



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR  
Engenharia

# **Caracterização do comportamento térmico de um armário exterior de telecomunicações móveis**

**Carlos Miguel Rosado Patrício**

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

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

**Covilhã, Setembro de 2015**



# Agradecimentos

Esta dissertação foi fruto de um longo trabalho, não apenas meu, mas de diversas pessoas e instituições que deram o seu valioso contributo.

Primeiramente, quero endereçar o meu agradecimento aos professores que me orientaram na execução desta dissertação, o meu orientador Professor Doutor Pedro Dinho Silva e o meu co-orientador Professor Doutor Luís Pires, aos quais agradeço pelo apoio que me foi concedido durante as diversas etapas que envolveram este trabalho.

Desejo também agradecer à Viatel pela disponibilidade demonstrada para interagir com o meio académico, permitindo unir esforços a fim de obter um resultado proveitosos para ambos. Agradeço também o tempo cedido pelos engenheiros envolvidos nesta sinergia.

Ainda, um obrigado à minha família e amigos, que de forma mais ou menos direta, apoiaram e tornaram possível este alcançar este objetivo.



# Resumo

A crescente utilização de tecnologias de telecomunicações pela sociedade tem levado a que a indústria desenvolva infraestruturas que suportem esse crescimento. Os armários exteriores de telecomunicações são um elemento importante na rede de telecomunicações, permitindo albergar e proteger os equipamentos necessários ao funcionamento da rede das condições adversas.

Este género de armários deverá ter um correto desempenho térmico para garantir uma temperatura inferior a 55 °C, limite para o funcionamento dos equipamentos, e evitar um consumo demasiado elevado de eletricidade. Este estudo propõe-se caracterizar o desempenho térmico do armário com recurso estudos numéricos realizados com o DesignBuilder/EnergyPlus. O desenvolvimento do modelo numérico é acompanhado de estudos experimentais, utilizando um armário real em funcionamento, de forma a garantir que o modelo é válido e que permite obter resultados fiáveis.

Entre os principais resultados, pode-se observar que a utilização de ventilação mecânica é eficaz na extração de calor do interior do armário, porém, existe um limite para o qual o aumento do valor de caudal de ar não se traduz, de forma significativa, em diminuição da temperatura interior. As propriedades radiantes dos materiais utilizados na construção do armário influenciam significativamente o comportamento térmico do armário, sendo que, os materiais metálicos apresentam melhor desempenho que os não metálicos, dentro dos casos estudados. A localização geográfica da EBT também é um fator fulcral para o comportamento térmico do armário.

Os resultados permitem elaborar, de forma quantitativa, uma caracterização térmica do armário e melhorar o perfil de utilização do mesmo. Analisando os diversos gráficos relativos aos ensaios numéricos efetuados torna-se possível analisar de que forma os vários fatores afetam a temperatura no interior do armário. Através de mais estudos seria possível elaborar uma caracterização mais completa, sendo possível caracterizar mais casos.

## Palavras-chave

Modelação numérica, caracterização térmica, armário de telecomunicações, simulação numérica



# Abstract

The growing use of telecommunication technologies by society has led the industry to develop infrastructure to support this growth. The telecommunications outdoor cabinets are an important element in the telecommunications network, allowing host and protect the equipment needed to run the network in adverse conditions.

The enclosure must have a proper thermal performance to ensure a temperature below 55 ° C, limit for the operation of equipment, and avoid an excessive consumption of electricity. This study aims to characterize the thermal performance of the cabinet using numerical studies with DesignBuilder/EnergyPlus. The development of the numerical model is followed by experimental studies using a real cabinet in operation, to ensure that the model is valid and allows to obtain reliable results.

In the main results, it can be observed that the use of mechanical ventilation is effective in the extraction of heat from the interior of the cabinet, however, there is a limit to which the increase in air flow rate does not result, significantly, in decrease on inner temperature. The radiant properties of the materials used in the construction of cabinet influence significantly the thermal behavior of the cabinet, metal materials perform better than non-metallic, within the cases studied. The geographical location of the EBT is also a key factor for the thermal behavior of the cabinet.

Results allowed to elaborate, quantitatively, a thermal characterization of the cabinet and improve the utilization profile. Analyzing the various graphics concernig numerical experiments carried out becomes possible to analyze how the different factors affect the temperature inside the cabinet. Through further studys would be possible to develop fuller characterization, and characterize different cases.

## Keywords

Numerical modeling, thermal characterization, telecommunications cabinet, numerical simulation



# Índice

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. Introdução</b> .....                           | <b>1</b>  |
| 1.1. Perspetiva geral.....                           | 1         |
| 1.2. O problema em estudo e a sua relevância .....   | 3         |
| 1.3. Revisão bibliográfica .....                     | 4         |
| 1.4. Objetivos e contribuição da dissertação .....   | 8         |
| 1.5. Visão geral e organização da dissertação .....  | 8         |
| <b>2. Características do armário em estudo</b> ..... | <b>11</b> |
| 2.1. Introdução .....                                | 11        |
| 2.2. Aspetos Construtivos .....                      | 12        |
| 2.3. Equipamento interior .....                      | 14        |
| 2.4. Dispositivo para controlo da temperatura .....  | 18        |
| 2.5. Nota conclusiva .....                           | 22        |
| <b>3. Modelação numérica</b> .....                   | <b>23</b> |
| 3.1. Introdução .....                                | 23        |
| 3.2. DesignBuilder/EnergyPlus .....                  | 24        |
| 3.2.1. Submenu <i>Activity</i> .....                 | 30        |
| 3.2.2. Submenu <i>Construction</i> .....             | 30        |
| 3.3. Implementação do modelo.....                    | 32        |
| 3.4. Validação experimental .....                    | 37        |
| 3.5. Nota conclusiva .....                           | 47        |
| <b>4. Estudo de casos</b> .....                      | <b>49</b> |
| 4.1. Aspetos referentes à modelação.....             | 49        |
| 4.2. Resultados e discussão.....                     | 50        |
| 4.3. Nota conclusiva .....                           | 63        |
| <b>5. Conclusão</b> .....                            | <b>65</b> |
| 5.1. Recapitulação .....                             | 65        |

|  |           |
|--|-----------|
| 5.2. Sugestão para trabalho futuro ..... | 66        |
| <b>Referências bibliográficas .....</b>  | <b>69</b> |

# Lista de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Previsão do tráfego móvel a nível mundial até 2020, levada a cabo pelo grupo Ericsson (2014)..          | 2  |
| Figura 2 - Armário exterior de telecomunicações. ....  | 12 |
| Figura 3 - Vista explodida do armário. ....  | 13 |
| Figura 4 - Interior do painel lateral (esquerda) e exterior do painel lateral (direita).....                       | 14 |
| Figura 5 - Quadro de corrente AC.....  | 15 |
| Figura 6 - Quadro de corrente DC. ....   | 16 |
| Figura 7 - Unidade de processamento de banda base BBU3900 Huawei. ....   | 16 |
| Figura 8 - Visão explodida do Alcatel-Lucent 7705. ....  | 17 |
| Figura 9 - Equipamento EMIL0-SNT.....  | 18 |
| Figura 10 - Esquema ilustrativo do funcionamento do arrefecimento através de ventilação forçada. ....              | 19 |
| Figura 11 - Gráfico da curva característica do ventilador.....   | 21 |
| Figura 12 - Exemplo de armário com sistema de ar condicionado para arrefecimento. ....                             | 21 |
| Figura 13 - Fluxograma do modo de funcionamento do EnergyPlus (EnergyPuls, 2014).....                              | 25 |
| Figura 14 - Diagrama dos dados de entrada e saída do EnergyPlus (Afonso, 2009). ....                               | 27 |
| Figura 15 - Ambiente gráfico do DesignBuilder. ....  | 28 |
| Figura 16 - Organização hierárquica dos modelos do DesignBuilder. ....   | 28 |
| Figura 17 - Quadro de calendarização do modo “7/12 Schedule”. ....   | 29 |
| Figura 18 - Histograma para definição dos valores das taxas de utilização.....                                     | 29 |
| Figura 19 - Imagem ilustrativa das camadas utilizadas num elemento construtivo.....                                | 31 |
| Figura 20 - Cacterísticas do “Component Block”. ....   | 32 |
| Figura 21 - Geometria final do modelo numérico. ....   | 33 |
| Figura 22 - Orientação do modelo numérico. ....  | 34 |
| Figura 23 - Organização hierárquica do modelo numérico utilizado. ....   | 35 |
| Figura 24 - Menu para escolha dos materiais construtivos do modelo. ....   | 36 |
| Figura 25 -Esquema do sistema de ventilação forçada do modelo numérico. ....                                       | 37 |
| Figura 26 - Localização dos analisadores de temperatura dentro do armário. ....                                    | 39 |
| Figura 27 - Exemplo do analisador utilizado nas medições de temperatura do interior do armário. ....               | 39 |
| Figura 28 - Valores experimentais da temperatura no interior do armário. ....                                      | 41 |
| Figura 29 - Valores numéricos e experimentais da temperatura exterior.....   | 42 |
| Figura 30 - Valores numéricos e experimentais da radiação solar. ....  | 43 |
| Figura 31 - Gráfico com os valores da temperatura exteriores, numérica e experimental. ....                        | 43 |
| Figura 32 - Gráfico com os valores de radiação solar, numérica e experimental. ....                                | 44 |
| Figura 33 - Gráfico com os valores da temperatura no interior do armário, numérica e experimental. ....            | 45 |
| Figura 34 - Gráfico com os valores da temperatura exteriores, numérica e experimental. ....                        | 45 |
| Figura 35 - Gráfico com os valores de radiação solar, numérica e experimental. ....                                | 46 |
| Figura 36 - Gráfico com os valores da temperatura no interior do armário, numérica e experimental. ....            | 47 |
| Figura 37 - Valores médios diários para a temperatura no interior do modelo do armário.....                        | 50 |
| Figura 38 - Valores de temperatura no interior do armário para diferentes valores de absorvidade. ....             | 51 |
| Figura 39 - Temperatura no interior do armário em função do material de construção do armário. ....                | 52 |
| Figura 40 - Temperatura no interior do armário em função da potência térmica dissipada no interior do armário..... | 53 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 41 - Temperatura no interior do armário em função do valor de caudal imposto. ....  | 55 |
| Figura 42 - Temperatura máxima atingida em função do caudal da ventilação mecânica. ....   | 56 |
| Figura 43 - Temperatura no interior do armário em função da potência térmica dissipada no interior do armário, para um caudal de ar de 100 m <sup>3</sup> /h. .... | 57 |
| Figura 44 - Temperatura interior máxima atingida em função do valor da potência térmica dissipada no interior do armário. ....                                     | 58 |
| Figura 45 - Temperatura no interior do armário em função do sombreamento. ....   | 59 |
| Figura 46 - Temperatura máxima atingida em função do valor de sombreamento. ....   | 59 |
| Figura 47 - Temperatura do ar no interior do armário em função da localização geográfica (Portugal). ..  | 61 |
| Figura 48 - Temperatura no interior do armário em função da localização geográfica (hemisfério norte). 62  |    |

# Lista de Tabelas

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 - Equipamentos instalados no interior do armário em estudo. ....   | 15 |
| Tabela 2 - Características dos ventiladores utilizados no armário. ....   | 20 |
| Tabela 3 - Propriedades térmicas do material do modelo estudado. ....   | 36 |
| Tabela 4 - Características de metrologia do dispositivo do <i>data logger</i> . ....                              | 40 |
| Tabela 5 - Materiais utilizados na simulação e respectivas propriedades térmicas. ....                            | 52 |
| Tabela 6 - Localização e dados climáticos sobre as cidades em estudo, para o mês de agosto (NASA, 2015).<br>..... | 62 |



# Nomenclatura

|                 |  |   |
|-----------------|--|---|
| $\dot{Q}_i$     | Carga térmica convectiva interna                         | [W]                                       |
| $\dot{Q}_{sys}$ | Transferência de calor relativo ao sistema de ventilação | [W]                                       |
| $\dot{m}_i$     | Caudal mássico de ar trocado entre zonas                 | [Kg·s <sup>-1</sup> ]                     |
| $\dot{m}_{inf}$ | Caudal mássico de ar infiltrado                          | [Kg·s <sup>-1</sup> ]                     |
| $C_p$           | Calor específico   | [Kj·Kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]   |
| $T_\infty$      | Temperatura de escoamento não perturbado                 | [°C] ou [K]                               |
| $T_s$           | Temperatura da superfície                                | [°C] ou [K]                               |
| $T_z$           | Temperatura na zona z                                    | [K]                                       |
| $q''$           | Fluxo de calor   | [W/m <sup>2</sup> ]                       |
| $q_{conv}$      | Taxa de calor transferido por convecção                  | [W]                                       |
| $h$             | Coefficiente convectivo                                  | [W/m <sup>2</sup> ·K]                     |
| $A$             | Área   | [m <sup>2</sup> ]                         |
| $C$             | Capacidade térmica                                       | [Kj·m·Kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ] |
| $Q$             | Caudal volúmico  | [m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ]        |
| $T$             | Temperatura  | [°C] ou [K]                               |
| $m$             | Massa  | [Kg]                                      |
| $q$             | Taxa de transferência de calor                           | [W]                                       |



## **Símbolos Gregos**

|                      |                         |
|----------------------|-------------------------|
| $\alpha$             | Absorvidade             |
| $\rho$               | Refletividade           |
| $\tau$               | Transmissividade        |
| $\tau_{m\acute{a}x}$ | Transmissividade máxima |

## **Acrónimos**

|               |   |
|---------------|---|
| <i>ABE_V2</i> | Armário Base Exterior Versão 2                |
| <i>AC</i>     | Alternating Current                           |
| <i>AVAC</i>   | Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado     |
| <i>BBU</i>    | Bandebase Unit                                |
| <i>CAD</i>    | Computer-Aided Design                         |
| <i>DC</i>     | Direct Current                                |
| <i>DFC</i>    | Dinâmica de Fluidos Computacional             |
| <i>EBT</i>    | Estação Base de Telecomunicações              |
| <i>EUA</i>    | Estados Unidos da América                     |
| <i>GSM</i>    | Global System for Mobile communication        |
| <i>MSPP</i>   | Multi-Service Provisioning Platform           |
| <i>NASA</i>   | National Aeronautics and Space Administration |
| <i>PVC</i>    | Policloreto de Vinil                          |
| <i>UBI</i>    | Universidade da Beira Interior;               |
| <i>UMTS</i>   | Universal Mobile Telecommunications System    |



# 1. Introdução

O capítulo inicial tem como propósito contextualizar o tema da presente dissertação, dar a conhecer a sua importância, bem como, apresentar trabalhos realizados na área que sejam relevantes para uma melhor compreensão da dissertação.

Este trabalho centra-se no objetivo de caracterizar o comportamento térmico de um armário exterior, utilizado na área das telecomunicações móveis. Em primeiro lugar será efetuado um enquadramento do trabalho, referindo alguns aspetos importantes da sua envolvente económica, social e empresarial. Para que o trabalho seja convenientemente compreendido é deveras importante que, antes de mais, se conheça o ambiente no qual este está inserido. Neste caso, temos como pano de fundo o sector das telecomunicações, tão presente no dia a dia da sociedade.

O importante papel que as telecomunicações representam na sociedade atual leva os agentes das áreas políticas e empresariais a fomentar o seu contínuo desenvolvimento. Para que o processo evolutivo decorra da melhor forma há que ter o sector bem caracterizado, para saber quais os aspetos que mais carecem de melhorias e quais as alterações que têm a possibilidade de trazer maior benefício. É portanto descrito de forma pormenorizada o problema em estudo, no qual se caracteriza uma pequena fração do sector das telecomunicações. São ainda expostas as razões que demonstram a importância deste trabalho.

Na revisão bibliográfica são apresentados e analisados alguns trabalhos relevantes que tenham sido efetuados na área. Seguidamente, são dados a conhecer quais os objetivos que se pretendem atingir com o estudo em causa e quais os contributos que a dissertação trará para a área.

No final deste primeiro capítulo é dada a conhecer a estrutura da dissertação, para que o leitor saiba qual a informação contida em cada capítulo, de modo a efetuar uma leitura mais proveitosa.

## **1.1. *Perspetiva geral***

No decorrer da história são inúmeros os exemplos de métodos desenvolvidos pelo Homem para aumentar a sua capacidade de comunicação, podendo ser identificados casos tanto a nível proeminentemente pessoal, como de cariz coletivo. Uma simples conversa pode ser um exemplo de comunicação circunscrito a um grupo limitado de indivíduos, enquanto um idioma pode ser visto como um instrumento de comunicação mais abrangente e de carácter social. Esta procura pela melhoria dos meios de comunicação resulta da necessidade humana de

interação e de aumentar continuamente o seu conhecimento. O progresso ao longo dos tempos culminou numa sociedade que, atualmente, depende mais das comunicações do que em qualquer outra altura da história.

A crescente indissociabilidade entre sociedade e as telecomunicações levou a um acréscimo da exigência em relação aos serviços prestados pelo sector. Existem fatores preponderantes que afetam a aceitação do mercado em relação a um determinado serviço de telecomunicações, como o preço, fiabilidade ou cobertura geográfica. Esta última, cobertura geográfica, tem uma elevada importância devido à facilidade que as pessoas têm em se deslocar atualmente, o que levou a uma elevada disseminação das tecnologias móveis.

Segundo um relatório realizado pelo grupo Ericsson (2014), existiam 6,9 mil milhões de subscrições de serviço de telemóvel a nível global, sendo que 2,5 mil milhões correspondiam a serviço com transmissão de dados de banda larga. Ao contrário do que acontecia anteriormente a principal utilização do telemóvel já não passa unicamente por chamadas de voz. O aparecimento dos *smartphones* e *tablets* aliado ao aumento da taxa de transferência de dados permitida pelas redes móveis permitiu criar um novo perfil de consumidor. Atualmente os dispositivos móveis permitem aceder a cada vez mais serviços, como visualização de vídeos, videochamadas entre outros, o que faz aumentar o tráfego nas redes móveis. Entre o ano de 2010 e 2014 o tráfego associado às chamadas de voz não sofreu um aumento muito significativo, enquanto a transferência de dados foi responsável por um aumento do tráfego muito significativo. Na figura 1 é possível observar o aumento do tráfego móvel mundial que é expectável para o ano de 2020, sem influência notória das chamadas de voz.

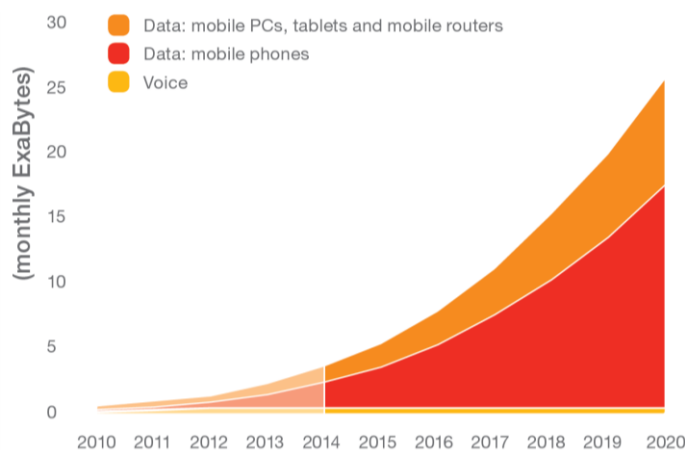


Figura 1 - Previsão do tráfego móvel a nível mundial até 2020, levada a cabo pelo grupo Ericsson (2014).

Uma rede de telecomunicações faz a ligações entre diversos terminais, permitindo a troca de informação entre dispositivos móveis, através de uma rede fixa. A base da infraestrutura de uma rede de telecomunicações são as EBT (Estação Base de Telecomunicações), que de acordo com Che net *al.* (2012) apresentam consumos energéticos superiores a outros edifícios públicos devido à sua elevada densidade energética e horário de funcionamento contínuo.

Com a crescente procura energética a nível mundial e conseqüente aumento do preço da mesma, torna-se relevante saber qual o consumo energético associado ao sector das telecomunicações. O impacto ambiental causado pela produção de energia também não pode ser descurado. O relatório elaborado por Roy (2008) estima que, no ano de 2007, o sector tenha sido responsável pelo consumo de 164 TWh, o correspondente a 1% de toda a energia consumida a nível mundial. De acordo com Scheck (2008) as infraestruturas de telecomunicações são responsáveis por até 90% do consumo energético de todo o sector, sendo que em 2008 existiam aproximadamente 4 mil milhões de EBT em todo o mundo, com uma taxa de crescimento esperada na casa dos dois dígitos.

As duas principais infraestruturas que servem de abrigo aos equipamentos de telecomunicações das EBT são os armários exteriores de telecomunicações e os *shelters*. Os armários exteriores são pequenos equipamentos com a capacidade de albergar e proteger os dispositivos de telecomunicações. Os *shelters* têm maior dimensão e assemelham-se a uma pequena casa, sendo utilizado muitas vezes para o efeito contentores pré-construídos.

## **1.2. O problema em estudo e a sua relevância**

A sociedade, tal como está estruturada, necessita das telecomunicações em muitas tarefas do dia a dia, e não é exepetável que haja um retrocesso nesta dependência, antes pelo contrário, as telecomunicações estão cada vez mais presentes na vida das pessoas. Para acompanhar o crescimento do setor das telecomunicações, existe ao mesmo tempo, um crescimento das infraestruturas que servem de base às comunicações sem fios. Sendo as EBT a ligação entre os dispositivos móveis pessoais e a rede fixa, na qual circula todo o tráfego de comunicações, torna-se de máxima importância conhecer o seu funcionamento.

