



# UNIVERSIDADE DE COIMBRA

**Faculdade de Ciências e Tecnologia**

Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores

André Filipe Rocha Marques

## Modelos para Simulação de Cargas e Avaliação do Potencial de Demand Response

Coimbra - Portugal

2012



**FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA E DE  
COMPUTADORES**

**FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA E DE  
COMPUTADORES – ESPECIALIZAÇÃO EM ENERGIA

# **Modelos para Simulação de Cargas e Avaliação do Potencial de Demand Response**

AUTORIA:

**André Filipe Rocha Marques**

ORIENTADORES

Professor Doutor Álvaro Filipe Peixoto Cardoso de Oliveira Gomes

Professor Doutor António Rui Almeida Figueiredo

PRESIDENTE DO JÚRI

Professor Doutor Pedro Manuel Gens de Azevedo de Matos Faia

VOGAL

Professora Doutora Rita Cristina Girão Coelho da Silva

Coimbra-Portugal

Janeiro de 2012





**Laboratório de Gestão de Energia**

**Ano Lectivo de 2011/2012**

Dissertação de Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

– Especialização em Energia –

# **Modelos para Simulação de Cargas e Avaliação do Potencial de Demand Response**

**Aluno:**

- André Filipe Rocha Marques

**Orientadores:**

- Prof. Doutor Álvaro Filipe Peixoto Cardoso de Oliveira Gomes

- Prof. Doutor António Rui Almeida Figueiredo



## Agradecimentos

Em primeiro lugar, o meu profundo agradecimento aos meus pais e irmãos pela oportunidade que me deram, pelos esforços e sacrifícios que passaram em prol do meu bem-estar, e pelo constante apoio, carinho e encorajamento

Um sincero agradecimento ao Professor Doutor Álvaro Gomes e ao Professor Doutor Rui Figueiredo pela disponibilidade, críticas, sugestões e conhecimentos transmitidos ao longo da orientação da dissertação.

A todos os meus amigos e colegas de curso, em especial ao Brunos Santos, Cristiano Alves, Henry Amaral, Jorge Martinho, Luís Fernandes, Luís Filipe e Marco Nunes, agradeço toda a amizade, desabafos, paciência, apoio e boa camaradagem que tiveram comigo e que me ajudou a percorrer todo este percurso académico que chega agora ao fim. Não poderia deixar de agradecer também à Alexandra Guedes e à Daniela Rainho pela ajuda prestada e constantes palavras de motivação.

Por fim, mas não em último lugar, agradeço a todos os companheiros e amigos do Laboratório de Gestão de Energia (LGE) pelo apoio, amizade e conhecimentos transmitidos que fizeram do LGE não só um local de trabalho mas também de grande camaradagem.

A todos, um **Muito Obrigado!**

## Resumo

O presente documento apresenta o trabalho desenvolvido no âmbito da Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, leccionada no Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, no ano lectivo 2011/2012.

O objectivo principal da presente dissertação é a identificação do potencial de *Demand Response* de cargas de aquecimento eléctrico de água e de frio alimentar no sector residencial. Para isso recorreu-se à avaliação dos possíveis impactos decorrentes da aplicação de acções de gestão da procura nesse tipo de cargas, quer a nível de cada carga individualmente quer ao nível agregado.

Por conseguinte, foi desenvolvida uma aplicação informática em ambiente *Matlab* que permite reproduzir quer o normal funcionamento das cargas em questão, quer o seu funcionamento quando são aplicadas acções de gestão da procura, permitindo avaliar os potenciais impactos de acções externas no consumo das cargas. No final são apresentados os resultados de um estudo de caso de forma a avaliar os impactos de diversas medidas de gestão da procura ao nível de uma subestação.

Os impactos da aplicação das medidas de gestão da procura em modelos de cargas de aquecimento eléctrico de água e de frio alimentar doméstico podem ser positivos ou negativos na operação da rede e, por isso, é de extrema importância a avaliação prévia dessas acções. Pelos casos de estudo analisados, nesta dissertação, verificou-se que ao aplicar acções de gestão da procura correctamente concebidas, é na maioria dos casos benéfico para os operadores de rede e para os consumidores. Para os consumidores, o principal benefício será a redução do valor da factura da energia eléctrica. Por sua vez, para os operadores de rede será uma redução da potência máxima nas horas de maior procura, com o consequente menor stress no sistema.

**Palavras-Chave:** aquecimento eléctrico de água, frio alimentar doméstico, gestão da procura, *Demand Response*, medidas de gestão da procura, modelos de cargas eléctricas.

## Abstract

The following document presents the work of a Master Thesis 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 2011/2012.

The main goal of this work is to identify the Demand Response potential of electrical heating loads of water and domestic cold storage in the residential sector.

A tool was developed in *MatLab* which allows the reproduction of loads behavior, with and without demand management actions, allowing the evaluation of potential impacts from external actions in energy absorption.

It is of great importance the previous assessment of these actions. It was verified that demand management actions, properly applied and designed could be, in the most of the cases, beneficent to network operators and consumers.

**Keywords:** electric heating water, domestic cold storage, demand management, Demand Response, demand management measures, electrical load models.



## Índice

Lista de Figuras .....	vi
Lista de Tabelas.....	viii
Lista de Abreviaturas .....	ix
1. Introdução.....	1
1.1 Organização da Dissertação.....	2
2. Gestão da Procura.....	2
2.2. Benefícios.....	7
3. Consumo de energia eléctrica no sector residencial.....	7
4. Aquecimento eléctrico de água .....	8
4.1. Modelo de carga fisicamente baseado.....	9
5. Frio Alimentar Doméstico.....	12
5.1. Modelo Fisicamente Baseado.....	15
5.1.1. Determinação do Coeficiente global de transferência de calor e do COP .....	17
5.1.2. Validação do modelo Equipamento de frio (Arca) .....	21
5.1.2.1. <i>Análise de resultados primeiro intervalo</i> .....	21
6. Modelos de cargas de Aquecimento eléctrico de Água e Frio Alimentar Doméstico .....	23
6.1. Método Monte Carlo .....	23
6.2. Modelo de carga individual .....	24
6.2.1. Dados de Entrada .....	26
6.2.2. Parâmetros aleatórios .....	26
6.2.3. Dados de Saída .....	27
6.3. Modelo de Carga Agregada.....	28
6.3.1. Aquecimento Eléctrico de Água/Frio Alimentar Doméstico .....	28
7. Caso de Estudo .....	30

7.1.	Caso de Estudo A .....	31
7.1.1.	Aquecimento Eléctrico de Água .....	31
7.1.2.	Frio Alimentar Doméstico.....	37
7.2.	Caso de Estudo B.....	41
7.2.1.	Aquecimento eléctrico de água .....	42
7.2.2.	Frio Alimentar Doméstico.....	45
8.	Conclusão .....	48
9.	Bibliografia.....	50
10.	Anexos.....	52
A.	Figuras referentes aos cenários do caso de estudo A de AEA.....	52
B.	Dados utilizados na determinação do coeficiente global de transferência de calor ..	54
C.	Cenário de variações de banda morta para AEA.....	55
D.	Cenários de variações de banda morta para FAD.....	58
E.	Cenários de cortes de alimentação para AEA e FAD.....	62

## Lista de Figuras

Figura 1- Corte de pontas [5] .....	3
Figura 2- Enchimento dos vales [5] .....	3
Figura 3- Desvio de Consumos [5] .....	3
Figura 4- Eficiência Energética [5] .....	3
Figura 5 - Aumento do Consumo [5] .....	4
Figura 6-Diagrama Flexível [5].....	4
Figura 7- Impacto temporal dos programas de DR [2] .....	6
Figura 8-Repartição dos consumos de electricidade pelos diferentes usos finais no ano de 2002 [6] .....	8
Figura 9-Modelo do termóstato de um equipamento de AEA .....	12
Figura 10-Ciclo de Carnot [15]. .....	13
Figura 11- Esquema Frigorífico Doméstico [16]. .....	13
Figura 12-Perfil de funcionamento típico de um equipamento de frio [6].....	14
Figura 13-Intervalos considerados para a determinação da condutividade térmica.....	17
Figura 14-Esquema da parede do equipamento de frio [17]. .....	19
Figura 15-Comparação entre os resultados simulados e experimentais (1º intervalo).....	21
Figura 16- Comparação entre os resultados simulados e experimentais (2º intervalo).....	22
Figura 17-Comparação entre os resultados simulados e experimentais(3º intervalo).....	23
Figura 18-Fluxos de dados do Modelo Carga Individual.....	25
Figura 19- Fluxos de dados do Modelo Carga Agregado .....	28
Figura 20- Variação da procura e da temperatura ao longo do dia (cenário 1).....	32
Figura 21-Variação da procura e da temperatura ao longo do dia (cenário 2).....	33
Figura 22-Variação da procura e da temperatura ao longo do dia com extracção de água quente .....	35
Figura 23-Variação da procura e da temperatura ao longo do dia com CA.....	36
Figura 24 - Variação da procura e da temperatura ao longo do dia com VBM .....	37
Figura 25-Variação da temperatura e da potência eléctrica num intervalo de tempo sem cortes de alimentação.....	39
Figura 26-Variação da temperatura e da potência eléctrica num intervalo de tempo com tempo de corte de 5 minutos e tempo de não corte de 10 minutos .....	40
Figura 27-Diagrama de Carga inicial .....	41
Figura 28 - Diagrama de carga relativo à simulação sem medidas de GP para o AEA.....	42

Figura 29 - Diagrama de carga relativo à simulação sem medidas de GP para o FAD ..... 46

## Lista de Tabelas

Tabela 1-Benefícios Demand Response [2] .....	7
Tabela 2-Resumo da determinação do Coef. Transferência .....	18
Tabela 3-Dados sobre o espaço condicionado do equipamento.....	19
Tabela 4-Resumo da detreminação do COP .....	20
Tabela 5-Dados recolhidos experimentalmente para o 1º intervalo.....	21
Tabela 6-Dados recolhidos experimentalmente para o 2º intervalo.....	22
Tabela 7-Dados recolhidos experimentalmente para o 3º intervalo.....	22
Tabela 8- Parâmetros Aleatórios nas simulações de MC para a mesma carga .....	27
Tabela 9-Parâmetros Aleatórios nas simulações de MC para a mesma carga .....	27
Tabela 10-Dados de saída para os modelos AEA e FAD .....	27
Tabela 11-Novos dados de entrada .....	29
Tabela 12-Dados de saída modelo agregado .....	29
Tabela 13- Parametrização usada para análise de sensibilidade .....	31
Tabela 14- Caracterização dos diferentes cenários .....	32
Tabela 15-Resultados obtidos após simulação dos diversos cenários.....	33
Tabela 16-Parametrização dos consumos de água quente .....	34
Tabela 17-Parametrização do equipamento .....	37
Tabela 18-Caracterização dos cenários .....	38
Tabela 19-Resultados obtidos após simulação dos cenários .....	38
Tabela 20- Descrição dos grupos constituintes do caso de estudo.....	42
Tabela 21-Energia, máximo de potência do DC, lucro e factor de perdas.....	43
Tabela 22 - Comparação entre os diversos cenários de cortes .....	43
Tabela 23-Número total de minutos e máximo intervalo ao aplicar os cenários de CA.....	43
Tabela 24 - Comparação entre os diversos cenários de VBM .....	44
Tabela 25 - Número total de minutos e máximo intervalo ao aplicar os cenários de VBM ....	45
Tabela 26- Descrição dos grupos de cargas constituintes do caso de estudo.....	45
Tabela 27 - Energia, máximo de potência do DC, lucro e factor de perdas.....	46
Tabela 28 - Comparação entre os diversos cenários de cortes .....	46
Tabela 29 - Número total de minutos e máximo intervalo ao aplicar os cenários de CA.....	47
Tabela 30 - Comparação entre os diversos cenários de VBM .....	47
Tabela 31 - Número total de minutos e máximo intervalo ao aplicar os cenários de VBM ....	48

## Lista de Abreviaturas

<b>Abreviatura</b>	<b>Descrição</b>
AEA	Aquecimento Eléctrico de Água
CA	Cortes de Alimentação
COP	<i>Coefficient Of Performance</i>
DC	Diagrama de Carga
DR	<i>Demand Response</i>
FAD	Frio Alimentar Doméstico
GP	Gestão da Procura
MC	Monte Carlo
RTP	<i>Real Time Pricing</i>
SE	Subestação
TOU	<i>Time Of Use</i>
VBM	Variação de Banda Morta



## 1. Introdução

O preço da energia eléctrica tem vindo a aumentar ao longo dos tempos. Os factores que têm contribuído para esse aumento são vários, sejam o custo da matéria-prima, as questões geopolíticas e até os investimentos feitos para mitigar os impactos ambientais provocados pela utilização das fontes primárias. Embora grande parte da produção existente seja feita ainda através dos recursos naturais não renováveis, existe uma grande pressão à inclusão das fontes renováveis ou com baixa emissão de dióxido de carbono [1].

Tradicionalmente os sistemas de energia eléctrica têm sido concebidos no sentido de adaptar a oferta à procura, efectuando-se grandes investimentos na construção de novas centrais de geração para satisfazer o aumento do consumo e em particular da ponta. Esta forma de actuação, não tira partido dos recursos existentes do lado da procura e obriga a pesados encargos financeiros tanto para operadores de sistema como consumidores, para uma capacidade de geração/transporte/distribuição/transformação que na melhor das hipóteses será utilizada algumas horas por ano [1]. Uma forma de mitigar esta situação passa por gerir o consumo de energia de maneira a que o diagrama de carga não seja tão irregular. Isto consegue-se, por exemplo, com desvios de consumo de horas de maior procura (ponta) para as horas de menor procura (vazio), ou com outras medidas que promovam a eficiência energética. Ou seja, quer medidas de gestão das cargas, onde o objectivo é gerir o consumo da forma mais adequada, quer as medidas de eficiência energética que visam a utilização de menos energia para o mesmo nível do serviço prestado, são à partida boas estratégias.

Estas duas medidas são estratégias de gestão da procura (GP) e têm como objectivo: racionalizar e diminuir os consumos [2].

Existe também um grande esforço para a inclusão das energias renováveis solar e eólica. Na Europa este tipo de geração de energia eléctrica tem ganho ao longo do tempo uma grande importância. Todavia, este tipo de geração tem características, nomeadamente a intermitência da eólica, que exigem a existência de repostas rápidas do restante sistema electroprodutor. Também nesta questão da incorporação das renováveis, as medidas de GP podem ser uma mais-valia para a gestão do sistema de energia eléctrica, permitindo uma melhor e maior integração das energias renováveis, podendo passar-se para uma situação de alguma adequação da procura à oferta ou como ferramenta para responder à variabilidade das renováveis [3].



Antes de implementar qualquer medida de GP é necessário prever os seus impactos, quer em termos económicos, quer em termos de consumos de energia e de alteração do nível de potência. Para tal recorre-se a ferramentas capazes de simular situações reais e analisar os respectivos resultados. Este trabalho visa a criação de ferramentas de simulação que permitam simular os impactos das medidas de GP a aplicar a cargas de aquecimento eléctrico de água (AEA) e frio alimentar doméstico (FAD).

## 1.1 Organização da Dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 8 capítulos sendo o presente o primeiro. No capítulo 2 apresentam-se alguns conceitos de introdução teórica ao tema, abordando o conceito de DR (Demand Response) e sua utilidade nos sistemas actuais de energia eléctrica. No capítulo 3 é feita uma caracterização da utilização de energia eléctrica do sector residencial, apresentando-se os principais consumos por habitação. Os capítulos 4 e 5 apresentam os modelos fisicamente baseados para cada uma das cargas em estudo. No capítulo 6 é feita uma caracterização dos modelos individuais e agregados, apresentando-se no capítulo 7 alguns casos de estudo. No capítulo 8, são apresentadas as conclusões do trabalho desenvolvido bem como sugestões de trabalhos a realizar no futuro.

## 2. Gestão da Procura

As questões relacionadas com a eficiência energética e gestão da procura, começaram a ter uma grande importância a partir da década de 70 devido às crises energéticas. Procurava-se, por um lado, diminuir as necessidades de incorporação energética para a obtenção do serviço de energia desejado e, por outro lado, aligeirar as necessidades galopantes de investimento nos sistemas de energia eléctrica que o normal desenvolvimento das sociedades acarretava. A este conjunto de actividades chamou-se gestão do lado da procura (Demand-Side Management, na terminologia anglo-saxónica) e incluía medidas de gestão de carga e de eficiência energética. Em termos de sistemas de energia eléctrica, os objectivos da gestão do lado da procura são os que se apresentam a seguir. Os três primeiros correspondem àquilo que se chama gestão de cargas [4].

- Corte de pontas - Representado na Figura 1. Normalmente obtido através do controlo directo de cargas do consumidor ou através de estímulos tarifários adequados. Este objectivo pode ser conseguido à do desligar por breves instantes de cargas termostáticas (ar condicionado, equipamentos de frio doméstico, termoacumuladores).

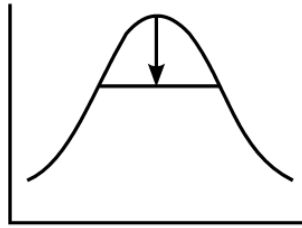


Figura 1- Corte de pontas [5]

- Enchimento dos vales - Representado na Figura 2. Esta gestão é feita essencialmente através de incentivos financeiros, estimulando o uso de energia eléctrica nos períodos de vazio. Por exemplo, a utilização de sistemas de armazenamento térmico para aquecimento ambiente.

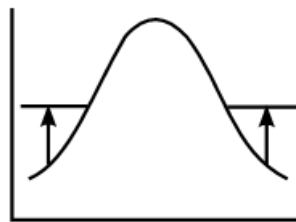


Figura 2- Enchimento dos vales [5]

- Desvio de Consumos - Representado na Figura 2Figura 3. Usualmente obtido através de tarifas variáveis ao longo do dia e/ou com recurso a dispositivos de armazenamento térmico (por exemplo AEA,FAD).

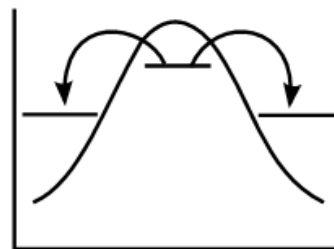


Figura 3- Desvio de Consumos [5]

- Eficiência Energética - Representada na Figura 4. Incentivos a novos hábitos de consumo e à aquisição de equipamentos mais eficientes.

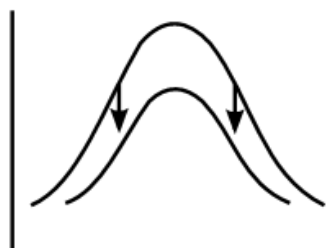


Figura 4- Eficiência Energética [5]

- Aumento de consumo – Representado na Figura 5. Procura estimular novas utilizações para a energia eléctrica, conquistando porventura mercado a outros combustíveis, através da promoção de equipamento eficiente.

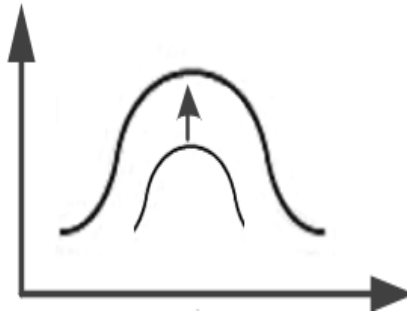


Figura 5 - Aumento do Consumo [5]

- Diagrama Flexível – Representado na Figura 6. Obtém-se com estímulos tarifários adequados.

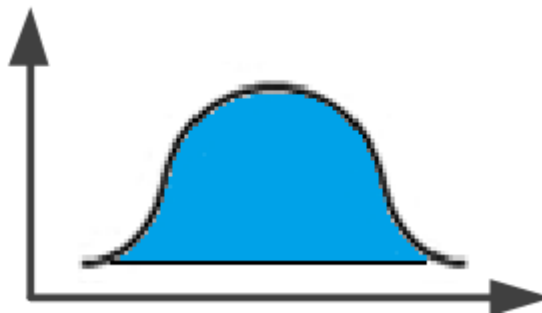


Figura 6-Diagrama Flexível [5]

Este tipo de programas é normalmente aplicado não só devido a questões económicas, mas também à potencial contribuição à redução das emissões, preservação dos recursos e questões de fiabilidade [5].

O DR enquadra-se nos três primeiros objectivos, procura obter mudanças no uso de energia eléctrica por parte dos consumidores finais em resposta às mudanças de preço da electricidade ao longo do tempo ou ao pagamento de incentivos financeiros por forma a persuadir a uma menor utilização da energia em alturas de pico contribuindo também para o aumento da fiabilidade do sistema [2]. Essa alteração pode ser efectuada através dos desvios de cargas para outros períodos, pela interrupção do funcionamento de cargas ou pela alteração de parâmetros que definem o funcionamento de algumas cargas termostáticas, por exemplo através da alteração dos valores de referência do termóstato [5].

O interesse do DR é possibilitar uma participação muito mais activa do consumidor em programas de gestão do lado da procura, através de um conjunto de diversos incentivos ou a uma maior consciencialização ou sentido de responsabilidade por parte do consumidor. A procura deixa de ser vista como uma coisa estática que tem que ser servida e passa a ser vista como parcialmente controlável, permitindo uma gestão mais eficiente de todos os recursos existentes no sistema de energia eléctrica.

