



Laura Cunha Somsen

Licenciada em Ciências da Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Sistema Holístico de Gestão de Energia Doméstica

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: João Francisco Alves Martins, Professor Associado,
Universidade Nova de Lisboa
Co-orientador: Rui Miguel Amaral Lopes, Professor Auxiliar Convi-
dado,
Universidade Nova de Lisboa

Júri

Presidente: Prof. André Teixeira Bento Damas Mora
Arguentes: Prof. Vitor Manuel de Carvalho Fernão Pires
Vogais: Prof. João Francisco Alves Martins



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Fevereiro, 2021

Sistema Holístico de Gestão de Energia Doméstica

Copyright © Laura Cunha Somsen, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

À minha avó.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor Doutor João Martins, e co-orientador, Professor Doutor Rui Amaral Lopes, por todo o apoio, motivação e conhecimento científico transmitidos ao longo desta dissertação. A disponibilidade de ambos permitiu que visse esclarecidas todas as dúvidas que fossem surgindo e, por isso, devo-lhes a concretização deste percurso.

Agradeço à Faculdade de Ciências e Tecnologias por me ter proporcionado uma educação com qualidade num ambiente fabuloso para o meu desenvolvimento académico e profissional, assim como agradeço a todos os docentes pela sua disponibilidade constante.

Um agradecimento enorme aos colegas de curso que me acompanharam desde o primeiro dia e com quem tive a oportunidade de crescer como pessoa. Agradeço especialmente a todos aqueles que me apoiaram em alturas mais complicadas e me ajudaram a levantar a cabeça e continuar a lutar. Um grande obrigado à minha família académica que esteve sempre disponível a esclarecer toda e qualquer dúvida que surgisse.

Deixo um agradecimento sincero aos meus melhores amigos Mónica Côrte-Real, Kyle Gonçalves e Vanessa Estrela, cujo apoio foi crucial para concretizar cada passo até hoje.

À minha família agradeço por tudo. Ao meu pai pela exigência e todo o mimo constante. À minha mãe por todo o amor e serenidade transmitida. Aos meus irmãos pela confiança e dedicação de sempre. À minha avó por me ouvir, compreender e motivar. Vocês são a razão da minha força e motivação, e por isso agradeço-vos do fundo do coração. Agradeço também a toda a minha família pelo apoio constante, independentemente da distância a que esta pandemia obrigou.

Agradeço, por fim, ao meu namorado, Rui Mendes, pela sua paciência, apoio, disponibilidade, conselhos e sobretudo pelo seu amor e carinho infindáveis.

RESUMO

Nos últimos anos, por múltiplos motivos conhecidos, tem-se assistido a uma intensificação da relevância do impacto ambiental. Sendo a produção de energia uma fonte de gases de efeito de estufa, torna-se determinante a produção energética através de fontes renováveis. Além disso, a dificuldade em tornar a energia acessível a todos torna essencial que a sua utilização seja mais criteriosa.

Face a estas inevitabilidades, surgem diretivas europeias com o objetivo de regulamentar uma porção destes impactos, nomeadamente nos edifícios, que representam quase 40% da energia consumida. A obrigação de implementar edifícios com necessidades quase nulas de energia (*nZEB*) surge como consequência destas medidas.

As comunidades agregadas de *nZEB* (*CNET-ZEC*) aparecem posteriormente com o objetivo de melhorar o aproveitamento energético total e individual.

Com a flexibilidade energética surge a oportunidade de proporcionar uma melhoria na utilização de equipamentos dos vários clientes, efetuando uma gestão da procura e cumprindo as limitações da rede.

A presente dissertação descreve o desenvolvimento de uma metodologia, e consequente utilização, que permite estimar a flexibilidade energética de *nZEB*, e de *CNET-ZEC*, por forma a ter uma melhor utilização da energia, seja através de limitações de potência ou redução de custos associados ao consumo energético. Esta metodologia baseia-se em algoritmos genéticos e concretiza uma redução no custo energético para os utilizadores, proporcionando também um maior controlo de potência do lado do gestor da rede de distribuição.

