



# ANÁLISE DE OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA DE UM EDIFÍCIO COMERCIAL E RESIDENCIAL

**AFONSO CERQUEIRA SANTOS**

novembro de 2020

# **ANÁLISE DE OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA DE UM EDIFÍCIO COMERCIAL E RESIDENCIAL**

Afonso Cerqueira Santos  
1140594

**2020**

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica



POLITÉCNICO  
DO PORTO

isep

## MODELAÇÃO E GESTÃO ENERGÉTICA DE UM EDIFÍCIO

Afonso Cerqueira Santos  
1140594

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Energias Sustentáveis, realizada sob a orientação do Doutor Pedro Nuno Silva Faria.

**2020**

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica



# JÚRI

## **Presidente**

Doutor Manuel Carlos Malheiro de Carvalho Felgueiras  
Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

## **Orientador**

Doutor Pedro Nuno Silva Faria  
Investigador Auxiliar, Instituto Superior de Engenharia do Porto

## **Arguente**

Doutor Hugo Gabriel Valente Morais  
Professor Auxiliar, Instituto Superior Técnico







## **PALAVRAS CHAVE**

Otimização; energia; resposta da procura; análise energética; consumo energético

## **RESUMO**

Com as alterações climáticas a surgirem cada vez mais em todo o planeta, como sociedade devemos procurar por formas de reduzir e mitigar o nosso impacto. A otimização energética e o uso eficiente de energia, visam melhorar a eficácia de consumo e reduzir perdas.

O presente trabalho apresenta a análise energética de um edifício com quatro pisos, áreas residenciais, comerciais e escritórios, e a comparação dos seus desempenhos e balanços energéticos. Este estudo vem em seguimento do trabalho feito anteriormente, e procura expandir o escopo de resultados obtidos, para outros tipos de consumidores de energia. O edifício e os equipamentos de consumo de energia elétrica foram definidos para posteriormente serem sujeitos a simulação. A otimização foi feita por um algoritmo de múltiplos períodos, tendo em conta o conceito de resposta da procura (*demand response*). Foram estudados dois cenários com os dados de entrada usados no estudo anterior, como referência, e novos dados selecionados especificamente para o edifício modelado. Os cenários, provaram o funcionamento do algoritmo de otimização com reduções de consumo de 5%, ao longo do dia. Adicionalmente, o algoritmo foi capaz de deslocar com sucesso o funcionamento de máquinas de lavar, e da bombagem do edifício. Por fim, foi possível comprovar o funcionamento da otimização, com utilizadores residenciais e comerciais, e considerando o conforto dos mesmos.

## AGRADECIMENTOS

Estou eternamente grato aos que me apoiaram durante esta fase da minha vida. Um obrigado especial para a minha família, e amigos mais próximos que me fizeram chegar até aqui. Pelo apoio, aprendizagem e prontidão para ajudar providas pelo orientador, Dr. Pedro Faria, um grande obrigado. Ficam também, os agradecimentos ao GECAD, por disponibilizar os seus serviços no decorrer do trabalho. Por último, um obrigado especial, para Mahsa Khorram, pela disponibilidade para apoiar as simulações.

**KEYWORDS**

Optimization; energy; *demand response*; energetic analysis; electrical consumption

**ABSTRACT**

*With climate change emerging more and more across the planet, as a society we must look for ways to reduce and mitigate our impact. The optimization and the efficient use of energy aim to improve the efficacy of consumption and reduce losses.*

*The present work presents the energy analysis of a building with four floors, residential, commercial and office areas, and the comparison of its performance and energy balances. This study follows on from the work done previously, and seeks to expand the scope of results obtained, for other types of energy consumers. The building and the appliances used to consume electricity were defined to be subsequently subject to simulation. The optimization was done by a multi-period algorithm, considering the demand response concept. Two scenarios were studied with the input data used in the previous study, as a reference, and new data selected specifically for the modeled building. The scenarios proved the operation of the optimization algorithm with consumption reductions of 5%, throughout the day. Additionally, the algorithm was able to successfully displace the operation of washing machines, and the pumping of the building. Finally, it was possible to prove the operation of the optimization, with residential and commercial users, and considering their comfort.*



## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

### Lista de Abreviaturas

ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
GECAD	Grupo de Investigação em Engenharia e Computação Inteligente para a Inovação e o Desenvolvimento
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
IoT	<i>Internet of Things</i> , Internet das Coisas
W <sub>L</sub>	Nível de importância da luz
P <sub>L</sub>	Redução de potência da luz
W <sub>AC</sub>	Nível de importância do ar condicionado
P <sub>AC</sub>	Redução de potência do ar condicionado
DW	<i>Dishwasher/Washing Machine</i> – Máquina de lavar louça/roupa
W <sub>DW</sub>	Nível de importância da máquina de lavar
DW <sub>Bin</sub>	Variável binária que indica o estado da máquina de lavar
T <sub>in</sub>	Temperatura interior baseada no consumo do ar condicionado
T <sub>set</sub>	Temperatura definida pelo utilizador
W <sub>DW<sub>sh</sub></sub>	Nível de importância de cada período para deslocar o consumo da máquina de lavar
DW <sub>Bin<sub>sh</sub></sub>	Variável binária que indica o estado da máquina de lavar depois de deslocado o consumo
ST	<i>Starting time of shifting</i> – Período de início para deslocar o consumo

### Lista de Unidades

W	Watt (Potência Elétrica)
W.h	Watt × Hora (Energia Elétrica)
KW.h	Kilowatt x Hora (Energia Elétrica)



## GLOSSÁRIO DE TERMOS

---

<i>DR</i>	<i>Demand Response</i> – Resposta da Procura define-se como todas as ações que possam ser tomadas pelos consumidores para reduzir o consumo, face a um estímulo dado pelo fornecedor ou distribuidor de energia.
<i>Script</i>	Programa escrito para um sistema de tempo de execução específico. Utilizado para automatizar a execução de tarefas.
<i>Ramp Rate</i>	A taxa, expressa em megawatts por minuto, que um gerador consegue alterar a sua produção.

---



## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - CLASSIFICAÇÃO DE PROGRAMAS DE RESPOSTA DA PROCURA. FONTE: (ALBADI & EL-SAADANY, 2008B)	6
FIGURA 2- CONSUMO ELÉTRICO NUM EDIFÍCIO EM SINGAPURA COM 28 000 M2, AO LONGO DE UM ANO.	8
FIGURA 4 - CONSUMO DOS EQUIPAMENTOS AO LONGO DE 20 DIAS NO EDIFÍCIO DO GECAD.	11
FIGURA 4 – PLANO DO EDIFÍCIO E EQUIPAMENTOS.	11
FIGURA 5 - REPRESENTAÇÃO DO EDIFÍCIO MODELO E EQUIPAMENTOS DEFINIDOS.	16
FIGURA 6 – ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DO ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO.	18
FIGURA 7 - SCRIPT NO GNU OCTAVE PARA CONVERSÃO DOS DADOS DE CONSUMO.	20
FIGURA 8 - TEMPERATURA EXTERIOR CONSIDERADA PARA OS SISTEMAS DE AR CONDICIONADO.	29
FIGURA 9 - REDUÇÃO DE POTÊNCIA REQUERIDA PELO ALGORITMO PARA CADA PERÍODO, CENÁRIO 1.	31
FIGURA 10 - PERFIL DE CONSUMO ENERGÉTICO ORIGINAL DO EDIFÍCIO COMPLETO, CENÁRIO 1.	31
FIGURA 11 - PERFIL DE CONSUMO ENERGÉTICO OTIMIZADO DO EDIFÍCIO COMPLETO.	32
FIGURA 12 - COMPARAÇÃO DOS PERFIS DE CONSUMO ORIGINAL E OTIMIZADO DO EDIFÍCIO, CENÁRIO 1.	32
FIGURA 13 - COMPARAÇÃO DOS CONSUMOS REDUZIDOS, AO LONGO DOS DIVERSOS PISOS, CENÁRIO 1.	33
FIGURA 14 - REDUÇÃO DE POTÊNCIA REQUERIDA PELO ALGORITMO PARA CADA PERÍODO, CENÁRIO 2.	33
FIGURA 15 - PERFIL DE CONSUMO ENERGÉTICO ORIGINAL DO EDIFÍCIO COMPLETO, CENÁRIO 2.	34
FIGURA 16 - PERFIL DE CONSUMO ENERGÉTICO OTIMIZADO DO EDIFÍCIO COMPLETO, CENÁRIO 2.	34
FIGURA 17 - COMPARAÇÃO DOS PERFIS DE CONSUMO ORIGINAL E OTIMIZADO DO EDIFÍCIO, CENÁRIO 2.	35
FIGURA 18 - COMPARAÇÃO DOS CONSUMOS REDUZIDOS, AO LONGO DOS DIVERSOS PISOS, CENÁRIO 2.	35



## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - DISTRIBUIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS PELO EDIFÍCIO.	21
TABELA 2 - SUMÁRIO DOS DETALHES DAS HABITAÇÕES DE ONDE PROVÊM OS DADOS DE CONSUMO. FONTE: (KELLY & KNOTTENBELT, 2015)	22
TABELA 3 - DISTRIBUIÇÃO DOS REGISTOS DE ENERGIA PELAS LOJAS E ESCRITÓRIOS DO EDIFÍCIO.	23
TABELA 4 - DISTRIBUIÇÃO DOS REGISTOS DE ENERGIA PELAS HABITAÇÕES DO EDIFÍCIO.	24
TABELA 5 - DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO CENÁRIO 1.	30
TABELA 6 - COMPARAÇÃO DOS CONSUMOS DOS DIVERSOS EQUIPAMENTOS, NOS CENÁRIOS ABORDADOS.	36



# ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	MOTIVAÇÃO .....	1
1.2	ENQUADRAMENTO .....	1
1.3	OBJETIVOS .....	2
1.4	RESUMO .....	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1	RESPOSTA DA PROCURA ( <i>DEMAND RESPONSE</i> ) .....	5
2.1.1	PROGRAMAS .....	6
2.2	EQUIPAMENTOS E OTIMIZAÇÃO DO CONSUMO .....	7
2.2.1	CLIMATIZAÇÃO E AVAC .....	9
2.2.2	OTIMIZAÇÃO DO CONFORTO DO UTILIZADOR .....	9
2.3	PESQUISA ANTERIOR.....	10
3	DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO.....	15
3.1	EDIFÍCIO.....	15
3.2	ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO .....	17
3.3	DADOS DE CONSUMO .....	19
3.3.1	CONVERSÃO DOS DADOS .....	19
3.4	EQUIPAMENTOS.....	20
3.4.1	DESCRIÇÃO DA ORIGEM DOS EQUIPAMENTOS.....	21
3.4.2	ADAPTAÇÃO AO CASO .....	23
3.4.3	BOMBAGEM E EXTRAÇÃO .....	25
4	CENÁRIOS E DISCUSSÃO .....	29
4.1	CENÁRIO 1 .....	30
4.2	CENÁRIO 2 .....	33

---

4.3	DISCUSSÃO .....	36
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....	39
5.1	CONCLUSÕES.....	39
5.2	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....	39
6	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	45
6.1	REFERÊNCIAS.....	45

# INTRODUÇÃO

- 1.1 MOTIVAÇÃO
- 1.2 ENQUADRAMENTO
- 1.3 OBJETIVOS E RESUMO

# 1 INTRODUÇÃO

A presente dissertação de mestrado fez parte do término do ciclo de estudos para obtenção do grau de mestre em Energias Sustentáveis, no Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), por parte do aluno Afonso Cerqueira Santos.

## 1.1 MOTIVAÇÃO

O consumo de energia elétrica em residências da União Europeia (EU-28) representou 26,7% da utilização total de eletricidade (Eurostat, 2020), e 49% das emissões de CO<sub>2</sub> mundiais em 2014 tiveram origem na produção de eletricidade e calor (International Energy Agency, 2020). Com a grande contribuição do setor energético, com o objetivo de abrandar e inverter o padrão de crescimento das emissões de gases poluentes e da temperatura média no planeta, a gestão energética em edifícios apresenta um forte potencial para melhoramento. A otimização do consumo de energia dos edifícios procura reduzir as perdas de energia o mais possível, o que por sua vez melhora o desempenho do edifício, das redes de transporte e distribuição de energia e reduz a fatura. Esta é uma das estratégias mais eficazes, pois intervém nas frentes de maior impacto. A utilização de métodos de poupança de energia como este, procura oferecer vantagens como a redução de custos de energia e otimização do funcionamento dos equipamentos. Reduzir o consumo nas alturas corretas pode também, aumentar a segurança elétrica e a qualidade da energia da rede (Yoon et al., 2018).

## 1.2 ENQUADRAMENTO

A atual dissertação apresenta-se como continuação da pesquisa (Khorram et al., 2020) anteriormente feita pela equipa do Grupo de Investigação em Engenharia e Computação Inteligente para a Inovação e o Desenvolvimento (GECAD). Este trabalho foi feito com o apoio do GECAD, e consistiu na análise do consumo dum edifício misto com recurso a um algoritmo de otimização energética. Na pesquisa anterior, foi feita a otimização do consumo do edifício atual do GECAD, com recurso ao controlo de 20 luzes, 10 equipamentos de ar condicionado e uma máquina de lavar.

Este estudo, procurou expandir o escopo dos resultados obtidos anteriormente, através da definição de um edifício com vários tipos de consumidores e novos dados de entrada.