Os programas de DR podem ser divididos em duas categorias:

- Programas baseados em preços variáveis com a hora do dia
- Programas baseados em incentivos ou de emergência

Nos programas baseados nos preços variáveis os estímulos são dados directamente pelos sistemas tarifários, para que os consumidores alterem dentro do possível os seus padrões de consumo de forma a tirar partido da variação dos preços [2].

Nos vários programas com tarifas variáveis destacam-se três: *Time Of Use* (TOU), *Real Time Pricing* (RTP) e *Critical Peak Price* (CPP). A TOU refere variações diárias e sazonais nos custos da energia eléctrica, são fixadas com meses de antecedência. Na RTP os preços oscilam horariamente, sendo estes preços conhecidos com dias de antecedência ou quase em tempo real. Por fim, a CPP, pode ser considerada do tipo TOU mas com um aumento significativo do preço nos intervalos críticos do dia [2].

A grande diversidade de programas, obriga que a sua utilidade seja avaliada a diferentes escalas de tempo de acordo com cada tipo de programa (Figura 7).

Alguns desses programas têm impacto directo na forma do consumo, que ocorre quando uma acção altera o normal funcionamento das cargas (controlo directo de cargas) e que podem ser usados para questões de fiabilidade do sistema de energia eléctrica, estando disponíveis apenas em curtos intervalos de tempo. Existem outros cujos impactos são sentidos a mais longo prazo (programas de promoção da eficiência energética). Nestes casos este impacto já depende em grande parte da consciencialização dos consumidores, da política, regulamentação e estímulos em cada país [1].

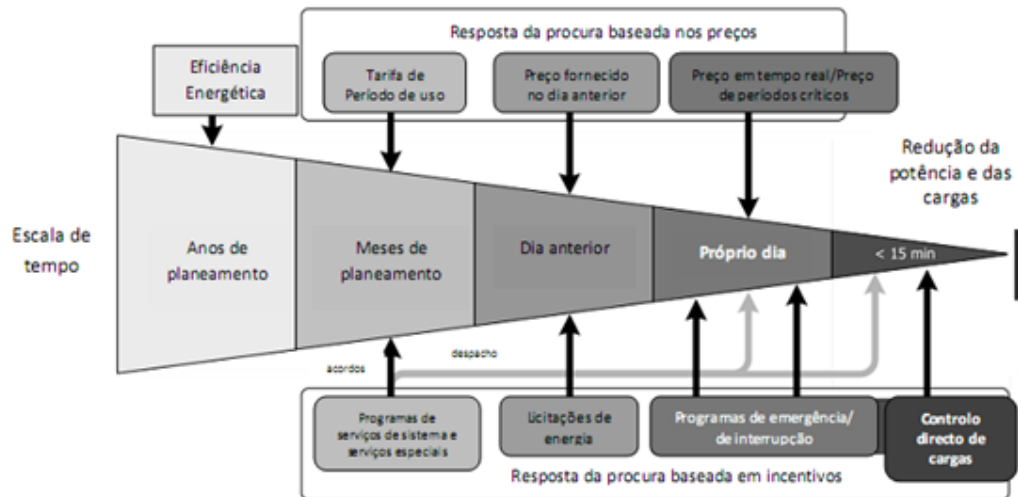


Figura 7- Impacto temporal dos programas de DR [2]

## 2.2. Benefícios

Os benefícios podem ser caracterizados e agrupados em três categorias distintas: directos, colaterais e de outro tipo (Tabela 1). Os benefícios directos são contabilizados pelos consumidores que actuam e participam em medidas de GP e os colaterais são aqueles em que os consumidores não participam directamente mas beneficiam com a acção dos outros. Os benefícios directos e colaterais podem ser qualificados em termos monetários, quanto aos outros essa quantificação é mais difícil [2].

**Tabela 1-Benefícios Demand Response [2]**

Tipo de Benefício	Destinatário	Benefício		Descrição
Directo	Consumidores que realizam medidas de DR	Benefícios Financeiros		Redução da factura Pagamento de incentivos
		Benefícios de confiabilidade		Diminuição da exposição a interrupções forçadas Oportunidade para auxiliar na redução do risco de apagões
Colateral	Alguns ou todos os consumidores	Impactos no mercado	Curto Prazo	Custo-benefício reduz os custos/preços marginais durante os eventos; Impactos sobre os requisitos de capacidade.
			Longo Prazo	Evita os custos de capacidade; Evita melhorias nas infra-estruturas de transporte e distribuição.
		Benefícios de confiabilidade		Redução do risco e consequência de interrupções forçadas; Recursos diversificados disponíveis para manter a confiabilidade do sistema.
Outros	Alguns ou todos os consumidores e operadores do sistema independentes	Mercado retalhista mais robusto		Opções baseadas no mercado oferecem oportunidades para a inovação na competitividade do mercado de retalho
		Benefícios de desempenho de mercado		Procura elástica reduz a capacidade de poder de mercado; Futuramente DR impede o poder de mercado
		Possíveis benefícios ambientais		Reduções das emissões num sistema com elevado número de centrais de geração poluentes.
		Independência energética/ Segurança		Recursos locais reduzem a dependência com os mercados exteriores

## 3. Consumo de energia eléctrica no sector residencial

O sector residencial é responsável por cerca de 16% do consumo energético em Portugal, constituído por uma grande diversidade de cargas torna-se importante realizar uma caracterização detalhada dos diversos usos finais, a começar pela sua contribuição para o consumo do sector, potências envolvidas, regimes de funcionamento típicos, restrições técnicas e/ou outras, nomeadamente relacionadas com eventuais preferências do consumidor [5] [6].

Na Figura 8 estão representados os consumos desagregados pelas diferentes cargas constituintes do sector residencial.

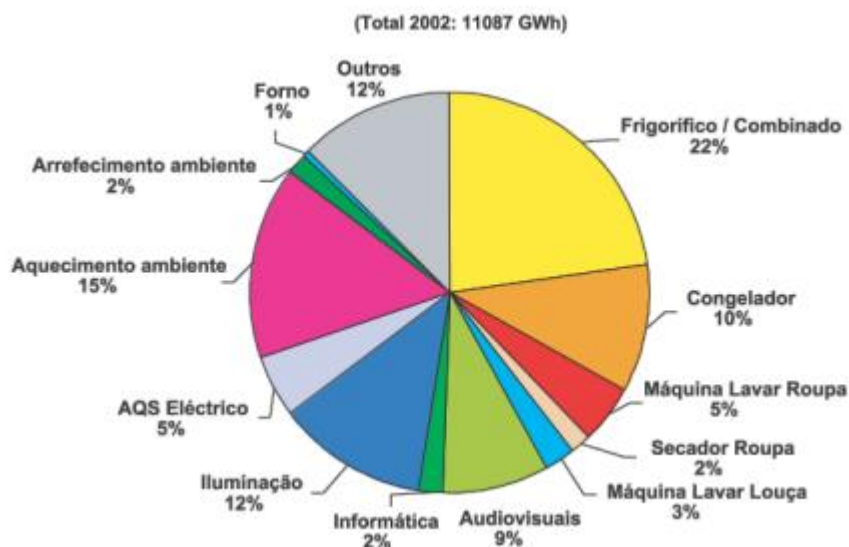


Figura 8-Repartição dos consumos de electricidade pelos diferentes usos finais no ano de 2002 [6]

Na Figura 8 pode observar-se que existem vários usos finais que podem ser alvos de medidas de gestão da procura. Neste trabalho serão apenas abordadas as cargas de AEA e FAD. Este conjunto de cargas perfaz cerca de 37%, do consumo residencial. Estas cargas têm um grande potencial para acções de gestão da procura, uma vez que possuem uma flexibilidade de controlo bastante elevada.

A repartição de consumos apresentada na Figura 8 tem vindo a alterar-se sobretudo devido ao aumento do número de equipamentos nas residências, existindo em alguns casos até a sua duplicação (televisões, equipamentos de frio). No entanto não é só o aumento de equipamentos que faz variar a repartição de consumos, há também uma grande influência dos hábitos de utilização por parte dos consumidores residenciais.

#### 4. Aquecimento eléctrico de água

As cargas de AEA têm sido um foco de diversos estudos em que são vistos como dispositivos de armazenamento que podem ser usados na redução de carga em períodos de maior procura ou como resposta a acções de emergência, através do seu controlo directo [7].

A Figura 8 mostra que 5% do consumo energético é devido a equipamento de AEA, uma melhor mais eficiente utilização desses equipamentos será muito importante para a redução dos custos de energia. Uma das formas de alterar/optimizar a utilização deste tipo de cargas passa por alterar o regime de funcionamento e/ou a parametrização. Este tipo de medidas pode

ter impactos negativos aquando do restabelecimento de alimentação às cargas, uma vez que a potência pedida à rede será por um conjunto destas cargas poderá ser mais elevada do que seria se não tivesse sido controlada. É o chamado efeito de payback, que ocorre devido à diminuição do factor de diversidade no funcionamento das cargas. Para colmatar essa situação será necessário efectuar uma análise prévia do impacto das medidas a efectuar.

#### 4.1. Modelo de carga fisicamente baseado

A necessidade de avaliar as diversas acções de gestão que as cargas de AEA podem ser alvo levou ao desenvolvimento de modelos que permitem simular o seu comportamento em termos de potência pedida à rede. Para se poderem avaliar os impactos de acções de controlo é necessário que os modelos permitam reproduzir o funcionamento das cargas sem e com acções de controlo aplicadas. Para tal, uma das abordagens é o recurso aos chamados modelos fisicamente baseados, que mais não são do que modelos que procuram reproduzir os fenómenos físicos (trocas de calor) que se verificam neste tipo de cargas. Precisa-se, pois conhecer as trocas de calor entre o elemento resistivo e a água. Sabe-se que para elevar a temperatura de um fluido com massa  $M$  é necessária energia [8]:

$$Q = M \times C_p \times \Delta T \quad (1)$$

onde,

$Q$  – quantidade de energia transmitida ao fluido [ $J$ ]

$M$  – massa de água [ $Kg$ ]

$C_p$  – calor específico da água  $\left[\frac{J}{Kg^{\circ}C}\right]$

$\Delta T$  – elevação de temperatura desejada [ $^{\circ}C$ ]

No entanto não é só nesta situação em que é necessário fornecer energia à água. A outra razão pela qual é necessário fornecer energia é para manter a água quente num intervalo de tempo suprimindo assim o efeito de perdas. Estas perdas são representadas pela expressão [8]:

$$P_{Perdas}(t) = A \times U \times (temp_{\acute{a}gua}(t) - temp_{ambiente}(t)) \quad [W] \quad (2)$$

onde,

$P_{Perdas}(t)$  – perdas por unidade de tempo [ $W$ ]



$A$  – área da envolvente do depósito [ $m^2$ ]

$U$  – coeficiente de transmissão térmica [ $\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ ]

Assim, a energia disponível num intervalo de tempo para aquecer a água é [8]:

$$Q(t) = P_R(t) \times \Delta t - P_{Perdas}(t) \times \Delta t \quad (3)$$

onde,

$P_R$  – é a potência da elemento resistivo [ $W$ ]

Partindo do princípio que se está a lidar com massas de água relativamente pequenas e no caso de apenas um elemento resistivo no fundo do depósito considera-se, que a temperatura da água no interior do depósito é uniforme. No caso de consumo de água quente a temperatura de mistura será dada por:

$$T_{\acute{a}gua}(t) = \frac{M - m(t)}{M} \times T_{quente}(t) + \frac{m(t)}{M} \times T_{fria}(t) \quad (4)$$

onde,

$m$  – quantidade de água consumida [ $Kg$ ]

Através das equações (3) e (4) observa-se que a temperatura da água é dada por:

$$T_{\acute{a}gua}(t + \Delta t) = T_{\acute{a}gua}(t) + \frac{P_R(t) - P_{Perdas}(t)}{M \times C_p} \times \Delta t \quad (5)$$

O controlo do termoacumulador será feito através de um termóstato, que tem normalmente um comportamento binário  $V_p(t)$ : 0 para quando está desligado e 1 para quando está ligado.

O funcionamento do termoacumulador é descrito pela equação:

$$T_{\acute{a}gua}(t + \Delta t) = T_{\acute{a}gua}(t) + \frac{P_R(t) \times V_b(t) - P_{Perdas}(t)}{M \times C_p} \times \Delta t \quad (6)$$

onde,

$V_b(t) = 1$  se  $T_{\acute{a}gua} < T_{term\acute{o}stato}$

$V_b(t) = 0$  se  $T_{\acute{a}gua} > T_{term\acute{o}stato}$

No modelo o consumo é parametrizado com resolução de uma hora. No entanto no interior do modelo esse consumo é igualmente dividido pelos 60 minutos. A temperatura desejada é considerada constante ao longo do dia.

O modelo apresentado anteriormente foi implementado e validado em [8]. Neste trabalho o modelo foi reimplementado com o objectivo de ser utilizado no estudo das acções de GP, nomeadamente acções que visam modificar o funcionamento das cargas através da alteração da temperatura de referência do termóstato.

O pseudo-código do modelo é o seguinte:

**-Se Inicio**

**-Se Temperatura Inicial  $\leq$  Banda Morta Inferior**

-Resistência ligada

**-Senão**

-Resistência desligado

**-Fim**

**-Senão**

**-Se Temperatura Actual  $\leq$  (Banda Morta superior se a temperatura está a subir ou Banda Morta inferior se a temperatura está a descer)**

-Resistência ligado

**-Senão**

-Resistência desligado

**-Fim**

**-Fim**

Além do modelo funcional descrito anteriormente existe também o modelo funcional do termóstato, que determina o padrão de consumos do equipamento. O modelo do termóstato está representado na Figura 9.

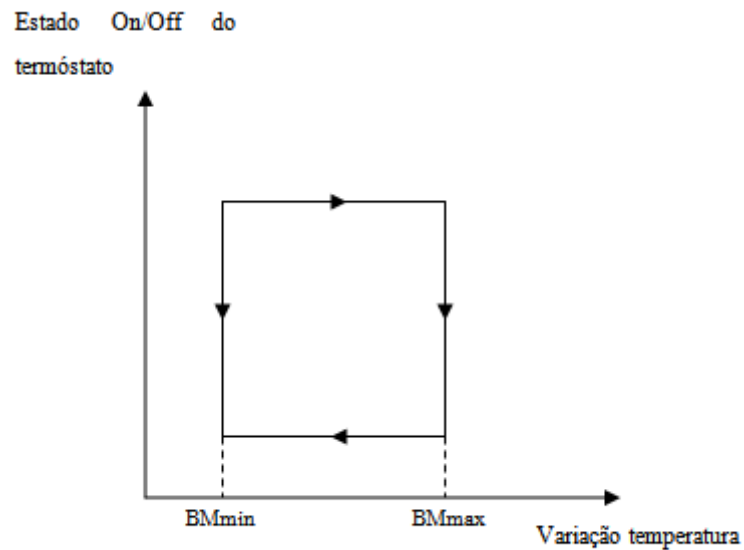


Figura 9-Modelo do termóstato de um equipamento de AEA

## 5. Frio Alimentar Doméstico

Há muitos anos que o mundo se depara com o problema da conservação dos alimentos. Durante muito tempo foi utilizado sal para tentar essa conservação, no entanto este processo revelou-se ineficaz. Entretanto com o avanço da ciência chegou-se à conclusão que a conservação dos alimentos poderia ser feita através do frio.

Quando se fala em equipamentos capazes de produzir frio mecanicamente normalmente, referem-se conceitos e aplicações que envolvem transferência de calor. Quem começou por estudar mais a fundo estes assuntos foi o físico francês Sadi Carnot, que em 1824, publicou um texto que continha relações entre a máquina de Carnot, o ciclo de Carnot e a potência motriz [9]. A máquina de Carnot é uma máquina ideal que utiliza calor para realizar trabalho. Uma máquina de Carnot é o procedimento mais eficaz para produzir trabalho a partir de dois focos de temperatura.

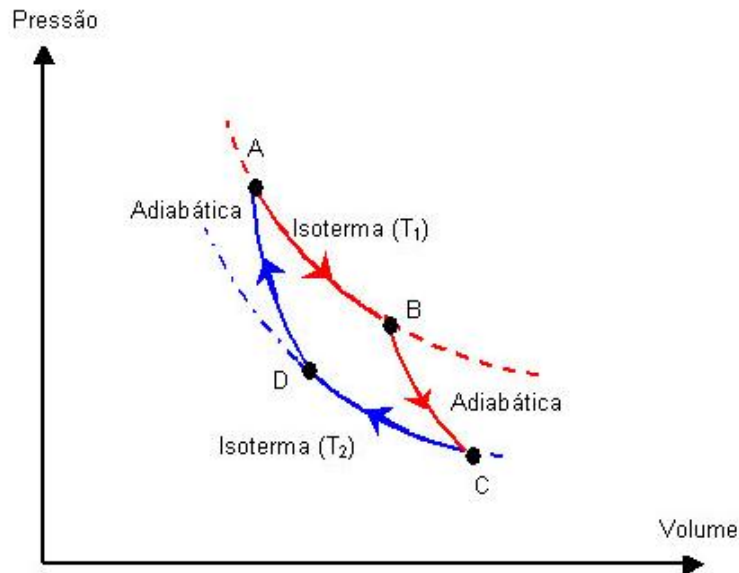


Figura 10-Ciclo de Carnot [15].

Na Figura 10 está representado o ciclo de Carnot um dos ciclos mais importantes da termodinâmica e que demonstra que o maior rendimento de uma máquina térmica é atingido através do uso de duas transformações adiabáticas e duas transformações isotérmicas, alternadas entre si.

Sabe-se que o calor flui normalmente na direcção das temperaturas inferiores, no caso dos equipamento de frio o que se pretende é retirar calor do interior para o exterior, ou seja, transferir calor de um fluido a mais baixa temperatura para um fluido a mais alta temperatura, isto só é possível recorrendo ao fornecimento de trabalho exterior ao que se dá o nome de Ciclo de Carnot Inverso.

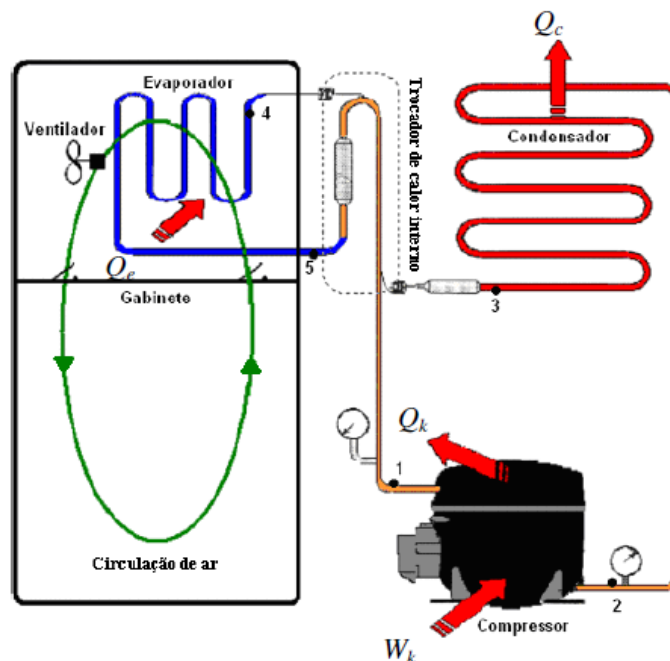


Figura 11- Esquema Frigorífico Doméstico [16].

Na Figura 11 está representado o funcionamento de um frigorífico doméstico de compressão a vapor.

Os equipamentos de frio a compressão de vapor são constituídos por quatro partes: o evaporador, o compressor, o condensador e a válvula de expansão. No evaporador o líquido refrigerante vai evaporar devido ao calor removido do interior do frigorífico. Este gás entra no compressor onde é comprimido, devido a esta compressão, a temperatura do gás sobe. Depois da compressão o gás superaquecido a alta pressão entra no condensador onde vai libertar o calor para o ar, isto deve-se ao facto da temperatura do ar estar inferior à do gás. No fim de libertar o calor, o gás passa novamente a líquido e para completar o ciclo este líquido a alta pressão passa por uma válvula de expansão, onde a sua pressão decresce e assim pode voltar novamente ao evaporador [10].

