



UNIVERSIDADE DE COIMBRA

**Faculdade de Ciências e Tecnologia**

Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Carlos Filipe Martins de Oliveira

**Modelos para simulação de cargas de frio alimentar doméstico para avaliação do potencial de *Demand Response***

Coimbra – Portugal

Setembro 2013





Universidade de Coimbra  
Faculdade de Ciências e Tecnologias  
Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Tema:

**Modelos para simulação de cargas de frio alimentar doméstico  
para avaliação do potencial de *Demand Response***

Autor:

**Carlos Filipe Martins de Oliveira**

Orientadores:

Professor Doutor Álvaro Filipe Peixoto Cardoso de Oliveira Gomes

Professor Doutor António Rui de Almeida Figueiredo

Presidente do Júri:

Professor Doutor Henrique José Almeida da Silva

Vogal:

Professor Doutor Marco Alexandre Cravo Gomes

Coimbra - Portugal

Setembro 2013





Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de  
Computadores

Especialização em Energia

Modelos para simulação de cargas de frio alimentar doméstico  
para avaliação do potencial de *Demand Response*

*Carlos Filipe Martins de Oliveira*

orientador: *Professor Doutor Álvaro Filipe Peixoto Cardoso de Oliveira Gomes*

orientador: *Professor Doutor António Rui de Almeida Figueiredo*



# Agradecimentos

Este espaço é dedicado aqueles que deram a sua contribuição para que esta dissertação fosse realizada. A todos eles deixo aqui o meu sincero agradecimento.

Aos meus orientadores, Professor Doutor Álvaro Gomes e Professor Doutor António Rui Figueiredo pelo apoio e orientação disponibilizados na realização deste trabalho, conselhos, sugestões, discussões produtivas, disponibilidade total e constante motivação.

À minha família deixo um grande agradecimento pela ajuda e força que me deram ao longo destes longos anos.

A todos os meus amigos e colegas de curso, em especial a Sofia Betânia Alves, agradeço toda a amizade, paciência e apoio neste longo caminho.

Este trabalho é enquadrado na Iniciativa Energia para a Sustentabilidade da Universidade de Coimbra e apoiado pelo projeto Energy and Mobility for Sustainable Regions - EMSURE (CENTRO-07-0224-FEDER-002004).



# Resumo

A evolução dos sistemas de energia no sentido das chamadas redes inteligentes (*Smart Grids* na terminologia anglo-saxónica) com a crescente disseminação da geração local e do recurso às tecnologias da informação e comunicação, permite, além de possíveis alterações nos fluxos de potência, a disponibilização bidirecional de dados quase em tempo real.

Ficam assim acessíveis dados de consumo, preços e outros sinais que tornam possível que o consumidor residencial utilize de forma mais eficiente os diversos recursos energéticos que tem à sua disposição. De entre esses recursos destacam-se a geração local, armazenamento dedicado ou não (veículo elétrico), compra e venda de energia à rede e carga controlável, cargas estas com capacidade de armazenamento e que podem ser interrompidas, por breves instantes sem degradar a qualidade do serviço de energia.

O conceito de Gestão da Procura baseia-se na capacidade de alteração na utilização de energia elétrica por parte dos consumidores, em resposta a determinados sinais, tais como incentivos e variações de preços. Foram criadas políticas e programas de incentivo à redução e alteração do consumo de energia elétrica, *Demand Side Management* na terminologia anglo-saxónica, com o objetivo de melhorar os perfis de consumo de energia, influenciando os consumidores a usar a eletricidade de maneira a que o seu diagrama de carga se torne mais flexível. Para a introdução de medidas de gestão de procura é necessário, previamente, avaliar os impactos de tais ações, quer ao nível da potência (diagramas de carga) quer ao nível da qualidade do serviço fornecido. Podem, desta forma, conceber-se medidas que permitam atingir os objetivos em termos de alteração do diagrama de carga sem degradar a qualidade de serviço e/ou evitar impactos negativos das ações no diagrama de carga. Para tal, pode recorrer-se a ferramentas de simulação que permitam reproduzir adequadamente a potência pedida à rede pelas cargas, quer em situação de funcionamento normal, quer numa situação de aplicação de ações de gestão da procura.

O presente trabalho foi desenvolvido no âmbito da Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, lecionada no Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, no ano letivo 2012/2013, visando a criação de uma ferramenta em *MATLAB* que permita simular o funcionamento de equipamentos de frio alimentar doméstico (FAD), tanto em funcionamento normal como na aplicação de ações que alteram esse normal funcionamento. Para isso foi criado um modelo fisicamente baseado, que reproduz os fenómenos físicos postos em jogo nos referidos equipamentos, com o objetivo de avaliar os impactos de ações de gestão da

procura, quer ao nível da potência (diagramas de carga) quer ao nível da qualidade do serviço fornecido, temperatura no interior do equipamento. Este trabalho é crucial para o desenvolvimento das ações, pois permite a sua avaliação prévia, evitando assim impactos negativos da aplicação das mesmas. Para a validação experimental do modelo recorreu-se a recolhas de consumos e temperaturas de um frigorífico, dois combinados e uma arca frigorífica.

Palavras-Chave: Frio Alimentar Doméstico, Gestão da Procura, Demand Side Management, Modelo Fisicamente Baseado.

# Abstract

The evolution of energy systems within the Smart Grids sense, with the increasing propagation of the local generation and the resource to information and communication technologies allows the bidirectional availability of data in near real time, besides the possible changes in output flows.

This allows the accessibility of the consumption data, the prices and other signs that make it possible to the residential consumer to use more efficiently the several energetic resources he disposes off. Among these, the highlight goes to the local generation, the dedicated/not dedicated storage (electric vehicle), buying and selling network energy and controllable loads (which have storage capacity and can be interrupted by brief moments without degrading the energy service quality).

The concept of Demand Response is based on the ability to change electricity use by consumers in response to certain signals, such as incentives and price changes. Both policies and incentive programs were created in order to reduce and change the power consumption, in other words Demand Side Management, with the aim of improving the profiles of energy consumption, influencing consumers to use electricity so that their load charts become more uniform. Before creating demand management measures, it is necessary to evaluate the impacts of such actions in terms of power (load charts) and quality of service provided. This allows the creation of measures to achieve goals in terms of altering the load charts without degrading the service quality. To achieve those goals, one can create software that reproduces the power requested by the network loads, either in normal operating conditions or in a situation where demand management actions are applied.

This work was developed within the Dissertation of Master in Electrical and Computer Engineering, taught in the Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Science and Technology, University of Coimbra, in the academic year of 2012/2013, with the purpose of creating a tool in *MATLAB* to simulate the operation of household food refrigeration equipment (FAD), both in normal operation and in the implementation of actions to Demand Response. In order to do this a physically based model was created to evaluate the impacts of management actions in demand, both in terms of power (load charts) and of quality of service provided (temperature inside the equipment), a model which reproduces the physical activity in the equipment. This work is crucial in the development of this type of actions because it allows to preliminary assess them, thus avoiding negative impacts of its implementation. For the experimental validation of the model, the consumption and temperatures collected of a refrigerator,

two fridge-freezers and a freezer were used.

Keywords: Domestic Cold Storage, Demand Response, Demand Side Management, Physically Based Model.

# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Gestão de Energia Elétrica . . . . .	2
1.2	Estrutura da dissertação . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Modelo Fisicamente Baseado</b>	<b>9</b>
2.1	Modelo Implementado . . . . .	13
2.1.1	Fluxos de calor de um equipamento de FAD . . . . .	13
2.1.2	Função Nuclear do modelo . . . . .	20
2.2	Notas Acerca do Modelo Implementado . . . . .	22
<b>3</b>	<b>Validação do Modelo</b>	<b>25</b>
3.1	Frigorífico Normal . . . . .	25
3.2	Combinado . . . . .	29
3.3	Arca Frigorífica . . . . .	32
3.4	Validação Aberturas . . . . .	34
<b>4</b>	<b>Análise de Resultados</b>	<b>37</b>
4.1	Frigorífico Normal . . . . .	37
4.1.1	Variação de Temperatura . . . . .	37
4.1.2	Cortes . . . . .	40
4.1.3	Análise Alteração de Banda Morta (BM) . . . . .	44
4.2	Combinado . . . . .	45
4.2.1	Variação de Temperatura . . . . .	45
4.2.2	Cortes . . . . .	46
4.2.3	Análise Alteração de Banda Morta . . . . .	47
4.3	Arca Frigorífica . . . . .	49
4.3.1	Variação de Temperatura . . . . .	49
<b>5</b>	<b>Caso de Estudo</b>	<b>51</b>
5.1	Subestação . . . . .	51
<b>6</b>	<b>Conclusões e Trabalhos Futuros</b>	<b>55</b>



# Lista de Figuras

1.1	Dois dos objetivo do controlo de cargas ao nível do diagrama de carga [3] . . .	3
1.2	Programas de <i>Demand Response</i> [4] . . . . .	4
1.3	Desagregação dos consumos de eletricidade pelos diferentes usos finais – dados de 2002 [5] . . . . .	5
1.4	Impacto temporal das medidas de <i>Demand Response</i> [5] . . . . .	5
1.5	Energy Box [18] . . . . .	6
2.1	Ciclo Carnot [7] . . . . .	9
2.2	Ciclo Frigorífico [8] . . . . .	11
2.3	Diagrama diário de um equipamento de FAD (monitorização de um equipamento real de 160 l) . . . . .	12
2.4	Ciclo ON/OFF de um frigorífico, Potência pedida a rede (Vermelho), Temperatura Interior (Roxo) . . . . .	12
2.5	Esquema da parede do equipamento de FAD [9] . . . . .	14
2.6	Resistências Térmicas do evaporador até ao exterior [12] . . . . .	16
2.7	Modelo . . . . .	22
2.8	Estratificação de Temperaturas em um combinado (Temperaturas recolhidas) .	22
2.9	Potência (Vermelho), Parede Exterior (Azul), Parede Interna (Verde) - Dados Recolhidos (Conservação) . . . . .	23
2.10	Potência (Vermelho), Parede Exterior (Azul), Parede Interna (Verde) - Dados Recolhidos (Conservação) . . . . .	23
3.1	Frigorífico Normal - Esquerda, Combinado - Centro, Arca Frigorífica - Direita .	25
3.2	Potência (Vermelho) e Temperatura Evaporador (Azul), Temperatura Ar Interior (Verde) - Dados Recolhidos (Congelação) . . . . .	27
3.3	Potência (Vermelho) e Temperatura Evaporador (Azul), Temperatura Ar Interior (Verde) - Dados Recolhidos (Conservação) . . . . .	27
3.4	Potência Recolhida (Vermelho), Potência Simulada (Azul Tracejado), Temperatura Recolhida (Roxo) e Temperatura Simulada (Verde Tracejado) - Conservação	28
3.5	Potência (Vermelho), Temperatura Evaporador (Azul) e Temperatura Ar Interior (Verde) - Dados Recolhidos (Congelação) . . . . .	30

3.6	Temperatura Evaporador (Vermelho) e Temperatura Ar Interior (Azul) - Dados Recolhidos (Congelação) . . . . .	31
3.7	Potência Recolhida (Vermelho), Potência Simulada (Azul Tracejado), Temperatura Recolhida Congelador (Roxo), Temperatura Simulada Congelador (Verde Tracejado), Temperatura Recolhida Frigorífico (Laranja) e Temperatura Simulada Frigorífico (Azul Tracejado) . . . . .	32
3.8	Temperatura Evaporador (Vermelho) e Temperatura Ar Interior (Azul) . . . . .	33
3.9	Potência Recolhida (Vermelho), Potência Simulada (Azul Tracejado), Temperatura Recolhida (Laranja) e Temperatura Simulada (Azul Tracejado) . . . . .	34
3.10	Estratificação de temperaturas no compartimento de refrigeração de um combinado com 3 aberturas . . . . .	35
4.1	Potência (Azul) - Esquerda, Simulação com temperatura ambiente a 6°C. Direita, Simulação com temperatura ambiente a 12 °C . . . . .	37
4.2	Potência (Azul) - Esquerda, Simulação com temperatura ambiente a 18°C. Direita, Simulação com temperatura ambiente a 24 °C . . . . .	38
4.3	Linha de Tendência do Consumo em relação a Temperatura Exterior de um Frigorífico Normal . . . . .	38
4.4	Fator de Coincidência (Azul) - Esquerda, Simulação com temperatura ambiente a 6°C. Direita, Simulação com temperatura ambiente a 12 °C . . . . .	39
4.5	Fator de Coincidência (Azul) - Esquerda, Simulação com temperatura ambiente a 18°C. Direita, Simulação com temperatura ambiente a 24 °C . . . . .	39
4.6	Fator de Coincidência (Azul) - Esquerda, Simulação com 2 cortes. Direita, Simulação com 4 cortes. Em baixo, Simulação de Referência, sem cortes . . . . .	40
4.7	Fator de Coincidência (Azul) - Esquerda, Simulação com temperatura ambiente a 6°C. Direita, Simulação com temperatura ambiente a 12 °C - 4 Cortes . . . . .	41
4.8	Fator de Coincidência (Azul) - Esquerda, Simulação com temperatura ambiente a 18°C. Direita, Simulação com temperatura ambiente a 24 °C - 4 Cortes . . . . .	42
4.9	Fator de Coincidência (Azul) - Esquerda, Simulação com temperatura ambiente a 6°C. Direita, Simulação com temperatura ambiente a 12 °C - 2 Cortes . . . . .	42
4.10	Fator de Coincidência (Azul) - Esquerda, Simulação com temperatura ambiente a 18°C. Direita, Simulação com temperatura ambiente a 24 °C - 2 Cortes . . . . .	43
4.11	Potência (Azul) - Esquerda, Simulação com temperatura ambiente a 6°C. Direita, Simulação com temperatura ambiente a 12 °C . . . . .	45
4.12	Potência (Azul) - Esquerda, Simulação com temperatura ambiente a 18°C. Direita, Simulação com temperatura ambiente a 24 °C . . . . .	45
4.13	Linha de Tendência do Consumo em relação a Temperatura Exterior de um Combinado . . . . .	46
4.14	Fator de Coincidência (Azul) - Esquerda, Simulação com 2 cortes. Direita, Simulação com 4 cortes. . . . .	47



---

4.15	Potência (Azul) - Esquerda, Simulação com temperatura ambiente a 6°C. Direita, Simulação com temperatura ambiente a 12 °C . . . . .	49
4.16	Potência (Azul) - Esquerda, Simulação com temperatura ambiente a 18°C. Direita, Simulação com temperatura ambiente a 24 °C . . . . .	49
4.17	Linha de Tendência do Consumo em relação a Temperatura Exterior de uma Arca Frigorífica . . . . .	50
5.1	Zoom subestação com Alteração de Banda Morta - Consumo Real (Vermelho), Consumo simulado com Alteração de BM (Azul Tracejado) . . . . .	52
5.2	FAD Subestação - Simulado (Verde) e Simulado com Alteração de BM (Roxo Tracejado) . . . . .	53



## Lista de Tabelas

3.1	Dados Físicos do Frigorífico . . . . .	26
3.2	Temperaturas Frigorífico Normal . . . . .	26
3.3	Especificações da Validação do Frigorífico Normal . . . . .	28
3.4	Dados Físicos Combinado . . . . .	29
3.5	Temperaturas Combinado . . . . .	29
3.6	Especificações da Validação do Combinado . . . . .	31
3.7	Dados Físicos Arca Frigorífica . . . . .	32
3.8	Temperaturas Interiores Arca Frigorífica . . . . .	33
3.9	Especificações da Validação do Frigorífico Normal . . . . .	34
3.10	Análise Aberturas . . . . .	35
4.1	Análise Carga Única - Frigorífico Normal . . . . .	38
4.2	Análise 10 Cargas - Frigorífico Normal . . . . .	40
4.3	Análise Cortes a mesma Temperatura - Frigorífico Normal . . . . .	41
4.4	Análise 4 cortes com variação de temperatura ambiente - Frigorífico Normal . . . . .	43
4.5	Análise Alteração de Banda Morta Refrigeração e Referência - Frigorífico Normal . . . . .	44
4.6	Análise Carga Única - Combinado . . . . .	46
4.7	Análise Cortes a mesma Temperatura - Combinado . . . . .	47
4.8	Análise Alteração de Banda Morta Refrigeração e Referência . . . . .	48
4.9	Análise Alteração de Banda Morta Congelação e Controlo de Ambas as BM . . . . .	48
4.10	Análise Carga Única - Arca Frigorífica . . . . .	50
4.11	Análise 4 cortes comparativa com recolhas. - Arca Frigorífica . . . . .	50
5.1	Número de consumidores residenciais e consumo anual . . . . .	51
5.2	Alteração da Temperatura do Termostato . . . . .	52
5.3	Consumo FAD simulado e simulado com alteração de BM . . . . .	53



## Acrónimos

BM	Banda Morta
CDC	Controlo Direto de Cargas
COP	Coeficiente de Performance
DR	<i>Demand Response</i>
FAD	Frio Alimentar Doméstico
FC	Fator de Coincidência
FR	Frigorífico
FZ	Congelador
GP	Gestão da Procura
SEE	Sistema de Energia Elétrica
TIC	Tecnologias da Informação e Comunicação
URE	Utilização Racional de Energia



# Capítulo 1

## Introdução

Devido ao avanço tecnológico da sociedade nas últimas décadas, assiste-se a um aumento da taxa de posse de equipamentos elétricos que, apesar do incremento da eficiência energética de boa parte deles, se traduz em maiores consumos energéticos, nomeadamente no setor residencial. Esta situação tem exigido um crescente aumento da capacidade dos sistemas de energia, e a um conseqüente aumento dos encargos financeiros tanto para produtores como para consumidores, e a maiores impactos ambientais. Em paralelo assiste-se a uma crescente disseminação dos sistemas de geração de pequena capacidade junto das cargas de utilização final e ao recurso cada vez mais intenso às TIC nas redes de energia, permitindo comunicações rápidas nos dois sentidos que muito têm contribuído para um aumento da operação dos sistemas e abre novas perspectivas para uma participação mais ativa do consumidor.

Pode dizer-se que três dos vetores da política energética nacional são: a segurança do abastecimento, garantindo o fornecimento de energia contínuo e adequado à economia nacional; contribuir para a competitividade da economia nacional, conseguindo uma mistura de fontes primárias que além das questões técnicas leve também em conta as questões económicas; contribuir para as outras políticas nacionais, nomeadamente a ambiental. A utilização eficiente dos recursos energéticos é um instrumento que pode contribuir para os três vetores de uma forma eficaz e economicamente racional. De uma forma geral pode dizer-se que as atividades envolvidas nos sistemas de energia apresentam um objetivo comum que é a redução de custos em todas as suas fases. Relativamente à produção, é importante encontrar formas de diminuir custos com matérias primas e emissões de gases poluentes. Para isto têm sido implementados incentivos à produção de energia renovável [1] e à eficiência energética. Quanto ao processo de transporte e distribuição, torna-se fundamental a redução de perdas e a otimização da utilização da capacidade existente evitando a criação de novas infraestruturas de maior capacidade. Ao consumidor cabe uma eficiente utilização dos serviços de energia, sendo essencial uma correta divulgação das medidas gerais de utilização racional de energia e incentivos disponíveis [2].

No caso da utilização final de energia, além da disseminação das tecnologias mais eficientes e de um nível adequado na utilização dos serviços de energia, a possibilidade de gerir quando se consome energia para obter esses serviços está, de alguma forma, a contribuir para a alteração

de paradigma a que se tem assistido ultimamente nos sistemas de energia elétrica. Estas alterações contêm dois vetores parciais que são, por um lado, as redes de distribuição deixaram de ser passivas encontrando-se cada vez mais disseminada a micro e mini geração, próximas das cargas, por outro lado, a já referida possibilidade de gestão de consumos que muda a tradicional característica de falta de elasticidade do preço da procura da eletricidade. Para isto muito tem contribuído a disseminação das TIC nos SEE.

