

UNIVERSIDADE DE COIMBRA
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Análise dos efeitos da utilização do
serviço de energia nos impactos de ações
de gestão de cargas**

Luís Manuel Lopes Morais

Orientadores:

Dr. Álvaro Filipe Peixoto Cardoso de Oliveira Gomes

Dr. Paulo Filipe de Almeida Ferreira Tavares

Júri:

Dr. António Paulo Mendes Breda Dias Coimbra (presidente)

Dr. Luís Miguel Pires Neves (vogal)

Dr. Álvaro Filipe Peixoto Cardoso de Oliveira Gomes (orientador)

fevereiro de 2020

Este trabalho teve apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) e do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) via COMPETE – Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI), no âmbito dos projetos T4ENERTEC (POCI-01-0145-FEDER-029820) e UID/MULTI/00308/2020.

This work has been supported by the European Regional Development Fund through the COMPETE 2020 Program and FCT, under projects UID/MULTI/00308/2020, and "T4-ENERTEC" POCI-01-0145-FEDER-029820.

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de deixar uma palavra de agradecimento ao Professor Doutor Álvaro Filipe Peixoto Cardoso de Oliveira Gomes e ao Professor Paulo Filipe de Almeida Ferreira Tavares pela orientação, pelas críticas, disponibilidade e pelo saber transmitido durante a realização deste trabalho.

Gostava também de deixar um enorme agradecimento ao Augusto, Paula e Ricardo pelo apoio incondicional, incentivo e enorme ajuda na superação dos obstáculos desta longa caminhada. Obrigado pai, mãe e mano por me mostrarem o significado de superação.

Quero agradecer aos meus avós José, Fernanda, Manuel e Lurdes pelo modelo de trabalho e esforço que me transmitiram ao longo dos anos. A vocês dedico este trabalho.

Não poderia deixar de agradecer à minha namorada Beatriz por todo o esforço, paciência, compreensão e disponibilidade demonstrada não só durante esta fase, mas em todas as vivências do meu percurso académico. Deixo o meu mais sincero obrigado e fica a certeza de que sem ti este trabalho não era possível.

Por fim, quero agradecer à malta do LGE, do Calhabé, do terceiro esquerdo e a todos os que nos últimos 5 anos partilharam comigo bons e maus momentos, bons e maus resultados. Obrigado a todos vocês pela amizade e companheirismo transmitidos nestes anos.

Resumo

Com o crescente aumento do consumo energético e com a preocupação de aumentar a produção de energia a partir de fontes renováveis, o equilíbrio entre a produção e a procura de energia tem sido cada vez mais desafiante. Devido à natureza variável e intermitente das fontes de energia renováveis, torna-se útil avaliar a possibilidade de uma participação mais ativa de recursos que existam do lado da procura, nomeadamente no setor residencial.

Neste contexto, o presente trabalho teve como principal objetivo a simulação de ações de gestão de carga sobre equipamentos de climatização focadas em estratégias de controlo direto e alterações de *setpoint* do termóstato sob diferentes cenários climáticos e sob diferentes perfis de utilização do serviço de energia, associados a hábitos pré-definidos dos ocupantes. Para cada simulação efetuou-se uma análise aos valores de potência dos diagramas de carga, bem como uma avaliação às variações de temperatura interior implicadas pela implementação das diferentes ações. Para cumprir estes objetivos procedeu-se à construção de um modelo representativo de um alojamento habitacional com características construtivas típicas do setor residencial português com base na ferramenta de simulação dinâmica Energy Plus.

Através dos dados de simulação recolhidos foi possível averiguar que as estratégias de controlo direto nem sempre asseguram o conforto dos utilizadores do equipamento. Já em estratégias de reparametrização, este conforto pode ser assegurado à custa de uma redução de potência disponibilizada da carga para a rede. Conclui-se, ainda, que tanto os valores de potência disponibilizados, como a qualidade de serviço consequente da aplicação das ações de gestão de carga, podem depender fortemente dos hábitos de utilização do serviço por parte dos residentes.

Palavras Chave: Edifícios Residenciais, Gestão do lado da procura, Resposta da procura, Controlo direto, Cargas térmicas, Energy Plus

Abstract

With the continuous increase in energy consumption and the concern to increase energy production from renewable sources, the balance between energy production and demand has been increasingly challenging. Due to the variable and intermittent nature of renewable energy sources, it is useful to assess the possibility of a more active participation of demand side resources, namely in the residential sector.

*In this context, the present work had as main objective the simulation of demand response actions focused on direct control and changes to the thermostat setpoint applied on air conditioning equipment under different climatic scenarios and under different service usage profiles associated to pre-defined occupant habits. For each simulation, the load diagram was analyzed and an evaluation of the temperature variation due to the implementation of different actions was made. In order to fulfill these objectives, a representative model of a residential building with typical portuguese construction characteristics was built, based on the dynamic simulation tool *Energy Plus*.*

Through the simulation data collected it was possible to verify that the direct control strategies do not always ensure the comfort of the equipment's users. In thermostat changes strategies, this comfort can be ensured at the expense of a reduction in the power available from the load to the grid. It is also concluded that both power availability values, as well as the quality of the service resulting from the application of load management actions, can strongly depend on the use habits of the residents.

Key Words: *Residential buildings, Demand side management, Demand response, Direct control, Thermal loads, Energy Plus*

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	v
Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xiv
Lista de Acrónimos	xv
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos do Trabalho	2
1.3 Estrutura do Trabalho	3
2 Revisão de Literatura	5
2.1 Comportamento Passivo de Edifícios	5
2.2 Medidas Solares Passivas	7
2.3 Gestão do Lado da Procura e a Utilização dos Serviços de Energia	8
2.4 Definição de Flexibilidade Energética em Edifícios Residenciais	9
2.5 Modelação e Simulação Energética de Edifícios	10
2.6 Software de Simulação Dinâmica <i>Energy Plus</i>	11
2.6.1 Princípio de Cálculo	12
2.6.2 Condições para Realização de Simulações	12

2.6.3	Leitura dos Dados de Saída	13
3	Caracterização do Modelo de Estudo	15
3.1	Caracterização Geométrica	15
3.2	Caracterização das Soluções Construtivas	17
3.3	Ganhos Internos e Taxa de Renovação do Ar Interior	19
3.4	Sistema de Climatização	20
4	Procedimentos e Análise de Resultados	23
4.1	Comportamento Passivo	23
4.2	Simulação de Ações de Gestão de Carga	25
4.2.1	Estação de Aquecimento	26
4.2.2	Estação de Arrefecimento	34
4.3	Efeito da utilização regular do serviço de climatização nos impactos das ações de gestão de carga	40
4.3.1	Estação de Aquecimento	41
4.3.2	Estação de Arrefecimento	45
5	Conclusões	49
5.1	Sugestões para Trabalho Futuro	51
	Bibliografia	53
	A Soluções Construtivas	57
	B Gráficos de simulação	59
B.1	Estação de Aquecimento	59
B.2	Estação de Arrefecimento	62

Índice de Figuras

2.1	Diagrama representativo dos diferentes fluxos de calor associados aos edifícios residenciais [5].	6
2.2	Exemplo linear da resposta térmica de um edifício segundo uma excitação externa. [4].	7
3.1	Planta do modelo de estudo representada a duas dimensões	16
4.1	Comportamento térmico passivo do modelo nos meses: (a) fevereiro; (b) maio; (c) agosto; (d) outubro.	24
4.2	Perfis de potência e temperatura interior para uma utilização do equipamento com <i>setpoint</i> nos 20°C - estação aquecimento.	27
4.3	Diagrama explicativo de análise aos diagramas de carga das estratégias de controlo direto.	28
4.4	Perfis de potência e temperatura interior durante o evento de DR para a estratégia 10on+5off - estação aquecimento.	28
4.5	Perfis de potência e temperatura interior durante o evento de DR para a estratégia 20on+10off - estação aquecimento.	29
4.6	Diagrama explicativo de análise aos diagramas de carga das estratégias de reparametrização.	30
4.7	Perfis de potência e temperatura interior durante o evento de DR para a estratégia 20n+10a - estação aquecimento.	31
4.8	Perfis de potência e temperatura interior durante o evento de DR para a estratégia 30n+15a - estação aquecimento.	32

4.9	Perfis de potência e temperatura interior para uma utilização do equipamento com <i>setpoint</i> nos 24°C - estação arrefecimento.	34
4.10	Perfis de potência e temperatura interior durante o evento de DR para a estratégia 10on+5off - estação arrefecimento.	35
4.11	Perfis de potência e temperatura interior durante o evento de DR para a estratégia 20on+10off - estação arrefecimento.	36
4.12	Perfis de potência e temperatura interior durante o evento de DR para a estratégia 20n+10a - estação arrefecimento.	37
4.13	Perfis de potência e temperatura interior durante o evento de DR para a estratégia 30n+15a - estação arrefecimento.	38
4.14	Amplitude dos intervalos de temperatura interior segundo o número de dias anteriores com utilização do serviço consequente da aplicação das estratégias: (a)10on+5off; (b)20on+10off - estação aquecimento. .	42
4.15	Amplitude dos intervalos de temperatura interior segundo o número de dias anteriores com utilização do serviço consequente da aplicação das estratégias: (a)10on+5off; (b)20on+10off - estação arrefecimento.	45
B.1	Perfis de potência e temperatura interior para uma utilização do equipamento com <i>setpoint</i> nos 20°C após 7 dias de utilização do serviço - estação aquecimento.	59
B.2	Perfis de potência e temperatura interior durante o evento de DR para a estratégia 10on+5off após 7 dias de utilização do serviço - estação aquecimento.	60
B.3	Perfis de potência e temperatura interior durante o evento de DR para a estratégia 20on+10off após 7 dias de utilização do serviço - estação aquecimento.	60
B.4	Perfis de potência e temperatura interior durante o evento de DR para a estratégia 20n+10a após 7 dias de utilização do serviço - estação aquecimento.	61

B.5	Perfis de potência e temperatura interior durante o evento de DR para a estratégia 30n+15a após 7 dias de utilização do serviço - estação aquecimento.	61
B.6	Perfis de potência e temperatura interior para uma utilização do equipamento com <i>setpoint</i> nos 24°C após 5 dias de utilização do serviço - estação arrefecimento.	62
B.7	Perfis de potência e temperatura interior durante o evento de DR para a estratégia 10on+5off após 5 dias de utilização do serviço - estação arrefecimento.	62
B.8	Perfis de potência e temperatura interior durante o evento de DR para a estratégia 20on+10off após 5 dias de utilização do serviço - estação arrefecimento.	63
B.9	Perfis de potência e temperatura interior durante o evento de DR para a estratégia 20n+10a após 5 dias de utilização do serviço - estação arrefecimento.	63
B.10	Perfis de potência e temperatura interior durante o evento de DR para a estratégia 30n+15a após 5 dias de utilização do serviço - estação arrefecimento.	64

Índice de Tabelas

3.1	Características geométricas do modelo de estudo. [25]	15
3.2	Características geométricas e condições de fronteira da zona térmica "Quarto1".	17
3.3	Resistências térmicas dos elementos que delimitam as zonas térmicas do modelo.	18
3.4	Caracterização do envidraçado com e sem proteções ativas.	18
3.5	Períodos e horários de ativação dos dispositivos de sombreamento. . .	19
3.6	Horários e atividades de ocupação.	20
3.7	Horários e tipo de iluminação.	20
3.8	Potências nominais e coeficientes de desempenho referentes ao equipamento de climatização.	21
4.1	Descrição das diferentes estratégias de controlo de carga utilizadas. . .	26
4.2	Descrição numérica dos resultados obtidos referentes aos diagramas de carga de cada estratégia - estação aquecimento.	33
4.3	Análise à qualidade do serviço obtido através da implementação das diferentes estratégias - estação aquecimento.	33
4.4	Descrição numérica dos resultados obtidos referentes aos diagramas de carga de cada estratégia - estação arrefecimento.	39
4.5	Resumo da qualidade do serviço obtido através da implementação das diferentes estratégias - estação arrefecimento.	40
4.6	Descrição numérica dos resultados obtidos referentes aos diagramas de carga de cada estratégia após 7 dias de utilização do serviço - estação aquecimento.	44

4.7	Resumo da qualidade do serviço obtido através da implementação das diferentes estratégias após 7 dias de utilização do serviço - estação aquecimento.	44
4.8	Descrição numérica dos resultados obtidos referentes aos diagramas de carga de cada estratégia após 5 dias de utilização do serviço - estação arrefecimento.	47
4.9	Resumo da qualidade do serviço obtido através da implementação das diferentes estratégias após 5 dias de utilização do serviço - estação arrefecimento.	48
A.1	Solução Construtiva: Paredes Exteriores (construção do exterior para o interior).	57
A.2	Solução Construtiva: Paredes Interiores (construção do exterior para o interior).	57
A.3	Solução Construtiva: Cobertura (construção do exterior para o interior).	58
A.4	Solução Construtiva: Pavimento (construção do exterior para o interior).	58

Lista de Acrónimos

ADENE	Agência para a Energia.
AIE	Agência Internacional de Energia.
AQS	Águas Quentes Sanitárias.
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.</i>
AVAC	Aquecimento Ventilação e ar-condicionado.
COP	<i>Coefficient of Performance</i> - Coeficiente de Desempenho.
CSV	<i>Comma Separated Values.</i>
DR	<i>Demand Response</i> - Resposta da procura.
DSM	<i>Demand Side Management</i> - Gestão do lado da procura.
EER	<i>Energy Efficiency Ratio</i> - Relação de Eficiência Energética.
EMS	<i>Energy Management System</i> - Sistemas de gestão energética.
EPW	<i>Energy Plus Weather.</i>
IDF	<i>Input Data File.</i>
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
nZEB	<i>Nearly Zero Energy Building</i> - Edifício com necessidades quase nulas de energia.
REH	Regulamento dos Edifícios de Habitação.
UE	União Europeia.
VRF	<i>Variable Refrigerant Flow.</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

Mesmo com todos os esforços em termos de promoção e disseminação de tecnologias e práticas mais eficientes, o consumo final de energia tem vindo a aumentar. Tal deve-se quer a um aumento da população, quer ao aumento do nível de vida que tem feito aumentar o número de equipamentos de utilização final de energia [1]. Para além da questão da utilização dos recursos, existe também o facto do setor energético ser um dos que mais impactos causa a nível ambiental. Assim sendo, urge tomar medidas que diminuam a taxa de delapidação dos recursos e medidas que permitam diminuir o impacto da sua utilização, neste caso, quer através da mitigação, quer da mudança de fontes primárias. Neste contexto, a União Europeia (UE) emitiu uma série de diretivas, nomeadamente, a diretiva 2010/31, onde surge, pela primeira vez, o conceito *Nearly Zero Energy Building* (nZEB). Fica a cargo de cada estado membro da UE definir e implementar o conceito de nZEB, segundo as suas legislações. No entanto, de acordo com a Diretiva Europeia de 2010, um nZEB será "um edifício com um desempenho energético muito elevado, onde as suas necessidades de energia quase nulas deverão ser cobertas em grande medida por energia proveniente de fontes renováveis, incluindo energia proveniente de fontes renováveis produzida no local ou nas proximidades" [2].

A forma como se usam os diversos equipamentos de utilização final, que permitem aos ocupantes dos edifícios usufruir dos serviços de energia, pode ter também um papel rele-

vante quer na quantidade de energia utilizada, quer nos custos associados ao fornecimento desses serviços [3]. A utilização dos diversos equipamentos pode estar associada tanto a práticas/hábitos dos utilizadores, como aos algoritmos programados em *Energy Management Systems* (EMS's) existentes. Torna-se, pois, útil avaliar o impacto que diferentes formas de utilização dos serviços de energia possam ter em termos de energia utilizada e em termos económicos. Esta utilidade torna-se ainda mais importante em cenário de redes eléctricas inteligentes, onde uma das características diferenciadoras é a possibilidade de uma participação mais ativa de recursos que existam do lado da procura na gestão do sistema elétrico.

Essa participação estará, à partida, condicionada quer por questões de conforto ou outras que sejam colocadas por parte do utilizador, quer pela disponibilidade, em termos de potência pedida à rede, da própria carga. O conforto e a disponibilidade da carga dependem, em larga medida, da forma de utilização dos serviços de energia. Interessa, pois, avaliar de que forma a utilização dos serviços de energia por parte do utilizador influencia quer a disponibilidade das cargas, quer o impacto da aplicação de ações de gestão da procura, nomeadamente, ao nível do conforto.

1.2 Objetivos do Trabalho

Este trabalho propõe-se a dois objetivos principais:

- Avaliar o impacto de ações de gestão de carga (aplicadas em equipamentos de ar-condicionado) sobre os valores de potência dos diagramas de carga e variações dos perfis de temperatura interior;
- Avaliar de que forma diferentes utilizações do serviço de energia, normalmente associadas a hábitos dos ocupantes, influenciam os impactos das ações implementadas.

Para concretizar estes objetivos, e através da ferramenta de simulação Energy Plus, procedeu-se à construção de um modelo representativo de um alojamento habitacional característico do território português. São, depois, criados diversos cenários em termos de utilização do serviço de energia e de ações de gestão de carga e avaliados os respetivos impactos ao nível do diagrama de carga e qualidade de serviço prestada.

1.3 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos distintos:

- Neste primeiro capítulo é realizado um enquadramento relativo ao tema da dissertação;
- No segundo capítulo é realizada uma revisão de literatura acerca do comportamento térmico e modelação de edifícios. É feita uma abordagem sobre o tema de gestão do lado da procura e dos seus principais campos de atuação. Por último, é ainda feita uma descrição sucinta das principais características do software Energy Plus;
- No terceiro capítulo são descritas as principais características e abordagens utilizadas para a construção do cenário de simulação;
- No quarto capítulo é feita uma análise ao comportamento térmico passivo da habitação, por forma a identificar quais os cenários favoráveis ao uso do serviço de climatização. São também expostos os cenários criados em termos de utilização do serviço de energia e das ações de gestão da procura simuladas, onde é feita uma análise detalhada referente aos resultados obtidos.
- No quinto e último capítulo são tecidas as conclusões face aos resultados de simulação obtidos.

Capítulo 2

Revisão de Literatura

2.1 Comportamento Passivo de Edifícios

O comportamento térmico dos edifícios e a energia utilizada para satisfazer as necessidades térmicas dos ocupantes é um processo definido pela interação complexa dos ganhos, perdas e armazenamento de calor por parte dos materiais construtivos.

Antes de mais, interessa referir e quantificar quais as formas de fluxo de calor associadas ao balanço térmico de um qualquer edifício (figura 2.1).