Com a diminuição das dimensões dos aparelhos eletrónicos necessários ao funcionamento das EBT os armários exteriores começaram a ser a estrutura escolhida para albergar os equipamentos, em detrimento dos *shelters*. Os armários, em alguns períodos, necessitam da ação de um sistema ativo de dissipação de calor para manter a temperatura de funcionamento dentro de limites impostos. De acordo com Roy (2008), no passado, os sistemas de ar condicionado foram a escolha preferencial para o arrefecimento nas EBT, porém o seu elevado consumo energético aliado aos custos de manutenção e problemas de

ruído tornou viável a migração para sistemas de arrefecimento passivo ou ventilação mecânica.

Os armários exteriores de telecomunicações têm exigências em termos de temperatura interior de funcionamento, com valores mínimos e máximos. Os equipamentos de telecomunicações instalados no interior dos armários dissipam calor durante o seu funcionamento, levando ao aumento da temperatura do armário. Para contornar os problemas de sobreaquecimento existem soluções, como o recurso a ventilação mecânica ou dispositivos de ar condicionado.

A seleção do equipamento deverá ter em conta a potência térmica dissipada pelos equipamentos a instalar e a potência térmica que o armário será capaz de extrair para o exterior, dependendo das condições sob as quais vai operar. Atualmente, este processo é efetuado com base em conhecimentos empíricos, o que pode levar a armários subaproveitados ou a armários incapazes de lidar com o calor produzido no seu interior. O recurso a ferramentas computacionais para caracterizar o desempenho térmico do armário pode evitar tais problemas.

Existem diversos benefícios que podem advir de aproveitar ao máximo as capacidades do armário. Problemas ligados ao sobreaquecimento nos armários podem causar problemas no serviço de telecomunicações, onerar a manutenção do armário ou danificar equipamentos. Por outro lado, a utilização de armários subaproveitados pode exigir a utilização de mais armários do que realmente seria necessário, aumentando os custos económicos e ambientais.

### **1.3. Revisão bibliográfica**

Para que a indústria das telecomunicações possa poupar recursos económicos e se torne mais sustentável, segundo Lubritto *et al.* (2011) a redução do consumo energético das EBT é um fator fulcral para as tecnologias de comunicação. Um dos elementos que representa uma oportunidade de poupanças energéticas é a componente de arrefecimento e será sobre este tema que o presente subcapítulo vai incidir, dando a conhecer diversos trabalhos que foram realizados neste âmbito.

Os trabalhos efetuados sobre a componente térmica dos armários de telecomunicações têm como objetivo último a redução do consumo de energia, com as vantagens ambientais e económicas que daí advém. A diminuição do consumo energético associado ao arrefecimento pode ser levado a cabo por diversas formas, como, diminuir a dissipação de calor no interior do armário e ganhos térmicos provenientes do exterior, outro será, alterar ou melhorar os métodos de extração de calor existentes. Em qualquer dos casos, é preponderante que exista uma boa caracterização do perfil térmico dos equipamentos, de forma a optar por uma estratégia mais proveitosa.

Uma boa gestão da temperatura de um armário de telecomunicações não traz apenas vantagens energéticas, tal como é referido por Ahmadi *et al.* (2014), é essencial para um bom desempenho, fiabilidade e durabilidade dos equipamentos eletrónicos. Existem vários estudos que relatam os efeitos nefastos de valores de temperatura elevada sobre os dispositivos eletrónicos. Segundo pesquisas efetuadas por Yeh (1996), mais de metade das falhas em sistemas eletrónicos ocorre devido ao deficiente controlo de temperatura. Através de resultados experimentais, obtidos por Alawadhi & Amon (2003), foi possível concluir que a diminuição de 1 °C na temperatura de um componente pode diminuir a probabilidade de falha em 4%, é ainda de salientar que um aumento da temperatura de um componente entre 10 °C e 20 °C pode duplicar a probabilidade de falha.

De acordo com Joshi *et al.* (2003), o aumento da temperatura pode tornar as reações químicas mais céleres, aumentar a corrosão, e induzir reações de oxirredução em alguns metais. Segundo Gurrum *et al.* (2004), a temperatura elevada pode também elevar a fadiga acumulada em componentes soldados. Gradientes de temperatura mais elevados podem causar alterações de frequência dos relógios internos dos processadores, o que leva a desfasamentos, tal como é referido por Banerjee *et al.* (2001).

A diminuição das dimensões dos aparelhos de telecomunicações permite que atualmente se utilizem pequenos armários exteriores para albergar os equipamentos. Anteriormente eram utilizados os *shelters* como infraestrutura de armazenamento dos aparelhos de telecomunicações, pelo que muitos dos estudos sobre a caracterização do desempenho térmico incidem sobre os *shelters*, existindo trabalhos tanto a nível experimental como a nível numérico.

O trabalho de Zhang *et al.* (2008) estuda o comportamento térmico da envolvente de um *shelter* em Guangzhou, China. Foram medidos os valores de temperatura das faces interiores e exteriores das paredes, chão e teto, velocidade e temperatura do ar extraído dos equipamentos, temperatura do ar no interior da estrutura e do ar à entrada e saída do ar condicionado. Para medir a temperatura foram utilizados termopares com uma precisão de  $\pm 0,5$  °C, os dados foram gravados num *data logger* com um intervalo de tempo de 5 minutos. O estudo conclui que a utilização de ventilação forçada em detrimento do ar condicionado é fortemente aconselhada, por forma a minimizar o consumo energético.

Existem poucos estudos com o objetivo principal de caracterizar o comportamento térmico dos armários ou *shelters* de telecomunicações. Muitos trabalhos abordam o tema de forma pouco aprofundada, estando mais focados em estudar os métodos de extração de calor. Os métodos estudados vão desde os já correntemente utilizados, com o intuito de introduzir

melhorias, a métodos mais experimentais ainda não utilizados pela indústria, com o objetivo de analisar a sua viabilidade.

Segundo Edler & Lundberg (2004), o recurso a ventilação com ar proveniente do exterior acarreta alguns inconvenientes, pois é necessário a utilização de filtros. O ar exterior pode arrastar consigo poeiras, humidade e gases corrosivos. Os filtros não são concebidos para manter a sua função durante o tempo de vida útil do armário, sendo necessário efetuar manutenção aos mesmos, o que leva a um incremento nos custos de manutenção do armário.

Estudos numéricos levados a cabo por Chen *et al.* (2009) demonstram as vantagens da utilização da utilização de ventilação forçada associada a uma estratégia controlo eficiente para arrefecer um *shelter* de telecomunicações. O programa de simulação numérica utilizado foi o PHOENICS. Segundo os resultados, é possível obter poupanças na ordem dos 50 %, com um tempo de retorno do investimento menor que dois anos.

Mariam *et al.* (2009) recorrem a um modelo DFC, validado experimentalmente, para estudar duas tipologias de sistemas de arrefecimento para as baterias instaladas num armário. São estudados parâmetros como o número e localização dos ventiladores ou velocidade do escoamento, de forma a analisar qual o perfil mais adequado. Também recorrendo a ferramentas DFC, Muralidharan *et al.* (2010) estudaram as variações de temperatura num armário de parede dupla, alterando o espaçamento entre as duas faces da parede e a velocidade do escoamento do ar. Os autores concluíram que a espessura da parede dupla tem pouca relevância na redução da carga térmica provocada pela radiação solar.

O trabalho de Sorrentino *et al.* (2010) recorre a um estudo numérico para simular uma sala de telecomunicações com um volume de 960 m<sup>3</sup>, com o objetivo de melhorar o sistema de controlo de temperatura. São introduzidas algumas simplificações no modelo numérico: toda a energia elétrica consumida é transformada em calor; a massa de fluido que entra no controlo de volume é igual ao que sai; o vapor de água é tratado como gás ideal; a pressão é constante; o controlo de volume é preenchido por uma mistura de gás com propriedades uniformes. A validação do modelo numérico é efetuada por comparação com dados experimentais. O estudo permitiu alcançar resultados que apontam para uma redução de 25% de consumo energético com a instalação de um sistema de *free-colling*.

No trabalho experimental elaborado por Samba *et al.* (2013) são efetuados testes em regime transitório e regime permanente de moda a analisar o funcionamento de um termossifão, instalado num armário exterior de telecomunicações para extrair o calor. O armário estudado é da empresa *France Telecom*, os equipamentos no seu interior foram substituídos por dissipadores de calor com potência variável, numa gama entre 0 W e 650 W. Os dissipadores de calor, por sua vez, foram colocados dentro de caixas para simular o comportamento dos

equipamentos de telecomunicações. O estudo revela que a introdução do termossifão permite elevar a capacidade de dissipação de calor do armário de 250 W, com sistema de refrigeração tradicional, para próximo de 600 W. Os testes foram efetuados tendo em consideração uma temperatura interior máxima no armário de 55 °C.

Existem outros trabalhos que estudam o efeito do termossifão como instrumento passivo de remoção de calor do interior dos armários. Os estudos realizados são de âmbito experimental e mostram resultados promissores, foram realizados por Zhou *et al.* (2013), Khodabandeh (2004) e Masson *et al.* (2013).

Um sistema de arrefecimento hidráulico, com água como fluido de trabalho, foi estudado por Nörtershäuser *et al.* (2014). A água foi escolhida dado a sua capacidade térmica ser muito superior à do ar. O trabalho é experimental e recorreu a dez resistências elétricas com 220  $\Omega$  cada para simular o calor dissipado pelos equipamentos, oito ventiladores foram utilizados para alcançar a convecção desejada. A potência térmica dissipada tinha valor variável com um máximo de 2000 W. De modo a monitorizar as temperaturas no interior do armário foram instalados termopares do tipo K, os dados foram armazenados num computador com um intervalo de um minuto entre cada registo. Os resultados obtidos mostram que o sistema tem boa capacidade de remover o calor. O maior inconveniente reside na impossibilidade de adaptação do sistema a infraestruturas já existentes e as possíveis complicações no caso de falha.

O recurso ao subsolo para arrefecimento de armários de telecomunicações já foi analisado em alguns trabalhos, a nível experimental e numérico. Um protótipo de um sistema de arrefecimento geotérmico foi estudado por Hong *et al.* (2009), alcançando um COP igual a 34, cerca de dez vezes superior a um sistema de ar condicionado convencional. O trabalho numérico executado por Yuping *et al.* (2008) concluiu que um armário com um sistema de arrefecimento geotérmico consegue dissipar 700 W de calor do interior do armário, com uma temperatura exterior de 45 °C. Cerca de 60% do calor foi dissipado diretamente no subsolo. A maior vantagem do sistema de arrefecimento geotérmico é a garantia da temperatura constante quase do subsolo, a partir de uma determinada profundidade.

Os crescentes custos económicos e ambientais associados ao consumo de energia têm levado ao reconhecimento da eficiência energética como um fator fulcral na sociedade atual. A eficiência energética tem ganho espaço na agenda de várias organizações e governos, levando à criação de normas e diretivas orientadas para um consumo de energia mais eficiente. Segundo a APCER (2015), em 2011, foi criada uma norma para que as organizações implementassem sistemas e processos para melhorar o desempenho térmico global, utilizando a energia com maior eficiência. A norma internacional tem a denominação ISO 50001 e tem o objetivo de diminuir o consumo de energia e libertação de gases poluentes. O setor das

telecomunicações não diverge desta tendência, assumindo elevada importância dadas as previsões do aumento do consumo de energia ligada às telecomunicações.

#### **1.4. *Objetivos e contribuição da dissertação***

A presente dissertação tem como finalidade caracterizar o comportamento térmico de um armário exterior de telecomunicações móveis, com recurso ao *software* DesignBuilder/EnergyPlus.

Pretende-se fazer uso das potencialidades do DesignBuilder/EnergyPlus para estudar o comportamento térmico de um armário de telecomunicações, sob diferentes condições de operação. A simulação numérica foi o método escolhido para estudar o comportamento do armário nesta fase, em detrimento de um estudo experimental, devido à facilidade e celeridade com as quais é possível alterar as condições de operação para além dos custos associados.

São objetivos da presente tese:

- a construção de um modelo numérico do armário exterior de telecomunicações recorrendo à ferramenta computacional DesignBuilder;

- a validação do modelo computacional através de informação experimental recolhida num armário real em condições normais de operação;

- a utilização do modelo computacional para a realização de estudos de caracterização do comportamento térmico de um armário de telecomunicações como resultado de diferentes condições, internas ou externas, de operação.

#### **1.5. *Visão geral e organização da dissertação***

Esta dissertação foi organizada com a preocupação de expor toda a informação de forma clara e estruturada, para que o leitor possa efetuar uma leitura e análise lúcida e eficaz. A estrutura assenta em 5 capítulos que, apesar de se interligarem entre si, podem ser considerados de forma distinta, devido a representarem fases diferentes do trabalho.

No primeiro capítulo é efetuado um enquadramento geral do trabalho efetuado e é ainda introduzida a temática em estudo. São dados a conhecer alguns trabalhos efetuados que estejam relacionados com a presente dissertação, bem como, estudos que sejam relevantes para uma análise mais eficiente da mesma. São, também, expostos os objetivos do trabalho e a importância deste.

O capítulo 2 é utilizado para descrever o armário estudado e os equipamentos presentes no seu interior. As principais características do armário são descritas, com principal enfoque para as que mais possam afetar o desempenho térmico do armário.

A informação relacionada com a simulação numérica é apresentada no terceiro capítulo. É descrito de forma breve o funcionamento do motor de simulação EnergyPlus, bem como, a sua interface gráfica, o DesignBuilder. É explicado como foi concebido o modelo numérico e de que forma foi efetuada a sua validação experimental, recorrendo a dados obtidos num armário real.

O quarto capítulo foi reservado para expor os resultados obtidos a partir das simulações efetuadas, com o objetivo de caracterizar o desempenho térmico do armário. Os resultados são expostos sob forma de gráficos para que os dados possam ser analisados de forma rápida e clara, em cada simulação é sempre feita a análise dos resultados.

No quinto e último capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho desenvolvido para a dissertação. Dada a especificidade do trabalho elaborado e a possibilidade de alargar as investigações no âmbito do estudo do desempenho térmico de um armário de telecomunicações, são propostos vários trabalhos que podem permitir ampliar o conhecimento relacionado com este género de equipamentos.



## 2. Características do armário em estudo

No presente capítulo será estudado o Armário Base Exterior Versão 2 (ABE\_V2), o equipamento que este contém e as condições necessárias para que os equipamentos funcionem corretamente. Serão descritos os aspetos construtivos que tenham relevância no comportamento térmico do armário. As características dos equipamentos do interior do armário também serão expostas, com especial atenção para os equipamentos que mais energia térmica dissipam.

### 2.1. Introdução

Os armários exteriores são utilizados para manter os equipamentos protegidos das condições meteorológicas adversas, evitar danos provocados por animais ou vandalismo e evitar o acesso indevido ao equipamento. O armário tem de ter a capacidade de extrair a energia térmica dissipada pelos equipamentos, de forma a manter temperatura no seu interior dentro da gama de temperaturas impostas para o bom funcionamento dos equipamentos. As características do armário devem, portanto, cumprir requisitos bem definidos de comportamento térmico e mecânico.

Não é comum que o interior do armário atinja temperaturas inferiores à temperatura mínima de funcionamento, mas sim, ultrapassar os valores de temperatura máxima, caso a taxa de dissipação de energia térmica não seja adequada. Portanto, é habitual que os armários de telecomunicações sejam projetados para dissipar o máximo de energia térmica possível.

A temperatura no interior do armário depende da carga térmica produzida pelos equipamentos contidos no seu interior, em conjunto com os ganhos térmicos provenientes do exterior (radiação solar, ganhos inerentes aos gradientes de temperatura entre o exterior e interior) e pela taxa de dissipação de calor. Quanto maior a carga térmica aplicada ao armário, maior terá de ser a taxa de dissipação de calor de forma a manter a temperatura no interior do armário.

Para um armário específico, a temperatura interior depende, proeminentemente, de dois fatores: a carga térmica dissipada no interior do armário e as condições meteorológicas da envolvente. Para um determinado local não é possível alterar as condições meteorológicas, sendo, porém, possível diminuir a radiação solar incidente no armário através de sombreamento e como tal diminuir a carga térmica aplicada. A variação dos equipamentos no interior do armário é outra forma de fazer variar a carga térmica no armário. Caso o armário, para uma determinada carga térmica, não seja capaz de garantir uma temperatura interior abaixo do valor máximo exigido será necessário aumentar a taxa de dissipação de calor. O incremento da taxa de dissipação de calor por ser feito através de alterações dos aspetos

construtivos do armário ou recorrendo a dispositivos com capacidade de retirar energia térmica do interior do armário.

## **2.2. *Aspetos Construtivos***

No presente subcapítulo são enumeradas as características construtivas mais importantes do armário, presente na figura 2, em especial a que mais afetam o comportamento térmico do armário. Este deverá ter características que lhe confirmam um bom comportamento térmico, mecânico, bem como, ter boa manutibilidade e acessibilidade ao interior. A nível térmico terá de manter a temperatura interior dentro da gama de temperaturas de funcionamento. A nível mecânico deverá ser garantida a integridade do próprio armário, estando preparado para condições meteorológicas adversas e dificultar o acesso ao interior por pessoas indevidas. Os equipamentos instalados no interior devem ser protegidos de possíveis entradas de água e de corpos estranhos (como sejam, insetos, detritos ou poeiras).



Figura 2 - Armário exterior de telecomunicações.

O armário é constituído por um pedestal, um espaço intermédio que alberga equipamentos de telecomunicações e quadros elétricos, e por fim, um cabeçote onde estão instalados os ventiladores. Na figura 3 é possível distinguir com facilidade a diferentes partes constituintes do armário, através da vista explodida. O pedestal tem uma altura de 150 mm e possui aberturas laterais para facilitar a entrada de cabos. Os painéis laterais são amovíveis, melhorando o acesso ao interior.

Na indústria o sistema internacional de unidades nem sempre é escolhido para quantificar as grandezas utilizadas, no caso dos armários de telecomunicações são utilizadas unidades específicas. Para as dimensões interiores são utilizados a polegada, para definir a largura, e o U, para definir a altura. As dimensões 1 U (altura) x 19'' (largura) correspondem a uma unidade de medida utilizada na instalação de equipamento eletrónico modular, cada 1 U (altura) x 19'' (largura) corresponde a 44,5 mm (altura) x 482,6 mm (largura). As dimensões exteriores do armário são de 638 mm (largura) x 1480 mm (altura) x 644 mm (profundidade). A nível interior o espaço útil para instalação de equipamento é de 25 U (altura) x 19'' (largura) x 550 mm (profundidade) ou 1111 mm (altura) x 483 mm (largura) x 550 mm (profundidade).



Figura 3 - Vista explodida do armário.

O material de construção é uma liga de alumínio (55,0%), zinco (43,4%) e silicone (1,6). A liga metálica utilizada é instalada com a espessura de 1 mm.

Todos os painéis dispõem de parede dupla com uma caixa de ar com 20 mm espessura, com o objetivo de reduzir a carga térmica aplicada ao interior do armário resultante da absorção de radiação solar. Na parede exterior, existem dois conjuntos de orifícios para a passagem de ar, um numa zona mais superior e outro na zona mais inferior. O objetivo é que o ar aquecido pela parede exposta à radiação solar possa sair pelos orifícios superiores, por efeito de convecção natural, e que através dos orifícios localizados na zona mais inferior possa entrar

ar fresco. Os orifícios foram concebidos de forma a impedir a entrada de água da chuva. Na figura 4 é possível visualizar o interior e exterior de um dos painéis laterais do armário.



Figura 4 - Interior do painel lateral (esquerda) e exterior do painel lateral (direita).

Os armários são pintados de branco, salvo raras exceções resultantes de constrangimentos de projeto, aumentando a refletividade das superfícies, o que leva à diminuição de ganhos térmicos resultantes da radiação solar.

Para garantir que a temperatura interior não ultrapassa o valor máximo admitido existe um sistema de ventilação forçada. Os ventiladores são ativados quando a temperatura atinge um valor pré-definido. No subcapítulo 2.4. o tema do controlo da temperatura do ar interior é tratado de forma mais exaustiva. Para manter o interior do armário limpo, as entradas de ar na face interior da parede dupla dispõem de filtros de ar, que se pode observar na figura 4. Os filtros têm como fim evitar a entrada de detritos e de pequenos animais, que poderiam provocar a diminuição da eficiência da ventilação e da dissipação de calor dos equipamentos ou mesmo danificar o equipamento.

### **2.3. Equipamento interior**

O equipamento instalado no interior de um armário exterior está dependente da empresa de telecomunicações que explore a EBT e dos serviços que esta pretenda fornecer. O sistema de controlo de temperatura, iluminação, sensor de abertura de porta e quadros elétricos são equipamentos instalados de origem. Os equipamentos de comunicação propriamente ditos são

da responsabilidade de cada empresa, sendo que existe um perfil habitual para as funções dos equipamentos instalados. A disposição espacial dos aparelhos pode variar de caso para caso.

Neste trabalho será estudado apenas uma possibilidade singular que se aproxime o mais possível dos casos reais, seguindo um *layout* que seja representativo da maioria dos casos. Na tabela 1 são enumerados os aparelhos que equipam o armário e que são considerados de maior relevância para o estudo do comportamento térmico.

Tabela 1 - Equipamentos instalados no interior do armário em estudo.

| Designação do equipamento | Função  | Potência térmica dissipada (valor máximo) |
|---------------------------|---|---|
| Quadro AC                 | Distribuir eletricidade em corrente alternada                             | Desprezável                               |
| Quadro DC                 | Distribuir eletricidade em corrente contínua                              | Desprezável                               |
| BBU3900 Huawei            | Unidade de processamento de banda de base                                 | 295 W                                     |
| Alcatel-Lucent 7705       | <i>Router</i>   | 60 W                                      |
| EMILO-SNT - PT Inovação   | Sistema modular do tipo <i>Multi-Service Provisioning Platform (MSPP)</i> | 120 W                                     |

Para controlar o funcionamento e proteger os aparelhos existem dois quadros elétricos separados, um de corrente alternada e outro de corrente contínua (ver nas figura 5 e figura 6), sendo que grande parte dos aparelhos instalados funciona com corrente contínua. Inicialmente a energia é fornecida sob forma de eletricidade em corrente contínua, onde é distribuída por diversos disjuntores. Posteriormente, parte desta energia destinada a alimentar os aparelhos que funcionam com corrente contínua é conduzida para um retificador. Este retificador está fora do armário. Depois da corrente alternada ser transformada em corrente contínua é novamente conduzida para o interior do armário, onde vai alimentar o quadro de corrente contínua. Todos os aparelhos ligados ao quadro de corrente contínua funcionam com um valor de tensão de -48 V.