O conceito de Gestão da Procura baseia-se na capacidade de alteração na utilização de energia elétrica por parte dos consumidores, em resposta a determinados sinais, tais como incentivos e variações de preços. Em conjunto, foram criadas políticas e programas de incentivo à redução e alteração do consumo de energia elétrica, *Demand Side Management* na terminologia anglo-saxónica, com o objetivo de melhorar os perfis de consumo de energia, influenciando os consumidores a usar a eletricidade de maneira a que o seu diagrama de carga se torne mais uniforme.

Todavia para uma implementação sem sobressaltos de medidas que visem a alteração dos padrões de consumo é necessário, previamente avaliar os impactos de tais ações quer ao nível da potência (diagramas de carga) quer ao nível da qualidade do serviço fornecido. Para tal, pode recorrer-se a ferramentas de simulação que permitam reproduzir adequadamente a potência solicitada à rede pelas cargas, quer em situação de funcionamento normal, quer numa situação de aplicação de ações de gestão da procura. Com o recurso a esse tipo de ferramentas é possível antever o impacto das medidas que se pretendem implementar. Este trabalho visa a criação de uma ferramenta que permite simular o funcionamento de equipamentos de frio alimentar doméstico (FAD). Este tipo de equipamento, apresenta uma potência pedida à rede de pequeno valor, representará cerca de 30 % do consumo residencial em Portugal e sendo uma carga termostática poderá ser útil em programas de gestão da procura (GP) que visem quer o incremento da eficiência de operação dos sistemas quer a maximização da penetração das renováveis.

## 1.1 Gestão de Energia Elétrica

A Utilização Racional de Energia (URE), da qual faz parte a Gestão da Procura (GP), *Demand Side Management* na terminologia anglo-saxónica, começou a ser importante no início da década de 70, coincidindo com a primeira crise petrolífera. Com o aumento constante do preço e da procura dos combustíveis fósseis, associado à instabilidade política em algumas das regiões produtoras, assim como a crescente preocupação com as questões ambientais, surgiu a necessidade de uma evolução nas tecnologias e uma alteração da forma como a energia era usada. O objetivo seria os equipamentos fornecerem os mesmos serviços de energia mas com um menor consumo da mesma. A isto chamamos eficiência energética.

Paralelamente à evolução tecnológica, foram criadas políticas e programas de incentivo à redução e alteração do consumo de energia elétrica, GP, com o objetivo de melhorar os perfis de consumo de energia, influenciando os consumidores a usar a eletricidade de maneira que o



seu diagrama de carga seja mais uniforme, diminuindo pontas e aliviando a pressão sobre os sistemas de energia, nomeadamente para o incremento da sua capacidade.

Esta uniformização é alcançada graças a um controlo de cargas específicas que não afetem o conforto e o bem-estar dos consumidores, nem a qualidade dos seus serviços. O controlo de cargas tem como objetivo, ao nível do diagrama de carga, o corte de pontas que se traduz na diminuição da potência pedida a rede nas horas de maior procura, e o desvio de consumos que consiste na alteração dos consumos para horas de menor procura, figura (1.1). Pode ainda ser usado em situações de emergência, como sejam restrições em termos de capacidade ou outras.

A GP engloba, assim, duas vertentes distintas em termos da utilização de energia: medidas que visem fomentar a eficiência energética e medidas que visem alterar a forma como a energia é usada. A estas últimas é chamada na terminologia anglo-saxónica *Demand Response* (DR) ou resposta da procura, em português.

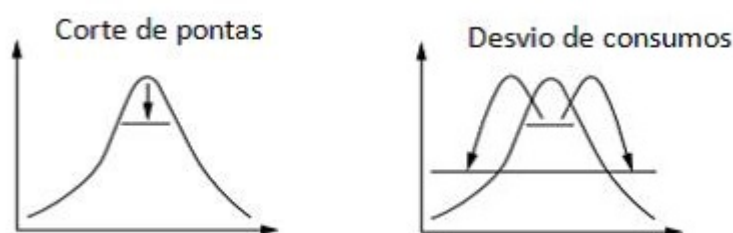


Figura 1.1: Dois dos objetivos do controlo de cargas ao nível do diagrama de carga [3]

O DR engloba as ações que visam a alteração na utilização de energia elétrica por parte dos consumidores, em resposta a determinados sinais, tais como incentivos e variações de preços. A figura (1.2) mostra os diferentes programas de DR.

Pode dizer-se que existem dois tipos de programas de DR: o baseado em incentivos, em que se destacam o controlo direto de cargas (CDC) e a interrupção/corte de alimentação; e os baseados nos preços, que são de longe os mais usados. Como CDC entende-se a interrupção, por breves instantes do funcionamento das cargas, usado sobretudo na minimização das pontas. Como desvios entende-se o deslocamento do consumo de um período do dia para outro, estimulado através de tarifas com preços variáveis ao longo do dia.

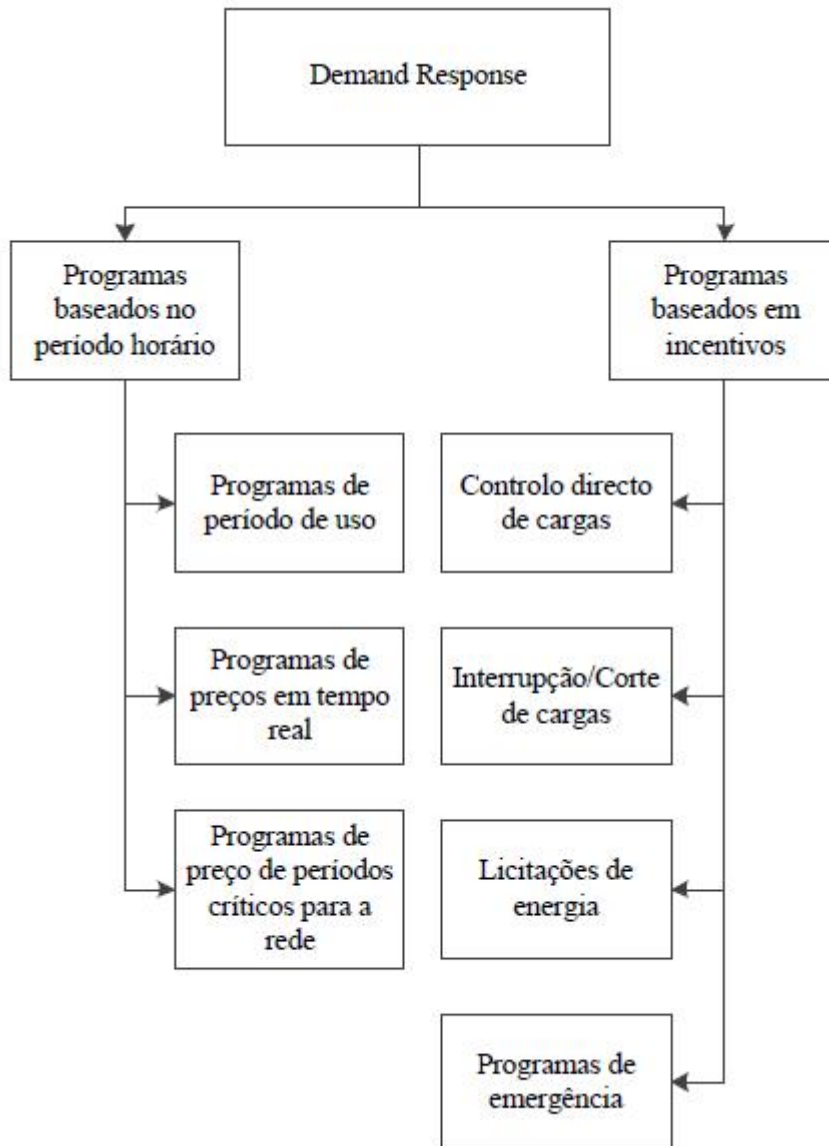


Figura 1.2: Programas de *Demand Response* [4]

Os diferentes tipos e as diversas ações devem ter como alvo diferentes cargas. Assim, o CDC aplica-se a cargas onde existe alguma capacidade de armazenamento e que podem ser interrompidas, por breves instantes sem degradar a qualidade do serviço de energia fornecido. Exemplos são o ar condicionado, termoacumulador ou cargas de frio alimentar doméstico. O desvio de consumos pode aplicar-se a cargas cujo serviço de energia possa ser fornecido em períodos de tempo diferentes do que seria em condições normais, sem contudo causar desconforto ao consumidor. Exemplo, são as máquinas de lavar e até, de certa forma, os termoacumuladores e os veículos elétricos. Os equipamentos de utilização final que podem ser alvo de gestão da procura perfazem cerca de 64% do consumo residencial, figura (1.3), o que, considerando a sua flexibilidade de controlo e levando também em conta as taxas de posse dos diferentes equipamentos, dá uma ideia do grande potencial de gestão da procura que existe neste sector.

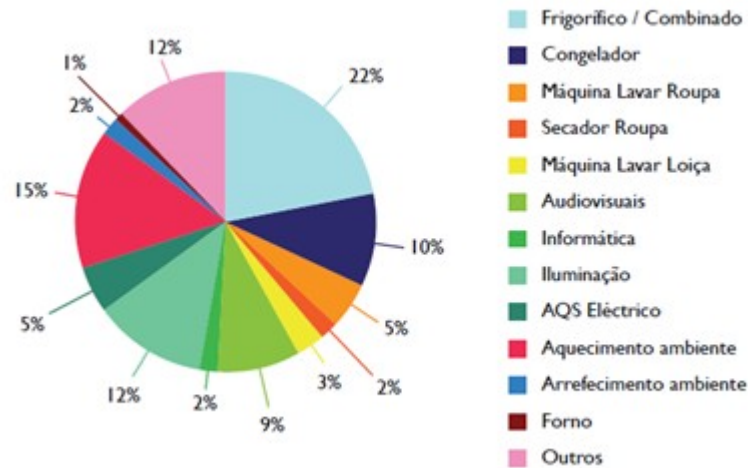


Figura 1.3: Desagregação dos consumos de eletricidade pelos diferentes usos finais – dados de 2002 [5]

As diferentes ações têm impactos em períodos de tempo distintos, como se pode ver na figura (1.4), levando a que as ações sejam passíveis de serem usadas pelo operador do sistema em períodos de tempo diferentes. Assim, o CDC pode ser usado na operação do sistema de energia enquanto as medidas de eficiência energética têm um impacto duradouro, podendo ter impacto nas decisões tomadas em termos de planeamento do sistema.

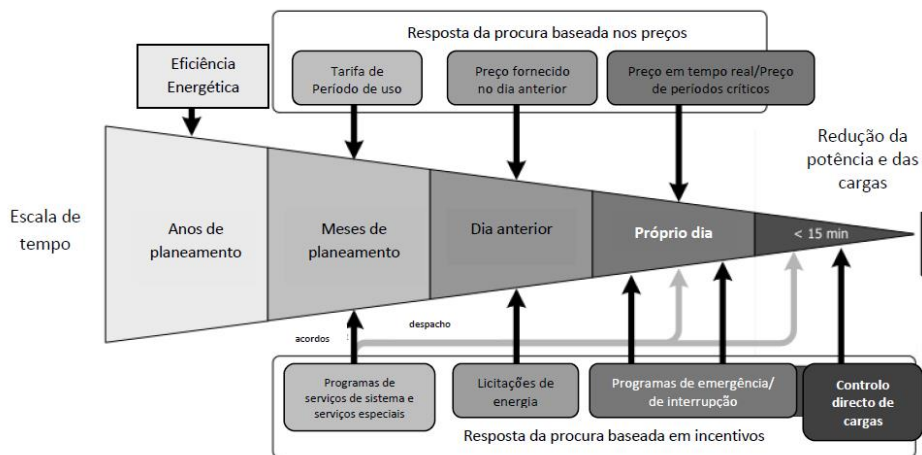


Figura 1.4: Impacto temporal das medidas de *Demand Response* [5]

As chamadas redes inteligentes, *Smart Grids* na terminologia anglo-saxónica, com o crescente recurso às TIC tornam possível a comunicação entre os diferentes intervenientes dos SEE, incluindo consumidores, fornecedores e produtores, fazendo com que a disseminação dos programas de DR seja viável. Nas redes inteligentes, há uma utilização mais intensa de sensores nas linhas de transporte e distribuição com a função de monitorizar vários parâmetros da linha, ligados a um sistema de comunicação que transmite dados e/ou ordens de comando em ambos os sentidos.

A comunicação nas linhas torna-as mais confiáveis, visto que o operador de rede pode verificar tudo em tempo real, usando ferramentas para detetar avarias e resolver os problemas. Pelo fato da comunicação ser feita em ambos os sentidos pode também, através da automatização da rede, isolar essas avarias e alterar configuração da rede e da linha de uma forma mais eficaz.

Para que a Gestão da Procura possa ser efetiva é necessário que a tecnologia e os algoritmos adequados sejam disponibilizados. Assim, começam a surgir dispositivos que permitem monitorização e controlo de cargas ao nível da utilização final. A *Energy Box*, figura (1.5), é uma prova de conceito dessas tecnologias, é uma aplicação que funciona como interface gráfico do consumo de energia elétrica. Tem como vantagens a capacidade de alterar o horário de funcionamento de equipamentos elétricos específicos, com a finalidade de se cumprirem os objetivos do controlo de cargas, figura (1.1), e reduzir a fatura de eletricidade do consumidor. Permite também a integração da micro geração e do armazenamento de energia. Para além disto, funciona como intercomunicador entre o consumidor e o gestor de rede, podendo ela decidir casos como pedidos de corte de cargas. Esta independência é possível graças aos algoritmos sobre os quais ela trabalha e que visam sempre o conforto e o bem-estar dos consumidores.

Em Portugal já existe um projeto que usa todas estas vantagens da *Energy Box*, que é o *InovCity*. Foi implementado em Évora, onde 31000 consumidores domésticos já retiraram as vantagens desta aplicação. Espera-se que em 2020, 80% das redes europeias de distribuição sejam constituídas por redes inteligentes. No entanto, ainda muito vai surgir em termos de disponibilização das tecnologias e serviços.

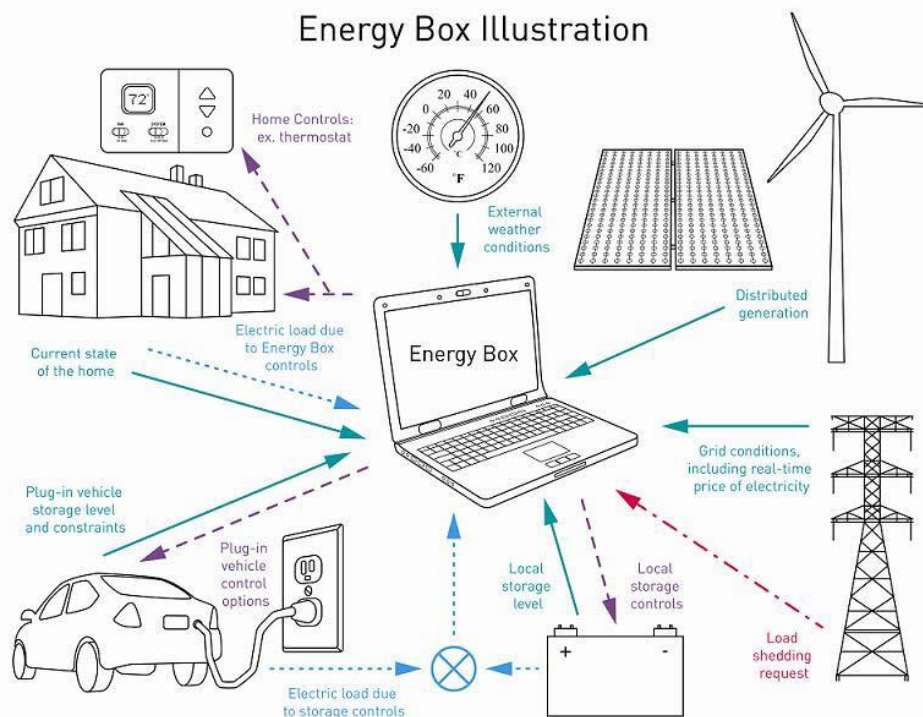


Figura 1.5: Energy Box [18]

## 1.2 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos. No capítulo 2 é apresentado o modelo fisicamente baseado de FAD e a metodologia aplicada para determinar os fluxos de calor através da envolvente dos equipamentos. O capítulo 3 é destinado à validação do modelo, comparando dados recolhidos com dados simulados de quatro equipamentos distintos, Frigorífico de duas portas (Frigorífico Normal), dois Combinado e uma Arca Frigorífica. No capítulo 4 são analisados alguns resultados, atribuindo principal evidência à variação da temperatura, cortes de energia e variação da Banda Morta (BM). O capítulo 5 é reservado ao caso de estudo. No último capítulo serão evidenciadas as principais conclusões retiradas da realização desta dissertação e descritos potenciais desenvolvimentos futuros.



## Capítulo 2

### Modelo Fisicamente Baseado

FAD refere-se a equipamentos com capacidade de transferir calor de um ambiente mais frio para outro mais quente, com objetivo de preservar ou refrescar alimentos e/ou bebidas, sendo necessário aplicar uma quantidade de trabalho ao sistema para esse efeito. O FAD tem por base uma máquina térmica, idealizada por Nicolas Léonard Sadi Carnot, com o nome de 'Máquina de Carnot' [15]. Esta máquina estabelece um ciclo de rendimento máximo, 'Ciclo de Carnot', que funciona através da alternância de duas transformações isotérmicas com duas adiabáticas. Pela observação da figura (2.1) pode-se constatar que este é um ciclo ideal que trabalha entre duas temperaturas,  $T_c$  (temperatura frente fria) e  $T_h$  (temperatura frente quente), onde a segunda é superior à primeira, em que mostra a evolução da pressão e do volume do gás de trabalho.

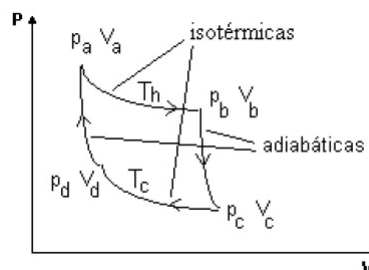


Figura 2.1: Ciclo Carnot [7]

- Processo AB - Expansão isotérmica, O gás está em contacto com a temperatura ambiente (fonte quente), recebendo dele uma quantidade de calor, condensador (3 da figura 2.2).
- Processo BC - Expansão adiabática, temperatura desce de  $T_h$  para  $T_c$ . Não ocorrem trocas de calor com o ambiente. O sistema realiza trabalho com diminuição de energia interna e, portanto, de temperatura, válvula de expansão (4 da figura 2.2).

- Processo CD - Compressão isotérmica, temperatura  $T_c$  constante. O gás está em contacto com a temperatura interior do equipamento (fonte fria), cedendo a ele uma quantidade de calor (1 da figura 2.2).
- Processo DA - Compressão adiabática, temperatura aumenta de  $T_c$  para  $T_h$ . O gás não troca calor com o ambiente. O sistema recebe trabalho, que serve para aumentar sua energia interna e, portanto, sua temperatura (2 da figura 2.2).

Numa máquina frigorífica, o ciclo de transformação é realizado em sentido contrário ao de uma máquina térmica, tendo como resultado a absorção de uma certa quantidade de calor a baixa temperatura, e a cedência de uma maior quantidade de calor à temperatura mais elevada, sendo necessário, para tal, aplicar uma certa quantidade de trabalho sobre o sistema. Segundo *Clausius* “*É impossível construir um dispositivo que opere, segundo um ciclo, e que não produza outros efeitos, além da transferência de calor de um corpo frio para um corpo quente*” [16].

A eficiência de uma máquina frigorífica calcula-se através do coeficiente de performance (COP) que é a razão entre os fluxos de energia térmica do equipamento,  $Q_T$ , e a energia consumida,  $W$ , equação (2.1).

$$COP = \frac{Q_T}{W} \quad (2.1)$$

Que se traduz na equação (2.2).

$$COP = \frac{Q_{gl} \cdot (T_{on} + T_{off})}{P \cdot T_{on}} \quad (2.2)$$

Onde,

- $Q_{gl}$ , potência de perdas global do frigorífico, W;
- $T_{on}$ , tempo de funcionamento do compressor, minuto;
- $T_{off}$ , tempo de não funcionamento do compressor, minuto;
- $P$ , potência do compressor, W.