Um dos fluxos caloríficos intervenientes neste balanço são os ganhos de calor internos, maioritariamente emitidos por todo o tipo de equipamento elétrico associado à operação quotidiana do edifício (equipamentos de cozinha, aparelhos informáticos...), tecnologias de iluminação e metabolismo relacionado com a atividade dos ocupantes do espaço. [4]

Existem também as transferências de calor associadas ao fenómeno de convecção. Este fluxo de calor é resultante da movimentação de fluídos, neste caso, de uma massa de ar, com deslocação das zonas mais quentes para as zonas mais frias. Por exemplo, este fluxo pode estar associado às ações de ventilação (mecânicas ou naturais) e à infiltração do ar através dos elementos pertencentes à envolvente. [4]

Por outro lado, a radiação está associada ao facto de qualquer corpo com temperatura acima do zero absoluto emitir radiação eletromagnética. [4]

Por fim, existe a transmissão de calor. No caso dos edifícios, as perdas/ganhos por transmissão, de uma forma resumida, referem-se ao processo físico da transferência de calor

por condução, através dos materiais constituintes da envolvente. [4]

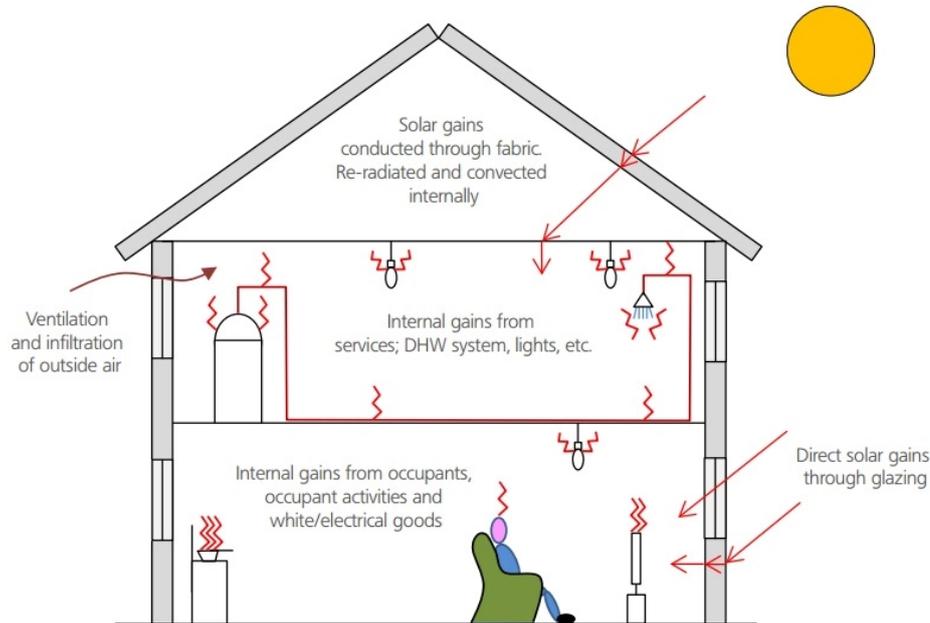


Figura 2.1: Diagrama representativo dos diferentes fluxos de calor associados aos edifícios residenciais [5].

Como se sabe, estas trocas de calor, excetuando os ganhos internos, são fortemente influenciadas pelas condições climáticas. Num contexto de análise do balanço térmico de edifícios, estas condições são denominadas de condições de fronteira externas. No caso da transferência energética por transmissão, o fluxo de calor por condução através dos elementos opacos, vai apresentar um desfasamento temporal em relação à excitação externa. Algum do calor que atravessa o material vai ser absorvido e armazenado dentro da construção (massa térmica). O resultado deste acontecimento é uma redução da amplitude e desfasamento temporal dos valores de temperatura interior em relação aos valores de temperatura exterior, que é designado, por muitos dos estudos, como o fenómeno da inércia térmica dos edifícios (figura 2.2). [4]

Estes valores de amplitude e desfasamento são fortemente dependentes de algumas propriedades termofísicas dos materiais. De uma maneira simplificada, a quantidade de calor armazenada está associada à densidade (ρ) e ao calor específico (c) do material, enquanto

que a taxa de calor transferida pela estrutura está associada à condutividade térmica (λ). [4]

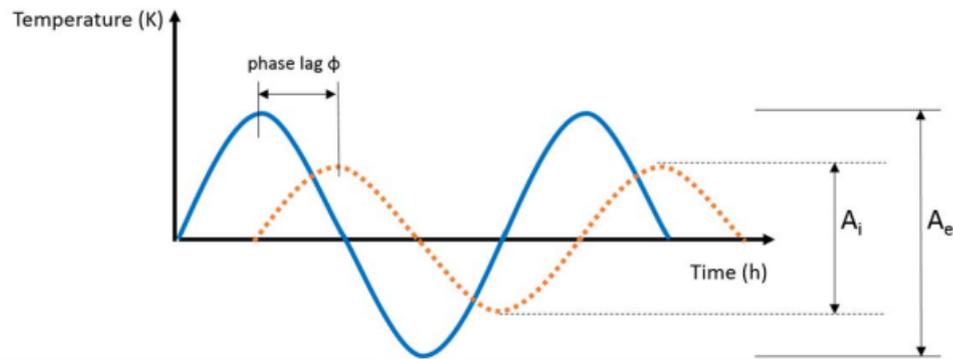


Figura 2.2: Exemplo linear da resposta térmica de um edifício segundo uma excitação externa. [4].

2.2 Medidas Solares Passivas

Através da implementação de tecnologias eficientes na envolvente do edifício e do controlo dos ganhos solares, é possível reduzir significativamente o uso dos sistemas ativos de climatização. [6]

O tipo de isolamento das fachadas e a sua respetiva aplicação permite um controlo das condições térmicas do interior do edifício, através da gestão da transferência de energia [7]. No caso de paredes de pano simples, e num contexto de reabilitação energética, o isolamento é preferencialmente colocado pelo exterior, uma vez que permite conservar a inércia térmica das paredes [8]. No caso de paredes duplas, o isolamento térmico é normalmente aplicado pela incorporação dos materiais isolantes na caixa de ar. Um dos materiais isolantes mais utilizados é o poliestireno expandido (EPS), que devido às suas características de baixa condutividade térmica e pouca capacidade de armazenamento de calor, confere trocas muito baixas de calor entre a superfície interior e exterior da envolvente [9].

Os vãos envidraçados das habitações são os principais responsáveis pelos ganhos solares. Antes de mais, interessa referir quais as principais propriedades térmicas associadas aos elementos de fenestração. Sendo parte da envolvente, estes elementos estão expostos a trocas de calor por condução. Esta troca de calor é quantificada pelo coeficiente de transmissão térmica (U_w). Quanto menor for este parâmetro, melhor será a capacidade de isolamento

da janela. Por outro lado, o fator solar dos vidros (g_v) é obtido através da relação entre a energia que é transmitida para o interior de espaço e a energia exterior incidente. Quanto maior for o valor de g_v , maiores serão os ganhos solares. [8]

A utilização e colocação eficiente destes elementos permite aproveitar ao máximo a iluminação natural exterior. Porém, devido aos seus elevados valores de transmissão térmica, são elementos que se podem traduzir em elevadas perdas/ganhos se não forem tomadas medidas adequadas de proteção (como por exemplo, sombreamentos).

A aplicação de dispositivos de sobreamento nas janelas é também tida em conta como uma boa solução passiva complementar. Estes dispositivos deverão ser utilizados de forma eficiente, ou seja, nas estações mais frias, a sua não utilização permitirá maximizar os ganhos solares e a consequente redução das necessidades de aquecimento, nas estações mais quentes, a sua ativação irá bloquear grande parte da radiação incidente e, consequentemente, reduzir as necessidades de arrefecimento.

2.3 Gestão do Lado da Procura e a Utilização dos Serviços de Energia

Com o crescente aumento do consumo energético e com a preocupação de aumentar a produção de energia a partir de fontes renováveis, o equilíbrio entre a produção e procura de energia tem sido cada vez mais desafiante. Devido à natureza variável e intermitente das fontes de energia renováveis, e com o intuito de evitar o congestionamento e stress dos sistemas de energia elétrica, o paradigma energético deixa de se focar apenas na forma e quantidade de energia produzida e passa a incluir também uma possível contribuição de modificação nos padrões de consumo dos equipamentos de utilização final.

A gestão do lado da procura, mais conhecida por *Demand Side Management* (DSM) na terminologia anglo-saxónica, serve-se de diferentes estratégias para induzir e/ou provocar alterações na forma e amplitude da procura [10]. São várias as estratégias incorporadas nas DSM que visam reduzir/alterar os consumos finais [11], de entre as quais interessa referir:

- *Load shifting*, uma técnica aplicada em cargas específicas que se rege pela alteração ou agendamento dos consumos nos momentos de maior procura energética do sistema

para os momentos de menor procura ou, na perspetiva do consumidor, dos períodos de custos mais baixos para os períodos de custos mais elevados (no caso de disponibilidade de produção própria).

- *Load shedding*, técnica que se refere à redução dos consumos através da interrupção do funcionamento de algumas cargas, por breves instantes.

Como meio para atingir algumas destas estratégias, surgem as medidas de *Demand Response* (DR). A implementação de ações de DR incide principalmente sobre dois planos:

- Planos baseados em incentivos, onde os utilizadores finais de energia são encorajados a alterar os seus consumos segundo ofertas ou acordos contratuais com as entidades operadoras de rede. Estes acordos podem permitir aos operadores alguma autoridade na gestão de carga dos clientes, controlando diretamente os horários e níveis de consumo dos mesmos (controlo de carga direto) [12].
- Planos baseados em tarifas, onde se faz uso de várias tarifas dinâmicas estrategicamente concebidas para encorajar os consumidores a ajustarem as suas próprias cargas (reduzindo os picos de consumo ou desviando os consumos para horas de menor congestão energética) [12].

2.4 Definição de Flexibilidade Energética em Edifícios Residenciais

A flexibilidade energética de edifícios é um conceito que põe em prática as medidas de gestão de carga através da aplicação de ações de DR e é normalmente quantificada com base na capacidade de gestão temporal do consumo e da produção de energia de acordo com as condições do clima local, com as necessidades dos consumidores e com os requisitos impostos pela rede. [13]

Deste modo, é adequado que exista uma divisão entre as cargas residenciais típicas. As mesmas devem ser descritas sob vários níveis de flexibilidade que, por sua vez, serão tidos em conta no planeamento de gestão dos consumos energéticos.

Segundo o autores em [3], é sugerido que as cargas residenciais se dividam em quatro categorias:

1. Cargas não controláveis: Cargas onde a intervenção dos sistemas de gestão possa causar um nível de desconforto substancial ao utilizador (iluminação, equipamentos de cozinha e lazer);
2. Cargas parametrizáveis: Cargas térmicas que podem ser ajustadas para diferentes modos de funcionamento, nomeadamente, diferentes gamas de temperatura e diferentes períodos de utilização. Tome-se como exemplo os equipamentos de ar-condicionado e termoacumuladores;
3. Cargas interrompíveis: Cargas que podem ser desligadas por curtos períodos sem que seja posta em causa a qualidade dos serviços. Estuda-se a possibilidade de enquadrar os equipamentos frigoríficos e equipamentos de ar-condicionado neste tipo de carga.
4. Cargas móveis: Serão as cargas em que os respetivos momentos de operação poderão ser agendados para diversos períodos sem afetar o conforto do utilizador (máquina de lavar roupa, lavar loiça).

As cargas termostáticas responsáveis por manter adequados os níveis de conforto nos edifícios têm sido alvo de numerosos estudos relacionados com o potencial da sua utilização no âmbito da flexibilidade da procura. [14]

Existem diversos métodos de armazenamento de energia calorífica em meio residencial, sendo, por isso, necessário estabelecer uma classificação entre eles. Segundo os autores em [15], dá-se o nome de armazenamento ativo à possibilidade de acumular calor em baterias térmicas e reservatórios de água. Por outro lado, um armazenamento passivo consiste no fenómeno de armazenar calor nos elementos construtivos da habitação.

É através destes métodos de armazenamento térmico que se estuda a possibilidade de agendamentos e reduções de cargas, nomeadamente, cargas que dizem respeito ao consumo dos equipamentos de climatização e dos sistemas de águas quentes sanitárias (AQS), sendo que na análise de implementação de tais medidas será quase sempre obrigatório garantir o mínimo conforto recomendado para os utilizadores destes serviços. [15]

2.5 Modelação e Simulação Energética de Edifícios

Os modelos matemáticos habitualmente utilizados para descrever o comportamento energético de edifícios, segundo a referência [16], são divididos em três componentes:

1. Variáveis de entrada, que vão ser preponderantes para descrever o comportamento do sistema. Estas variáveis, por sua vez, podem ser de natureza controlável (ações de gestão de energia do edifício) ou incontrolável (temperaturas climatéricas externas);
2. Estrutura e propriedades do sistema que fornecem a descrição física necessária da construção;
3. Variáveis de saída, retratadas por dados que descrevem a resposta do sistema em função das variáveis de entrada.

Segundo estas componentes, existem duas abordagens de modelação que podem ser adotadas. Por um lado, existe uma simulação de modelos diretos, onde são conhecidas as características da estrutura do sistema físico e são calculadas as variáveis de saída em função das variáveis de entrada. Por outro lado, há uma simulação de modelos indiretos, onde são conhecidas tanto as variáveis de entrada, como as de saída, e o objetivo consiste em obter um modelo numérico representativo do sistema físico. [16]

2.6 Software de Simulação Dinâmica *Energy Plus*

O Energy Plus é uma ferramenta computacional de simulação do comportamento energético de edifícios, desenvolvida pelo *U.S. Department of Energy* (Departamento de Energia dos Estados Unidos da América). [17]

O Energy Plus resulta da combinação das potencialidades de dois programas desenvolvidos e utilizados no final dos anos 80 e início dos anos 90 de século XX, o BLAST e DOE-2. O Energy Plus representa uma evolução em relação às estruturas, potencialidades e facilidade de utilização, comparativamente com os programas precedentes, devido à linguagem FORTRAN90 utilizada. [17]

Os dois programas precedentes do Energy Plus foram objecto de vários estudos como, por exemplo, no desenvolvimento do *Building Energy Simulation Test* (BESTEST) da Agência Internacional de Energia (AIE) [18]. A ferramenta Energy Plus também entrou no conjunto de testes com objectivo da avaliação do comportamento térmico de edifícios, realizados no *Building Energy Simulation Test for HVAC Models* (HVAC BESTEST) da AIE e em vários artigos expostos na *Building Simulation Conference 2009* [19–21].

Esta ferramenta de simulação computacional utiliza uma abordagem do tipo dinâmica

no fenómeno de transferência de energia entre o edifício e o meio exterior, na qual o interior da habitação se encontra em constante interação com o meio exterior ao longo do período de simulação.

2.6.1 Princípio de Cálculo

Na simulação das necessidades energéticas do edifício, o cálculo do balanço de calor do ar interior é aplicado segundo a lei da conservação energética e é dado pela soma das seguintes parcelas energéticas [22]:

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_\infty - T_z) + \dot{Q}_{sys} \quad (2.1)$$

Onde:

- $C_z \frac{dT_z}{dt}$ = Energia armazenada no interior da zona;
- $\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i$ = Somatório da quantidade de calor emitida pelas cargas internas;
- $\sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_\infty - T_z)$ = Somatório da quantidade de calor transferida entre zonas adjacentes;
- $\sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_\infty - T_z)$ = Somatório da quantidade de calor transferida devido à infiltração de ar exterior;
- \dot{Q}_{sys} = Quantidade de calor associado aos sistemas instalados.

2.6.2 Condições para Realização de Simulações

As simulações executadas por esta ferramenta podem ter uma duração entre um dia a um ano, com tempos de cálculo (*time steps*) compreendidos entre um minuto e uma hora [23]. Normalmente, este parâmetro é escolhido consoante as necessidades de simulação, ou seja, para simulações mais rigorosas, o tempo de cálculo deve ser o mais baixo possível, no entanto, esta escolha torna o tempo total da simulação mais demorado [24].

Como condição motriz de simulação, o Energy Plus requer dois tipos de ficheiro:

- *Input data Files* (IDF);
- *Energy Plus Weather Files* (EPW).

O ficheiro IDF contém a informação relativa à parametrização física do edifício (construtiva e geométrica), às características relacionadas com os hábitos de ocupação do edifício (horários de ocupação e utilização dos equipamentos que, por sua vez, estão diretamente relacionados com os ganhos caloríficos internos e com o consumo energético da habitação) e à parametrização que caracteriza os sistemas AVAC. A parametrização deste ficheiro pode ser implementada e alterada através de um editor implementado no EnergyPlus (interface própria). [23]

O ficheiro EPW contém os valores de temperatura exterior, radiação e orientação solar, latitude, longitude e altitude de uma determinada localização. Os valores climáticos são apresentados em intervalos de hora a hora durante um período anual [23]. Caso se pretenda tempos de cálculo inferiores a uma hora, o Energy Plus apresenta uma função de interpolação de dados rigorosa que permite obter estes valores nos tempos desejados [23]. Na sua biblioteca de ficheiros climáticos, o Energy Plus contém dados para várias regiões a nível mundial e nacional. Estes ficheiros são elaborados com base em resultados da investigação de dados climáticos internacionais para cálculos energéticos (IWEC - *International Weather for Energy Calculations*) [17].

2.6.3 Leitura dos Dados de Saída

No final de cada simulação são gerados dois tipos de ficheiros distintos [23]:

- Ficheiro de texto, onde são discriminados quaisquer erros ocorridos na fase de compilação ou simulação (ex: parametrização incorreta ou incoerente);
- Ficheiro onde são escritas as variáveis de saída que se pretendem obter. Estes dados podem ser gerados em formato *Comma Separated Values* (CSV) ou formato *Hyper Text Markup Language* (HTML), conforme a necessidade do utilizador.

Uma das principais lacunas desta ferramenta de simulação é a falta de interface gráfica própria, sendo, por isso, necessário recorrer a softwares complementares para obter uma representação gráfica das variáveis de saída. [24]

Capítulo 3

Caracterização do Modelo de Estudo

3.1 Caracterização Geométrica

Os dados relativos à caracterização geométrica do modelo do presente trabalho são baseados num estudo elaborado pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) a pedido da Agência para a Energia (ADENE), que teve como objetivo o desenvolvimento e teste de um indicador do comportamento solar passivo de edifícios de habitação com base nos dados recolhidos no Sistema de Certificação Energética de Edifícios (SCE) [25]. Neste estudo é feita uma classificação de edifícios de referência com base no ano de construção dos edifícios e nas suas principais características geométricas [25]. Desta maneira, as características geométricas do modelo do presente trabalho baseiam-se num alojamento de uma habitação multifamiliar de duas fachadas e empena expostas ao exterior, típica da época de 1991 a 2012 (tabela 3.1).

Tabela 3.1: Características geométricas do modelo de estudo. [25]

Designação	Unidade	Valor
Número de pisos		1
Área útil de pavimento	m^2	96
Largura da fachada	m	7,4
Largura da empena	m	13
Pé direito	m	2,7
Área das janelas / Área de fachada		35%
Volume	m^3	259,74

A introdução de dados relativos à geometria do edifício, como os elementos construtivos, vãos envidraçados e paredes internas, é feita através de um sistema de coordenadas tridimensionais onde cada elemento é definido através dos vértices que o compõem. As características geométricas recolhidas não têm em consideração as paredes internas da habitação. No entanto, para que a simulação seja o mais próxima possível com a realidade, a habitação foi dividida em 6 zonas térmicas diferentes que correspondem às principais divisões de um qualquer alojamento (figura 3.1).