Figura 5 - Quadro de corrente AC.



Figura 6 - Quadro de corrente DC.

A potência térmica dissipada por ambos os quadros é muito baixa, pelo que será desprezada neste trabalho.

O dispositivo BBU3900 Huawei é uma unidade de processamento de banda base, servindo de interface entre a rede fixa e uma ou mais unidades de rádio. Este equipamento está preparado para funcionar com rede de quarta geração e suporta três modos de funcionamento: o GSM, GSM+UMTS e UMTS.



Figura 7 - Unidade de processamento de banda base BBU3900 Huawei.

O BBU3900 necessita de estar instalado num espaço interior e protegido, como é o caso do armário em estudo. Este equipamento dispõe de um sistema de controlo de temperatura próprio com um ventilador, o controlador permite controlar a velocidade do ventilador e tem um sensor que mede a temperatura na placa do equipamento. Com um valor máximo de dissipação de energia térmica de 295 W, este é o equipamento presente no armário que mais contribui para elevar a temperatura no interior do armário. As dimensões deste equipamento são 442 mm (largura) x 310 mm (profundidade) x 86 mm (altura).

Este equipamento tem a classe de proteção IP20. Para um correto funcionamento, a temperatura de trabalho deverá estar compreendida entre os  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  e os  $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$ , já o valor de humidade relativa do ar deverá ser superior a 5 % e inferior a 95 %.

Outro aparelho presente neste estudo é o Alcatel-Lucent 7705 e funciona como *router* e agregador de redes. Este dispositivo funciona como ligação entre o EBT e a infraestrutura central de telecomunicações.

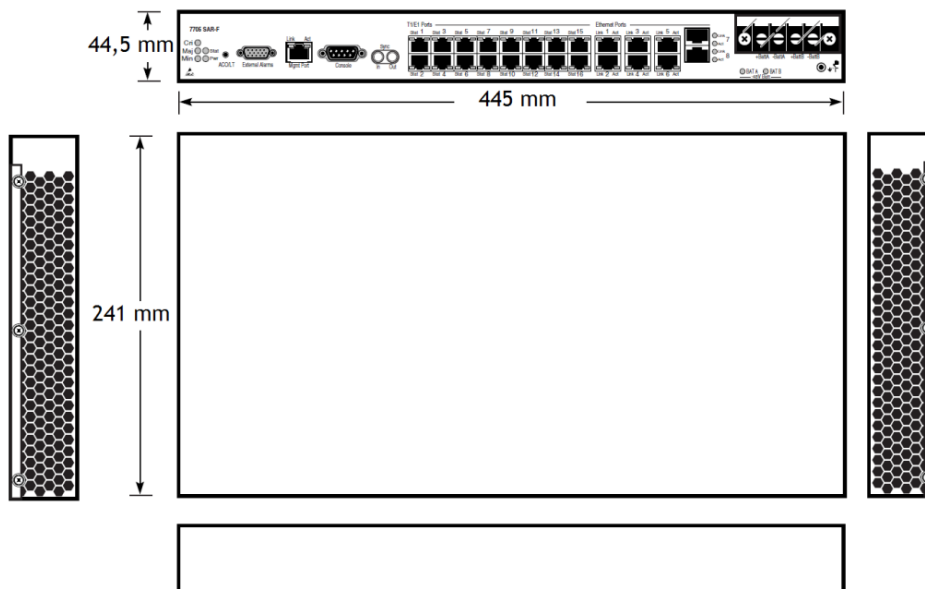


Figura 8 - Visão explodida do Alcatel-Lucent 7705.

Este dispositivo também está munido de um sistema de controlo de temperatura, na figura 8 é possível observar as grelhas de entrada de ar (lateral direita) e a de saída de ar (lateral esquerda). No total existem 5 ventiladores no interior do *router* que funcionam num regime ligado/desligado, o seu funcionamento está dependente dos valores de temperatura registados pelos sensores no interior do aparelho.

O dispositivo deve estar condicionado num local em que as condições de trabalho estejam em conformidade com as especificações de fábrica, a temperatura deverá situar-se entre os  $-40^{\circ}\text{C}$  e os  $+65^{\circ}\text{C}$ , no caso de arranque a frio será necessário um valor mínimo de  $-20^{\circ}\text{C}$ . A humidade relativa deverá ser no mínimo 5 % e no máximo 85 %, para evitar a ocorrência de condensação. As dimensões, tal com está presente na figura 8, são 445 mm (largura) x 241 mm (profundidade) x 44,5 mm (altura).

O EMILO-SNT desenvolvido pela PT Inovação é um sistema modular do tipo *Multi-Service Provisioning Platform*, permitindo ligar várias redes através de fibra ótica. A sua dissipação de calor é no máximo 120 W.



Figura 9 - Equipamento EMILO-SNT.

Os equipamentos presentes no inteiro do armário dissipam uma potência térmica máxima somada, igual a 475 W. Este cenário apenas ocorre quando todos os equipamentos estão a dissipar a máxima potência térmica para a qual foram concebidos, em funcionamento normal a potência dissipada será inferior.

#### ***2.4. Dispositivo para controlo da temperatura***

O sistema de controlo de temperatura deve estar munido de elementos que lhe permitam monitorizar a temperatura, aumentar a taxa de dissipação de calor para o exterior do armário, caso seja necessário. Se em algum momento o sistema não for capaz de lidar com o aumento da temperatura, o sistema de controlo deverá enviar um alarme para que os serviços de manutenção possam acorrer ao local. Um ineficaz controlo da temperatura pode resultar em inúmeros problemas para o funcionamento da EBT, desde pequenas falhas no funcionamento a danos significativos nos equipamentos.

O armário deve garantir uma temperatura do ar interior situada entre os -35 °C e os 55 °C. Não sendo, em geral, a temperatura mínima atingida dentro do armário um ponto crítico o mesmo não se passa relativamente à temperatura máxima, podendo exigir cuidados adicionais. A temperatura no interior do armário altera-se quando a taxa de extração de calor é diferente da soma da taxa de transferência de calor do exterior para o interior do armário com a taxa de dissipação de calor dos equipamentos instalados no interior. No caso em que a convecção natural não seja capaz de garantir os valores de temperatura necessários, é necessário recorrer a dispositivos ativos de controlo da temperatura.

Segundo a empresa fornecedora do armário estudado (Viatel), este garante uma temperatura interior entre -5 °C e 50 °C com convecção natural, para uma potência máxima a dissipar de 250 W.

A nível comercial, os dispositivos com utilização mais comum funcionam através de ventiladores que forcem a passagem de ar pelo interior armário ou através de sistemas de ar condicionado que extraem a energia térmica do interior do armário.

Os dispositivos com ventiladores instalados para o controlar a temperatura forcem a saída do ar na zona superior do armário, provocando um diferencial de pressão entre o interior e o

exterior armário, causando a entrada de ar na zona inferior. A entrada de ar ambiente na zona inferior do armário e sua saída na zona superior permite a circulação de ar por todos os equipamentos no interior do armário, tal como se verifica na figura 10.



Figura 10 - Esquema ilustrativo do funcionamento do arrefecimento através de ventilação forçada.

As principais vantagens do arrefecimento com recurso a ventiladores são os custos de aquisição e de manutenção baixos e a simplicidade de aplicação deste género de solução. O caudal de ar e a temperatura exterior têm grande influência na taxa de extração de calor do interior do armário. O calor é extraído dos equipamentos principalmente por convecção. Na equação (1) pode-se observar a fórmula matemática que descreve o processo de transferência de calor de uma superfície por convecção. Onde  $A$  é área de transferência,  $h$  o coeficiente de transferência de calor por convecção e  $(T_s - T_\infty)$  o diferencial de temperatura entre a superfície considerada e o escoamento.

$$q_{conv} = Ah(T_s - T_\infty) \quad (1)$$

Sendo a superfície de transferência fixa, o coeficiente de transferência de calor por convecção e o diferencial de temperatura são os termos que vão influenciar a taxa de calor extraído. O coeficiente convectivo depende de vários fatores entre os quais a geometria da superfície, as propriedades do fluido e a natureza do escoamento. O aumento da velocidade do escoamento de ar pode ser uma estratégia para aumentar este coeficiente.

Para um valor de caudal igual, quanto menor for o diferencial de temperatura entre o ar ambiente e os equipamentos, menor será a taxa de remoção de energia térmica. Em locais

onde as temperaturas exteriores sejam muito elevadas esta opção poderá não responder com eficácia às necessidades exigidas.

No caso do armário a estudar nesta dissertação, o sistema de arrefecimento é constituído por dois ventiladores axiais que são ativados por um sensor de temperatura regulável, num sistema tipo ligado/desligado. Os ventiladores são da marca EBM PAPST, o modelo 4318. As principais características de funcionamento dos ventiladores estão presentes na tabela 2.

Tabela 2 - Características dos ventiladores utilizados no armário.

| Característica               | Valor    | Unidade                |
|------------------------------|----------|------------------------|
| Tensão nominal               | 48       | [V]                    |
| Velocidade angular           | 2800     | [r.min <sup>-1</sup> ] |
| Consumo                      | 5,1      | [W]                    |
| Temperatura de funcionamento | -20 a 50 | [°C]                   |
| Caudal nominal               | 170      | [m <sup>3</sup> /h]    |
| Ruído                        | 45       | [dB]                   |

O valor de caudal nominal apresentado na tabela é afetado pela perda de carga do escoamento de ar ao percorrer o armário. No armário existem vários constrangimentos ao movimento do fluido, como a presença de equipamentos e cabos no interior do armário, os orifícios pelos quais sai o ar (no cabeçote) e os orifícios pelos quais o ar entra, a estes adiciona-se o efeito obstrutivo causado pelos filtros. A falta de manutenção do armário e consequente acumulação de poeiras e detritos nos filtros e orifícios também leva a uma diminuição do caudal de ar escoado. O fabricante dos ventiladores fornece um diagrama de funcionamento do ventilador (figura 11) no qual é possível comparar o caudal fornecido pelo ventilador em função da variação de pressão causada por constrangimentos ao escoamento.

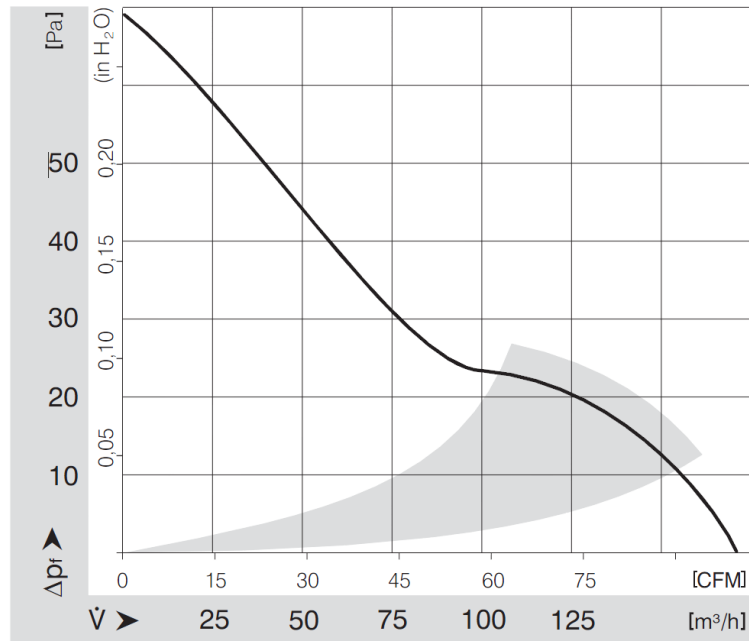


Figura 11 - Gráfico da curva característica do ventilador.

Para situações em que a ventilação não tenha a capacidade de extrair a energia térmica dissipada pelos equipamentos a uma taxa suficientemente alta para manter um valor de temperatura aceitável, o recurso a soluções com ar condicionado poderá ser uma solução. Os sistemas de ar condicionado permitem uma taxa de extração de calor superior aos sistemas com ventiladores, porém apresentam o custo mais elevado aquando da sua aquisição e durante a sua utilização.



Figura 12 - Exemplo de armário com sistema de ar condicionado para arrefecimento.

Diversas empresas disponibilizam soluções que permitem instalar sistemas de ar condicionado em armários de telecomunicações comuns. Na figura 12 está representado um armário no

qual foi instalado um sistema de ar condicionado, este foi instalado no lugar de um dos painéis laterais.

Existem outras tecnologias para o arrefecimento de armário exteriores de telecomunicações mas são pouco utilizadas, muitas dessas tecnologias estão ainda em fase de desenvolvimento, sendo utilizadas apenas para fins de investigação. Na secção 1.3. (revisão bibliográfica) foram apresentados alguns exemplos.

## **2.5. Nota conclusiva**

É crucial conhecer os materiais e forma como é construído o armário para que seja possível estudá-lo a nível térmico. Os dispositivos que equipam o armário também assumem um papel decisivo no comportamento térmico do armário, já que dissipam energia térmica durante o seu funcionamento. Ao longo deste capítulo foram apresentadas as principais características do armário e dos equipamentos presentes no seu interior, essencialmente no que concerne a características passíveis de influenciar o desempenho térmico.

Também foram descritas quais as condições de temperatura indicadas para o correto funcionamento do armário. Já alguns dos equipamentos também exigem valores limite de humidade relativa do ar que podem variar de acordo com o equipamento.

No final, existem valores que se mostram mais relevantes para o estudo, são eles o valor o valor de potência térmica máxima dissipada pelos equipamentos no interior do armário e a temperatura interior de funcionamento do armário. A potência térmica máxima que os equipamentos dissipam é de 475 W e deve ser tida em conta para calcular os efeitos do equipamento em funcionamento na temperatura do interior do armário. No interior do armário a temperatura deve estar entre os  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$  e os  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ , o limite inferior dificilmente é atingido, sendo necessárias condições climatéricas muito rigorosas. Já o limite de  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$  poderá ser alcançado com maior facilidade, devido ao efeito conjunto das condições exteriores e de dissipação de energia térmica no interior, exigindo por tal maior precaução.

### 3. Modelação numérica

Este terceiro capítulo aborda a temática da modelação numérica, expondo alguns conceitos importantes, como as vantagens e desvantagens da sua utilização e qual a sua aplicabilidade. O programa computacional EnergyPlus e sua respetiva interface gráfica DesignBuilder também são apresentados, sendo dado a conhecer as suas potencialidades e especificidades relevantes para a dissertação.

É descrita a forma como foi construído o modelo numérico do armário. Algumas simplificações são introduzidas no modelo em relação ao armário real, seja por limitações do *software* ou mesmo para facilitar a construção do mesmo. Estas simplificações são efetuadas de forma a minimizar ao máximo o erro introduzido nas soluções e são descritas mais adiante.

Qualquer modelo numérico deve sofrer um processo de validação experimental para garantir que o comportamento do modelo é coerente com o que aconteceria num caso real. A validação experimental permite obter resultados corretos de forma fidedigna. O processo de validação resulta de uma confrontação dos resultados experimentais com os resultados das simulações, com a possibilidade de existir uma margem de erro, e caso os valores não coincidam, há a necessidade de fazer ajustes no modelo.

#### 3.1. Introdução

De acordo com Gaspar (2008), a modelação numérica é amplamente utilizada para resolver problemas físico-matemáticos que envolvam uma resolução analítica complexa. Existem várias razões para a crescente utilização de ferramentas de modelação numérica, o avanço verificado na capacidade de processo dos computadores atuais permite efetuar simulações com maior celeridade, as interfaces gráficas que algum *software* de simulação apresenta também facilitam a utilização deste gênero de programas. Boukhanouf & Haddad (2010) definem a simulação como uma ferramenta com uma boa relação custo/tempo para caracterizar e melhorar processos que envolvam transferência de calor, podendo abarcar uma abrangente faixa de geometrias e condições de trabalho.

Segundo Oliveira (2001) o conceito de métodos numéricos reside em transformar equações às derivadas parciais em equações algébricas, sendo estas resolvidas num número finito de pontos. As simulações numéricas chegam a uma solução através de um processo iterativo de aproximação. A solução obtida a partir de métodos numéricos aproxima-se mais ao resultado analítico, com o aumento de número de pontos calculados e com o número de iterações, no caso de haver convergência.

Sendo o método numérico um método de aproximação iterativo, a cada iteração alcança-se um resultado mais próximo da solução final, caso o processo esteja a convergir. É necessário portanto assumir um método que seja capaz de parar o processo iterativo e garantir um erro dentro de um valor considerado aceitável. Ferreira & Patrício (1999) referem que numa simulação numérica a solução final é desconhecida, não sendo possível definir inicialmente um valor absoluto para o erro e é necessário compará-lo com a solução obtida a cada iteração. Existem diversos métodos para determinar aproximações numéricas porém não expostas neste trabalho, dado o elevado número de possibilidades e não ser o objetivo estudar exaustivamente os métodos numéricos, mas sim utilizá-los como ferramenta de resolução de problemas de grande complexidade.

Mariam (2010) realizou um estudo sobre a utilização de modelos computacionais na gestão térmica de armários de telecomunicações, afirmando que os modelos numéricos representam um papel central no dimensionamento de soluções de arrefecimento dos armários e diminuem o período de desenvolvimento dos mesmos.

O simulador utilizado permite ter uma visão macroscópica dos processos térmicos que se desenrolam no armário, não permitindo descortinar o que está a suceder em cada ponto do armário. O ponto forte do programa reside em saber quais as temperaturas e calor transferido em cada zona e superfícies, respetivamente, com intervalos de tempo inferiores a uma hora. Dado o objetivo do trabalho ser caracterizar o desempenho térmico do armário e não conhecer em detalhe os processos termodinâmicos envolvidos, servindo de exemplo o perfil de escoamento de ar no interior do armário, o programa cumpre de forma eficaz o pretendido.

### **3.2. DesignBuilder/EnergyPlus**

O EnergyPlus é programa de simulação para o cálculo de temperaturas e cargas térmicas de edifícios, permite facilitar a análise energética de diversas infraestruturas por parte de arquitetos e engenheiros. O programa foi desenvolvido na linguagem FORTRAN 90 e deriva de programas previamente existentes, o DOE-2 e o Blast. O código fonte é de acesso livre, sendo possível efetuar modificações no mesmo caso seja pretendido. O EnergyPlus é um motor de simulação integrado, agregando vários módulos que funcionam em conjunto calculando os balanços energéticos de um edifício, mediante os *inputs* fornecidos pelo utilizador.

A simulação tem como base o princípio da conservação de energia. Os diversos módulos são calculados simultaneamente, existindo um gestor de simulação que garante a correta troca de informação entre os diferentes programas agregados. A figura 13 esquematiza o modo como ocorre a troca de informação entre os vários módulos do EnergyPlus, onde é



Os valores da potência térmica dissipada no interior do edifício também podem ser definidos.

O DesignBuilder/EnergyPlus faz os cálculos para cada volume de controlo, em que cada volume é denominado por zona. O conceito de zona baseia-se nos volumes que são calculados como apenas um. Cada zona pode ser adiabática, não existindo trocas de calor com o exterior, ou por outro lado, pode sofrer trocas de calor e ar com zonas adjacentes.

Para compreender o funcionamento do EnergyPlus é importante saber quais as equações que são utilizadas no cálculo dos diversos parâmetros. Para calcular o fluxo de calor que atravessa um elemento com duas superfícies a determinada temperatura o EnergyPlus utiliza a equação (2), relacionando o fluxo de calor de uma superfície com uma série infinita de temperaturas:

$$q''_{ko}(t) = \sum_{j=0}^{\infty} X_j T_{o,t-j\delta} - \sum_{j=0}^{\infty} Y_j T_{i,t-j\delta} \quad (2)$$

Em que o fluxo de calor é representado por  $q''$ , a temperatura por  $T$  (em Kelvin), “i” corresponde à superfície interior enquanto “o” corresponde à superfície exterior, “X” e “Y” são fatores relacionados com as propriedades térmicas dos materiais. Pela equação (2) constata-se que o fluxo de calor num elemento depende da temperatura das superfícies e das propriedades térmicas dos materiais.

Para obter uma solução exata é necessário um número infinito de termos, o que não é viável. Porém, o DesignBuilder faz uso do método CTF (*Conduction Transfer Function*) que permite obter uma única equação linear com constantes como coeficientes. Segundo Ciulla *et al.* (2010) este método é utilizado pela ASHRAE para resolver este género de cálculos numéricos.

O cálculo da energia armazenada em cada zona é dado pela seguinte equação:

$$c_z \frac{dT_z}{dT} = \sum_{i=1}^{Nsl} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{Nsurfaces} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{Nzones} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{Q}_{sys} \quad (3)$$

Da soma das diversas variáveis resulta  $c_z \frac{dT_z}{dT}$  que corresponde à energia térmica acumulada numa zona. Onde  $\sum_{i=1}^{Nsl} \dot{Q}_i$  é a soma das cargas convectivas internas,  $\sum_{i=1}^{Nsurfaces} h_i A_i (T_{si} - T_z)$  é o valor do calor transferido das superfícies interiores para o volume de controlo por convecção,  $\sum_{i=1}^{Nzones} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z)$  advém das trocas de ar entre as diversas zonas,

$\dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z)$  corresponde às infiltrações de ar proveniente do exterior, por fim,  $\dot{Q}_{sys}$  dá o valor de energia relacionado com a trocas de ar do sistema de ventilação forçada.