No sentido de simplificar a utilização desta metodologia, foi desenvolvido um protótipo de aplicação móvel na qual os utilizadores visualizam os seus benefícios e que tem como objetivo a demonstração dos impactos ambientais do seu consumo, incentivando a um comportamento mais sustentável.

Palavras-chave: Edifício com necessidades quase nulas de energia, Eficiência Energética, Flexibilidade Energética, Gestão da Procura, Algoritmos Genéticos.

ABSTRACT

Through the years, for multiple known reasons, there has been an escalation of the environmental impact's relevance. Being the energy production a source of greenhouse emissions, it is crucial to produce energy through renewable sources. Besides, the hardship of making energy accessible to everyone makes it essential to demand better usages of the energy.

Due to these inevitabilities, european directives arise with the aim of regulating a portion of these impacts, namely on buildings, which represent nearly 40% of the consumed energy. The obligation of implementing nearly zero energy buildings (*nZEB*) comes as a consequence of these regulations.

Aggregated communities of *nZEB* (*CNET-ZEC*) appear afterwards with the goal of increasing the total and individual energy efficiency.

Energy flexibility rises the opportunity of guarranteeing an improvement on the energy systems of clients, by doing demand side management and fulfilling the grid's limitations.

This dissertation describes the development of a methodology and sequent utilization, which allows the estimation of energy flexibility of *nZEB* and *CNET-ZEC*, to improve the energy usage, either through power limitations or reduction of energy consumption costs. This methodology is based in genetic algorithms and achieves a reduction in energy costs for users, while also providing a greater power control on the side of the distribution system's manager.

Regarding the simplification of this methodology's use, a mobile application's prototype was developed, in which the users visualize their benefits and which has the purpose of showing the environmental impacts of their energy consumption, encouraging a more sustainable behaviour.

Keywords: nearly Zero-Energy Building, Energy Efficiency, Energy Flexibility, Demand Side Management, Genetic Algorithms.

ÍNDICE

Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xix
Siglas	xxi
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Motivação	4
1.3 Objetivo	5
1.4 Descrição do Documento	6
2 Estado de Arte	9
2.1 nZEB	10
2.1.1 Prosumer	10
2.1.2 Comunidade nZEB	11
2.2 Flexibilidade Energética	11
2.2.1 Flexibilidade Agregada	12
2.2.2 Metodologias para Quantificação da Flexibilidade	13
2.3 Monitorização não intrusiva de cargas	16
2.4 Aplicações Comerciais	17
3 Solução Proposta	19
3.1 Metodologia	19
3.1.1 Foco	20
3.1.2 Simulação de Dados	20
3.2 Algoritmos Genéticos	25
3.2.1 Conceito de Algoritmo Genético	25
3.2.2 Técnicas de Variação e Seleção Genética	27
3.3 Aplicação	28
3.3.1 Modelo Funcional	29
3.3.2 Protótipo Desenvolvido	30
3.3.3 Cenários	34

3.3.4	Indicadores	35
4	Resultados	37
4.1	Cenário 1	37
4.1.1	Custo Energético	37
4.1.2	Potência Máxima	39
4.2	Cenário 2	41
4.2.1	Custo Energético	41
4.2.2	Potência Máxima	43
4.3	Cenário 3	44
4.3.1	Custo Energético	44
4.3.2	Potência Máxima	44
4.4	Cenário 4	45
4.4.1	Custo Energético	45
4.4.2	Potência Máxima	46
4.5	Cenário 5	47
4.6	Comparação de Resultados	47
5	Conclusão	51
5.1	Síntese	51
5.2	Trabalho Futuro	52
	Bibliografia	55
A	Gráficos de Consumo Acumulado	61