### 1.3 OBJETIVOS

Foram definidos alguns objetivos e implicações para a otimização energética deste edifício. O objetivo principal, foi criar um edifício com vários tipos de consumidores, com a utilização de um conjunto de dados do consumo reais para a otimização. Para isso, foi necessário definir um prédio com espaços diversos e os seus equipamentos. Após a seleção do conjunto de dados a utilizar, estes necessitam de ser convertidos para executar com o algoritmo. Por fim, os resultados e desempenhos energéticos do edifício foram comparados e analisados em dois cenários.

### 1.4 RESUMO

Começou-se por modelar um prédio com quatro andares, duas lojas comerciais, dois escritórios e seis habitações. Após ter sido feito o estudo e avaliação das variáveis enumeradas anteriormente, foi feita uma pesquisa por informação relativa ao consumo elétrico individualizado de equipamentos comuns como luzes, frigoríficos, máquinas de lavar e equipamentos de ar condicionado. Os equipamentos foram selecionados tendo em conta a sua compatibilidade com o controlo pelo algoritmo e com as políticas de resposta da procura. Estas informações, juntamente com o modelo dos sistemas de consumo do prédio, foram utilizadas para simular e otimizar os desempenhos do edifício. Os resultados da otimização, foram analisados e comparados em dois cenários. Com base nas otimizações e resultados do trabalho, por fim, foram apresentadas as conclusões. Estas, comprovam o funcionamento do algoritmo e a aproximação aos vários tipos de consumidores com sucesso.

O trabalho atual apresenta-se dividido nos seguintes tópicos:

- a. Definição do edifício;
- b. Pesquisa e seleção do conjunto de dados de consumo para simulação;
- c. Definição dos equipamentos consumidores de energia;
- d. Descrição do algoritmo de otimização, utilizando o conceito de resposta da procura (*Demand Response*);
- e. Adaptação dos dados de entrada;
- f. Análise do desempenho do algoritmo no edifício;
- g. Avaliação dos resultados e conclusões.

Na Secção 2, apresenta-se a revisão bibliográfica com toda a informação que suporta o trabalho. A Secção 3 dispõe o algoritmo de otimização e o método de aplicação juntamente com os detalhes do caso de estudo e dos equipamentos estão. Na Secção 4, encontra-se a apresentação dos resultados e discussão dos mesmos. Por fim, na Secção 5 expõem-se as conclusões e sugestões de melhoria.

# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 RESPOSTA DA PROCURA (*DEMAND RESPONSE*)
- 2.2 EQUIPAMENTOS E OTIMIZAÇÃO DO CONSUMO
- 2.3 PESQUISA ANTERIOR



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Toda a informação relevante para o desenvolvimento do trabalho, como textos acadêmicos, técnicos e conhecimentos científicos são apresentados nesta secção.

### 2.1 RESPOSTA DA PROCURA (*DEMAND RESPONSE*)

Tradicionalmente, a indústria de fornecimento de energia limitou-se a suprir todas as necessidades elétricas à medida que estas surgiam, mas esta metodologia apresenta imensas desvantagens, como: elevada insegurança da rede devido à dificuldade de equilibrar constantemente os consumos e a produção sem métodos de predição; e maiores custos de manutenção provocados pelo maior número de falhas e incidentes.

No entanto, esta indústria intensiva em capital, sofreu reestruturação dos seus mercados de fornecimento de energia devido à procura pela eficiência e redução de emissões, emergência de mercados abertos, e *smart-grids* (Vale et al., 2013). Para que a rede elétrica seja mais eficiente, é necessário que as flutuações na procura sejam minimizadas (P. Faria & Vale, 2011). Pois, para que a rede se mantenha segura e estável, é necessário haver um equilíbrio entre a procura e a oferta de energia em todos os momentos. Qualquer flutuação neste equilíbrio sensível provoca desvios nos valores de referência da voltagem e frequência, o que é indesejável (Albadi & El-Saadany, 2008b). Para manter um sistema de transmissão de potência estável é necessário manter o seu valor de frequência dentro dos valores admissíveis (Lobato et al., 2012), caso contrário o desempenho e tempo médio de vida do sistema serão afetados.

Uma resposta da procura pode ser definida como qualquer alteração ao comportamento normal do consumidor final em resposta às variações do preço da eletricidade ao longo do tempo. Este pode ser qualquer incentivo criado para motivar a redução do consumo em alturas de pico e de insegurança energética. E também, quaisquer modificações intencionais nos padrões de utilizações dos consumidores finais para alterar a agenda, carga ou consumo total de eletricidade (Albadi & El-Saadany, 2008b; International Energy Agency, 2003; U S Department of Energy, 2006; Vale et al., 2013). Com isto, a resposta da procura contribuiu para o equilíbrio e previsão das condições da rede e promove a redução do consumo de energia.

### 2.1.1 PROGRAMAS

Considerando a natureza da resposta à procura, (Albadi & El-Saadany, 2008a; Pedro Faria et al., 2015b) apresenta as três principais ações que um utilizador pode tomar para obter uma resposta à variação de preço de eletricidade:

- 1) O utilizador reduz o seu consumo somente durante os picos críticos de consumo, o que implica uma perda temporária de conforto;
- 2) O utilizador responde aos períodos de alto preço alterando algumas das operações mais intensivas energeticamente para períodos de mais baixo preço;
- 3) Recorrendo ao uso de produção local, o utilizador reduz os seus custos praticamente sem alterar o seu padrão de consumo.

No primeiro caso tem-se como exemplo uma redução temporária dos parâmetros no termóstato de um AC. No segundo, pode alterar-se o período de funcionamento de uma máquina de lavar ou bombas de água, por exemplo. E no terceiro, a utilização de painéis solares fotovoltaicos, geradores eólicos e/ou baterias ajuda a reduzir os custos de energia. Na Figura 1, apresenta-se a classificação dos programas de resposta da procura proposta (Albadi & El-Saadany, 2008b; Pedro Faria & Vale, 2013).

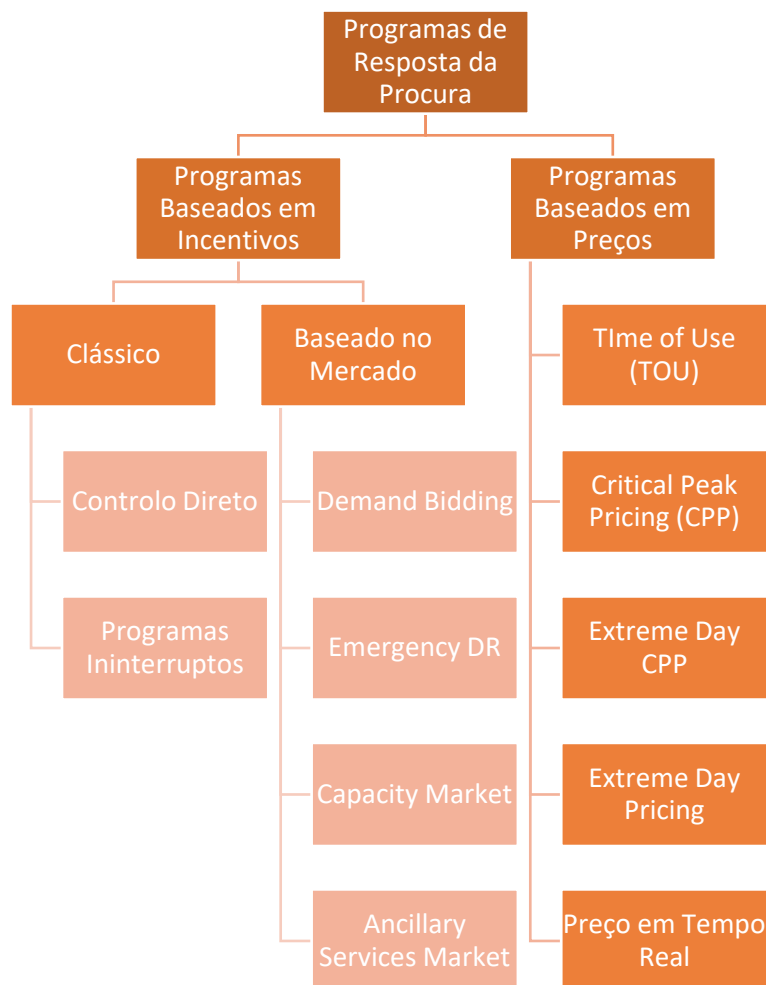


Figura 1 - Classificação de Programas de Resposta da Procura. Fonte: (Albadi & El-Saadany, 2008b)

Num relatório por, (Tang & Wang, 2019), foi desenvolvido um sistema de gestão energética para um edifício residencial com energia renovável, solar e eólica. Para reduzir o consumo energético e a incerteza das energias renováveis, foi utilizado um programa de resposta da procura. Nestes programas é necessário modelar as cargas elétricas para serem corretamente geridas, os quatro tipos principais de cargas são descritos a seguir:

- Interrompível, um tipo de carga elétrica que pode ser parada a qualquer momento, sem repercussões;
- Energia constante, tipos de cargas que necessitam de um valor fixo de energia, independentemente do tempo de operação, por exemplo, equipamentos carregáveis;
- Potência constante, cargas que requerem um valor de potência constante ao longo do dia, como é o caso das luzes e iluminação;
- Não interrompível, são cargas que não podem ser paradas durante o seu funcionamento, antes de terminar a sua tarefa, por exemplo as máquinas de lavar.

## 2.2 EQUIPAMENTOS E OTIMIZAÇÃO DO CONSUMO

Todos os equipamentos consumidores de energia possuem um padrão de funcionamento característico, limitações distintas no seu controlo e implicações que devem ser seguidas para o seu correto funcionamento. A seguir apresenta-se a pesquisa relevante para a escolha dos equipamentos a otimizar, as suas características e a sua compatibilidade com o método de resposta da procura (Pedro Faria et al., 2015a).

Segundo (Campbell, 2020), cerca de 35% da energia consumida em residências dos Estados Unidos da América, é desperdiçada. O aquecimento e arrefecimento de espaços comuns representou 47% do total de energia consumida, constituindo quase metade de toda a eletricidade utilizada em residências. Em segundo lugar apresentam-se os equipamentos de aquecimento de água, com 14%. De seguida, em terceiro e quarto lugar, com 13% e 12% do consumo de energia total, estão as máquinas de secar e lavar e a iluminação, respetivamente. Todos estes equipamentos consumidores em conjunto formam cerca de 86% do consumo total. Com isto é possível determinar que a redução do consumo de eletricidade em habitações tem grande potencial e é facilitada se a otimização for direcionada a estes principais consumidores.

O relatório (Kandasamy et al., 2018), descreve um estudo feito a um edifício de 28 000 m<sup>2</sup> em Singapura somente com escritórios que cumpre os requisitos da Green Mark (GM) 4.0. Foi possível alcançar uma redução de 46% no consumo do edifício recorrendo a melhorias na iluminação e o seu controlo, aumentando as definições de temperatura e utilizando o reconhecimento de localização do ocupante.

Na Figura 2, está presente a distribuição do consumo dos diversos equipamentos no edifício ao longo de um ano.

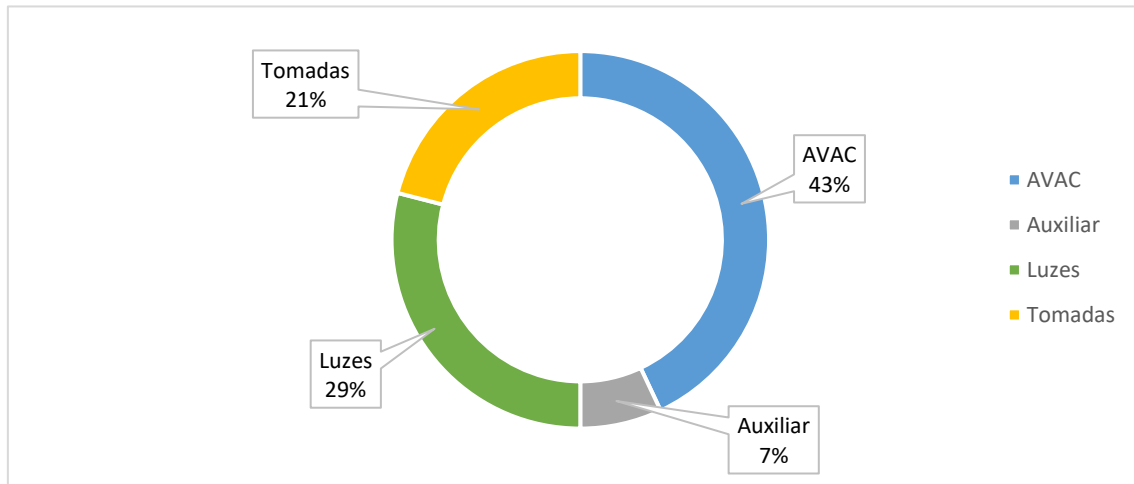


Figura 2- Consumo elétrico num edifício em Singapura com 28 000 m<sup>2</sup>, ao longo de um ano.