Na figura 14 está representado um diagrama no qual é fácil identificar quais os dados que o EnergyPlus utiliza nas suas simulações e que informação é devolvida ao utilizador.

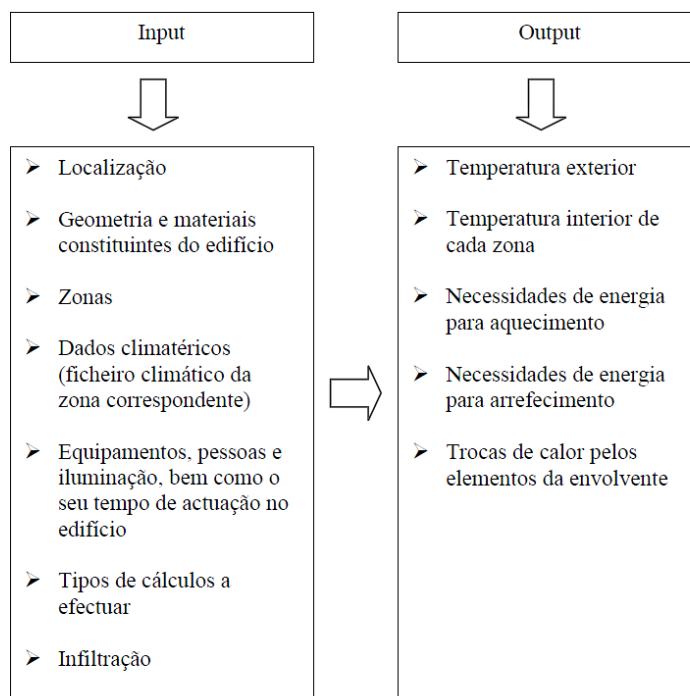


Figura 14 - Diagrama dos dados de entrada e saída do EnergyPlus (Afonso, 2009).

O DesignBuilder não é um programa de simulação, este funciona como interface gráfica para o EnergyPlus, tornando-o de fácil utilização. O DesignBuilder permite inserir os *inputs* e posteriormente devolve os *outputs*, como se vê na figura 14. Todo o processo de cálculo numérico que permite chegar aos *outputs* é levado a cabo pelo EnergyPlus, sem que o utilizador tenha de trabalhar diretamente com o simulador. A interface gráfica permite modelar edifícios virtuais de variadas dimensões e tipologias, através de ferramentas CAD.

O ambiente gráfico do DesignBuilder, na figura 15, tem a barra de menus na parte superior, localizada à esquerda está a organização hierárquica do modelo, à direita um painel de ajuda/informações, em baixo localiza-se a barra de estado. O ecrã de edição que permite visualizar e alterar a diferentes características do modelo está presente no centro do *layout*.

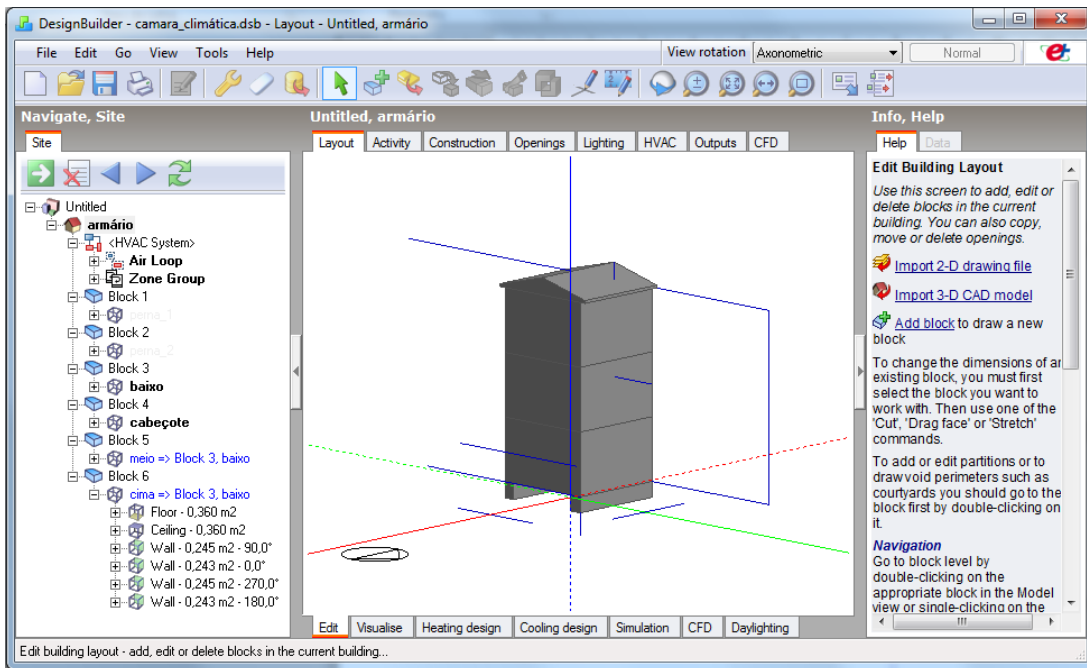


Figura 15 - Ambiente gráfico do DesignBuilder.

Os modelos virtuais estão organizados através de uma hierarquia que parte de um nível mais geral e culmina num mais específico, como está descrito na figura 16.



Figura 16 - Organização hierárquica dos modelos do DesignBuilder.

A localização define o local geográfico e o ficheiro climático que vão servir de base ao projeto. As características da localização vão interferir nos resultados das simulações, entre elas estão a altitude, radiação solar, temperatura ou direção e velocidade do vento. Cada projeto é constituído por um ou mais edifícios, que são construídos a partir de blocos. Cada zona tem a sua análise térmica, ainda que possam interagir entre si.

Os tempos de operação de algumas ações como o aquecimento e arrefecimento, transmissividade dos “*Component Block*”, funcionamento de equipamentos ou ocupação de zonas são controlados através da ferramenta “*Schedule*”. Esta ferramenta permite a sua definição através de dois meios, o “*7/12 Schedule*” e o “*Compact Schedule*”. No primeiro, cada dia da semana não sofre variações ao longo de cada mês, tem como vantagem ser mais intuitivo e é apropriado para casos em que exista uma rotina semanal, como se verifica na figura 17.

| Profiles |           |           |           |           |           |              |           |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|-----------|
| Mo...    | Monday    | Tuesday   | Wednesday | Thursday  | Friday    | Saturday     | Sunday    |
| Jan      | On        | On        | On        | On        | On        | 9:30 - 17:30 | Off       |
| Feb      | On        | On        | On        | On        | On        | 9:30 - 13:00 | Off       |
| Mar      | On        | On        | On        | On        | On        | 9:30 - 13:00 | Off       |
| Apr      | On        | On        | On        | On        | On        | 9:30 - 13:00 | Off       |
| May      | On        | On        | On        | On        | On        | 9:30 - 13:00 | Off       |
| Jun      | On        | On        | On        | On        | On        | Off          | Off       |
| Jul      | On        | On        | On        | On        | On        | Off          | Off       |
| Aug      | On        | On        | On        | On        | On        | Off          | Off       |
| Sep      | On        | On        | On        | On        | On        | Off          | Off       |
| Oct      | On        | On        | On        | On        | On        | Off          | Off       |
| Nov      | On        | On        | On        | On        | On        | Off          | Off       |
| Dec      | Operation | Operation | Operation | Operation | Operation | Operation    | Operation |

Figura 17 - Quadro de calendarização do modo “7/12 Schedule”.

Para além das opções *On* e *Off* o “Schedule” permite criar perfis para as taxas de utilização, permitindo avariar entre 0 a 100%. Durante um dia podem existir variações das taxas de utilização de cada 15 em 15 minutos ou com intervalos de até 1 hora. Estas alterações podem ser definidas com recurso a um histograma, como mostra a figura 18.

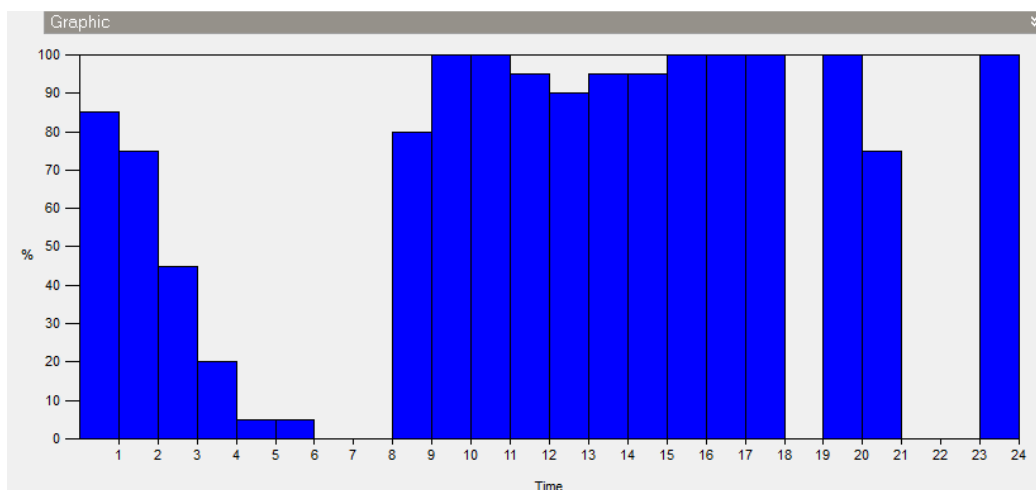


Figura 18 - Histograma para definição dos valores das taxas de utilização.

O “Compact Schedule” é mais flexível, permitindo definir cada dia do ano de forma individual, para tal é construído um “Schedule” num formato semelhante a linhas de código.

O menu *Edit* permite editar grande parte da informação e características relacionadas com o modelo a desenvolver, de modo a facilitar a acessibilidade ao utilizador o menu está dividido em vários submenus.

### 3.2.1. Submenu *Activity*

O submenu *Activity* permite alterar os dados referentes à atividade humana, máquinas e eletrodomésticos diversos. Estes dados podem ter forte influência nos ganhos térmicos de um edifício, em muitos casos a ocupação humana e sua atividade fazem aumentar fortemente os consumos energéticos relacionados com a climatização.

Os dados relativos à atividade humana podem ser introduzidos, caso se justifique, de forma muito exaustiva. É possível introduzir o número de pessoas que ocupam cada zona, os ganhos térmicos resultantes do seu metabolismo e quais os períodos em que a zona tem ocupação humana. É também possível definir vários parâmetros relacionados com o conforto térmico, para tal basta alterar os valores para a temperatura, humidade e ventilação. O sistema AVAC poderá ser controlado de acordo com a informação introduzida neste submenu.

Neste trabalho não será necessário utilizar o submenu *Activity*, já que não existe atividade humana e os ganhos térmicos resultantes do funcionamento dos equipamentos de telecomunicações serão simulados através de outro método.

### 3.2.2. Submenu *Construction*

As características construtivas dos diferentes blocos podem ser consultadas e alteradas neste submenu. O programa dispõe de um conjunto de materiais que podem ser utilizados como componentes do edifício, estes materiais já têm as suas propriedades pré-definidas. Caso o utilizador deseje pode ainda criar novos materiais e introduzir as suas propriedades.

Caso o utilizador deseje criar um padrão, de forma a utilizar várias vezes as mesmas características construtivas, poderá fazê-lo utilizando a ferramenta *template*. Esta ferramenta permite economizar tempo, utilizando repetidamente as mesma características construtivas.

Para além de ser possível definir os materiais a utilizar é ainda possível definir quantas camadas tem cada elemento e qual a espessura das mesmas. É possível criar paredes com caixa de ar ou outros elementos construtivos complexos com diversos materiais. Como se pode verificar na figura 19 o programa permite verificar, através de uma imagem, quais as camadas que estão a ser utilizadas, para uma melhor perceção do resultado das várias camadas juntas.

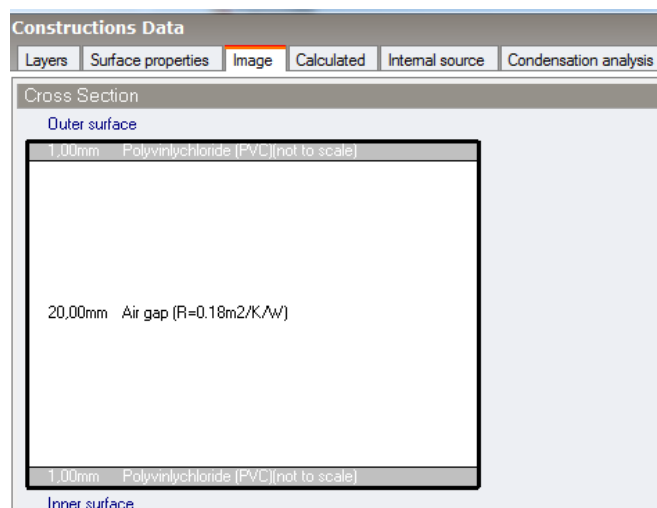


Figura 19 - Imagem ilustrativa das camadas utilizadas num elemento construtivo.

As propriedades radiantes de um material definem a forma como este interage com o meio exterior em relação à energia eletromagnética, tendo influência na transmissão de calor por radiação. As características da transmissão de calor por radiação dependem da natureza eletromagnética e das propriedades radiantes do material.

O programa de simulação permite alterar os valores de absorvidade para radiação infravermelha e de absorvidade para a radiação solar em todos os materiais construtivos utilizados. Considerando uma superfície de um corpo na qual incide radiação monocromática, pela lei da conservação de energia temos a equação (4) (Silva, 2010):

$$1 = \rho + \alpha + \tau \quad (4)$$

Onde  $\rho$  representa a refletividade,  $\alpha$  a absorvidade e  $\tau$  a transmissividade. Estas grandezas apresentam valores entre 0 e 1. Os materiais utilizados no modelo numérico são todos opacos, pelo que  $\tau=0$ .

Para a simulação de efeitos de sombreamento, causados por um edifício ou qualquer outro tipo de obstáculo, existe uma ferramenta na qual se parametriza os blocos utilizados para o efeito. Os blocos utilizados denominam-se “*Component Block*” e servem apenas para simular o efeito de sombreamento e reflexão, não vai entrar nos cálculos térmicos efetuados na simulação. O principal parâmetro a configurar é a transmissividade, que define a fração de radiação que atravessa o material, toda a radiação que não atravessa o “*Component Block*” será refletida. A transmissividade máxima pode ser definida entre 0 e 1, é chamada transmissividade máxima pois o valor da absorvidade também vai depender do “*Schedule*”. A transmissividade é calculada com base na equação (5), onde a

transmissividade máxima é multiplicada pelo valor definido no “*Schedule*”, que varia entre 0 e 1.

$$\tau = \tau_{m\acute{a}x} \times \text{valor schedule} \quad (5)$$

Para um bloco que simule uma sombra completa, com transmissividade nula, ao longo de todo o período simulado, o valor de  $\tau_{m\acute{a}x}$  deverá ser igual a 0 e o “*Schedule*” definido como “*On*”.

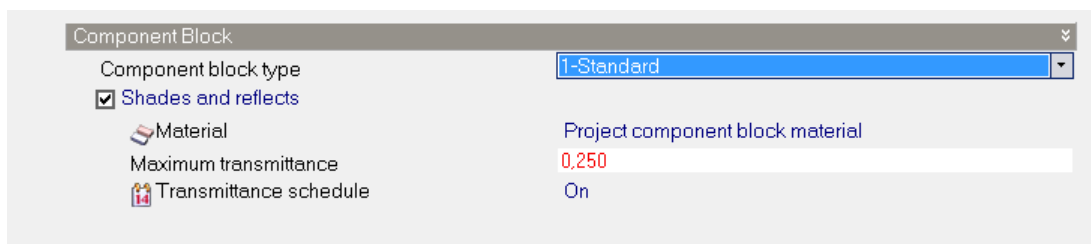


Figura 20 - Características do “*Component Block*”.

Ainda neste submenu é possível simular uma inércia térmica através da adição de um material com um valor de calor específico elevado. A grandeza física que relaciona quantidade de calor transferida para um corpo com a variação de temperatura causada neste é denominada capacidade térmica. Um valor de capacidade térmica superior corresponderá a uma maior inércia térmica. O valor da capacidade térmica, tal como definida pela equação (6), resulta do produto do valor do calor específico pela massa do corpo, pelo que a variação do valor da capacidade térmica está dependente dos valores destas duas grandezas.

$$C = C_p \times m \quad (6)$$

Quanto maior for a inércia térmica de um bloco, mais lentas serão as variações de temperatura nesse mesmo bloco. O DesignBuilder permite também definir qual a área que o elemento que simula a inércia térmica tem exposta, sendo que uma maior área exposta vai significar uma transferência de calor mais elevada.

### 3.3. Implementação do modelo

O modelo numérico tridimensional foi construído com recurso ao DesignBuilder, criando um modelo com dimensões próximas do armário real, presente na figura 21. Todas as simplificações efetuadas no modelo foram efetuadas com o cuidado de prejudicar o menos possível a representação pretendida do modelo real a simular.

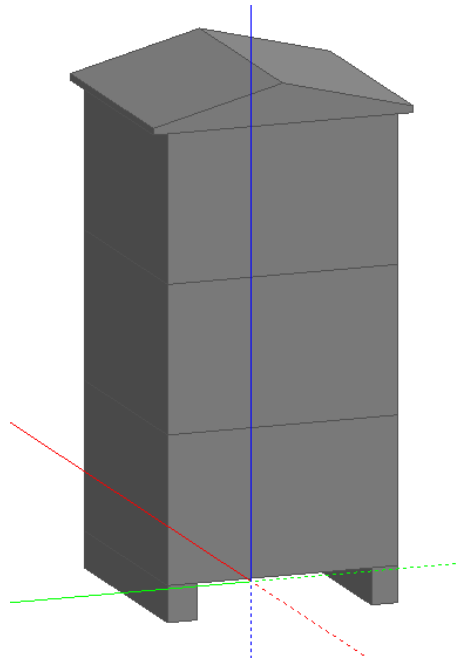


Figura 21 - Geometria final do modelo numérico.

Depois de efetuadas as medições ao armário e analisar os seus aspetos construtivos, o armário foi replicado no modelo computacional. A estrutura é construída sem qualquer equipamento no interior, todos os componentes de suporte físico e de passagem de cabos também são desprezados. A ausência de componentes no interior do armário provoca a diminuição da sua inércia térmica, bem como, a alteração de outros processos físicos relacionados com transmissão de calor ou perfil de escoamento de ar.

O modelo está orientado com o painel frontal ou traseiro (não existe diferença entre os painéis frontal e traseiro e entre ambos os painéis laterais) para norte e os painéis laterais para este e oeste, como se vê na figura 22. A orientação do modelo tem influência na forma com este recebe a radiação proveniente do sol, ao longo do dia, devido ao ângulo de incidência dos raios solares no armário e à área exposta à radiação solar direta.

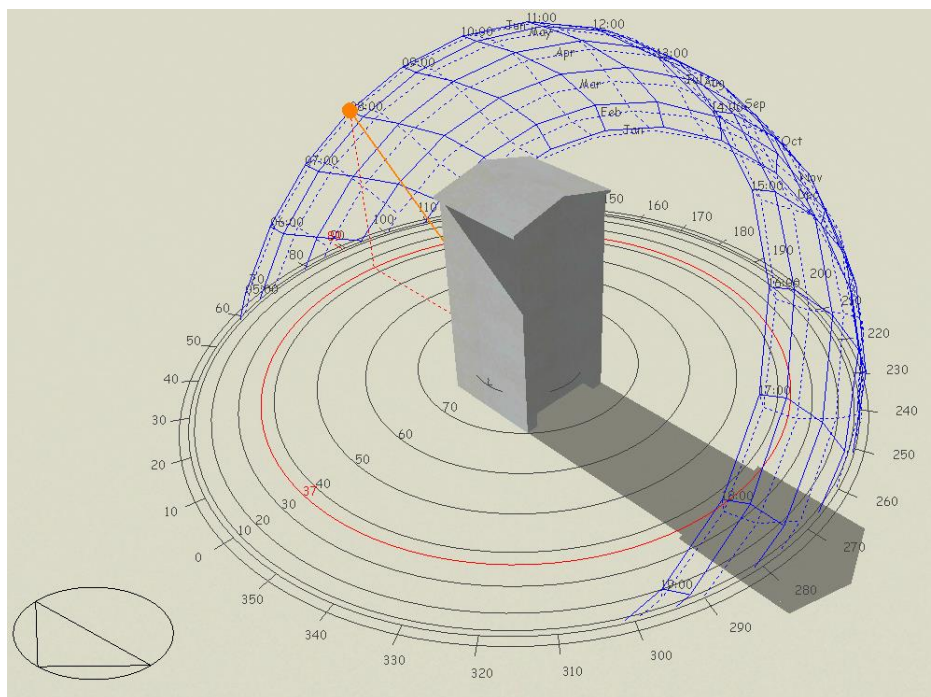


Figura 22 - Orientação do modelo numérico.

Os armários exteriores de telecomunicações não são instalados diretamente no solo, ficando em cima de uma estrutura metálica que permite a livre circulação de ar por baixo do armário. Para simular este aspeto relevante para a obtenção de resultados credíveis foram introduzidas duas “pernas” na face de baixo do armário, como se vê na figura 21.

O modelo é constituído por 6 blocos e um módulo AVAC que simula o funcionamento dos ventiladores, tal como consta na figura 23. Os blocos 1 e 2 são as “pernas” que elevam o armário acima do solo, estas não são contabilizadas nos cálculos numéricos. O corpo do armário está dividido em 3 partes: o bloco 3 “baixo”, o bloco 5 “meio” e o bloco 6 “cima”. Para o cabeçote foi criado o bloco 4. Os blocos 3, 5, 6 e 4, que representam o corpo e cabeçote do armário, estão interligados e funcionam como apenas um bloco para efeitos de cálculo numérico, representam uma única zona.