Os equipamentos de FAD são geralmente designados por frigoríficos, arcas ou combinados. No interior de cada equipamento existe um evaporador onde circula o gás frio. O calor do interior do equipamento é transferido para este gás (1 da figura 2.2) que vai aquecer à medida que percorre o sistema de refrigeração. Para transferir esse calor para o exterior usa-se um compressor (2 da figura 2.2) que, ao aumentar a pressão ao gás, aumenta a sua temperatura. Este gás aquecido segue para o condensador (3 da figura 2.2), onde troca calor com o ar exterior, arrefecendo o gás e condensando-o. O líquido refrigerador passa então por uma válvula de expansão (4 da figura 2.2), que provoca uma brusca baixa na pressão e conseqüente evaporação instantânea e auto arrefecimento. Este gás frio entra no frigorífico e completa-se o ciclo termodinâmico.



Ao fazer-se uma comparação entre o ciclo frigorífico, figura (2.2), e o ciclo de Carnot, figura (2.1), as transformações adiabáticas dão-se nos pontos 2 e 4, figura (2.2), pois é nesses pontos onde existe alterações da temperatura do gás refrigerante. As transformações isotérmicas dão-se em 1 e 3, figura (2.2).

Este ciclo só se torna eficiente se o compartimento for termicamente bem isolado. Isto alcançado através de paredes espessas, de 30 a 60 mm, com uma camada interior de material isolante com baixa condutividade térmica.

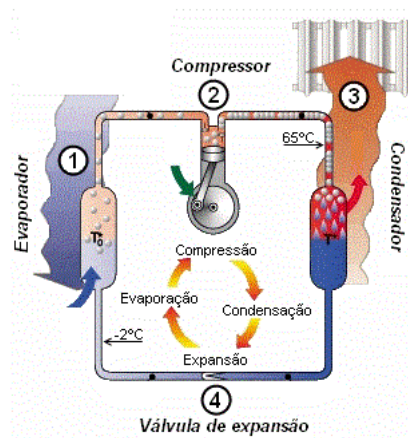


Figura 2.2: Ciclo Frigorífico [8]

Durante este ciclo, o equipamento de FAD necessita de energia elétrica para colocar em funcionamento o compressor que permite elevar a temperatura e a pressão do fluido refrigerante e, dessa forma, transferir o calor para o ambiente exterior. Quando a temperatura no interior atinge um valor adequado, o ciclo frigorífico interrompe o funcionamento, ficando apenas a ocorrer trocas de calor do exterior para o interior e, eventualmente, a libertar-se calor dos alimentos ou bebidas que tenham sido colocados no interior.

O compressor funciona por períodos, ligado quando está a retirar calor para o exterior ou desligado quando está a receber calor do exterior. Estes períodos são controlados através de um termostato localizado no evaporador cujo objetivo é manter a qualidade de serviço controlada, ou seja, a temperatura necessária para conservar ou congelar os alimentos, consoante o equipamento em questão.

Na figura (2.3) apresenta-se um exemplo da potência pedida à rede por um equipamento de FAD, ao longo de um dia.

Verifica-se que em cada início de ciclo existe uma potência solicitada à rede superior à do restante tempo. Este aumento deve-se à corrente de arranque do compressor ser superior 6 a 8

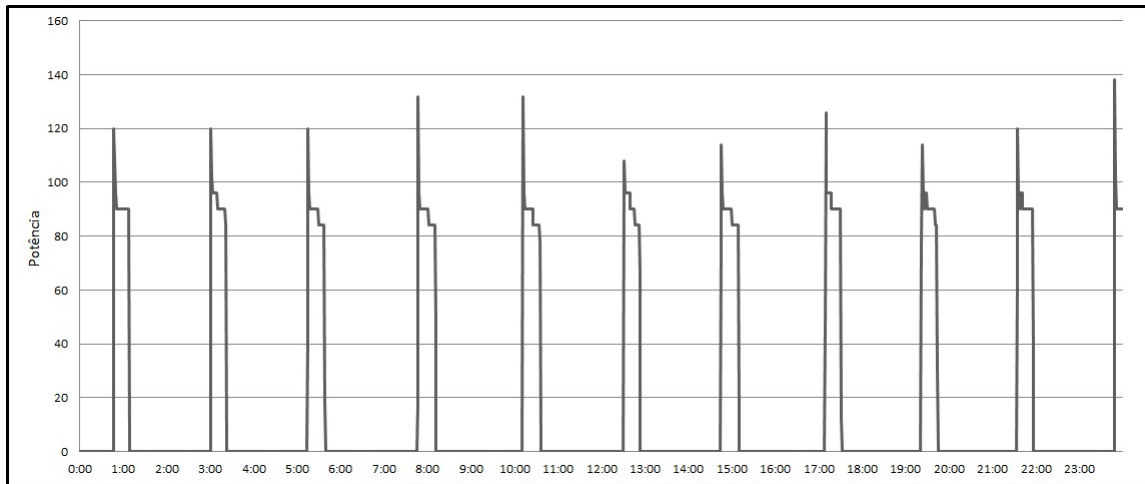


Figura 2.3: Diagrama diário de um equipamento de FAD (monitorização de um equipamento real de 160 l)

vezes a corrente nominal, e também à necessidade de vencer a maior diferença de pressão causada pela inatividade do refrigerante. Tipicamente, quando o ciclo não está em funcionamento, a pressão no sistema diminui. Pressupõe-se que a potência inicial de cada ciclo tenha uma parte que é proporcional ao seu tempo de inatividade.

O tempo que o compressor está ON é o tempo que a temperatura interior demora a atingir o valor mínimo da BM, dependendo da carga térmica e também da eficiência do sistema, figura (2.4).



Figura 2.4: Ciclo ON/OFF de um frigorífico, Potência pedida a rede (Vermelho), Temperatura Interior (Roxo)

Pode verificar-se que quando o compressor liga a temperatura interior ainda aumenta um pouco porque o circuito internamente ainda não foi arrefecido. Quando o compressor desliga a temperatura interior ainda desce um pouco porque o líquido refrigerante está a uma temperatura inferior à interior e assim o evaporador continua a arrefecer o ar interior.

## 2.1 Modelo Implementado

### 2.1.1 Fluxos de calor de um equipamento de FAD

Nos equipamentos de FAD existem, para além de possíveis fontes de calor internas, três fenómenos de transferência de calor com influência na temperatura interior e que contribuem para os ganhos de calor do equipamento, que são, condução, convecção e radiação. Estes podem ser expressos por  $Q = \frac{\Delta T}{R_x}$ , com x dependente do tipo de fenómeno.

#### Condução

É um fenómeno de transferência de calor devido a uma diferença de temperatura entre duas regiões que são separadas por um corpo sólido. No caso do FAD, estes ganhos verificam-se através das paredes dos equipamentos. Estas contactam com duas temperaturas diferentes, interior e ambiente, e a resistência que oferecem ao fluxo de calor cria o seguinte fluxo de perdas, Q, equação (2.3) [9].

$$Q = \frac{\Delta T}{R_{cond}} [W] \quad (2.3)$$

Onde a resistência de condução é dada por, equação (2.4),

$$R_{cond} = \frac{e}{u.A} [^{\circ}C/W] \quad (2.4)$$

- $\Delta T$ , diferença de temperatura,  $^{\circ}C$ ;
- e, espessura do material em metros;
- u, condutividade térmica em  $\frac{W}{m.^{\circ}C}$ ;
- A, área da superfície em  $m^2$ .

No caso do corpo sólido ser constituído por dois ou mais corpos, como é o caso das paredes do frigorífico, a resistência de condução será a soma das resistências individuais, figura (2.5).

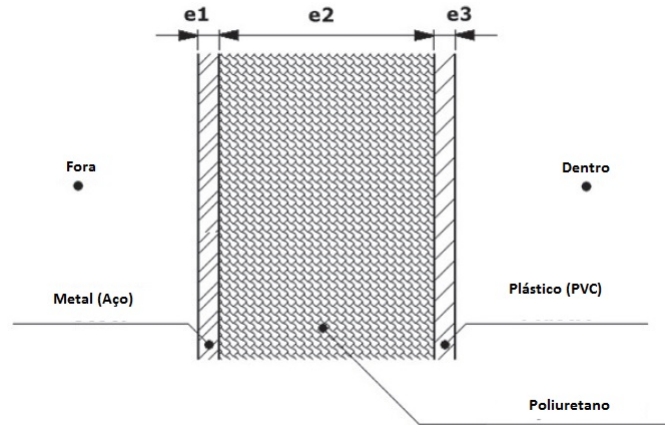


Figura 2.5: Esquema da parede do equipamento de FAD [9]

## Convecção

A transferência de calor por convecção surge através dos movimentos de fluidos devido a uma diferença de temperatura. Quando o ar se desloca em contacto com uma parede, se houver diferença de temperatura entre a superfície da parede e o ar ocorre transferência de calor. Se a temperatura superficial da parede for  $T_s$  e a temperatura do ar  $T_a$  então o fluxo de calor é dado por [10],

$$Q = h_{conv} \cdot A \cdot (T_s - T_a) [W] \quad (2.5)$$

Da equação anterior obtém-se,

$$Q = \frac{\Delta T}{R_{conv}} [W] \quad (2.6)$$

onde,

$$R_{conv} = \frac{1}{h_{conv} \cdot A} [^{\circ}C/W] \quad (2.7)$$

com,

- A, área da superfície em  $m^2$ ;
- $h_{conv}$ , coeficiente de transferência de calor por convecção dado por,

$$h_{conv} = \frac{Nu \cdot u_f}{L_{ref}} [W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)] \quad (2.8)$$

onde,

- $u_f$ , é a condutividade térmica do ar;
- $L_{ref}$ , é a altura da parede, no caso de ser uma parede vertical. Numa parede horizontal é a área a dividir pelo perímetro,  $A/P$  [9].
- $Nu$ , número de Nusselt, é um coeficiente adimensional de transferência de calor. Proporciona uma medida da transferência convectiva de calor na superfície [11]. Dado por,

$$Nu = C.Ra^n \quad (2.9)$$

Com,

- $C$  e  $n$ , são constantes que dependem da geometria da superfície;
- $Ra$ , número de Raleigh, é um número adimensional associado com os fluxos conduzidos por convecção [11]. Dado por,

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot L_{ref}^3 \cdot Pr}{\nu^2} \quad (2.10)$$

onde,

- $g$ , aceleração da gravidade ( $m^2$ );
- $\beta$ , coeficiente de expansão do volume ( $K^{-1}$ );
- $T_s$ , temperatura da superfície ( $^\circ C$ );
- $T_\infty$ , temperatura do fluido longe da superfície ( $^\circ C$ );
- $\nu$ , coeficiente de viscosidade do fluido ( $\frac{m^2}{s}$ );
- $Pr$ , Número de Prandtl, é um número adimensional que aproxima a razão entre a difusibilidade molecular do momento e a difusibilidade do calor, sendo uma propriedade do fluido [11].

## Radiação

A transferência de calor por radiação resulta do deslocamento de fotões de uma superfície para outra. Ao atingirem uma superfície, esses fotões podem ser absorvidos, refletidos ou transmitidos [10]. O poder de irradiação de uma dada superfície depende do seu poder emissivo. A equação (2.11), define a potência de perdas por radiação.

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_p^4 - T_{sup}^4) [W] \quad (2.11)$$

onde,

- $\varepsilon$ , Emissividade da superfície;

- $\sigma$ , Constante de Stefan-Boltzmann,  $5,729 * 10^{-8} \text{W}/\text{m}^2 \text{K}^4$ ;
- $A$ , Área superfície,  $\text{m}^2$ ;
- $T_p$ , Temperatura absoluta da superfície,  $\text{K}$ ;
- $T_{sup}$ , Temperatura absoluta da superfície vizinha,  $\text{K}$ ;

Através do desenvolvimento do binómio de Newton,

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_p^2 + T_{sup}^2) \cdot (T_p + T_{sup}) \cdot (T_p - T_{sup}) [\text{W}] \quad (2.12)$$

Da equação anterior obtém-se,

$$Q = \frac{\Delta T}{R_{rad}} [\text{W}] \quad (2.13)$$

onde,

$$R_{rad} = \frac{1}{h_{rad} \cdot A} [^\circ\text{C}/\text{W}] \quad (2.14)$$

com,

- $h_{rad}$ , é o coeficiente de radiação térmica, que se obtém através de,

$$h_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_p^2 + T_{sup}^2) \cdot (T_p + T_{sup}) [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})] \quad (2.15)$$

## Resistências Térmicas

A oposição às diferentes contribuições para os fenómenos de transferência de calor num equipamento de FAD podem ser representadas como na figura (2.6), que traduz esquematicamente a distribuição das resistências térmicas, desde o evaporador até ao exterior. Este esquema pretende fazer uma analogia com as resistências elétricas.

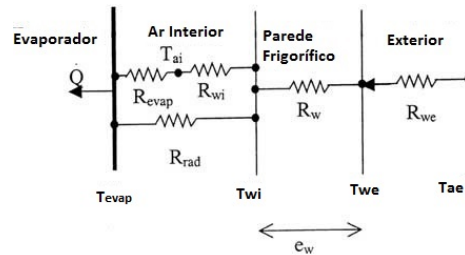


Figura 2.6: Resistências Térmicas do evaporador até ao exterior [12]

Desta forma é determinada a resistência térmica global das paredes laterais, equação (2.16).

$$R_{gl} = \frac{(R_{evap} + R_{wi}) \cdot R_{rad}}{R_{evap} + R_{wi} + R_{rad}} + R_w + R_{we} \text{ [}^\circ\text{C/w]} \quad (2.16)$$

De forma análoga, a resistência térmica global referida aos topos do equipamento é dada pela equação (2.17).

$$R_{gl_{Topo}} = \frac{R_{wi_{Topo}} \cdot R_{rad_{Topo}}}{R_{wi_{Topo}} + R_{rad_{Topo}}} + R_{w_{Topo}} + R_{we_{Topo}} \text{ [}^\circ\text{C/w]} \quad (2.17)$$

Com,

- $T_{evap}$ , temperatura evaporador,  $^\circ\text{C}$ ;
- $T_{ai}$ , temperatura ambiente interior,  $^\circ\text{C}$ ;
- $T_{wi}$ , temperatura parede interior,  $^\circ\text{C}$ ;
- $T_{we}$ , temperatura parede exterior,  $^\circ\text{C}$ ;
- $T_{ae}$ , temperatura ambiente exterior,  $^\circ\text{C}$ ;
- $R_{evap}$ , resistência térmica por convecção do evaporador,  $[\text{}^\circ\text{C/w}]$  ;
- $R_{wi}$ , resistência térmica por convecção da parede interior,  $[\text{}^\circ\text{C/w}]$ ;
- $R_{rad}$ , resistência térmica por radiação entre as paredes interiores,  $[\text{}^\circ\text{C/w}]$ ;
- $R_w$ , resistência térmica por condução na parede,  $[\text{}^\circ\text{C/w}]$ ;
- $R_{we}$ , resistência térmica por convecção exterior,  $[\text{}^\circ\text{C/w}]$ ;
- $R_{gl}$ , resistência global,  $[\text{}^\circ\text{C/w}]$ ;
- $R_{gl_{Topo}}$ , resistência global dos topos,  $[\text{}^\circ\text{C/w}]$ ;
- $R_{rad_{Topo}}$ , resistência térmica por radiação do topo,  $[\text{}^\circ\text{C/w}]$ ;
- $R_{wi_{Topo}}$ , resistência térmica por convecção do topo interior,  $[\text{}^\circ\text{C/w}]$ ;
- $R_{w_{Topo}}$ , resistência térmica por condução no topo,  $[\text{}^\circ\text{C/w}]$ ;
- $R_{we}$ , resistência térmica por convecção topo exterior,  $[\text{}^\circ\text{C/w}]$ .

## Perdas Totais

A equação (2.18), representa o fluxo de calor no evaporador,  $Q_{gl_{evaporador}}$ ,

$$Q_{gl_{evaporador}} = \frac{T_{ai} - T_{evap}}{R_{evap}} [W] \quad (2.18)$$

O fluxo de calor pelas paredes,  $Q_{gl_{paredes}}$ , que contactam diretamente com o exterior é dada pela equação (2.19).

$$Q_{gl_{paredes}} = \frac{T_{ae} - T_{ai}}{R_{gl}} [W] \quad (2.19)$$

Em equipamentos com dois compartimentos, relativamente à parede em contacto com o outro compartimento, a equação (2.20) dá o seu fluxo de calor,  $Q_{gl_{divisória}}$ . Este só existe caso seja um equipamento com mais do que um compartimento.

$$Q_{gl_{divisória}} = \frac{T_{aiB} - T_{aiA}}{R_{gl_{Topo}}} [W] \quad (2.20)$$

Relativamente aos topos, a equação (2.21) da potência de perdas,  $Q_{gl_{Topos}}$ .

$$Q_{gl_{Topos}} = \frac{T_{ae} - T_{ai}}{R_{gl_{Topo}}} [W] \quad (2.21)$$

$T_{aiB}$  representa a temperatura ambiente interior do compartimento oposto ao qual queremos calcular a potência de perdas e que apresenta a temperatura  $T_{aiA}$  (congelador ou frigorífico). A resistência térmica global tem de ser calculada consoante a organização dos compartimentos.

Outro fator a contribuir para a variação da temperatura no interior é o carregamento ou seja, a introdução de bebidas e/ou comida. A forma de lidar com essa contribuição foi considerar a quantidade de energia armazenada no alimento correspondente, e a diferença de temperatura entre o alimento e o interior do frigorífico e quantificar a libertação de calor ao longo do tempo. O tempo de arrefecimento de cada produto é calculado no instante inicial, através do procedimento indicado pela ASHRAE Refrigeration; 2002 [13][14].

Em termos de simulador, o carregamento de alimentos entra como uma fonte de calor variável que é calculada previamente, tendo em conta o tipo de alimento e a sua temperatura [13].

O carregamento foi calculado com base no seguinte [13]:

**1. Calor libertado da temperatura do produto até uma temperatura abaixo da de refrigeração:**

$$Q_1 = M.Cp.(T_i - T_f) [kJ] \quad (2.22)$$



Com,

- $Q_1$ , energia retirada do produto (kJ);
- $M$ , massa do produto (kg);
- $C_p$ , calor específico do produto acima da temperatura de congelamento (kJ/Kg.K);
- $T_i$ , temperatura inicial do produto (K ou °C);
- $T_f$ , temperatura acima da de congelamento do produto (K ou °C).

Para o frigorífico, apenas este passo é necessário, sendo a temperatura  $T_f$  a do compartimento de refrigeração.

### 2. Calor libertado durante o congelamento:

$$Q_2 = M \cdot h_{if} [\text{kJ}] \quad (2.23)$$

Com,

- $Q_2$ , energia retirada do produto (kJ);
- $M$ , massa do produto (kg);
- $h_{if}$ , calor latente de fusão do produto (kJ/Kg);

### 3. Calor libertado da temperatura de congelamento até à temperatura final (temperatura da câmara de congelamento):

$$Q_3 = M \cdot C_p \cdot (T_z - T_f) [\text{kJ}] \quad (2.24)$$

Com,

- $Q_3$ , energia retirada do produto (kJ);
- $M$ , massa do produto (kg);
- $C_p$ , calor específico do produto abaixo da temperatura de congelamento (kJ/Kg.K);
- $T_z$ , temperatura de congelamento do produto (K ou °C);
- $T_f$ , temperatura acima da de congelamento do produto (K ou °C).

O fluxo de calor libertado pelos alimentos até ao congelamento é:

$$Q_{carregamento} = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (2.25)$$

O fluxo de perdas libertado pelos alimentos até a refrigeração é:

$$Q_{carregamento} = Q_1 \quad (2.26)$$

O fluxo de calor que faz variar a temperatura do termostato é:

$$Q_{gl} = Q_{gl_{evaporador}} + Q_{gl_{paredes}} + Q_{gl_{divisória}} + Q_{gl_{Topo}} \quad (2.27)$$

### 2.1.2 Função Nuclear do modelo

A variação da temperatura no evaporador por unidade de tempo será:

$$\Delta T_{evap} = \frac{(-P.COP + Q_{gl}) \cdot \Delta t + Q_{carregamento}}{M.Cp} \quad (2.28)$$

Onde,

- $-P.COP$ , potência térmica do equipamento, W.