Os resultados apontam para um consumo elevado de 43% por parte dos equipamentos de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC), embora o padrão seja este, é de salientar que o edifício se localiza numa zona de alta humidade pelo que a utilização e a carga nos equipamentos de arrefecimento aumenta. Devido à crescente tendência para desenhar edifícios com fachadas envidraçadas, as janelas apresentam-se no edifício em questão como sendo a segunda maior fonte de carga para arrefecimento devido ao seu fraco desempenho térmico. As luzes juntamente com as tomadas representam 50% do consumo energético do edifício e por isso possibilitam um grande impacto na redução do consumo, através da alteração para sistemas eficientes de iluminação LED ou controlo das tomadas baseado na presença ou não de um ocupante. (Kandasamy et al., 2018)

Em (Lakshmanan et al., 2016) está presente um estudo dinamarquês para regularizar a frequência da rede de distribuição através de resposta da procura de cargas reguladas por termóstato, como frigoríficos e arcas congeladoras. Como já foi referido anteriormente, é necessário manter os valores de frequência e voltagem da rede dentro dos admissíveis para que esta seja estável. Recorrendo ao controlo de 25 frigoríficos em diversos domicílios, foi possível obter um tempo de resposta de 24 segundos, e um *ramp rate* de 63%. Este último, sendo quase o dobro de um gerador a gasóleo, que é considerado dos mais rápidos a entrar em funcionamento. Com isto, demonstra-se que os frigoríficos apresentam um tempo de resposta rápido e com grande capacidade de impacto para a redução e o controlo dos consumos.

### 2.2.1 CLIMATIZAÇÃO E AVAC

A climatização em edifícios apresenta um desafio particular. Isto porque muitas vezes a redução do consumo energético destes sistemas implica redução do conforto do utilizador.

Na universidade de Almería, em Espanha, foi usado um método de otimização com múltiplos objetivos (Martell et al., 2020) num edifício com 1000 m<sup>2</sup> e um sistema AVAC centralizado. Este método permitiu a resolução de algoritmos de otimização com vários objetivos em simultâneo e em conflito, que é o caso da climatização. Numa otimização com o objetivo singular de minimizar o consumo dum sistema AVAC, o utilizador vai sofrer um impacto negativo por a temperatura não ser adequada, isto é minimizado com a introdução de limites na redução do consumo para manter algum conforto, mas é menos desejável. Ao contrário de uma função com um único objetivo que tem apenas uma solução, a otimização com múltiplos objetivos apresenta uma gama de valores possíveis. O objetivo do sistema é maximizar o conforto dos utilizadores. Para isso, foi proposta uma função de custo que avalia o nível de desconforto do utilizador baseado na temperatura medida e na ideal, e também no nível ideal de iluminação. Também foi definida uma equação para estimar o custo, baseada no consumo do sistema AVAC e das luzes, e no preço da eletricidade. Este sistema de otimização, proposto em Espanha, foi capaz de estimar apropriada e coerentemente as temperaturas e níveis de iluminação para o conforto dos utilizadores e ao mesmo tempo reduzir em 11% o consumo energético.

### 2.2.2 OTIMIZAÇÃO DO CONFORTO DO UTILIZADOR

O conforto dos ocupantes de um edifício depende essencialmente de três parâmetros (Ahmad & Khan, 2020). O conforto visual, térmico e a qualidade do ar no interior.

Para manter ou alcançar o conforto visual do utilizador é essencial manter a luminosidade dentro de uma gama de valores de conforto. Esta gama é altamente dependente do tipo de iluminação, presença de luz solar, arquitetura do espaço e parâmetros relativos ao utilizador, como a tarefa, anatomia, hora do dia e condições visuais (Shafavi et al., 2020). No caso deste estudo, o conforto visual será considerado levemente, uma vez que não foram definidas variáveis suficientes para abordar o tema.

Quanto ao conforto térmico, este depende fundamentalmente da temperatura interior, humidade relativa, temperatura radiante e velocidade do ar. Uma vez que uma grande parte do consumo elétrico vem dos sistemas de ar condicionado, estes apresentam o maior potencial para otimização. No entanto, para manter o conforto do utilizador é necessário aproximar ao máximo a temperatura interior à desejada/definida pelo utilizador. O método utilizado neste estudo para otimizar o conforto térmico é descrito na secção a seguir.

A qualidade do ar interior depende principalmente da concentração de CO<sub>2</sub> no ar e de outros poluentes que possam emergir do interior, por exemplo, da madeira e mármore. Para garantir a qualidade do ar interior em novos edifícios de habitação, foi definido um valor mínimo de taxa de renovação por hora pelo Ministério do Ambiente (Portaria n.º 353-A/2013). Isto significa que pelo menos 40% do volume de ar interior, deve ser renovado a cada hora.

### 2.3 PESQUISA ANTERIOR

O presente trabalho vem em seguimento da pesquisa feita anteriormente no GECAD, (Khorram et al., 2020). Esta pesquisa consistiu na otimização do consumo de 20 luzes, 10 equipamentos de ar condicionado e uma máquina de lavar, do atual edifício do GECAD, presente no ISEP, considerando o conforto dos utilizadores. Foi implementado um algoritmo de otimização de múltiplos períodos no sistema SCADA do edifício (Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados). Foram considerados vários parâmetros para implementar o algoritmo em vários períodos consecutivos de 15 minutos. A otimização proposta foi feita considerando o conforto do utilizador e as suas preferências, estes foram modelados na função objetivo relativamente à temperatura interior e nos limites de operação para impedir o sistema de reduzir o consumo em demasia. O algoritmo é executado no início de todos os períodos e começa por importar a informação dos sensores e a previsão temporal do sistema SCADA. Foram definidos níveis de prioridade para cada AC e luz com o objetivo de determinar a importância de cada equipamento para o conforto dos utilizadores. Essencialmente, em cada período os equipamentos são priorizados e os equipamentos com os níveis mais baixos são os primeiros em que o consumo é reduzido. Cada vez que as preferências dos utilizadores forem alteradas, o algoritmo é executado com esses novos parâmetros e são definidos objetivos de redução de consumo distintos para cada um dos períodos. No caso da máquina de lavar, o seu ciclo de consumo é deslocado para alturas de menor consumo, mas o algoritmo é obrigado a procurar pela altura mais viável e o seu ciclo de funcionamento não pode ser interrompido. Foram apresentados três cenários distintos baseados no mesmo algoritmo, mas com restrições e funções distintas. O cenário A, minimiza o consumo de energia sem considerar o conforto dos utilizadores e recorrendo a um conjunto de limites máximos de redução do consumo da iluminação e climatização. O B, minimiza o consumo de energia, o desconforto dos utilizadores e preserva a temperatura interior entre as definições dos utilizadores. Por fim, o cenário C incorpora todos os aspetos anteriores. Minimiza o consumo de energia e o desconforto dos utilizadores, enquanto incorpora o conjunto de limites máximos de redução e preserva a temperatura interior entre os valores definidos. Na figura 3, pode ver-se o plano do edifício em questão e os equipamentos a controlar (Ar condicionado, Luzes e Máquina de loiça). Já na figura 4, é possível ver o consumo de referência dos equipamentos no edifício ao longo de 20 dias. Os três cenários foram simulados com base em 20 dias de informação de consumo fornecida do próprio GECAD. O cenário A, foi capaz de reduzir

o consumo das luzes e AC's baseado nas restrições definidas e sem considerar restrições térmicas. No caso do cenário B, foi possível reduzir o consumo das luzes e AC's baseado em restrições térmicas. Esta redução do consumo dos AC's foi mais acentuada que no primeiro cenário devido ao algoritmo ter alcançado a temperatura definida, no entanto, o consumo das luzes subiu comparativamente. O último cenário, que engloba ambos os cenários anteriores, demonstrou que as restrições térmicas afetam o consumo energético dos AC's, enquanto que as restrições de conforto restringem AC's e luzes. O consumo dos AC's, neste último caso, aumentou comparativamente ao caso de referência, já o consumo das luzes diminuiu.

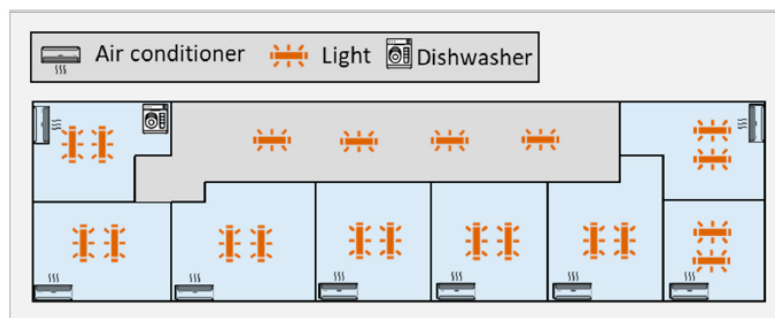


Figura 4 – Plano do edifício e equipamentos.

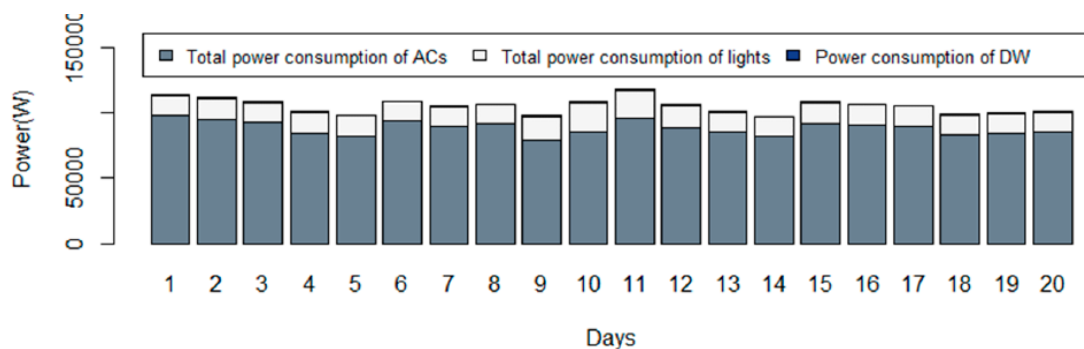


Figura 4 - Consumo dos equipamentos ao longo de 20 dias no edifício do GECAD.

Os resultados demonstraram que foi possível, otimizar e controlar o consumo de cada equipamento, e também foi considerada a possibilidade dos utilizadores modificarem as definições. Com isto, foi reduzido o consumo do edifício, tendo em conta os utilizadores, as suas preferências quanto à temperatura interior definida, e luzes.



# DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

- 3.1 EDIFÍCIO
- 3.2 ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO
- 3.3 DADOS DE CONSUMO



### 3 DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

Com o objetivo de expandir o trabalho feito anteriormente, optou-se por realizar o estudo de otimização a vários tipos de consumidores. Para isso, foi definido um edifício com área comercial, residencial e escritórios (DWH, 2017; Hong et al., 2020; Sarac, 2019). Procurou-se analisar os impactos da resposta da procura e do algoritmo nos perfis de consumo, e por essa razão, a geometria, estrutura e composição do edifício não foram consideradas. Foram modelados os equipamentos e distribuídos pelos diversos espaços de forma a representar os vários tipos de consumidores. Para simular e otimizar a gestão energética deste edifício, foi selecionado um conjunto de dados de consumo reais e foram adaptados ao caso de estudo (Kelly, 2017; Kelly & Knottenbelt, 2015).

Nesta secção estão presentes a descrição detalhada do caso de estudo e a metodologia de trabalho utilizada. Define-se o edifício considerado no caso de estudo, os equipamentos e o algoritmo para otimização, o conjunto de dados utilizado e o método de aproximação.

#### 3.1 EDIFÍCIO

O edifício considerado para este caso de estudo foi definido em conjunto com o orientador e procura representar vários tipos de consumidores. Baseado em (Hong et al., 2020; Sarac, 2019), um prédio baixo, de quatro andares, pode ser considerado como um edifício dentro da norma. Por isso, o edifício é composto por quatro andares, duas áreas comerciais no rés-do-chão, dois escritórios no primeiro andar e os restantes andares são dedicados a área residencial. Desta forma, o edifício pode representar o consumo de áreas comerciais, escritórios e residências. Todos os andares neste edifício encontram-se divididos em dois lados, esquerdo e direito, no total com 10 espaços.

Baseado na pesquisa e no trabalho anterior, foram selecionados os principais equipamentos a otimizar de acordo com a sua importância para o conforto, impacto no consumo elétrico e flexibilidade de controlo. Estes, serão detalhados mais à frente.

Na Figura 5 pode ser vista a composição do edifício e a distribuição dos equipamentos (Hong et al., 2020; Kelly & Knottenbelt, 2015; Sarac, 2019). As duas áreas comerciais no rés-do-chão (Loja 1 e 2), dispõem cada uma de um sistema AVAC e duas luzes, esta é uma configuração simples para pequenas lojas. No primeiro andar encontram-se os escritórios (Escritório 1 e 2), neste caso, cada um com duas salas, quatro luzes, um frigorífico e um sistema AVAC. Para representar escritórios com espaço comum e uma zona de trabalho. O segundo, terceiro e quarto andar (Apartamento 1, 2, 3, 4, 5 e 6) foram definidos como área residencial e por isso apresentam variações de

espaços e equipamentos com o intuito de simular alguma diversidade nas habitações. Os apartamentos dispõem todos em comum de um frigorífico, uma máquina de lavar, entre dois e quatro sistemas AVAC e entre cinco e nove luzes.