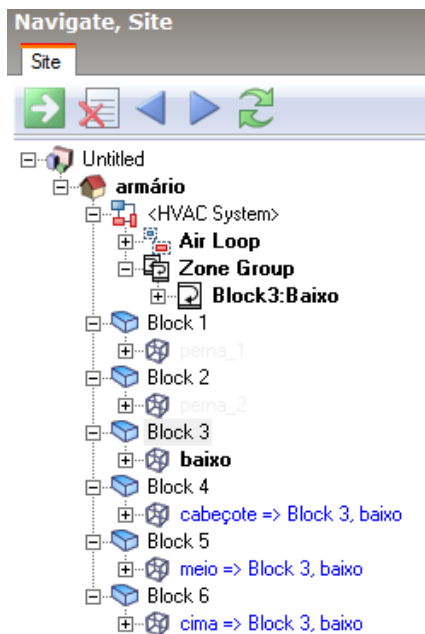


Figura 23 - Organização hierárquica do modelo numérico utilizado.

As dimensões utilizadas na simulação respeitam as do armário real, porém é necessário saber qual a área (chão) e volume interior do modelo, de forma a calcular a potência térmica dissipada no interior e o caudal da ventilação, os valores são dados pelo programa.

O volume interior tem um valor de  $0,46 \text{ m}^3$ , sendo a soma dos volumes interiores dos blocos 3, 4, 5 e 6. Este valor é necessário pois, os resultados do DesignBuilder para o caudal são apresentados em renovações/h, só com o valor do volume é possível calcular o valor de caudal em  $\text{m}^3/\text{h}$ . A equação (7) relaciona o caudal (Q) em  $\text{m}^3/\text{h}$  com o número de renovações de ar por hora.

$$Q = 0,46 \times \text{renovações}/h \quad (7)$$

O modelo tem os painéis traseiro e laterais e a porta frontal com parede dupla com 20 mm de espessura, como se verifica na figura 24, as restantes superfícies têm apenas uma camada. Para além do ar no interior da parede dupla, todos o modelo é constituído pelo mesmo material, com a espessura de 1 mm. Os painéis com caixa de ar do modelo não têm ventilação natural, tal como acontece com os painéis do armário real. No caso real, o ar circula dentro dos painéis devido ao aquecimento do ar provocado pelo calor produzido no armário e pela radiação solar incidente no armário.

O programa não dispunha da liga metálica na qual foi construída do armário na sua lista, sendo as características térmicas adicionadas manualmente. Os valores das características utilizadas estão presentes na tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades térmicas do material do modelo estudado.

| Condutibilidade térmica (W/m.K) | Calor Específico (J/Kg.K) | Massa volúmica (Kg/m <sup>3</sup> ) |
|---------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|
| 160                             | 880                       | 2800                                |

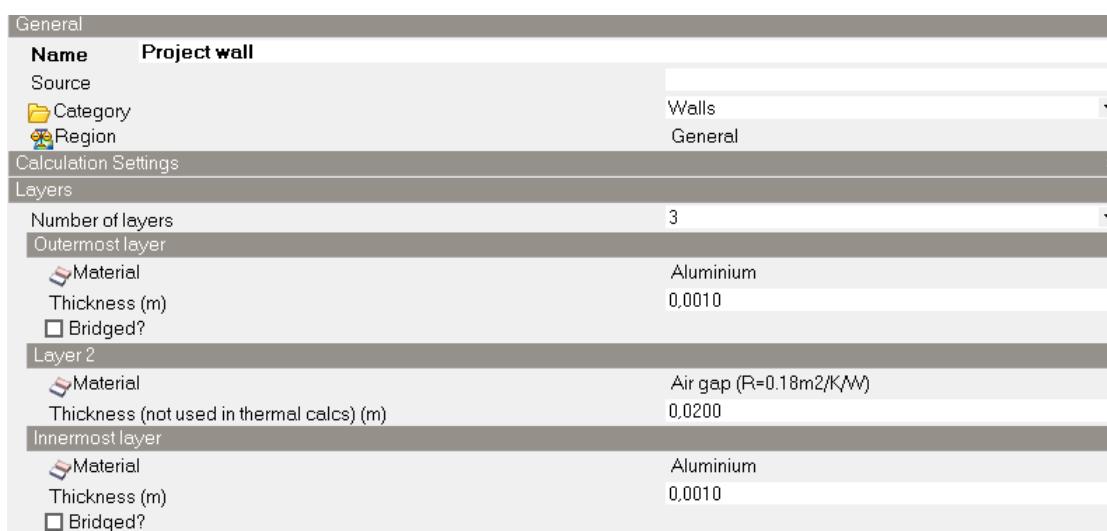


Figura 24 - Menu para escolha dos materiais construtivos do modelo.

Para simular a ventilação forçada do armário foi utilizada a ferramenta que permite criar um sistema AVAC, na figura 25 observa-se o esquema do sistema de ventilação forçada. O sistema modelado é constituído pelo volume interior do armário e um ventilador que insufla ar para o interior desse mesmo volume, a extração de ar é efetuada pelo gradiente de pressão entre o interior e exterior do armário. O valor de caudal do ventilador é definido pelo utilizador, o que possibilita estudar os valores de temperatura dentro do armário em função da variação do valor de caudal da ventilação.

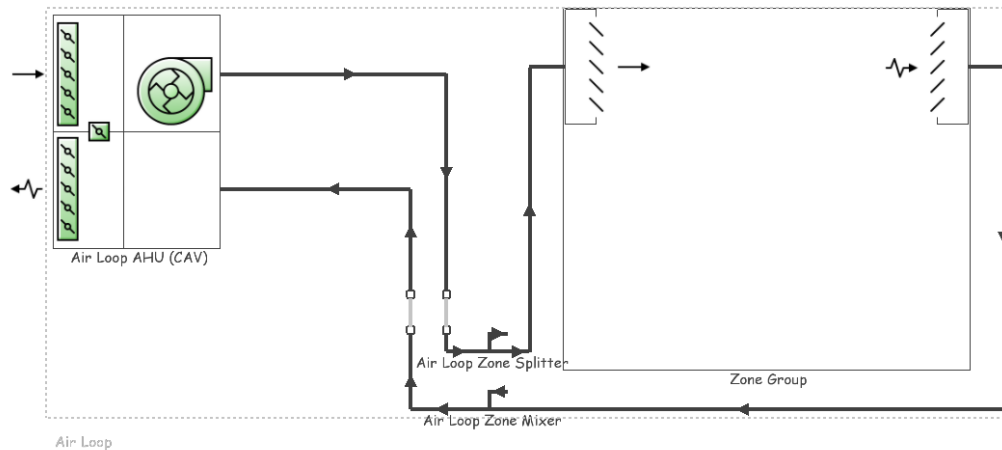


Figura 25 -Esquema do sistema de ventilação forçada do modelo numérico.

As únicas trocas de ar que serão efetuadas com o exterior do armário limitam-se à ventilação do sistema AVAC. O programa de simulação permite que sejam adicionadas infiltrações de ar no modelo, simulando as infiltrações em fissuras causados por gradientes de pressão.

Para simular cargas térmicas no interior de cada “Zona” o DesignBuilder dispõe de várias opções, podendo as cargas ser classificadas de acordo com a sua fonte, sirva como exemplo cargas térmicas provenientes de computadores, metabolismo humano, entre outros. Estas opções estão presentes no submenu *Activity* no menu *Edit* e estão limitadas a  $60 \text{ W/m}^2$ . Todas as cargas térmicas são introduzidas com a unidade  $\text{W/m}^2$ . De forma a contornar o inconveniente da limitação da energia térmica dissipada no submenu *Activity* recorreu-se ao submenu *Lighting* onde é possível introduzir manualmente a energia térmica dissipada no interior do armário sem limitações, também em  $\text{W/m}^2$ .

A área que serve de referência ao cálculo das cargas térmicas no interior do armário, assumida pelo DesignBuilder, é igual a  $1,43 \text{ m}^2$ . Este valor resulta da soma da área do chão de todos os blocos envolvidos na simulação numérica. Para calcular o calor total dissipado no interior do armário utiliza-se a equação (8), onde o fluxo de calor ( $q''$ ) multiplicado pela área de referência resulta na potência térmica dissipada em Watt.

$$q = 1,43 \times q'' \quad (8)$$

### 3.4. Validação experimental

Um modelo numérico deve ser devidamente validado para que os resultados resultantes de simulações que recorram ao modelo produzam resultados fidedignos. Para validar o

modelo numérico do armário em estudo foram comparados os resultados numéricos com resultados experimentais, obtidos a partir de um armário em funcionamento normal. Os resultados experimentais foram obtidos entre os dias 13 e 24 de abril de 2015, tendo sido medidos os valores de temperatura do ar em dois pontos diferentes do armário.

O armário escolhido para recolher os dados experimentais localiza-se no concelho da Covilhã, próximo da autoestrada A23. O local está sujeito à exposição solar durante a maior parte do dia. O armário está equipado com dois ventiladores que são acionados através de um sensor de temperatura, quando o valor de temperatura atinge aproximadamente 35 °C.

O equipamento presente no interior do armário dissipa um valor máximo de 475 W de calor, este valor corresponde ao pior cenário possível. A taxa dissipação de calor por parte dos equipamentos depende da sua configuração, bem como da taxa de utilização imposta aos mesmos. O armário está instalado num local de baixa densidade populacional, tendo sido instalado para dar cobertura de rede móvel à autoestrada A23. Com condições propícias à baixa utilização do EBT, onde se encontra este armário, é esperado que a potência térmica dissipada se situe consideravelmente abaixo do 475W.

Os valores de temperatura foram medidos com recurso a dois analisadores de temperatura semelhantes, recolhendo em simultâneo o valor da humidade relativa do ar. Os analisadores foram colocados em dois pontos distintos, um na zona mais inferior do armário, o outro foi colocado na zona superior do armário, perto dos ventiladores que extraem ar do armário. Os registos dos valores de temperatura e humidade relativa do ar foram efetuados com um intervalo de tempo de 1 minuto, totalizando um total de 16.379 medições em 10 dias, para cada analisador.



Figura 26 - Localização dos analisadores de temperatura dentro do armário.

Os analisadores colocados no armário são comercializados pela empresa Lascar Electronics e são ambos do mesmo modelo EL-USB-2-LCD, na figura 27. O dispositivo é um *data logger* e tem como função medir e gravar informação sobre a temperatura e humidade relativa, com uma capacidade de 16.379 leituras. O equipamento dispõe de *software* que permite programar e analisar os dados recolhidos, sendo possível criar gráficos, imprimir ou exportar a informação para ser utilizados noutros programas. Através de um ecrã no dispositivo é possível consultar várias informações relativas à temperatura e humidade.



Figura 27 - Exemplo do analisador utilizado nas medições de temperatura do interior do armário.

O *data logger* tem uma bateria de iões de lítio que lhe confere autonomia para até 12 meses. As leituras podem ser gravadas com intervalos de tempo que vão desde 10 segundos a 12 horas. As características associadas às medições, tais como precisão ou intervalo de medições, estão presentes na tabela 4.

Tabela 4 - Características de metrologia do dispositivo do *data logger*.

|                   | Intervalo de medição | Precisão    | Resolução |
|-------------------|----------------------|-------------|-----------|
| Temperatura       | -35 °C a 80 °C       | ±0,5 a ±2,0 | 0,5       |
| Humidade Relativa | 0 % a 100 %          | ±3.0 a ±5.0 | 0,5       |

A comparação entre os resultados numéricos e os resultados experimentais é efetuada com recurso a gráficos, facilitando a análise dos resultados. Os valores da temperatura interior do armário obtidos experimentalmente são cruzados com os valores numéricos, para o mesmo período de tempo. As condições exteriores, numéricas e experimentais, afetam de forma significativa os resultados, sendo também comparadas. Dados obtidos numa estação meteorológica, perto do armário onde foram realizados os ensaios experimentais, são utilizados para analisar as condições exteriores experimentais, contendo informação relevante como a temperatura do ar, velocidade do vento ou radiação solar.

Das medições experimentais da temperatura interior resultou um gráfico onde são apresentados os resultados obtidos, com se pode observar na figura 28. O gráfico contém duas curvas, correspondentes aos dois pontos de medição: baixo e cima. Como seria de esperar as medições efetuadas no ponto mais baixo apresentam temperaturas mais baixas, já que o ar quente tem tendência a subir devido à sua menor massa específica e também por se encontrar na zona de entrada de ar para o interior do armário. O analisador colocado no ponto superior está localizado perto da zona de saída de ar do armário e também está perto do sensor que controla o acionamento da ventilação do armário. Como se pode verificar as temperaturas medidas por este analisador pouco ultrapassam os 36 °C, devido à entrada em funcionamento dos ventiladores. As temperaturas superiores a 35 °C no interior do armário, que é o valor limite para o qual os ventiladores entram em funcionamento, podem ficar a dever-se ao tempo de resposta do sistema de ventilação.

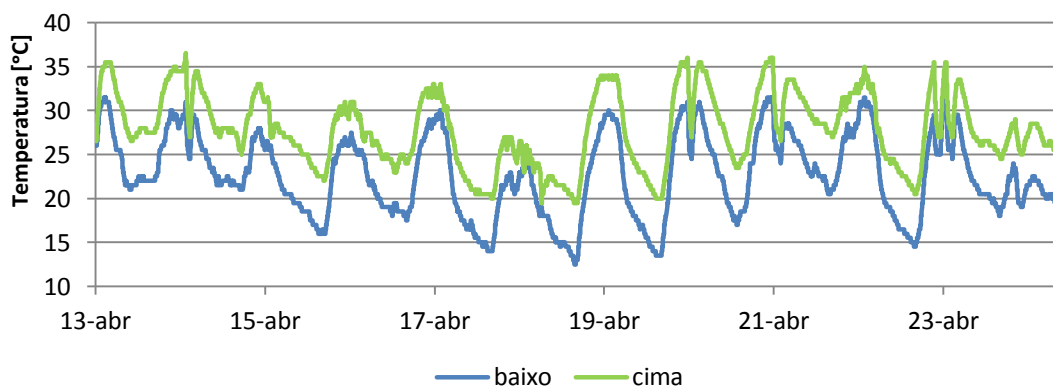


Figura 28 - Valores experimentais da temperatura no interior do armário.

Existem diversas variáveis que afetam os resultados experimentais, com a possibilidade de dificultar a correta comparação entre resultados numéricos e experimentais. A possibilidade de discrepância entre as condições meteorológicas recolhidas pela estação meteorológica e a informação dada pelo modelo climático podem inviabilizar a confrontação de resultados, pelo que é necessário analisar os mesmos, de forma a garantir a validação do modelo. Os aparelhos eletrónicos presentes no armário não funcionam em regime permanente, o que também pode introduzir erros nos resultados experimentais. A localização do armário num local com pouca densidade populacional, e consequente taxa de utilização baixa da respetiva EBT, pode levar a um perfil de dissipação energética, por parte dos equipamentos de telecomunicações, mais linear ao longo de cada dia.

Não sendo possível alterar as condicionantes associadas ao ensaio experimental, há que modificar a variáveis da simulação numérica, de forma a ir de encontro às condições experimentais.

As condições meteorológicas utilizadas nas simulações do DesignBuilder provêm de um ficheiro climático correspondente à cidade da Covilhã, existindo diferenças entre os valores obtidos de forma experimental. O modelo numérico que foi simulado para alcançar a validação experimental é uma réplica do armário utilizado para obter os dados experimentais, tal como o modelo que foi descrito no capítulo 3.3. *Implementação do Modelo*. Ao longo do período de estudo para obter a validação, foi considerada uma potência térmica dissipada no interior do armário constante, com um valor igual a 100 W. Foi utilizado este valor tendo em conta a baixa taxa de utilização da EBT, logo será natural que a carga térmica no interior do armário seja muito inferior do que o valor máximo de 475 W. Foi ainda definido que não existem trocas de ar entre o interior e exterior do modelo, não sendo ativada a ventilação mecânica, nem considerando as trocas de ar relativas a infiltrações.

Quando a condições exteriores ao armário, numérica e experimental, não coincidem é natural que haja discrepâncias nos resultados do interior do armário. Para efetuar a validação do modelo é importante escolher períodos em que as condições numérica e experimental convirjam, nos casos em que as condições sejam mais distanciadas é necessário analisar os valores resultantes e verificar se estão coerentes com as divergências existentes.

O gráfico da figura 29 contém, a vermelho, aos valores de temperatura exterior do ficheiro climático utilizado no DesignBuilder (valores numéricos) e, a azul, os valores de temperatura exteriores medidos pela estação meteorológica (valores experimentais). No dia 20 de abril e ente os dias 21 e 23 de abril existem falhas no registo de informação dos valores experimentais.

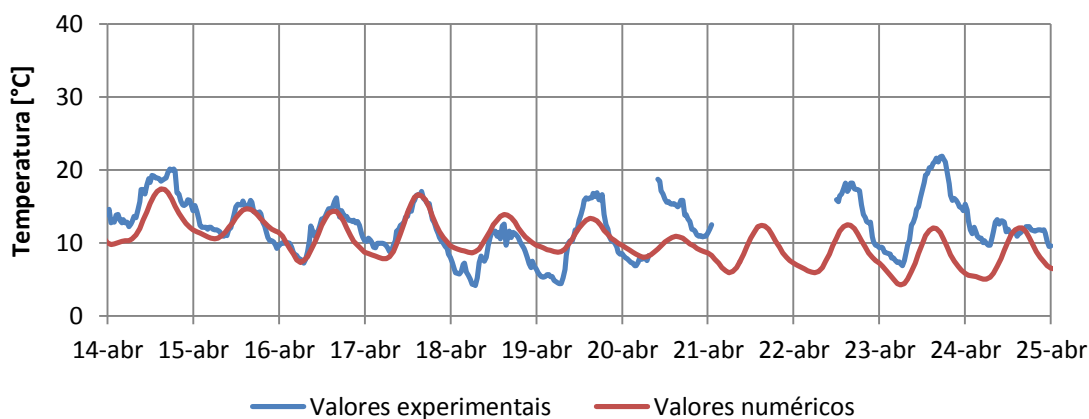


Figura 29 - Valores numéricos e experimentais da temperatura exterior.

Tal como no gráfico anterior, o seguinte, da figura 30, apresenta valores do ficheiro climático do DesignBuilder e valores obtidos a partir da estação meteorológica, mas neste caso para a potência da radiação solar. Também para os valores da radiação solar existiu uma falha no registo de dados, para o mesmo período ocorrido no registo da temperatura.

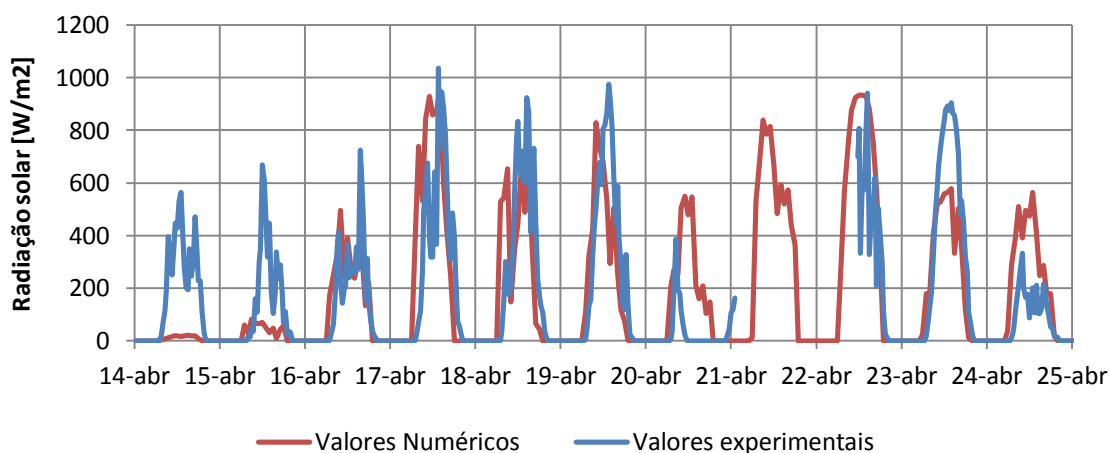


Figura 30 - Valores numéricos e experimentais da radiação solar.

Dos dados experimentais recolhidos existem dois dias em que os valores de temperatura exterior experimentais se aproximam bastante dos valores numéricos, são estes os dias 16 e 17 de abril. Como se pode verificar na figura 31 a maior diferença entre a temperatura experimental e numérica, nos dias 16 e 17 de abril, é de aproximadamente  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Também nestes dois dias os valores referentes à radiação solar, quer nos dados experimentais como nos numéricos, são semelhantes, figura 32. Serão, portanto, analisados os resultados no interior do armário em função deste período. Será de esperar que os valores, numéricos e experimentais, da temperatura no interior do armário sejam idênticos ao longo dos dois dias.

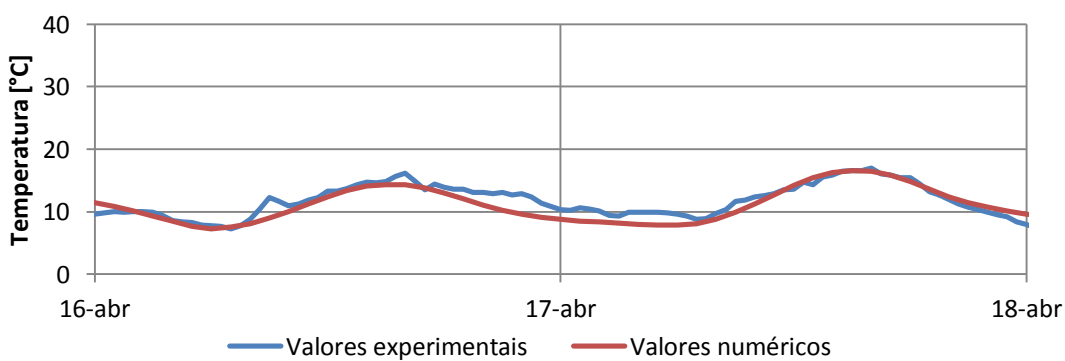


Figura 31 - Gráfico com os valores da temperatura exteriores, numérica e experimental.