O frigorífico funciona alternando o seu funcionamento entre ligado/desligado. Programa-se a temperatura desejada no termóstato e o sistema de controlo liga ou desliga o equipamento para que se obtenha uma temperatura relativamente constante em torno da temperatura para a conservação dos alimentos. A Figura 12 mostra o funcionamento típico deste equipamento

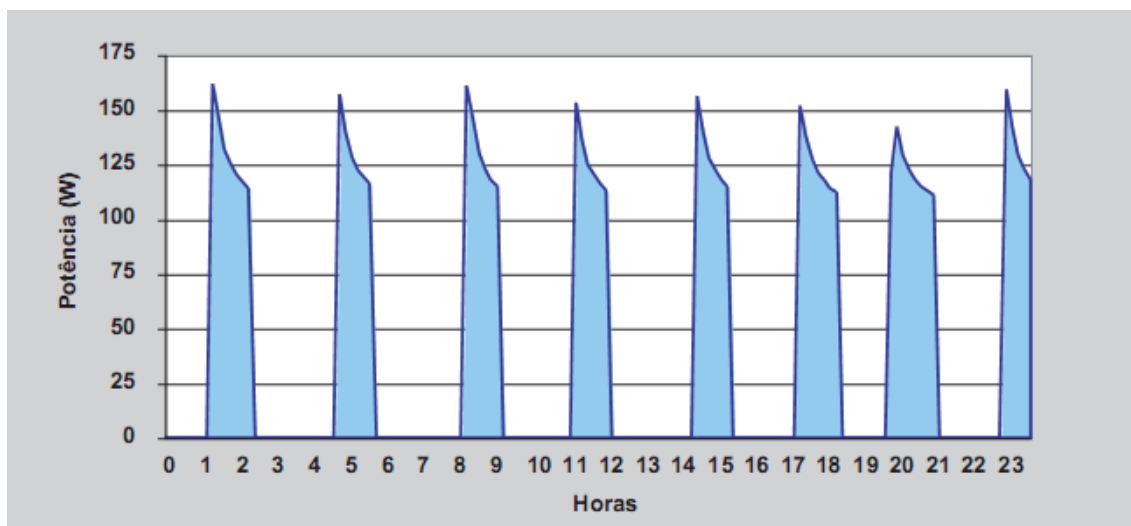


Figura 12-Perfil de funcionamento típico de um equipamento de frio [6]

Como se pode observar na Figura 12, a potência pedida à rede não é constante durante o intervalo em que o compressor está ligado, esta situação deve-se à corrente de arranque do compressor uma vez que pode chegar até 5 vezes a corrente nominal e também se deve à circulação do gás refrigerante que como está parado vai obrigar a um maior esforço da máquina nos instantes iniciais do seu funcionamento [11]. No modelo proposto é considerada,

uma potência constante durante todo o período de funcionamento, essa aproximação pode ser feita uma vez que para efectuar a gestão deste tipo de cargas a não inclusão do pico inicial não provoca alterações significativas.

### 5.1. Modelo Fisicamente Baseado

A necessidade de ter um modelo capaz de reproduzir o funcionamento deste tipo de cargas e de ao mesmo tempo ser capaz de avaliar o impacto em termos de procura e da temperatura interior levou à identificação dos fenómenos físicos colocados em jogo e à sua caracterização matemática. Nesta secção é feita a descrição desses modelos matemáticos, sua implementação e a sua validação experimental. São também avaliados os impactos de algumas acções de GP.

Numa primeira abordagem ao modelo da carga de frio doméstico, foi apenas tido em conta as variações de temperatura devido às trocas de calor entre o interior e o exterior através da envolvente.

O modelo proposto é representado pela equação:

$$M \cdot C_p \cdot \Delta T = (Q(t) - P(t)) \times \Delta t \quad (7)$$

onde,

$M$  – Massa de ar no interior do equipamento(Kg)

$C_p$  – Calor específico do ar(J/Kg°C)

$Q$  –Ganhos térmicos pela envolvente(W)

O termo  $P(t)$  é calculado através do produto entre a potência do compressor e o COP. O COP (*coeficiente of performance*) é o quociente entre a energia térmica retirada do interior do equipamento e a energia eléctrica gasta pelo compressor para remover essa energia térmica.

Os ganhos térmicos pela envolvente são dados pela expressão:

$$Q(t) = AU(T_{amb}(t) - T_{interior}(t)) \quad (8)$$

em que,

$A$  – área da envolvente ( $m^2$ )

$U$  – coeficiente de transferência de calor pela envolvente ( $\frac{W}{m^2 \cdot C}$ )

Combinado as equações 7 e 8 chega-se à expressão final do comportamento do equipamento

$$T_{interior}(t + \Delta t) = T_{interior}(t) - \frac{P(t) - AU(T_{amb}(t) - T_{interior}(t))}{M \cdot C_p} \times \Delta t \quad (9)$$

A expressão anterior dá a temperatura no instante  $(t + \Delta t)$  a partir da temperatura no instante  $(t)$  mais as trocas de calor que ocorrem no intervalo  $(\Delta t)$ . Desta expressão pode ver-se que conhecendo alguns parâmetros das cargas e a temperatura no instante anterior consegue-se calcular a temperatura no interior do equipamento. A determinação do COP e da condutividade térmica, é essencial para a modelação do funcionamento das cargas. Sendo parametrizável na ferramenta construída, foi possível implementar um modelo que é replicável para diferentes cargas de frio alimentar doméstico.

O pseudo-código do modelo é o seguinte:

```
-Se Inicio  
  -Se Temperatura Inicial > = Banda Morta Superior  
    -Compressor Ligado  
  -Senão  
    -Compressor desligado  
  -Fim  
-Senão  
  -Se Temperatura Actual >= (Banda Morta inferior se a temperatura  
está a descer ou Banda Morta superior se a temperatura está a subir)  
    -Compressor ligado  
  -Senão  
    -Compressor desligado  
  -Fim  
-Fim
```

## 5.1.1. Determinação do Coeficiente global de transferência de calor e do COP

### 5.1.1.1. Coeficiente global de transferência de calor

Quer para a condutividade térmica através da envolvente quer para o COP há valores de referência que podem ser obtidos em publicações da área [12] [13]. Todavia, pretendendo fazer uma validação experimental do modelo optou-se por começar por determinar esses valores para os equipamentos usados nas experimentações. Para isso fizeram-se diversas monitorizações em vários equipamentos em que se mediu a temperatura interior, a temperatura exterior e o consumo do equipamento. Em situações em que não houve abertura da porta, a energia que é necessário repor será igual à energia que foi perdida através da envolvente. Sabendo que os fluxos de energia através da envolvente são proporcionais à diferença de temperatura e ao coeficiente global de transferência de calor térmica do material da envolvente é possível com as monitorizações estimar o valor para esse coeficiente.

Na Figura 13 estão representados os intervalos considerados para o cálculo da condutividade térmica para uma das cargas monitorizadas. Os dados recolhidos experimentalmente para cada intervalo de análise encontram-se no Anexo B.

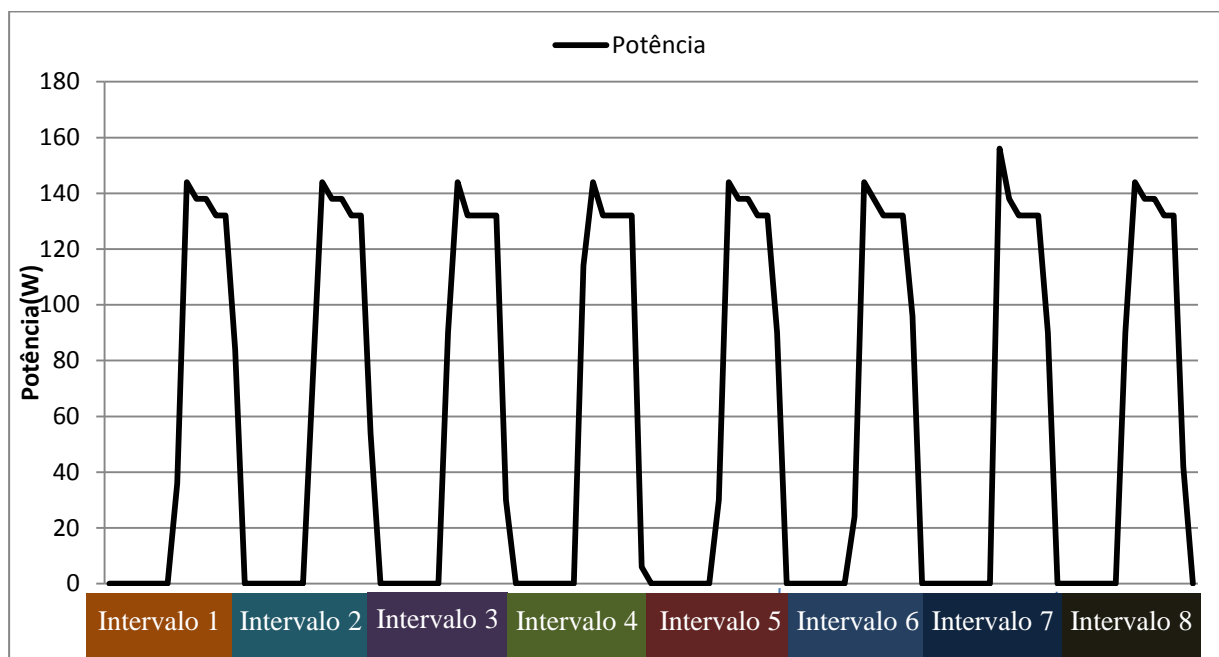


Figura 13-Intervalos considerados para a determinação da condutividade térmica

Da Figura 13 pode verificar-se que os tempos de funcionamento ( $t_{on}$ ) e os tempos de não funcionamento ( $t_{off}$ ) são de 7 minutos à excepção do intervalo 7 onde são de 8 e 6, respectivamente. Em todos os casos a duração de um ciclo ( $t_{on} + t_{off}$ ) é de 14 minutos.



A determinação do coeficiente global de transferência de calor é feita através da seguinte expressão

$$P \times COP \times t_{on} = A \times U \times \Delta T \times t \leftrightarrow$$

$$A \times U = \frac{P \times COP \times t_{on}}{\Delta T \times t} \left( \frac{W}{^{\circ}C} \right) \quad (10)$$

Para o equipamento em questão foi considerado um COP igual a 1,4, que permite obter os valores do coeficiente global de transmissão de calor apresentados na Tabela 2 .

Na Tabela 2 representa-se no resumo da análise feita a vários intervalos para a determinação da Condutividade térmica para um  $\Delta T = 35.38^{\circ}C$ .

**Tabela 2-Resumo da determinação do Coef. Transferência**

<b>Intervalo</b>	<b>Ganhos Térmicos (W)</b>	<b>Coef. Transferência (W/°C)</b>
1	80,38	2,27
2	80,72	2,28
3	78,75	2,23
4	79,2	2,23
5	80,4	2,27
6	79,8	2,23
7	78	2,2
8	81	2,28
<b>Média</b>	<b>79,78</b>	<b>2,24</b>

Refira-se que este valor é a estimativa para o coeficiente global de transferência de calor de um dos equipamentos usados na validação experimental. No modelo implementado este valor, e outros, pode ser parametrizado pelo utilizador o que permite simular diferentes equipamentos de frio alimentar doméstico.

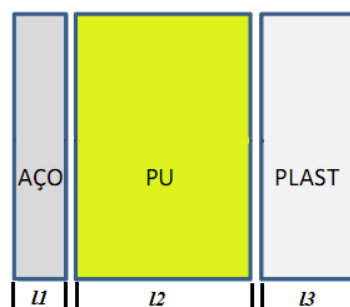
#### **5.1.1.2. Coeficiente de Desempenho (COP)**

O COP por definição é o quociente entre a energia térmica retirada do interior do equipamento e a energia eléctrica consumida para o efeito. Não tendo informação sobre o valor do COP do equipamento utilizado, tornou-se necessário tentar obtê-lo experimentalmente. Para tal fez-se o cálculo da carga térmica para diferentes intervalos, e

encontrar o COP para um deles. Para determinar a carga térmica é necessário ter os dados do equipamento em questão, mais propriamente o espaço condicionado. Na Tabela 3 estão representados os dados do equipamento usado na simulação.

**Tabela 3-Dados sobre o espaço condicionado do equipamento**

<b>Altura (m)</b>	<b>0.7</b>
<b>Largura (m)</b>	<b>0.47</b>
<b>Comprimento (m)</b>	<b>1.07</b>
<b>Espessura do material isolante (m)</b>	<b>0.04</b>
<b>Condutividade térmica do material isolante (W/m°C)</b>	<b>0.027</b>
<b>Espessura da chapa de aço (m)</b>	<b>0,0015</b>
<b>Condutividade térmica do aço (W/m°C)</b>	<b>50</b>
<b>Espessura da parede de plástico (m)</b>	<b>0,0025</b>
<b>Condutividade térmica do plástico (W/m°C)</b>	<b>0,046</b>



**Figura 14-Esquema da parede do equipamento de frio [17].**

Através dos dados da Tabela 3 e da Figura 14 é possível determinar-se o coeficiente de transmissão de calor  $U$ .

Uma vez que as paredes do equipamento são compostas por três materiais diferentes o coeficiente  $U$  é calculado da seguinte forma:

$$R_{total} = \frac{l_1}{k_1} + \frac{l_2}{k_2} + \frac{l_3}{k_3} = \frac{0,0015}{50} + \frac{0,04}{0,027} + \frac{0,0025}{0,046} = 1,53 \left( \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W} \right) \quad (11)$$

$$U_{total} = \frac{1}{R_{total}} = \frac{1}{1,53} = 0,675 \left( \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right) \quad (12)$$

Determinado o coeficiente de transmissão é necessário determinar-se o coeficiente global de transferência de calor do espaço. Para tal é utilizada a expressão:

$$U \times \sum_{i=1}^6 A_i = U \times (A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6) \quad (13)$$

$$\begin{aligned} U \times \sum_{i=1}^6 A_i &= 0,675 \times (0,749 + 0,749 + 0,392 + 0,392 + 0,5029 + 0,5029) \\ &= 2,22 \left( \frac{W}{^\circ C} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

No caso presente admite-se que o coeficiente  $U$  é igual para todas a paredes.

Tendo chegado ao valor do coeficiente global de transferência de calor, o COP é determinado através da expressão:

$$P \times COP \times t_{on} = A \times U \times \Delta T \times t \quad (15)$$

$$COP = \frac{A \times U \times \Delta T \times t}{P \times t_{on}} \quad (16)$$

Na Tabela 4 representa-se no resumo da análise feita a vários intervalos para a determinação do coeficiente de desempenho do equipamento.

**Tabela 4-Resumo da detreminação do COP**

<b>Intervalo</b>	<b>Ganhos Térmicos (W)</b>	<b>COP</b>
1	1099.61	1.374
2	1099.60	1.357
3	1099.62	1.388
4	1099.60	1,388
5	1099.61	1,367
6	1099.61	1,377
7	1099.62	1.400
8	1099.60	1,388
<b>Média</b>	<b>1099,61</b>	<b>1.38</b>

### 5.1.2. Validação do modelo Equipamento de frio (Arca)

De forma a validar experimentalmente o modelo desenvolvido, serão apresentados alguns intervalos de estudo. O objectivo é concluir se o modelo desenvolvido é ou não válido. Para tal recorre-se à comparação entre os resultados obtidos experimentalmente e os simulados. Repare-se que apenas são apresentados de forma detalhada 3 intervalos de monitorização. Todavia, as recolhas de dados são bastante mais extensas quer em termos de duração quer em termos de equipamentos.

#### 5.1.2.1. Análise de resultados primeiro intervalo

Este intervalo é relativo ao dia 21/11/2011 das 17 horas até às 18 horas. Os dados recolhidos experimentalmente encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5-Dados recolhidos experimentalmente para o 1º intervalo

Temperatura Média(°C)	Duração do intervalo	Energia consumida(Wh)
-21	60	53.7

Na realização da simulação obteve-se um consumo energético de 52.8 Wh, sendo a variação percentual entre a energia obtida experimentalmente e simulada de 1.7%. Na Figura 15 é apresentado a comparação entre os resultados obtidos experimentalmente e os simulados.

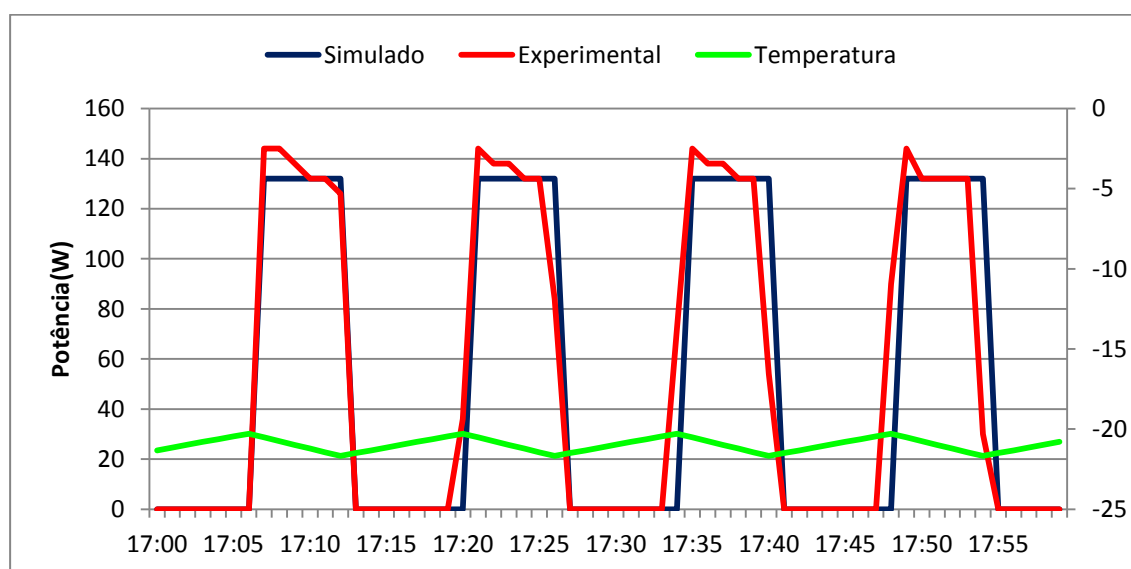


Figura 15-Comparação entre os resultados simulados e experimentais (1º intervalo)

### 5.1.2.2. Análise dos resultados do segundo intervalo

Este intervalo é relativo ao dia 22/11/2011 das 5 horas e 45 minutos até às 6 horas e 45 minutos. Os dados recolhidos experimentalmente encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6-Dados recolhidos experimentalmente para o 2º intervalo

Temperatura Média(°C)	Duração do intervalo	Energia consumida(Wh)
-21	60	52.9

Uma vez que o consumo energético obtido na simulação é de 52.8 Wh, a variação percentual é de 0.18%. Na Figura 16 é apresentada a comparação entre os resultados obtidos experimentalmente e os simulados.

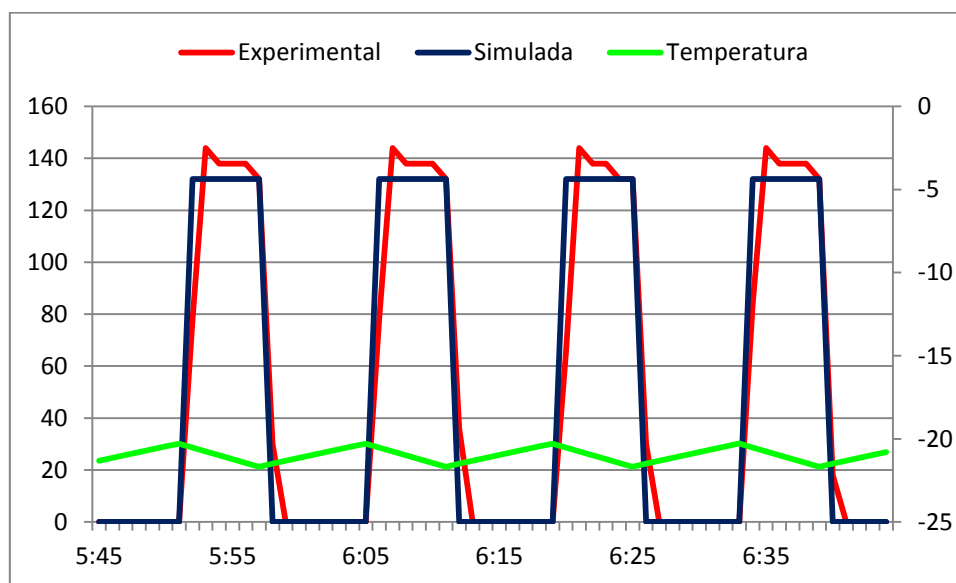


Figura 16- Comparação entre os resultados simulados e experimentais (2º intervalo)

### 5.1.2.3. Análise dos resultados do terceiro intervalo

Este intervalo é relativo ao dia 23/11/2011 das 3 horas e 49 minutos até às 5 horas e 48 minutos. Os dados recolhidos experimentalmente encontram-se na Tabela 7.

Tabela 7-Dados recolhidos experimentalmente para o 3º intervalo

Temperatura Média(°C)	Duração do intervalo	Energia consumida(Wh)
-21	120	108,4

Após simulação obteve-se um consumo energético de 107.8Wh, o que resulta numa diferença percentual de 0.55%. Na Figura 17 é apresentada a comparação entre os resultados obtidos experimentalmente e os simulados.