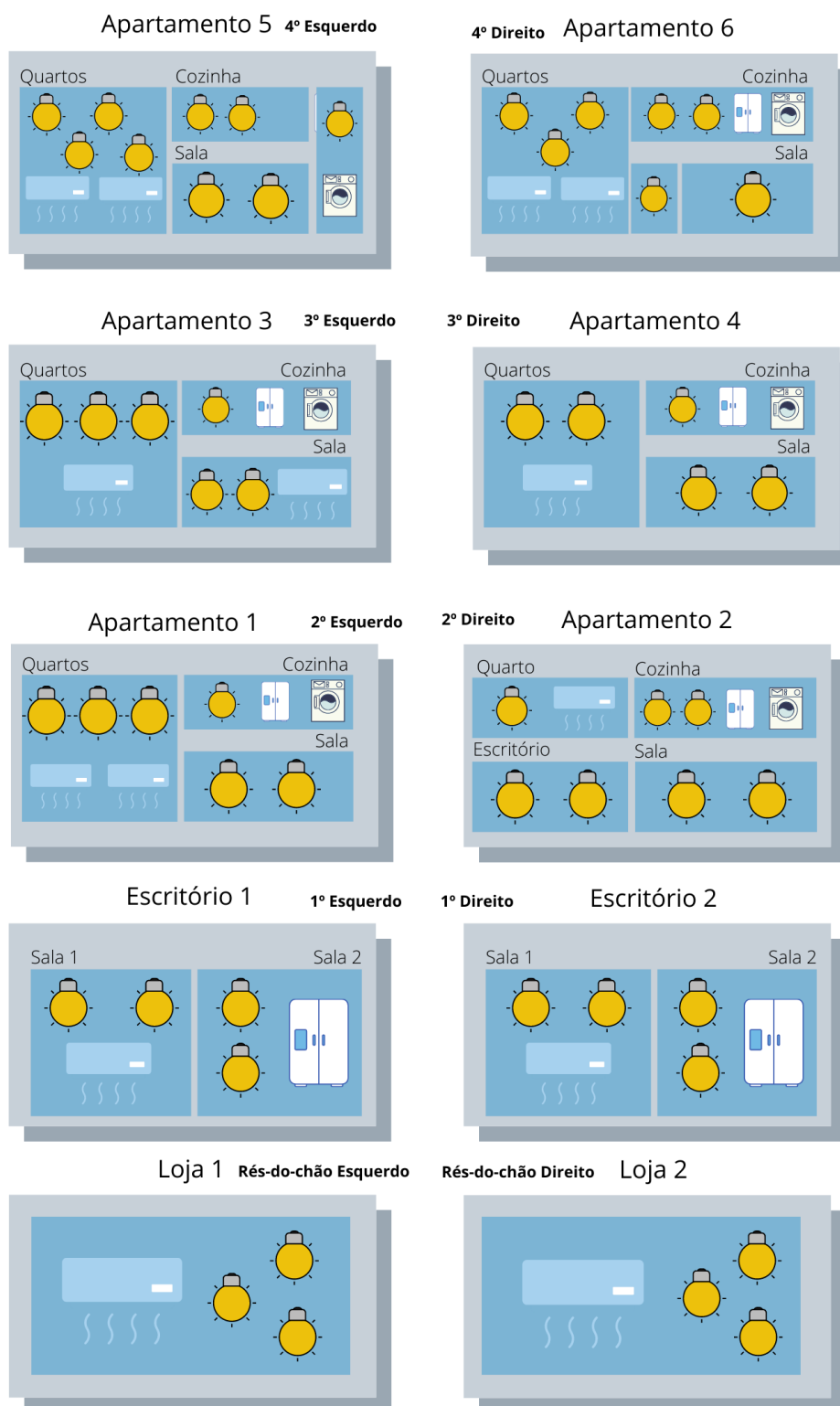


Figura 5 - Representação do edifício modelo e equipamentos definidos.

Com a configuração de equipamentos definida, foi possível modelar de uma forma simples, os vários espaços do edifício. Cada um destes espaços dispõe dos equipamentos básicos que se pode esperar numa loja, escritório ou habitação típica. Desta forma, é possível modelar um edifício padrão, mais aproximado do real, com os equipamentos que possam beneficiar das políticas de resposta da procura.

De seguida, define-se o algoritmo de otimização utilizado, os dados de consumo e definem-se os equipamentos a otimizar e a sua quantidade por espaço.

### 3.2 ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO

O principal objetivo do algoritmo proposto é, otimizar o consumo das máquinas de lavar, iluminação e dos sistemas de ar condicionado (AC). Este incorpora uma otimização em programação linear de múltiplos períodos para minimizar o consumo de energia. O algoritmo controla a intensidade das luzes e dos AC's e desloca o consumo das máquinas de lavar para períodos de menor intensidade e sem interromper o seu ciclo de funcionamento. Em cada novo período são definidos objetivos de redução de consumo diferentes, que dependem do período anterior.

Na Figura 6, pode ser visto o esquema de funcionamento do algoritmo. Este começa por importar a informação de consumo dos sensores, neste caso dos ficheiros fornecidos. Em cada período são definidos níveis de prioridade para cada AC e luz, de forma a determinar a importância de cada equipamento para os utilizadores. Os equipamentos com o nível de importância mais baixo são os primeiros a participar na redução de consumo. A otimização é executada várias vezes ao dia, e em cada período com as preferências mais recentes dos utilizadores e novas definições de redução do consumo.

No entanto, como já visto anteriormente, alterar o padrão de consumo dos utilizadores pode levar a insatisfação do mesmo. Para combater isso, foram implementadas restrições à otimização que consideram o conforto visual e térmico dos utilizadores. Estes parâmetros de conforto foram definidos para limitar a redução global do consumo de cada equipamento e também a redução em períodos consecutivos. Somente quando todas as definições de conforto e restrições estejam definidas é que o algoritmo procura reduzir o consumo dos diversos aparelhos e mover os consumos das máquinas de lavar.

**Equação (1)**

$$= \sum_{t=1}^T \left[ \sum_{l=1}^{Luz} W_{L(l,t)} \times P_{L(l,t)} + \sum_{e=1}^E W_{E(e,t)} \times P_{E(e,t)} + \sum_{a=1}^{AC} W_{AC(a,t)} \times P_{AC(a,t)} + \sum_{b=1}^{Bomba} W_{B(b,t)} \times P_{B(b,t)} + \sum_{d=1}^{DW} W_{DW(d,t)} \times DW_{Bin(d,t)} + \sum_{a=1}^{AC} \frac{T_{in(a,t)} - T_{set(a,t)}}{T_{in(a,t)}} \right] + \sum_{st=1}^{ST} W_{DW_{sh(st)}} \times DW_{Bin_{sh(st)}}$$

A função objetivo do algoritmo é apresentada na Equação (1). O primeiro somatório,  $T$  indica o número de períodos. A primeira equação é dedicada às luzes, com

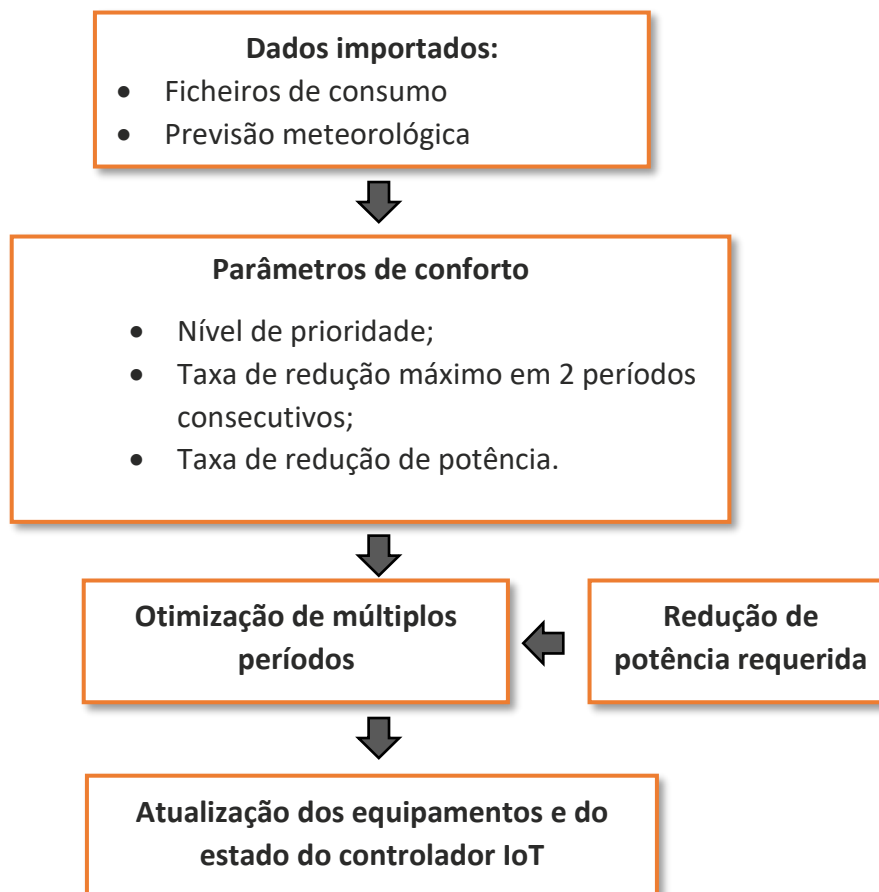


Figura 6 – Esquema de funcionamento do algoritmo de otimização.

o nível de prioridade em  $W_L$ , e a redução de potência desejada em  $P_L$ , para cada luz. O mesmo se aplica para os sistemas de ar condicionado, bombagem e extração, com

$W_{AC}$ ,  $P_{AC}$ ,  $W_E$ ,  $P_E$ ,  $W_B$  e  $P_B$ . A terceira e última equação, representam as máquinas de lavar em estado normal e com o seu consumo deslocado, respetivamente.  $DW_{Bin}$  e  $DW_{Bin\_sh}$  são valores binários, e este último indica o deslocamento do ciclo de funcionamento completo para  $ST$  (*Starting Time for shifting*). Por fim, a quarta equação, com  $T_{in}$  e  $T_{set}$ , representam a temperatura interior e temperatura definida no edifício. Para prevenir uma redução muito acentuada no consumo em períodos consecutivos, o algoritmo deve procurar os consumos em cada período e preservar a temperatura definida pelos utilizadores.

### 3.3 DADOS DE CONSUMO

Para estabelecer uma boa base para as simulações e resultados foi necessário efetuar uma pesquisa por conjuntos de informação de consumo de habitações reais. A utilização de dados de consumo de habitações reais permite obter resultados autênticos e de melhor qualidade.

Foram selecionados os dados de um estudo feito entre 2012 e 2017 em cinco residências em Londres, Reino Unido (Kelly, 2017) e (Kelly & Knottenbelt, 2015). Os valores de potência instantânea ( $W$ ) individual de 25 eletrodomésticos e o consumo total dos edifícios, foram recolhidos ao longo de cinco anos em períodos de seis segundos. Para cada equipamento e cada casa são fornecidos ficheiros independentes com as datas de início e fim do registo, juntamente com data de cada medição de potência. A informação detalhada de cada eletrodoméstico, juntamente com os pormenores dos edifícios e dos instrumentos de medida está disponível para uso livre em (Kelly & Knottenbelt, 2015).

Primeiramente, foram escolhidos os equipamentos de interesse para este estudo, como os equipamentos AVAC, luzes, frigoríficos e máquinas de lavar. No entanto, para uso juntamente com o software de simulação foi necessário converter os valores. Originalmente os registos apresentavam duas colunas, uma com os valores de potência instantânea ( $W$ ) e outra com a data de cada medição. A data é apresentada em Era UNIX, um sistema que conta os segundos desde 1 de janeiro de 1970 e regista a potência a cada seis segundos. Estes dados foram convertidos para valores de energia ( $W.h$ ) em períodos de 15 minutos, o método utilizado é descrito mais a seguir.

#### 3.3.1 CONVERSÃO DOS DADOS

Para converter os dados, foi utilizado o GNU Octave, um software de programação gratuito semelhante ao MatLab®. Para tal, foi criado um *script* (folha de código executável) e este foi executado com cada um dos ficheiros de consumo selecionados anteriormente. Como os registos originais dispõem de duas colunas, uma com a data em Era UNIX (*Unix Timestamp*), e outra com os valores instantâneos de potência, e como por vezes os registos ‘saltam’ alguns segundos, foi necessário utilizar um método de

conversão mais complexo. O funcionamento do *script*, figura 6, pode ser descrito da seguinte forma:

1. Identificar a data da primeira medição;
2. Acrescentar 900 à data inicial (15 minutos mais à frente);
3. Identificar o registo mais próximo da data inicial + 900;
4. Somar todos os valores entre estas datas;
5. Dividir a soma por 150 para obter a conversão correta para watt x hora (W.h);
6. Definir a data inicial + 900 como o valor inicial e retomar o ciclo;
7. Criar um ficheiro com a data e os valores de consumo energético convertidos.