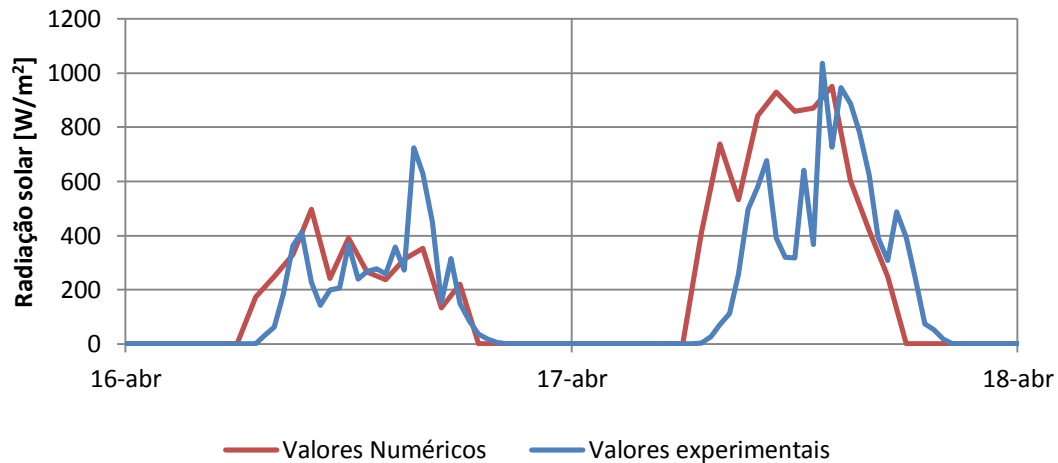


Figura 32 - Gráfico com os valores de radiação solar, numérica e experimental.

Na figura 33 está presente o gráfico no qual se pode ver os valores de temperatura no interior do armário, para o mesmo período de tempo do gráfico da figura 31. Os valores experimentais e numéricos não distam muito, existindo uma boa correspondência entre ambos. A diferença de temperaturas não é muito relevante e é mais acentuada devido ao “atraso” temporal dos valores experimentais em relação aos valores numéricos. Esta defasagem temporal ocorre devido ao efeito da radiação solar, em que os valores de radiação solar sobem inicialmente com maior ímpeto no caso dos valores numéricos. Já no dia 17 de abril verifica-se uma maior diferença entre os valores experimentais e numéricos, quando comparado com o dia anterior, o que se pode dever a uma maior diferença entre os valores da radiação solar, para esse dia. No período noturno entre o dia 16 e 17 de abril os valores experimentais de temperatura interior são quase sempre superiores aos numéricos, tal como acontece para os valores de temperatura exterior, neste período não existe influência da radiação solar.

De forma sucinta, é possível dizer que os valores de temperatura no interior do armário, numérico e experimental, vão de encontro ao expectável, tendo em consideração os valores de temperatura no exterior do armário e de radiação solar.

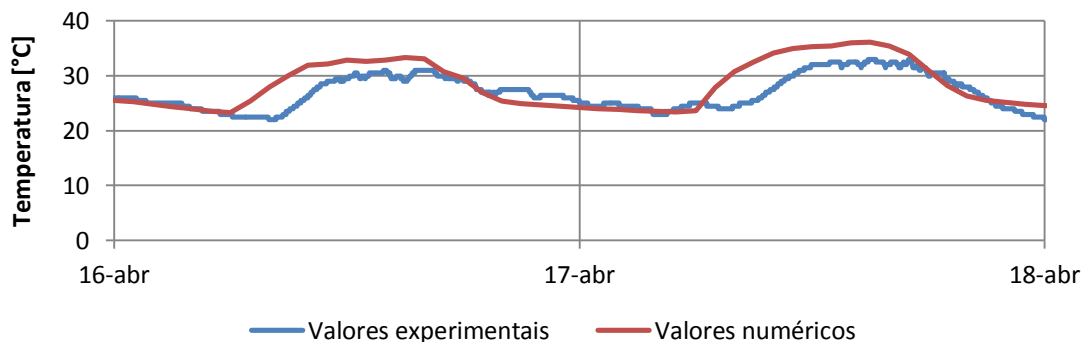


Figura 33 - Gráfico com os valores da temperatura no interior do armário, numérica e experimental.

Como os dados experimentais obtidos na estação meteorológica não coincidem com os dados do ficheiro climático ao longo do tempo, é de esperar que em alguns períodos ambos os valores difiram muito. Na figura 34 verifica-se diferenças superiores a 10 °C entre os valores numéricos e os valores experimentais, com os experimentais mais elevados no dia 23 de abril. Esta diferença leva a esperar também um valor mais elevado para os valores experimentais no interior do armário. Os valores da radiação solar, tal como os da temperatura, também diferem em ambos os dias, no dia 23 os valores registados pela estação meteorológicas são superiores aos da simulação, já no dia seguinte acontece o contrário, com os valores do ficheiro climático a sobreporem-se aos experimentais.

Dadas as condições de temperatura exterior e radiação solar apresentadas, a nível numérico e experimental, o expectável será que a temperatura, do teste experimental, no interior do armário seja superior à da simulação, para o dia 23 de abril. Por outro lado, o dia 24 de abril deverá apresentar valores superiores para os valores obtidos a partir da simulação numérica.

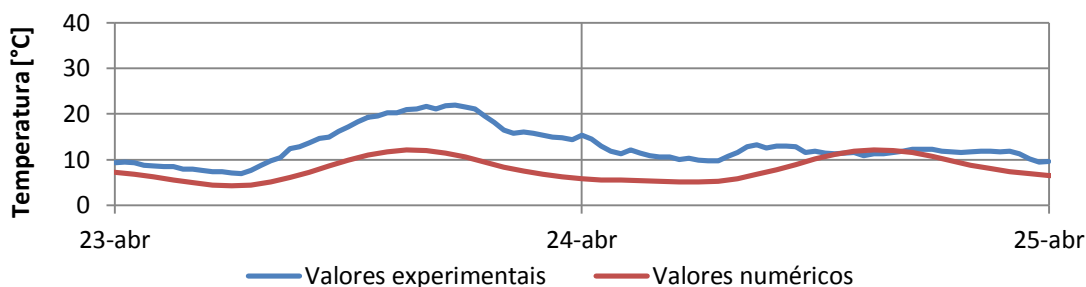


Figura 34 - Gráfico com os valores da temperatura exteriores, numérica e experimental.

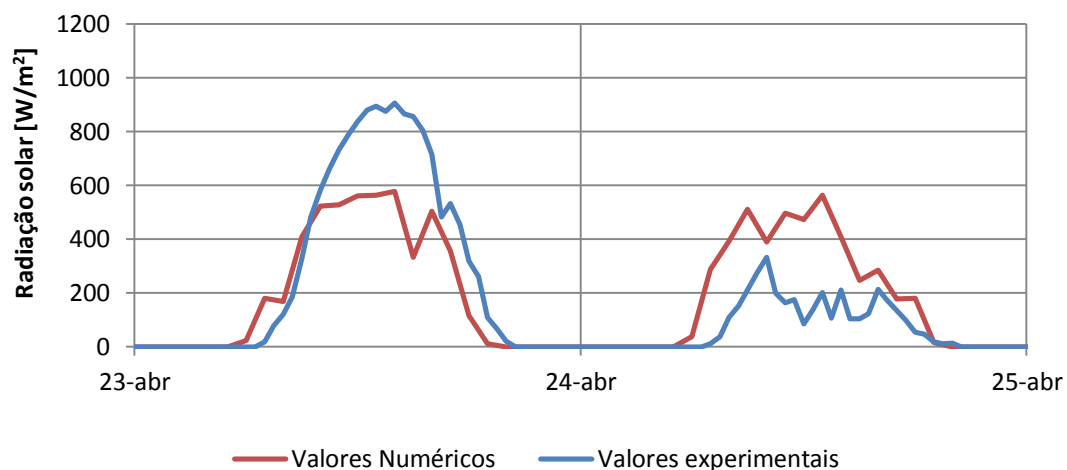


Figura 35 - Gráfico com os valores de radiação solar, numérica e experimental.

O gráfico da figura 36 mostra os resultados esperados, dadas as condições exteriores estudadas. O dia 24 de abril mostra valores superiores para os resultados numéricos, para o dia 23 de abril os valores experimentais não são superiores aos numéricos, como seria de esperar, devido à entrada em funcionamento do sistema de ventilação.

O sistema de ventilação do armário, onde foram colocados os analisadores de temperatura, está programado para iniciar o seu funcionamento assim que a temperatura atinja os 35 °C, daí que os valores de temperatura experimentais pouco tenham excedido os 35 °C. Os ventiladores são acionados duas vezes no dia 23, como se verifica pelas duas vezes que ocorre uma descida abrupta da temperatura. Caso o sistema de ventilação não tivesse entrado em ação os valores experimentais seriam superiores aos numéricos, como era previsto, sendo também os valores experimentais, da temperatura exterior e radiação solar, superiores aos numéricos.

Para o dia 24 os valores de numéricos de temperatura no interior do armário tornam-se mais elevados que os experimentais a partir das 7 horas da manhã, devido ao efeito provocado pela radiação solar que aumenta de forma mais significativa a partir desta hora. Durante o período noturno, entre o dia 23 e 24 de abril, na ausência de radiação solar, os valores de temperatura exteriores têm maior influência na temperatura interior, com os valores numéricos a serem superiores aos experimentais, no exterior e interior do armário.

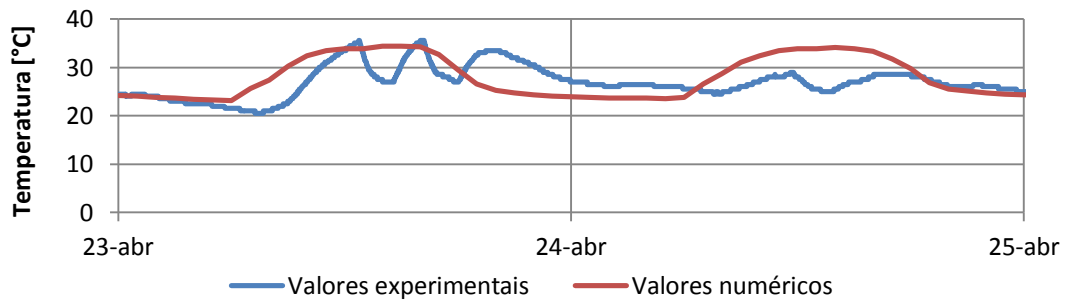


Figura 36 - Gráfico com os valores da temperatura no interior do armário, numérica e experimental.

### 3.5. Nota conclusiva

Apesar de existirem modelos numéricos que conseguem simular vários processos físicos com elevada eficiência, não deixa de existir a necessidade de validar cada novo modelo numérico concebido. Por vezes, os problemas estudados são de grande complexidade e torna-se difícil conceber um modelo numérico que tenha um comportamento adequado. O processo que vai do melhoramento do iterativo do modelo à validação permite criar um modelo do qual irão resultar ensaios com maior exatidão nos resultados.

Alguns pormenores podem afetar o processo de validação, como a ausência de infiltrações no modelo numérico ou a variação da potência térmica dissipada no interior do armário. Para contornar as possíveis causas de erro foram escolhidos dias em que os valores de temperatura e radiação solar, numéricos e experimentais, fossem facilmente comparáveis.

Apesar dos constrangimentos e como seria expectável, o modelo numérico elaborado replica com eficácia o armário de telecomunicações que se pretende estudar. Quando comparados os valores da temperatura no interior do armário, numéricos e experimentais, é possível constatar que existe uma boa correspondência entre eles, quando comparados com os valores de temperatura exterior e de radiação solar.

A validação do modelo numérico confere uma garantia às simulações efetuadas com recurso a este modelo, permitindo obter estudos com resultados fiáveis. Só após a validação efetuada, seguem os estudos numéricos para caracterizar o comportamento térmico do armário.



## 4. Estudo de casos

A concretização de diversos estudos paramétricos permite estudar a influência de várias grandezas, de forma isolada, na temperatura do ar no interior do armário. Isto vai permitir caracterizar o comportamento térmico do armário mediante alteração, de forma seletiva, de diversas condicionantes.

Para que os resultados possam ser analisados de forma clara e eficaz, estes serão expostos sob forma de gráficos que relacionam a temperatura no interior do armário com a variação do parâmetro em estudo.

### 4.1. *Aspetos referentes à modelação*

Após validado o modelo é necessário definir as condições sob as quais os ensaios numéricos serão realizados, para que seja possível compará-los e obter conclusões satisfatórias.

Os estudos representados limitam-se um curto período temporal, quando comparado a um ciclo anual. Quando se concebe um projeto são tomadas em consideração as condições mais desfavoráveis, de forma a garantir o correto funcionamento em todas as ocasiões, neste caso também o período mais crítico será alvo de análise. O período estudado corresponde a uma semana que foi escolhida, após a análise dos resultados ao longo do ano e corresponde aos dias em que as condições são menos favoráveis ao correto funcionamento do armário.

Para escolher qual o período de tempo a estudar foi criado um gráfico com a temperatura no interior do modelo do armário, nos períodos entre 1 de junho e 30 de setembro que são os períodos mais críticos, devido às temperaturas elevadas. Através do gráfico da figura 37 pode-se verificar que o armário atinge valores de temperatura mais elevada entre os dias 10 e 20 de agosto, sendo que o período a ser utilizado nos caso a estudar ficou definido ente 10 e 17 de agosto, assinalado no gráfico com cor a verde. Este gráfico apresenta valores médios diários, obtidos através do DesignBuilder, e foi simulado com uma potência dissipada no interior do armário igual a 100 W e sem ventilação.

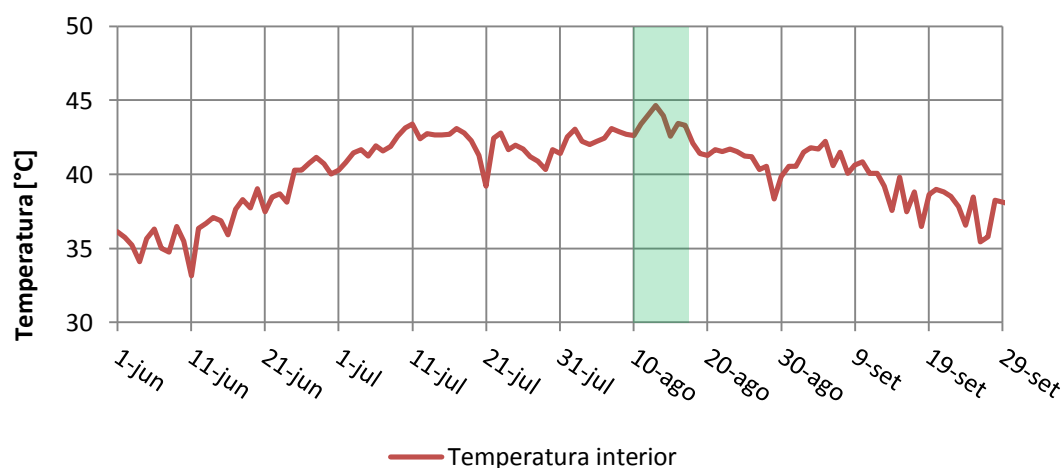


Figura 37 - Valores médios diários para a temperatura no interior do modelo do armário.

Salvo a existência de informação em contrário, o modelo do armário a estudar corresponde a um armário com as características do armário real, construído em liga de alumínio, zinco e silício, sem renovação de ar no interior do armário e uma potência térmica dissipada no seu interior de 100 W. O local definido para os ensaios e consequente ficheiro climático correspondem à cidade da Covilhã.

## 4.2. Resultados e discussão

Esta secção serve para mostrar os resultados obtidos e analisá-los, objetivando de que forma o armário se comporta a nível térmico nos estudos efetuados. Os resultados são expostos sob forma de gráficos para uma melhor compreensão do evoluir da temperatura ao longo do tempo.

### Variação das propriedades radiantes da superfície

Neste estudo serão alteradas as propriedades radiantes dos materiais expostos ao meio exterior, analisando quais as consequências que daí advêm para o desempenho térmico do armário. Na prática estas propriedades podem ser alteradas com a variação dos materiais de construção do armário e da sua cor.

Os valores de absorvidade para a gama do visível e ultravioleta são alterados simultaneamente e variam entre 0,10 e 0,95, com valores intermédios de 0,25, 0,50 e 0,75. No gráfico da figura 38 é comparada a temperatura no interior do armário com a variação dos valores de absorvidade.

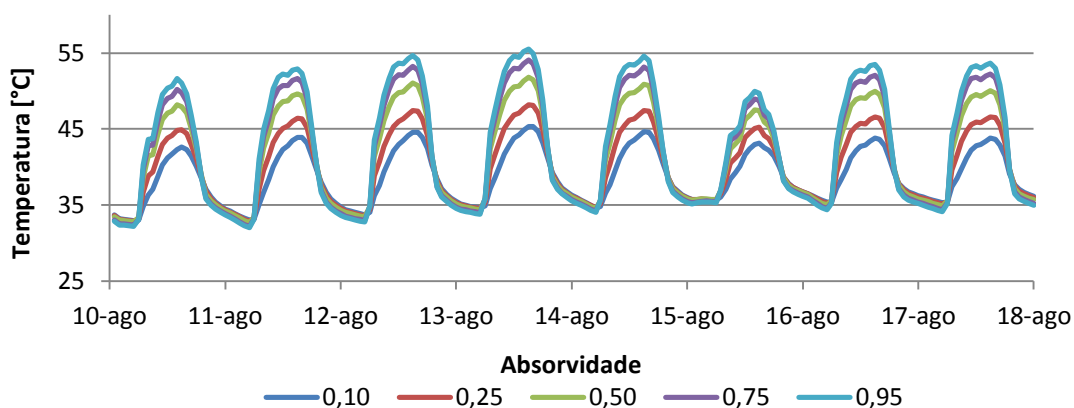


Figura 38 - Valores de temperatura no interior do armário para diferentes valores de absorvidade.

Como seria de esperar os valores de temperatura sofrem alterações mais significativas durante os períodos diurnos devido ao efeito da radiação solar, com temperaturas mais elevadas para os valores de absorvidade mais altos. Os resultados demonstram que durante a ausência de radiação solar a variação dos valores de absorvidade não alteram significativamente a temperatura no interior. No caso em que o valor de absorvidade é igual a 0,95, sem ventilação, a temperatura no armário chega a ultrapassar os 55 °C, o limite máximo de temperatura para o funcionamento do armário.

Pode-se concluir que um valor mais alto de absorvidade vai prejudicar o desempenho térmico do armário durante o dia, podendo por em causa o controlo de temperatura de forma eficaz. Durante os períodos noturnos a variação nos valores de absorvidade tem pouca influência na variação de temperatura.

#### Variação do material de construção de armário

Os fabricantes de armários de telecomunicações procuram evoluir os seus produtos continuamente, melhorando as suas características, ao mesmo tempo existe a preocupação em diminuir custos de produção. O armário estudado é construído com uma liga de alumínio e neste caso é referida como liga de alumínio.

Este estudo procura obter resultados para casos em que o material de construção do armário seja alterado. A utilização de materiais com diferentes propriedades térmicas leva, conseqüentemente, à alteração do desempenho térmico do armário. Este estudo permite quantificar a variação dos valores de temperatura do armário para materiais alternativos, nomeadamente o zinco, fibra de vidro e PVC. As propriedades térmicas dos materiais estudados estão presentes na tabela 5.

Tabela 5 - Materiais utilizados na simulação e respectivas propriedades térmicas.

| Material         | Condutibilidade térmica (W/m.K) | Calor Específico (J/Kg.K) | Massa volúmica (Kg/m <sup>3</sup> ) | Absorvidade (visível) | Absorvidade (infravermelhos) |
|------------------|---------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|-----------------------|------------------------------|
| Liga de Alumínio | 160                             | 880                       | 2800                                | 0,3                   | 0,3                          |
| Zinco            | 113                             | 390                       | 7000                                | 0,3                   | 0,3                          |
| Fibra de Vidro   | 0,036                           | 960                       | 100                                 | 0,6                   | 0,9                          |
| PVC              | 0,170                           | 900                       | 1390                                | 0,7                   | 0,9                          |

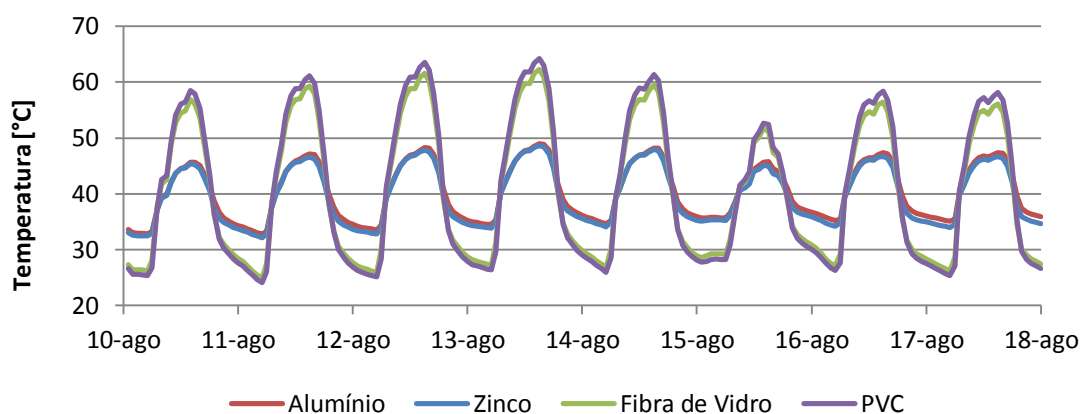


Figura 39 - Temperatura no interior do armário em função do material de construção do armário.