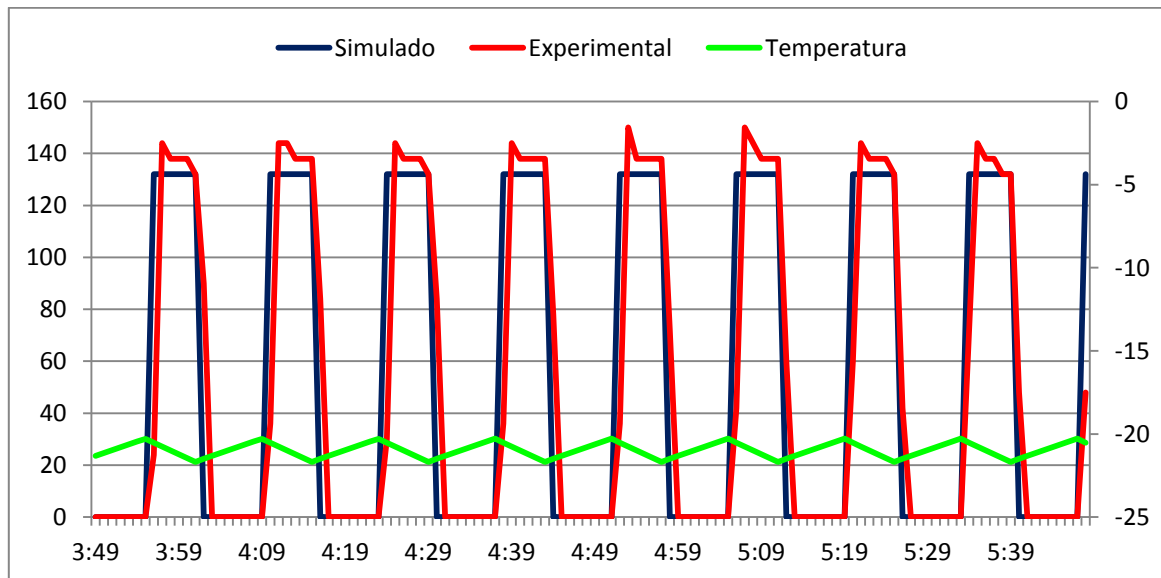


Figura 17-Comparação entre os resultados simulados e experimentais(3º intervalo)

Devido às diferenças percentuais entre os resultados recolhidos e os simulados serem pequenas (inferiores a 2%), pode concluir-se que a ferramenta desenvolvida pode ser utilizada na análise do funcionamento de um equipamento de frio. Acredita-se que dada a variabilidade dos parâmetros e de algumas simplificações na sua quantificação as diferenças apresentadas são de modo a aceitar o modelo implementado como válido para reproduzir o funcionamento de um equipamento de FAD.

## 6. Modelos de cargas de Aquecimento eléctrico de Água e Frio Alimentar Doméstico

Neste capítulo descreve-se explicitamente a construção e parametrização das ferramentas desenvolvidas para a simulação do AEA e FAD.

### 6.1. Método Monte Carlo

Um dos grandes objectivos das ferramentas de simulação é possibilitarem um estudo prévio dos potenciais impactos das acções de gestão da procura. Essa avaliação tanto deve ser feita ao nível individual, quer em termos de potência pedida à rede e consumo de energia e ainda à qualidade do serviço prestado, quer ao nível agregado (conjuntos alargados de cargas). De notar que os parâmetros que caracterizam cada uma das cargas têm pequenas variações de

carga para carga que podem afectar o seu funcionamento, essas alterações podem ter a duração de algumas horas ou até de dias. Um dos métodos para lidar com a aleatoriedade de alguns dos parâmetros é o Método de Monte Carlo (MC), em que a determinação de cada parâmetro segue uma distribuição probabilística. O método de Monte Carlo é uma modelo de simulação que utiliza a geração de números aleatórios para atribuir valores aos parâmetros aleatórios, cujo objectivo é o de efectuar N simulações do modelo fisicamente baseado fazendo variar, de simulação para simulação, os parâmetros aleatórios. Dentro dos parâmetros aleatórios, alguns variam de carga para carga outros variam de simulação para simulação. No modelo desenvolvido os parâmetros aleatórios variam segundo uma distribuição normal

## **6.2. Modelo de carga individual**

Mesmo ao nível de cada carga individualmente há variações nos parâmetros que convém acautelar se se pretende obter diagramas médios representativos de uma dada carga. De realçar que há diferenças qualitativas quando estamos a usar diagramas prováveis ou possíveis de uma carga e diagramas médios. No caso de um diagrama possível está-se interessado num padrão de potência pedida ao longo do tempo (normalmente um dia) que seja possível para uma dada carga. Por exemplo, um mesmo termoacumulador com os mesmos valores de temperatura ambiente e de água quente e fria, dá origem a diferentes diagramas (possíveis) de acordo com a utilização da água quente. A obtenção de diagramas médios para uma dada carga exige que se lide com essa variação dos parâmetros. Também, aqui se podem usar os métodos de Monte Carlo.

Os modelos desenvolvidos têm como base os modelos fisicamente baseados descritos anteriormente. Os dados necessários são fornecidos ao simulador através de uma folha de cálculo, onde é caracterizado toda a envolvente bem como os equipamentos de AEA e FAD.

A Figura 18 demonstra os fluxos no modelo implementado.

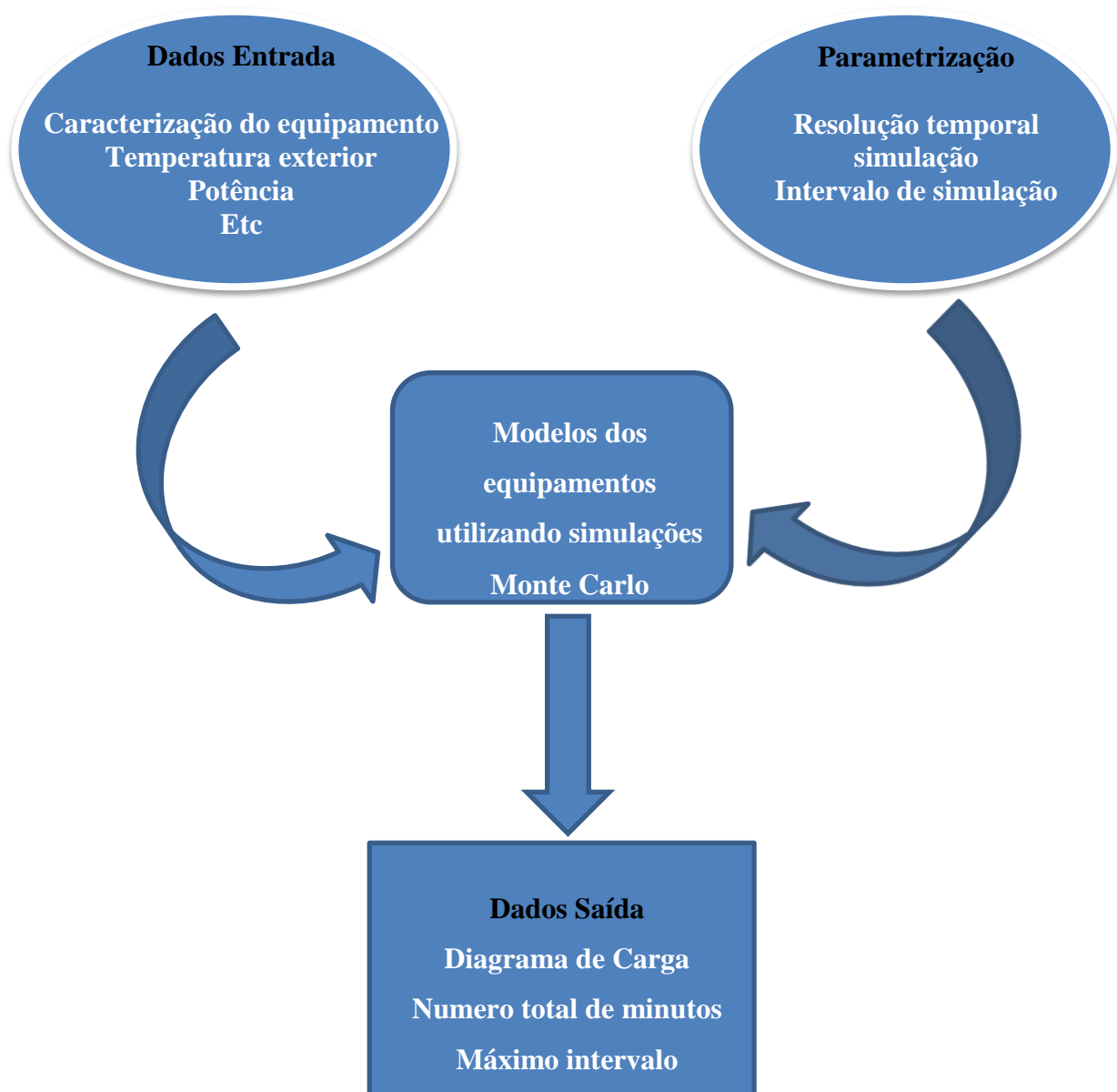


Figura 18-Fluxos de dados do Modelo Carga Individual



### **6.2.1. Dados de Entrada**

Nesta secção são mencionados os dados de entrada da aplicação desenvolvida.

#### ***6.2.1.1. Aquecimento Eléctrico de Água***

Os dados de entrada são os seguintes:

- Condutividade térmica (isolamento);
- Capacidade do termoacumulador;
- Temperatura no início da simulação;
- Potência do elemento resistivo;
- Número de simulações de MC,
- Variação dos parâmetros aleatórios nas simulações MC;
- Temperatura exterior;
- Limite superior e inferior de banda morta.

#### ***6.2.1.2. Frio Alimentar Doméstico***

Os dados de entrada do modelo são:

- Condutividade térmica (isolamento);
- Volume refrigerado;
- Temperatura no início da simulação;
- Potência do compressor;
- Número de simulações de MC,
- Variação dos parâmetros aleatórios nas simulações MC;
- Temperatura exterior;
- Limite superior e inferior de banda morta.
- COP

### **6.2.2. Parâmetros aleatórios**

Neste modelo existem várias variáveis de entrada onde é necessário trabalhar com a incerteza. Nesta secção vai ser apresentada uma lista de parâmetros aleatórios para a mesma carga.

### 6.2.2.1. Aquecimento Eléctrico de Água

Na Tabela 8 são mostrados os parâmetros aleatórios utilizados na simulação.

Tabela 8- Parâmetros Aleatórios nas simulações de MC para a mesma carga

Parâmetros	Varição entre simulações MC
Consumo de água quente	Sim
Temperatura da água da rede	Sim
Temperatura exterior	Sim
Coefficiente de transmissão	Não
Potência AEA	Não
Temperatura desejada	Não
Capacidade	Não
Banda Morta	Não

### 6.2.2.2. Frio Alimentar Doméstico

Na Tabela 9 são mostrados os parâmetros aleatórios utilizados na simulação.

Tabela 9-Parâmetros Aleatórios nas simulações de MC para a mesma carga

Parâmetros	Varição entre simulações MC
Temperatura exterior	Sim
Coefficiente de transmissão	Não
Potência FAD	Não
Temperatura desejada	Não
Volume refrigerado	Não
Banda Morta	Não

Nas duas situações a variação é independente, ou seja, difere entre parâmetros e simulações. Para cada simulação são geradas variações diferentes.

### 6.2.3. Dados de Saída

Nesta secção são mencionados os dados de entrada da aplicação desenvolvida.

#### 6.2.3.1. Aquecimento Eléctrico de Água/Frio Alimentar Doméstico

Na Tabela 10 encontram-se descritos os dados de saída dos modelos.

Tabela 10-Dados de saída para os modelos AEA e FAD

Dados de Saída	Descrição
Diagrama de Carga	Representa a potência pedida à rede ao longo do tempo
Número de Minutos	Número de minutos que a temperatura no interior do termoacumulador fica a abaixo de um limite mínimo de conforto
Máximo intervalo	Maior intervalo, em que a temperatura fica abaixo do limite de conforto

### 6.3. Modelo de Carga Agregada

O objectivo deste modelo é poder analisar o comportamento de várias cargas. As cargas são divididas em grupos, ou seja, as cargas são agrupadas de acordo com o tipo, não podendo existir num mesmo grupo cargas de tipos diferentes [14].

Na Figura 19 encontra-se o esquema de entradas e saídas de dados deste modelo.

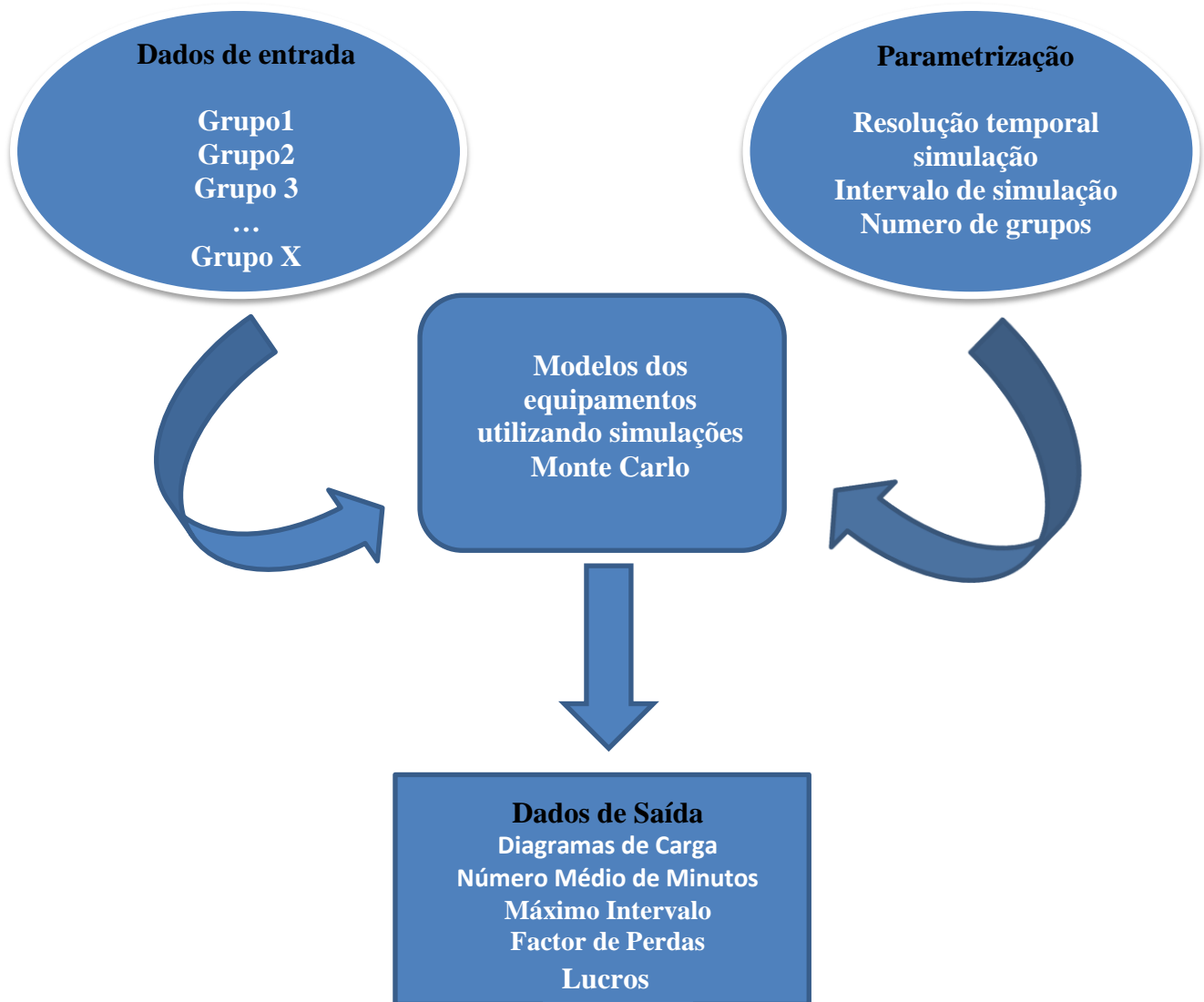


Figura 19- Fluxos de dados do Modelo Carga Agregado

#### 6.3.1. Aquecimento Eléctrico de Água/Frio Alimentar Doméstico

##### 6.3.1.1. Dados de entrada

Para além dos dados de entrada anteriores encontram-se na Tabela 11 os novos dados de entrada para o modelo agregado.

Tabela 11-Novos dados de entrada

Número cargas por grupo
Variações percentuais dos parâmetros aleatórios nas simulações MC
Posto de transformação a que se encontra ligado o grupo

### 6.3.1.2. Parâmetros aleatórios

Com a agregação das cargas é muito importante ter em conta que os parâmetros aleatórios são diferentes para cargas diferentes, ou seja quando existe uma mudança de equipamento na simulação, todos os parâmetros aleatórios vão sofrer alterações. Claro está, que se se estiver no mesmo grupo as condições ambientais serão semelhantes. No caso de serem simulados vários grupos diferentes implica que as condições ambientais das habitações sejam diferentes.

### 6.3.1.3. Dados de saída

Na Tabela 12 estão representados os dados de saída.

Tabela 12-Dados de saída modelo agregado

Dados de Saída	Descrição
<b>Diagrama de Carga</b>	Representa a potência pedida à rede ao longo do tempo
<b>Número total de Minutos</b>	Número de minutos em que a temperatura no interior do termoacumulador fica abaixo de um limite mínimo de conforto
<b>Máximo intervalo</b>	Maior intervalo, em que a temperatura fica abaixo do limite de conforto
<b>Factor de Perdas</b>	Quociente entre perdas médias e perdas máximas

Nesta situação o número de minutos passou a número total de minutos, uma vez que são simulados várias cargas e esta variável é a soma dos números médios de minutos por carga. Existe um novo dado de saída, Factor de perdas, que é determinado da seguinte forma:

$$Factor\ de\ Perdas\ (l) = \frac{1}{N} \frac{\sum_{t=0}^t p^2(t)}{\max(p^2(t))} [pu] \quad (17)$$

onde,

$N$  é o número de intervalos de tempo em que o período  $T$  se encontra discretizado;

$p(t)$  é a procura no intervalo de tempo  $t$ .

Existem também os Lucros, que se podem dividir em, lucros com a energia ou lucros com a potência.

Os lucros com a energia são determinados da seguinte forma:

$$a_t \times (P_t^2) + b_t \times P_t + c_t \quad (18)$$

onde,

$a_t$  e  $b_t$  são valores em €/kWh e  $c_t$  em € ao longo do intervalo  $t$ ;

$P_t$  é a procura no intervalo de tempo  $t$  (kWh).

Os lucros com a potência são:

$$P_{maxDC} \times k_1 + P_{medHP} \times k_2 + P_{maxHP} \times k_3 \quad (19)$$

onde,

$P_{maxDC}$  é potência máxima do DC;

$P_{medHP}$  é a potência média em horas de ponta;

$P_{maxHP}$  é a potência máxima em horas de ponta;

$k_1, k_2, k_3$  são constantes em €/kW.

## 7. Caso de Estudo

Este capítulo encontra-se dividido em duas partes.

Numa primeira parte apresenta-se um Caso de Estudo A, com o objectivo de demonstrar a aplicação e finalidade das ferramentas desenvolvidas. Consiste na simulação de um equipamento com análise de resultados. As medidas que irão ser analisadas são os cortes de alimentação (CA) e a variação da banda morta (VBM). Os cortes consistem em interromper a alimentação da carga por um curto espaço de tempo mas repetidas vezes, enquanto a VBM consiste em variar os valores impostos pelo consumidor no termóstato dos equipamentos de AEA e FAD de forma a obter reduções energéticas.

Por fim, apresenta-se um Caso de Estudo B que consiste na simulação de 10 grupos de cargas durante um dia com resolução temporal de 1 minuto, utilizando simulações de MC, com o objectivo de analisar a medidas de GP na rede de distribuição.

Os resultados obtidos dependem em grande parte da utilização dos equipamentos, no caso do termoacumulador da extracção de água quente e no caso do equipamento de frio das aberturas de porta que são feitas ao longo do dia. No entanto no caso do equipamento FAD o estudo dos impactos das medidas de GP foi feito em regime permanente ou seja, sem aberturas de portas.

## 7.1. Caso de Estudo A

Com o objectivo de apresentar as principais potencialidades da ferramenta desenvolvida, apresentam-se análises de sensibilidade de alguns parâmetros e de medidas de GP para os modelos individuais dos equipamentos de AEA e FAD.

### 7.1.1. Aquecimento Eléctrico de Água

Nesta secção será analisado o modelo de aquecimento eléctrico de água. Numa primeira parte é feita uma análise de sensibilidade de alguns parâmetros e numa segunda fase será feita a análise dos impactos de medidas de GP

#### 7.1.1.1. Caracterização da simulação

Na Tabela 13 são apresentados os diversos parâmetros de entrada.

**Tabela 13- Parametrização usada para análise de sensibilidade**

<b>Valor BM Max (°C)</b>	60
<b>Valor BM Min (°C)</b>	58
<b>Potência Resistência (kW)</b>	1,5
<b>Temp. inicial sim.(°C)</b>	60
<b>Temp. ambiente média(°C)</b>	25
<b>Coef. Transf. Gobal Calor (W/°C)</b>	1,54
<b>Capacidade (L)</b>	80

As simulações têm a duração de um dia com resolução temporal de 1 minuto.

### 7.1.1.2. Análise de Sensibilidade

Nesta secção pretende-se avaliar a sensibilidade do modelo simulado, através da variação de alguns parâmetros descritos na Tabela 14.

Tabela 14- Caracterização dos diferentes cenários

Cenário	Descrição	Alteração
1	Condições iniciais	---
2	Diminuir temperatura interior	-10 °C
3	Aumentar temperatura interior	+10 °C
4	Aumentar Temperatura Ambiente	+4 °C
5	Diminuir Temperatura Ambiente	-4 °C
6	Aumento do Coef. Transf. Global de Calor	1,95 W/ °C
7	Diminuição da Coef. Transf. Global de Calor	1,15 W/ °C

A Figura 20 e a Figura 21 mostram a evolução temporal da procura e da temperatura do equipamento de AEA para o cenário 1 e cenário 2, as restantes figuras encontram-se no Anexo A.