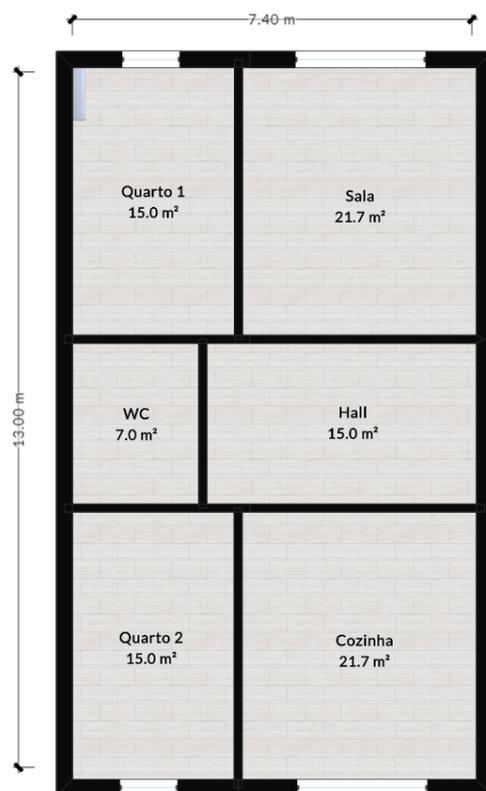


Figura 3.1: Planta do modelo de estudo representada a duas dimensões

Por motivos de simplificação, a análise do presente trabalho vai ser restringida a uma só zona térmica, sendo ela a zona denominada de "Quarto1", que, por sua vez, vai estar fortemente dependente do comportamento passivo das zonas térmicas adjacentes e das condições de ambiente externas. Neste seguimento, apresenta-se uma descrição das principais características geométricas da zona térmica considerada, bem como as condições de fronteira externas a que os elementos que delimitam esta zona estão expostos (tabela 3.2). Dado que este modelo representa um alojamento de uma habitação multifamiliar, considera-se que os alojamentos inferiores e superiores estão sujeitos a comportamentos térmicos semelhantes

Tabela 3.2: Características geométricas e condições de fronteira da zona térmica "Quarto1".

Elemento	Unidade	Valor	Condição de Fronteira
Área útil de pavimento	m^2	15	Adiabática
Área de cobertura	m^2	15	Adiabática
Pé direito	m	2,7	
Área parede interior	m^2	13,5	Zona térmica "Sala"
Área parede interior	m^2	8,1	Zona térmica "WC" e "Hall"
Área parede da empena	m^2	13,5	Exterior
Área parede da fachada	m^2	5,25	Exterior
Área janela da fachada	m^2	2,85	Exterior
Volume	m^3	40,5	

onde as trocas de calor entre pisos são bastante reduzidas. Posto isto, a condição de fronteira que se aplica à cobertura e pavimento é adiabática. A condição de fronteira adiabática despreza quaisquer trocas de calor das superfícies com as zonas exteriores, no entanto, a capacidade de armazenamento de massa térmica dessa mesma superfície é mantida.

A orientação da fachada da zona "Quarto 1" que contém área envidraçada apresenta uma orientação desfasada 135° do ponto Norte.

3.2 Caracterização das Soluções Construtivas

Segundo o Energy Plus, a parametrização construtiva é implementada segundo as propriedades termo-físicas dos materiais, já referidas anteriormente (condutividade, calor específico e densidade do material). No entanto, na impossibilidade da caracterização dos materiais segundo estes dados, é possível considerar apenas a espessura e resistência térmica final da construção, onde o armazenamento de massa térmica é desprezado.

Os elementos construtivos do presente modelo foram baseados em construções típicas do território português, com base no manual *ITE50* [9] e no estudo *Comportamento Solar passivo das habitações* [25].

De modo a aumentar o rigor na simulação, a recolha de dados foi feita no sentido de não desprezar o efeito das pontes térmicas, considerando as três principais propriedades dos materiais constituintes de cada elemento. Devido a esta consideração e a um método de cálculo automático por parte do *software*, o valor da resistência térmica total das soluções

construtivas obtido é ligeiramente discrepante dos valores tabelados nas referências acima mencionadas. As características e tipologia das construções podem ser consultadas nas tabelas A.1 a A.4 expostas no apêndice A. Na tabela 3.3 apresenta-se o valor da resistência térmica final, bem como o valor da espessura total de cada construção obtidos através do EnergyPlus.

Tabela 3.3: Resistências térmicas dos elementos que delimitam as zonas térmicas do modelo.

Elemento	Espessura Total (m)	Resistência Térmica $((m^2.C^{\circ})/W)$
Paredes Exteriores	0,30	1,29
Paredes Interiores	0,16	0,4
Cobertura	0,37	1,01
Pavimento	0,37	1,01

A caracterização dos envidraçados é feita através dos parâmetros de coeficiente de transmissão térmica e fator solar (tabela 3.4). Por fim, é ainda considerada a existência de dispositivos de proteção solar. Por motivos de privacidade e conforto é considerado um horário fixo de ativação destes dispositivos durante o período noturno. Durante a estação de arrefecimento os dispositivos são ativados durante uma parte do período diário (coincidente com o horário de desocupação do alojamento). Durante as restantes estações os dispositivos são mantidos recolhidos de dia (tabela 3.5). A aplicação desta medida deve-se, essencialmente, a uma tentativa de controlo eficiente dos ganhos solares, que, por um lado, são necessários em períodos de temperaturas mais baixas e, por outro, podem ser indesejados em períodos de temperaturas mais elevadas.

Tabela 3.4: Caracterização do envidraçado com e sem proteções ativas.

Elemento	Fator Solar	Coeficiente U $(W/(m^2.C^{\circ}))$
Envidraçado	0,75	3,10
Envidraçados com proteção ativa	0,04	

Tabela 3.5: Períodos e horários de ativação dos dispositivos de sombreamento.

Período	Horário de ativação
Outras estações	21:00h - 8:00h
Estação de arrefecimento	21:00h - 8:00h / 10:00h - 17:00h

3.3 Ganhos Internos e Taxa de Renovação do Ar Interior

O Energy Plus possibilita ao utilizador a introdução dos ganhos associados a diferentes tipos de equipamento, ocupação de pessoas, dispositivos de iluminação, entre outros. O campo de introdução dos ganhos internos de ocupação permite a definição de uma calendarização associada a períodos de permanência no interior da habitação e às atividades realizadas pelos habitantes.

O calor produzido pelo corpo humano encontra-se directamente relacionado com a taxa de metabolismo. Na referência bibliográfica de apoio ao software [23] encontram-se disponíveis valores da taxa de metabolismo do corpo humano associadas às diferentes actividades, elaborada de acordo com dados da *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE). Considerando a zona térmica de estudo como sendo um espaço de descanso/lazer, foram escolhidos os horários de ocupação e actividades representados na tabela 3.6.

O Energy Plus considera os principais fenómenos térmicos associados aos dispositivos de iluminação como sendo a fração radiante, a fração visível e a fração convectiva. Estes fenómenos diferem segundo o tipo de lâmpada e configuração do sistema de iluminação (suspensas, embutidas ou em superfície). Na mesma referência [23] é possível consultar valores tabelados (obtidos com base nos dados da *Illuminating Engineering Society of North America*) dos fenómenos referidos em função do tipo do sistema de iluminação. Os horários e as características relacionadas com o tipo de iluminação estão expostos na tabela 3.7.

Para o presente modelo de estudo não foi considerado qualquer tipo de sistema de ventilação mecânica, sendo a ventilação natural responsável pela renovação do ar. Segundo o Regulamento dos Edifícios de Habitação (REH), é referido no Decreto-Lei n.º118/2013 que

nos edifícios de habitação o valor de taxa de renovação horária do ar deve ser igual ou superior a 0,4 renovações por hora [26]. Desta maneira, para o presente modelo, considerou-se uma taxa de renovação horária de valor 0,6 constante durante o período diário em todas as zonas térmicas.

Tabela 3.6: Horários e atividades de ocupação.

Horário	Ocupantes	Atividade	Taxa Metabólica (W/pessoa)
18h - 23h	1	Leitura , TV , PC	99
23h - 8h	1	Dormir	72

Tabela 3.7: Horários e tipo de iluminação.

Horário	Iluminação(W)	Sistema	F. Radiante	F. Visível	F. Convectiva
21h - 23h	30	Em superfície	0,1	0,6	0,01
7h - 8h	30	Em superfície	0,1	0,6	0,01

3.4 Sistema de Climatização

O sistema implementado no modelo é do tipo *Variable Refrigerant Flow* (VRF) e é composto por uma unidade exterior (*Condensing unit*) e por uma só unidade interior de ar-condicionado (*Terminal unit*) implementada na zona térmica "Quarto1". O sistema é do tipo *inverter*, ou seja, é caracterizado por um compressor de velocidade variável, que permite ajustar a potência de consumo do equipamento em função da necessidade de aumentar ou diminuir a temperatura de acordo com o *setpoint* definido pelo utilizador. A parametrização e ligação do sistema foi atribuída de acordo com a função de *auto-size* do EnergyPlus, onde o volume da divisão e as condições exteriores anuais de simulação são tidas em conta. Apresenta-se na tabela 3.8 os valores de potência nominal do equipamento, bem como os respetivos valores dos coeficientes de desempenho.

Tabela 3.8: Potências nominais e coeficientes de desempenho referentes ao equipamento de climatização.

Funcionamento	Potência Térmica(W)	Potência Elétrica(W)	COP/EER
Aquecimento	1800	370	4,8
Arrefecimento	1600	400	4,0

Capítulo 4

Procedimentos e Análise de Resultados

O perfil climático utilizado nas simulações que se seguem é referente à zona de Coimbra e foi obtido através da base de dados online do EnergyPlus [27]. Os valores resultantes das simulações foram sempre obtidos com tempos de cálculo de um minuto, de modo a ter o máximo de rigor possível na análise. Já se referiu, anteriormente, que o EnergyPlus não contém qualquer capacidade de visualização gráfica dos dados de saída. Desta maneira, para o presente trabalho, os dados de saída obtidos são importados e visualizados através da ferramenta Matlab.

4.1 Comportamento Passivo

O comportamento passivo refere-se, essencialmente, à variação de temperatura interior do edifício em função das condições climatéricas exteriores e dos respetivos ganhos internos (atividade metabólica e iluminação), não tendo em conta qualquer influência dos sistemas ativos. A temperatura do ar interior é um indicador de conforto térmico, sendo as temperaturas de conforto de referência 18°C e 25°C , na estação de aquecimento e arrefecimento [26]. A necessidade de utilização dos meios ativos é, então, avaliada segundo estes valores. Para observação do comportamento térmico passivo do modelo, as simulações foram executadas nas duas primeiras semanas de quatro meses representativos (outros autores poderiam escolher outros) de um ano: fevereiro, maio, agosto, outubro e podem ser observadas através da figura 4.1, onde a linha azul representa a evolução temporal da temperatura do ar interior,

a linha vermelha a temperatura exterior e as linhas pretas os valores fixos de referência do conforto térmico.

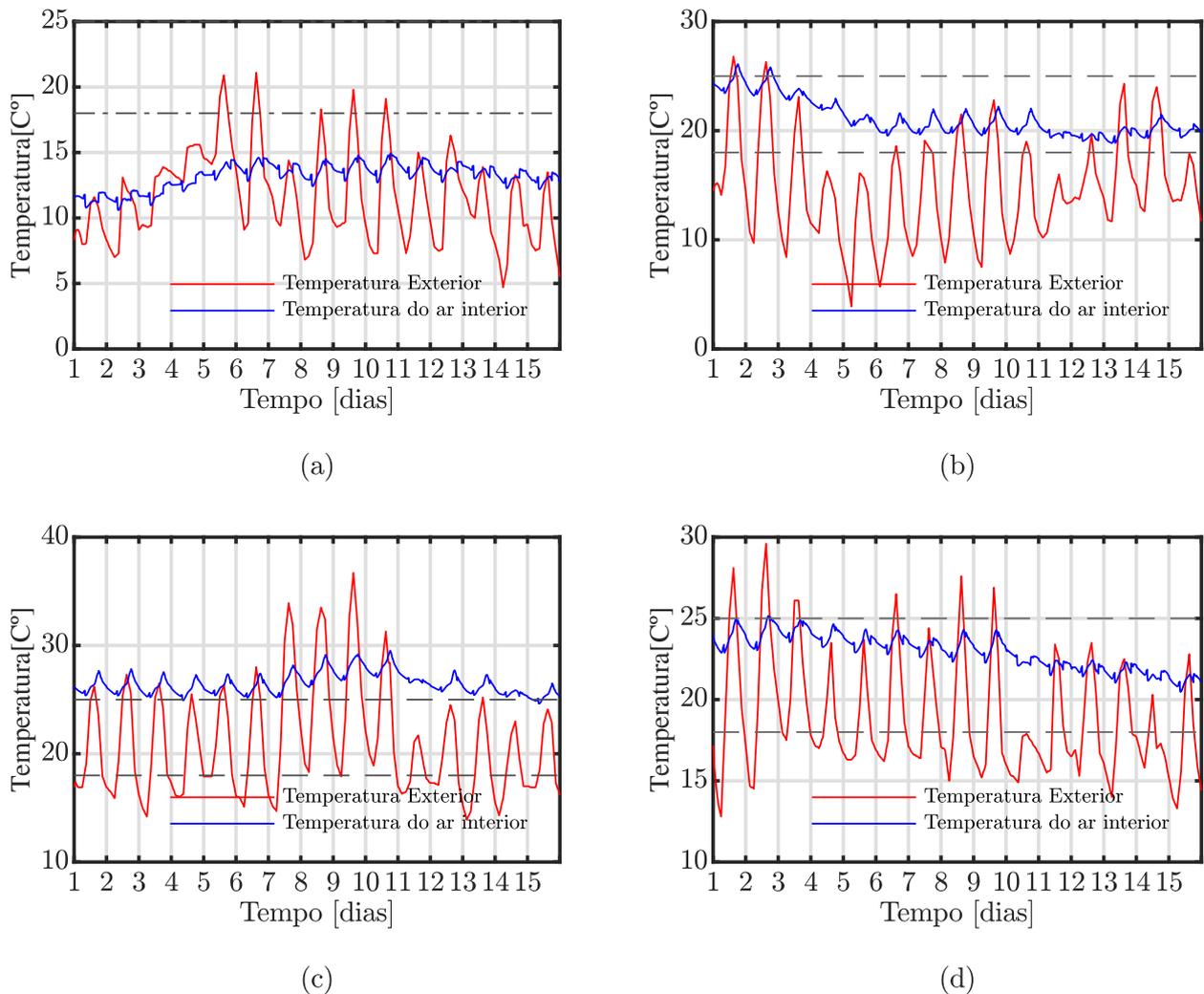


Figura 4.1: Comportamento térmico passivo do modelo nos meses: (a) fevereiro; (b) maio; (c) agosto; (d) outubro.

Numa primeira análise, destaca-se o fenómeno da inércia térmica, onde a variação das curvas de temperatura interior apresenta uma forte redução de amplitude térmica e desfasamento temporal quando comparadas com as ondas de temperatura exterior. Durante os períodos de existência solar, parte da radiação incidente é armazenada na estrutura, o que acaba por garantir variações de temperatura interior menores que as variações de temperatura exterior (amortecimento dos picos de temperatura). Quando os valores de temperatura exterior começam a baixar, essa mesma energia vai sendo libertada gradualmente, conferindo, assim, neste período, valores de temperatura interior superiores ao exterior.

Destaca-se também o impacto gerado pelos ganhos de calor internos. Estes ganhos observam-se através das irregularidades nas formas de onda da temperatura interior, que se verificam mais notórios nas alturas de temperatura mais baixa. O modelo habitacional construído apresenta bons níveis de conforto térmico para os cenários de simulação representados pelos meses de maio e outubro, (figura 4.1(b) e 4.1(d), respetivamente). O mesmo não se verifica para o mês de fevereiro (figura 4.1(a)), onde a temperatura interior se encontra bem abaixo do nível de referência durante um período de tempo prolongado. Da mesma maneira, no mês de agosto (figura 4.1(c)), mesmo com os dispositivos de proteção solar ativos durante os período de maior incidência solar, a temperatura interior mantém-se superior ao nível de referência.

4.2 Simulação de Ações de Gestão de Carga

As simulações ocorrem agora nos dias 15 de fevereiro e 9 de agosto (consultar figura 4.1). Estes dias foram escolhidos pelo simples facto de representarem valores reduzidos e elevados de temperatura interior durante os cenários de simulação observados anteriormente (cenários sem sistemas ativos).

Considera-se que nestes dois dias a utilização do serviço é feita entre as 17:00h e as 23:00h com um *setpoint* de 20°C e 24°C para a estação de aquecimento e arrefecimento, respetivamente. Os eventos de DR ocorrem num período intermédio deste horário, ou seja, das 19:00h às 21:00h.

As ações de gestão de cargas simuladas neste trabalho são de dois tipos: medidas de controlo direto e medidas de reparametrização (alteração do *setpoint* do termóstato) aplicadas em equipamentos de ar-condicionado. As ações de controlo direto aplicadas são baseadas na referência [28]. Através das literaturas [29,30] observa-se que as alterações na parametrização dos termóstatos podem levar à redução de potência e redução de consumo. Desta maneira, implementam-se ações de reparametrização em ciclos sucessivos de modo a serem comparadas com as ações de controlo direto. A tabela 4.1 apresenta uma descrição resumida das estratégias aplicadas. Para as estratégias de alteração de *setpoint*, os valores do estado alterado correspondem a 18°C e 26°C para a estação de aquecimento e arrefecimento (em vez dos 20°C e 24°C, respetivamente).

Tabela 4.1: Descrição das diferentes estratégias de controlo de carga utilizadas.

Estratégia	Descrição
10on+5off	Ciclos sucessivos de 15 minutos onde o equipamento se encontra ligado durante 10 minutos e desligado durante 5
20on+10off	Ciclos sucessivos de 30 minutos onde o equipamento se encontra ligado durante 20 minutos e desligado durante 10
20n+10a	Ciclos sucessivos de 30 minutos onde o equipamento opera no setpoint normal durante 20 minutos e no setpoint alterado durante 10
30n + 15a	Ciclos sucessivos de 45 minutos onde o equipamento opera no setpoint normal durante 30 minutos e no setpoint alterado durante 15

4.2.1 Estação de Aquecimento

Antes de mais, começa-se por caracterizar o regime de funcionamento associado a um uso contínuo do equipamento sem qualquer intervenção de ações de gestão de carga. Na figura 4.2 é apresentado o diagrama de carga e respetiva curva de temperatura interior referentes a este uso. Para que a temperatura seja elevada para o *setpoint* desejado (20°C), é necessário uma alimentação da carga à potência nominal (370W). A temperatura interior é elevada dos $13,5^{\circ}\text{C}$ aos 20°C em cerca de 20 minutos. Nota-se também que para manter a temperatura nos 20°C o equipamento altera o seu regime de funcionamento para um valor de potência mais baixa. Esta alteração de potência é característica dos sistemas do tipo *inverter*, ou seja, a potência de alimentação da carga é ajustada conforme a necessidade de aumentar ou manter a temperatura nas condições desejadas. Durante as seis horas de utilização registou-se um consumo de 1760,6 Wh. Chama-se ainda a atenção para uma ligeira perturbação no diagrama de carga no momento das 18:00h. Este ligeiro decréscimo de potência justifica-se com a introdução de ganhos de calor internos na zona provocados pela atividade metabólica do ocupante. Por fim, as linhas vermelhas são meramente um indicador do período onde serão simuladas as ações de gestão de carga.