O alumínio e o zinco permitem obter uma menor flutuação nos valores de temperatura, atingindo valores menores durante o dia e valores mais elevados durante a noite. Durante a noite uma maior absorvidade na onda dos infravermelhos vai permitir que o armário transfira mais calor, sob forma de radiação, para o meio envolvente que está a uma temperatura inferior. Durante o período nocturno as perdas por radiação para o céu também são consideráveis. Por outro lado, durante o dia uma maior absorvidade na onda da luz visível também provoca um aumento dos ganhos térmicos, com grande influência da radiação solar. Os valores mais elevados de absorvidade para a gama dos infravermelhos e da radiação visível, da fibra de vidro e do PVC, vão ser prejudiciais perante a exposição solar, bem como, durante os períodos nocturnos.

A variação nos valores de grandezas como a condutibilidade e o calor específico não mostram grande influência nos resultados. A condutibilidade térmica teria mais preponderância se o material de construção fosse mais espesso, devido à reduzida espessura dos materiais utilizados não se regista grande variação nos resultados. Neste caso, o valor da capacidade térmica não é muito influenciado pela variação do valor de calor específico, já que a massa envolvida é reduzida.

A construção do armário em metal, dentro dos casos estudados, mostra-se mais proveitoso que os materiais não metálicos devido aos valores de temperatura máxima atingidos serem inferiores.

### Variação da potência térmica dissipada no interior do armário, sem ventilação

A potência térmica dissipada pelos equipamentos presentes no interior do armário é um dos fatores mais relevantes para a variação de temperatura no interior do armário, pretende-se portanto estudar a relação entre a potência térmica dissipada e a temperatura no interior do armário, no caso em que não existe trocas de ar com o exterior.

Foram efetuadas simulações para potências térmicas entre 100 W e 400 W, com intervalos de 100 W, a potência térmica dissipada é constante ao longo do tempo. Os resultados obtidos estão expostos no gráfico da figura 40, existindo quase uma proporcionalidade direta entre o aumento da temperatura e o aumento da potência térmica dissipada.

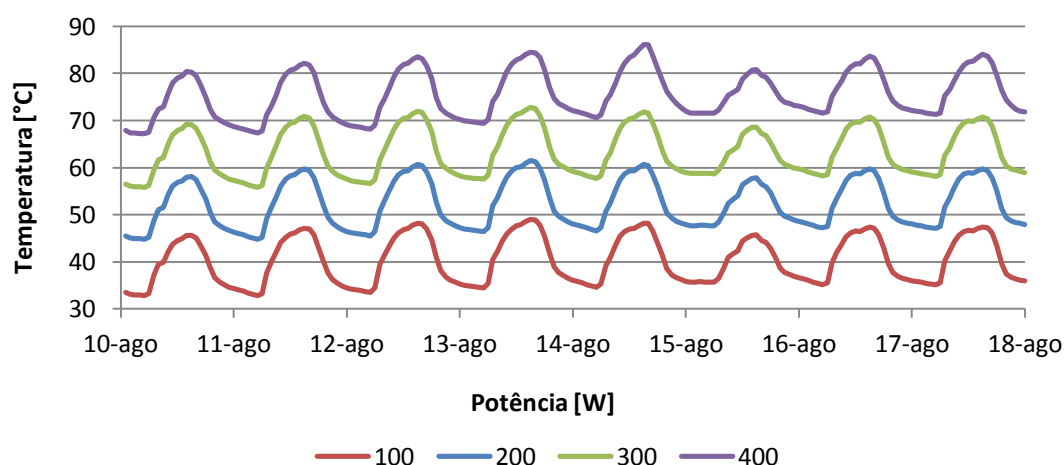


Figura 40 - Temperatura no interior do armário em função da potência térmica dissipada no interior do armário.

Para uma potência térmica de 100 W verifica-se que o armário tem a capacidade de dissipar o calor a uma taxa suficiente alta para garantir uma temperatura inferior a 55 °C,

mesmo com a ausência de ventilação forçada. Para as restantes potências térmicas estudadas seria necessário que o sistema de ventilação entrasse em funcionamento de modo a garantir que a temperatura do ar não exceda os 55 °C, porém é necessário estudar cada caso para definir o caudal de ar mínimo necessário para cada valor de potência térmica.

#### **Variação do caudal de ar da ventilação**

Quando a taxa de dissipação de calor do armário não é suficientemente elevada para manter o seu interior com valores de temperaturas aceitáveis é necessário recorrer à ventilação forçada. As características do escoamento proporcionado pelos ventiladores têm influência na quantidade de energia térmica que é retirada do interior do armário por unidade de tempo. Este estudo pretende examinar a influência do valor do caudal na variação da temperatura no interior do armário.

Um bom dimensionamento do sistema de ventilação permite a instalação de equipamento adequado sem pôr em causa o correto controlo de temperatura, permitindo evitar a utilização de ventiladores sobredimensionados que elevariam os custos de aquisição e de funcionamento ou casos de subdimensionamento, nos quais os ventiladores não teriam a capacidade para remover a carga térmica interna.

É expectável que a partir de um determinado valor de caudal de ar a temperatura não diminua mais, alcançando um valor próximo da temperatura exterior. Para alcançar valores de temperatura inferiores à temperatura exterior seria necessária a instalação de um sistema de refrigeração.

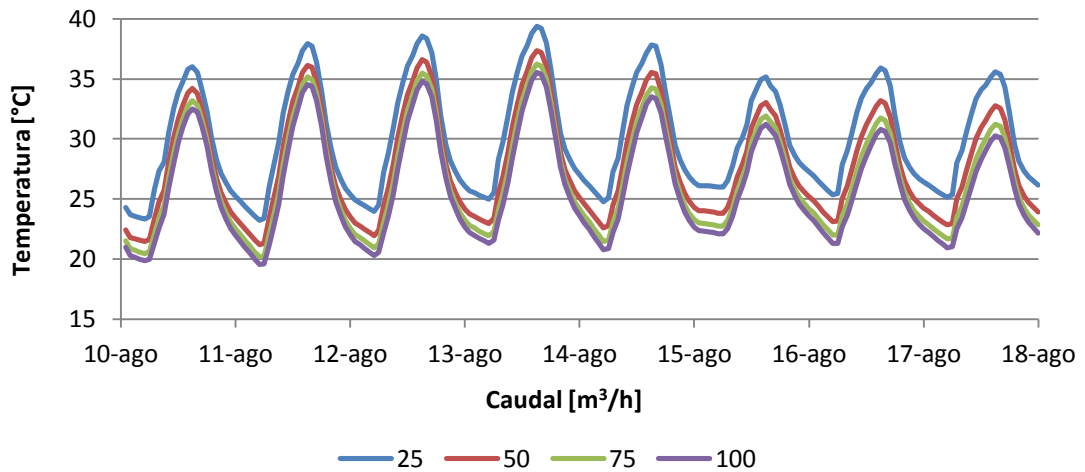


Figura 41 - Temperatura no interior do armário em função do valor de caudal imposto.

A diferença de temperatura máxima atingida para os caudais de ar mínimo e máximo estudados, verificada para períodos equivalentes, está compreendida entre, aproximadamente, 3 °C e 5 °C. É portanto, necessário quadruplicar o caudal para obter uma diminuição da temperatura a rondar os 4 °C. A diminuição de temperatura alcançada entre o caudal de 25 m<sup>3</sup>/h e de 50 m<sup>3</sup>/h é a mais elevada. A cada incremento de caudal imposto verifica-se que a redução do valor máximo de temperatura é cada vez menor. Na comparação entre os caudais de 75 m<sup>3</sup>/h e 100 m<sup>3</sup>/h verifica-se uma redução de apenas 2% no valor da temperatura, significando que a partir deste valor de caudal o seu aumento não traz benefício para o controlo de temperatura.

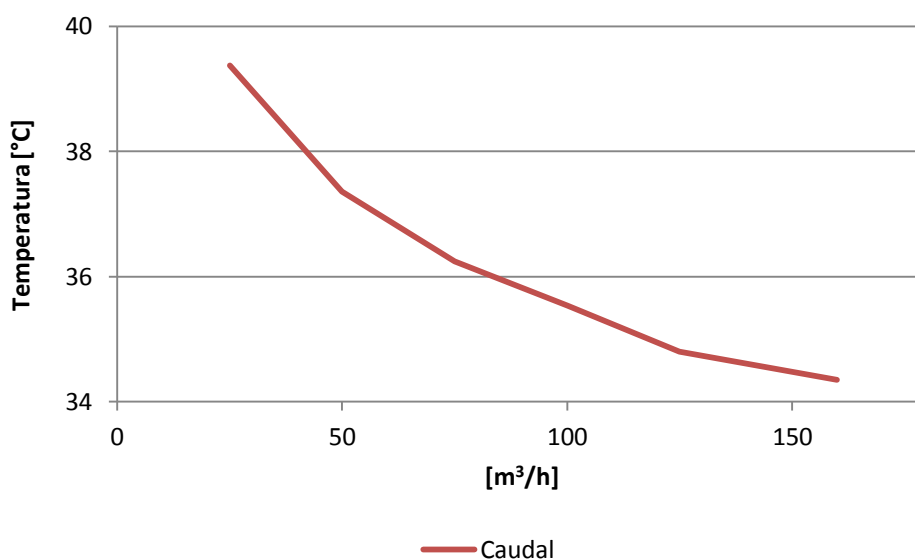


Figura 42 - Temperatura máxima atingida em função do caudal da ventilação mecânica.

O gráfico da figura 42 dá uma melhor percepção da influência variação do caudal de ar no valor da temperatura máxima alcançada no interior do armário. À medida que o caudal de ar aumenta a diminuição da temperatura começa a acontecer a um ritmo mais baixo. Um valor de caudal de ar de renovação, muito elevado não significa, necessariamente, uma melhoria significativa no controlo da temperatura. É importante definir um valor de caudal adequado, que possa aliar a escolha de um equipamento de ventilação económico e eficaz, a um correto controlo da temperatura.

#### Variação da potência térmica dissipada no interior do armário para um caudal de ar de 100 m³/h

Muitos dos armários de telecomunicações existentes no mercado dispõem de um sistema de ventilação forçada para evitar o sobreaquecimento do equipamento. Por norma, o sistema de ventilação funciona no modo ligado/desligado, controlado por um sensor de temperatura. Os ventiladores trabalham, portanto, a velocidade constante e com caudal fixo durante o funcionamento.

Nos casos em que o armário não é escolhido em função das necessidades, mas pelo contrário, adaptam-se os equipamentos a utilizar de acordo com um armário já existente, é importante conhecer a limitações do armário. Este estudo tem como objetivo perceber qual a potência térmica máxima que pode ser dissipada pelos equipamentos instalados no interior armário, sem que seja posta em causa o correto funcionamento do EBT devido a problemas de sobreaquecimento. A simulação é efetuada com a ventilação ligada e com

um caudal volúmico de ar fixo em  $100 \text{ m}^3/\text{h}$ , onde é analisada a temperatura em função da potência térmica dissipada.

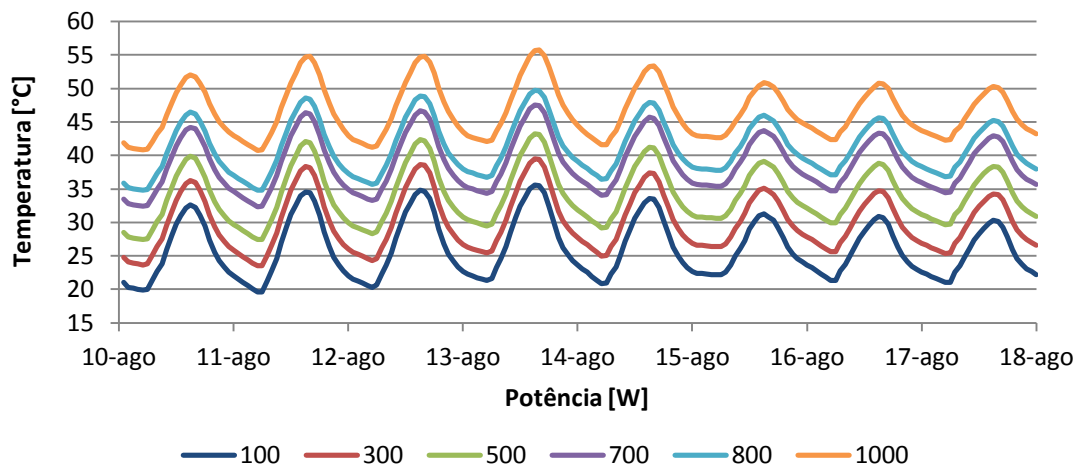


Figura 43 - Temperatura no interior do armário em função da potência térmica dissipada no interior do armário, para um caudal de ar de  $100 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Através do gráfico da figura 43 é perceptível como aumenta a temperatura no interior do armário com o aumento da potência térmica dissipada no seu interior. Para uma potência de  $1000 \text{ W}$  verifica-se que a temperatura chega a ultrapassar ligeiramente os  $55 \text{ }^\circ\text{C}$ , valor limite para o funcionamento do armário. No caso em que a potência térmica dissipada foi fixada em  $800 \text{ W}$  a temperatura máxima atingida é de  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ . É ainda possível verificar que para potências térmicas entre  $100 \text{ W}$  e  $700 \text{ W}$  cada acréscimo de  $200 \text{ W}$  de potência térmica dissipada vai provocar um aumento da temperatura do ar interior em aproximadamente  $4 \text{ }^\circ\text{C}$ .

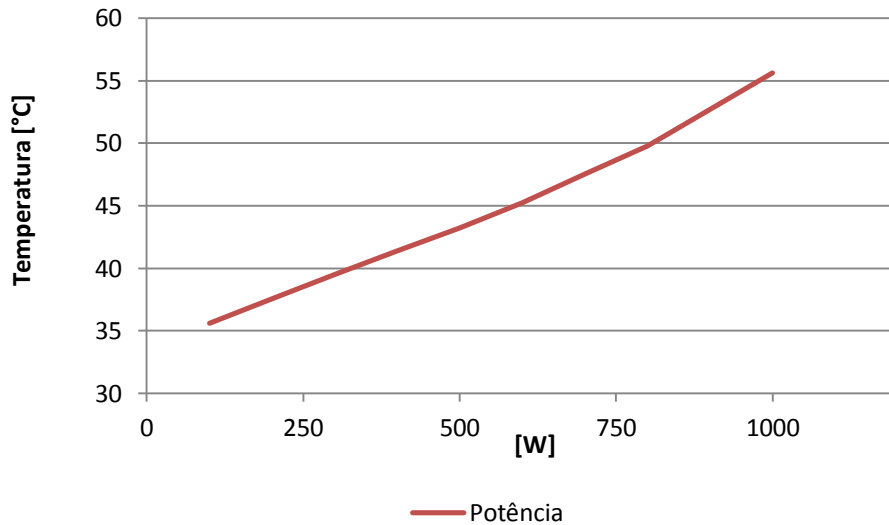


Figura 44 - Temperatura interior máxima atingida em função do valor da potência térmica dissipada no interior do armário.

O gráfico da figura 44 relaciona a temperatura máxima atingida no interior do armário em função da potência térmica libertada pelos equipamentos presentes no interior do armário, para o período estudado. O resultado apresenta um comportamento quase linear, significando que o aumento da temperatura é quase proporcional ao incremento de potência térmica dissipada no interior do armário.

A potência máxima a dissipar deverá ser escolhida tendo em conta vários fatores como as consequências da interrupção do funcionamento de um EBT, possíveis problemas no equipamento em caso de sobreaquecimento, a probabilidade dos equipamentos funcionarem no pior caso, em que dissipam o máximo de potência térmica, entre muitas outras condicionantes.

#### Efeito do sombreamento

A radiação solar é um fator que afeta o rendimento térmico do armário, quanto maior for a radiação solar incidente no armário maior serão as cargas térmicas, levando a um consequente aumento de temperatura do ar no seu interior. Uma das estratégias para reduzir o efeito da radiação incidente no armário pode passar por sombrear o armário. Em situações reais o sombreamento por ser provocado por vegetação, infraestruturas pré-existentes ou construídas para o efeito ou resultante da própria orografia do terreno.

Neste estudo é utilizada a ferramenta do DesignBuilder “*Component Block*” para controlar a radiação incidente no modelo numérico. Foram colocados blocos para garantir que toda a radiação incida nos “*Component Block*” antes de atingir o armário. A transmissividade foi

variada desde 0, não passando nenhuma radiação, até 1, caso em que não existe sombreamento. A potência térmica dissipada no interior do armário é de 200 W.

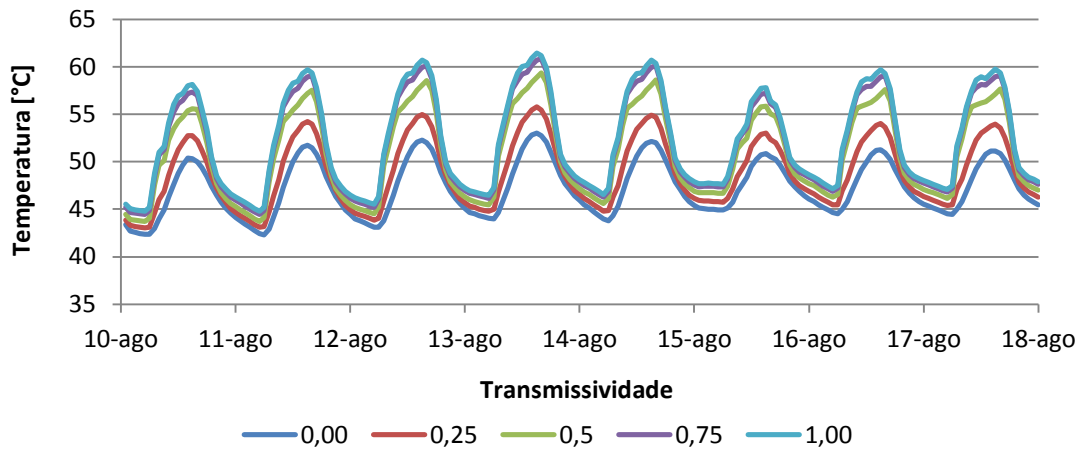


Figura 45 - Temperatura no interior do armário em função do sombreamento.

O efeito produzido pelo sombreamento na temperatura do interior do armário é notório no gráfico da figura 45 onde chegam a existir diferenças de quase 9 °C, para o mesmo período. Um maior nível de sombreamento mostra-se eficaz no melhoramento do controlo de temperatura no armário.

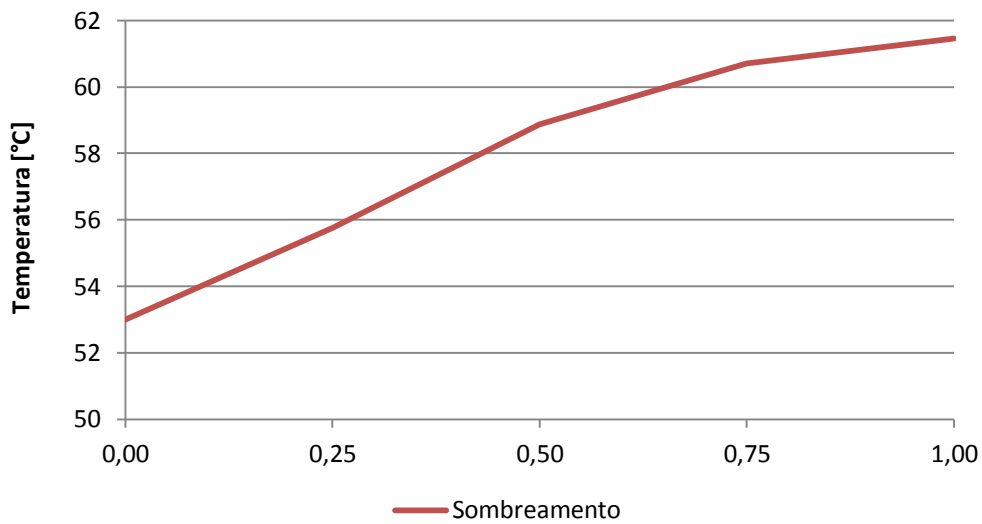


Figura 46 - Temperatura máxima atingida em função do valor de sombreamento.

O gráfico da figura 46 mostra que a diferença entre impedir por completo a incidência de radiação no armário ou reduzir para metade a radiação incidente, resulta numa diferença menor que 3 °C. Já para a diferença entre nenhum sombreamento ou uma redução para

metade na radiação solar incidente provoca uma variação na temperatura máxima do ar interior do armário de quase 6 °C.

Num caso real não seria viável evitar que toda a radiação incidisse no armário, para tal o equipamento estaria de estar completamente protegido, sendo colocado, por exemplo, dentro de um *shelter*. Tal, retiraria o propósito do armário exterior de telecomunicações que se baseia no baixo custo, fácil instalação e manutenção.

Uma boa solução pode passar garantir que o armário seja sombreado apenas nas horas em que a radiação provoca um efeito mais nefasto. Para tal basta saber o percurso solar, ao longo do ano, para definir o local onde instalar o armário. Através do conhecimento do percurso solar é possível calcular onde instalar o obstáculo que vai causar o sombreamento, escolhendo quais os períodos nos quais o armário será sombreado.