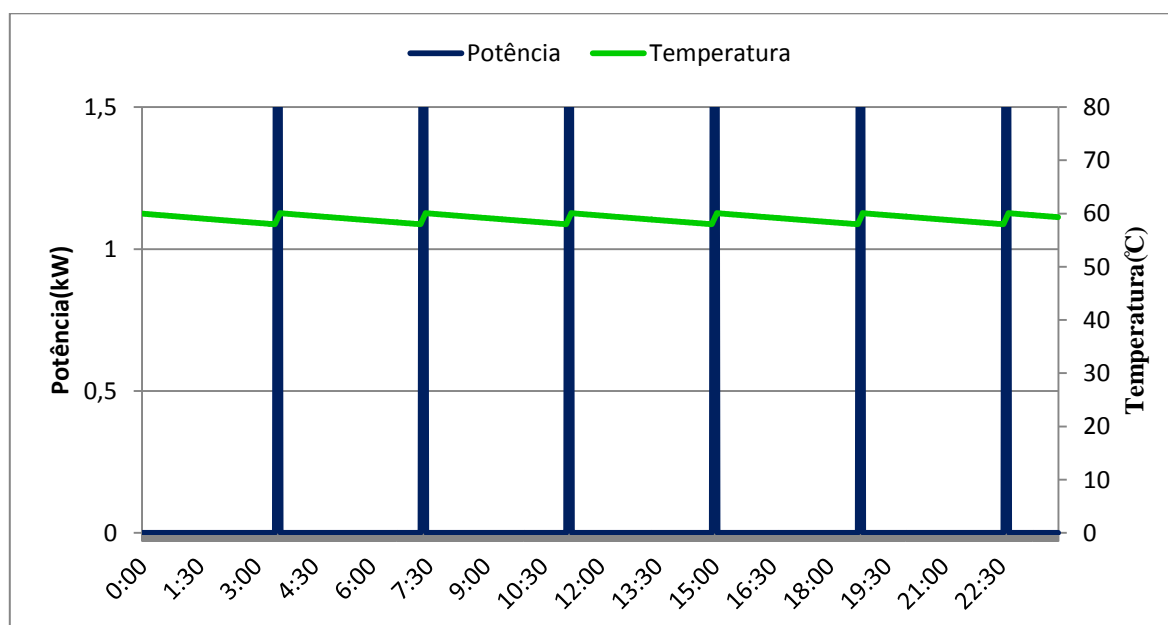


Figura 20- Variação da procura e da temperatura ao longo do dia (cenário 1)

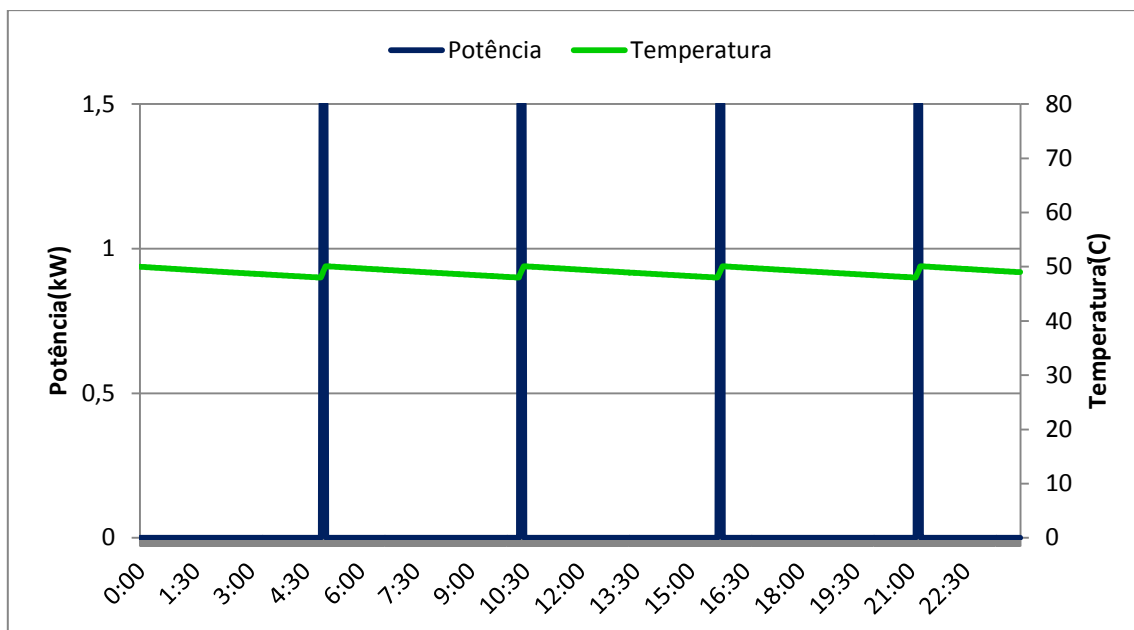


Figura 21-Variação da procura e da temperatura ao longo do dia (cenário 2)

Analisando as figuras acima é possível verificar-se que quanto maior a temperatura da água maior o consumo de energia.

Tabela 15-Resultados obtidos após simulação dos diversos cenários

Cenário	Energia(kWh)	Máximo(kW)	Diferença(%)	$t_{on}$ (min)	$t_{off}$ (min)
1	1,2	1,5	---	8	221
2	0,8	1,5	-33,3	8	316
3	1,6	1,5	+33,3	8	169
4	1	1,5	-16,66	8	252
5	1,4	1,5	+16,66	8	197
6	1,6	1,5	+33,3	8	173
7	0,8	1,5	-33,33	8	298

Através da Tabela 15 conclui-se que ao diminuir a temperatura do termóstato em 10 °C (Figura 20) obtém-se poupanças energéticas de 33,3%, o que é bastante natural uma vez que ao diminuir os limites de BM também diminuimos a taxa de variação da temperatura dentro do termoacumulador uma vez que as perdas são calculadas em função da diferença de



temperatura entre o interior e o exterior. No entanto o tempo em que o elemento resistivo permanece ligado é igualmente de 8 minutos, contrariamente o tempo que permanece desligado aumentou. No cenário 3 (Figura 21) acontece exactamente o inverso, embora o tempo de funcionamento permaneça inalterado, o tempo em que se encontra desligado diminui, essa situação leva a que haja um aumento da energia consumida. Os cenários 4 e 5 demonstram a importância do ambiente neste caso da temperatura em que o equipamento se encontra, para dias mais quentes as perdas, uma vez que são em função da diferença entre a temperatura interior e exterior são menores e assim sendo existe uma diminuição no consumo de energia, ao contrário do que acontece em dias mais frios. Por fim, ao analisar os resultados obtidos nos cenários 6 e 7 é possível verificar-se que os equipamentos com melhor isolamento conseguem produzir o mesmo resultado, recorrendo a uma menor consumo de energia.

Por fim, o parâmetro para o qual foi analisada a sensibilidade do modelo simulado foi a extracção de água. Na Tabela 16 estão representados os consumos de água quente utilizados na simulação.

**Tabela 16-Parametrização dos consumos de água quente**

Fluxo de água hora a hora (l/h)			
0:00-1:00	0	12:00-13:00	10
1:00-2:00	0	13:00-14:00	0
2:00-3:00	0	14:00-15:00	0
3:00-4:00	0	15:00-16:00	0
4:00-5:00	0	16:00-17:00	0
5:00-6:00	0	17:00-18:00	0
6:00-7:00	0	18:00-19:00	10
7:00-8:00	10	19:00-20:00	40
8:00-9:00	25	20:00-21:00	0
9:00-10:00	0	21:00-22:00	0
10:00-11:00	0	22:00-23:00	0
11:00-12:00	0	23:00-24:00	0

A Figura 22 demonstra o comportamento do equipamento com extracção de água quente.

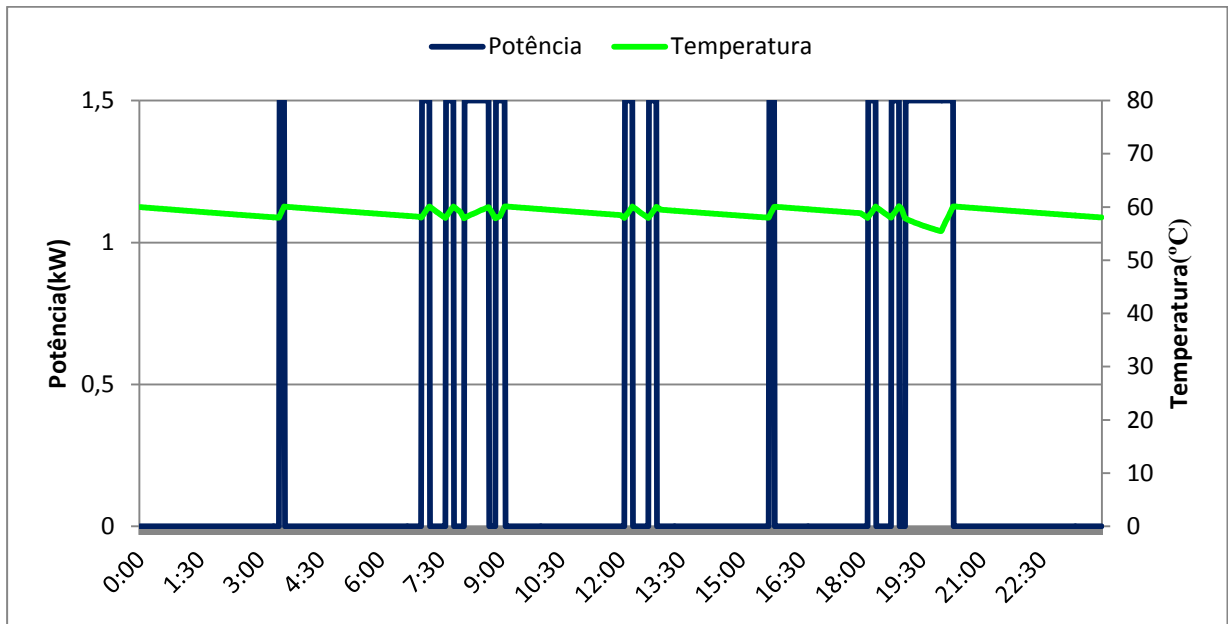


Figura 22-Variação da procura e da temperatura ao longo do dia com extração de água quente

A principal conclusão a tirar é de que é de facto o parâmetro que mais influencia o regime de funcionamento de cargas deste tipo, tendo este um consumo energético de 5,275kWh. Verifica-se também que para consumos elevados cuja extração de energia seja superior à potência do elemento resistivo, a temperatura da água continua a baixar e sobe para taxas de extração inferiores à potência do elemento resistivo.

### 7.1.1.3. Análise de medidas de GP

A primeira acção de GP a ser implementada foi o corte de alimentação. Os cortes foram efectuados entre as 8 horas e 30 minutos e 9 horas e entre as 19 horas e as 19 horas e 15 minutos.

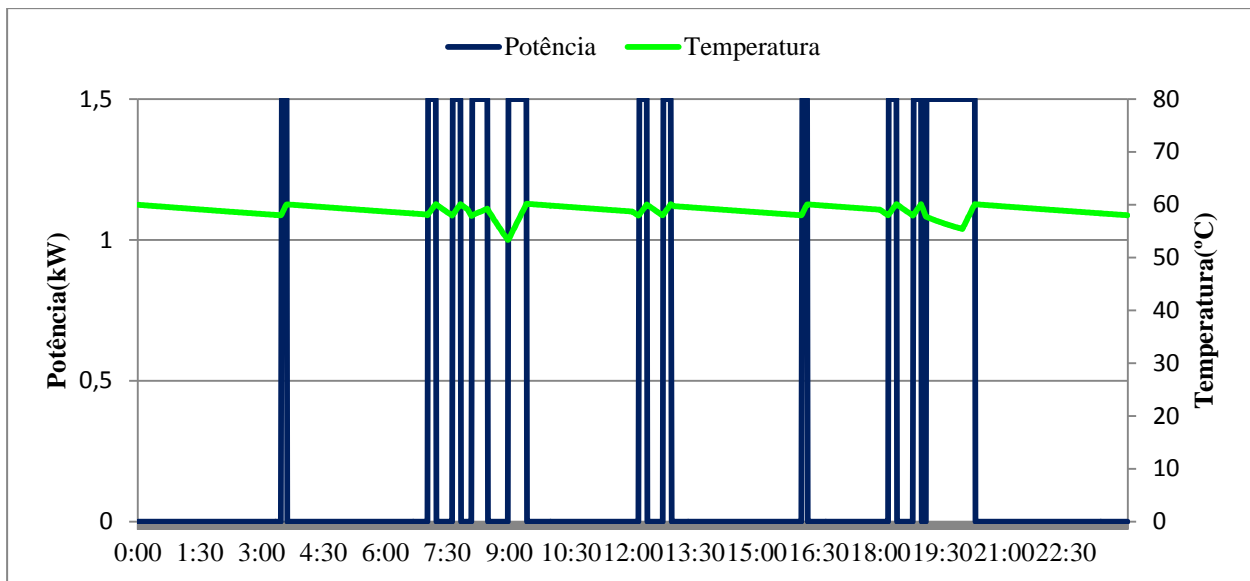


Figura 23-Variação da procura e da temperatura ao longo do dia com CA

A energia consumida pelo equipamento em funcionamento normal é de 5,275kWh(figura), no caso em que se efectuam CA a energia consumida é de 5,225kWh. Conclui-se portanto que houve uma poupança de 1%. Ao analisar também os limites de temperatura pode observar-se que a temperatura no interior do equipamento em funcionamento normal tem um mínimo de 55,44°C e quando sujeito a cortes regista um valor mínimo de 53.32°C. Esta diminuição da temperatura é bastante natural uma vez que o equipamento é forçado a permanecer desligado.

A segunda medida a ser aplicada foi a variação de banda morta. A variação de banda morta é feita da seguinte forma: nos intervalos em que o consumo de água é nulo é alterada a temperatura de referência do termóstato para uma temperatura muito baixa de modo a restringir o funcionamento do equipamento e é reposto o valor inicial instantes antes de acontecerem os consumos de maneira a que o nível de conforto seja sempre garantido. Na Figura 24 é perceptível essa variação uma vez que nos intervalos das 0 horas às 6 horas e 30 minutos, das 9 horas às 17 horas e 30 minutos e das 8 horas às 24 horas a temperatura decresce constantemente.

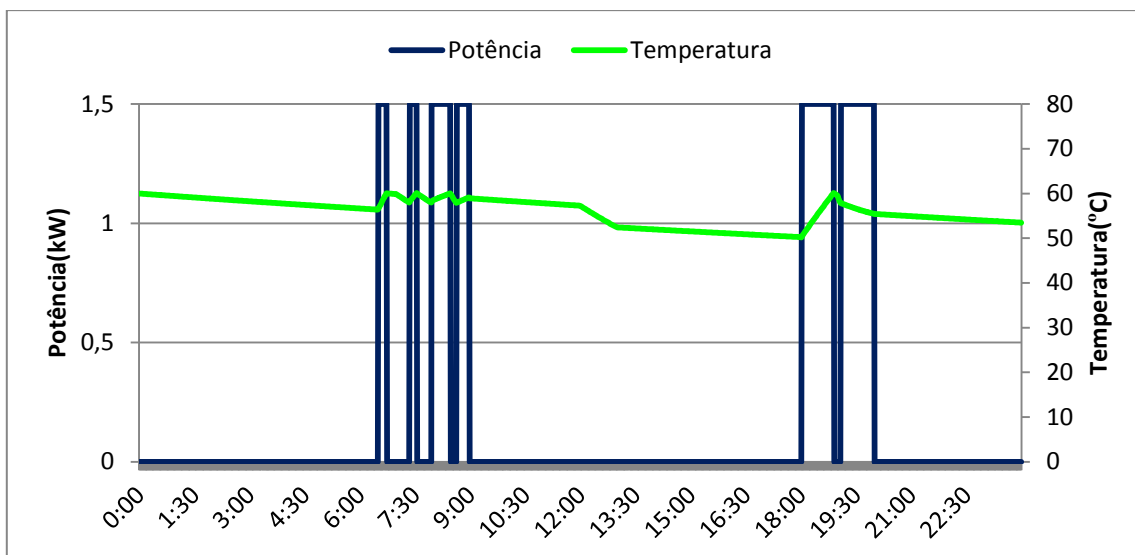


Figura 24 - Variação da procura e da temperatura ao longo do dia com VBM

Ao analisar a Figura 24 observa-se que a o variar a banda morta em situações em que a extracção de água quente é mínima ou nula (Tabela 16), é possível obterem-se reduções nos consumos energéticos sem causar situações de desconforto. O consumo foi de 4,65kWh, o que revela uma redução de 11%.

Pode concluir-se que a aplicação de medidas de GP é vantajoso para se obter poupanças energéticas em equipamentos de AEA, sem grande alteração nas condições de conforto.

### 7.1.2. Frio Alimentar Doméstico

Nesta secção será analisado o modelo de frio alimentar doméstico. Numa primeira parte é feita uma análise de sensibilidade de alguns parâmetros e numa segunda fase será feita a análise dos impactos de medidas de GP

#### 7.1.2.1. Caracterização da simulação

Na Tabela 17 são apresentados os diversos parâmetros de entrada.

Tabela 17-Parametrização do equipamento

Limite Superior da Banda Morta(°C)	-20,5
Limite Inferior da Banda Morta(°C)	-21,5
Coeficiente Global de Perdas(W/°C)	2,22
Potência(kW)	0,132
Temperatura Ambiente Média(°C)	14,19

As simulações têm a duração de um dia com resolução temporal de 1 minuto

### 7.1.2.2. Análise de Sensibilidade

Para analisar a sensibilidade do modelo implementado à variação de vários parâmetros foi efectuada uma análise detalhada do comportamento do modelo. As variações dos diferentes parâmetros estão representadas na Tabela 18.

**Tabela 18- Caracterização dos cenários**

Cenário	Descrição	Alteração
1	Condições iniciais	---
2	Aumentar Temperatura interior	+1°C
3	Diminuir Temperatura Interior	-1°C
4	Aumentar Temperatura Ambiente	+3°C
5	Diminuir Temperatura Ambiente	-3°C
6	Isolamento mais fraco	AU=2,53W/°C
7	Isolamento mais forte	AU=1.97W/°C

Na Tabela 19 são apresentados os resultados após as diversas simulações, Nos casos em que existe redução nos consumos energéticos as percentagens têm valor negativo, contrariamente ao que acontece quando houve aumento de consumos de energia eléctrica, pois o valor é positivo.

**Tabela 19- Resultados obtidos após simulação dos cenários**

Cenário	Energia(kWh)	Máximo(W)	Diferença consumo(%)
1	1,35	132	---
2	1,32	132	-2,2
3	1,39	132	+2,96
4	1,47	132	+8,88
5	1,24	132	-8,14
6	1,54	132	+14,07
7	1,20	132	-11,11

Através da observação da Tabela 19 conclui-se que ao alterar a temperatura do termóstato em 1°C obtêm-se poupanças no consumo de energia de 2.2%. Como já era previsível para temperaturas exteriores (cenário 4) superiores o consumo de energia será superior, uma vez que os ganhos térmicos serão maiores. Contrariamente para temperaturas exteriores mais baixas (cenário 5) o consumo de energia é inferior, pois as os ganhos são menores e o equipamento para manter a temperatura desejada realiza menos trabalho. Os cenários 6 e 7 têm como objectivo realçar a importância do isolamento do equipamento e como se pode observar é no cenário 7 onde existe a maior redução no consumo de energia. Concluindo, é necessário ter em conta o local onde se coloca o equipamento, bem como o seu tipo para se obter um maior rendimento do mesmo.

### 7.1.2.3. Análise de medidas de GP

Para se analisar os impactos das acções de GP foram efectuados cortes cíclicos com um tempo de corte de 5 minutos e um tempo de não corte de 10 minutos. Relativamente à variação de banda morta é aplicada uma variação de +1°C durante todo o dia.

As figuras seguintes mostram a relação entre a potência eléctrica e a temperatura no interior do equipamento. Esta análise é feita ente as 10 horas e as 12 horas.