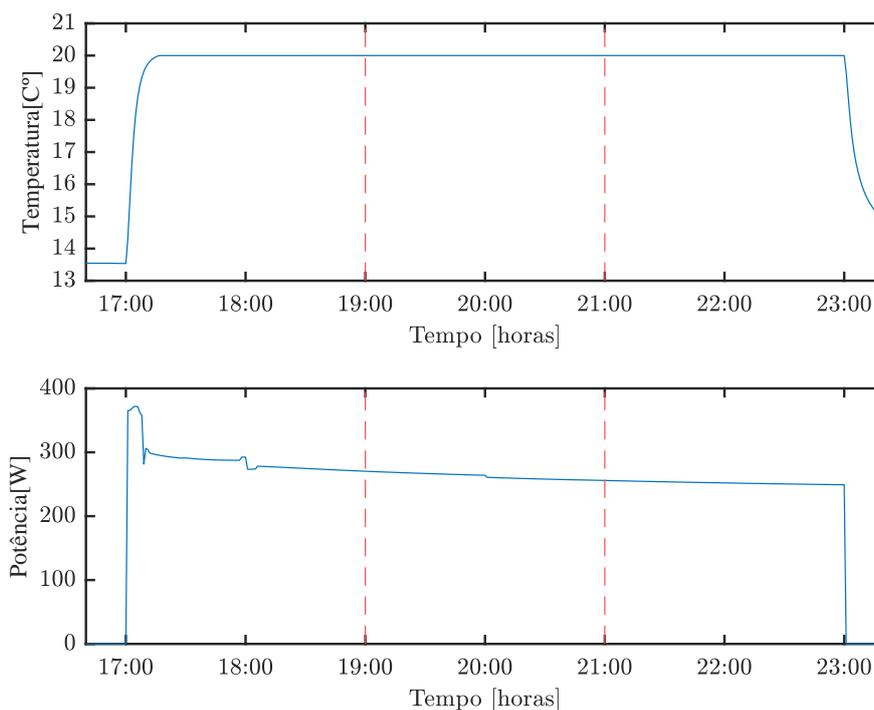


Figura 4.2: Perfis de potência e temperatura interior para uma utilização do equipamento com *setpoint* nos 20°C - estação aquecimento.

A primeira simulação de gestão de carga inicia-se com a aplicação da estratégia 10on+5off. A figura 4.4 mostra a variação do regime de funcionamento do equipamento e da temperatura do ar interior durante o tempo em que o evento de DR ocorre. Por razões de simplificação, a análise que se segue é referente apenas ao primeiro ciclo (existem alterações ligeiras nos valores dos ciclos posteriores). Aconselha-se ainda a observação do diagrama explicativo representado na figura 4.3, de modo a que se tenha uma perceção mais facilitada sobre os termos utilizados e registados acerca dos diagramas de carga para estratégias de controlo direto. Numa primeira análise, observa-se que o equipamento, numa fase inicial opera a potência de 269,0W, aproximadamente. Quando se inicia um estado off, a potência exigida pela carga vai atingir um estado nulo, como era de esperar. Deste efeito, vai existir uma potência máxima disponibilizada por parte da carga para a rede de aproximadamente 269W. O tempo em que existe potência disponibilizada é de 5 minutos. Durante estes 5 minutos a temperatura interior tende a decrescer, registando-se uma variação dos 20°C aos 16,7°C, sensivelmente. Após a restituição da alimentação à carga, há um aumento do consumo (que era previsível) para tentar repor as condições parametrizáveis por defeito.

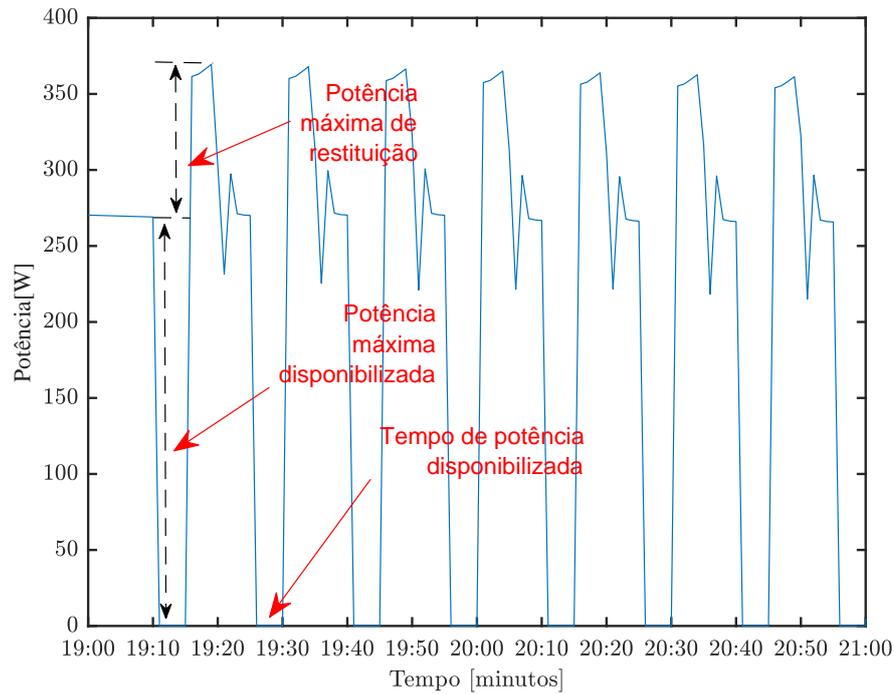


Figura 4.3: Diagrama explicativo de análise aos diagramas de carga das estratégias de controlo direto.

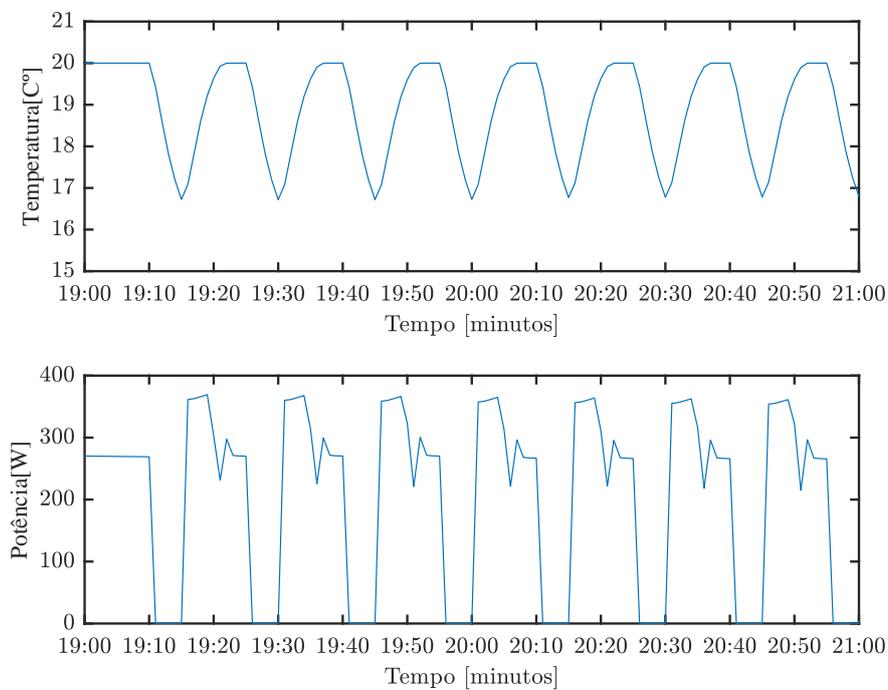


Figura 4.4: Perfis de potência e temperatura interior durante o evento de DR para a estratégia 10on+5off - estação aquecimento.

A potência máxima de restituição (diferença entre a potência pedida à rede após a restituição da alimentação à carga e a potência que pediria em regime estacionário) regista-se no valor de 100,4W. Chama-se ainda a atenção para este efeito de restituição, no caso de uma implementação real sobre um grupo de cargas do mesmo tipo implicar que as ações de controlo devam ser adequadamente concebidas e distribuídas sobre diferentes grupos de controlo, por forma a conseguir reduzir a potência máxima exigida à rede sem correr o risco de aumentar noutro instante de tempo.

Na estratégia 20on+10off representada na figura 4.5 é visível um comportamento bastante semelhante à estratégia anterior em termos de valores de potência. O valor da potência máxima disponibilizada é de 267,9W. No entanto, o tempo de disponibilização de potência passa agora para os 10 minutos em cada ciclo. Derivado deste efeito, é observável que a qualidade do serviço piora significativamente visto que a temperatura do ar interior sofre variações de maior amplitude, dos 20°C aos 15,5°C. A potência máxima de restituição é bastante semelhante à que se observou anteriormente, sendo o valor registado de 100,7W. Dado que agora se nota uma menor frequência cíclica durante o intervalo observado, a frequência do fenómeno de restituição é igualmente menor.

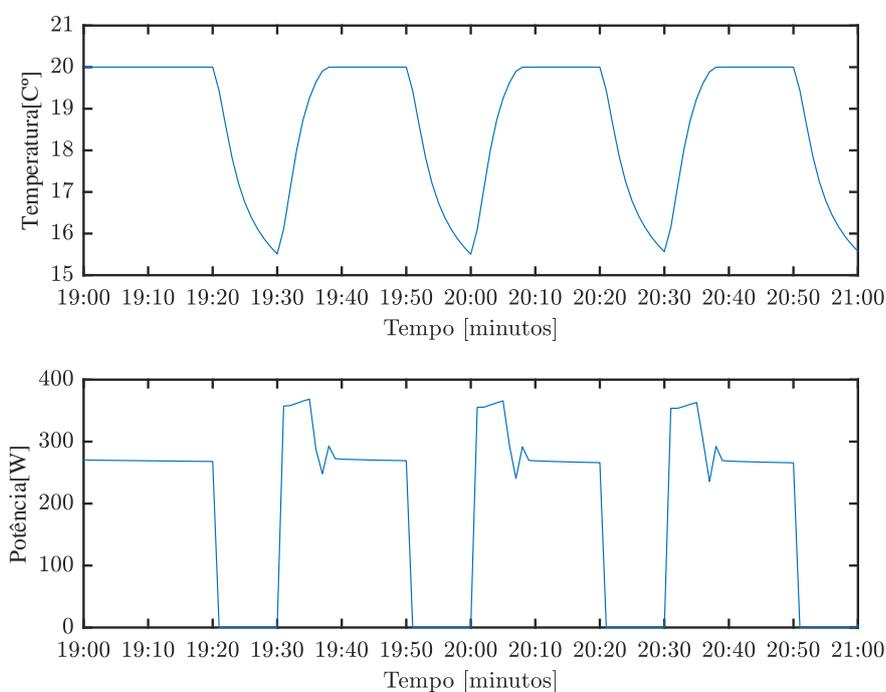


Figura 4.5: Perfis de potência e temperatura interior durante o evento de DR para a estratégia 20on+10off - estação aquecimento.

Passando à estratégia 20n+10a e analisando a figura 4.7, é observado um regime de funcionamento algo diferente (aconselha-se a observação do diagrama explicativo representado na figura 4.6, de modo a que se tenha uma percepção mais facilitada sobre os termos utilizados e registados acerca dos diagramas de carga para estratégias de reparametrização). Quando o *setpoint* do equipamento é alterado para os 18°C, vai existir uma potência máxima disponibilizada de 267,9W. Este é, sensivelmente, o valor que se disponibiliza à rede durante um intervalo de 3 minutos. Este intervalo corresponde ao tempo que a temperatura demora a variar dos 20°C para os 18°C. Quando a temperatura interior atinge o valor dos 18°C há uma necessidade de a manter nesse estado. Nesse mesmo instante vai ser gerada uma potência transitória. O valor de potência mínima disponibilizada durante este transitório é de 31,0W. Após este acontecimento, a potência disponibilizada estabiliza, registando-se um valor de 121,4W. O tempo de potência disponibilizada característica do estado reparametrizado registou-se nos 7 minutos. Após este período, volta a existir a necessidade de elevar a temperatura para os 20°C, sendo que a potência máxima de restituição gerada se verifica nos 100,1W.

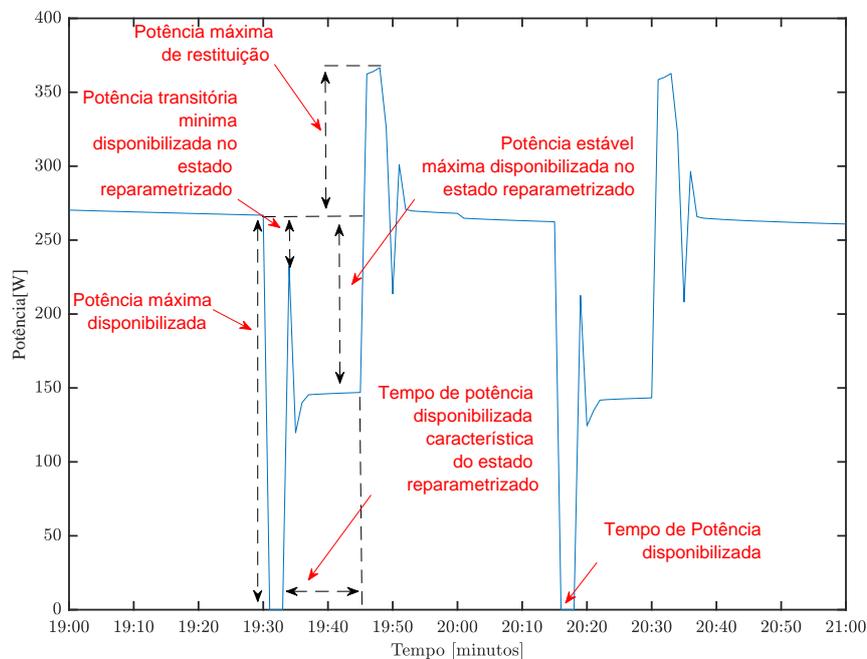


Figura 4.6: Diagrama explicativo de análise aos diagramas de carga das estratégias de reparametrização.

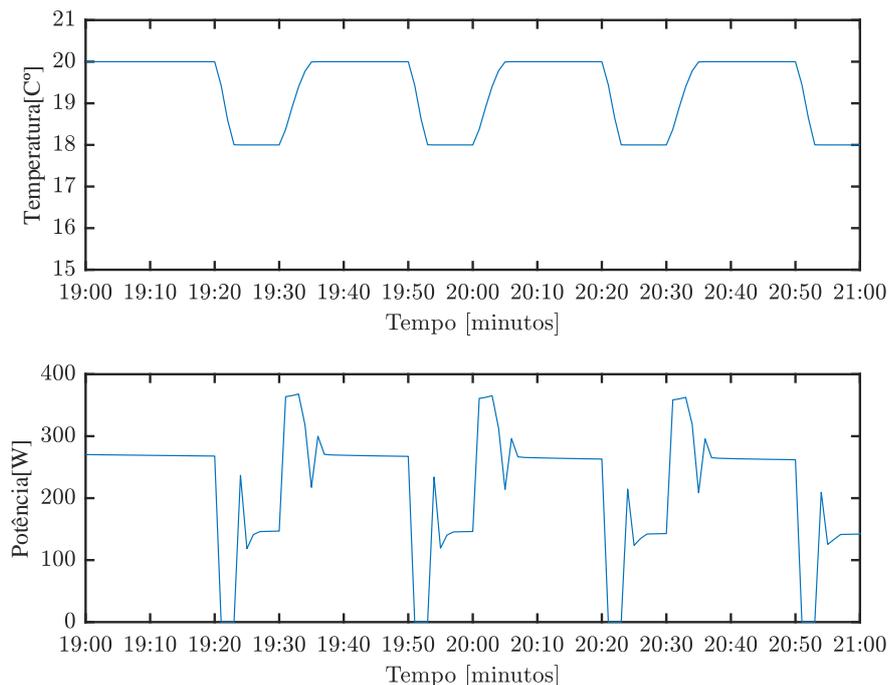


Figura 4.7: Perfis de potência e temperatura interior durante o evento de DR para a estratégia 20n+10a - estação aquecimento.

Na figura 4.7, observa-se, ainda, que a qualidade do serviço é sempre garantida dentro da gama de valores definida (tal como espectável).

Para a estratégia 30n+15a, os perfis obtidos podem ser observados na figura 4.8. O modo de operação do equipamento nesta simulação é bastante semelhante ao da figura 4.7. A potência máxima disponibilizada para a rede no momento da alteração do *setpoint* é de 266,8W. A duração da potência disponibilizada é de 3 minutos (tempo de variação da temperatura dos 20°C para os 18°C). Obteve-se um valor de potência transitória mínima disponibilizada no estado alterado de 34,3W.

Logo após o transitório, a potência do diagrama estabiliza, passando, assim, a disponibilizar-se um valor de 120,3W. O tempo de potência disponibilizada característica do estado alterado passou a ser de 12 minutos (este tempo aumentou em relação ao da figura 4.7, como era espectável). Logo após este tempo, inicia-se uma restituição de alimentação à carga onde a potência máxima de restituição se registou nos 99,8W. Tal como na figura 4.7, a qualidade de serviço foi garantida dentro da gama de valores estipulada.

De uma forma resumida, a tabela 4.2 mostra o resumo dos valores de potência e tempos obtidos através da aplicação de cada estratégia. Já na tabela 4.3 encontra-se descrita uma

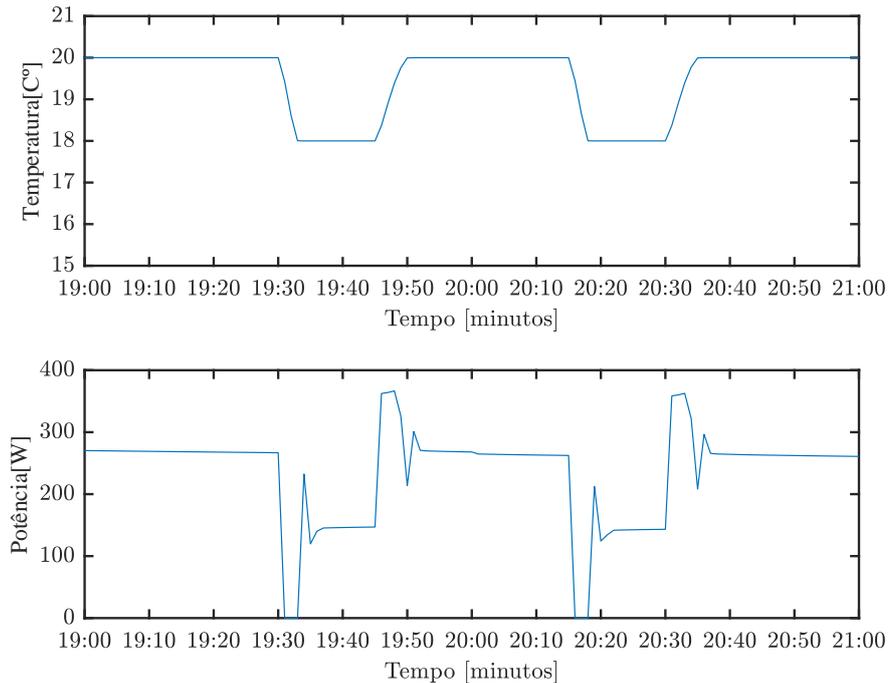


Figura 4.8: Perfis de potência e temperatura interior durante o evento de DR para a estratégia 30n+15a - estação aquecimento.

análise sucinta relativa à qualidade do serviço.

Comparando a estratégia 10on+5off à estratégia 20on+10off, observa-se que diferem no valor do tempo de potência disponibilizada (tabela 4.2), o que seria claramente esperado devido à diferença cíclica. Devido a esta diferença, observou-se, ainda, que a amplitude das variações de temperatura interior obtidas com a aplicação da estratégia 20on+10off foram superiores (tabela 4.3). Comparando as estratégias 20n+10a e 30n+15a, observou-se a única diferença no tempo da potência disponibilizada característica do estado alterado (tabela 4.2). Este acontecimento era esperado, uma vez que a duração do estado alterado na estratégia 30n+15a é maior do que na estratégia 20n+10a.

