp. 56-61.
- Silva, P.D. (2010), "*Apontamentos de Transmissão de Calor*", Covilhã: Universidade da Beira Interior.
- Silva, P.D. (2015), "*Energética de Edifícios*", Covilhã: Universidade da Beira Interior.
- Sisk, L. (2014), "*Energy Efficient Cooling Strategies for Telecom*", IEEE 36th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC).
- Sun, X., Zhang, G., Medina, M.A., Liu, T. e Liao, S. (2014), "*A study on the use of phase change materials (PCMs) in combination with a natural cold source for space cooling in telecommunication base stations (TBSs) in China*", Applied Energy 117, pp. 95-103.

- Sun, X., Zhang, G., Medina, M.A. e Liao, S. (2015), “*Performance of a free-air cooling system for telecommunications base stations using phase change materials (PCMs): In-situ tests*”, Applied Energy 147, pp. 325-334.
- Sundaram, A.S., Seeniraj, R.V. e Velraj, R. (2010), “*An experimental investigation on passive cooling system comprising phase change material and two-phase closed thermosyphon for telecom shelters in tropical and desert regions*”, Energy and Buildings, pp. 1726-1735.
- Sutterlin, W.R. (2015), “*A brief comparison of ice packs, salts, paraffins and vegetable-derived phase change materials*”. Consultado a setembro 24, 2016. Disponível em: <http://www.thermosafe.com>.
- testo. (2005), “*testo 425, Thermal anemometer*”, testo AG, Lenzkirch, Alemanha.
- Tu, R., Liu, X. e Jiang, Y. (2011), “*Energy performance analysis on telecommunication base station*”, Energy and Buildings 43, pp. 315-325.
- Véras, J.C.d.C. (2014), “*Análise experimental dos efeitos termoelétricos em geradores termoelétricos*”, João Pessoa, Brasil: Universidade Federal da Paraíba.
- Viatel. (s.d.), “*ABE Armário Base Exterior*”, Viatel S.A., Viseu, Portugal.
- Wankhede M., Khaire, V. e Goswami, A. (2007), “*Evaluation of Cooling Solutions for Outdoor Electronics*”, IEEE 9th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC).
- Wendt, J.F. (ed.) (2009), *Computational fluid dynamics*, 3ª ed. Springer, Berlim.
- Yuping, H., Shengqin, J., Yunhui, Z., Xiaoming, K., Qiao, C., Cucchiatti, F. e Griffa, G. (2008a), “*ENERGY SAVING ACTIVE COOLING SYSTEMS FOR OUTDOOR CABINET*”, IEEE 30th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC).
- Yuping, H., Shengqin, J., liqian, Z., Qiao, C. e Bianco, c., (2008b), “*Cooling System of Outdoor Cabinet using Underground Heat Pipe*”, IEEE 30th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC).
- Zhai, Z.J., Zhang, Z., Zhang, W. e Chen, Q.Y. (2007), “*Evaluation of Various Turbulence Models in Predicting Airflow and Turbulence in Enclosed Environments by CFD: Part 1 - Summary of Prevalent Turbulence Models*”, HVAC&R Research 13(6), pp. 853-870.

Zhang, Y., Chen, Y., Wu, J. e Meng, Q. (2008), “*Study on energy efficient envelope design for telecommunication base station in Guangzhou*”, Energy and Buildings 40, pp. 1895-1900.

Zhang, P., Wang, B., Shi, W., Han, L. e Li, X. (2013), “*Simulation on energy performance of air-conditioning system assisted with thermosyphon used in telecommunication base station*”, Proceedings of BS2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, pp. 1548-1553.

Zhou, F., Chen, J., Ma, G. e Liu, Z. (2013), “*Energy-saving analysis of telecommunication base station with thermosyphon heat exchanger*”, Energy and Buildings 66, pp. 537-544.