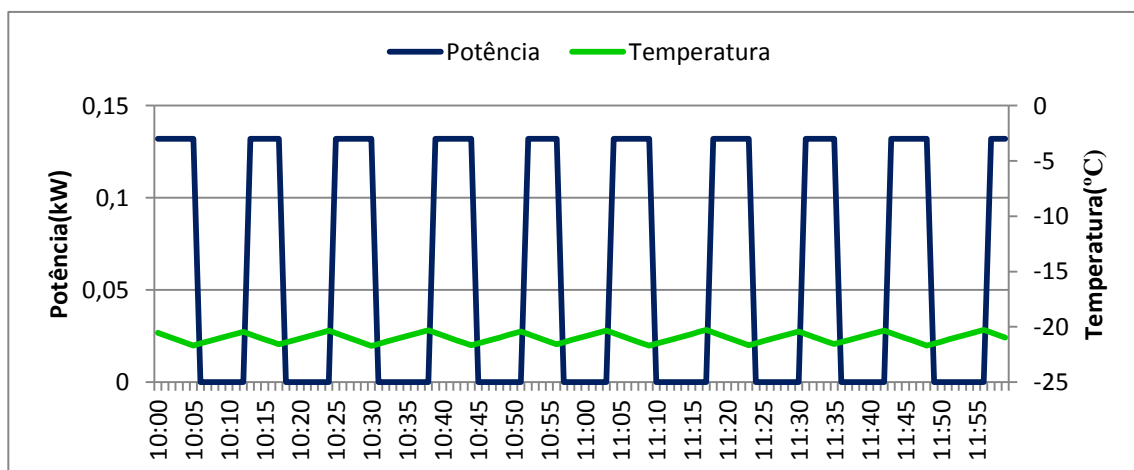


Figura 25-Variação da temperatura e da potência eléctrica num intervalo de tempo sem cortes de alimentação

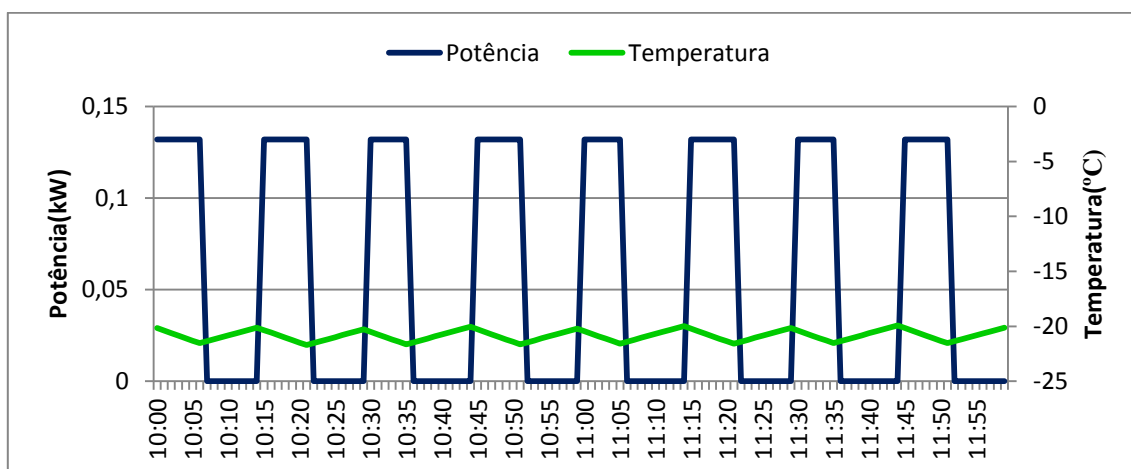


Figura 26-Variação da temperatura e da potência eléctrica num intervalo de tempo com tempo de corte de 5 minutos e tempo de não corte de 10 minutos

.Para o intervalo considerado, o consumo energético em funcionamento normal é de 118,8Wh e para o funcionamento com CA é de 116,6Wh, sendo assim pode concluir-se que a poupança energética é de 1,85%. Analisando a Figura 25 verifica-se que o funcionamento do equipamento de frio é bastante regular, permanece a funcionar durante 6 minutos e permanece desligado durante 8 minutos. Ao analisar a Figura 26 verifica-se que os tempos sofrem alterações. Os tempos passam a ser de 7 minutos para o tempo em que o equipamento se encontra ligado e de 8,5 minutos para o tempo em que se encontra desligado. Analogamente efectuando uma análise a nível da temperatura no interior do equipamento, observa-se que para o caso onde não existem cortes, o máximo de temperatura é -20,28°C e se existirem cortes esta atinge os -19,93°C. Relativamente à VBM, simulou-se um dia em que a banda morta sofre a alteração de +1°C e analisando o mesmo intervalo obteve-se um consumo de energia 110Wh, conseguindo-se, portanto uma poupança de 7,4%.

Conclui-se, então, que aplicar este tipo de medidas de GP é muito vantajoso para se obter poupanças energéticas em equipamentos de FAD, sem grandes alterações na qualidade da conservação dos alimentos.

## 7.2. Caso de Estudo B

O grande objectivo da GP é a redução da potência e do consumo energético ao nível da rede que se avalia com recurso a grupos de cargas.

Neste capítulo será feita a análise do impacto das medidas ao nível da subestação. A subestação possui consumos de cargas não controláveis (cargas onde não se efectuam acção de GP), aos quais se adicionam os consumos relativos aos equipamentos de AEA e FAD, as chamadas cargas controláveis. A Figura 27 representa o DC de cargas não controláveis.

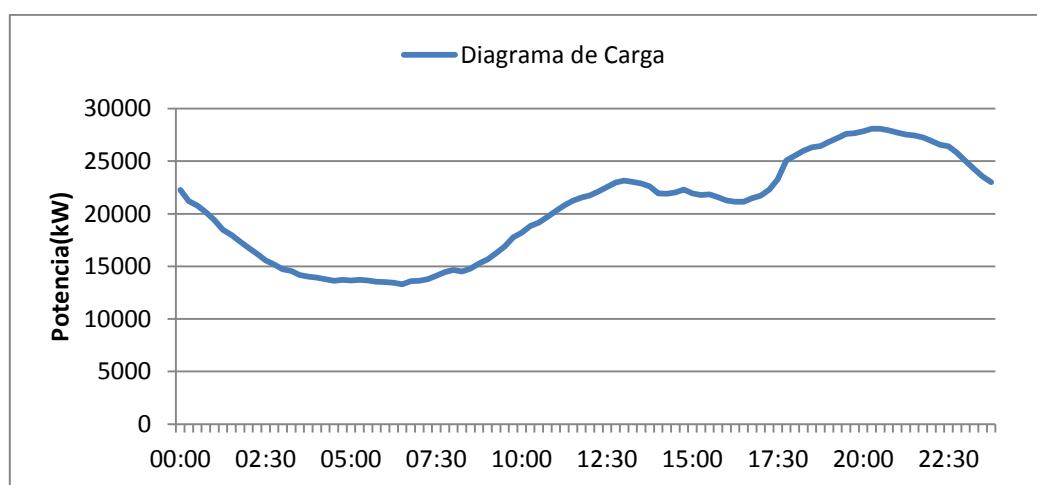


Figura 27-Diagrama de Carga inicial

O caso de estudo foi dividido em duas fases. Numa primeira fase analisou-se diversos cenários de medidas de GP (CA e VBM) e realizou-se uma análise do impacto dessas medidas na rede de distribuição a nível de uma SE para equipamentos de AEA e numa segunda fase fez-se o mesmo mas para equipamentos de FAD.



### 7.2.1. Aquecimento eléctrico de água

Relativamente a esta secção na Tabela 20 é feita uma breve descrição dos grupos de cargas.

Tabela 20- Descrição dos grupos constituintes do caso de estudo

Grupo	Potência (kW)	Número de Cargas
1	1,5	125
2	2	125
3	2,5	125
4	1,5	125
5	2	125
6	2	125
7	2	125
8	2,5	125
9	2,2	125
10	2	125

A Figura 28 mostra a procura das cargas não controláveis e a procura total (cargas controláveis e cargas não controláveis).

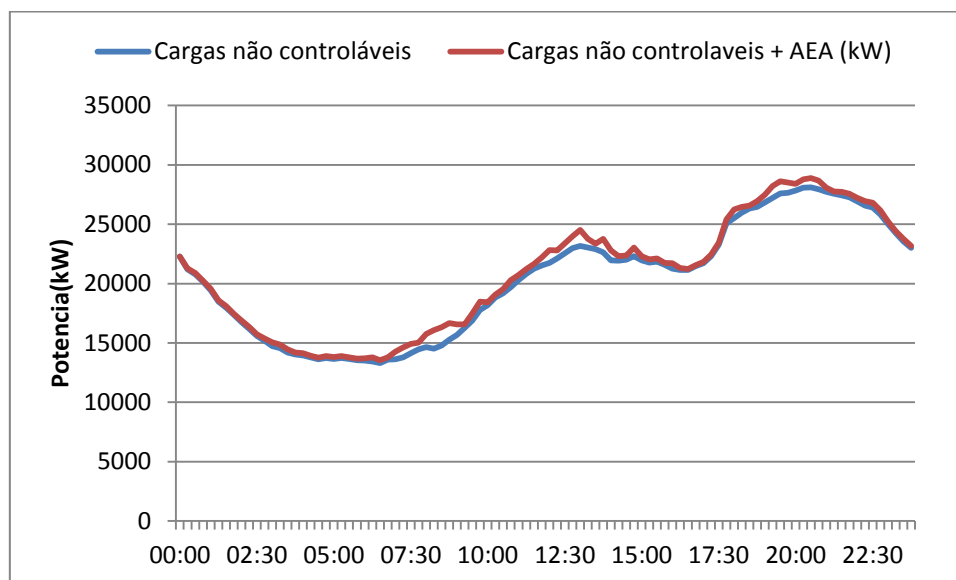


Figura 28 - Diagrama de carga relativo à simulação sem medidas de GP para o AEA

Para a mesma simulação foram registados os valores da energia eléctrica total consumida, máximo de potência do diagrama, lucros e factor de perdas na Subestação (Tabela 21).

Tabela 21-Energia, máximo de potência do DC, lucro e factor de perdas

Energia (kWh)	Máximo(kW)	Lucro(€)	Factor de perdas(pu)
499291,5	28889,37	92060653	0.54

### 7.2.1.1. Aplicação de cortes de alimentação

Os resultados obtidos para os diferentes cenários, foram organizados na Tabela 22 as poupanças energéticas e as reduções do máximo de potência apresentam valores negativos, contrariamente, os aumentos apresentam valores positivos. Os cenários estão descritos no Anexo E

Tabela 22 - Comparação entre os diversos cenários de cortes

Cenário	Energia(kWh)	Máximo(kW)	Cortes	
			$t_{on}$	$t_{off}$
1	499291,5	28889,97	0	0
	<b>Diferença(kW)</b>	<b>Diferença(kW)</b>	-	-
2	-405,5	+281,7	20	10
3	-245,0	-180,9	15	5
4	-145,9	-33,0	20	5
5	-635,5	+79,59	20	15
6	-540,5	+50,6	15	10
7	-425,3	-168,6	10	5

Tabela 23-Número total de minutos e máximo intervalo ao aplicar os cenários de CA

		Cenários						
		1	2	3	4	5	6	7
Grupo de Cargas	1	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
	2	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
	3	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
	4	0/0	0/0	0/0	0/0	6833/27	2319/15	0/0
	5	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
	6	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
	7	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
	8	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
	9	0/0	129/5	0/0	0/0	3059/25	2905/33	4/1
	10	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0

Pode observar-se que todos os cenários de CA originam poupanças energéticas, mas quando se interrompe cargas por um certo período de tempo é imperativo analisar a evolução da temperatura no interior. Através da Tabela 23 observa-se que existem apenas dois grupos de cargas onde o nível de conforto é ultrapassado, mas verifica-se também que para o caso em que os cortes têm a duração de 5 minutos, o máximo intervalo é nulo ou é inferior a 5 minutos. Portanto, pode-se aplicar CA a estes grupos de cargas desde que o tempo de corte não seja superior a 5 minutos. Comparando os máximos de potência obtém-se reduções em 3 cenários (3,4 e 7). Conclui-se então que aplicar CA de forma coordenada é uma medida importante para se obterem reduções nos consumos, no entanto relativamente à redução de potência máxima só os cenários 3, 4 e 7 são eficazes para o efeito.

#### **7.2.1.2. Aplicação de cenários de variação de banda morta**

A Tabela 24 contém os resultados obtidos após as diversas simulações para os diferentes cenários. Poupanças energéticas ou reduções do máximo de potência do DC apresentam valores negativos, contrariamente, os aumentos apresentam valores positivos. Os cenários estão descritos no Anexo C.

**Tabela 24 - Comparação entre os diversos cenários de VBM**

Cenário	Energia(kWh)	Máximo(kW)	VBM(hh:mm)			
			11:00-12:00	18:00-19:00	21:00-24:00	00:00-06:00
1	499291,5	28889,97	0	0	0	0
	<b>Diferença(kW)</b>	<b>Diferença(kW)</b>	-	-	-	-
2	-298,9	-129,3	+3	+5	-3	-20
3	-138,5	+3,9	+2	+3	-1	-15
4	-78,1	+123,1	0	+2	0	-10
5	-103,1	+198,0	0	0	0	-10
6	-631,6	+94,0	-3	-3	-3	-15
7	-1484,0	-15,6	-5	-5	-5	-15

Na Tabela 25 estão registados do número total de minutos e máximo intervalo, após a simulação dos diversos cenários.

**Tabela 25 - Número total de minutos e máximo intervalo ao aplicar os cenários de VBM**

Grupo de Cargas	Cenários						
	1	2	3	4	5	6	7
1	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
2	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
3	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
4	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	20/20	14543/69
5	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	5/5	0/0
6	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	127/22	87/20
7	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
8	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
9	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
10	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	225/65	389/42

Ao analisar a Tabela 24 verifica-se que todos os cenários originam poupanças energéticas. No entanto, é necessário fazer-se a análise a possíveis situações de desconforto causadas pela aplicação das medidas de VBM. Para tal recorre-se à Tabela 25 e ao analisá-la verifica-se que se pode excluir os cenários 6 e 7 uma vez que a temperatura da água chega a estar 69 minutos na zona de desconforto. Conclui-se portanto que ao aplicar variações de banda morta é possível reduzir os consumos de energia, mas apenas no cenário 2 e no cenário 7 se obtém reduções do máximo da potência do DC.

### 7.2.2. Frio Alimentar Doméstico

Na Tabela 26 estão descritos os grupos de cargas utilizados para a análise das medidas de GP.

**Tabela 26- Descrição dos grupos de cargas constituintes do caso de estudo**

Grupo	Potência (W)	Número de Cargas
1	150	1500
2	160	1500
3	145	1500
4	150	1500
5	130	1500
6	137	1500
7	160	1500
8	155	1500
9	165	1500
10	120	1500

A Figura 29 mostra a procura das cargas não controláveis e a procura total (cargas controláveis e cargas não controláveis).

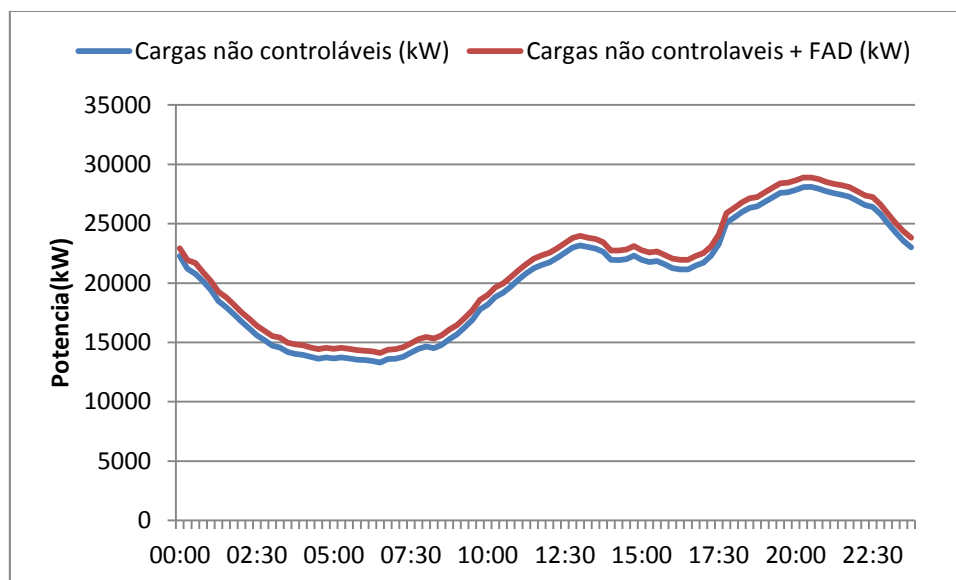


Figura 29 - Diagrama de carga relativo à simulação sem medidas de GP para o FAD

Para mesma simulação foram registados os valores do consumo energia, máximo de potência, lucros e factor de perdas (Tabela 27).

Tabela 27 - Energia, máximo de potência do DC, lucro e factor de perdas

Energia (kWh)	Máximo(kW)	Lucro(€)	Factor de perdas(pu)
507908,8	28898,17	95209013	0.56

### 7.2.2.1. Aplicação de cortes de alimentação

Os resultados obtidos para as diferentes simulações foram resumidos e organizados na Tabela 28. Os cenários estão representados no Anexo E.

Tabela 28 - Comparação entre os diversos cenários de cortes

Cenário	Energia(kWh)	Máximo(kW)	Cortes	
			$t_{on}$	$t_{off}$
1	507908,8	28898,17	0	0
	<b>Diferença(kW)</b>	<b>Diferença(kW)</b>	-	-
2	-316,8	+406,7	20	10
3	-189,7	+79,0	15	5
4	-34,4	+88,7	20	5
5	-496,0	+294,8	20	15
6	-373	+244,2	15	10
7	-180,5	-2,34	10	5

Ao analisar a Tabela 28 verifica-se que todos os cenários apresentam poupanças energéticas, porém para perceber se se pode aplicar ou não os cenários apresentados é necessário analisar também a Tabela 29. Como, tal verifica-se que três cenários apresentam situações em que é posta em causa a boa conservação dos alimentos. Pode-se excluir o cenário 5 uma vez que em alguns casos a temperatura chega a estar 13 minutos acima da temperatura máxima admissível. Relativamente aos cenários restantes, esse intervalo de tempo nunca ultrapassa os 6 minutos. Conclui-se que o único cenário não admissível para aplicação de CA é o 5 e em todos se obtêm poupanças energéticas, mas apenas o cenário 7 se obtém redução do máximo de potência do DC.

**Tabela 29 - Número total de minutos e máximo intervalo ao aplicar os cenários de CA**

		Cenários						
		1	2	3	4	5	6	7
Grupo de Cargas	1	0/0	0/0	0/0	0/0	67078/7	0/0	0/0
	2	0/0	36/1	0/0	0/0	29992/8	20229/2	0/0
	3	0/0	0/0	0/0	0/0	4182/2	0/0	0/0
	4	0/0	0/0	0/0	0/0	46353/5	0/0	0/0
	5	0/0	2871/3	0/0	0/0	355965/11	228/2	0/0
	6	0/0	11344/6	0/0	0/0	414335/13	20140/3	0/0
	7	0/0	0/0	0/0	0/0	35639/5	0/0	0/0
	8	0/0	0/0	0/0	0/0	11456/5	0/0	0/0
	9	0/0	146/1	0/0	0/0	37097/6	4111/2	0/0
	10	0/0	0/0	0/0	0/0	5565/3	0/0	0/0

#### 7.2.2.2. Aplicação de variações de banda morta

Os resultados obtidos após as diferentes simulações foram resumidos e organizados na Tabela 30. Os cenários estão representados no Anexo D.

**Tabela 30 - Comparação entre os diversos cenários de VBM**

Cenário	Energia (kWh)	Máximo(kW)	VBM(hh:mm)		
			7:00-8:30	11:00-12:30	19:00-20:00
1	507908,8	28898,17	0	0	0
	Diferença (kWh)	Diferença (kW)	---	---	---
2	-619,3	-18,57	+1	+1	+1
3	+180,5	-6,05	-1	-1	-1
4	-1236,17	-37,22	+2	+2	+2
5	+373,7	+47,03	-2	-2	-2
6	-69,4	+58,074	+1	-2	+1
7	+106,87	-0,43	-1	-2	0

Ao analisar a Tabela 30 verifica-se que os cenários onde se obtêm as maiores reduções no consumo de energia são aqueles onde se actua +1°C/2°C na VBM. Os cenários 3 e 5 têm maior consumo energético pois reduz-se o valor da temperatura de referência em -1°C/-2°C o que vai provocar a um aumento do tempo do funcionamento do equipamento. No entanto no

caso do cenário 3 consegue-se obter uma redução do máximo de potência. O cenário 2 é o que mais benefício traz uma vez que diminui o consumo de energia e também o máximo de potência.

Através da Tabela 31 verifica-se que em todos os cenários com a exceção do cenário 4, a temperatura admissível para conservação de alimentos nunca é ultrapassado e no caso em que esta é ultrapassada o máximo intervalo nunca é superior a 3 minutos. Conclui-se assim que é possível aplicar diferentes cenários de VBM aos grupos de carga sem causar grandes situações de perigo para a conservação dos alimentos.

**Tabela 31 - Número total de minutos e máximo intervalo ao aplicar os cenários de VBM**

		Cenários						
		1	2	3	4	5	6	7
Grupo de Cargas	1	0/0	0/0	0/0	60041/1	0/0	0/0	0/0
	2	0/0	0/0	0/0	76494/2	0/0	0/0	0/0
	3	0/0	0/0	0/0	68524/2	0/0	0/0	0/0
	4	0/0	0/0	0/0	71631/2	0/0	0/0	0/0
	5	0/0	0/0	0/0	75015/3	0/0	0/0	0/0
	6	0/0	0/0	0/0	87496/3	0/0	0/0	0/0
	7	0/0	0/0	0/0	71797/2	0/0	0/0	0/0
	8	0/0	0/0	0/0	70398/2	0/0	0/0	0/0
	9	0/0	0/0	0/0	88381/2	0/0	0/0	0/0
	10	0/0	0/0	0/0	74750/2	0/0	0/0	0/0

## 8. Conclusão

Neste trabalho foi desenvolvida uma ferramenta que permite simular o funcionamento de equipamentos de AEA e FAD. Esta ferramenta possibilitou analisar os impactos da aplicação de medidas de GP a estes tipos de equipamentos, quer a nível individual quer ao nível agregado (ao nível de SE). As medidas de GP avaliadas foram identificadas de forma aleatória, não sendo usado nenhum processo de identificação baseado em instrumentos de investigação operacional que permitissem lidar com o carácter multiobjectivo e combinatório que informa este tipo de processo.