Comparando agora as estratégias de controlo direto com as estratégias de reparametrização, constata-se que os valores de potência máxima disponibilizada em cada ciclo são maiores nas estratégias de controlo direto (tabela 4.2), uma vez que nas estratégias de reparametrização existe a necessidade de alterar o valor de potência disponibilizada para manter as condições de temperatura do estado reparametrizado. No entanto, pela observação da tabela 4.3, é claramente notório que a qualidade de serviço prestada pelas estratégias de reparametrização é superior à prestada pelas estratégias de controlo direto, o que poderá

ser extremamente importante em termos de aceitação deste tipo de ações por parte dos utilizadores dos equipamentos.

Tabela 4.2: Descrição numérica dos resultados obtidos referentes aos diagramas de carga de cada estratégia - estação aquecimento.

Estratégia	Potência Máxima disponibilizada	Tempo da potência disponibilizada	Potência Máxima de Restituição	Potência transitória mínima disponibilizada no estado reparametrizado	Potência estável máxima disponibilizada no estado reparametrizado	Tempo da potência disponibilizada característica do estado reparametrizado
10on+5off	269,0 W	5 minutos	100,4 W	---	---	---
20on+10off	267,9 W	10 minutos	100,7 W	---	---	---
20n+10a	267,9 W	3 minutos	100,1 W	31,0 W	121,4 W	7 minutos
30n+15a	266,8 W	3 minutos	99,8 W	34,3 W	120,3 W	12 minutos

Tabela 4.3: Análise à qualidade do serviço obtido através da implementação das diferentes estratégias - estação aquecimento.

Estratégia	Qualidade do Serviço
10on+5off	Sempre que se inicia um estado off a temperatura varia dos 20°C aos 16,7°C no intervalo de 5 minutos. No início dos estados on, a temperatura é reposta de volta aos 20°C até nova alteração de estado.
20on+10off	Sempre que se inicia um estado off a temperatura varia dos 20°C aos 15,5°C no intervalo de 10 minutos. No início dos estados on, a temperatura é reposta de volta aos 20°C até nova alteração de estado.
20n+10a	Sempre que se inicia um estado de alteração de setpoint, a temperatura varia dos 20°C para os 18°C num intervalo de 3 minutos. A temperatura é mantida neste valor durante os restantes 7 minutos do estado. Quando se inicia um estado de reposição do setpoint a temperatura é remetida ao valor dos 20°C.
30n + 15a	Sempre que se inicia um estado de alteração de setpoint, a temperatura varia dos 20°C para os 18°C no intervalo de 3 minutos. A temperatura é mantida neste valor durante os restantes 12 minutos do estado. Quando se inicia um estado de reposição do setpoint a temperatura é remetida ao valor dos 20°C.

4.2.2 Estação de Arrefecimento

Tal como na estação de aquecimento, começa-se por apresentar o diagrama de carga referente a um funcionamento contínuo do equipamento sem qualquer aplicação de ações de gestão de carga para a estação de arrefecimento (dia 9 de agosto). A figura 4.9 apresenta o diagrama de carga e perfil de temperatura interior consequente deste tipo de uso. Observa-se que a temperatura interior inicial da zona às 17:00h apresenta um valor de 28,3°C. Neste instante, inicia-se a utilização do serviço, onde a carga é alimentada à potência nominal para reduzir a temperatura à parametrização dos 24°C. Após a estabilização da temperatura, a potência é ajustada para um valor mais baixo. Uma vez que as condições de temperatura interior iniciais estão mais próximas das condições de temperatura requeridas, o equipamento tende a utilizar uma potência menor quando comparada com a figura 4.2. Fazendo uma análise mais atenta, observa-se, ainda, um descréscimo gradual no consumo do equipamento (mais acentuado do que o da figura 4.2). Tal facto, deve-se à influência que as descidas de temperatura exteriores têm sobre as temperaturas interiores. Durante as 6 horas foram consumidos cerca de 1194,2 wh.

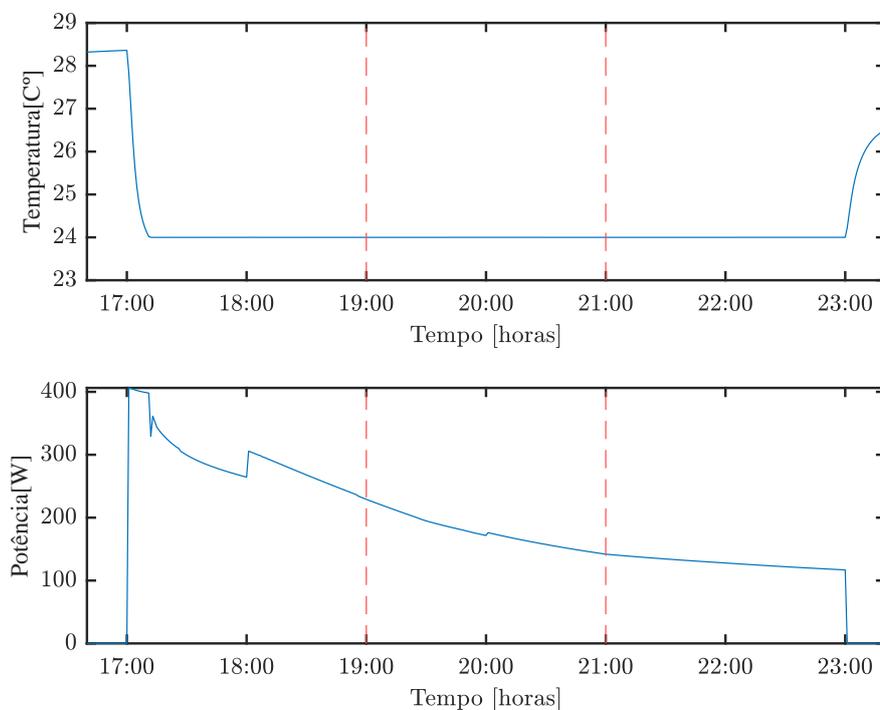


Figura 4.9: Perfis de potência e temperatura interior para uma utilização do equipamento com *setpoint* nos 24°C - estação arrefecimento.

Observa-se ainda, pelas 18:00h, uma perturbação na curva de potência que, mais uma vez, se justifica pela introdução dos ganhos internos gerados pela atividade metabólica do ocupante. As linhas vermelhas representam o período onde são simuladas as ações de gestão de carga.

Através da simulação da estratégia 10on+5off obtiveram-se os resultados apresentados na figura 4.10. Nesta figura é notável que os valores de potência de cada ciclo decrescem ao longo do tempo. Por motivos de simplificação, a análise dos valores que se seguem volta a ser feita somente para o primeiro ciclo. Quando se inicia o estado off, a potência máxima disponibilizada vai ter um valor de 217,3W. O valor do tempo da potência disponibilizada nesta estratégia é de 5 minutos. Durante este tempo, a temperatura interior varia entre os 24°C e 25,8°C sensivelmente. Uma vez que o equipamento opera agora na função de arrefecimento, sempre que se inicia um estado off a tendência da temperatura é a de subir. Ao fim dos 5 minutos, existe um efeito de restituição de carga, de modo a reduzir a temperatura para os 24°C. O valor da potência máxima restituída para este caso é de 154,3W.

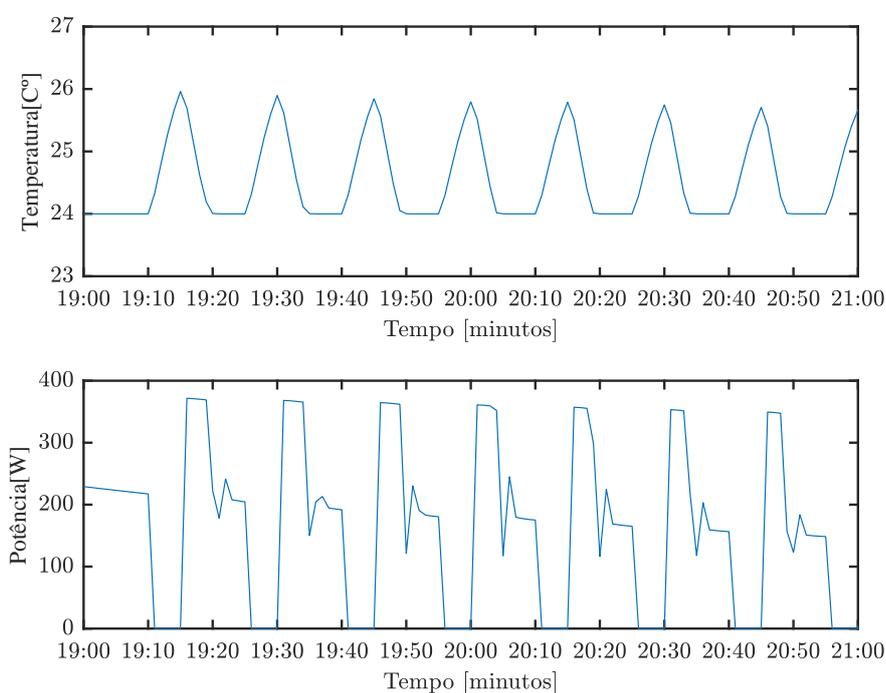


Figura 4.10: Perfis de potência e temperatura interior durante o evento de DR para a estratégia 10on+5off - estação arrefecimento.

Já na estratégia 20on+10off obtiveram-se os resultados apresentados na figura 4.11. A potência máxima disponibilizada é agora de 205,9W. Para esta estratégia a duração de potência disponibilizada durante um ciclo é de 10 minutos. Durante este período registaram-se variações de temperatura dos 24°C aos 26,7°C. A potência máxima de restituição verifica-se agora de 163,9W. Uma vez mais, é notório que o prolongamento do estado off gera variações de temperatura de maior amplitude quando comparadas com a estratégia da figura 4.10. Dado que existe uma menor frequência cíclica, observa-se, novamente, que, no mesmo intervalo de tempo, a frequência do fenómeno de restituição decresce em comparação com a estratégia anterior.

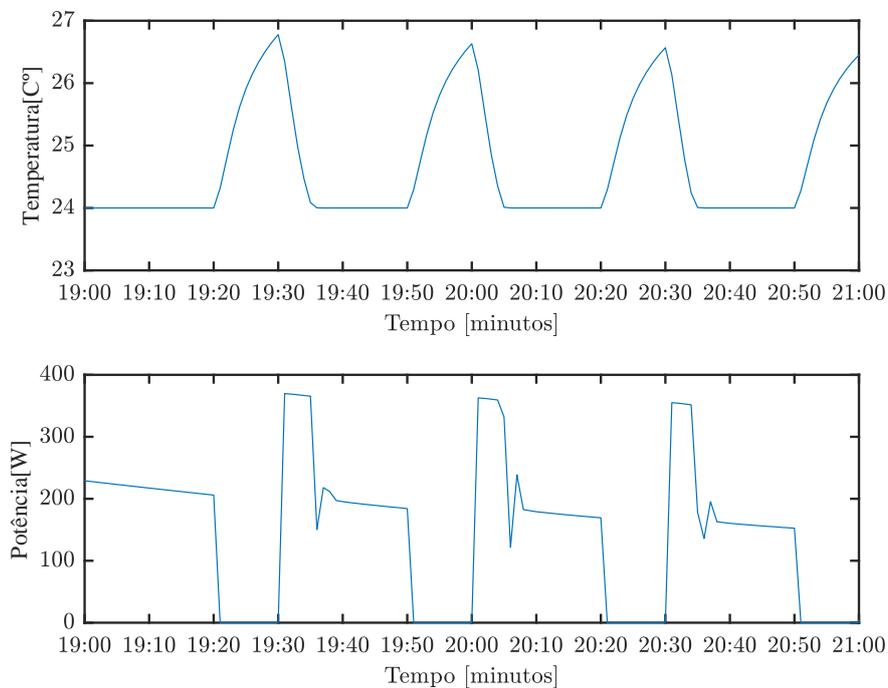


Figura 4.11: Perfis de potência e temperatura interior durante o evento de DR para a estratégia 20on+10off - estação arrefecimento.

Para a estratégia 20n+10a apresentam-se os resultados na figura 4.12. Quando se altera a parametrização do equipamento vai passar a existir uma potência disponibilizada durante um intervalo de 5 minutos. O valor máximo desta potência disponibilizada é de 205,9W. Durante estes 5 minutos a temperatura aumenta dos 24°C aos 26°C. Logo após este período, constata-se, novamente, uma potência transitória derivada da necessidade de manter a temperatura nos 26°C. A potência transitória mínima disponibilizada para a rede é registada nos 94,0W. Após este transitório, a potência do diagrama estabiliza durante um curto intervalo de tempo.

O valor da potência estável máxima disponibilizada neste instante é de 115,8W. O tempo da potência disponibilizada característica do estado reparametrizado é de 5 minutos. Após este período, há necessidade de reduzir a temperatura de volta aos 24°C, sendo que é, por isso, gerada uma potência máxima de restituição de 163,1W. Mais uma vez, como espectável, as temperaturas foram mantidas dentro da gama de valores estipulada.

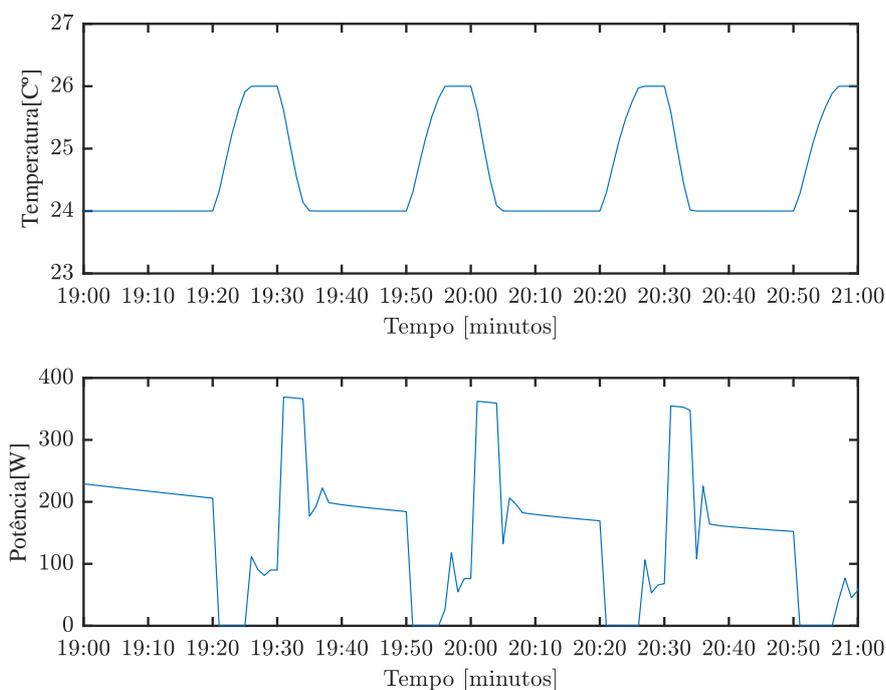


Figura 4.12: Perfis de potência e temperatura interior durante o evento de DR para a estratégia 20n+10a - estação arrefecimento.

Por último, na figura 4.13, observam-se os gráficos obtidos para a estratégia 30n+15a. Tal como na simulação anterior, quando se dá a alteração na parametrização do equipamento vai passar a existir uma potência disponibilizada para a rede. O valor máximo desta potência regista-se agora no valor dos 194,8W. Decorridos 5 minutos, a temperatura interior atinge os 26°C. Volta-se a verificar uma potência transitória para manter a temperatura neste valor. A potência transitória mínima disponibilizada é agora de 90,4W. Após este transitório, a potência estabiliza, gerando uma potência disponibilizada de 110,3W. O tempo da potência disponibilizada característica do estado reparametrizado é agora de 10 minutos. Após estes 10 minutos, a temperatura é reposta nos 26°C, gerando uma potência máxima de restituição de 151,9W.

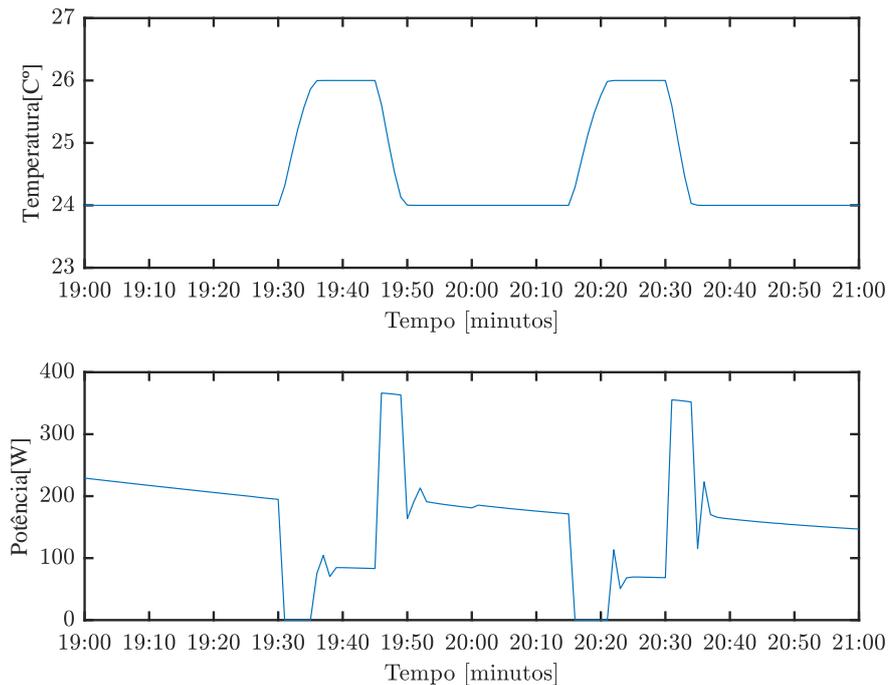


Figura 4.13: Perfis de potência e temperatura interior durante o evento de DR para a estratégia 30n+15a - estação arrefecimento.

Os resultados resumidos das simulações referentes aos diagramas de carga e à qualidade de serviço para esta estação estão expostos na tabela 4.4 e na tabela 4.5, respetivamente. Para este cenário específico da estação de arrefecimento, as conclusões são algo diferentes das obtidas na estação de aquecimento. Para as estratégias de controlo direto, tal como se verificou anteriormente e de uma forma espectável, o tempo de potência disponibilizada em cada ciclo é maior para a estratégia 20on+10off (tabela 4.4). Devido a este facto, a amplitude da variação da temperatura voltou a verificar-se maior para a estratégia 20on+10off (tabela 4.5).

Comparando as estratégias de reparametrização entre si, volta-se a verificar, como esperado, que o tempo da potência disponibilizada característica do estado reparametrizado é maior para a estratégia 30n+15a.

Comparando as estratégias de controlo direto com as estratégias de reparametrização, observa-se agora que a estratégia 10on+5off apresenta uma qualidade de serviço bastante semelhante às estratégias de reparametrização em termos de variação de temperatura. A pior qualidade de serviço é fornecida pela aplicação da estratégia 20on+10off (tabela 4.5).