LISTA DE FIGURAS

1.1	Variação da procura de energia e consequentes emissões de CO ₂ para cada cenário (Retirado de [1]).	2
1.2	Variação do consumo de energia por setor na União Europeia (Retirado de [3]).	3
1.3	Variação do consumo de energia por setor para cada cenário (Retirado de [1]).	3
1.4	Representação de uma comunidade de nZEB (Adaptado de [11]).	4
2.1	Variação da Procura Energética consoante Penalizações (Adaptado de [32]). .	13
2.2	Perfis de flexibilidade (esquerda) operação atrasada; (direita) operação forçada (Traduzido de [33]).	14
2.3	Curvas de custos sem (esquerda) e com pontos intermédios (direita) (Traduzido de [37]).	14
2.4	Consumo Energético (Adaptado de [38]).	15
2.5	Variação da Potência Temporalmente (Retirado de [41]).	16
3.1	Fluxograma da metodologia do estudo efetuado para desenvolvimento do algoritmo.	19
3.2	Opções de tarifas bi-horárias (Retirado de [56]).	23
3.3	Opções de tarifas bi-horárias para cada potência contratada (Retirado de [58]).	24
3.4	Impacto das máquinas no consumo da casa 1.	25
3.5	Representação de população através de cromossomas e genes (Adaptado de [61]).	26
3.6	Fluxograma dos processos inerentes a um algoritmo genético (Retirado de [40]).	27
3.7	Modo de funcionamento da técnica de <i>crossover</i> (Retirado de [40]).	28
3.8	Fluxograma dos processos inerentes ao algoritmo genético desenvolvido. . .	30
3.9	Página inicial do protótipo desenvolvido.	31
3.10	Representação da energia consumida pela casa 1 antes de efetuar a otimização.	32
3.11	Comparação da energia consumida pela casa 1 antes e depois de efetuar a otimização.	32
3.12	Representação da energia consumida por uma comunidade de habitações de diferente ocupação antes de efetuar a otimização.	33
3.13	Comparação da energia consumida por uma comunidade de habitações de diferente ocupação antes e depois de efetuar a otimização.	33
4.1	Consumo Acumulado da Casa 1 Antes e Depois da Otimização.	39

LISTA DE FIGURAS

4.2	Consumo Acumulado da Casa 2 Antes e Depois da Otimização.	39
4.3	Comparação de custos entre comunidades e casas individualizadas antes e depois da otimização.	43
4.4	Consumo Acumulado de Comunidade de Habitações Diferentes Antes e Depois da Otimização.	46
4.5	Consumo e produção da casa 1 após ajuste de potência máxima, a pedido do DSO.	47
5.1	Certificado de participação no <i>EDP University Challenge</i>	52
A.1	Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para a casa 3, antes da otimização.	61
A.2	Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para a casa 3, depois da otimização.	62
A.3	Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para a casa 4, antes da otimização.	63
A.4	Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para a casa 4, depois da otimização.	64
A.5	Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para a casa 5, antes da otimização.	65
A.6	Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para a casa 5, depois da otimização.	66
A.7	Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para a casa 6, antes da otimização.	67
A.8	Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para a casa 6, depois da otimização.	68
A.9	Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para a casa 7, antes da otimização.	69
A.10	Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para a casa 7, depois da otimização.	70
A.11	Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para a casa 8, antes da otimização.	71
A.12	Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para a casa 8, depois da otimização.	72
A.13	Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para a casa 9, antes da otimização.	73
A.14	Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para a casa 9, depois da otimização.	74
A.15	Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para a casa 10, antes da otimização.	75

A.16 Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para a casa 10, depois da otimização.	76
A.17 Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para a casa 11, antes da otimização.	77
A.18 Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para a casa 11, depois da otimização.	78
A.19 Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para a casa 12, antes da otimização.	79
A.20 Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para a casa 12, depois da otimização.	80
A.21 Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para a comunidade, antes da otimização.	81
A.22 Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para a comunidade, depois da otimização.	82
A.23 Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para uma comunidade igual, antes da otimização.	83
A.24 Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para uma comunidade igual, depois da otimização.	84