Através da equação (2.28) chegamos às equações que vão modelar os ciclos OFF (2.29) e ON (2.30).

Ciclo OFF,

$$\Delta T_{evap} = \frac{Q_{gl} \cdot \Delta t + Q_{carregamento}}{M.Cp} \quad (2.29)$$

Ciclo ON,

$$\Delta T_{evap} = \frac{(-P.COP + Q_{gl}) \cdot \Delta t + Q_{carregamento}}{M.Cp} \quad (2.30)$$

A temperatura interior é modelada através de uma relação com as perdas por convecção do evaporador, que é apresentada na equação (2.31).

$$T_{interior_{i+1}} = T_{interior_i} + \frac{Q_{gl_{evap}}}{M.Cp} \cdot \Delta t \quad (2.31)$$

Estas equações são implementadas com o objetivo de modelar o funcionamento do FAD na ferramenta *MATLAB*, da seguinte forma.

```

i=0;
Enquanto i < Tempo de Simulação
  Faz
    Se (Estado = ON)
      Enquanto Temperatura do evaporador > Temperatura mínima do termostato
        
$$T_{evap_{i+1}} = T_{evap_i} + \frac{(-P.COP + Q_{gl}).\Delta t + Q_{carregamento}}{M.Cp}$$

        Se Temperatura do evaporador <= Temperatura Interior
          Estado = OFF
        Se Não (Estado = OFF)
          Enquanto Temperatura do evaporador < Temperatura máxima do termostato
            
$$T_{evap_{i+1}} = T_{evap_i} + \frac{Q_{gl}.\Delta t + Q_{carregamento}}{M.Cp}$$

            Se Temperatura do evaporador >= Temperatura Interior
              Estado = ON
          Fim Se
        Se Temperatura do evaporador =< Temperatura Interior
          
$$T_{interior_{i+1}} = T_{interior_i} + \frac{-Q_{gl}.\Delta t}{M.Cp}$$

        Se Não
          
$$T_{interior_{i+1}} = T_{interior_i} + \frac{Q_{gl}.\Delta t}{M.Cp}$$

        Fim Se
      i=i+1;
    Fim Faz
  Fim Enquanto

```

O modelo necessita de uma parametrização feita previamente numa folha de Excel onde definimos o tipo de carga que queremos simular e as suas características. Para simular diversos grupos de cargas na mesma simulação usa-se folhas de Excel com a parametrização para cada grupo. Todos os dados de entrada, parametrizações, são passíveis de serem alterados. Os resultados são guardados em um documento de Excel. Na simulação de grupos, as cargas pertencentes a um mesmo grupo são escolhidas de acordo com critérios geográficos (proximidade) e com características técnicas das cargas e da utilização do serviço. A última folha de cada documento de Excel é dedicada as especificações gerais da simulação onde incluímos o número de cargas por grupo assim como a percentagem de alteração dos parâmetros das cargas dentro do mesmo grupo. Isto é, a percentagem com que as características das cargas podem alterar relativamente a referência, que é a folha respetiva ao grupo em questão. Assim é possível reproduzir o funcionamento de vários equipamentos durante um ou vários dias.

Esquematicamente a figura (2.7) representa o funcionamento do modelo.



Figura 2.7: Modelo

## 2.2 Notas Acerca do Modelo Implementado

Apesar da temperatura no interior do equipamento não ser uniforme, considerou-se uma temperatura média interior única. Como se pode verificar na figura (2.8) há temperaturas diferentes no espaço. Todavia, estando o termostato no evaporador será esta temperatura que “controla” os ciclos ON/OFF de funcionamento do equipamento. Como se pode verificar na validação, o erro introduzido é mínimo.

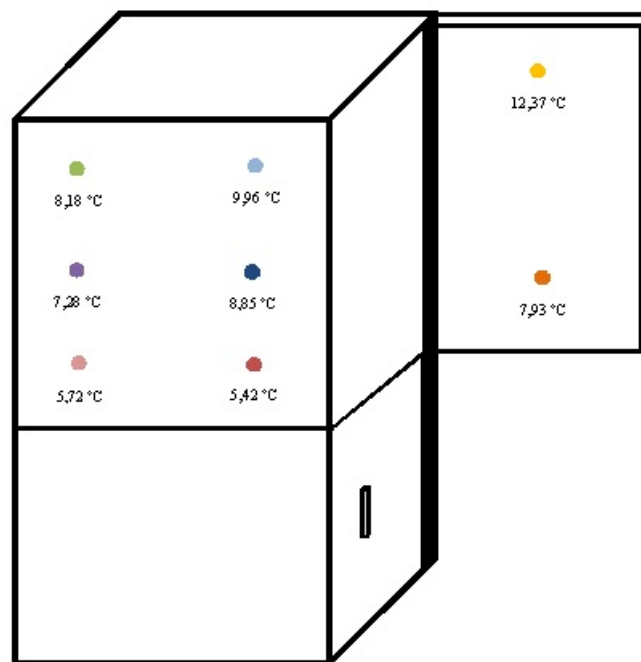


Figura 2.8: Estratificação de Temperaturas em um combinado (Temperaturas recolhidas)

O sistema que caracteriza as trocas de calor de energia entre o interior e o exterior tem em consideração não só a nó a massa de ar interior e alimentos, mas também parte da massa da envolvente, uma vez que esta também é arrefecida e aquecida, tendo experimentalmente sido caracterizada em termos percentuais a quantidade de massa térmica (M.Cp) da envolvente que

entra em cada período. A massa térmica é dada pelo produto entre a massa do equipamento (M) e o calor específico (Cp).

Procedeu-se à análise das recolhas de temperaturas internas e externas da parede do equipamento com objetivo de comprovar que existem variações entre as várias superfícies, figura (2.9). Assim, pode comprovar-se que uma percentagem da massa da envolvente é aquecida e arrefecida durante o processo, pois as temperaturas são diferentes, não variando da mesma forma (interior e exterior).

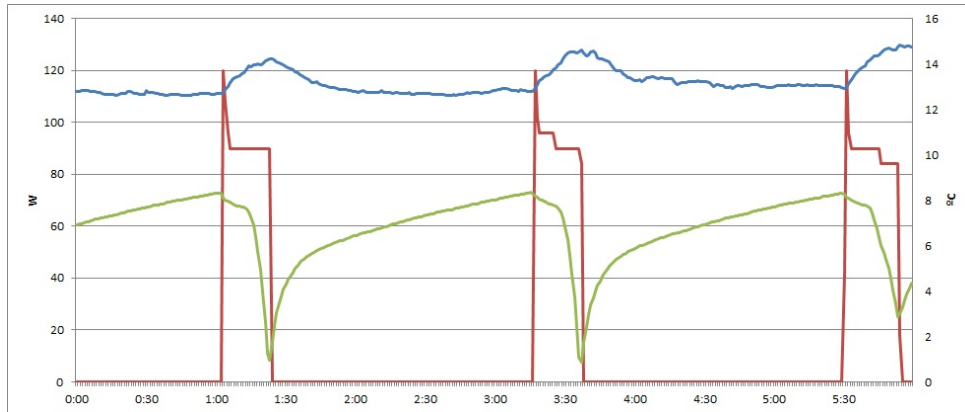


Figura 2.9: Potência (Vermelho), Parede Exterior (Azul), Parede Interna (Verde) - Dados Recolhidos (Conservação)

A figura (2.9) representa a média da temperatura de todas as paredes enquanto que a figura (2.10) representa apenas de uma única parede, lateral. Ambas representam ainda o consumo.

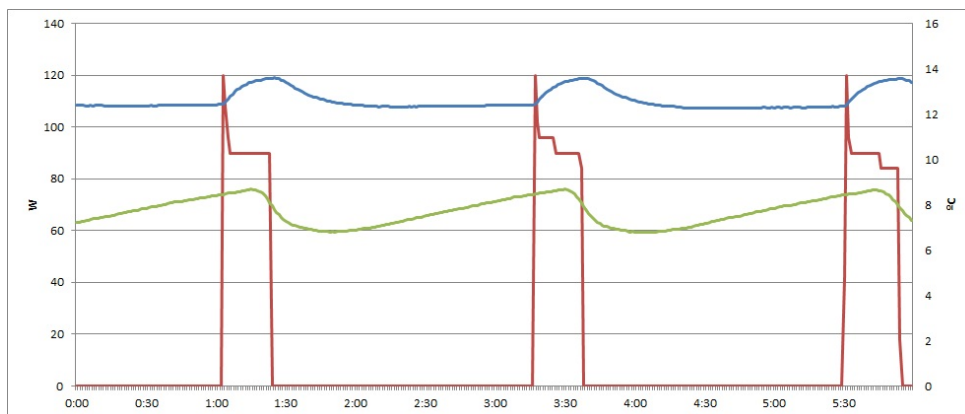


Figura 2.10: Potência (Vermelho), Parede Exterior (Azul), Parede Interna (Verde) - Dados Recolhidos (Conservação)

Verifica-se através da figura (2.9) que, após o compressor ligar, a temperatura das paredes interiores desce como consequência do evaporador estar localizado numa das paredes (posterior interior). A superfície exterior aquece devido ao condensador estar localizado na parte posterior que, por condução, aquece as paredes laterais, figura (2.10).



## Capítulo 3

### Validação do Modelo

O modelo foi validado experimentalmente e os resultados analisados e comparados com os resultados obtidos por simulação. De forma a validar o modelo serão apresentados alguns gráficos e análises comparativas de consumos e temperaturas.

Foi utilizado um frigorífico de duas portas (Frigorífico Normal), dois Combinados e uma Arca Frigorífica, figura (3.1).



Figura 3.1: Frigorífico Normal - Esquerda, Combinado - Centro, Arca Frigorífica - Direita

#### 3.1 Frigorífico Normal

Os equipamentos de FAD estudados apresentam dois compartimentos distintos, isolados e estanques, sendo que um deles permite a congelação de alimentos e o outro a sua conservação. No compartimento de congelação é usado um evaporador em forma de caixa aberta anterior, enquanto na frigorífico, o evaporador é apenas uma porção da parede interior posterior. O circuito de refrigeração é constituído apenas por um compressor para ambos os evaporadores.

Para a validação foram recolhidas temperaturas e consumos de um frigorífico durante alguns dias.

Os consumos foram recolhidos através do equipamento CWATT (desenvolvido no LGE, no DEEC) com uma resolução temporal de minuto.

Para a recolha da temperatura usaram-se termopares ligados a uma placa de aquisição de dados que interpreta e exporta, em tempo real, as temperaturas de 8 superfícies, também com uma resolução temporal de minuto. Foram também utilizados registadores de temperatura *Thermochron* DS1921G, com capacidade de memória consoante a resolução desejada. Neste caso, recorreu-se a uma resolução de minuto a minuto para recolher as temperaturas no congelador, na primeira prateleira, na última prateleira e junto ao botão de alteração do termostato do frigorífico. Para medir a temperatura exterior, foi utilizado o mesmo sistema.

Os dados físicos do frigorífico estão presentes na tabela (3.1).

Altura (m)	Altura Conservação (m)	Altura Congelação (m)	Largura (m)	Profundidade (m)	Espessura Média (m)
1,405	1	0,405	0,56	0,593	0,035

Tabela 3.1: Dados Físicos do Frigorífico

Analisando 24 horas de recolhas, obtiveram-se os seguintes valores médios, tabela (3.2):

°C	Temperatura Média Interna	Temperatura Média Evaporador	Temperatura Máxima termostato	Temperatura Mínima termostato
Congelação	-15,87	-14,43	-6,59	-27,57
Conservação	5,72	4,37	6,68	5,88

Tabela 3.2: Temperaturas Frigorífico Normal

O funcionamento destas cargas é o típico das cargas termostáticas de arrefecimento, ou seja, quando a temperatura atinge o máximo do termostato, o compressor liga e a temperatura do evaporador desce rapidamente até ser atingida a mínima, onde o compressor se desliga. Nesse instante, o ar interior continua a receber frio do evaporador, enquanto este já aquece. Após alguns minutos as temperaturas igualam-se, retomando ambas o mesmo sentido, o do aquecimento, figura (3.2).

No congelador a variação da temperatura no evaporador é de cerca de 30°C e na temperatura inteiro é de 25°C, figura (3.2).



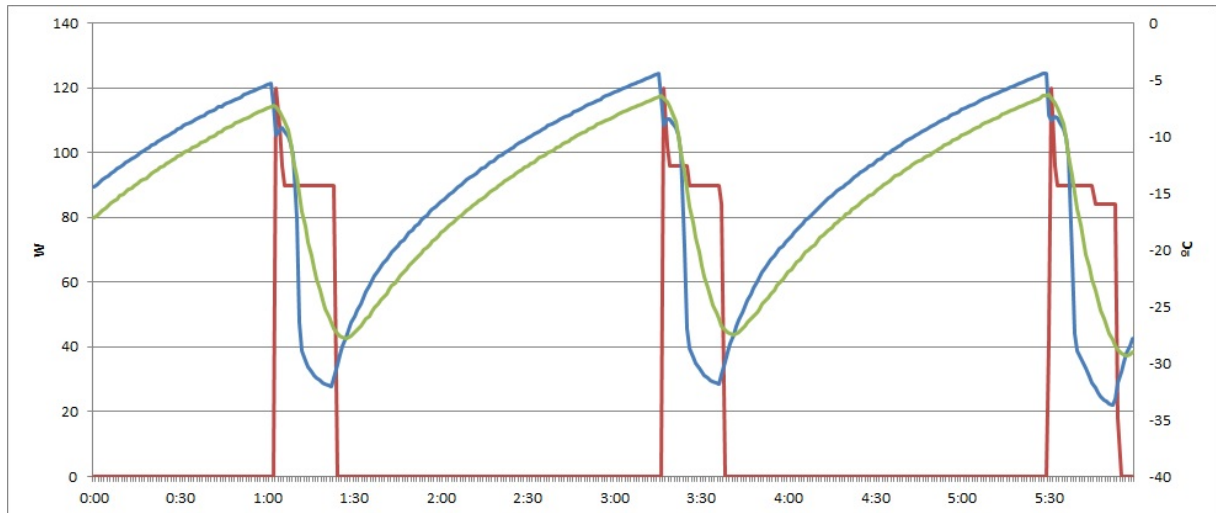


Figura 3.2: Potência (Vermelho) e Temperatura Evaporador (Azul), Temperatura Ar Interior (Verde) - Dados Recolhidos (Consgelação)

No compartimento de conservação, a temperatura do evaporador é representada pelo vetor alusivo ao termopar mais próximo da sua localização. A temperatura do ar interior é apresentada pela média dos vetores referentes aos três termómetros localizados dentro do compartimento. A figura (3.3), representa o comportamento de ambas as temperaturas.

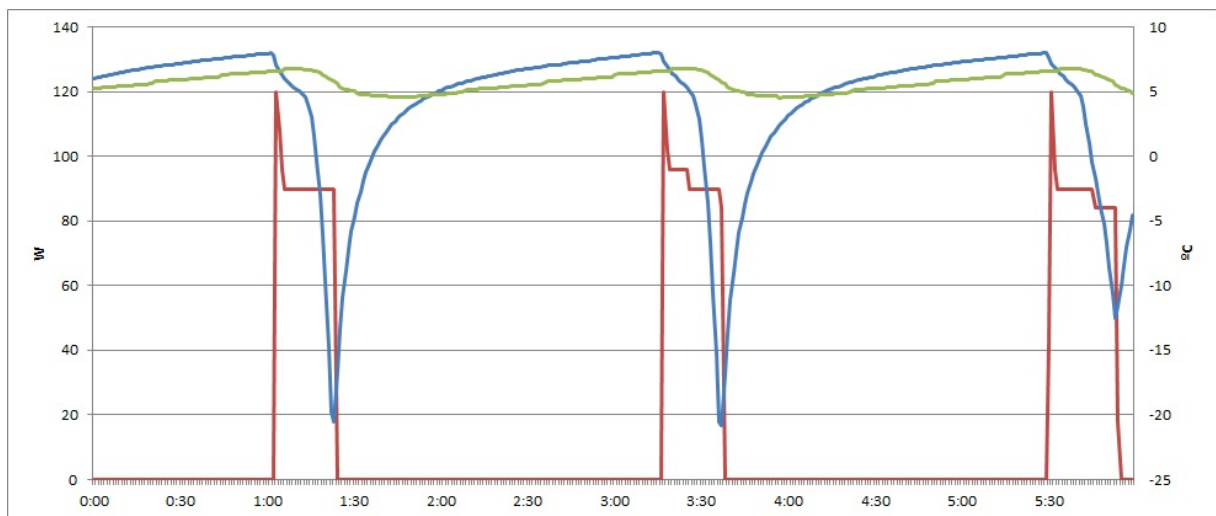


Figura 3.3: Potência (Vermelho) e Temperatura Evaporador (Azul), Temperatura Ar Interior (Verde) - Dados Recolhidos (Conservação)

Como se pode verificar, a amplitude da temperatura do evaporador é muito superior à do ar interior, atingindo temperaturas negativas. Por este motivo, em certas zonas do compartimento de conservação ocorre a formação de gelo pelo que não devemos encostar alimentos à parede posterior do equipamento (que contém o evaporador).

A fim de validar o modelo fisicamente baseado efectuou-se uma simulação de 24 horas, com as especificações iguais às do equipamento onde foram efetuadas as recolhas, tabela (3.3). Também a temperatura ambiente e do termostato foram reguladas de acordo com as recolhidas.

A figura (3.4), representa a potência simulada e a recolhida pelo CWATT, assim como as temperatura interior.

Potência do Equipamento (W)	Temperatura Inicial FZ (°C)	Temperatura Inicial FR (°C)	Temperatura Ambiente (°C)
88,52	-14,42	6,02	12,22
Espessura da Parede Exterior (m)	Espessura da Parede Interior (m)	Espessura do Isolamento FZ (m)	Espessura do Isolamento FR (m)
0,001	0,004	0,04	0,03
Temperatura Parede Interior FZ (°C)	Temperatura Parede Exterior FZ (°C)	Diferença Temperatura Parede Interior FR (°C)	Diferença Temperatura Parede Exterior FR (°C)
1,1	-0,65	1,18	0,97
Área Evaporador Congelador ( $m^2$ )	Área Evaporador Frigorífico ( $m^2$ )	COP FR	
0,81	0,1	1,55	
Temperatura Máxima do Evaporador (°C)	Temperatura Mínima do Evaporador (°C)		
8,29	-21,02		

Tabela 3.3: Especificações da Validação do Frigorífico Normal

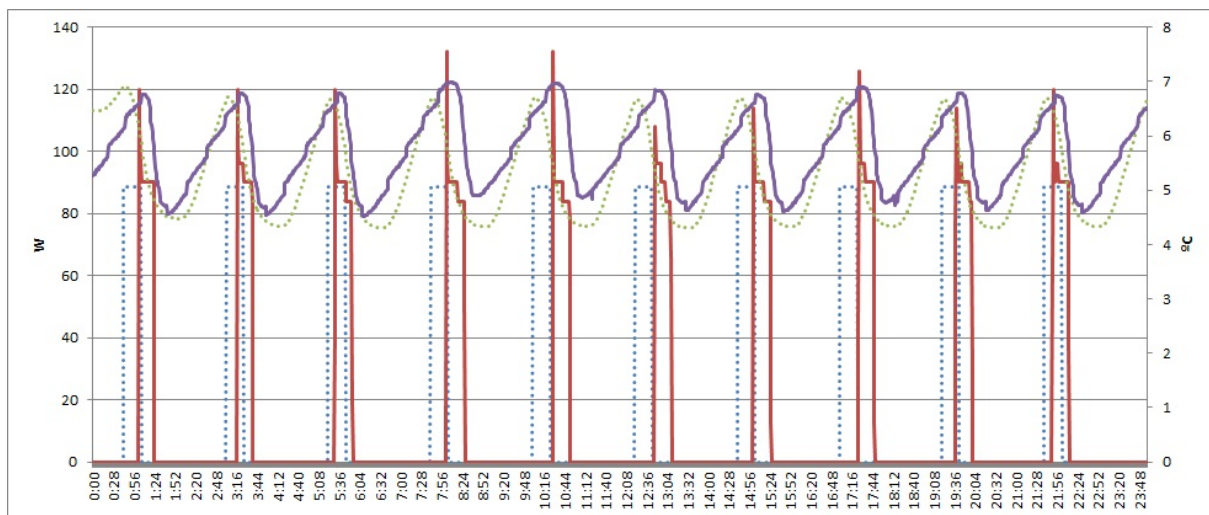


Figura 3.4: Potência Recolhida (Vermelho), Potência Simulada (Azul Tracejado), Temperatura Recolhida (Roxo) e Temperatura Simulada (Verde Tracejado) - Conservação

O consumo recolhido num dia é de 346,7 Wh e o simulado de 354,08 Wh o que dá uma diferença percentual de 2,13%. Pode-se assim concluir que a ferramenta desenvolvida pode ser utilizada na análise do funcionamento deste tipo de equipamento de FAD.