Finalmente, comparam-se agora os resultados em relação à estação de aquecimento. Nas

estratégias de controlo direto, foi claramente notório que os valores máximos de potência disponibilizada são inferiores na estação de arrefecimento. Este facto justifica-se pela necessidade do equipamento usar uma potência inferior para satisfazer as condições parametrizáveis. Da mesma maneira, verificou-se que a potência máxima de restituição foi menor no cenário de aquecimento (comparar tabelas 4.2 e 4.4). Nota-se ainda que a aceitação do serviço por parte dos utilizadores para este tipo de estratégias seria mais fácil na estação de arrefecimento, uma vez que a amplitude das variações de temperatura interior é menor neste caso (comparar tabelas 4.3 e 4.5).

Para as estratégias de reparametrização, a qualidade de serviço foi garantida em ambos os cenários (arrefecimento e aquecimento), embora com valores de máximos de potência disponibilizada mais reduzidos para a estação de arrefecimento (comparar tabelas 4.2 e 4.4). Verifica-se que na estação de arrefecimento o tempo da potência disponibilizada característica do estado reparametrizado é menor. Este fenómeno justifica-se pelo aumento do tempo em que a temperatura demora a atingir o valor do *setpoint* alterado (comparar tabelas 4.3 e 4.5). Nota-se ainda que a potência transitória mínima disponibilizada no estado reparametrizado é significativamente menor para a estação de arrefecimento (comparar tabelas 4.2 e 4.4).

Tabela 4.4: Descrição numérica dos resultados obtidos referentes aos diagramas de carga de cada estratégia - estação arrefecimento.

Estratégia	Potência Máxima disponibilizada	Tempo da potência disponibilizada	Potência Máxima de Restituição	Potência transitória mínima disponibilizada no estado reparametrizado	Potência estável máxima disponibilizada no estado reparametrizado	Tempo da potência disponibilizada característica do estado reparametrizado
10on+5off	217,3 W	5 minutos	154,3 W	---	---	---
20on+10off	205,9 W	10 minutos	163,9 W	---	---	---
20n+10a	205,9 W	5 minutos	163,1 W	94,0 W	115,8 W	5 minutos
30n+15a	194,8 W	5 minutos	151,9 W	90,4 W	110,3 W	10 minutos

Tabela 4.5: Resumo da qualidade do serviço obtido através da implementação das diferentes estratégias - estação arrefecimento.

Estratégia	Qualidade do Serviço
10on+5off	Sempre que se inicia um estado off a temperatura varia dos 24°C aos 25,8°C no intervalo de 5 minutos. No início dos estados on, a temperatura é reposta de volta aos 24°C e mantém-se nesse valor até nova alteração de estado.
20on+10off	Sempre que se inicia um estado off a temperatura varia dos 24°C aos 26,7°C no intervalo de 10 minutos. No início dos estados on, a temperatura é reposta de volta aos 24°C e mantém-se nesse valor até nova alteração de estado.
20n+10a	Sempre que se inicia um estado de alteração de setpoint, a temperatura varia dos 24°C para os 26°C num intervalo de 5 minutos. A temperatura é mantida neste valor durante os restantes 5 minutos do estado. Quando se inicia um estado de reposição do setpoint a temperatura é remetida ao valor dos 24°C.
30n + 15a	Sempre que se inicia um estado de alteração de setpoint, a temperatura varia dos 24°C para os 26°C no intervalo de 5 minutos. A temperatura é mantida neste valor durante os restantes 10 minutos do estado. Quando se inicia um estado de reposição do setpoint a temperatura é remetida ao valor dos 24°C .

4.3 Efeito da utilização regular do serviço de climatização nos impactos das ações de gestão de carga

As simulações anteriores retratam aplicações de controlo de carga sobre dois dias específicos de duas estações distintas, considerando que o serviço de energia foi apenas usado nesse dia. Todavia, durante as estações de aquecimento e de arrefecimento é comum aos ocupantes fazerem uma utilização mais continuada e regular destes serviços. Neste seguimento, a questão que se coloca é: de que maneira é que uma utilização mais continuada do serviço de climatização pode afetar os impactos dos eventos de DR?

Nas simulações que se seguem, a ocorrência do evento e registo dos dados mantêm-se nesses dias e nos mesmos horários. A alteração imposta reside em variar o número de dias anteriores, onde existiu uma utilização do serviço. Para facilitar a compreensão do leitor, dá-se o seguinte exemplo: uma análise feita na estação de aquecimento sob a influência da utilização do serviço nos cinco dias anteriores, significa que durante os dias 10, 11, 12, 13,

14 houve uma utilização normal do serviço (*setpoint* fixo) das 17:00h às 23:00h e no dia 15 é feita a avaliação das medidas de gestão de carga. Ao fazer a avaliação dos dados no mesmo dia (para as mesmas condições exteriores) garante-se que qualquer alteração registada na temperatura interior e no consumo do equipamento é em função das diferenças de energia armazenada na estrutura associada ao histórico de utilização do serviço.

4.3.1 Estação de Aquecimento

Como foi observado anteriormente, a qualidade do serviço para as estratégias de reparametrização é sempre mantida dentro da gama de valores definida. No entanto, para as estratégias de controlo direto, é notório que a qualidade do serviço depende fortemente de aplicação das ações além, claro, das condições climatéricas. Esta afirmação é justificada pelas diferenças de temperatura observadas com a aplicação deste tipo de estratégias em estações distintas. Desta maneira, procedeu-se ao aumento do número de dias anteriores em que existiu utilização do serviço, de modo a observar eventuais diferenças na amplitude dos intervalos de temperatura interior consequentes da aplicação das estratégias de controlo direto. A figura 4.14 apresenta a variação máxima de temperatura interior consequente da aplicação das estratégias de controlo direto, segundo a variação do número de dias anteriores onde existiu utilização do serviço. Olhando para a figura 4.14(a) e 4.14(b) destaca-se que o valor da amplitude da variação de temperatura associado ao caso "0 número de dias anteriores com utilização do serviço" corresponde ao caso simulado anteriormente na estação de aquecimento, ou seja, sem precedentes de utilização (relembra-se que, neste caso, as variações de temperatura foram de [20;16,7] e [20;15,5] para estratégia 10on+5off e 20on+10off, respetivamente. Consultar tabela 4.3).

De uma maneira geral, observa-se na figura 4.14 que a qualidade do serviço obtida no dia 15 de fevereiro melhora, significativamente, com o aumento do número de dias anteriores onde existiu utilização do serviço, uma vez que a amplitude dos intervalos de temperatura interior tende a decrescer. No entanto, este decréscimo observa-se cada vez menos acentuado. Na figura 4.14(a) constata-se que a partir dos 7 dias anteriores onde existiu utilização do serviço, já não se verifica qualquer variação na amplitude das temperaturas. Esta, neste caso, apresenta um valor de 2,4°C. Já na figura 4.14(b) observa-se que a partir dos 6 dias anteriores

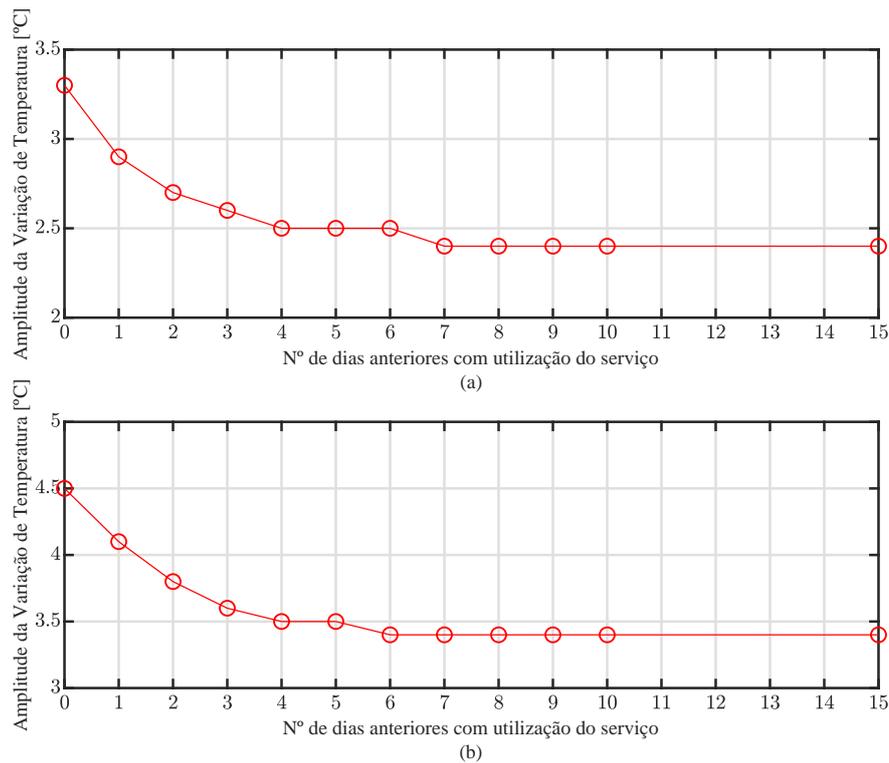


Figura 4.14: Amplitude dos intervalos de temperatura interior segundo o número de dias anteriores com utilização do serviço consequente da aplicação das estratégias: (a)10on+5off; (b)20on+10off - estação aquecimento.

com utilização do serviço já não se registam variações no intervalo de temperaturas interiores, sendo que, para este caso, se regista uma amplitude de 3,4°C. Dado que já se avaliou o pior cenário em termos de qualidade de serviço (cenário sem precedentes de utilização), escolhe-se agora um cenário que represente a melhor qualidade de serviço prestada para ambas as estratégias, de modo a ser possível avaliar quais as respetivas alterações em termos de diagrama de carga e potência disponibilizada para a rede. O cenário de simulação escolhido é o de "7 dias anteriores com utilização do serviço", dado que este ponto já representa um valor saturado para ambas as curvas. Para reforçar a ideia, o novo cenário de simulação continua a ser feito sobre o dia 15 de fevereiro, mas considera-se agora que durante os dias 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 o equipamento esteve em funcionamento das 17:00h às 23:00h com *setpoint* de 20°C.

A figura B.1 representa o diagrama de carga obtido no dia 15 de fevereiro (para este novo cenário) sem qualquer ação de gestão de carga. Destaca-se, desde já, o valor da temperatura

inicial, que passa agora a ser de 15°C. Esta alteração é justificada pela utilização precedente do serviço, dado que tanto as cargas internas como as condições climatéricas se mantiveram iguais. Dado que as necessidades de aquecimento são menores neste cenário, observa-se também que a potência usada pelo equipamento para manter a temperatura nos 20°C é menor quando comparada à da figura 4.2. O valor de consumo do equipamento durante as 6 horas regista-se nos 1325,6 wh.

Os diagramas de carga resultantes da simulação das ações de gestão de carga para este novo cenário podem ser consultados da figura B.2 à figura B.5. Os resultados obtidos através da análise dos diagramas de carga destas simulações podem ser consultados na tabela 4.6. Os valores percentuais em cada célula desta tabela têm por base a comparação com os valores da tabela 4.2. O resumo à qualidade de serviço do presente cenário pode ser consultado através da tabela 4.7.

Comparando as estratégias de controlo direto na situação sem precedentes de utilização com o presente cenário (observar tabelas 4.2 e 4.6) é claramente notório uma redução nos valores de potência máxima disponibilizada (cerca de 20%), o que acaba por ser o esperado, dado que o equipamento neste cenário necessita de ser alimentado com menores valores de potência para manter as condições parametrizadas. Da mesma maneira, para o presente cenário, a potência máxima de restituição verificou-se maior (um aumento de cerca de 50%). Quanto à qualidade do serviço obtida por estas duas estratégias, como já se tinha visto anteriormente, melhorou significativamente neste cenário, uma vez que as variações de temperatura interna se mostraram menores (observar tabelas 4.7 e 4.3). Para as estratégias de reparametrização observou-se também uma redução dos valores de potência máxima disponibilizada e de potência estável máxima disponibilizada no estado reparametrizado (observar tabelas 4.2 e 4.6). É também notória a redução do tempo da potência disponibilizada característica do estado reparametrizado. Este acontecimento deve-se ao facto do aumento da demora em que a temperatura transita dos 20°C para os 18°C (observar tabelas 4.7 e 4.3).

Numa análise geral e para este cenário concreto observa-se que do ponto de vista do operador de rede, ações aplicadas sob influência das utilizações anteriores consideradas implicam a obtenção de menores valores de potência disponibilizada pela carga quando comparada à aplicação das mesmas estratégias sem influências energéticas precedentes. Apesar deste

fator, no caso das estratégias de controlo direto, esta influência pode ser preponderante para garantir melhor aceitação do serviço por parte dos utilizadores, dado que a amplitude das variações de temperatura diminuiu consideravelmente (observar tabelas 4.7 e 4.3).

Tabela 4.6: Descrição numérica dos resultados obtidos referentes aos diagramas de carga de cada estratégia após 7 dias de utilização do serviço - estação aquecimento.

Estratégia	Potência Máxima disponibilizada	Tempo da potência disponibilizada	Potência Máxima de Restituição	Potência transitória mínima disponibilizada no estado reparametrizado	Potência estável máxima disponibilizada no estado reparametrizado	Tempo da potência disponibilizada característica do estado reparametrizado
10on+5off	216,7 W (-19,4%)	5 minutos	152,1 W (+51,5%)	---	---	---
20on+10off	216,2 W (-19,3%)	10 minutos	152,4 W (+51,3%)	---	---	---
20n+10a	216,2 W (-19,3%)	4 minutos	152,8 W (+52,6%)	37,9 W (+22,3%)	102,5 W (-15,6%)	6 minutos
30n+15a	215,7 W (-19,2%)	4 minutos	151,9 W (+52,2%)	36,6 W (+6,7%)	102,0 W (-14,8%)	11 minutos

Tabela 4.7: Resumo da qualidade do serviço obtido através da implementação das diferentes estratégias após 7 dias de utilização do serviço - estação aquecimento.

Estratégia	Qualidade do Serviço
10on+5off	Sempre que se inicia um estado off a temperatura varia dos 20°C aos 17,6°C no intervalo de 5 minutos. No início dos estados on, a temperatura é reposta de volta aos 20°C até nova alteração de estado.
20on+10off	Sempre que se inicia um estado off a temperatura varia dos 20°C aos 16,6°C no intervalo de 10 minutos. No início dos estados on, a temperatura é reposta de volta aos 20°C até nova alteração de estado.
20n+10a	Sempre que se inicia um estado de alteração de setpoint, a temperatura varia dos 20°C para os 18°C num intervalo de 4 minutos. A temperatura é mantida neste valor durante os restantes 6 minutos do estado. Quando se inicia um estado de reposição do setpoint a temperatura é remetida ao valor dos 20°C.
30n + 15a	Sempre que se inicia um estado de alteração de setpoint, a temperatura varia dos 20°C para os 18°C no intervalo de 4 minutos. A temperatura é mantida neste valor durante os restantes 11 minutos do estado. Quando se inicia um estado de reposição do setpoint a temperatura é remetida ao valor dos 20°C.

4.3.2 Estação de Arrefecimento

Tal como na estação de aquecimento, procede-se agora à variação dos dias anteriores em que existiu utilização do serviço na estação de arrefecimento. Para estes dias foi considerada uma utilização do equipamento das 17:00h às 23:00h, parametrizada para um *setpoint* de 24°C. A figura 4.15 apresenta a amplitude da variação da temperatura interior consequente da aplicação das estratégias de controlo direto, segundo a variação do número de dias anteriores onde existiu utilização do serviço. O caso simulado anteriormente na estação de arrefecimento incidiu sobre a aplicação das estratégias no dia 9 de agosto sem quaisquer precedentes de utilização onde as variações de temperatura registadas para as estratégias de 10on+5off e 20on+10off foram de [24;25,8]°C e [24;26,7]°C, respetivamente (tabela 4.5). Estes resultados estão representados nas figuras 4.1(a) e 4.1(b) nos casos "0 número de dias anteriores com utilização do serviço".

De uma forma geral, olhando para a figura 4.1, é notório que a amplitude das variações

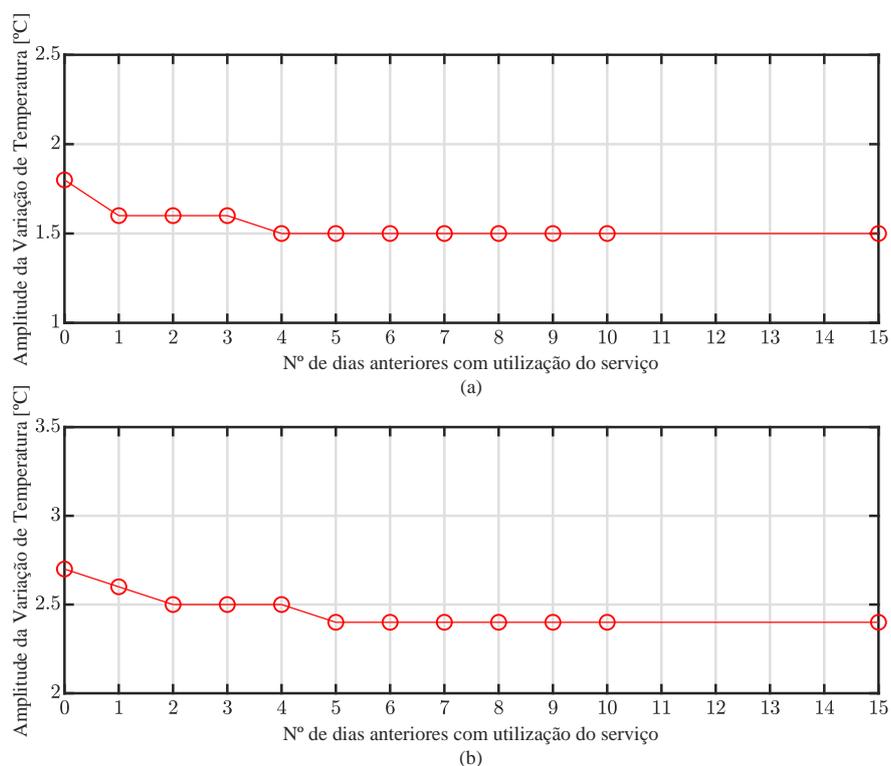


Figura 4.15: Amplitude dos intervalos de temperatura interior segundo o número de dias anteriores com utilização do serviço consequente da aplicação das estratégias: (a)10on+5off; (b)20on+10off - estação arrefecimento.

de temperatura interna obtidas através da aplicação das estratégias vai diminuindo com o aumento do número de dias anteriores onde existiu utilização do serviço, mas de forma pouco significativa. Observando o pior cenário (0 dias) e o melhor cenário (15 dias) da figura 4.1(a), constata-se que a variação dos intervalos de temperatura passou dos $1,8^{\circ}\text{C}$ para os $1,5^{\circ}\text{C}$. Na figura 4.1(b) registou-se uma variação de temperatura de $2,7^{\circ}\text{C}$ para o pior cenário (0 dias) e $2,4^{\circ}\text{C}$ para o melhor cenário (15 dias). Destes resultados infere-se que a contribuição da energia frigorífica fornecida em dias anteriores teve um impacto ligeiro na qualidade do serviço (redução de amplitudes em cerca de 16,67% e 11,25%, respetivamente) no momento das medições. As simulações que se seguem avaliam o cenário de 5 dias de utilização anterior (ponto onde ambas as curvas saturam) de modo a inferir potenciais alterações nos diagramas de carga.

Reforça-se que este novo cenário representa uma situação onde durante os dias 4, 5, 6, 7, 8 o serviço foi utilizado das 17:00h às 23:00h com *setpoint* de 24°C , sendo que a análise de dados é feita sobre o dia 9 de agosto.