### **Efeito da localização geográfica**

A localização geográfica da EBT é um fator proeminente para a resposta do armário a nível térmico. Para diferentes pontos do globo podem existir grandes variações no clima que tem de ser tidas em conta no projeto de uma EBT. Os constrangimentos mais comuns advêm de problemas relacionados com temperaturas demasiado elevadas, mas nem sempre as temperaturas elevadas são o problema, casos em que as temperaturas sejam demasiado baixas podem afetar negativamente o desempenho dos equipamentos de telecomunicações, tal como níveis de humidade do ar que extravasem os valores especificados pelos fabricantes dos equipamentos.

O ensaio sobre a influência da localização geográfica na temperatura interior do armário foi dividido em duas partes. A primeira corresponde ao funcionamento do armário em várias cidades do território português, a segunda diz respeito a várias cidades do hemisfério norte. Apenas foram utilizadas cidades do hemisfério norte de modo a manter o período de estudo entre os dias 10 e 17 de agosto, já que no hemisfério sul corresponderia a inverno. Em ambos os casos os estudos decorrem com um valor de potência térmica dissipada no interior do armário de 100 W e sem recurso a ventilação mecânica.

Para o estudo de várias localizações a nível do território português foram escolhidas duas cidades no litoral, uma mais a sul (Lisboa) e outra mais a norte (Porto), e três no interior, uma no sul (Beja), uma no centro (Covilhã) e a última no norte (Bragança).

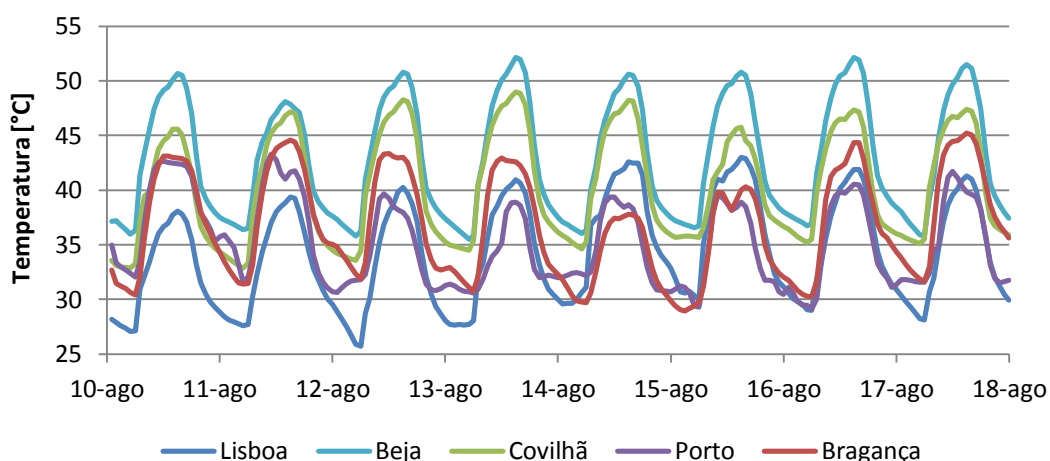


Figura 47 - Temperatura do ar no interior do armário em função da localização geográfica (Portugal).

Os resultados para as duas cidades do litoral, Lisboa e Porto, são mais favoráveis com as temperaturas quase sempre mais baixas, apenas Bragança em alguns períodos apresenta resultados semelhantes. O clima no litoral é mais temperado, não alcançando temperaturas máximas tão elevadas como no interior, no período de verão. No caso de Bragança, apesar de ser no interior, é a cidade mais a norte das 5 estudadas, o que pode levar a temperaturas mais baixas.

As cidades de Beja e da Covilhã, ambas no interior, apresentam temperaturas mais elevadas no interior do armário que as restantes. A primeira, Beja, por se situar mais a sul apresenta temperaturas mais elevadas que no caso da Covilhã.

Em Portugal continental, é possível chegar à conclusão que para locais na mesma latitude o fator interioridade é uma desvantagem para o controlo de temperatura no interior do armário, devido ao clima menos temperado.

Para o estudo fora do território português foram escolhidas 3 cidades europeias, 1 na América do Norte e outra na Ásia Ocidental. Na tabela 6 estão presentes os dados referentes à localização geográfica de cada cidade e dados climáticos, entre eles, a radiação solar direta normal, a temperatura média mínima e máxima de ar. Todos os valores são referentes ao mês de agosto e resultam da média de valores obtidos ao longo de 22 anos, entre julho de 1983 e junho de 2005. Estes valores constam numa base de dados criada pela NASA concebida para apoiar o desenvolvimento da utilização de energias renováveis e faz parte do projeto *Surface meteorology and Solar Energy*.

Tabela 6 - Localização e dados climáticos sobre as cidades em estudo, para o mês de agosto (NASA, 2015).

|           | Latitude [°] | Longitude [°] | Radiação solar direta normal [kWh/m <sup>2</sup> /dia] | Temperatura média mínima [°C] | Temperatura média máxima [°C] |
|-----------|--------------|---------------|--|-------------------------------|-------------------------------|
| Lisboa    | 38,7         | -9,1          | 8,10   | 19,5                          | 24,7                          |
| México    | 19,4         | -99,1         | 4,49   | 13,6                          | 23,0                          |
| Moscovo   | 55,7         | 37,6          | 4,06   | 12,5                          | 21,3                          |
| Östersund | 63,2         | 14,6          | 3,71   | 7,49                          | 15,3                          |
| Riade     | 24,7         | 46,8          | 7,92   | 27,4                          | 41,4                          |

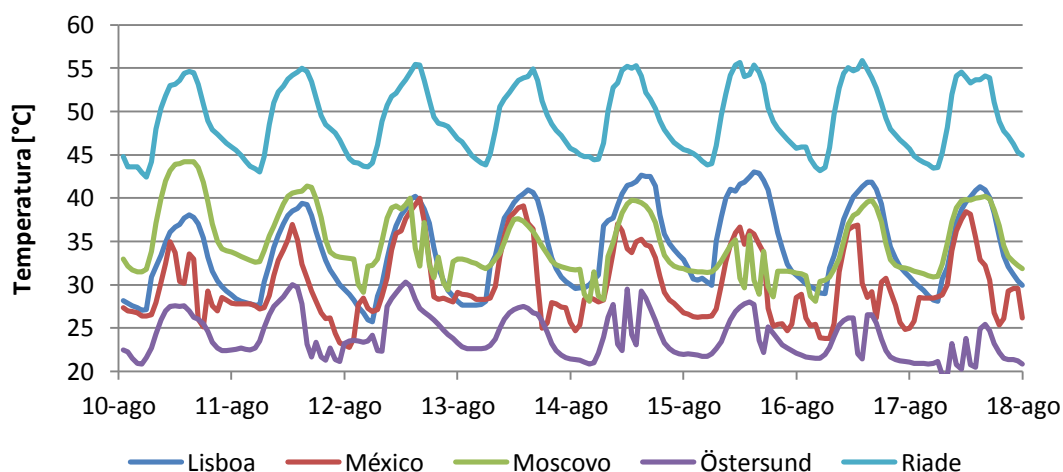


Figura 48 - Temperatura no interior do armário em função da localização geográfica (hemisfério norte).

Como seria de esperar os valores apresentados no gráfico da figura 48 são mais díspares que os do gráfico da figura 47, já que o primeiro apenas contém resultados de cidades de Portugal, enquanto o segundo contém resultados de vários locais ao longo do hemisfério norte. Para além da grande distância entre as cidades estudadas, existe ainda o fator da latitude que também difere bastante entre alguns dos locais escolhidos.

No gráfico existem duas cidades que se destacam pelos seus resultados, Östersund (Suécia) e Riade (Arábia Saudita), a primeira devido a apresentar menores temperaturas que as

restantes e a segunda, pelo contrário, apresenta valores de temperatura no armário claramente superiores às restantes. A cidade de Östersund, por se localizar no norte da Europa, apresenta um clima frio em que é possível dissipar maior potência térmica no interior do armário, quando comparada com os outros casos estudados. Já o caso de Riade mostra que em clima mais quentes, como é o caso da Ásia Ocidental, até com baixas potências dissipadas no interior do armário pode ser necessário um dispositivo de controlo de temperatura ativo. Neste estudo verifica-se que, na cidade de Riade, com uma potência térmica de 100 W no interior do armário e sem ventilação o armário não tem a capacidade de manter a temperatura abaixo dos 55 °C.

A cidade de Lisboa (Portugal) e Moscovo (Rússia) apresentam um perfil de resultados semelhante, em alguns períodos uma apresenta valores de temperatura superiores, noutros períodos o cenário inverte-se. Para ambos os casos o valor máximo de temperatura aproxima-se dos 45 °C, sendo o de Moscovo um pouco mais elevado. Já os resultados para a cidade do México mostram, para quase todo o período estudado, valores inferiores aos de Lisboa. A temperatura máxima atingida no interior do armário situa-se muito próxima dos 40 °C.

### **4.3. Nota conclusiva**

Os estudos efetuados permitem analisar o comportamento térmico do armário quando sujeito a um conjunto diversificado de situações, quer em termos de condições de operação quer em termos das condições internas e externas ao armário. A utilização de *software* de simulação numérica mostra-se uma ferramenta muito eficaz para decidir quais os equipamentos a instalar num armário de telecomunicações, resultando num armário com utilização mais racional e diminuindo o risco de possíveis problemas no controlo de temperaturas.



## 5. Conclusão

Neste capítulo são apresentadas, de forma sucinta, as conclusões que foram alcançadas ao longo do trabalho desenvolvido, evidenciando os aspectos mais relevantes para o estudo do comportamento térmico de um armário exterior de telecomunicações. Por fim, são sugeridos alguns trabalhos que podem ser desenvolvidos nesta área, com o propósito de aumentar e diversificar o conhecimento sobre esta matéria.

### 5.1. Recapitulação

Os estudos relacionados com a temática das telecomunicações assumem elevada importância na atualidade, dado o previsível aumento do tráfego de comunicações móveis para os anos vindouros. As telecomunicações representam cerca de 1% do consumo global de energia, pelo que é de máxima importância uma utilização, a nível energético, o mais eficiente e sustentável possível, podendo o conhecimento científico contribuir para tal. Além da temática energética, existe a progressiva dependência da sociedade nas telecomunicações para as mais diversas tarefas do quotidiano. Esta dissertação mais vocacionada para o âmbito do estudo térmico nas comunicações móveis foi realizada tendo em consideração a pertinência do tema.

A partir dos resultados é possível destacar algumas conclusões em relação ao comportamento térmico do armário. Um dos pontos a ter em atenção na instalação de um EBT é a sua localização geográfica, pois a temperatura interior do armário é muito influenciada pelas condições climáticas. A escolha dos materiais utilizados na construção do armário também é de grande importância, em grande parte, devido às propriedades radiantes dos materiais. Dos estudos decorridos, é possível concluir que os materiais metálicos são mais adequados que os não metálicos, devido às suas propriedades radiantes. A variação da potência térmica dissipada no interior do armário tem grande influência na temperatura interior, no caso de existir ventilação a influência é menor. A ventilação mecânica, sendo um método de extração de calor simples e barato, mostra-se eficaz para a extração de calor nos armários de telecomunicações. É, porém, importante notar que existe um limite para o qual o aumento do caudal de ar da ventilação se mostra ineficaz no melhoramento da extração de calor.

A utilização do DesignBuilder/EnergyPlus para caracterizar o desempenho térmico do armário mostrou ser uma boa opção, permitindo obter resultados quantitativos sob diversas condições de operação. O *software* de modelação numérica existente permite estudar um modelo sob diversas condições, interiores e exteriores, de forma rápida e, em grande parte dos casos, menos onerosa que em ensaios experimentais. A possibilidade de alterar um grande número de variáveis na simulação é uma grande vantagem. Um senão da

modelação numérica prende-se com o facto de ser necessário validar experimentalmente cada novo modelo numérico concebido. Este género de estudo torna-se, portanto, mais indicado para casos em que o modelo seja ensaiado repetidamente.

Atualmente, a instalação dos equipamentos nos armários de telecomunicações é efetuada com base em conhecimentos empíricos, podendo dar azo a instalações incorretamente dimensionadas. A análise da capacidade de dissipação de potência térmica de um armário exterior de telecomunicações permite definir quais os equipamentos que podem ser instalados, sem comprometer os limites de temperatura impostos. A utilização do DesignBuilder/EnergyPlus permite, caso a caso, conhecer qual a potência térmica máxima a dissipar no interior do armário, evitando casos de subdimensionamento no material a instalar ou problemas associados a excesso de potência térmica dissipada no interior do armário. O correto dimensionamento, apoiado em soluções de modelação numérica, permite uma gestão mais eficiente de recursos, o que se traduz em ganhos a nível económico e energético.

Os ensaios levados a cabo nesta dissertação permitiram perceber de que forma diversas variáveis afetam o comportamento térmico do armário. Apesar deste género de estudos numéricos serem uma ferramenta útil, deverá existir uma postura crítica por parte de quem projeta o *layout* do armário. As simulações efetuadas correspondem a casos específicos, não abrangendo todos os pormenores existentes num caso real. Em suma, o DesignBuilder/EnergyPlus é uma ferramenta poderosa para a caracterização do desempenho térmico de armários exteriores de telecomunicações, permitindo otimizar a utilização destes, porém é necessário ter em atenção as limitações do programa para que os resultados não sejam afetados negativamente.

## **5.2. Sugestão para trabalho futuro**

Todos os trabalhos desenvolvidos visam alcançar um determinado objetivo, não podendo abarcar um infinito número de resultados. Esta limitação pode advir de diferentes constrangimentos, sejam eles de carácter económico, temporal, ausência de recursos ou determinadas competências. Esta dissertação não foge a esta regra, após finalizado o trabalho e analisados os resultados obtidos, é possível concluir que o tema estudado é muito abrangente e que o estudo sobre esta temática poderá ser efetuado de forma ainda mais aprofundada e diversificada. O desenvolvimento de estudos relacionados com o funcionamento dos armários exteriores de telecomunicações é de grande importância, por um lado, devido ao previsível aumento do tráfego nas telecomunicações e proliferação deste género de armários para albergar os equipamentos de telecomunicações, por outro lado, a bibliografia é parca em estudos relacionados com os armários de

telecomunicações, sendo que grande parte do conhecimento foi obtido de forma empírica e está confinado ao sector empresarial que lida com estes equipamentos.

Uma possibilidade para desenvolver este tema passa por realizar um estudo diretamente relacionado com o trabalho levado a cabo durante a presente dissertação. Através de mais ensaios, com a introdução de novos valores para as variáveis estudadas ou mesmo o estudo de outras variáveis que não foram estudadas, poderia ser alcançada uma caracterização do comportamento do armário mais aprofundada. A introdução de trocas de ar causadas pelas infiltrações e a análise da sua influência no comportamento térmico seria importante.

Além de alteração das características do funcionamento, a introdução de alterações no armário ou o estudo de diferentes armários também seria interessante, do ponto de vista científico. Adicionar isolantes no interior ou exterior do armário pode ser um caso a estudar, tal como a introdução de matérias de mudança de fase, analisando para cada caso se existe melhorias a nível térmico e no caso do comportamento térmico do armário ser mais favorável, verificar se a relação entre o investimento necessário e as melhorias conseguidas é vantajosa.

Nesta dissertação foi efetuado um estudo a nível macroscópico, onde foram introduzidos *inputs* e o DesignBuilder devolvia como *output* a temperatura no interior do armário, ao longo do tempo estudado. Seria pertinente analisar de que forma o armário se comporta no seu interior, qual a distribuição de temperatura dentro do volume interior do armário ou de que forma ocorre o escoamento de ar desde a entrada à saída do armário. O estudo do perfil de temperaturas permitiria identificar onde existem pontos quente e quais os pontos mais críticos para o funcionamento dos equipamentos. A análise do escoamento de ar dentro armário possibilitaria conhecer problemas associados à deficiente circulação de ar pelo equipamentos e consequente diminuição do desempenho do sistema de ventilação forçada.

Todos os trabalhos relacionados com a caracterização do armário têm como objetivo primordial o seu melhoramento, pelo que será de grande importância que se desenvolvam trabalhos onde surjam soluções viáveis que melhorem o funcionamento do armário.



## Referências bibliográficas

- Afonso, J. F. (2009). *Estudo do Comportamento Térmico de Edifícios Antigos*. Monte de Caparica: UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA.
- Ahmadi, M., Gholami, A., Bahrami, M., & Lau, K. (2014). Passive Cooling of Outside Plant Power Systems, a Green Solution to Reduce Energy Consumption. IEEE.
- Alawadhi, E. M., & 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.
- APCER. (12 de Junho de 2015). Obtido de APCER: <http://www.apcer.pt/>
- Banerjee, K., Pedram, M., & Pedram, M. (2001). Analysis and optimization of thermal issues in high-performance VLSI. Nova lorque, USA: ACM.
- Boukhanouf, R., & Haddad, A. (2010). A CFD analysis of an electronics cooling enclosure for application. *Applied Thermal Engineering*, 30, 2426-2434.
- Chen, Y., Zhang, Y., & Meng, Q. (2009). Study of ventilation cooling technology for telecommunication base stations in Guangzhou. *Energy and Buildings*, 41, 738-744.
- Chen, Y., Zhang, Y., & Meng, Q. (2012). Study of ventilation cooling technology for telecommunication base stations:. *Energy and Buildings*, 212-218.
- Ciulla, G., Brano, V. L., & Orioli, A. (2010). A criterion for the assessment of the reliability of ASHRAE conduction transfer function coefficients. *Energy and Buildings*, 42, 1426-1436.
- Edler, T., & Lundberg, S. (2004). *Energy efficiency enhancements in radio access networks*. Ericsson.
- EnergyPuls. (2014). Input Output Reference.
- Ericsson. (2014). *ERICSSON MOBILITY REPORT*.
- Ferreira, J. A., & Patrício, M. F. (1999). *Análise Numérica*. Coimbra.
- Gaspar, P. D. (2008). *"Otimização do Desempenho e da Eficiência Energética de Equipamentos de Refrigeração"*. Covilhã, Portugal: Universidade da Beira Interior.

- Gurrum, S. P., Suman, S. K., Joshi, Y. K., & Fedorov, A. G. (2004). Thermal Issues in Next-Generation Integrated Circuits. *Device and Materials Reliability*, 4, 709-714 .
- Hong, Y., Li, Y., & Shi, J. (2009). Geothermal Cooling Solution Research For Outdoor Cabinet. Leuven, Bélgica: EDA Publishing/THERMINIC.
- Joshi, Y., Azar, K., Blackburn, D., Lasance, C. J., Mahajan, R., & 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, 1195-1201.
- Khodabandeh, R. (2004). Thermal performance of a closed advanced two-phase thermosyphon loop for cooling of radio base stations at different operating conditions. *Applied Thermal Engineering*, 24, 2643-2655.
- Lubritto, C., Petraglia, A., Vetromile, C., Curcuruto, S., Logorelli, M., Marsico, G., & D'Onofrio, A. (2011). Energy and environmental aspects of mobile communication systems. *Energy*, 1109-1114.
- Mariam, F. A. (2010). *THERMAL MANAGEMENT OF OUTSIDE PLANT TELECOMMUNICATION CABINETS: DESIGN AND CFD MODELING METHODOLOGY*. ARLINGTON, TEXAS.
- Mariam, F. A., Raju, U., Mulay, V., Agonafer, D., Sivanandan, D., & Hendrix, M. (2009). Thermal Design Considerations of Air-Cooled High Powered Telecommunication Cabinets. IEEE.
- Masson, S. L., Chehade, A. A., & Louahlia-Gualous, H. (2013). Passive cooling of telecommunication outdoor cabinets for mobile base station. Berlin: INTELEC.
- Muralidharan, B., Mariam, F. A., Karajgikar, S., Agonafer, D., & Hendrix, M. (2010). Energy Minimization Based Fan Configuration for Double Walled Telecommunication Cabinet with Solar Load. IEEE.
- NASA. (12 de Setembro de 2015). *NASA Surface meteorology and Solar Energy - Location*. Obtido de <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?email=&step=1&p=&lat=387&submit=Submit&lon=-91>
- Nörtershäuser, D., Masson, S. L., Volkov, T., Huttunen, J., & Douchet, F. (2014). LIQUID COOLING FOR MOBILE BASE STATION. IEEE.
- Oliveira, P. d. (2001). *Mecânica Computacional*. Covilhã: Universidade da Beira Interior.

- Roy, S. (2008). *Energy Logic for Telecommunications*. Emerson Network Power.
- Samba, A., Louahlia-Gualous, H., Masson, S. L., & Nörterhäuser, D. (2013). Two-phase thermosyphon loop for cooling outdoor telecommunication equipments. *Applied Thermal Engineering*, 50, 1351-1360.
- Scheck, H.-O. (2008). Power consumption and energy efficiency of fixed and mobile telecom networks. Kyoto.
- Silva, P. D. (2010). *Apontamentos de Transmissão de Calor*. Covilhã: Universidade da Beira Interior.
- Sorrentino, M., Rizzo, G., Genova, F., & Gaspardone, M. (2010). A model for simulation and optimal energy management of Telecom switching plants. *Applied Energy*, 87, 259-267.
- Viatel. (s.d.). ABE Armário Base Exterior. Viseu.
- Yeh, L. (1996). Review of heat transfer technologies in electronic equipment. *Journal of Electronic Packaging*, 117, 333-339.
- Yuping, H., Shengqin, J., Yunhui, Z., Xiaoming, K., Qiao, C., Cucchiatti, F., & Griffa, G. (2008). ENERGY SAVING ACTIVE COOLING SYSTEMS FOR OUTDOOR CABINET. IEEE.
- Zhang, Y., Chen, Y., Wu, J., & Meng, Q. (2008). Study on energy efficient envelope design for telecommunication base station in Guangzhou. *Energy and Buildings*, 40, 1895-1900.
- Zhou, F., Chen, J., Ma, G., & Liu, Z. (2013). Energy-saving analysis of telecommunication base station with thermosyphon heat exchanger. *Energy and Buildings*, 66, 537-544.