No frigorífico normal a dimensão dos evaporadores é a principal responsável pela diferença de temperatura, por isso conseguimos ter dois compartimentos com temperaturas diferentes com um único sistema de refrigeração.

Concluiu-se também que o termostato está localizado no evaporador, pois a sua temperatura máxima e mínima é aproximadamente constante a quando do início e fim de ciclos do compressor.

## 3.2 Combinado

O Combinado estudado difere do frigorífico normal por ter o compartimento de congelação por baixo do de conservação, tendo um compressor independente para cada um. O congelador é, geralmente, composto por gavetas e entre estas estão localizados os evaporadores responsáveis pelo arrefecimento. A zona de conservação é idêntica ao frigorífico normal, mantendo a localização do evaporador na parede posterior interior do equipamento. Há também um termostato a controlar a temperatura de cada divisão.

Os equipamentos e as estratégias de recolha foram iguais às efetuadas para o frigorífico normal, tendo no caso do combinado sido recolhidos três conjuntos de dados: em funcionamento parcial (parte de congelação e parte de refrigeração) e em funcionamento simultâneo.

Os dados físicos do combinado estão presentes na tabela (3.4).

Altura (m)	Altura Conservação (m)	Altura Congelação (m)	Largura (m)	Profundidade (m)
1,875	1,3	0,575	0,6	0,655

Tabela 3.4: Dados Físicos Combinado

Analisando 24 horas, obtiveram-se os seguintes valores médios, tabela (3.5):

°C	Temperatura Média Interna	Temperatura Média Evaporador	Temperatura Máxima termostato Evaporador	Temperatura Mínima termostato Evaporador
Congelação	-20,52	-21,13	-18,49	-23,44
Conservação	7,26	-2,89	5,35	-21,53

Tabela 3.5: Temperaturas Combinado

A figura (3.5) representa alguns períodos de aquecimento e arrefecimento do congelador. Este, relativamente ao frigorífico convencional, tem um controlo da temperatura mais preciso,

ou seja as variações entre as temperaturas máximas e mínimas são menores, sendo a variação de 7°C para o evaporador e 3°C para a temperatura interior. Os períodos são também menores, cerca de 9 minutos, estando ligado durante 2 minutos. Esta menor variação da temperatura interior pode ocorrer devido ao facto de cada compartimento ter um compressor independente, podendo assim haver um ajuste da temperatura mais eficaz. Para recolher a temperatura interior foram usados os registadores de temperatura e um termopar localizado a meio do compartimento. Para o evaporador usamos um termopar junto a uma das suas grelhas.

Na figura (3.5) verifica-se formatos diferentes devido a resolução escolhida para efetuar as recolhas.

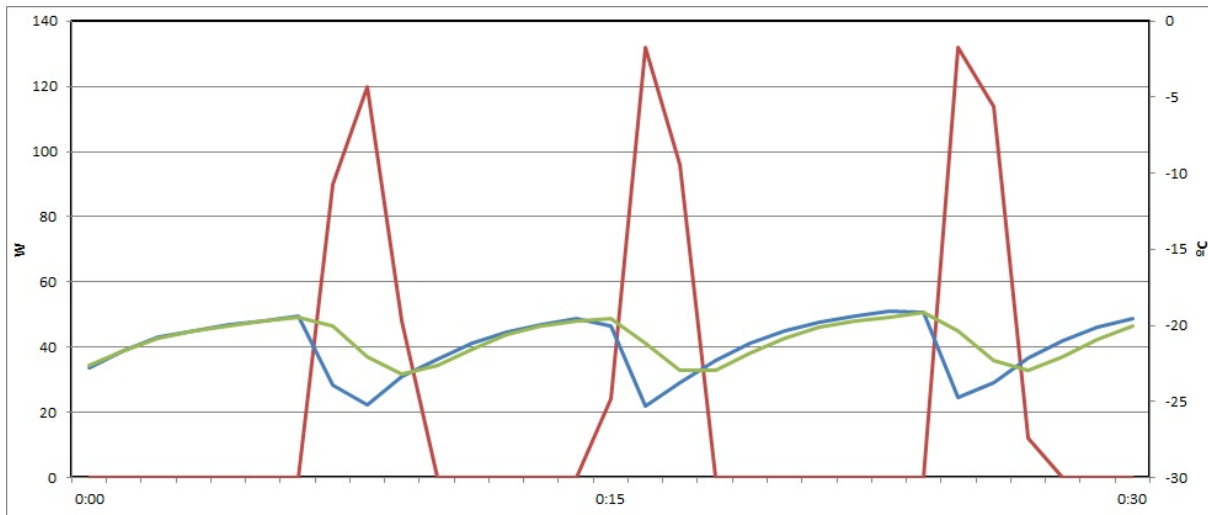


Figura 3.5: Potência (Vermelho), Temperatura Evaporador (Azul) e Temperatura Ar Interior (Verde) - Dados Recolhidos (Congelação)

No compartimento de conservação, a temperatura do evaporador é representada pelo vetor alusivo ao termopar mais próximo da sua localização. A temperatura do ar interior é representada por um termopar a meio do compartimento. A figura (3.6) mostra o comportamento de ambas as temperaturas.

As oscilações na temperatura interior assim como no evaporador são idênticas ao compartimento de conservação do frigorífico normal. Segundo os dados obtidos pode-se assim extrapolar que a diferença entre o combinado e o frigorífico normal reside numa maior eficácia no processo de congelação.

Na figura (3.10) pode ver-se uma estratificação das temperaturas interiores do mesmo espaço de conservação (combinado).

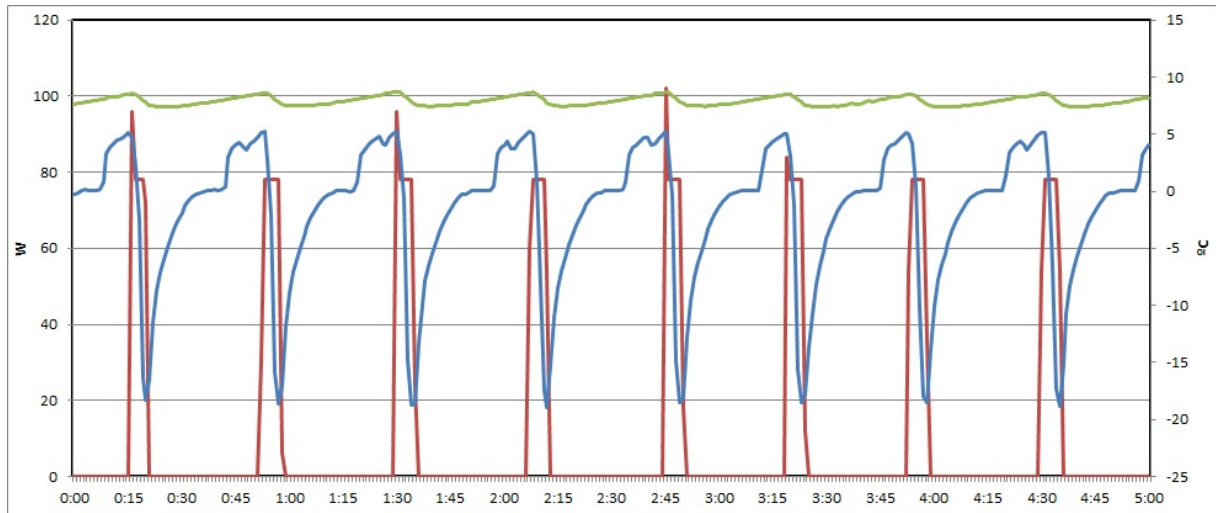


Figura 3.6: Temperatura Evaporador (Vermelho) e Temperatura Ar Interior (Azul) - Dados Recolhidos (Congelação)

A fim de validar o modelo fisicamente baseado efectuou-se uma simulação de 24 horas, com as especificações iguais as do equipamento onde foram efetuadas as recolhas, tabela (3.6). A temperatura ambiente média era de 18,84. Também a temperatura ambiente e do termostato foram reguladas de acordo com as recolhidas.

Avaliando o modelo obteve-se a figura (3.7), que representa a potência simulada e a recolhida pelo CWATT, assim como a temperatura interior do congelador e do frigorífico.

Potência Congelador (W)	Potência Frigorífico (W)	Temperatura Inicial FZ (°C)	Temperatura Inicial FR (°C)
88,52	69,35	-22,80	5
Espessura da Parede Exterior (m)	Espessura da Parede Interior (m)	Espessura do Isolamento FZ (m)	Espessura do Isolamento FR (m)
0,001	0,004	0,04	0,03
Área Evaporador Congelador ( $m^2$ )	Área Evaporador Frigorífico ( $m^2$ )	COP FZ	COP FR
0,81	0,1	1,78	2,17
Temperatura Parede Interior FZ (°C)	Temperatura Parede Exterior FZ (°C)	Diferença Temperatura Parede Interior FR (°C)	Diferença Temperatura Parede Exterior FR (°C)
7,11	1,02	-2,56	0,88
Temperatura Máxima do Evaporador FR (°C)	Temperatura Mínima do Evaporador FR (°C)	Temperatura Máxima do Evaporador FZ (°C)	Temperatura Mínima do Evaporador FZ (°C)
5,35	-21,53	-18,25	-26,86

Tabela 3.6: Especificações da Validação do Combinado

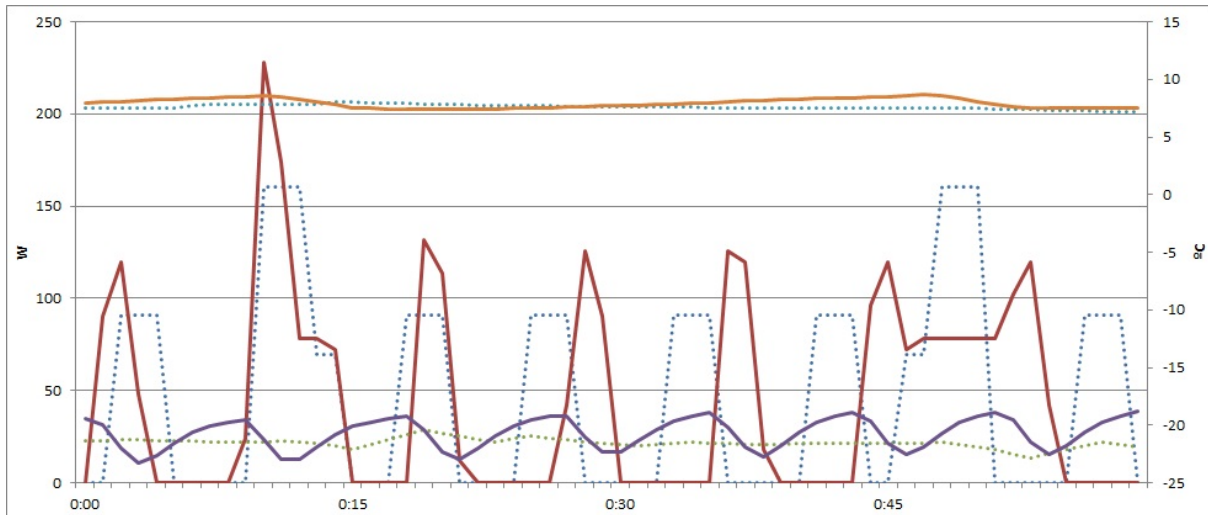


Figura 3.7: Potência Recolhida (Vermelho), Potência Simulada (Azul Tracejado), Temperatura Recolhida Congelador (Roxo), Temperatura Simulada Congelador (Verde Tracejado), Temperatura Recolhida Frigorífico (Laranja) e Temperatura Simulada Frigorífico (Azul Tracejado)

O consumo recolhido num dia é de 1147,1 Wh e o simulado de 1073,92 Wh o que dá uma diferença de 6,38%. Pode-se assim concluir que a ferramenta desenvolvida pode ser utilizada na análise do funcionamento deste tipo de equipamento de FAD.

### 3.3 Arca Frigorífica

A arca frigorífica é um equipamento de uso exclusivo para a congelação de alimentos. Contém um compartimento isolado, vertical ou horizontal onde os alimentos são congelados e se mantêm armazenados. O arrefecimento deste equipamento deve-se aos evaporadores embutidos nas paredes do equipamento, contrariamente ao combinado que recorre a grelhas, ou seja evaporadores, entre as gavetas na zona de congelação.

Os equipamentos e as estratégias de recolha foram iguais às efetuadas para o frigorífico normal.

As recolhas de dados foram efetuadas numa arca frigorífica horizontal com as seguintes dimensões, tabela (3.7).

Altura (m)	Largura (m)	Profundidade (m)
0,785	0,54	0,585

Tabela 3.7: Dados Físicos Arca Frigorífica

Analisando 24 horas, obtiveram-se os seguintes valores médios , tabela (3.8):

°C	Temperatura Média Interna	Temperatura Média Evaporador	Temperatura Máxima termostato Evaporador	Temperatura Mínima termostato Evaporador
Congelação	-18,28	-20,09	-16,85	-24,25

Tabela 3.8: Temperaturas Interiores Arca Frigorífica

A figura (3.8), mostra alguns períodos de aquecimento e arrefecimento recolhidos. A arca possui um controlo idêntico ao combinado pois o ar interior tem uma oscilação a rondar os 3°C e o evaporador os 7°C. Embora se usem tecnologias diferentes, o comportamento da temperatura interior apresenta o mesmo padrão.

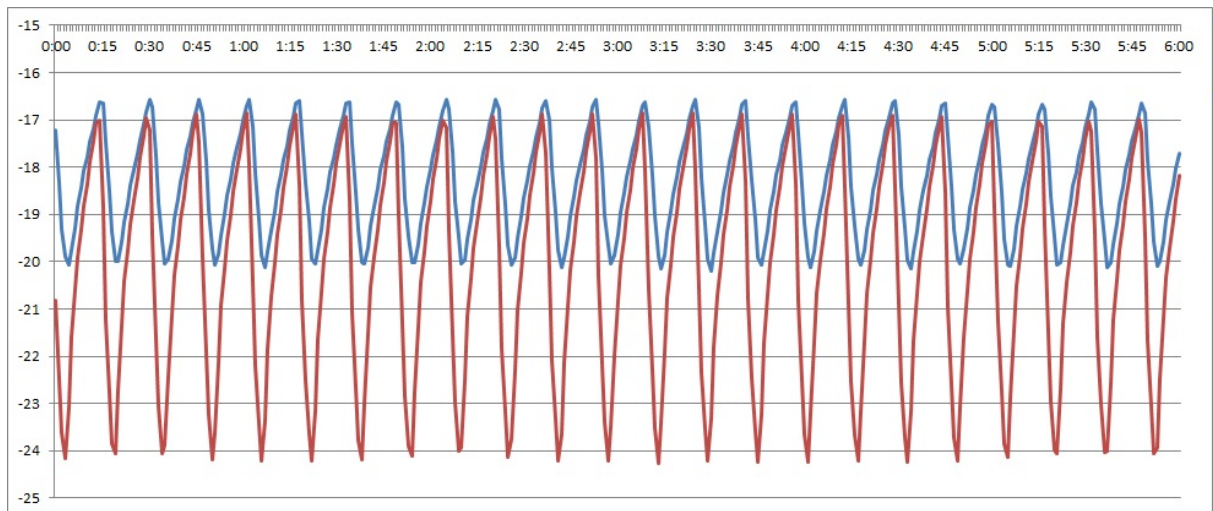


Figura 3.8: Temperatura Evaporador (Vermelho) e Temperatura Ar Interior (Azul)

A fim de validar o modelo fisicamente baseado efectuou-se uma simulação de 24 horas, com as especificações iguais às do equipamento onde foram efetuadas as recolhas, tabela (3.9). Também a temperatura ambiente e do termostato foram reguladas de acordo com as recolhidas.

Ao avaliar o modelo obteve-se a figura (3.9), que representa a potência simulada e a recolhida assim como a temperatura interior da arca.

Potência do Equipamento (W)	Temperatura Inicial FZ (°C)	COP FZ
72,62	-20,83	1,71
Espessura da Parede Exterior (m)	Espessura da Parede Interior (m)	Espessura do Isolamento FZ (m)
0,001	0,004	0,04
Temperatura Parede Interior FZ (°C)	Temperatura Parede Exterior FZ (°C)	Área Evaporador Congelador ( $m^2$ )
1,81	0,8	0,81
Temperatura Máxima do Evaporador FZ (°C)	Temperatura Mínima do Evaporador FZ (°C)	Temperatura Ambiente (°C)
-16,9	-24,5	17,41

Tabela 3.9: Especificações da Validação do Frigorífico Normal

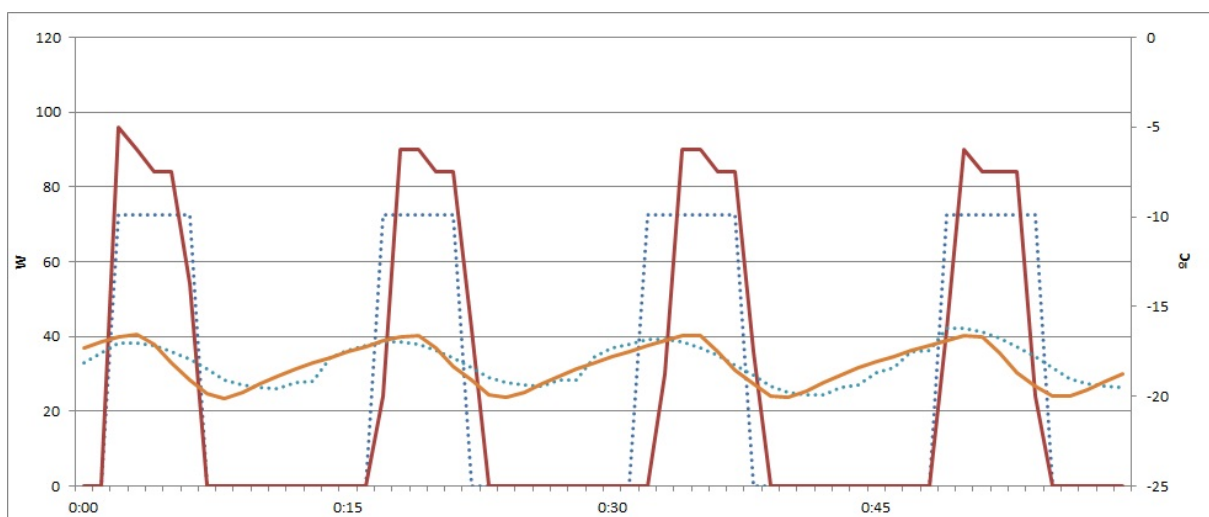


Figura 3.9: Potência Recolhida (Vermelho), Potência Simulada (Azul Tracejado), Temperatura Recolhida (Laranja) e Temperatura Simulada (Azul Tracejado)

O consumo recolhido num dia é de 628,20 Wh e o simulado de 629,37 Wh o que dá uma diferença de 0,19 %. Pode-se assim concluir que a ferramenta desenvolvida pode ser utilizada na análise do funcionamento deste tipo de equipamento de FAD.