A figura B.6 representa o diagrama de carga e perfil de temperatura interior obtidos para o dia 9 de agosto do presente cenário sem qualquer ação de gestão de carga. Numa primeira análise repara-se que o valor de temperatura inicial registado às 17:00h passa a ser de $27,7^{\circ}\text{C}$. O diagrama de carga é bastante semelhante ao observado na figura 4.9, notando-se apenas uma ligeira redução na curva de valores da potência utilizada para manter a temperatura nos 24°C (comparar com a figura 4.9). O consumo durante as 6 horas de utilização registou-se nos 1044,35 wh.

Os diagramas de carga resultantes das ações de gestão de carga para este novo cenário podem ser consultados da figura B.7 à figura B.10.

Na tabela 4.8 apresentam-se resumidos os valores de simulação das diferentes estratégias. Os valores percentuais de cada célula desta tabela têm por base a comparação com os valores de potência da tabela 4.4. Já na tabela 4.9 apresenta-se um resumo da qualidade do serviço prestada por cada estratégia.

Analisando a tabela 4.8 observa-se que os valores de potência máxima disponibilizada relativos às estratégias de controlo direto são ligeiramente menores do que os apresentados na tabela 4.4 (reduções de cerca de 10%). Por outro lado, e como era de esperar, os valores

da potência máxima de restituição de carga aumentaram ligeiramente. Como já se tinha visto, as alterações verificadas na qualidade de serviço prestada nas estratégias de controlo direto são ligeiras (uma variação $0,3^{\circ}\text{C}$ no intervalo de temperaturas) comparando o cenário sem precedentes de utilização com o cenário de utilização do serviço nos 5 dias anteriores. (comparar as tabelas 4.5 e 4.9)

Para as estratégias de reparametrização observou-se também uma redução nos valores de potência disponibilizada. Do mesmo modo, os valores máximos da potência de restituição aumentaram. Notou-se ainda a diferença de mais um minuto no tempo da potência disponibilizada e, como consequência, o tempo de potência disponibilizada característica do estado reparametrizado diminuiu um minuto (comparar as tabelas 4.4 e 4.8). Como era de esperar, a qualidade de serviço prestada pelas estratégias de reparametrização foi assegurada dentro dos intervalos estipulados.

Verificaram-se algumas alterações em termos de diagrama de carga neste cenário quando comparadas com o cenário de simulação sem precedentes de utilização. Por outro lado, estima-se que as variações na qualidade de serviço não sejam grandes o suficiente ao ponto de alterar o conforto dos utilizadores. Conclui-se, assim, que neste período de simulação específico da estação de arrefecimento, a aplicação destas estratégias é quase insensível ao histórico de utilização regular considerado do ponto de vista da qualidade de serviço prestada.

Tabela 4.8: Descrição numérica dos resultados obtidos referentes aos diagramas de carga de cada estratégia após 5 dias de utilização do serviço - estação arrefecimento.

Estratégia	Potência Máxima disponibilizada	Tempo da potência disponibilizada	Potência Máxima de Restituição	Potência transitória mínima disponibilizada no estado reparametrizado	Potência estável máxima disponibilizada no estado reparametrizado	Tempo da potência disponibilizada característica do estado reparametrizado
10on+5off	195,5 W (-10,0%)	5 minutos	176,5 W (+14,4%)	---	---	---
20on+10off	185,8 W (-9,8%)	10 minutos	184,2 W (+12,4%)	---	---	---
20n+10a	185,8 W (-9,8%)	6 minutos	183,7 W (+12,6%)	65,4 W (-30,4%)	110,0 W (-5,0%)	4 minutos
30n+15a	176,3 W (-9,5%)	6 minutos	190,4 W (+25,3%)	91,9 W (+1,7%)	105,8 W (-4,0%)	9 minutos

Tabela 4.9: Resumo da qualidade do serviço obtido através da implementação das diferentes estratégias após 5 dias de utilização do serviço - estação arrefecimento.

Estratégia	Qualidade do Serviço
10on+5off	Sempre que se inicia um estado off a temperatura varia dos 24°C aos 25,5°C no intervalo de 5 minutos. No início dos estados on, a temperatura é reposta de volta aos 24°C e mantém-se nesse valor até nova alteração de estado.
20on+10off	Sempre que se inicia um estado off a temperatura varia dos 24°C aos 26,4°C no intervalo de 10 minutos. No início dos estados on, a temperatura é reposta de volta aos 24°C e mantém-se nesse valor até nova alteração de estado.
20n+10a	Sempre que se inicia um estado de alteração de setpoint, a temperatura varia dos 24°C para os 26°C num intervalo de 6 minutos. A temperatura é mantida neste valor durante os restantes 4 minutos do estado. Quando se inicia um estado de reposição do setpoint a temperatura é remetida ao valor dos 24°C.
30n + 15a	Sempre que se inicia um estado de alteração de setpoint, a temperatura varia dos 24°C para os 26°C no intervalo de 6 minutos. A temperatura é mantida neste valor durante os restantes 9 minutos do estado. Quando se inicia um estado de reposição do setpoint a temperatura é remetida ao valor dos 24°C .

Capítulo 5

Conclusões

Numa primeira análise, e tendo em conta o comportamento passivo da habitação, os requisitos de conforto e as condições climatéricas, é possível notar que as necessidades energéticas para aquecimento são superiores quando comparadas com as necessidades de arrefecimento. Relativamente à estação de aquecimento, e num cenário onde não houve precedentes de utilização do serviço, o período em que as estratégias de controlo direto apresentam disponibilização de potência à rede implicam variações de temperatura interior pouco aceitáveis. Já nas estratégias de reparametrização verificou-se que a amplitude das variações de temperatura é assegurada à custa de uma redução da potência disponibilizada no estado reparametrizado, o que, de certa forma, acaba por ser mais favorável na aceitação do serviço para este cenário por parte dos utilizadores do equipamento.

Ainda na estação de aquecimento, e considerando o cenário onde existiu uma utilização do serviço em dias anteriores, foi possível observar uma diminuição considerável nos valores de potência dos diagramas de carga no dia das medições, quando comparados com o cenário de simulação sem precedentes de utilização. De uma forma geral, esta diminuição teve impacto sobre dois aspetos: na redução dos valores de potência disponibilizada (redução de cerca de 19%) e no aumento da potência máxima de restituição (cerca de 50%). Para as estratégias de controlo direto, durante o tempo de disponibilização de potência, observaram-se variações de temperatura de menor amplitude. Conclui-se, assim, que para o período de simulação na estação de aquecimento, onde se considerou um uso continuado do equipamento, a qualidade do serviço prestada pelas estratégias tornou-se mais aceitável. Em contrapartida, verificou-se

uma redução nos valores de potência disponibilizada e um aumento das potências máximas de restituição.

Para a estação de arrefecimento, e num cenário onde não se considerou precedentes de utilização, verificou-se que nas estratégias de controlo direto a amplitude da variação de temperatura interior foi menor nos momentos de disponibilização de carga, quando comparada com a estação de aquecimento. Porém, na estação de arrefecimento, o valor de potência máxima disponibilizada foi mais baixo e os valores de potência de restituição máxima verificaram-se mais altos. Sublinha-se ainda que neste cenário a qualidade de serviço prestada pela estratégia 10on+5off foi bastante semelhante à qualidade prestada pelas estratégias de reparametrização. Para as estratégias de reparametrização voltou a observar-se que a amplitude das variações de temperatura é assegurada à custa de uma redução da potência disponibilizada no estado reparametrizado.

Ainda na estação de arrefecimento e comparando o cenário de uso continuado do serviço com o cenário sem utilização precedente, observaram-se alterações impostas nos valores do diagrama de carga (reduções de potência disponibilizada em cerca de 10%). Para o período da estação de arrefecimento considerado, e segundo a utilização regular considerada, verificou-se que a aplicação das estratégias de gestão de carga foi quase insensível ao histórico de utilização do ponto de vista da qualidade de serviço prestada. Com este trabalho foi ainda possível confirmar o efeito da restituição de carga, onde a necessidade de repor a temperatura no valor desejado gerou alimentações da carga perto da potência nominal. Posto isto, pode também inferir-se que uma gestão adequada dos grupos de cargas e das ações a aplicar pode levar a reduções de potência pedida à rede por essas cargas, desde que se acautele devidamente o efeito da restituição.

De uma maneira geral, com este trabalho foi possível mostrar que a qualidade do serviço consequente da aplicação das estratégias de controlo direto pode depender dos hábitos de utilização dos consumidores. Por outro lado, é possível melhorar esta qualidade com aplicação de ações de reparametrização do equipamento embora esta medida implique um decréscimo nos valores de potência disponibilizada da carga para a rede.

5.1 Sugestões para Trabalho Futuro

Para o presente trabalho foi considerado sempre o mesmo horário para a simulação dos eventos de DR (2 horas após o início da utilização do serviço). Seria relevante avaliar de que forma a variação deste tempo (ex: após 1,3,4,5,6 horas) afeta os resultados obtidos.

Outra avaliação pertinente a fazer seria registrar os resultados das diferentes estratégias aplicadas segundo a variação das principais características do modelo (ex: diferentes orientações do edifício, diferentes características construtivas ao nível das fachadas e envidraçados).

A aplicação das estratégias de reparametrização teve sempre por base uma variação de 2°C no *setpoint* do equipamento. Uma abordagem interessante seria a simulação destas mesmas estratégias com diferentes variações no *setpoint* (ex: 1°C;1,5°C).

Bibliografia

- [1] L. Pe, “A review on buildings energy consumption information,” vol. 40, pp. 394–398, 2008.
- [2] Parlamento Europeu, “Directiva 2010/31/UE (reformulação),” *Jornal Oficial da União Europeia*, pp. 13–35, 2010. [Online]. Available: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/pt/TXT/?uri=CELEX:32010L0031>
- [3] A. Soares, Á. Gomes, and C. H. Antunes, “Categorization of residential electricity consumption as a basis for the assessment of the impacts of demand response actions,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 30, pp. 490–503, 2014. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.10.019>
- [4] S. Verbeke and A. Audenaert, “Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 2300–2318, 2018.
- [5] “Preventing overheating,” 2016. [Online]. Available: https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Preventing_{_}overheating
- [6] H. Wang, K. Meng, F. Luo, Z. Y. Dong, G. Verbič, Z. Xu, and K. P. Wong, “Demand response through smart home energy management using thermal inertia,” *2013 Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC 2013*, no. October, pp. 1–6, 2013.
- [7] R. V. Ralegaonkar and R. Gupta, “Review of intelligent building construction: A passive solar architecture approach,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 8, pp. 2238–2242, 2010. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.04.016>

- [8] DGGE, “Reabilitação energética da envolvente de edifícios residenciais,” Direção Geral de Geologia e Energia, Tech. Rep., 2004.
- [9] C. A. dos Santos and L. Matias, “Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios,” Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Tech. Rep., 2006.
- [10] T. Vidyamani and K. S. Swarup, “Analysis of Active and Transactive Demand Response Strategies for Smart Residential Buildings,” *2018 20th National Power Systems Conference, NPSC 2018*, pp. 1–5, 2018.
- [11] L. Gelazanskas and K. A. Gamage, “Demand side management in smart grid: A review and proposals for future direction,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 11, pp. 22–30, 2014. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2013.11.001>
- [12] H. T. Haider, O. H. See, and W. Elmenreich, “A review of residential demand response of smart grid,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 59, pp. 166–178, 2016. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.016>
- [13] S. Ø. Jensen, A. Marszal-Pomianowska, R. Lollini, W. Pasut, A. Knotzer, P. Engelmann, A. Stafford, and G. Reynders, “IEA EBC Annex 67 Energy Flexible Buildings,” *Energy and Buildings*, vol. 155, pp. 25–34, 2017.
- [14] G. Reynders, R. Amaral Lopes, A. Marszal-Pomianowska, D. Aelenei, J. Martins, and D. Saelens, “Energy flexible buildings: An evaluation of definitions and quantification methodologies applied to thermal storage,” *Energy and Buildings*, vol. 166, pp. 372–390, 2018.
- [15] T. Weiß, A. M. Fulterer, and A. Knotzer, “Energy flexibility of domestic thermal loads—a building typology approach of the residential building stock in Austria,” *Advances in Building Energy Research*, vol. 13, no. 1, pp. 122–137, 2019.
- [16] V. Corrado and E. Fabrizio, *Steady-State and Dynamic Codes, Critical Review, Advantages and Disadvantages, Accuracy, and Reliability*. Elsevier Inc., 2019. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-812817-6.00011-5>

-
- [17] Energy Plus, “EnergyPlus Essentials,” U.S. Department of Energy, Tech. Rep., 2019. [Online]. Available: <https://energyplus.net/documentation>
- [18] R. Judkoff and J. Neymark, “Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method, National Renewable Energy Laboratory, International Energy Agency.” p. 296, 1995.
- [19] J. Neymark and R. Judkoff, “International Energy Agency Building Energy Simulation Test and Diagnostic Method for Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Equipment Models (HVAC BESTEST),” p. 350, 2002. [Online]. Available: <http://www.nrel.gov/docs/fy02osti/30152.pdf>
- [20] A. Brun, C. Spitz, E. Wurtz, and L. Mora, “Behavioural comparison of some predictive tools used in alow-energy building,” *IBPSA 2009 - International Building Performance Simulation Association 2009*, pp. 1185–1190, 2009.
- [21] R. Brahme, Z. O’Neill, W. Sisson, and K. Otto, “Using existing whole building energy tools for designing net-zero energy buildings - challenges and workarounds,” *IBPSA 2009 - International Building Performance Simulation Association 2009*, pp. 9–16, 2009.
- [22] EnergyPlus, “Engineering Reference,” U.S. Department of Energy, Tech. Rep., 2019. [Online]. Available: <https://energyplus.net/documentation>
- [23] Energy Plus, “Input Output Reference,” U.S. Department of Energy, Tech. Rep., 2019. [Online]. Available: <https://energyplus.net/documentation>
- [24] D. Zhu, T. Hong, D. Yan, and C. Wang, “A detailed loads comparison of three building energy modeling programs: EnergyPlus, DeST and DOE-2.1E,” *Building Simulation*, vol. 6, no. 3, pp. 323–335, 2013.
- [25] A. Pinto and R. Fragoso, “Indicador de comportamento térmico solar passivo de habitações - Estação de aquecimento,” Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Tech. Rep., 2018.
- [26] Diário da República, “Portaria n.º 349-B/2013 - Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH)—Requisitos de conceção para edificios novos

- e intervenções,” *Diário da República N.º 232, 1.ª série*, vol. 11, no. 29, pp. 18–29, Lisboa, Portugal (in Portuguese), 2013.
- [27] EnergyPlus, “Weather Data.” [Online]. Available: <https://energyplus.net/weather>
- [28] A. Gomes, C. H. Antunes, and J. Martinho, “A physically-based model for simulating inverter type air conditioners/heat pumps,” *Energy*, vol. 50, no. 1, pp. 110–119, 2013. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2012.11.047>
- [29] M. Fadzli, H. Selamat, R. Yusof, and S. Buyamin, “Review of HVAC scheduling techniques for buildings towards energy-efficient and cost-effective operations,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 27, pp. 94–103, 2013. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.041>
- [30] J. W. Moon and S. H. Han, “Thermostat strategies impact on energy consumption in residential buildings,” *Energy and Buildings*, vol. 43, no. 2-3, pp. 338–346, 2011.

Apêndice A

Soluções Construtivas

Tabela A.1: Solução Construtiva: Paredes Exteriores (construção do exterior para o interior).

Material	Espessura (<i>m</i>)	Calor Específico (<i>J/Kg.°C</i>)	Condutividade Térmica (<i>w/m.k</i>)	Densidade Volúmica (<i>Kg/m³</i>)
Reboco	0,025	837	1,3	1800
Tijolo	0,11	837	0,5	1200
EPS	0,03	1200	0,045	12
Tijolo	0,11	837	0,5	1200
Reboco	0,025	837	1,3	1800

Tabela A.2: Solução Construtiva: Paredes Interiores (construção do exterior para o interior).

Material	Espessura (<i>m</i>)	Calor Específico (<i>J/Kg.°C</i>)	Condutividade Térmica (<i>w/m.k</i>)	Densidade Volúmica (<i>Kg/m³</i>)
Reboco	0,025	837	1,3	1800
Tijolo	0,11	837	0,5	1200
Reboco	0,025	837	1,3	1800

Tabela A.3: Solução Construtiva: Cobertura (construção do exterior para o interior).

Material	Espessura (<i>m</i>)	Calor Específico (<i>J/Kg.°C</i>)	Condutividade Térmica (<i>w/m.k</i>)	Densidade Volúmica (<i>Kg/m³</i>)
Ladrilho	0,02	837	1,3	1800
Betonilha	0,05	880	1,15	1600
EPS	0,03	1200	0,045	12
Betonilha	0,05	880	1,15	1600
Betão Armado	0,2	880	2,0	2300
Reboco	0,025	837	1,3	1800

Tabela A.4: Solução Construtiva: Pavimento (construção do exterior para o interior).

Material	Espessura (<i>m</i>)	Calor Específico (<i>J/Kg.°C</i>)	Condutividade Térmica (<i>w/m.k</i>)	Densidade Volúmica (<i>Kg/m³</i>)
Reboco	0,025	837	1,3	1800
Betão Armado	0,2	880	2,0	2300
Betonilha	0,05	880	1,15	1600
EPS	0,03	1200	0,045	12
Betonilha	0,05	880	1,15	1600
Ladrilho	0,02	837	1,3	1800

Apêndice B

Gráficos de simulação

B.1 Estação de Aquecimento

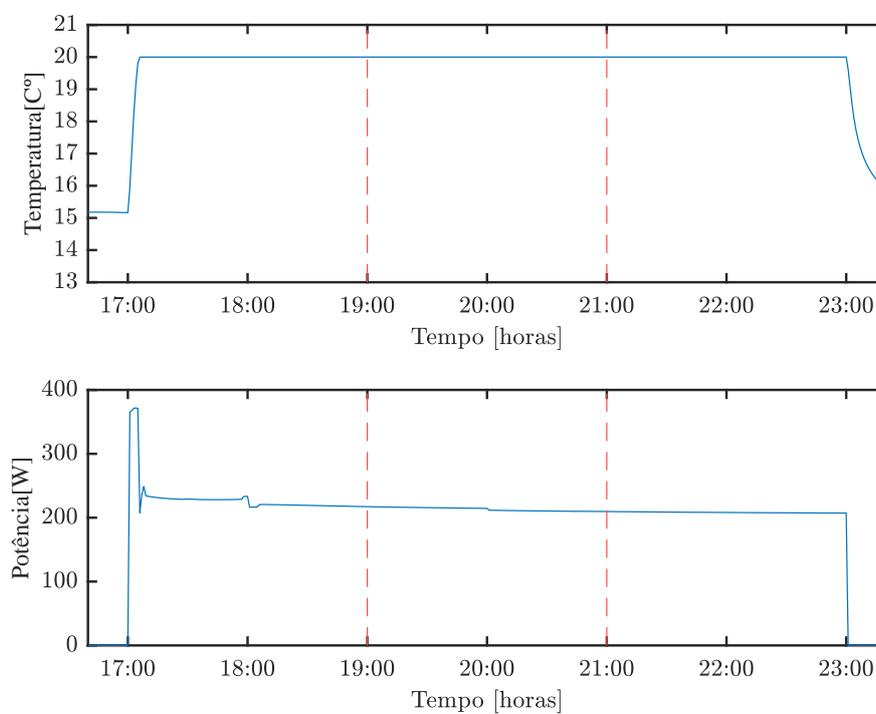


Figura B.1: Perfis de potência e temperatura interior para uma utilização do equipamento com *setpoint* nos 20°C após 7 dias de utilização do serviço - estação aquecimento.