LISTA DE TABELAS

3.1	Características das habitações simuladas.	21
3.2	Tipos de máquinas consideradas.	21
3.3	Potência nos primeiros minutos de funcionamento para algumas das máquinas utilizadas.	21
3.4	Potência pico instalada para cada habitação.	22
3.5	Preços médios de mercado e preço de venda associado a cada mês.	24
3.6	Custos diários associados a cada habitação.	25
3.7	Características das habitações com igual ocupação.	34
3.8	Características das habitações com ocupação diferente.	35
4.1	Custos diários associados a cada habitação antes e depois da otimização.	38
4.2	Potências máximas associadas a cada habitação antes e depois da otimização.	40
4.3	Potências Contratadas associadas a cada habitação antes e depois da otimização.	40
4.4	Poupança em reduções de potência contratada para cada habitação.	41
4.5	Custos diários associados a uma comunidade antes e depois da otimização.	42
4.6	Custos diários comparativos associados a cada habitação antes e depois da otimização.	42
4.7	Potências máximas associadas a uma comunidade antes e depois da otimização.	43
4.8	Custos diários comparativos associados a cada habitação antes e depois da otimização, para habitações de igual ocupação.	44
4.9	Custos diários associados a uma comunidade de habitações com ocupações iguais antes e depois da otimização.	45
4.10	Potências máximas associadas a uma comunidade de habitações iguais antes e depois da otimização.	45
4.11	Custos diários comparativos associados a cada habitação antes e depois da otimização, para habitações de diferente ocupação.	45
4.12	Custos diários associados a uma comunidade de habitações com ocupações diferentes antes e depois da otimização.	46
4.13	Potências máximas associadas a uma comunidade de habitações diferentes antes e depois da otimização.	46

SIGLAS

AC	Alternating Current.
CNET-ZEC	Cooperative Net Zero Energy Community.
DC	Direct Current.
DSM	Demand Side Management.
DSO	Distribution System Operator.
EPBD	Directiva para o Desempenho Energético dos Edifícios.
LM	Load Matching.
MLL	Máquina de Lavar Loiça.
MLR	Máquina de Lavar Roupa.
MLSR	Máquina de Lavar e Secar Roupa.
MS	Máquina de Secar.
nZEB	Nearly Zero Energy Building.
Pdec	Potência a Decrementar.
Pinc	Potência a Incrementar.
Pref	Potência de Referência.
SDS	Sustainable Development Scenario.
STEPS	Stated Policies Scenario.
UE	União Europeia.

INTRODUÇÃO

Este capítulo contextualiza o problema no qual a presente dissertação se centra, assim como a motivação e os esforços efetuados até hoje no sentido de o resolver. Os esforços realizados na área focam-se principalmente na alteração da legislação em vigor, aumentando a sustentabilidade com o aumento de legislações mais restritivas. Para além disso, a existência de estudos relevantes na avaliação e caracterização da tecnologia existente possibilita um desenvolvimento constante no caminho da sustentabilidade.

O enquadramento do projeto de dissertação é a secção inicial deste capítulo introdutório, demonstrando um dos problemas existentes na atualidade. A secção que se segue reflete algumas das alterações efetuadas até ao momento para contrariar o caminho insustentável previsto. Por fim, a secção 1.3 refere os objetivos do algoritmo a desenvolver no presente projeto.

1.1 Enquadramento

Com o passar dos anos a relevância do impacto ambiental tem vindo a ser intensificada. Uma das preocupações reside no consumo energético, visto que a produção de energia também pode constituir uma fonte de poluição.

Segundo projeções da *International Energy Agency* para 2040 existem três cenários de desenvolvimento da procura energética, cada um deles com repercussões diferentes (figura 1.1) [1].

- O cenário de *Stated Policies* tem como base a utilização de medidas já estipuladas até 2040;
- O cenário de *Sustainable Development* assenta em medidas mais ambiciosas relativamente à utilização de tecnologias renováveis verdes e eficientes;