### 3.4 Validação Aberturas

A figura (3.10) representa a estratificação das temperaturas interiores num combinado em 8 localizações diferentes.



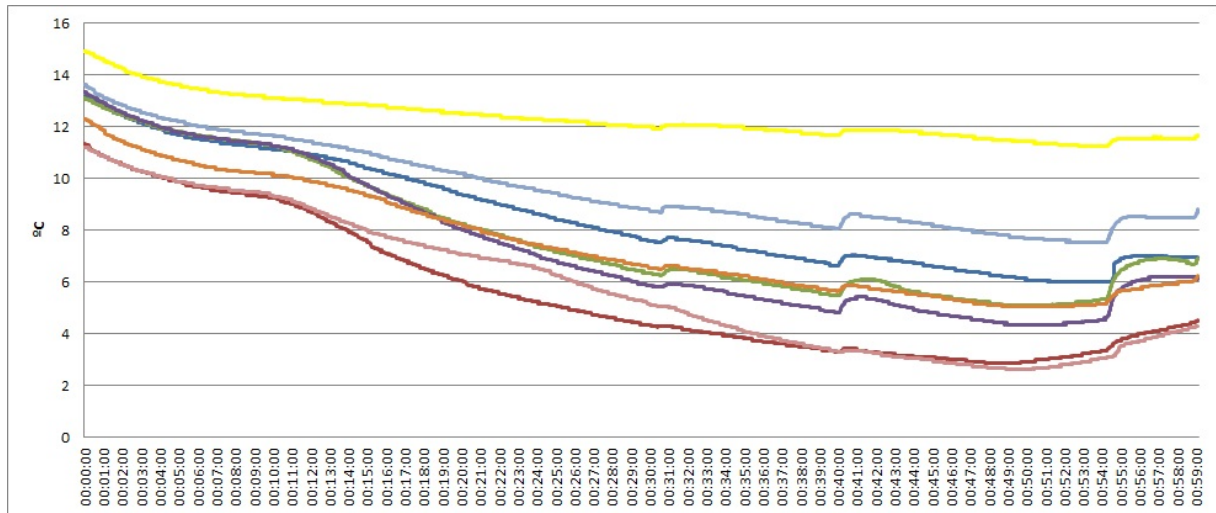


Figura 3.10: Estratificação de temperaturas no compartimento de refrigeração de um combinado com 3 aberturas

Estas temperaturas estão representadas na figura 2.7 para mais fácil visualização do local de onde foram recolhidas as temperaturas interiores.

As recolhas efetuadas levaram-nos a concluir que a cada abertura renova-se uma percentagem do ar interior por ar exterior, ou seja, uma percentagem do ar ambiente vai aquecer o interior do equipamento.

Se a diferença de temperaturas, interior e exterior, fosse estável a percentagem de renovação ia depender unicamente do tempo de abertura da porta do equipamento. Como a temperatura interior está constantemente a variar, arrefecer e aquecer, enquanto a temperatura exterior mantém-se praticamente constante vamos ter duas variáveis, diferença de temperatura e tempo de abertura. Considerando uma abertura média de 10 segundos, obteve-se a seguinte relação entre o  $\Delta T$ , variação da temperatura provocada pela abertura, e a diferença de Temperatura, interior e exterior do combinado, tabela (3.10). Esta relação pode ser aproximada por uma linha de tendência exponencial dada pela equação (3.1).

$$\Delta T = 0,0059 * e^{0,3516*(T_{ae} - T_{ai})} [^{\circ}\text{C}] \quad (3.1)$$

	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Simulado
$\Delta T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	0,1668	0,2085	0,3445	0,4231	0,43
Diferença de Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) ( $T_{ae} - T_{ai}$ )	9,6263	9,9910	11,5080	12,1977	12,21

Tabela 3.10: Análise Aberturas



## Capítulo 4

# Análise de Resultados

Com o intuito de apresentar as principais características e potencialidades da ferramenta desenvolvida, apresentam-se análises de sensibilidade e de medidas de GP para os vários equipamentos de FAD estudados.

### 4.1 Frigorífico Normal

#### 4.1.1 Variação de Temperatura

##### Análise a 1 carga

Efetuaram-se quatro simulações de um frigorífico normal durante 1 dia. Cada simulação foi efetuada a uma temperatura média ambiente diferente, 6 °C, 12 °C, 18 °C e 24°C. O objetivo é avaliar a variação do consumo com a variação da temperatura ambiente.

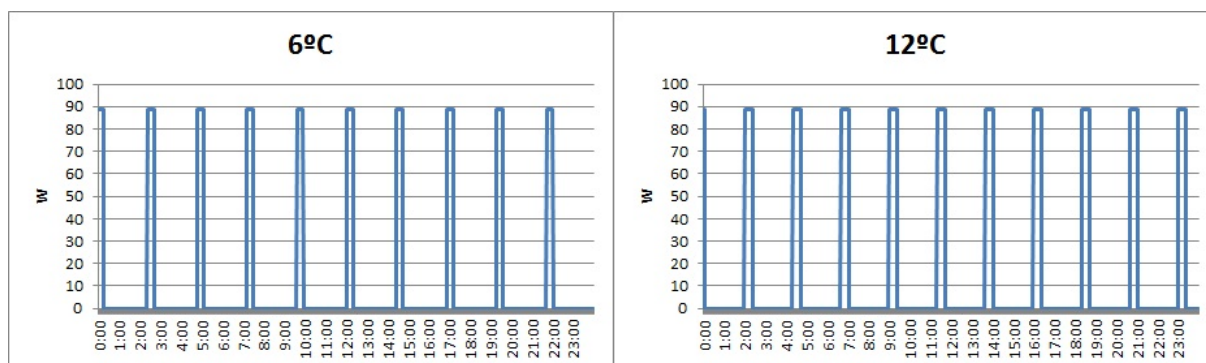


Figura 4.1: Potência (Azul) - Esquerda, Simulação com temperatura ambiente a 6°C. Direita, Simulação com temperatura ambiente a 12 °C

As figuras (4.1) e (4.2) representam o consumo do frigorífico normal nos quatro cenários.

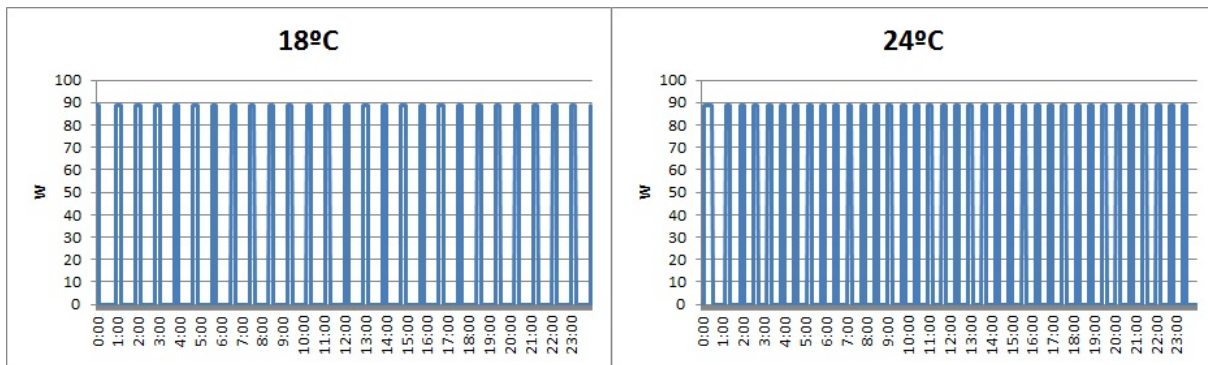


Figura 4.2: Potência (Azul) - Esquerda, Simulação com temperatura ambiente a 18°C. Direita, Simulação com temperatura ambiente a 24 °C

Verifica-se, na tabela (4.1), que o consumo aumenta com a temperatura ambiente em que este equipamento está localizado. A equação da reta de tendência é:  $y = 21,466 * x + 125,52$  W, sendo y o consumo e x a temperatura ambiente.

Temperatura Ambiente	6 °C	12 °C	18 °C	24 °C
Consumo Médio (Wh)	275,89	358,51	495,71	659,47

Tabela 4.1: Análise Carga Única - Frigorífico Normal

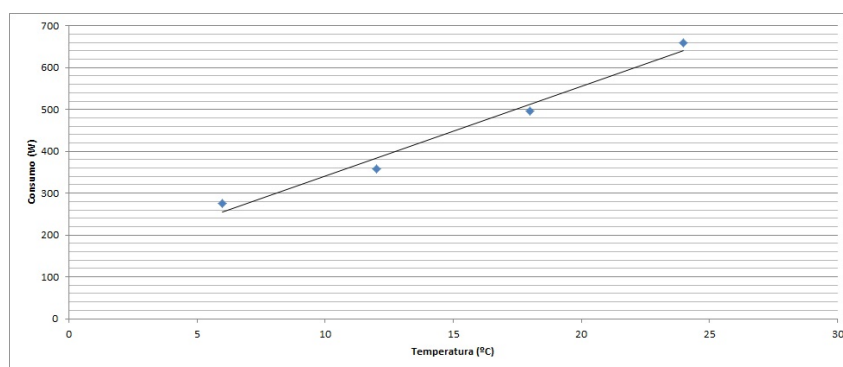


Figura 4.3: Linha de Tendência do Consumo em relação a Temperatura Exterior de um Frigorífico Normal

### Análise a 1000 Cargas

Efetuar-se-ão quatro simulações de 1000 equipamentos do tipo, frigorífico normal, com uma percentagem de alterações de carga para carga de 5 %. Estas foram de 1 dia com cada simulação a ser efetuada a uma temperatura média ambiente diferente, 6 °C, 12 °C, 18 °C e 24°C. O objetivo

é avaliar a variação do consumo com a variação da temperatura ambiente assim como o aumento do fator de coincidência.

O Fator de coincidência (FC) é a relação entre a potência máxima do diagrama de carga soma com a soma das potências máximas. Está relação é dada pela equação (4.1) [17].

$$FC = \frac{P_{m\acute{a}x}(DDC_{soma})}{\sum P_{m\acute{a}x}(DDC)} \quad (4.1)$$

O FC varia entre 0 e 1, sendo 1 o valor em que existe maior coincidência.

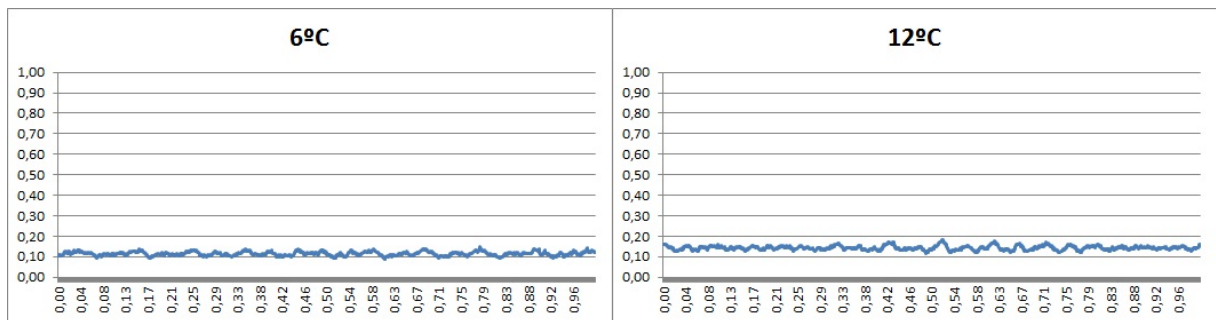


Figura 4.4: Fator de Coincidência (Azul) - Esquerda, Simulação com temperatura ambiente a 6°C. Direita, Simulação com temperatura ambiente a 12 °C

As figuras (4.4) e (4.5) representam o fator de coincidência dos equipamentos nos quatro cenários. Verifica-se ao observar os gráficos que o fator de coincidência médio aumenta com o aumento da temperatura.

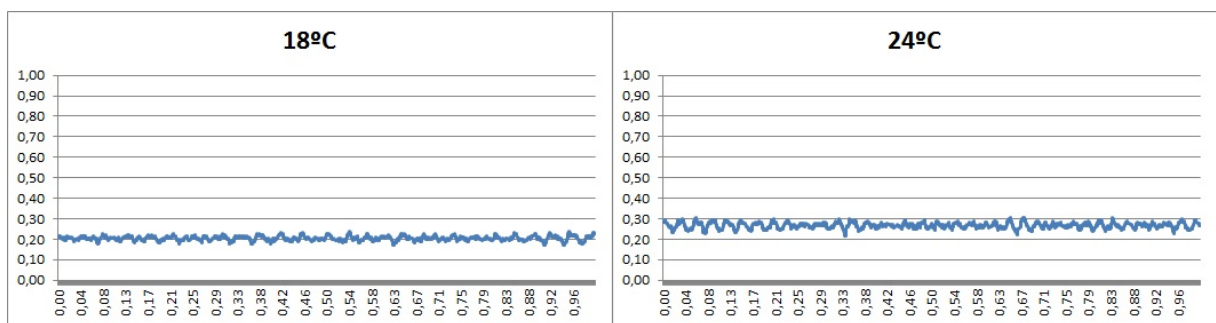


Figura 4.5: Fator de Coincidência (Azul) - Esquerda, Simulação com temperatura ambiente a 18°C. Direita, Simulação com temperatura ambiente a 24 °C

Verifica-se, na tabela (4.2), que o consumo médio aumenta com a temperatura ambiente em que este equipamento está localizado assim como o fator de coincidência. Isto é, com o aumento da temperatura ambiente aumentamos o número de equipamentos ligados ao mesmo tempo.

Temperatura Ambiente	6 °C	12 °C	18 °C	24 °C
Consumo Médio (Wh)	283,98	358,02	511,97	654,11
Fator de Coincidência Médio	0,115	0,143	0,205	0,267

Tabela 4.2: Análise 10 Cargas - Frigorífico Normal

### 4.1.2 Cortes

#### Análise à Mesma Temperatura Ambiente

Efetuar-se duas simulações de 1000 equipamentos do tipo, frigorífico normal, com uma percentagem de alterações de carga para carga de 5 %. Ambas foram de 1 dia com a temperatura média ambiente de 15 °C. Foram provocados 2 cortes de energia numa das simulações e 4 noutra, cada um de 15 minutos. Na primeira simulação, 2 cortes, foram provocados às 6 horas e 18 horas. No segundo, 4 cortes, foram provocados às 0 horas, 6 horas, 12 horas e 18 horas. Houve uma terceira simulação para servir como referência ao estudo.

O objetivo destas simulações é verificar o comportamento do fator de coincidência e a sua normalização (tempo de retoma). Também foi averiguado o consumo e a ponta máxima do diagrama.

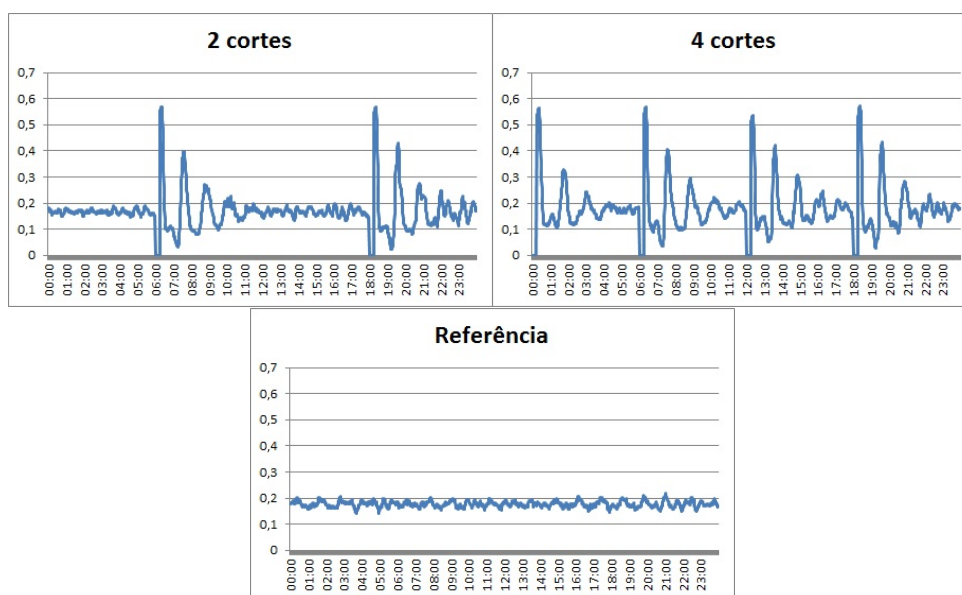


Figura 4.6: Fator de Coincidência (Azul) - Esquerda, Simulação com 2 cortes. Direita, Simulação com 4 cortes. Em baixo, Simulação de Referência, sem cortes

Verifica-se na figura (4.6) os cortes de energia provocados em ambos os casos.

Com a ajuda da tabela (4.3) podemos concluir que o consumo médio se mantém praticamente inalterado, pois são cortes de curta duração e a temperatura interior do equipamento pouco ultrapassa a temperatura do termostato. A ponta máxima do diagrama aumenta quando provocamos cortes pois há um aumento de coincidência do arranque do compressor dos equipamentos. No caso dos quatro cortes, o tempo entre cortes quase não é suficiente para o grupo de frigoríficos retomar a diversidade natural. O mesmo não acontece quando se aplicam os dois cortes, em que se constata que o conjunto de frigoríficos regressa aos valores de diversidade sem cortes.

De referir que os cortes foram simulados a todas as cargas.

Número de Cortes	4		2		Referência	
Consumo Médio (Wh)	426,47		423,38		421,74	
Ponta (W)	57,50		55,18		20,24	
Fator de Coincidência Médio	0,177		0,174		0,177	
Gama de Valores Fator de Coincidência (Máx/Min)	0,00	0,573	0,00	0,569	0,139	0,216

Tabela 4.3: Análise Cortes a mesma Temperatura - Frigorífico Normal

### Análise com Variação de Temperatura Ambiente

Efetuar-se-ão quatro simulações de 1000 equipamentos do tipo, frigorífico normal, com uma percentagem de alterações de carga para carga de 5 %. Estas foram de 1 dia com cada simulação a ser efetuada a uma temperatura média ambiente diferente, 6 °C, 12 °C, 18 °C e 24°C. Foram provocados 4 cortes, às 0 horas, 6 horas, 12 horas e 18 horas, com o objetivo de avaliar a variação do consumo com a variação da temperatura ambiente assim como o aumento do valor médio do fator de coincidência.

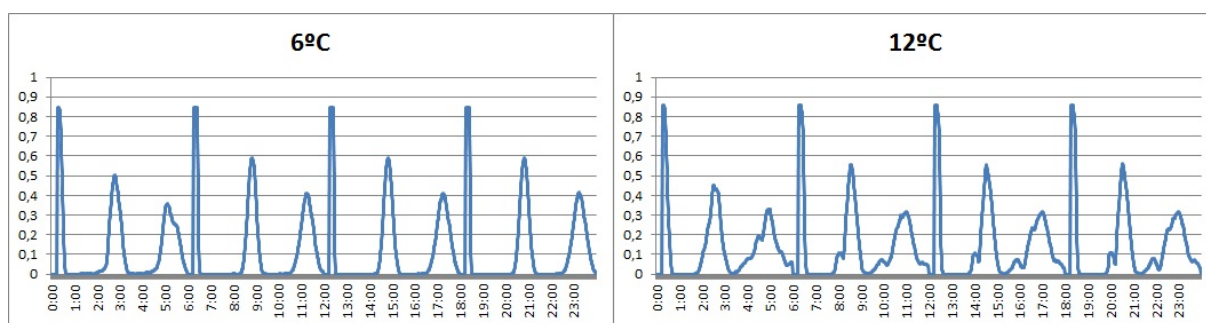


Figura 4.7: Fator de Coincidência (Azul) - Esquerda, Simulação com temperatura ambiente a 6°C. Direita, Simulação com temperatura ambiente a 12 °C - 4 Cortes

As figuras (4.7) e (4.8) representam o fator de coincidência dos equipamentos nos quatro cenários. Verifica-se ao observar os gráficos que o fator de coincidência médio aumenta com o aumento da temperatura.