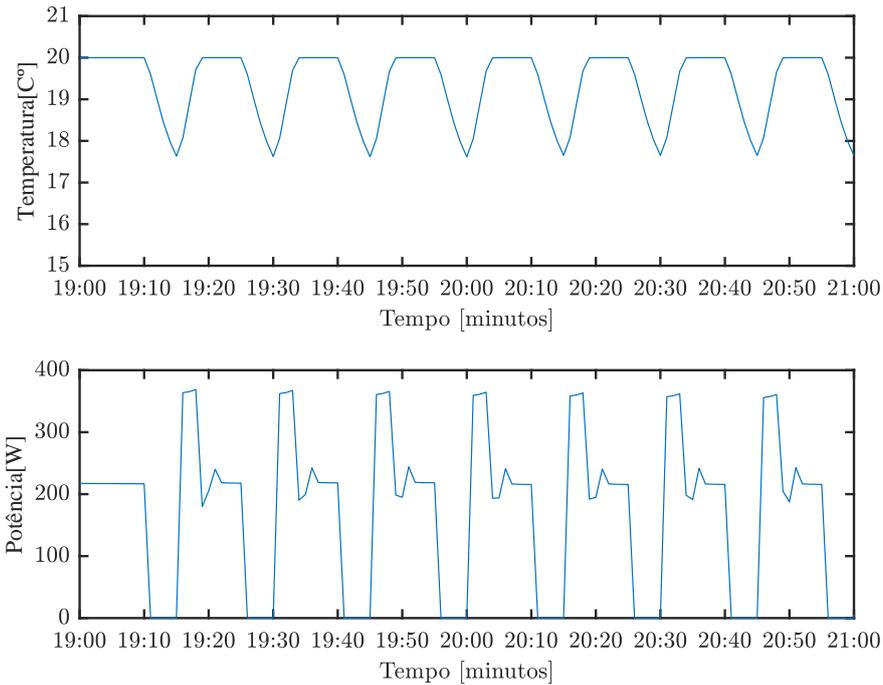


Figura B.2: Perfis de potência e temperatura interior durante o evento de DR para a estratégia 10on+5off após 7 dias de utilização do serviço - estação aquecimento.

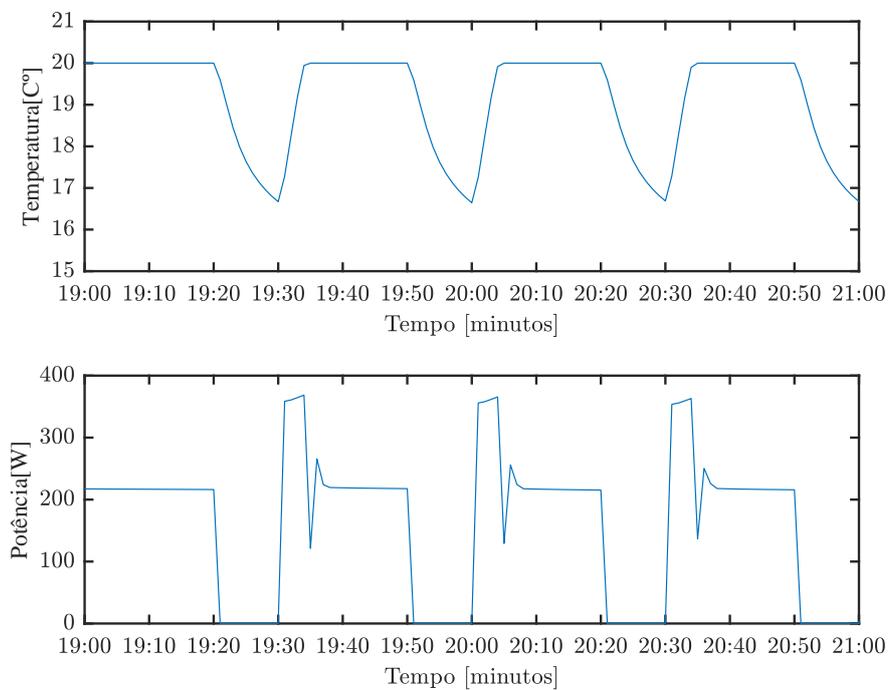


Figura B.3: Perfis de potência e temperatura interior durante o evento de DR para a estratégia 20on+10off após 7 dias de utilização do serviço - estação aquecimento.

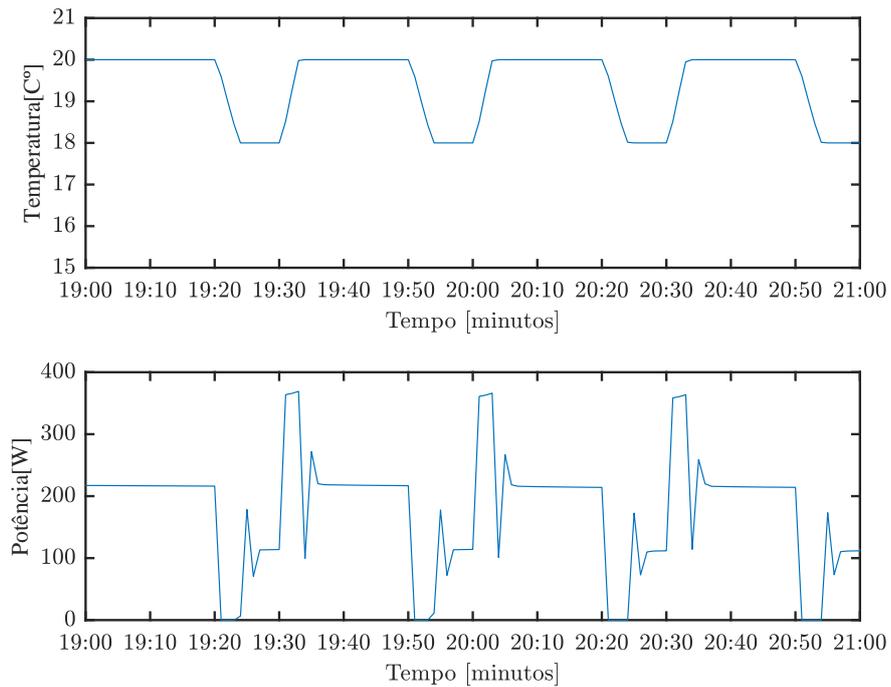


Figura B.4: Perfis de potência e temperatura interior durante o evento de DR para a estratégia 20n+10a após 7 dias de utilização do serviço - estação aquecimento.

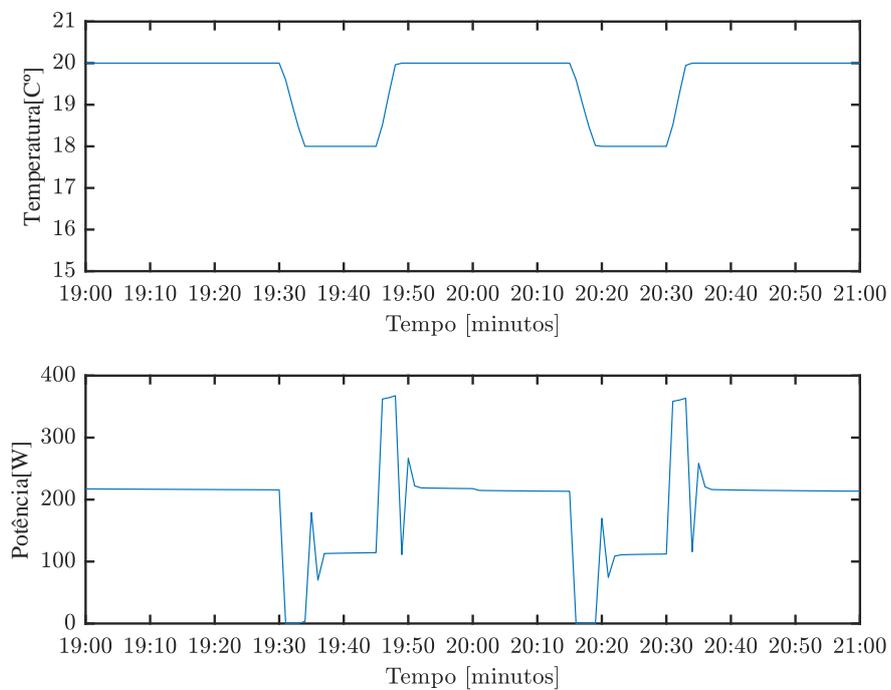


Figura B.5: Perfis de potência e temperatura interior durante o evento de DR para a estratégia 30n+15a após 7 dias de utilização do serviço - estação aquecimento.

B.2 Estação de Arrefecimento

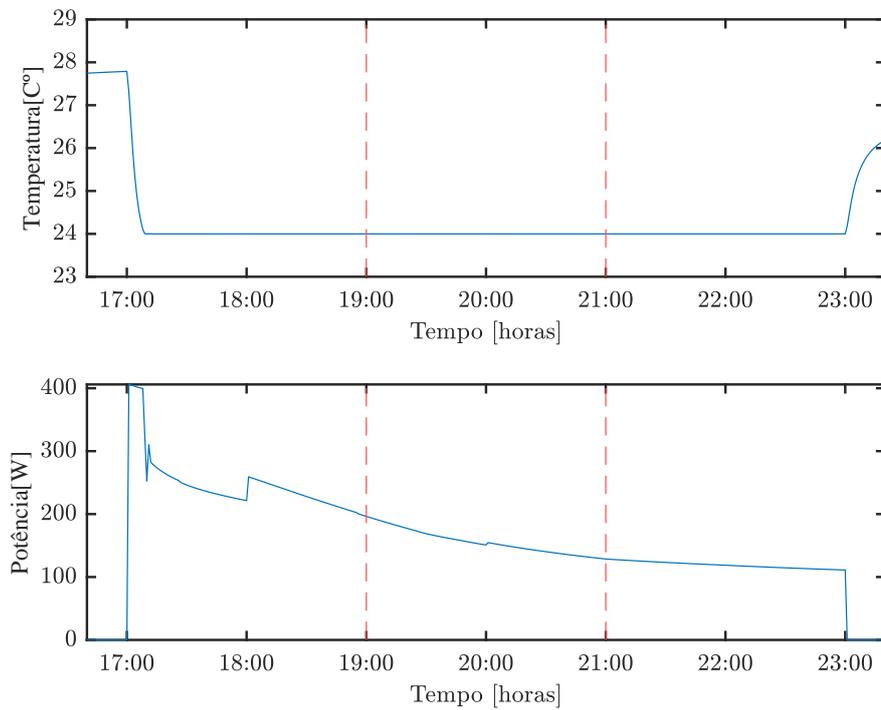


Figura B.6: Perfis de potência e temperatura interior para uma utilização do equipamento com *setpoint* nos 24°C após 5 dias de utilização do serviço - estação arrefecimento.

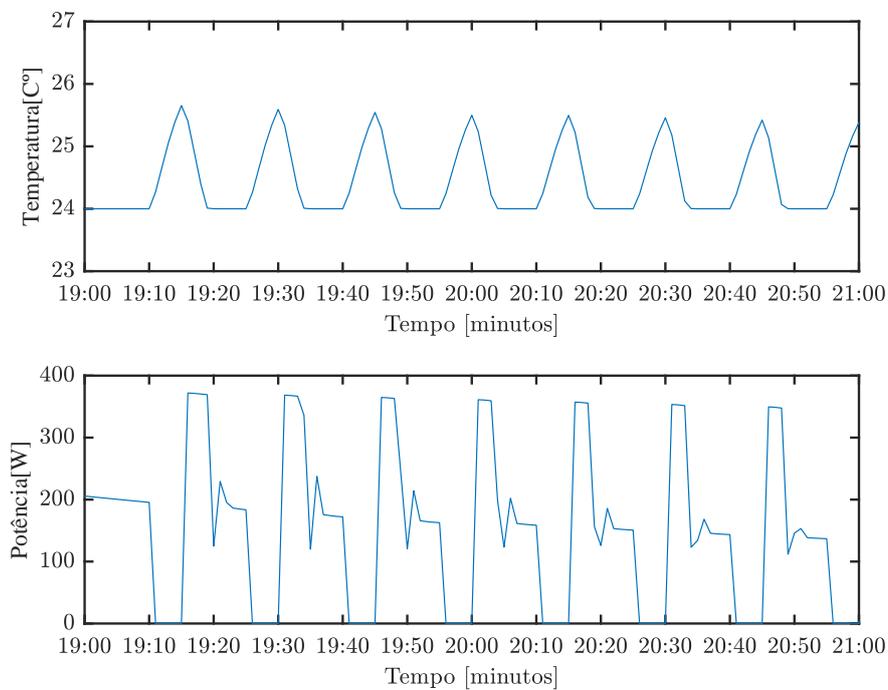


Figura B.7: Perfis de potência e temperatura interior durante o evento de DR para a estratégia 10on+5off após 5 dias de utilização do serviço - estação arrefecimento.

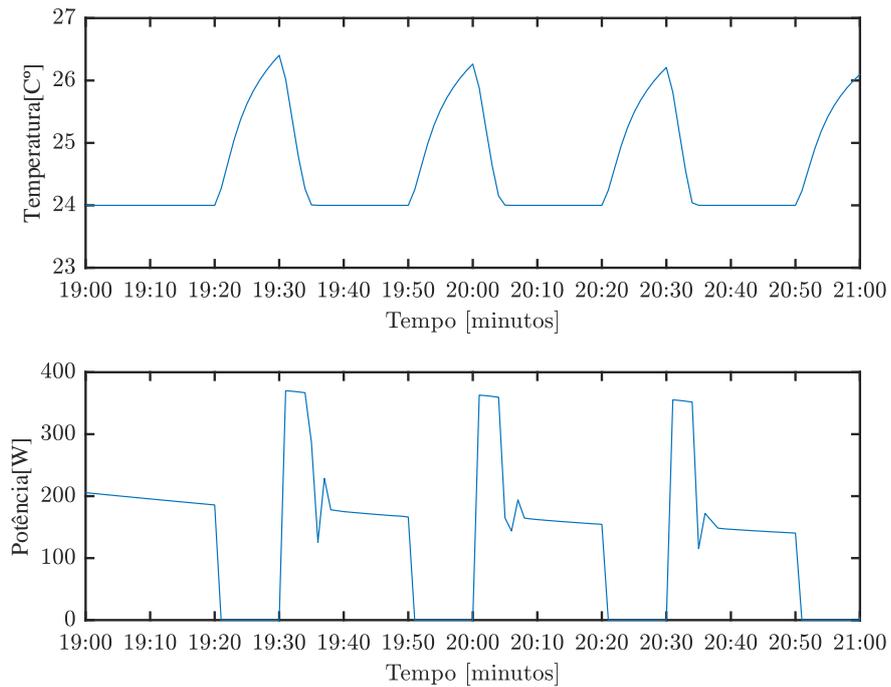


Figura B.8: Perfis de potência e temperatura interior durante o evento de DR para a estratégia 20on+10off após 5 dias de utilização do serviço - estação arrefecimento.

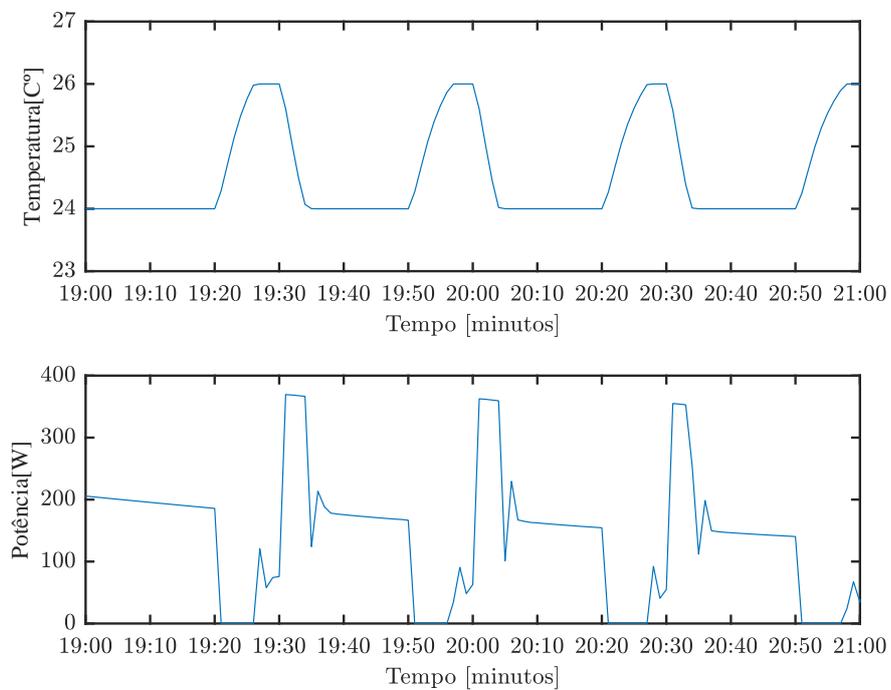


Figura B.9: Perfis de potência e temperatura interior durante o evento de DR para a estratégia 20n+10a após 5 dias de utilização do serviço - estação arrefecimento.

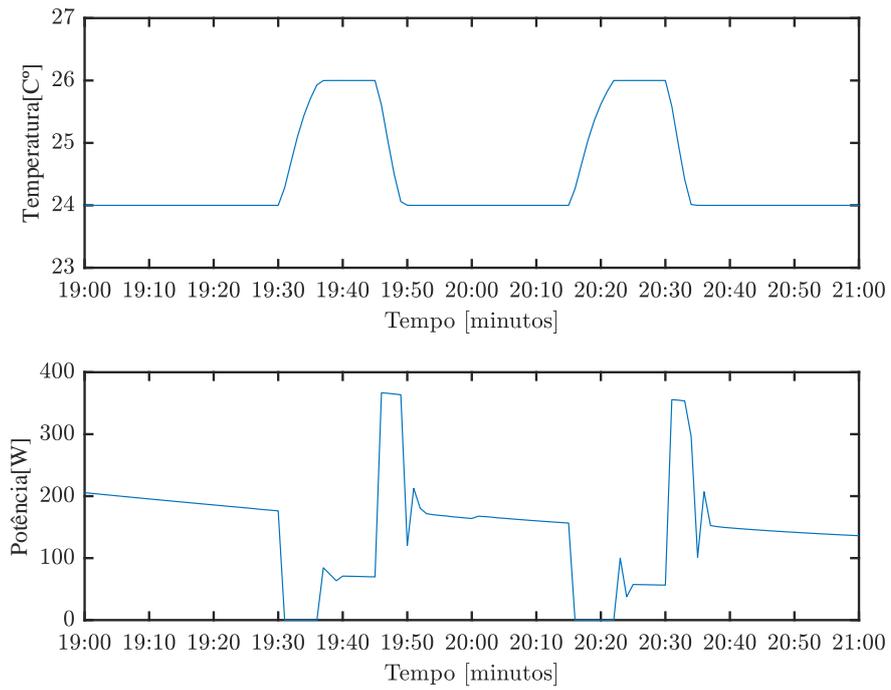


Figura B.10: Perfis de potência e temperatura interior durante o evento de DR para a estratégia 30n+15a após 5 dias de utilização do serviço - estação arrefecimento.