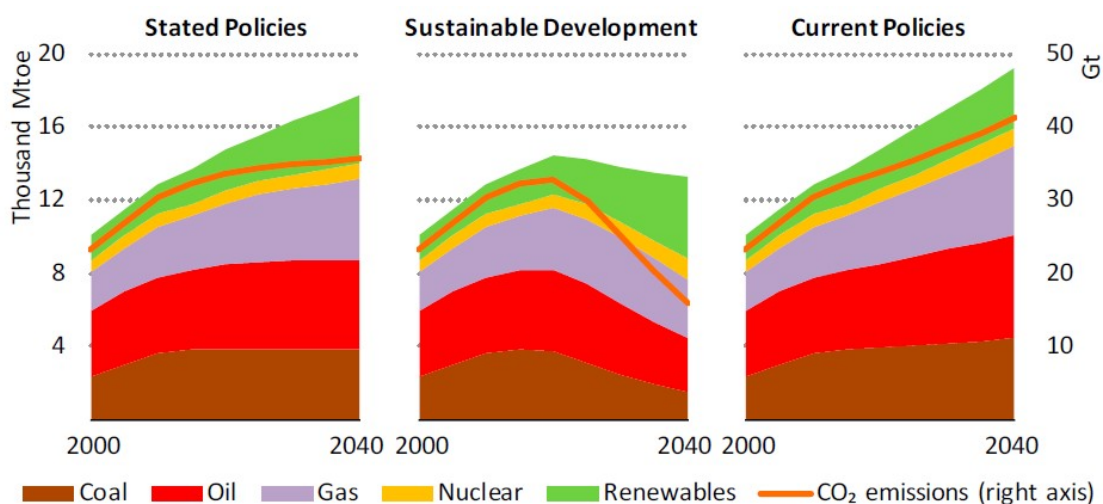


Figura 1.1: Variação da procura de energia e consequentes emissões de CO₂ para cada cenário (Retirado de [1]).

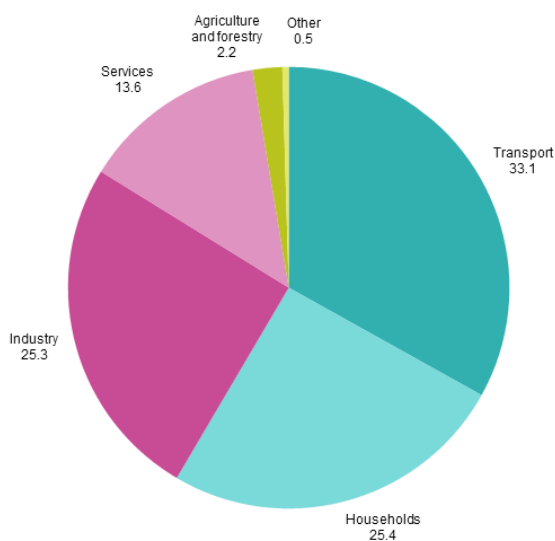
- O cenário de *Current Policies* assume um crescimento de acordo com as medidas atualmente aplicadas, demonstrando o impacto ambiental esperado caso nenhuma ação adicional seja despoletada.

Verifica-se que as medidas atualmente anunciadas permitem uma ligeira redução das emissões de CO₂, no entanto não resultam numa descida acentuada na procura de combustíveis fósseis, pelo que se mantém insustentável para uma economia de forte crescimento. Como tal, torna-se inevitável procurar não só fontes energéticas limpas, mas também com a maior eficiência possível, por forma a estimular um desenvolvimento no sentido da sustentabilidade.

Um dos elementos em destaque é o consumo dos edifícios, visto que este setor representa praticamente 40% da energia consumida (figura 1.2). Adicionalmente, também os edifícios são responsáveis por 36% das emissões de dióxido de carbono [2].

Atualmente, na Europa, 75% dos edifícios são energeticamente ineficientes e, apenas em média 1% são renovados anualmente [4]. Considerando que 35% dos edifícios têm mais de 50 anos, torna-se necessário implementar medidas que melhorem o desempenho energético destes [5]. Excluindo os edifícios em construção, seria possível poupar de 5% a 6% de energia e reduzir em 5% as emissões de dióxido de carbono ao renovar os edifícios construídos [6].

A integração de *nZEB* em comunidades permite também melhorias de eficiência consideráveis sendo que, num caso ideal, como estudado por Sun. et al., as melhorias relativas ao custo económico, balanceamento de cargas e interação da rede poderiam chegar a 118%, 40% e 56%, respetivamente. [7]. Segundo a *International Energy Agency*, contrariamente ao cenário STEPS (Stated Policies Scenario), num cenário de SDS (Sustainable Development Scenario) é viável, entre 2019 e 2040, um consumo final residencial inferior ao de 2000-2018 (figura 1.3).



Note: figures do not sum to 100.0 % due to rounding.
 Source: Eurostat (online data code: nrg_100a)

Figura 1.2: Variação do consumo de energia por setor na União Europeia (Retirado de [3]).