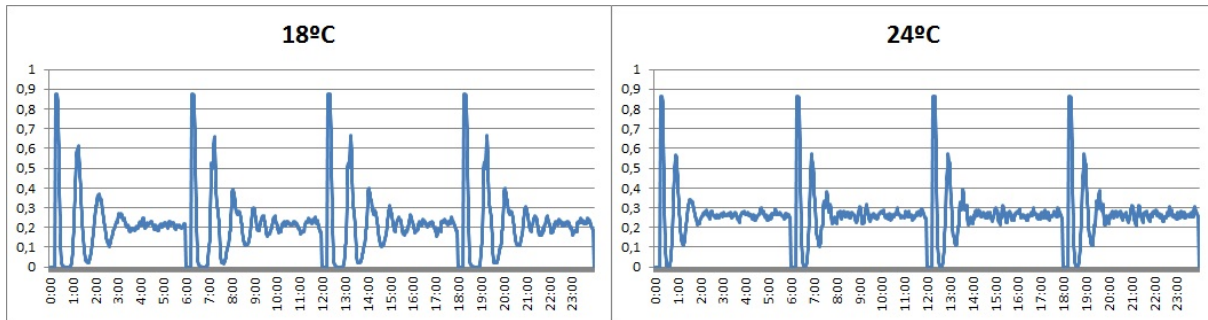


Figura 4.8: Fator de Coincidência (Azul) - Esquerda, Simulação com temperatura ambiente a 18°C. Direita, Simulação com temperatura ambiente a 24 °C - 4 Cortes

Efetuaram-se também quatro simulações de 1000 equipamentos cada do tipo, frigorífico normal, com uma percentagem de alterações de carga para carga de 5 %. Estas foram de 1 dia com cada simulação a ser efetuada a uma temperatura média ambiente diferente, 6 °C, 12 °C, 18 °C e 24°C. Foram provocados 2 cortes, às 6 horas e 18 horas, com o mesmo objetivo.

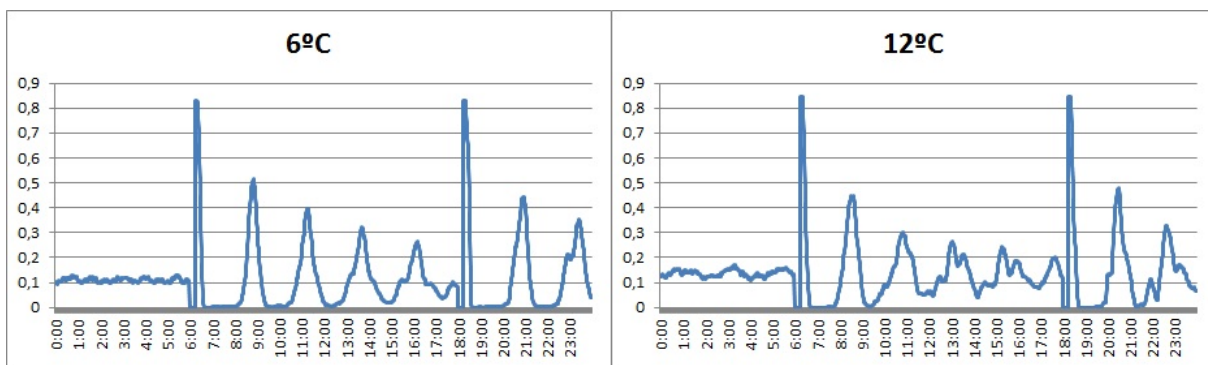


Figura 4.9: Fator de Coincidência (Azul) - Esquerda, Simulação com temperatura ambiente a 6°C. Direita, Simulação com temperatura ambiente a 12 °C - 2 Cortes

As figuras (4.9) e (4.10) representam o fator de coincidência dos equipamentos nos quatro cenários. Verifica-se ao observar os gráficos que o fator de coincidência médio aumenta com o aumento da temperatura.



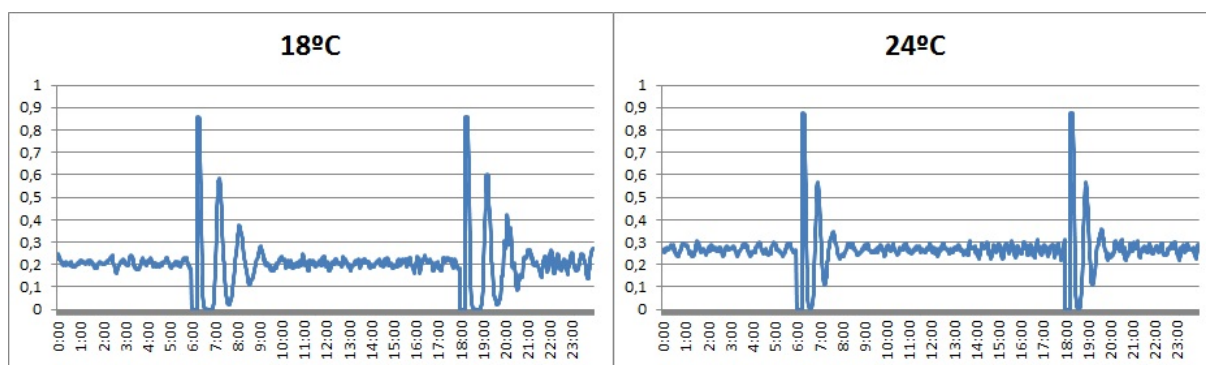


Figura 4.10: Fator de Coincidência (Azul) - Esquerda, Simulação com temperatura ambiente a 18°C. Direita, Simulação com temperatura ambiente a 24 °C - 2 Cortes

A tabela (4.4) contém uma breve análise sobre as simulações. Verifica-se em comparação com a análise feita sem cortes que ao efetuarmos cortes aumentamos a ponta máxima do diagrama. Com o aumento da temperatura verifica-se que há tendência para o consumo sem cortes ser superior ao consumo com cortes. Quanto menor for a diferença entre a temperatura interior e exterior, menor será o crescimento da temperatura interior, portanto será menor o consumo para repor a temperatura pretendida. No caso extremo, a temperatura interior atinge a temperatura ambiente

O fator de coincidência embora não varie muito em média, a sua gama vária bastante para os diagramas com cortes, como verificamos nas figuras anteriores.

<b>Temperatura Ambiente</b>	6 °C		12 °C		18 °C		24 °C	
<b>Cortes</b>	2	4	2	4	2	4	2	4
<b>Consumo Médio c/cortes (Wh)</b>	292,98	305,44	347,45	351,14	510,43	512,85	646,66	641,88
<b>Consumo Médio s/cortes (Wh)</b>	283,98		358,02		511,97		654,11	
<b>Ponta (W)</b>	88,46	88,49	88,46	88,35	88,47	88,36	88,32	88,59
<b>Fator de Coincidência Médio c/cortes</b>	0,115	0,122	0,139	0,142	0,206	0,213	0,266	0,262
<b>Fator de Coincidência Médio s/cortes</b>	0,115		0,143		0,205		0,267	

Tabela 4.4: Análise 4 cortes com variação de temperatura ambiente - Frigorífico Normal

### 4.1.3 Análise Alteração de Banda Morta (BM)

Efetuar-se três simulações de 1000 equipamentos do tipo, frigorífico normal, com uma percentagem de alterações de carga para carga de 5 %. Ambas foram de 1 dia com a temperatura média ambiente de 12 °C. Foram provocados alterações nos termostatos dos equipamentos. Na primeira simulação, BM Max, foi provocado um aumento de 1 °C no valor máximo da temperatura de referência no termostato. Na segunda, BM Min, foi provocado um aumento de 1 °C no valor mínimo. Na terceira, Desl BM, foi provocado um aumento de 1 °C nos valores mínimo e máximo da banda do termostato. Houve ainda uma quarta simulação para servir como referência ao estudo.

O objetivo principal destas simulações é verificar o consumo do equipamento quando ocorrem estas alterações.

<b>Tipo de Alteração</b>	<b>BM Max</b>	<b>BM Min</b>	<b>Desl BM</b>	<b>Referência</b>
<b>Consumo Médio (Wh)</b>	352,50	343,77	342,79	353,7
<b>Ponta (W)</b>	18,80	17,72	19,53	17,63
<b>Fator de Coincidência Médio</b>	0,145	0,142	0,141	0,144

Tabela 4.5: Análise Alteração de Banda Morta Refrigeração e Referência - Frigorífico Normal

Através da tabela (4.5) verifica-se que não diminuímos substancialmente o consumo ao alterar o valor máximo da temperatura do termostato (BM Max). O aumento da ponta neste caso também é perceptível pois, ao aumentar a temperatura máxima temos que retirar mais energia térmica durante um período de tempo maior para arrefecer o equipamento.

Quando alteramos a temperatura do termostato mínima (BM Min) obtém-se uma diminuição significativa do consumo e uma ponta relativamente idêntica à da referência. Conclui-se portanto que quando queremos alterar a BM, gama de temperaturas entre a máxima e a mínima do termostato, para obter menos perdas de energia, devemos alterar a temperatura mínima do termostato.

A situação que envolveu uma maior diferença em termos de consumo foi a Desl BM, embora seja semelhante ao valor obtido em BM Min.

## 4.2 Combinado

### 4.2.1 Variação de Temperatura

#### Análise 1 carga

Efetuarão-se quatro simulações de um combinado de 1 dia. Cada simulação foi efetuada a uma temperatura média ambiente diferente, 6 °C, 12 °C, 18 °C e 24°C. O objetivo é avaliar a variação do consumo com a variação da temperatura ambiente.

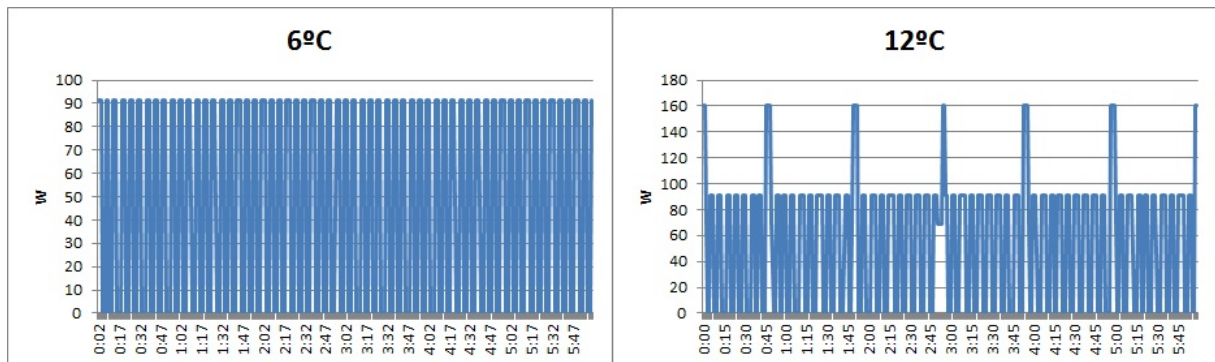


Figura 4.11: Potência (Azul) - Esquerda, Simulação com temperatura ambiente a 6°C. Direita, Simulação com temperatura ambiente a 12 °C

As figuras (4.11) e (4.12) representam o consumo do frigorífico normal nos quatro cenários. Verifica-se que com o aumento da temperatura ambiente o compressor do frigorífico começa também a trabalhar. Como a temperatura interior pedida ao combinado na zona de conservação é superior a 6 °C, no primeiro gráfico só se verifica o consumo do compressor do congelador.

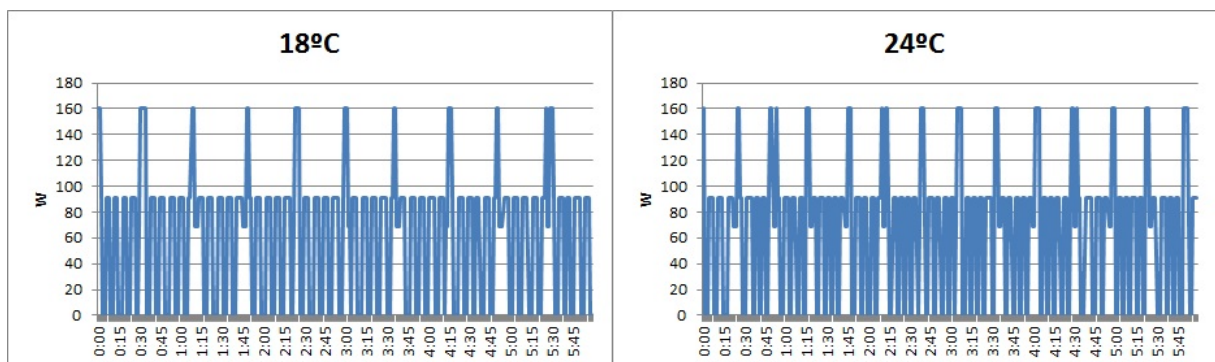


Figura 4.12: Potência (Azul) - Esquerda, Simulação com temperatura ambiente a 18°C. Direita, Simulação com temperatura ambiente a 24 °C

Verifica-se, na tabela (4.6), que o consumo aumenta com a temperatura ambiente em que este equipamento está localizado. A equação da reta de tendência é:  $y = 29,51 * x + 637,43$  W, sendo y o consumo e x a temperatura ambiente.

Temperatura Ambiente	6 °C	12 °C	18 °C	24 °C
Consumo Médio (Wh)	796,78	1013,61	1177,84	1332,32

Tabela 4.6: Análise Carga Única - Combinado

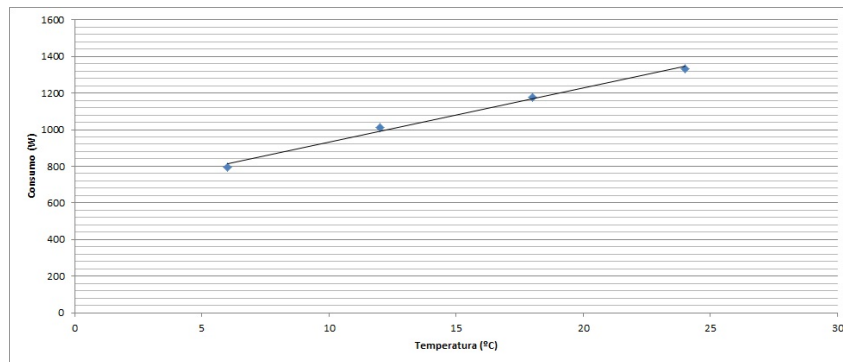


Figura 4.13: Linha de Tendência do Consumo em relação a Temperatura Exterior de um Combinado

## 4.2.2 Cortes

### Análise Mesma Temperatura Ambiente

Efetuar-se duas simulações de 1000 combinados, com uma percentagem de alterações de carga para carga de 5 %. Ambas foram de 1 dia com a temperatura média ambiente de 15 °C. Foram provocados 2 cortes de energia numa das simulações e 4 noutra, cada um de 15 minutos. Na primeira simulação, 2 cortes, foram provocados às 6 horas e 18 horas. No segundo, 4 cortes, foram provocados às 0 horas, 6 horas, 12 horas e 18 horas. Houve uma terceira simulação para servir como referência ao estudo.

O objetivo destas simulações é verificar o comportamento do fator de coincidência e a sua normalização (tempo de retoma). Também foi averiguado o consumo e a ponta máxima do diagrama.

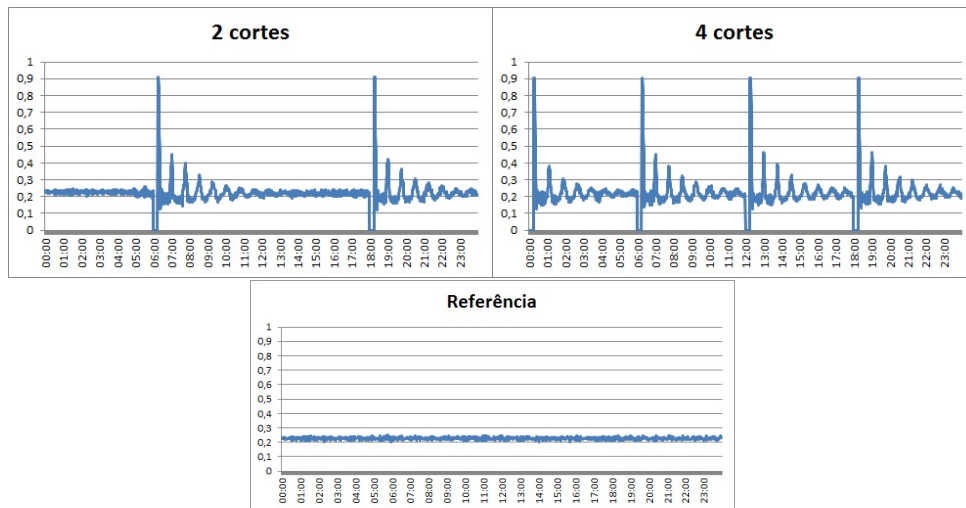


Figura 4.14: Fator de Coincidência (Azul) - Esquerda, Simulação com 2 cortes. Direita, Simulação com 4 cortes.

Verifica-se na figura (4.14) os cortes de energia provocados em ambos os casos.

Com a ajuda da tabela (4.7) podemos concluir que o consumo médio diminui com os cortes, pelo motivo já indicado anteriormente. A ponta máxima aumenta como esperado assim como a gama de valores do fator de coincidência.

Número de Cortes	4		2		Referência	
Consumo Médio (Wh)	1036,74		1042,20		1090,61	
Ponta (W)	160,49		160,72		45,01	
Fator de Coincidência Médio	0,220		0,221		0,228	
Gama de Valores Fator de Coincidência (Máx/Min)	0,906	0	0,913	0	0,256	0,203

Tabela 4.7: Análise Cortes a mesma Temperatura - Combinado

### 4.2.3 Análise Alteração de Banda Morta

Efetuarão-se três simulações de 1000 combinados, com uma percentagem de alterações de carga para carga de 5 %. Ambas foram de 1 dia com a temperatura média ambiente de 12 °C. Foram provocados alterações nos termostatos dos equipamentos. Na primeira simulação, BM Max, foi provocado um aumento de 1 °C no termostato máximo. Na segunda, BM Min, foi provocado um aumento de 1 °C no termostato mínimo. Na terceira, Desl BM, foi provocado

um aumento de 1 °C no termostato mínimo e máximo. Houve ainda uma quarta simulação para servir como referência ao estudo.

O objetivo principal destas simulações é verificar o consumo do equipamento quando ocorrem estas alterações.

<b>Tipo de Alteração</b>	BM Max Fr	BM Min Fr	Desl BM	Referência
<b>Consumo Médio (Wh)</b>	1162,59	1203,41	1164,54	1230,26
<b>Ponta (W)</b>	157,84	158,71	159,06	160,69
<b>Fator de Coincidência Médio</b>	0,296	0,302	0,279	0,30

Tabela 4.8: Análise Alteração de Banda Morta Refrigeração e Referência

As tabelas (4.8) e (4.9) representam a análise de alteração de Banda Morta.

<b>Tipo de Alteração</b>	BM Max Fz	BM Min Fz	Desl BM Fz	Desl BM 2
<b>Consumo Médio (Wh)</b>	1217,22	1115,98	1158,72	1130,22
<b>Ponta (W)</b>	159,90	159,01	160,04	158,30
<b>Fator de Coincidência Médio</b>	0,308	0,279	0,293	0,286

Tabela 4.9: Análise Alteração de Banda Morta Congelação e Controlo de Ambas as BM

Através da tabela (4.9) verifica-se que diminuámos o consumo ao alterar a temperatura do termostato máximo e mínimo do frigorífico do combinado.

Quando alteramos o termostato máximo do congelador o consumo aumenta, pois aquece mais e há mais calor para retirar do compartimento. Quando aumentamos o termostato mínimo, o congelador consome menos energia pois não necessita de baixar tanto a temperatura. A ponta do equipamento mantêm-se aproximadamente constante em todos testes.

## 4.3 Arca Frigorífica

### 4.3.1 Variação de Temperatura

#### Análise 1 Carga

Efetuarão-se quatro simulações de uma Arca Frigorífica de 1 dia. Cada simulação tinha uma temperatura média ambiente diferente, 6 °C, 12 °C, 18 °C e 24°C. O objetivo é avaliar a variação do consumo com a variação da temperatura ambiente.