Foi necessário repetir o processo acima para todos os ficheiros. Com isto, obteve-se os valores de energia (W.h) desejados em intervalos de 15 minutos



```
1  ##Inicio
2
3  datainicial=channel_14(1,1);
4  linhai=1;
5  linhaf=1;
6  potencia=0;
7  output(round(rows(channel_14)/140),2)=0;
8
9  ##primeira linha
10 output(1,1)=channel_14(1,1);
11 ciclo=2;
12
13 while (linhaf<=rows(channel_14))
14
15     mais15=datainicial+900;
16     ##procurar linha 15min depois
17     do
18         linhaf=linhaf+1;
19         until (channel_14 (linhaf,1)>=mais15)
20
21     ##somar potencia no intervalo
22     while (linhai<linhaf)
23         potencia=potencia+channel_14(linhai,2);
24         linhai=linhai+1;
25     endwhile
26
27     ##W.h
28     potencia=potencia/150;
29     output(ciclo,1)=channel_14(linhaf,1);
30     output(ciclo,2)=potencia;
31
32     ##troca data
33     datainicial=channel_14(linhaf,1);
34
35     ##reset
36     potencia=0;
37     ciclo=ciclo+1;
38
39 endwhile
40
```

Figura 7 - Script no GNU Octave para conversão dos dados de consumo.

### 3.4 EQUIPAMENTOS

De seguida, definem-se os equipamentos a otimizar e a sua quantidade por espaço, mas antes de definir os equipamentos são apresentadas as razões pela sua seleção.

Cerca de metade do consumo de energia nos escritórios, em média, pertence a sistemas AVAC e o restante à iluminação, equipamentos e outros ligados às tomadas (Kandasamy et al., 2018) e (Khorram et al., 2020). Os equipamentos de ar condicionado são selecionados, pois são os de maior impacto no consumo, mas também provocam um elevado impacto no conforto. Por esta razão a sua otimização é limitada pela caracterização do conforto do utilizador e o quanto se pode desviar da temperatura indicada.

As luzes apresentam-se em maior número quanto aos restantes equipamentos e embora o seu consumo individual seja reduzido, em conjunto representam 29%, figura 2, do consumo e conseguem ser facilmente otimizadas com sensores de presença e/ou temporizadores.

Quanto às máquinas de lavar, o seu consumo pode ser facilmente deslocado para outra altura do dia sem reduzir praticamente o conforto dos utilizadores, programando o seu funcionamento para alturas mais benéficas. Por fim, os frigoríficos por apresentarem um funcionamento em ciclos, permitem controlar o seu consumo temporária e rapidamente (Lakshmanan et al., 2016).

Na tabela 2 está presente a distribuição dos equipamentos pelas diversas áreas do edifício. A distribuição foi definida juntamente com o orientador, de forma a representar de uma forma simples os vários tipos de consumidores de energia elétrica.

Tabela 1 - Distribuição dos equipamentos pelo edifício.

		Ar condicionado	Luzes	Máquina de Lavar	Frigorífico
Loja 1	R/C Esquerdo	1	3		
Loja 2	R/C Direito	1	3		
Escritório 1	1º Esquerdo	1	4		1
Escritório 2	1º Direito	1	4		1
Apartamento 1	2º Esquerdo	2	7	1	1
Apartamento 2	2º Direito	1	5	1	1
Apartamento 3	3º Esquerdo	2	6	1	1
Apartamento 4	3º Direito	1	5	1	1
Apartamento 5	4º Esquerdo	2	9	1	1
Apartamento 6	4º Direito	2	7	1	1
Total		14	53	6	8

### 3.4.1 DESCRIÇÃO DA ORIGEM DOS EQUIPAMENTOS

A partir deste conjunto de dados de consumo foi possível obter informações de 15 luzes, quatro máquinas de lavar e quatro frigoríficos. No total, estes equipamentos apresentam mais de 32 anos de registos de consumo elétrico combinado. Com isto é possível obter resultados mais fidedignos a partir das simulações. Como foi referido anteriormente, estes 15 equipamentos provêm de medições feitas em cinco residências, é importante descrever o tipo de habitação de forma a adaptar e analisar melhor os resultados (Kelly & Knottenbelt, 2015).

Na tabela 2, são apresentados detalhes de quatro habitações, a descrição dos seus ocupantes, estatísticas de consumo, datas de medição e informação relevante para o estudo. Os detalhes da habitação três encontram-se ocultados pois nenhuma das medições dessa casa foi utilizada. A habitação 1 registou o maior contributo para o estudo, pelo que grande parte das medições são desta habitação.

Tabela 2 - Sumário dos detalhes das habitações de onde provêm os dados de consumo. Fonte: (Kelly & Knottenbelt, 2015)

Habitação	1	2	4	5
Tipo de edifício	Terraço	Terraço	Meio-Terraço	Apartamento
Ano de construção	1905	1900	1935	2009
Aquecimento	Gás Natural	Gás Natural	Gás Natural	Gás Natural
Número de ocupantes	4	2	2	2
Descrição dos ocupantes	2 adultos e 1 cão desde 2006. Um filho nasceu em 2011 e o segundo em 2014	2 adultos, 1 no trabalho todo o dia; o outro por vezes em casa	1 adulto e 1 aposentado	2 adultos
Consumo médio da rede por dia (kWh ativo)	7,64	7,17		13,75
Consumo médio da rede por dia (kWh reativo)	8,90	8,00	10,24	14,56
Data do início da medição	09-11-2012	17-02-2013	09-03-2013	29-06-2014
Data da última medição	26-04-2017	10-10-2013	01-10-2013	13-11-2014
Duração total (dias)	1 629	234	205	137

Com base na tabela anterior é possível identificar vários tipos de consumidores nas habitações dos registos de consumo. Na habitação 1, o terraço de um edifício, têm-se os registos de um casal e duas crianças. Na segunda habitação, da mesma tipologia que o anterior, têm-se os registos de um casal apenas. Na habitação 4, um duplex, foram registados os consumos de um adulto e um idoso. E por fim, na quinta habitação, foram registados os consumos de dois adultos num apartamento. Dada a variedade dos registos é possível adequar os equipamentos e espaços de forma a melhor representar os diferentes grupos de consumidores, no edifício modelo.

### 3.4.2 ADAPTAÇÃO AO CASO

Com uma análise rápida, é possível identificar que o número de equipamentos no edifício modelado é superior ao número de equipamentos do conjunto de dados. Por essa razão, é necessário dividir os registos dos equipamentos de forma que se possa estender o conjunto de dados para o número de equipamentos necessário para a otimização. Para isso, todas as medições foram avaliadas e divididas em ficheiros com registos anuais de cada equipamento. O resultado foram 66 ficheiros individuais de consumo. No total, 53 registos de luzes, 6 de máquinas de lavar e 8 de frigoríficos. Na tabela 3, apresentam-se os equipamentos designados a cada área, a sua localização, potência nominal e observações e alterações importantes que possam ter sido feitas ao longo da medição.

Tabela 3 - Distribuição dos registos de energia pelas lojas e escritórios do edifício.

Loja 1	Equipamento	Registo Original	Observações
Sala 1	Luz 1	house1_office_lamp2_pt1	Lâmpada fluorescente 10W; Escritório
	Luz 2	house1_office_lamp3_pt1	Lâmpada fluorescente 10W; Escritório
	Luz 3	house1_livingroom_s_lamp_pt1	Lâmpada fluorescente 20W; Sala
<b>Loja 2</b>			
Sala 1	Luz 4	house1_office_lamp1_pt1	Lâmpada fluorescente 15W; Escritório
	Luz 5	house1_office_lamp1_pt2	Lâmpada fluorescente 15W; Escritório
	Luz 6	house1_livingroom_lamp_tv_pt1	Lâmpada fluorescente 15W; Sala; Luz atrás de TV
<b>Escritório 1</b>			
Sala 1	Luz 7	house1_office_lamp1_pt3	Lâmpada fluorescente 15W; Escritório
	Luz 8	house1_office_lamp2_pt2	Lâmpada fluorescente 10W; Escritório
	Luz 9	house1_office_lamp3_pt2	Lâmpada fluorescente 10W; Escritório
Sala 2	Luz 10	house1_utilityrm_lamp_pt1	Lâmpada fluorescente linear 40W; Despensa
	Frigorífico 1	house1_fridge_pt1	Frigorífico 300W
<b>Escritório 2</b>			
Sala 1	Luz 11	house1_office_lamp1_pt4	Lâmpada fluorescente 15W; Escritório
	Luz 12	house1_office_lamp2_pt3	Lâmpada fluorescente 10W; Escritório
	Luz 13	house1_office_lamp3_pt3	Lâmpada fluorescente 10W; Escritório
Sala 2	Luz 14	house1_utilityrm_lamp_pt2	Lâmpada fluorescente linear 40W; Despensa
	Frigorífico 2	house1_fridge_pt2	Frigorífico 300W

De seguida, na tabela 4, são apresentadas as definições dos equipamentos para cada habitação. Foram considerados diferentes tipos de espaços, com características e tipos de ocupantes diferentes. Isto para simular aproximadamente, o típico consumidor.

Tabela 4 - Distribuição dos registos de energia pelas habitações do edifício.

<b>Apartamento 1</b>			
Quarto	Luz 15	house1_bedroom_ds_lamp_pt2	Lâmpada incandescente 45W; Quarto
Escritório	Luz 16	house1_office_lamp3_pt4	Lâmpada fluorescente 10W; Escritório
	Luz 17	house1_office_lamp2_pt4	Lâmpada fluorescente 10W; Escritório
Sala	Luz 18	house1_livingroom_lamp_tv_pt2	Lâmpada fluorescente 15W; Sala; Luz atrás de TV
	Luz 19	house1_livingroom_s_lamp_pt2	Lâmpada fluorescente 20W; Sala
	Luz 20	house1_kitchen_lamp2_pt1	Lâmpada fluorescente 20W; Cozinha
Cozinha	Luz 21	house1_kitchenlights_pt2	10 x Lâmpada LED 10W; Cozinha
	Frigorífico 3	house1_fridge_pt3	Frigorífico 300W
	Máquina de Lavar 1	house1_washingmachine_pt3	Máquina de lavar roupa 2500W; Hotpoint Aquarius WD420
<b>Apartamento 2</b>			
Quarto 1	Luz 22	house1_bedroom_d_lamp_pt1	Lâmpada incandescente 45W; Quarto
Quarto 2	Luz 23	house1_childs_table_lamp_pt2	Lâmpada incandescente 15W de mesa; Quarto infantil
Quarto 3	Luz 24	house1_childs_ds_lamp_pt2	Lâmpada LED 10W; Quarto infantil
	Luz 25	house1_livingroom_s_lamp_pt3	Lâmpada fluorescente 20W; Sala
Sala	Luz 26	house1_livingroom_lamp_tv_pt3	Lâmpada fluorescente 15W; Sala; Luz atrás de TV
	Luz 28	house1_kitchen_dt_lamp_pt1	Lâmpada incandescente 15W; Cozinha
Cozinha	Frigorífico 4	house1_fridge_pt4	Frigorífico 300W
	Máquina de Lavar 2	house1_washingmachine_pt4	Máquina de lavar roupa 2500W; Samsung wf80f5e5u4x
<b>Apartamento 3</b>			
Quarto 1	Luz 29	house1_bedroom_ds_lamp_pt1	Lâmpada incandescente 45W; Quarto
Quarto2	Luz 30	house1_childs_table_lamp_pt1	Lâmpada incandescente 15W de mesa; Quarto infantil
Sala	Luz 31	house1_livingroom_s_lamp2_pt1	Lâmpada fluorescente 15W; Sala
	Luz 32	house1_livingroom_lamp_tv_pt4	Lâmpada fluorescente 15W; Sala; Luz atrás de TV
Cozinha	Luz 33	house1_kitchenlights_pt1	10 x Lâmpada halogéneo 50W; Cozinha
	Frigorífico 5	house1_fridge_pt5	Frigorífico 300W
	Máquina de Lavar 3	house1_washingmachine_pt5	Máquina de lavar roupa 2500W; Samsung wf80f5e5u4x
<b>Apartamento 4</b>			
Quarto 1	Luz 34	house1_bedroom_d_lamp_pt2	Lâmpada incandescente 45W; Quarto
Quarto 2	Luz 35	house1_childs_ds_lamp_pt1	Lâmpada LED 10W; Quarto infantil
Quarto 3	Luz 36	house1_childs_ds_lamp_pt3	Lâmpada LED 10W; Quarto infantil
Sala	Luz 37	house4_tv_dvd_digibox_lamp	Televisão, DVD Player e Luz 100W; Sala

Cozinha	Luz 38	house1_livingroom_s_lamp2_pt2	Lâmpada fluorescente 20W; Sala
	Luz 39	house1_kitchen_dt_lamp_pt2	Lâmpada incandescentes 15W; Cozinha
	Frigorífico 6	house4_freezer	Frigorífico congelador 300W
	Máquina de Lavar 4	house4_washing_machine_microwav_e_breadmaker	Máquina de lavar roupa, microondas e máquina de fazer pão
	<b>Apartamento 5</b>		
Quarto 1	Luz 40	house1_bedroom_d_lamp_pt3	Lâmpada incandescente 45W; Quarto
	Luz 41	house1_bedroom_ds_lamp_pt3	Lâmpada incandescente 45W; Quarto
Quarto 2	Luz 42	house1_childs_table_lamp_pt3	Lâmpada incandescente 15W de mesa; Quarto infantil
Despensa	Luz 43	house1_utilityrm_lamp_pt3	Lâmpada fluorescente linear 40W; Despensa
Sala	Luz 44	house1_livingroom_s_lamp2_pt3	Lâmpada fluorescente 20W; Sala
Cozinha	Luz 45	house1_kitchen_lamp2_pt2	Lâmpada fluorescente 20W; Cozinha
	Luz 46	house1_kitchenlights_pt3	10 x Lâmpada LED 10W; Cozinha
	Frigorífico 7	house2_fridge	Frigorífico 300W
	Máquina de Lavar 5	house2_washing_machine	Máquina de lavar roupa 2500W
	<b>Apartamento 6</b>		
Quarto 1	Luz 47	house1_bedroom_d_lamp_pt4	Lâmpada incandescente 45W; Quarto
Quarto 2	Luz 48	house1_bedroom_ds_lamp_pt4	Lâmpada incandescente 45W; Quarto
Quarto 3	Luz 49	house1_childs_ds_lamp_pt4	Lâmpada LED 10W; Quarto infantil
	Luz 50	house1_childs_table_lamp_pt4	Lâmpada incandescente 15W de mesa; Quarto infantil
Marquise	Luz 51	house1_utilityrm_lamp_pt4	Lâmpada fluorescente linear 40W; Despensa
	Máquina de Lavar 6	house5_washer_dryer	Máquina de lavar e secar roupa 2500W
Sala	Luz 52	house1_livingroom_s_lamp_pt4	Lâmpada fluorescente 15W; Sala; Luz atrás de TV
	Luz 53	house1_livingroom_s_lamp2_pt4	Lâmpada fluorescente 20W; Sala
Cozinha	Luz 54	house1_kitchenlights_pt4	10 x Lâmpada LED 10W; Cozinha
	Frigorífico 6	house5_fridge_freezer	Frigorífico e congelador 300W

### 3.4.3 BOMBAGEM E EXTRAÇÃO

Para além dos equipamentos mencionados acima, ainda foi considerado o consumo de bombagem de água e extração de ar para o edifício. Naturalmente, este tipo de edifícios contêm sistemas centralizados para efetuar este tipo de trabalho (Wong et al., 2014). Neste caso, foi considerado o funcionamento de uma bomba de água com

potência nominal de 1100W, ao longo de 90 minutos durante o dia. Para a extração de ar do edifício, foi considerado o funcionamento constante, durante o dia, de uma ventoinha com 200W de potência nominal.