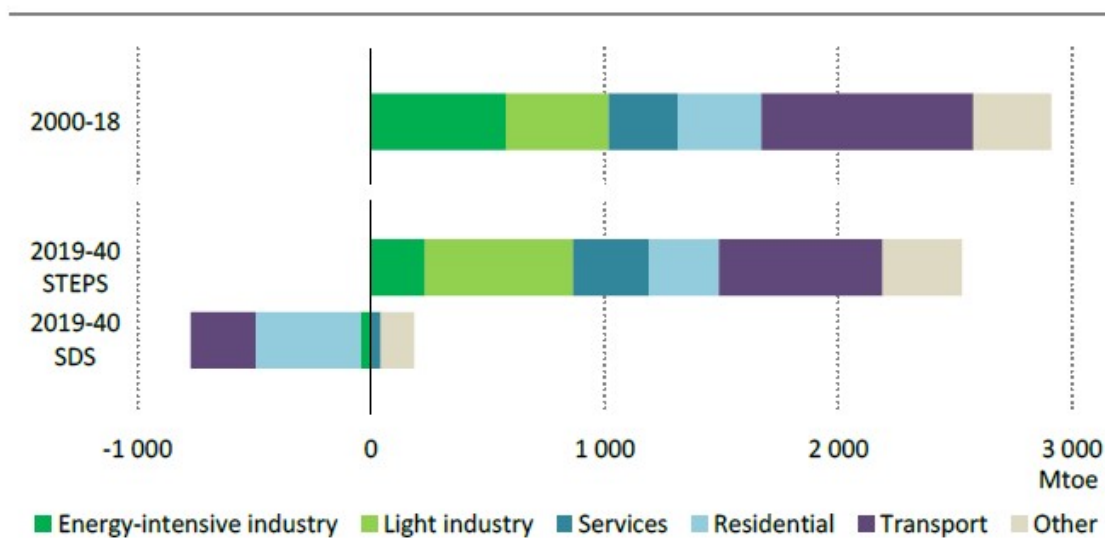


Figura 1.3: Variação do consumo de energia por setor para cada cenário (Retirado de [1]).

1.2 Motivação

Derivado deste conjunto de problemas, começam a surgir diretivas europeias com o objetivo de "desenvolver um sistema energético sustentável, concorrencial, seguro e descarbonizado" [2], que permitem reduzir as discrepâncias entre o consumo energético e a sua produção local. Pode concretizar-se através de alterações na produção, utilizando fontes renováveis locais, ou por diminuições no consumo energético, concretizável, por exemplo, através de uma melhoria na eficiência dos edifícios.

A diretiva EPBD [8] realça a importância da eficiência energética na efetivação de uma economia sem impactos ambientais até 2050, assim como a diminuição de 50% de consumo energético em comparação com 2005. Esta diretiva propicia assim um percurso no sentido de garantir um parque imobiliário com emissões baixas ou nulas de gases com efeito de estufa na União Europeia até 2050.

A implementação desta diretiva promove também a comunicação mais aberta entre países da UE acerca do desempenho energético de cada país, permitindo assim uma regulamentação e controlo mais adequado dos impactos no meio ambiente. Além disso, serão promovidos outros aspetos como, por exemplo, o bem estar de utilizadores dos edifícios em consideração, controlando também a qualidade do ar e a ventilação existente.

A importância do Decreto-Lei n.º 162/2019 vem transpor a diretiva [9], que promove a utilização de energia renovável, realça o autoconsumo desta energia e define os conceitos de autoconsumidores e comunidades de autoconsumidores (figura 1.4). É, neste contexto, relevante o aumento na eficiência energética dos agregados familiares e diminuição da pobreza energética, devido à redução tanto do consumo como de tarifas de comercialização. Poderão verificar-se, já que tem como objetivo auxiliar o autoconsumo individual e em comunidade de energia renovável, ao suprimir inconvenientes legais desnecessários, e promovendo o desenvolvimento tecnológico [10] [9].