Após a análise dos resultados obtidos, verificou-se que a aplicação de medidas de GP em equipamentos de AEA e FAD pode ou não melhorar as condições de normal funcionamento da rede de distribuição. A aplicação de CA e VBM de forma coordenada e previamente

estudada, origina poupanças energéticas e reduções da potência máxima do diagrama de carga a nível de uma SE. Todavia é necessário ter-se especial atenção aos níveis de conforto e de conservação dos alimentos quando se usam este tipo de medidas uma vez que se não forem bem elaboradas podem causar situações em que as temperatura ultrapassem os máximos admissíveis. Apesar disso aplicar medidas de GP em equipamentos deste tipo pode ser benéfico, quer para os consumidores quer para o operador de rede. Para os consumidores existe a redução na factura energética, e para o operador de rede há a redução da potência máxima.

Como sugestões desenvolvimentos futuros identificam-se os seguintes pontos:

- Desenvolvimento do modelo com inclusão da taxa de utilização.
- Desenvolvimento de novos modelos de cargas utilizando outras formas de tratamento de incerteza, por exemplo a lógica fuzzy, sistemas neuronais, entre outros.
- Implementação de mais modelos de outros usos finais, nomeadamente de aquecimento eléctrico ambiente e aquecimento solar de águas sanitárias.
- Desenvolvimento de uma ferramenta que com o objectivo de permitir o estudo dos diferentes equipamentos domésticos e respectiva análise do impacto das medidas de GP na rede.



## 9. 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] Martinho, Jorge., *Modelos de Cargas de Condicionamento Ambiente para avaliação do Potencial de Demand Response*. Coimbra : s.n., 2011.
- [4] Gellings, Clark., *The Concept of Demand-Side Management for Electric Utilities*. 1.
- [5] Soares, Ana., *Gestão Integrada de Recursos Energéticos- Contextualização e Análise* . Coimbra : s.n., 2011.
- [6] ADENE., *Eficiência energética em equipamentos e sistemas eléctricos no sector residencial*. Lisboa : DGGE/IP-3E, 2004.
- [7] Laurent, J.C e Malhamé, R.P., *A Physically-Based Computer Model of Aggregate Electric Water Heating Loads*. Canada : s.n., 1994.
- [8] Gomes, Álvaro., *Simulação de Cargas Eléctricas no Contexto do Condicionamento da Procura de Energia Eléctrica*. Coimbra : s.n., 1995.
- [9] , Wikipedia. *Nicolas Léonard Sadi Carnot*. [Online] [Citação: 10 de 01 de 2012.] [http://pt.wikipedia.org/wiki/Nicolas\\_L%C3%A9onard\\_Sadi\\_Carnot](http://pt.wikipedia.org/wiki/Nicolas_L%C3%A9onard_Sadi_Carnot).
- [10] Stoecker, Wilbert e Jones, Jerold., *Refrigeração e Ar Condicionado*.
- [11] , *Motores de Indução*. [Online] [Citação: 18 de 01 de 2012.] <http://www.estv.ipv.pt/PaginasPessoais/eduardop/MqE/Arranque%20motores%20indu%C3%A7%C3%A3o.pdf>.
- [12] Fafisol Isolamentos. [Online] [Citação: 23 de 01 de 2012.] <http://www.fafisol.com/dicatermico.html>.
- [13] ACC household compressors. ACC. [Online] [Citação: 23 de 01 de 2012.] <http://www.the-acc-group.com/cgi-bin/WebObjects/ACCSite.woa/wa/Nav/goTo?cm=191>.
- [14] Gomes, Álvaro., *Identificação e apoio à selecção de estratégias de controlo directo de cargas Uma abordagem multiobjectivo evolucionária*. Coimbra : s.n., 2004.
- [15] , Centro de Referencia Virtual. *Máquinas Térmicas*. [Online] [Citação: 10 de 01 de 2012.] [http://crv.educacao.mg.gov.br/sistema\\_crv/index.asp?id\\_projeto=27&ID\\_OBJETO=58363&ti po=ob&cp=000000&cb=](http://crv.educacao.mg.gov.br/sistema_crv/index.asp?id_projeto=27&ID_OBJETO=58363&ti po=ob&cp=000000&cb=).
- [16] Borges, Bruno, et al., *Simulação Transiente de Refrigeradores Domésticos: Uma Abordagem Quase-Estática Semi-Empírica*. Paraíba : s.n., 2010.

[17] Pereira, Luiz., *Simulação Semi-Empirica de Refrigeradores Domésticos*. Florianópolis : s.n., 2009.

## 10. Anexos

### A. Figuras referentes aos cenários do caso de estudo A de AEA

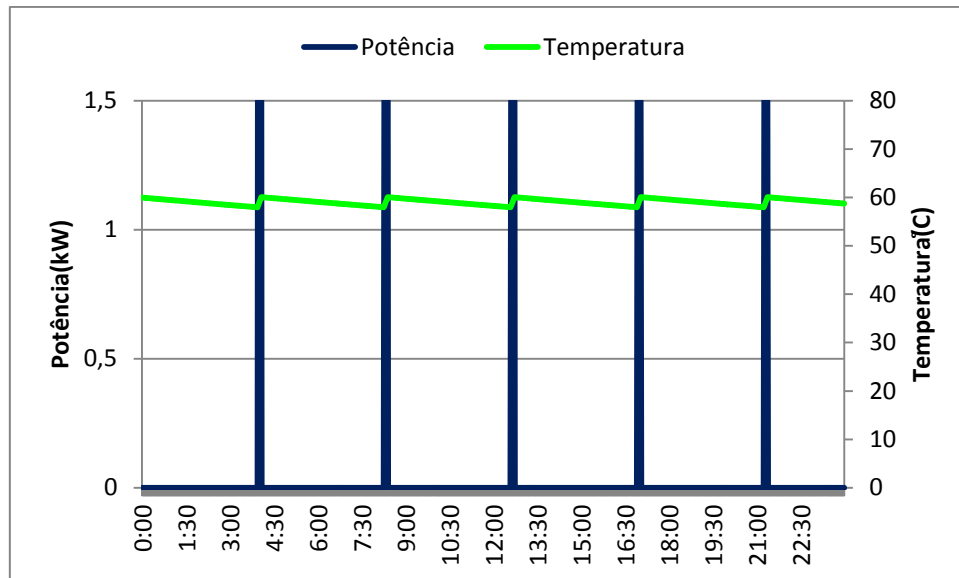


Figura A- 1 Variação da procura e da temperatura da água ao longo do tempo (cenário 3)

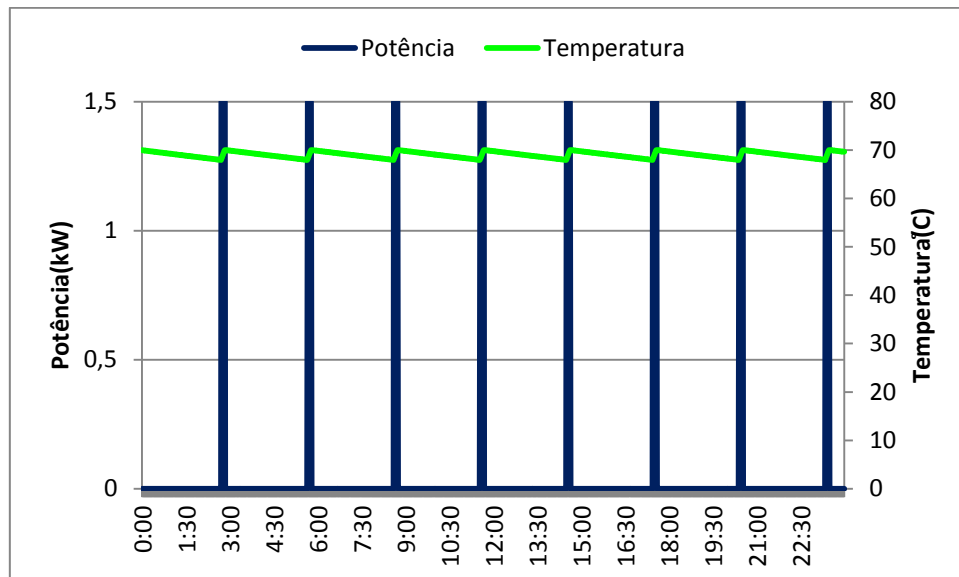


Figura A- 2 Variação da procura e da temperatura da água ao longo do tempo (cenário 4)

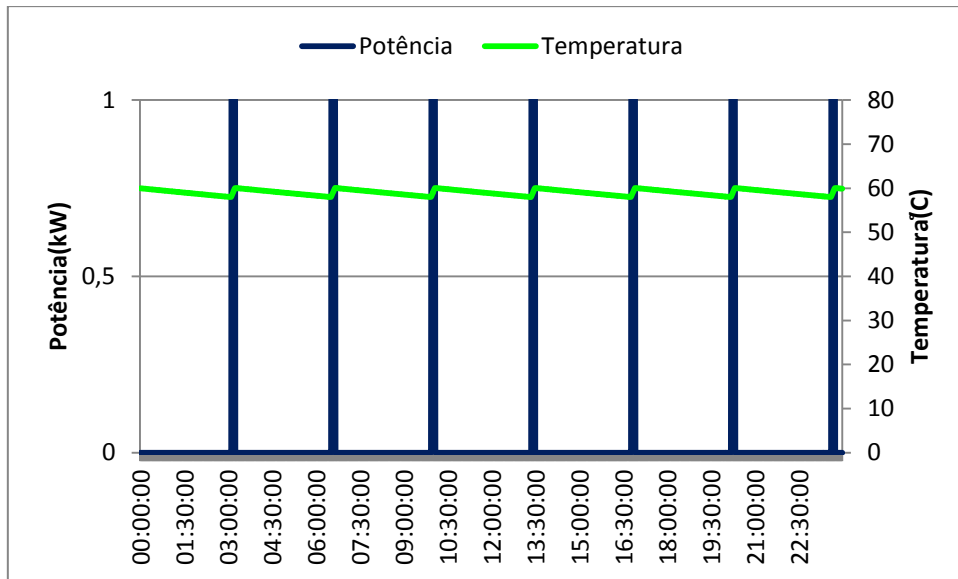


Figura A- 3 Variação da procura e da temperatura da água ao longo do tempo (cenário 5)

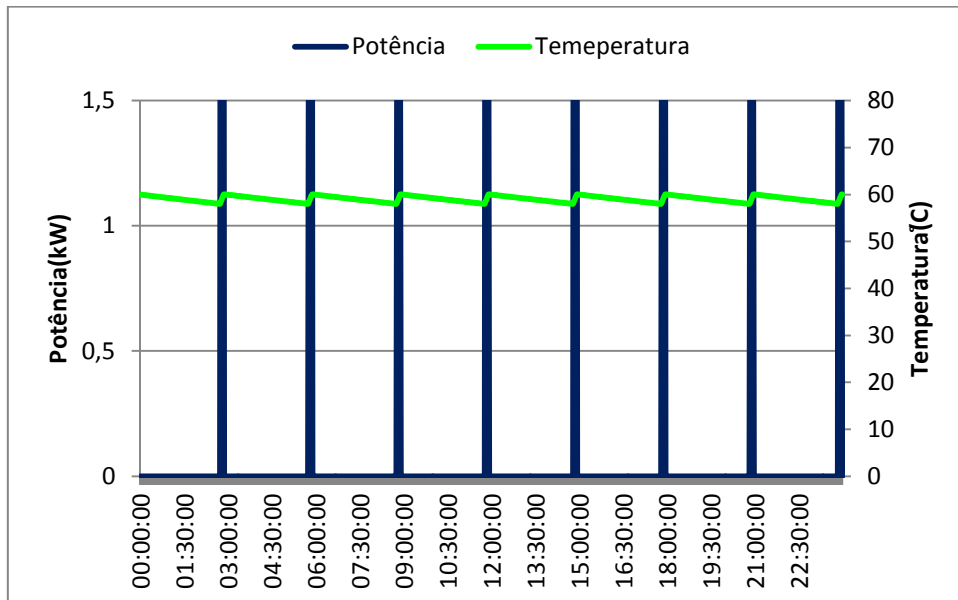


Figura A- 4 Variação da procura e da temperatura da água ao longo do tempo (cenário 6)

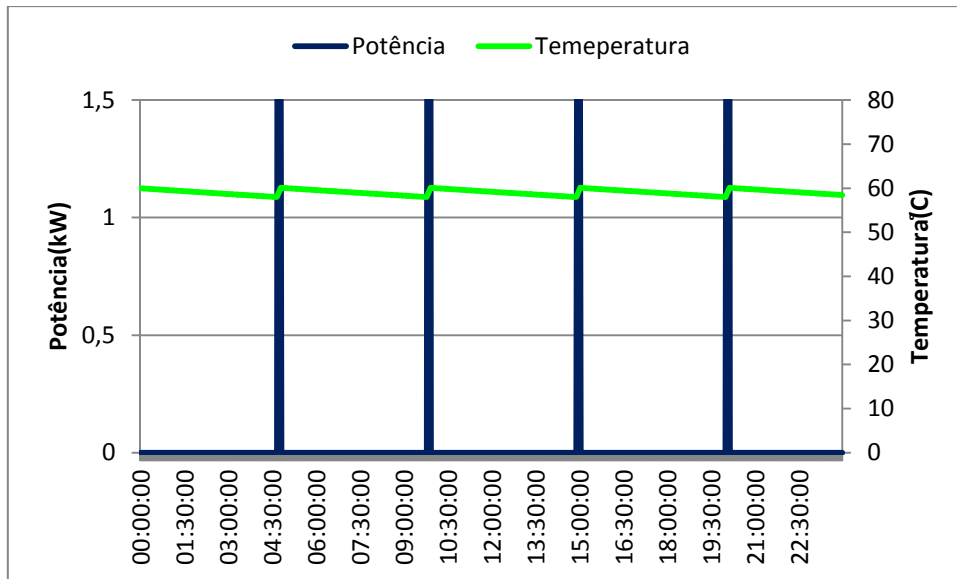


Figura A- 5 Variação da procura e da temperatura da água ao longo do tempo (cenário 7)

## B. Dados utilizados na determinação do coeficiente global de transferência de calor

Tabela B- 1 Dados recolhidos experimentalmente para os diferentes intervalos

	Intervalos							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Potência	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
	36	72	90	114	30	24	0	90
	144	144	144	144	144	144	156	144
	138	138	132	132	138	138	138	138
	138	138	132	132	138	132	132	138
	132	132	132	132	132	132	132	132
	132	132	132	132	132	132	132	132
	84	54	30	6	90	96	90	42

### C. Cenário de variações de banda morta para AEA

Relativamente à VBM apresentam-se os 7 cenários de estudo.

#### Cenário 1

Neste cenário não há variações de banda morta, ou seja, é um cenário sem qualquer medida de GP de forma a servir de cenário base para comparação.

#### Cenário 2

Neste cenário é feita uma variação de  $-20^{\circ}\text{C}$  entre as 0 horas e as 6 horas seguida de uma variação de  $+3^{\circ}\text{C}$  das 11 horas às 12 horas, outra das 18 horas até às 19 horas de  $+5^{\circ}\text{C}$  e por fim das 21 horas até às 23 horas de  $-3^{\circ}\text{C}$ .

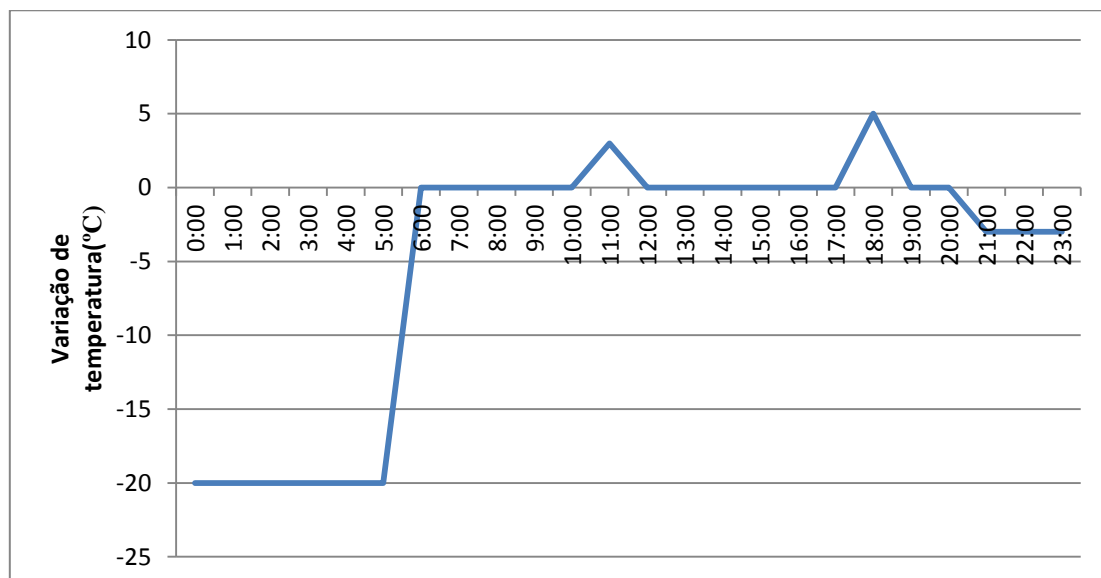


Figura C- 1 VBM cenário 2

#### Cenário 3

Neste cenário é feita uma variação de  $-10^{\circ}\text{C}$  entre as 0 horas e as 6 horas seguida de uma variação de  $+2^{\circ}\text{C}$  das 11 horas às 12 horas, outra das 18 horas até às 19 horas de  $+3^{\circ}\text{C}$  e por fim das 21 horas até às 23 horas de  $-1^{\circ}\text{C}$ .

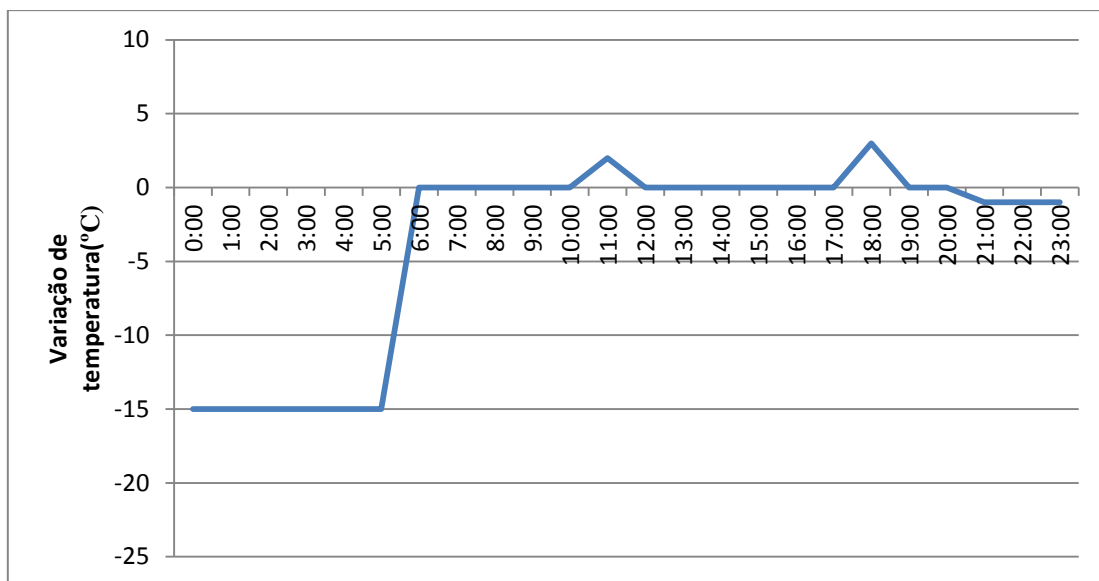


Figura C- 2 VBM cenário 3

### Cenário 4

Neste cenário é feita uma variação de  $-10^{\circ}\text{C}$  entre as 0 horas e as 6 horas seguida de uma variação das 18 horas até às 19 horas de  $+2^{\circ}\text{C}$ .

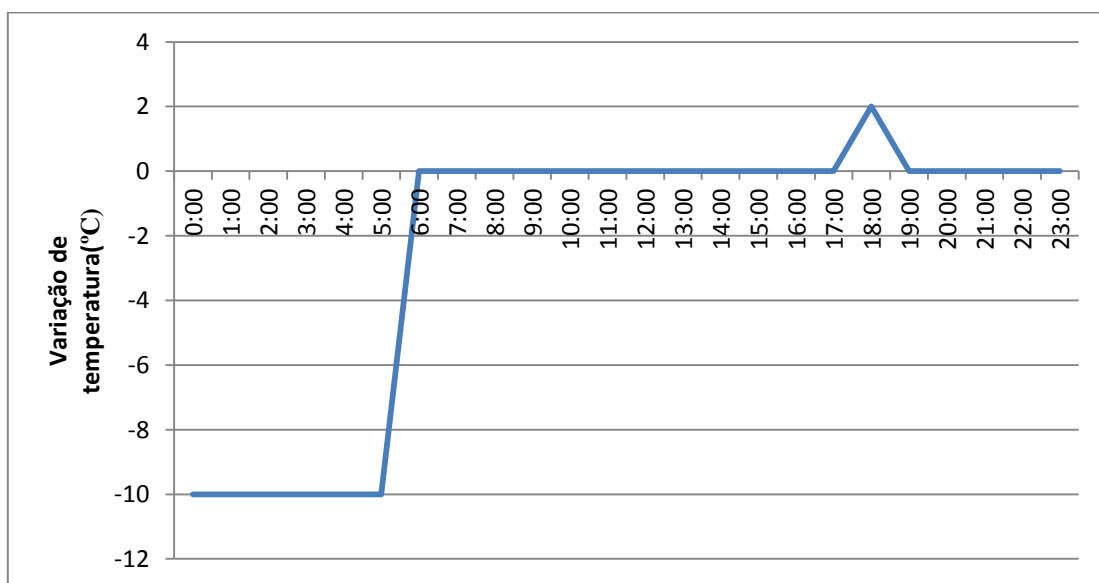


Figura C- 3 VBM cenário 4

### Cenário 5

Neste cenário é feita uma variação de  $-10^{\circ}\text{C}$  entre as 0 horas e as 6 horas.