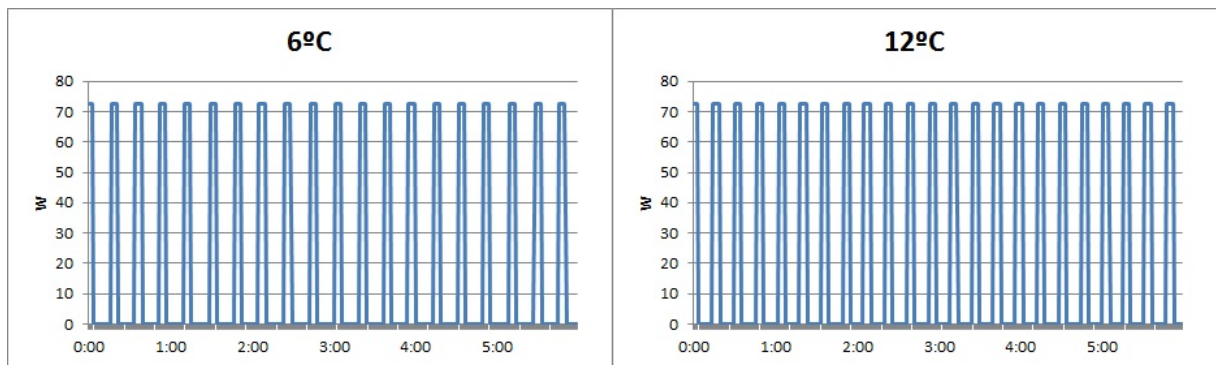


Figura 4.15: Potência (Azul) - Esquerda, Simulação com temperatura ambiente a 6°C. Direita, Simulação com temperatura ambiente a 12 °C

As figuras (4.15) e (4.16) representam o consumo do frigorífico normal nos quatro cenários.

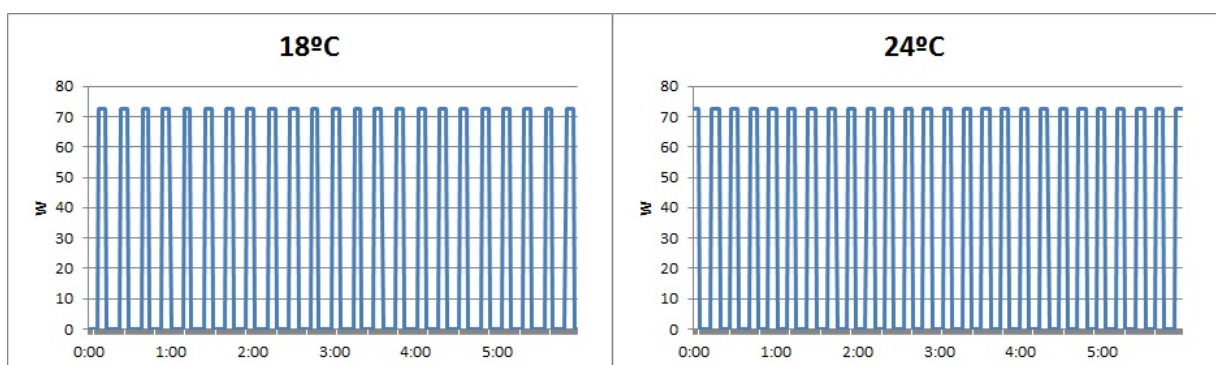


Figura 4.16: Potência (Azul) - Esquerda, Simulação com temperatura ambiente a 18°C. Direita, Simulação com temperatura ambiente a 24 °C

Verifica-se, na tabela (4.10), que o consumo aumenta com a temperatura ambiente em que este equipamento está localizado. A equação da reta de tendência é:  $y = 14,32 * x + 385,49$  W, sendo  $y$  o consumo e  $x$  a temperatura ambiente.

Temperatura Ambiente	6 °C	12 °C	18 °C	24 °C
Consumo Médio (Wh)	475,66	559,17	626,95	739,51

Tabela 4.10: Análise Carga Única - Arca Frigorífica

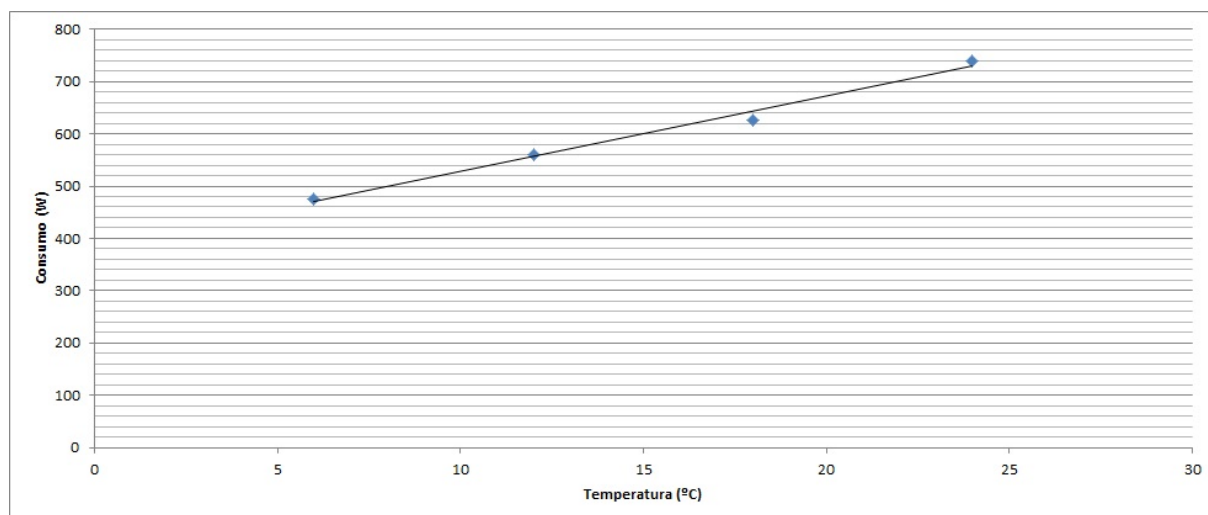


Figura 4.17: Linha de Tendência do Consumo em relação a Temperatura Exterior de uma Arca Frigorífica

#### Análise comparativa do impacto de cortes reais e simulados

Nesta análise vamos relacionar os dados com cortes de uma Arca Frigorífica num dado mês, tabela (4.11). Para isso foi escolhido um mês com elevado volume de dados recolhidos e com temperaturas médias próximas (21,87 °C). Efectuou-se uma simulação com 28 Arcas Frigoríficas com nenhuma alteração, equivalente aos dias dos dados recolhidos, com 4 cortes de 30 minutos, com o objetivo de comparar as simulações com as recolhas efetuadas com cortes. Esta análise reflete a validade do modelo desenvolvido.

	Recolhido	Simulado	Diferença %
<b>Consumo Médio (Wh)</b>	701,45	701,80	0,05
<b>Potência Média (W)</b>	33,39	33,42	0,09
<b>Fator de Coincidência Médio</b>	0,38	0,33	13,3

Tabela 4.11: Análise 4 cortes comparativa com recolhas. - Arca Frigorífica



# Capítulo 5

## Caso de Estudo

### 5.1 Subestação

É apresentado um estudo de caso que envolve a avaliação do impacto de ações de gestão da procura sobre cargas de frio alimentar doméstico no diagrama de carga de uma subestação de 60 MVA/15 kV com três transformadores de 20 MVA, que alimentam, através de 13 linhas, tabela (5.1), 229 postos de transformação de 15kV/230/400V, 63 dos quais pertencem a consumidores de Média Tensão (MT) e 166 são da rede pública de distribuição de energia elétrica e abastecem consumidores em Baixa Tensão (BT) e circuitos de iluminação pública.

A capacidade de alguns postos de transformação tem vindo a aumentar ao longo do tempo, de acordo com as necessidades, através da adição de um ou dois transformadores de capacidade adequada. Presentemente, alguns destes postos de transformação são de facto vários conjuntos de transformadores em paralelo.

A taxa de posse de combinados e frigoríficos é 1,05 [5] num total de 21428, enquanto que a das arcas frigoríficas é de 0,5, ou seja metade dos agregados familiares no nosso país têm uma arca frigorífica [5], num total de 10204 arcas.

Linhas	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12	L13
Número de Consumidores	126	3669	1800	2792	164	4	1578	1250	465	0	2802	2801	2957
Consumo (MWh)	280	8953	4380	7155	503	15	3033	2862	10173	0	9017	9753	8546

Tabela 5.1: Número de consumidores residenciais e consumo anual

A medida de gestão da procura que foi simulada foi a alteração da temperatura de referência nos termostatos dos equipamentos, com o objetivo de reduzir as pontas, figura (5.2). Para

isso foram parametrizados 12 linhas, retirou-se a linha 10 pois não tem nenhum consumidor residencial, com seis grupos cada. Os seis grupos de cada linha estão divididos em três grupos, dois de Combinados, dois de Frigoríficos Normais e dois de Arcas Frigoríficas.

Horas	18:00	18:15	18:30	18:45	19:00	19:15	19:30	19:45	20:00	20:15	20:30	20:45	21:00
Grupo 1		+2	+2	+2	+2	+2	+2	+2	+2				
Grupo 2				+2	+2	+2	+2	+2	+2	+2	+2		
Grupo 3	+2	+2	+2	+2	+2	+2	+2	+2					
Grupo 4					+2	+2	+2	+2	+2	+2	+2	+2	
Grupo 5						+2	+2	+2	+2	+2	+2	+2	+2
Grupo 6			+2	+2	+2	+2	+2	+2	+2	+2			

Tabela 5.2: Alteração da Temperatura do Termostato

A figura (5.1) tem por objetivo mostrar algumas diferenças entre o consumo real e o consumo simulado com alteração de BM

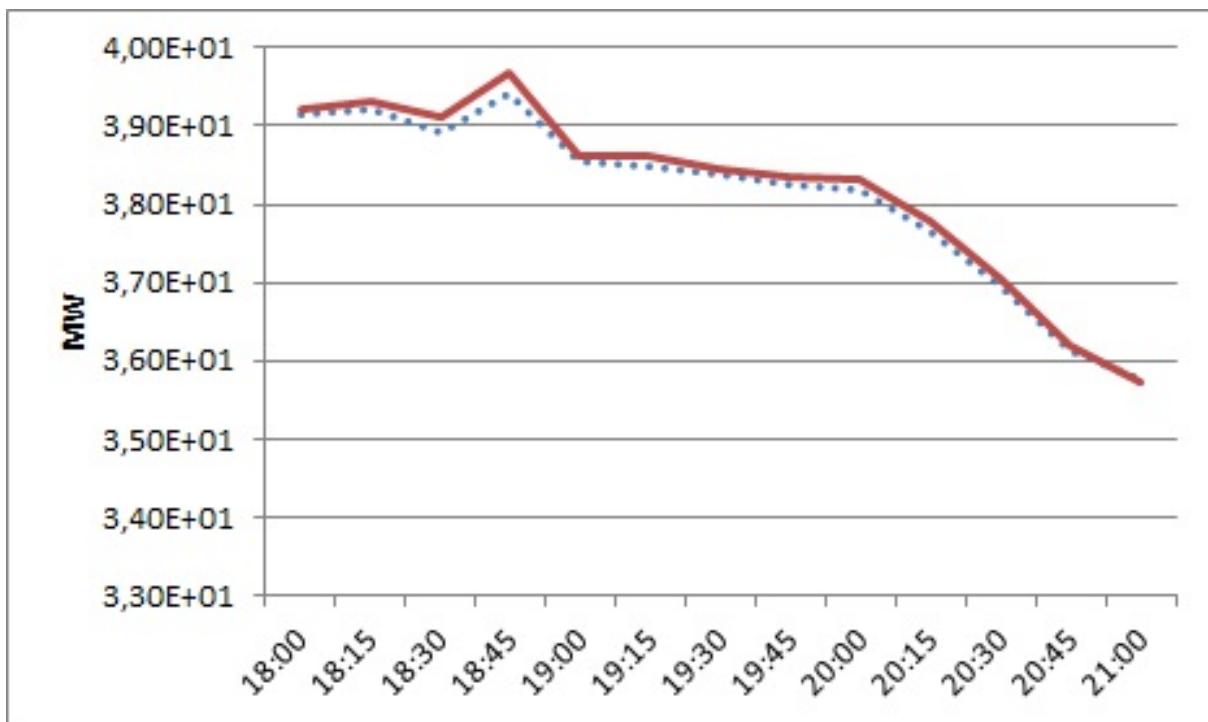


Figura 5.1: Zoom subestação com Alteração de Banda Morta - Consumo Real (Vermelho), Consumo simulado com Alteração de BM (Azul Tracejado)

A figura (5.2) representa a potência pedida a rede pelo conjunto de consumidores da subestação ao longo de um dia. A oscilação inicial verificada na figura é devido ao arranque do simulador.

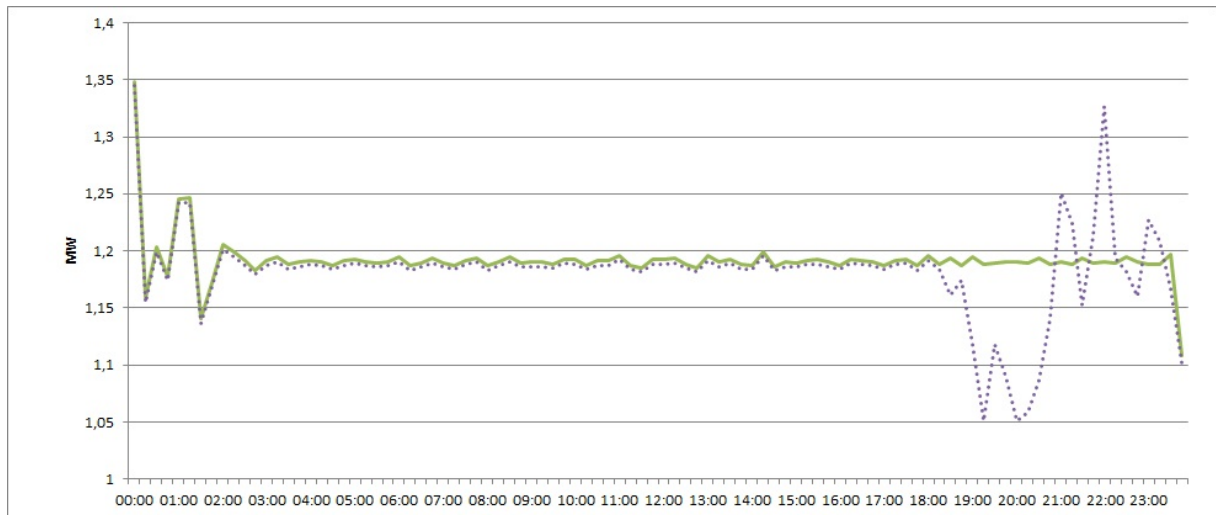


Figura 5.2: FAD Subestação - Simulado (Verde) e Simulado com Alteração de BM (Roxo Tracejado)

Através da tabela (5.3) verifica-se alterações consideráveis com a alteração de Banda Morta. Pode-se assim baixar a ponta 139 kW na hora de ponta.

Horas	18:00	18:15	18:30	18:45	19:00	19:15	19:30	19:45	20:00
Potência Real Subestação (MW)	39,22	39,33	39,12	39,67	38,62	38,62	38,46	38,35	38,32
Redução na Subestação %	0,16	0,31	0,53	0,62	0,20	0,36	0,19	0,26	0,36
Potência Real FAD (MW)	1,196	1,188	1,193	1,187	1,195	1,189	1,189	1,191	1,190
Redução FAD %	5,35	10,27	17,27	20,89	6,44	11,61	5,97	8,48	11,68

Tabela 5.3: Consumo FAD simulado e simulado com alteração de BM



## Capítulo 6

### Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste trabalho desenvolveu-se uma ferramenta capaz de reproduzir o funcionamento de um equipamento de FAD, tanto em funcionamento normal como na aplicação de ações de Gestão da Procura. Para tal, foi criado um modelo fisicamente baseado e validado experimentalmente, com o objetivo de avaliar os impactos de ações de gestão da procura, quer ao nível da potência (diagramas de carga) quer ao nível da qualidade do serviço fornecido. Este trabalho é crucial no desenvolvimento deste tipo de ações, pois permite a sua avaliação prévia, evitando assim impactos negativos da aplicação das mesmas. É de referir que as ações aqui apresentadas referem-se a um modelo de experimentação, pelo que, em desenvolvimentos futuros, o modelo implementado deverá ser usado em conjunto com algoritmos de otimização que permitem identificar as ações que melhor se adequam aos objetivos (por exemplo a minimização da ponta). É também de referir que o desenvolvimento tecnológico dos equipamentos de uso final de eletricidade, nomeadamente com a crescente utilização dos *Smart Thermostats* e com a crescente utilização das TIC nos sistemas de energia, ao permitirem uma rápida comunicação entre fornecedores e consumidores, constituem suportes para uma maior disseminação na prática das ações de gestão da procura, que terão como grande objetivo a utilização eficiente dos recursos (geração, transporte e distribuição, geração local e consumo adaptável).



## Bibliografia

- [1] Chardon, Alain, et al., *Demand Response- a decisive breakthrough for Europe*. 2008.
- [2] U.S. Department of Energy., *Benefits of Demand Response in Electricity Markets and Recommendations for Achieving Them*. United States : s.n., 2006.
- [3] Gellings, C. W. e Chamberlin, J. H. *Demand-side management: Concepts & Methods*. s.l. : The Fairmont Press, Inc., 1993.
- [4] *New Principles for Demand Response Planning*. s.l. : EPRI, Palo Alto, CA, March 2002. EP-P6035/C3047.
- [5] Almeida, Aníbal Traça. *REMODECE, FCTUC*. ISR - Universidade de Coimbra.
- [6] U.S. Department of Energy. *Benefits of Demand Response in Electricity Markets and Recommendations for Achieving Them*. February 2006.
- [7] Mesquita, N; *Resumo da teoria de refrigeração*. FEUP, Julho 2009
- [8] Princípio de Funcionamento da Bomba de Calor [Online] [Citação: 01 de 09 de 2013] <http://www.climaconforto.pt/>
- [9] Afonso, Clito; Castro, Manuel. *Air infiltration in domestic refrigerators: The influence of the magnetic seals conservation*. International Journal of Refrigeration 33 (2010), 856-867.
- [10] Stoecker, W. F.; Jones, J. W.. *Refrigeração e Ar Condicionado*. Tradução José M. Sainz Jabardo - [et al.]. - São Paulo : McGraw-Hill do Brasil, 1985, pp. 30.
- [11] Bejan, Adrian. *Transferência de Calor*. Tradução Eng.º Euryale de Jesus Zerbini e Eng.º Ricardo Santilli Ekman Simões. - São Paulo : Edgard Blucher Ltda, 1996.
- [12] Laguerre, O.; Flick, D.. *Heat transfer by natural convection in domestic refrigerators*. Journal of Food engineering 62 (2004) 79-88.
- [13] Martins, Isabel Cristina Branco. *Método simplificado de cálculo da potência térmica resultante de cargas térmicas de refrigeração de produtos em frigoríficos domésticos*. Relatório do projeto final do MIEM, FEUP, 2008.

- 
- [14] Cecchini, C., and D. Marchal; *A simulation model of refrigerating and airconditioning equipment based on experimental data*. ASHRAE Transactions, 1991.
- [15] A. Durmayaz, O.S. Sogut, B. Sahin, H. Yavuz; *Optimization of thermal systems based on finite-time thermodynamics and thermoeconomics*. Progress in Energy and Combustion Science 30 (2004) 175–217.
- [16] H.M. Nussenzveig; *Curso de Física Básica, vol.II –Fluídos; Oscilações e Ondas; Calor*. Editora Edgard-Blucher, 1986.
- [17] *IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants*, Red Book. IEEE Standard 141(TM)-1993.
- [18] Livengood, D. e Larson, R. *The Energy Box: Locally Automated Optimal Control of Residential Electricity Usage*. Service Science. 2009, Vol. 1, 1, pp. 1-16.