# CENÁRIOS E DISCUSSÃO

4.1 CENÁRIO 1

4.2 CENÁRIO 2

4.3 DISCUSSÃO



## 4 CENÁRIOS E DISCUSSÃO

Na secção seguinte apresentam-se os cenários em que o algoritmo de otimização foi aplicado, os resultados e a discussão dos mesmos. Foram testados dois cenários diferentes, o primeiro é a aplicação do algoritmo baseado nos consumos do trabalho anterior, e servirá como cenário de referência. No segundo cenário foram utilizados os dados de consumo selecionados para este estudo.

No total, o algoritmo dispôs de 14 sistemas de ar condicionado, 53 luzes e 6 máquinas de lavar para controlar o consumo. Seguindo o mesmo tipo de análise feita no estudo anterior e em diversos artigos científicos do mesmo tipo, serão estudados perfis de consumo ao longo de um dia de forma a simplificar a análise dos mesmos. Este algoritmo foi focado nas horas de principal uso, ou seja, das 8 horas até às 20 horas e os resultados estão dispostos a seguir. Podem ser vistos 48 períodos entre este horário, estes representam o número total de períodos de 15 minutos entre as 12 horas definidas.

Para executar o algoritmo ainda foram necessárias mais informações, como a temperatura exterior do edifício. Esta é necessária para simular a carga nos sistemas de ar condicionado. Na figura 8, é possível observar o gráfico da distribuição de temperatura exterior do edifício utilizada para o dia em questão, esta não foi explorada e foi fornecida pelo GECAD, juntamente com a informação de consumo do cenário 1.

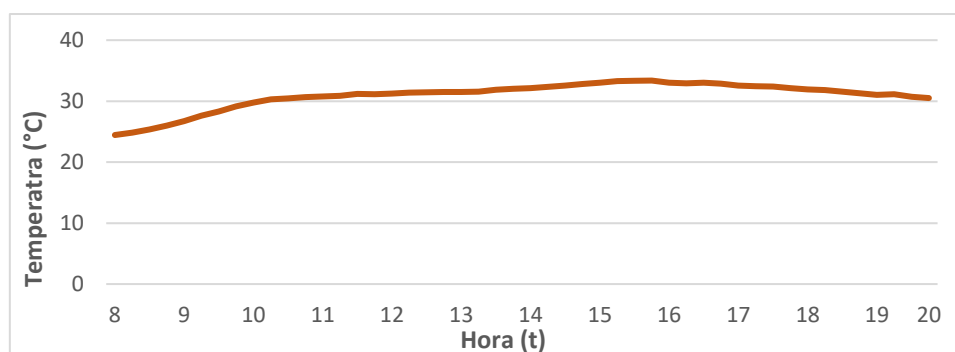


Figura 8 - Temperatura exterior considerada para os sistemas de ar condicionado.

Com uma análise rápida foi possível verificar que as temperaturas representam um dia quente, com uma temperatura média de 31 °C entre as 8 e 20 horas. Isto indica que o consumo dos sistemas de ar condicionado possam vir a contribuir consideravelmente para o consumo do edifício. Adicionalmente, foram fornecidas as definições de temperatura interior desejadas para cada espaço que dispõe de sistema de ar condicionado. Estas temperaturas foram definidas entre os 14 e 19 °C para cada um dos

sistemas de ar condicionado e período, de forma a representar um perfil flexível e variado das definições de temperatura desejadas ao longo do dia.

#### 4.1 CENÁRIO 1

O cenário 1 foi definido como o cenário de referência. Este servirá de comparação e avaliação para os restantes cenários. Neste caso e no cenário a seguir, foi utilizada a versão completa do algoritmo de otimização, e as condições descritas na secção anterior. O número de equipamentos deste cenário é equivalente ao do estudo. No entanto, os dados de consumo das luzes, ACs, bombagem e extração, e características destes equipamentos são provenientes de medições feitas pelo sistema SCADA no edifício do GECAD, (Khorram et al., 2020). Esta informação de consumo é real e foi medida ao longo de vários dias de trabalho das 8 horas, até às 20 horas, Figura 4 – Plano do edifício e equipamentos. A informação de consumo dos frigoríficos utilizada neste cenário proveio dos dados selecionados. Comparativamente ao consumo selecionado para o estudo, os dados utilizados neste cenário apresentam um perfil de consumo muito superior. Isto porque os consumos são oriundos de um edifício de escritórios com intensividade de uso superior ao uso residencial. No cenário 2, serão tratados dados de consumo de habitações entre os dois e quatro ocupantes, já neste caso, trata-se de um edifício com uma média de 20 ocupantes.

Na tabela 5, estão presentes as características dos equipamentos utilizados neste cenário.

Tabela 5 - Descrição dos equipamentos utilizados no cenário 1.

	Quantidade	Potência	Observações
ACs	14	1300W	
Luzes	51	100W	Lâmpadas fluorescentes T5
Máquinas de Lavar	6	2000W	Ciclo de funcionamento de 90 min.
Bombagem	1	1100W	
Extrator	1	200W	Extrator do edifício, funciona a tempo inteiro
Frigoríficos	8	300W	

Na figura 9, pode ser vista a redução de potência requerida pelo fornecedor de energia. Estes valores indicam a porção de redução de potência requisitada pela entidade distribuidora de energia em cada período, e faz parte integrante de uma das medidas de resposta da procura. Estes valores também foram usados como redução de

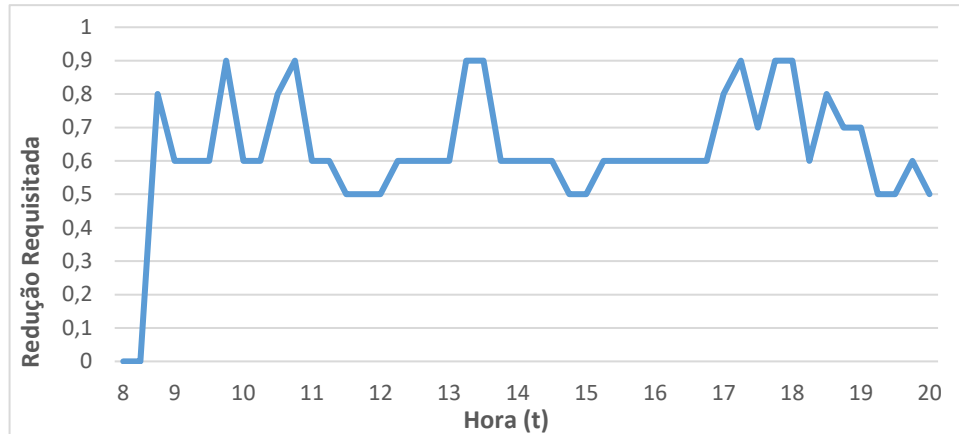


Figura 9 - Redução de potência requerida pelo algoritmo para cada período, cenário 1.

potência máxima aplicada aos equipamentos sob controlo do algoritmo.

De seguida, na figura 10, está presente o perfil de consumo de todos os equipamentos do edifício. Estão destacados os consumos individuais de cada grupo de equipamentos. O consumo cumulativo ao longo do dia foi de 194,7 kWh. Como já foi referido na secção 2.2.1 e em (Khorram et al., 2020), os sistemas de ar condicionado apresentam-se na maior parte dos casos, incluindo este, com a porção mais significativa do consumo, 69%. O segundo maior impacto no consumo foi provocado pelas luzes, com 19%.

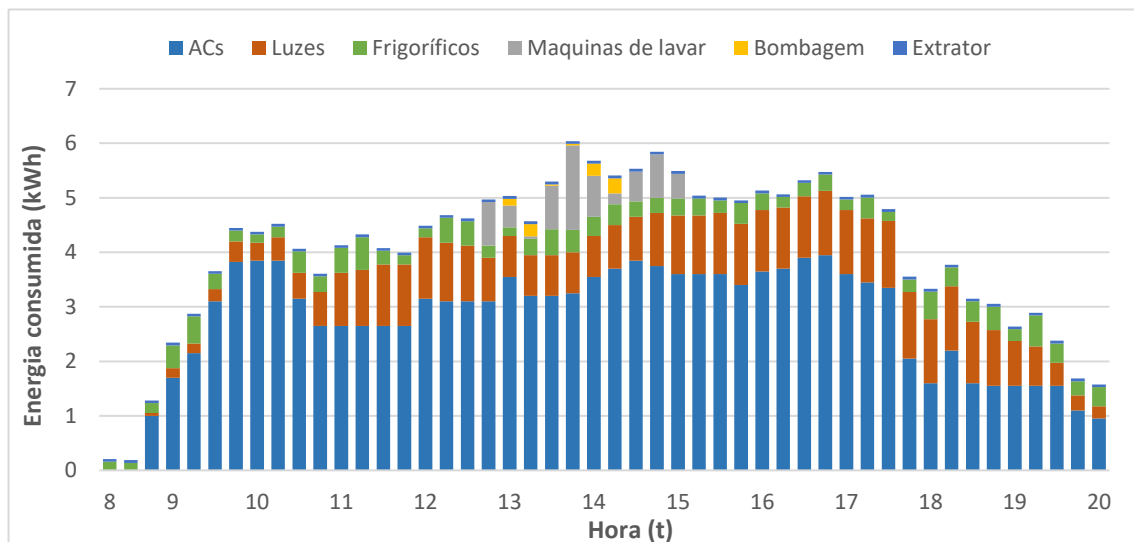


Figura 10 - Perfil de consumo energético original do edifício completo, cenário 1.

Da mesma forma que na figura anterior, na figura 11, está presente o perfil de consumo otimizado de todos os equipamentos do edifício. Neste caso, o consumo cumulativo ao longo do dia foi de 185,2 kWh. Comparativamente ao consumo original, isto representa um decréscimo de 4,9% na energia consumida durante o dia em questão. Foi possível verificar que, para além da redução no consumo, o algoritmo foi capaz de

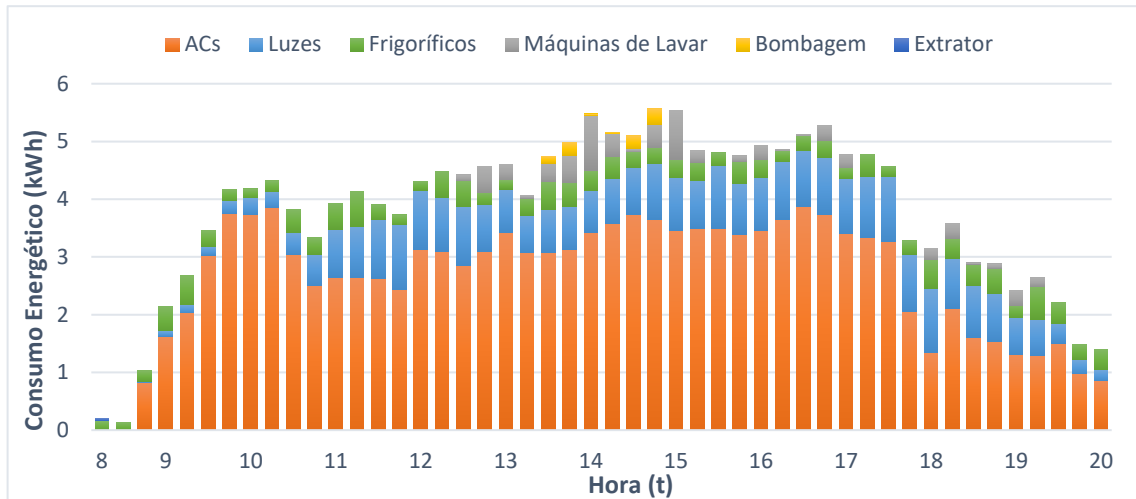


Figura 11 - Perfil de consumo energético otimizado do edifício completo.

deslocar o funcionamento das máquinas de lavar para períodos mais apropriados. Isto porque, o consumo original destes equipamentos encontrava-se entre as 12:45 e as 15h, e este foi distribuído ao longo do dia com sucesso. Na figura 12, apresentam-se os perfis de consumo original e otimizado do edifício completo para comparação. Verificou-se que o algoritmo teve um maior impacto entre as 13 e as 15 horas, e reduziu o maior pico do consumo desde 6 kWh para 5kWh, às 13 horas e 45 minutos.