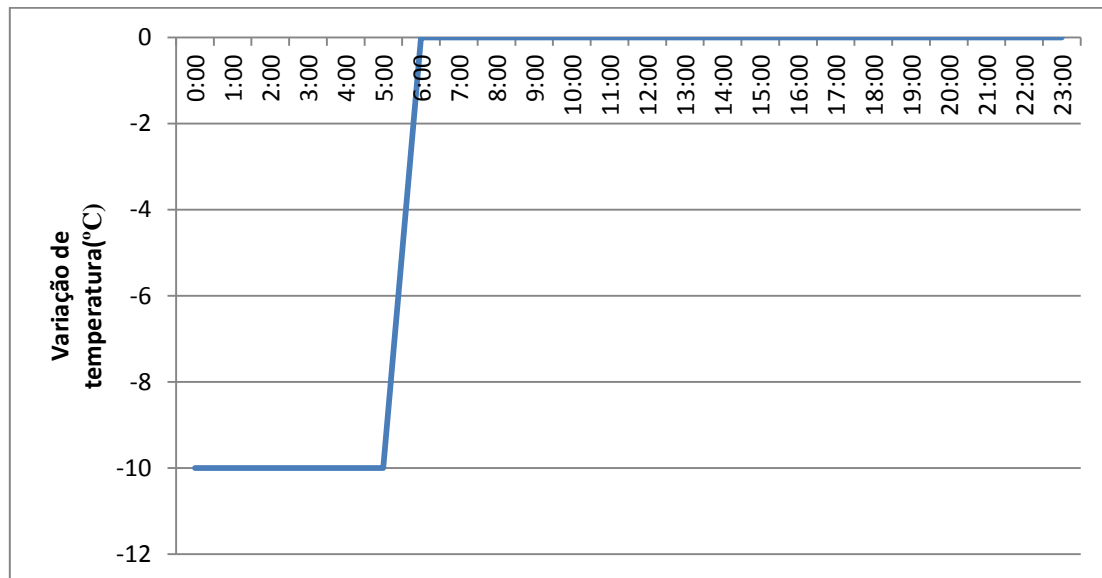


Figura C- 4 VBM cenário 5

### Cenário 6

Neste cenário é feita uma variação de  $-15^{\circ}\text{C}$  entre as 0 horas e as 6 horas seguida de uma variação de  $-3^{\circ}\text{C}$  das 11 horas até às 12 horas, outra das 18 horas até às 19 horas de  $-3^{\circ}\text{C}$  e por fim das 21 horas até às 23 horas de  $-3^{\circ}\text{C}$ .

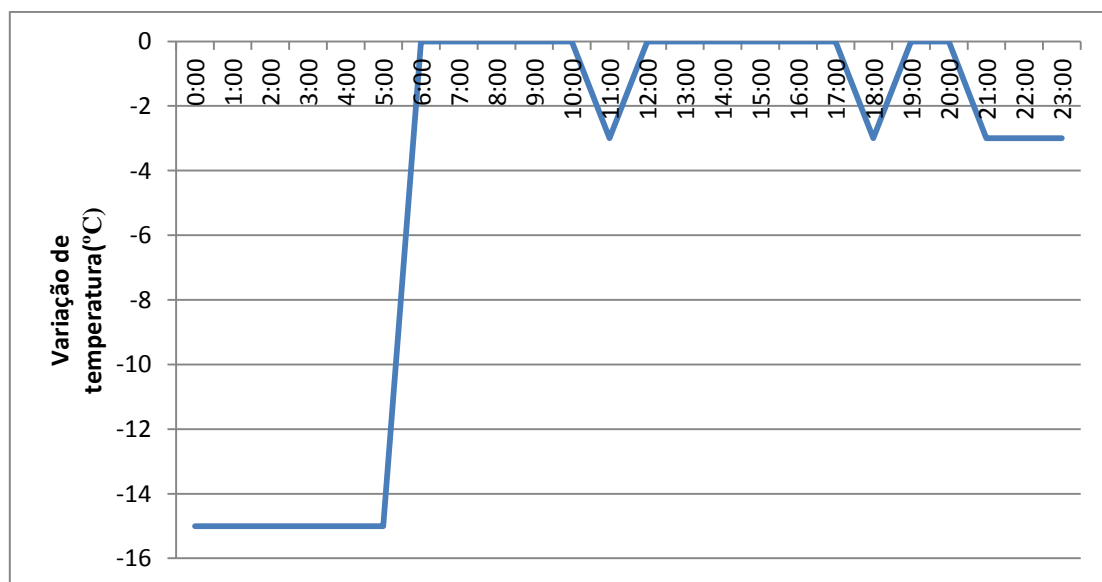


Figura C- 5 VBM cenário 6

### Cenário 7

Neste cenário é feita uma variação de  $-15^{\circ}\text{C}$  entre as 0 horas e as 6 horas seguida de uma variação de  $-5^{\circ}\text{C}$  das 11 horas às 12 horas, outra das 18 horas às 19 horas de  $-5^{\circ}\text{C}$  e por fim das 21 horas até às 23 horas de  $-5^{\circ}\text{C}$ .



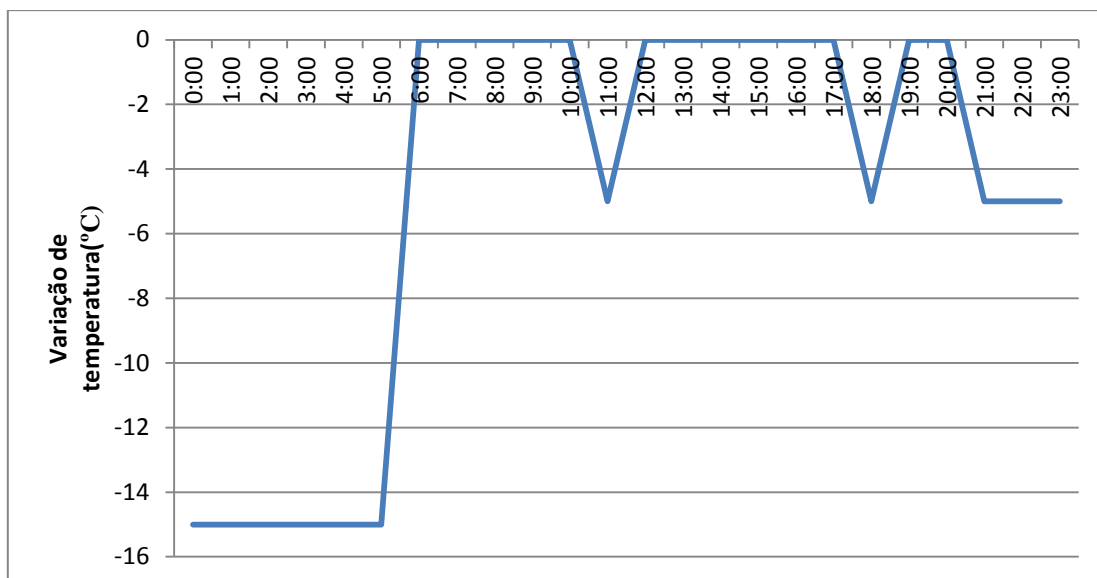


Figura C- 6 VBM cenário 7

## D. Cenários de variações de banda morta para FAD

### Cenário 1

Neste cenário não há variações de banda morta, ou seja, é um cenário sem qualquer medida de GP de forma a servir de cenário base para comparação.

### Cenário2

Neste cenário é feita uma variação de +1°C entre as 7 horas e as 8 horas e 30 minutos seguida de uma variação de +1°C das 11 horas até às 12 horas e 30 minutos e por fim das 19 horas às 20 horas de +1°C.

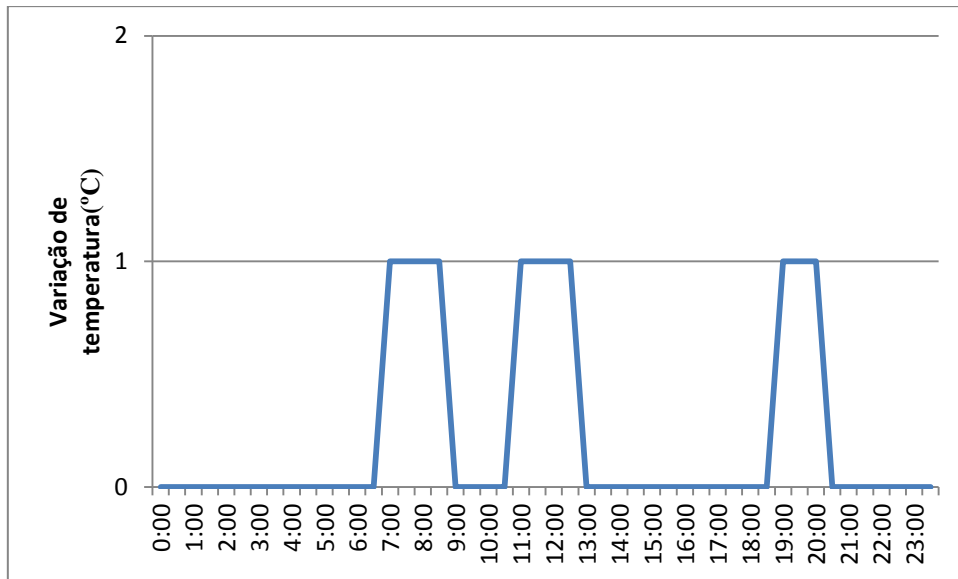


Figura D- 1 VBM cenário 2

### Cenário 3

Neste cenário é feita uma variação de  $-1^{\circ}\text{C}$  entre as 7 horas e as 8 horas e 30 minutos seguida de uma variação de  $-1^{\circ}\text{C}$  das 11 horas até às 12 horas e 30 minutos e por fim das 19 horas às 20 horas de  $-1^{\circ}\text{C}$ .

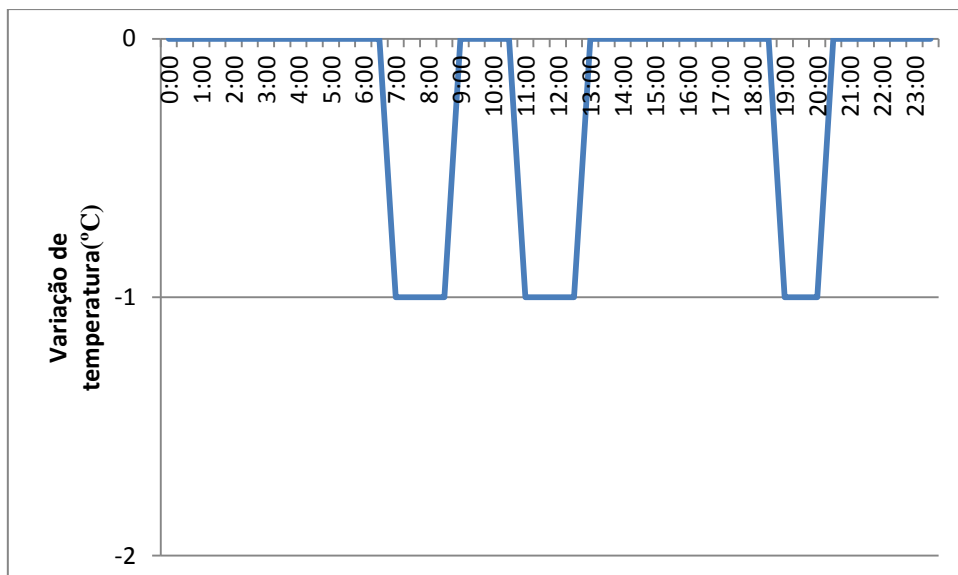


Figura D- 2 VBM cenário 3

#### Cenário 4

Neste cenário é feita uma variação de  $+2^{\circ}\text{C}$  entre as 7 horas e as 8 horas e 30 minutos seguida de uma variação de  $+2^{\circ}\text{C}$  das 11 horas até às 12 horas e 30 minutos e por fim das 19 horas às 20 horas de  $+2^{\circ}\text{C}$ .

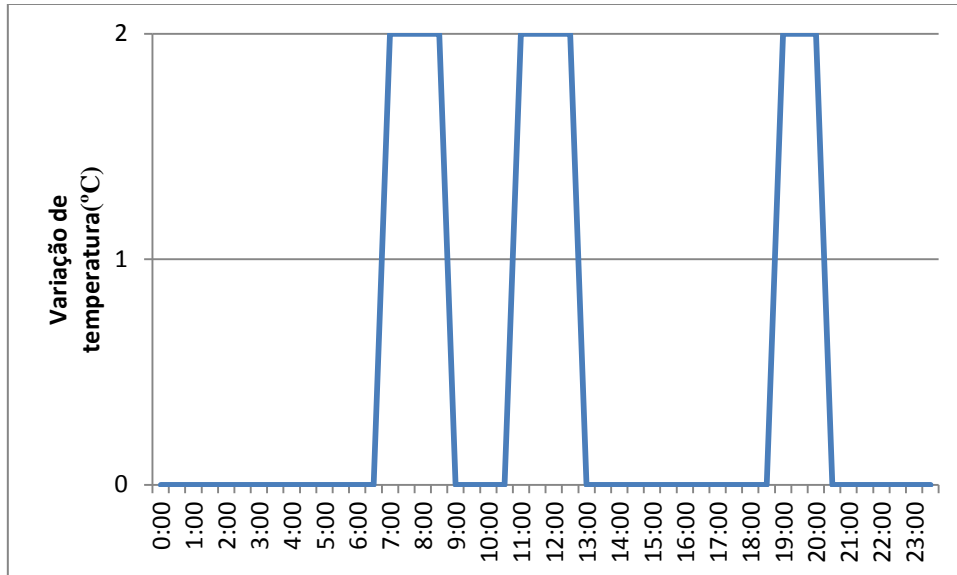


Figura D- 3 VBM cenário 4

#### Cenário 5

Neste cenário é feita uma variação de  $-2^{\circ}\text{C}$  entre as 7 horas e as 8 horas e 30 minutos seguida de uma variação de  $-2^{\circ}\text{C}$  das 11 horas até às 12 horas e 30 minutos e por fim das 19 horas às 20 horas de  $-2^{\circ}\text{C}$ .

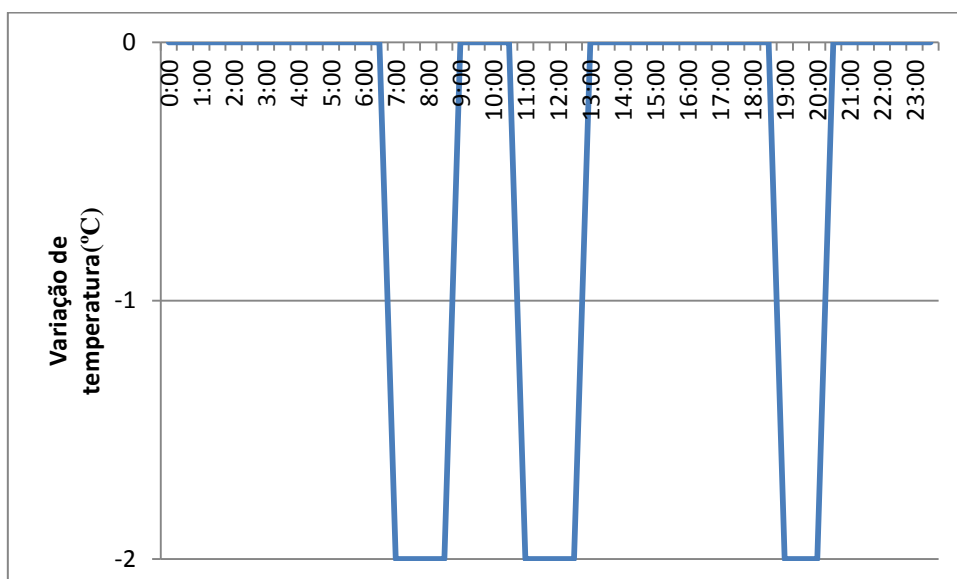


Figura D- 4 VBM cenário 5

### Cenário 6

Neste cenário é feita uma variação de  $+1^{\circ}\text{C}$  entre as 7 horas e as 8 horas e 30 minutos seguida de uma variação de  $-2^{\circ}\text{C}$  das 11 horas até às 12 horas e 30 minutos e por fim das 19 horas às 20 horas de  $+1^{\circ}\text{C}$ .

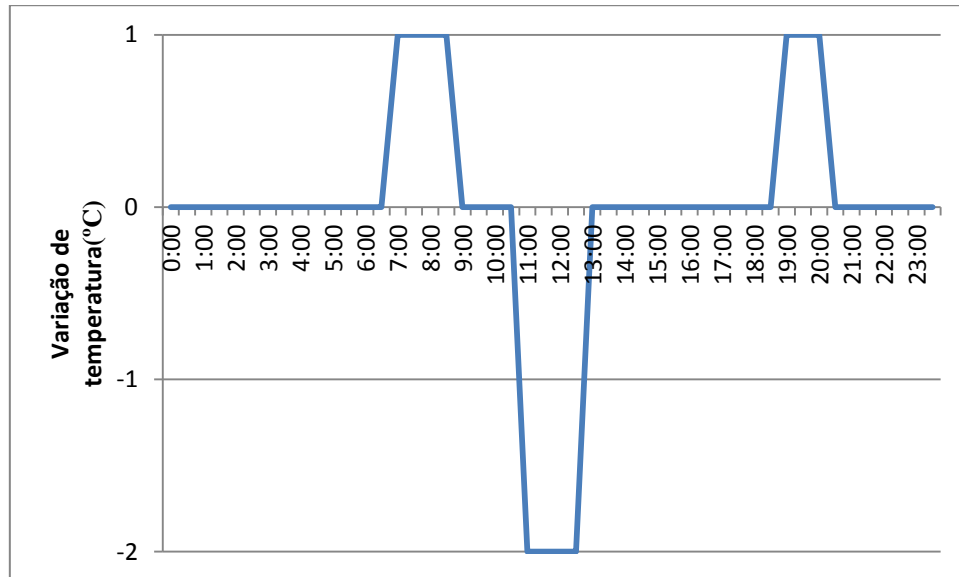


Figura D- 5 VBM cenário 6

### Cenário 7

Neste cenário é feita uma variação de  $-1^{\circ}\text{C}$  entre as 7 horas e as 8 horas e 30 minutos seguida de uma variação de  $-2^{\circ}\text{C}$  das 11 horas até às 12 horas e 30 minutos.

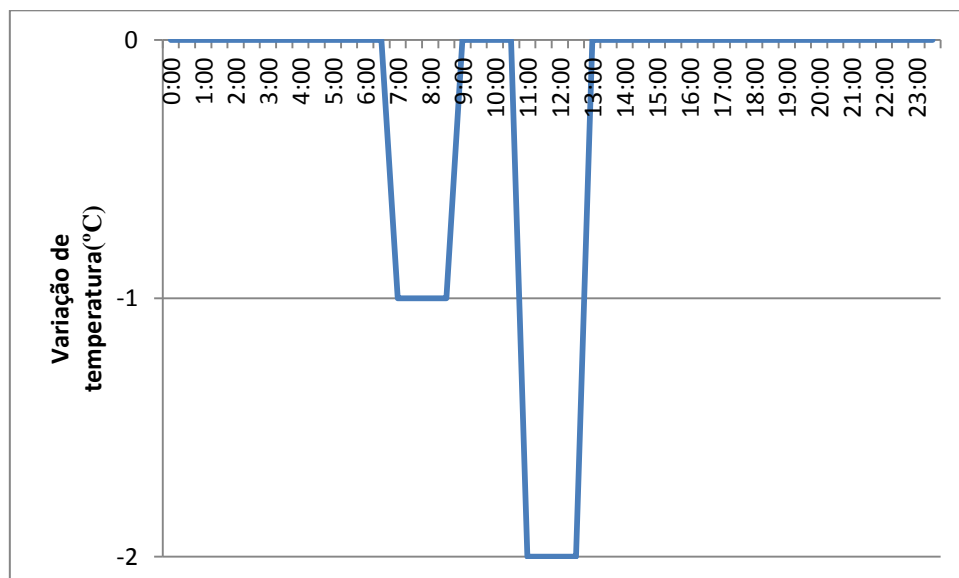


Figura D- 6 VBM cenário 7

### E. Cenários de cortes de alimentação para AEA e FAD

Na tabela estão descritos o tempo de corte ( $t_{off}$ ) e o tempo de não corte ( $t_{on}$ ) de cada cenário, onde o cenário 1 representa a simulação sem medidas de GP.

Tabela E- 1 Cenários de aplicação de CA

Cenários	$t_{on}$	$t_{off}$
1	0	0
2	20	10
3	15	5
4	20	5
5	20	15
6	15	10
7	10	5