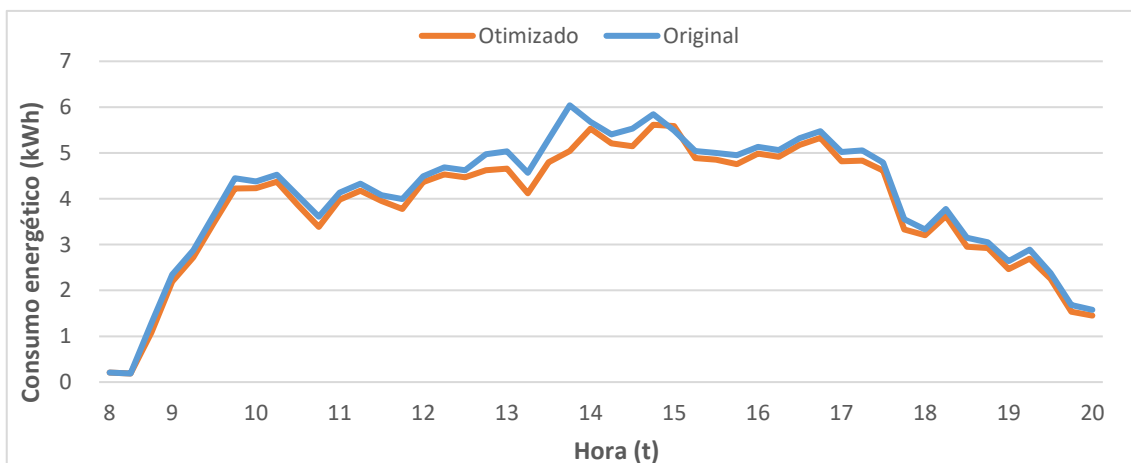


Figura 12 - Comparação dos perfis de consumo original e otimizado do edifício, cenário 1.

Em último, na figura 13, está presente a comparação dos consumos reduzidos, em cada um dos pisos do lado direito do edifício. Foi possível analisar que, o algoritmo obteve uma maior redução do consumo, na parte final do dia. Também foi possível observar que, os espaços com maior número de equipamentos, neste caso o quarto andar, apresentam uma maior redução comparativamente aos restantes. Através dos picos de

redução da figura abaixo, pode-se considerar que, o algoritmo obteve uma redução ligeira, sem afetar significativamente o conforto dos utilizadores, em períodos consecutivos. Ao controlar a redução de consumos ao longo dos períodos, o algoritmo foi capaz de impedir uma redução muito acentuada em períodos consecutivos. Isto, pode trazer desconforto indesejado para os ocupantes, e como tal, deve ser minimizado.

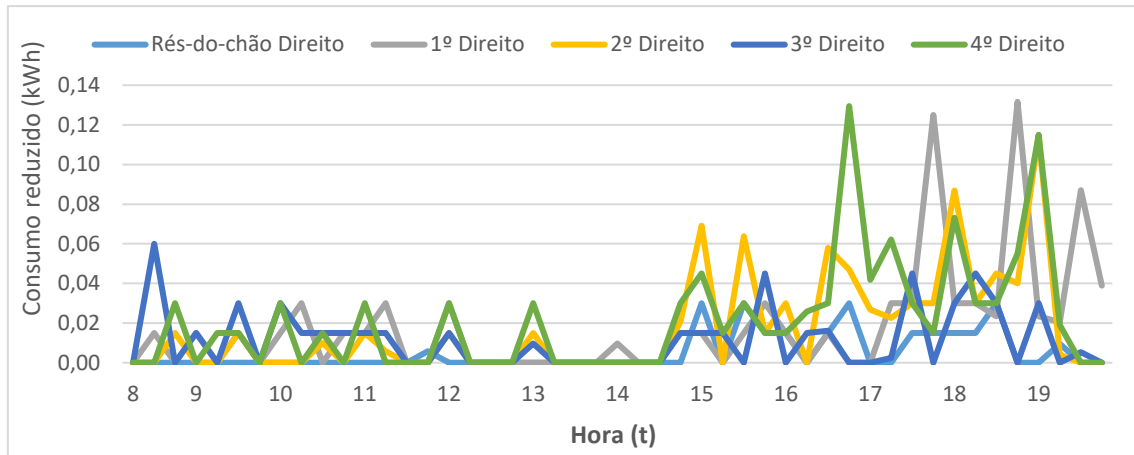


Figura 13 - Comparação dos consumos reduzidos, ao longo dos diversos pisos, cenário 1.

## 4.2 CENÁRIO 2

No cenário seguinte, abordou-se a otimização energética do edifício modelado, juntamente com os dados de consumo selecionados. O algoritmo, foi executado com todos os dados de entrada adaptados ao caso, e foram analisados os resultados da otimização. Neste cenário, foi contemplado um dia desde as oito horas até à meia-noite, para otimizar o consumo até ao final da noite, na zona residencial, e obter mais detalhes do perfil e dos dados utilizados. A definição dos equipamentos utilizados no edifício, para este caso, foi descrita na secção 3.4. Os detalhes dos sistemas de ar condicionado, como as temperaturas, inercia térmica e consumos, são provenientes do estudo



Figura 14 - Redução de potência requerida pelo algoritmo para cada período, cenário 2.

anterior, tal como no cenário anterior. Na figura 14, apresenta-se a redução de potência requisitada pelo fornecedor de energia, a cada período, como política de resposta da procura. Esta redução, é usada pelo algoritmo para decidir em que períodos reduzir o consumo.

Os resultados da otimização, com os dados de entrada selecionados, são apresentados a seguir. Na figura 15, pode ser visto o perfil de consumo energético inicial, para o cenário 2. O perfil é mais constante, como se pode ver, que o caso anterior. As máquinas de lavar apresentam um consumo mais acentuado por terem uma potência nominal superior, às utilizadas no cenário anterior.

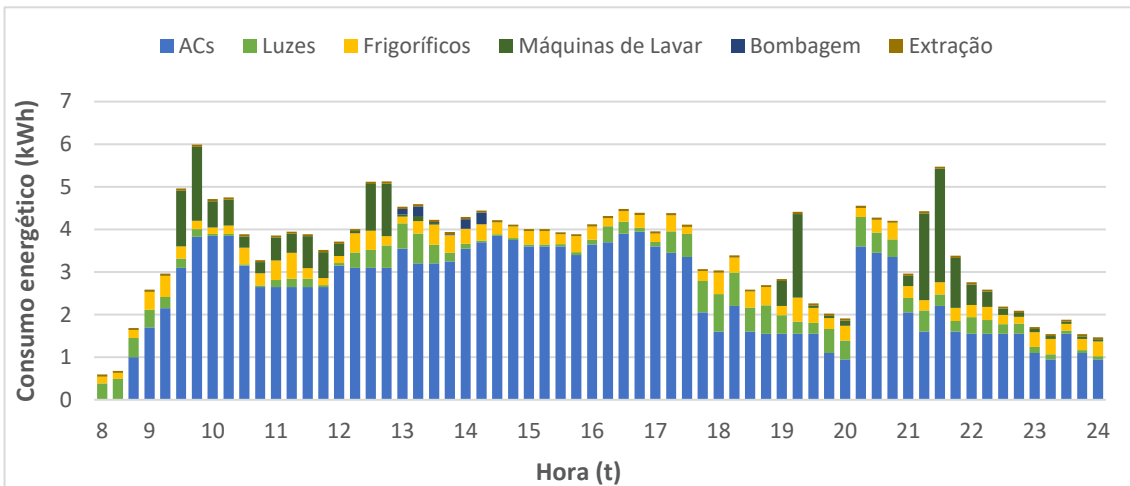


Figura 15 - Perfil de consumo energético original do edifício completo, cenário 2.

Originalmente, ao longo de 16 horas, foram consumidos 224,5 kWh. O perfil de consumo otimizado, presente na figura 16, apresentou um consumo de 214,4 kWh. Isto, traduz-se num decréscimo de 4,5%, semelhante ao caso anterior. Quanto às máquinas de lavar, o algoritmo apresentou alguma dificuldade a deslocar o funcionamento para alturas mais benéficas. Apesar disso, foi capaz de reduzir o consumo das luzes de 19

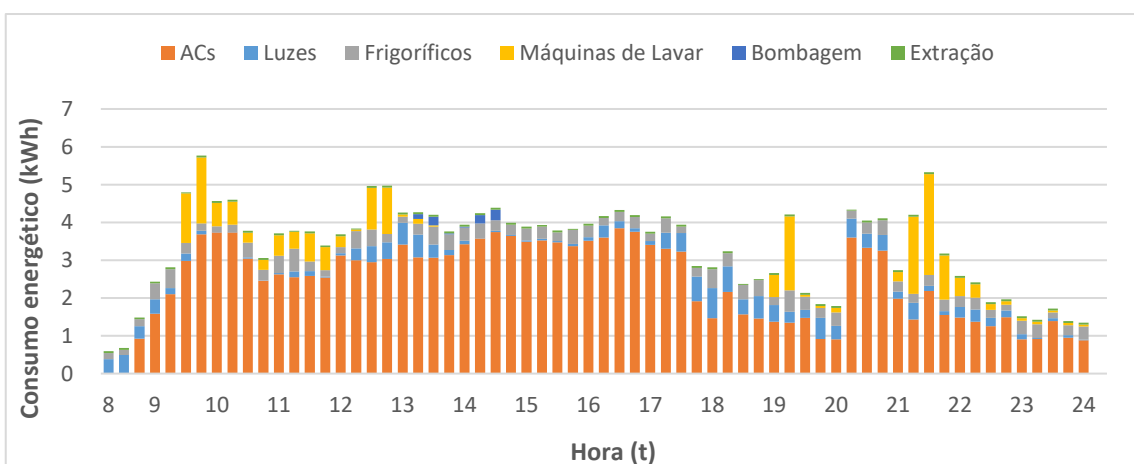


Figura 16 - Perfil de consumo energético otimizado do edifício completo, cenário 2.

kWh, para 15,8 kWh, quase 17%. Quanto aos ACs, a otimização reduziu o consumo de 161,6 kWh, para 154,8 kWh, cerca de 4,2%. Uma vez que, a otimização contempla o conforto dos utilizadores, uma redução menos acentuado dos ACs seria de esperar,

devido ao grande impacto destes sistemas na temperatura interior. Como comparação, na figura 17, estão traçados ambos os perfis em sobreposição. Observou-se que, o algoritmo reduziu o perfil de consumo ligeiramente, ao longo do dia. Embora, a redução

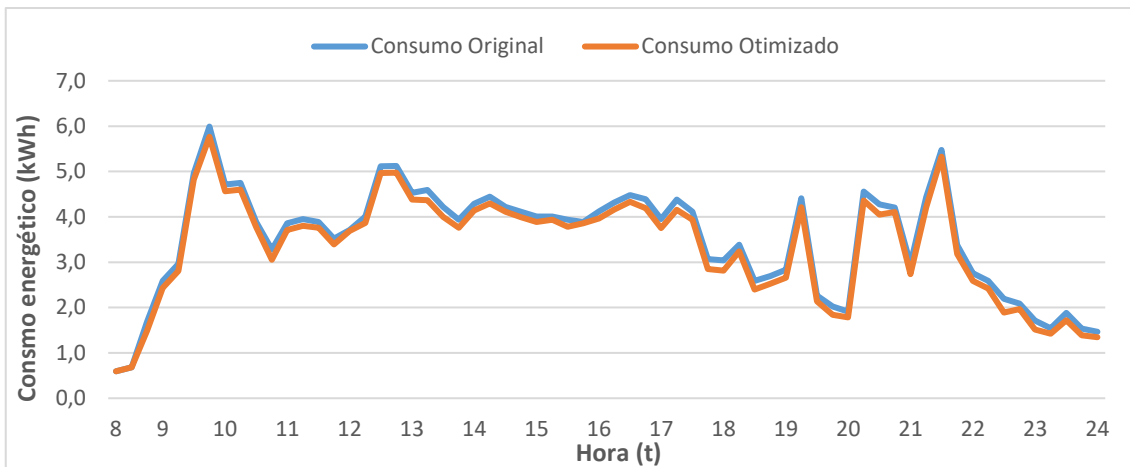


Figura 17 - Comparação dos perfis de consumo original e otimizado do edifício, cenário 2.

dos picos de consumo seja menos acentuada que no caso anterior, ainda foi possível verificar uma descida entre 5% e 10%.

Por fim, como no caso inicial, foi analisada a redução de consumo das diferentes áreas, nos quatro pisos. Esta, presente na figura 18, indica para uma redução mais focada na parte da manhã, e depois das 17 horas. Podem ver-se, valores mais altos na redução do consumo, no quarto, terceiro e segundos andares. Isto, porque são as habitação que apresentam a maior porção do consumo, neste caso, com cerca de 70% da energia consumida. Também foi possível verificar que, o algoritmo procura impedir a redução excessiva do consumo dos equipamentos, em períodos consecutivos. É possível observar isso nas reduções de consumo, acima, através dos picos característicos.

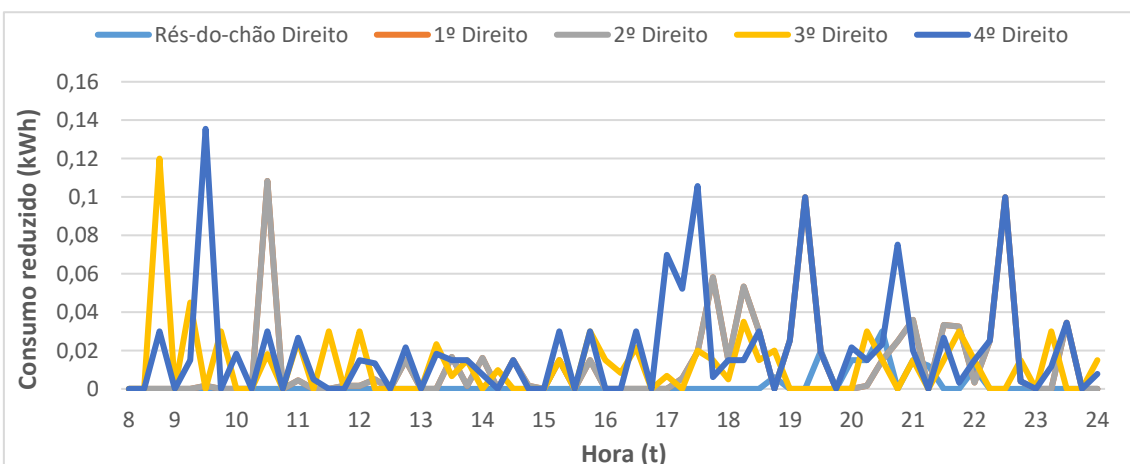


Figura 18 - Comparação dos consumos reduzidos, ao longo dos diversos pisos, cenário 2.

### 4.3 DISCUSSÃO

Nesta secção, discutem-se os resultados obtidos nos cenários anteriores. Os consumos obtidos ao longo do dia, foram semelhantes em ambos os casos. Como se pode observar pelos resultados da otimização, o algoritmo foi capaz de reduzir os consumos. Embora esta redução tenha sido de cerca de 5%, é um consumo considerável. Por exemplo, no cenário dois, o algoritmo reduziu o consumo em 10 kWh. Isto, representa uma redução da fatura elétrica do edifício, até 1,8€ por dia. Em edifícios de dimensões superiores, estes ganhos podem ser ainda maiores. Na tabela 5, podem ser vistos os valores de consumo absolutos dos vários cenários. Como já foi referido anteriormente, o primeiro cenário foi contemplado com 12 horas de funcionamento, já no segundo cenário foram contempladas 16 horas. Para além de, naturalmente, apresentar consumos mais altos, o cenário dois, apresenta consumo das luzes mais baixo que o primeiro. Isto porque, os consumos utilizados no primeiro cenário foram de um edifício de uso mais intensivo, enquanto que no segundo caso, foram consumos mais leves de habitações.

Tabela 6 - Comparação dos consumos dos diversos equipamentos, nos cenários abordados.

Equipamentos	Cenário 1		Cenário 2	
	Normal	Otimizado	Normal	Otimizado
ACs	131,9 (67,7%)	127,1 (68,6%)	161,6 (72%)	154,8 (72,2%)
Luzes	38,2 (19,6%)	33,5 (18,1%)	19,1 (8,5%)	15,8 (7,4%)
Extração	2,4 (1,2%)	2,3 (1,1%)	3,2 (1,5%)	3,0 (1,2%)
Total (kWh)	194,7	185,2	224,5	214,4

Quanto aos perfis de consumo, estes apresentam características diferentes. No primeiro cenário, tem-se um perfil mais arredondado, com o máximo de consumo por volta das 14 horas. Já no segundo, os picos de consumo situam-se a meio da manhã, e depois das 18 horas. Estas características, demonstram a natureza da origem dos dados de entrada. Os dados utilizados no cenário um, provenientes de um edifício de escritórios de elevado uso, mostram o perfil de consumo comum, a espaços de trabalho comum. No segundo cenário, o perfil apresenta a curva mais comum das habitações, com os picos de consumo situados nas alturas em que o maior número de pessoas se situam nestes locais.

As curvas de redução, de forma semelhante aos perfis, apresentam reduções de potência, nos períodos de maior consumo. Isto significa que, o algoritmo selecionou com sucesso as situações em que deve reduzir o consumo. No cenário um, a maior parte da redução, situa-se depois das 15 horas, alturas em que a produtividade dos trabalhadores começa a descer, e estes começam a dispersar-se. Quanto ao cenário dois, este apresentou a maior parte da redução durante a manhã, e depois das 17 horas. Isto é um benefício, pois estas são as alturas de maior consumo.

# CONCLUSÕES

5.1 CONCLUSÕES

5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS



## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Por fim, apresentam-se as conclusões quanto ao estudo efetuado. Estas dizem respeito ao desempenho do algoritmo, nos cenários contemplados. Foram também avaliadas as análises, e a definição do edifício em questão.

### 5.1 CONCLUSÕES

Através deste estudo, foi possível aproximar o trabalho feito anteriormente, para novos tipos de consumidores de energia elétrica. Foi definido com sucesso um edifício com consumidores comerciais, habitações e escritórios. Após a pesquisa, foram definidos dados de entrada para o algoritmo. Foi possível incorporar dados de consumo reais, estes provenientes de habitações na Inglaterra. Estes dados, necessitaram de uma conversão, antes de poderem ser introduzidos no algoritmo de otimização. Foram também, definidos com sucesso os equipamentos do edifício, embora de forma simples, foram capazes de representar os vários consumidores.

O método de otimização, alcançou, com sucesso, reduções no consumo significativas para ambos os casos, considerando a resposta da procura. Os diferentes equipamentos foram integrados corretamente com o algoritmo, comprovando a flexibilidade do mesmo. Os resultados da otimização, demonstraram que esta foi capaz de controlar as luzes, máquinas de lavar e sistemas de ar condicionado com sucesso. Ao mesmo tempo que foi reduzido o consumo, o algoritmo considerou o conforto visual, e térmico dos utilizadores. Embora, isto seja subjetivo, foi possível observar que o algoritmo impediu a redução em períodos consecutivos, como indicado anteriormente.

Com isto, a análise permitiu concluir que, o algoritmo pode ser utilizado em edifícios com diferentes tipos de consumidores. Este, também foi capaz de considerar o conforto dos utilizadores, durante todo o tempo de funcionamento, e incorporando uma política de resposta do consumo.

### 5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Em trabalhos futuros, podem ser explorados, mais acentuadamente, os dados de consumo. Uma vez que, neste caso só foi contemplado um dia de funcionamento, e estes apresentam quase um ano de registos. Adicionalmente, o algoritmo pode ser

analisado para incorporar mais políticas de resposta da procura, modelações de edifícios e novos equipamentos, por exemplo, sistemas de ar condicionado centralizados. A introdução de sistemas de produção de energia, pode expandir ainda mais o método de otimização e o desempenho das reduções.





# BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

## 6.1 REFERÊNCIAS



## 6 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

### 6.1 REFERÊNCIAS

- Ahmad, A., & Khan, J. Y. (2020). Real-Time Load Scheduling, Energy Storage Control and Comfort Management for Grid-Connected Solar Integrated Smart Buildings. *Applied Energy*, 259(November 2019), 114208. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114208>
- Albadi, M. H., & El-Saadany, E. F. (2008a). A summary of demand response in electricity markets. *Electric Power Systems Research*, 78(11), 1989–1996. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2008.04.002>
- Albadi, M. H., & El-Saadany, E. F. (2008b). A summary of demand response in electricity markets. In *Electric Power Systems Research* (Vol. 78, Issue 11, pp. 1989–1996). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2008.04.002>
- Campbell, U. (2020). The Biggest Sources of Residential Energy Consumption. *Connect 4 Climate*. <https://www.connect4climate.org/infographics/what-uses-most-energy-your-home>
- DWH. (2017). *Average UK house sizes: The 5 main property types*. <https://www.dwh.co.uk/advice-and-inspiration/average-house-sizes-uk/>
- Eurostat. (2020). *Energy consumption EU-28*. <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ten00124/default/line?lang=en>
- Faria, P., & Vale, Z. (2011). Demand response in electrical energy supply: An optimal real time pricing approach. *Energy*, 36(8), 5374–5384. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.06.049>
- Faria, Pedro, & Vale, Z. (2013). Demand response programs definition using demand price elasticity to define consumers aggregation for an improved remuneration structure. *2013 4th IEEE/PES Innovative Smart Grid Technologies Europe, ISGT Europe 2013*. <https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2013.6695365>
- Faria, Pedro, Vale, Z., & Baptista, J. (2015a). Constrained consumption shifting management in the distributed energy resources scheduling considering demand response. *Energy Conversion and Management*, 93, 309–320. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.028>
- Faria, Pedro, Vale, Z., & Baptista, J. (2015b). Demand response programs design and use considering intensive penetration of distributed generation. *Energies*, 8(6), 6230–6246. <https://doi.org/10.3390/en8066230>
- Hong, Y., Ezeh, C. I., Deng, W., Hong, S. H., Peng, Z., & Tang, Y. (2020). Correlation between building characteristics and associated energy consumption: Prototyping low-rise office buildings in Shanghai. *Energy and Buildings*, 217. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109959>
- International Energy Agency. (2003). The Power to Choose. Demand Response in Liberalised Electricity Markets. In *Promotion {&} Education* (Vol. 11). <https://doi.org/10.1177/10253823040110040101>
- International Energy Agency. (2020). *CO2 emissions & GHG emissions*. IEA Statistics © OECD/IEA 2014. <http://data.worldbank.org/data-catalog/world-development-indicators>
- Kandasamy, N. K., Karunagaran, G., Spanos, C., Tseng, K. J., & Soong, B.-H. (2018). Smart lighting system using ANN-IMC for personalized lighting control and daylight harvesting. *Building and Environment*, 139, 170–180.

- <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.005>
- Kelly, J. (2017). UK Domestic Appliance Level Electricity(UK-DALE-2017)-Disaggregated appliance/whole house power. *Ukerc*.  
<https://doi.org/10.5286/UKERC.EDC.000004>
- Kelly, J., & Knottenbelt, W. (2015). The UK-DALE dataset, domestic appliance-level electricity demand and whole-house demand from five UK homes. *Scientific Data*, 2, 1–14. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.7>
- Khorram, M., Faria, P., Abrishambaf, O., & Vale, Z. (2020). Consumption optimization in an office building considering flexible loads and user comfort. *Sensors (Switzerland)*, 20(3). <https://doi.org/10.3390/s20030593>
- Lakshmanan, V., Marinelli, M., Hu, J., & Bindner, H. W. (2016). Provision of secondary frequency control via demand response activation on thermostatically controlled loads: Solutions and experiences from Denmark. *Applied Energy*, 173, 470–480. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.054>
- Lobato, E., Egado, I., & Rouco, L. (2012). Monitoring frequency control in the Turkish power system. *Electric Power Systems Research*, 84(1), 144–151. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2011.10.016>
- Martell, M., Rodríguez, F., Castilla, M., & Berenguel, M. (2020). Multiobjective control architecture to estimate optimal set points for user comfort and energy saving in buildings. *ISA Transactions*, 99, 454–464. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.10.006>
- Sarac, F. (2019). *High and Mid-Rise Apartment Buildings Are Overshadowing Low-Rises for the First Time in 3 Decades*.  
<https://www.rentcafe.com/blog/apartmentliving/high-mid-rise-residential-buildings-overshadowing-low-rise/>
- Shafavi, N. S., Zomorodian, Z. S., Tahsildoost, M., & Javadi, M. (2020). Occupants visual comfort assessments: A review of field studies and lab experiments. *Solar Energy*, 208, 249–274. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.07.058>
- Tang, R., & Wang, S. (2019). Model predictive control for thermal energy storage and thermal comfort optimization of building demand response in smart grids. *Applied Energy*, 242, 873–882. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.038>
- U S Department of Energy. (2006). Benefits of Demand Response in Electricity Markets and Recommendations for Achieving Them. In *U.S. Department of Energy* (Issue February). <https://doi.org/citeulike-article-id:10043893>
- Vale, Z., Morais, H., Faria, P., & Ramos, C. (2013). Distribution system operation supported by contextual energy resource management based on intelligent SCADA. *Renewable Energy*, 52, 143–153. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.10.019>
- Wong, L. T., Mui, K. W., Lau, C. P., & Zhou, Y. (2014). Pump efficiency of water supply systems in buildings of Hong Kong. *Energy Procedia*, 61, 335–338. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.1119>
- Yoon, S. H., Kim, S. Y., Park, G. H., Kim, Y. K., Cho, C. H., & Park, B. H. (2018). Multiple power-based building energy management system for efficient management of building energy. *Sustainable Cities and Society*, 42(May), 462–470. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.08.008>