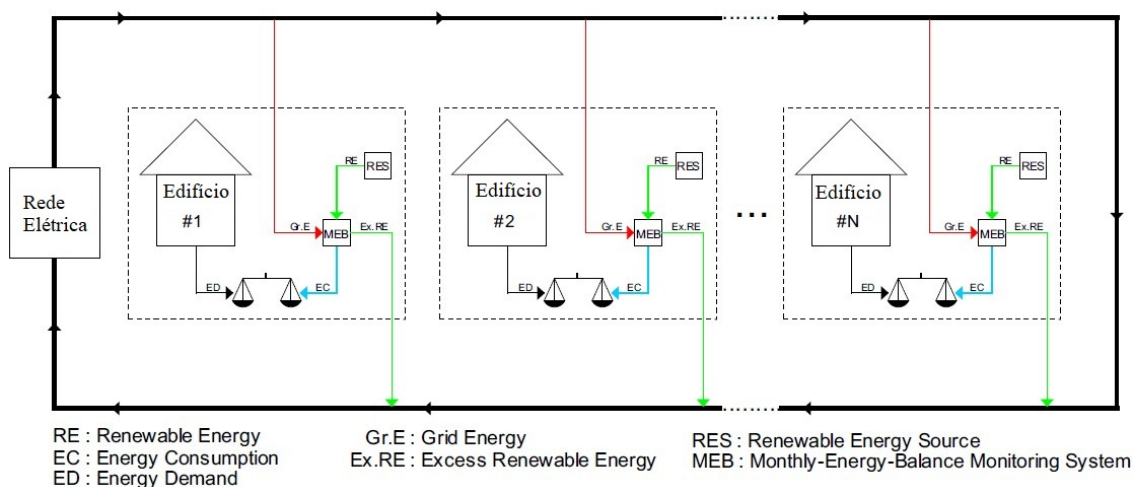


Figura 1.4: Representação de uma comunidade de nZEB (Adaptado de [11]).

Por forma a aumentar a competitividade e, conseqüentemente, tornar a energia economicamente mais acessível e garantir a segurança e sustentabilidade do abastecimento, torna-se urgente legislar adequadamente o mercado interno da eletricidade. A diretiva descrita em [2] tem como objetivo, entre outros, o desenvolvimento de um mercado de eletricidade funcional que promova a utilização de fontes renováveis, a flexibilidade e a inovação. Refere ainda que os consumidores "*deverão poder consumir, armazenar e vender eletricidade de produção própria no mercado e participar em todos os mercados da eletricidade, oferecendo flexibilidade ao sistema*", e que, para tal, as barreiras legais e comerciais existentes terão de ser anuladas [2]. Declara igualmente que a Comunidade de Energia permite que os consumidores cooperem na produção, consumo e partilha de energia, priorizando no entanto a energia renovável ao invés do lucro efetuado.

O favorecimento deste ecossistema sustentável permite a disrupção de técnicas como a flexibilidade energética, que atua no sentido de controlar determinadas condicionantes de um dado consumo, tendo sido desenvolvidas novas metodologias neste âmbito. Estas condicionantes podem ser o custo associado a uma quantidade de energia consumida, a redução de emissões de CO₂ e conseqüente redução da poluição, e o controlo da potência instantânea utilizada, entre outras.

1.3 Objetivo

Este trabalho tem como principal objetivo o desenvolvimento de uma metodologia capaz de reduzir os impactos ambientais do consumo energético.

A utilização de aplicações móveis permite mostrar aos utilizadores os seus consumos e aumentar a sua consciência ambiental. Como tal, criando um interesse (de poupança financeira, por exemplo) na utilização de aplicações, torna-se possível aumentar a consciencialização das comunidades. O benefício da metodologia em questão será medido através das alterações de custo energético para o utilizador, para concretizar resultados.

Esta metodologia aceita variáveis de entrada (número de pessoas no agregado familiar, número de máquinas passíveis de programar para horas desejadas) e é composta por um conjunto de algoritmos que:

1. calculam o custo energético associado ao funcionamento típico das cargas da habitação;
2. modificam o posicionamento horário das cargas movimentáveis de acordo com as limitações horárias do utilizador;
3. recalculam o custo energético associado a esse posicionamento;
4. selecionam o funcionamento que gera menor custo energético;
5. adaptam os horários das cargas de acordo com restrições da operadora da rede.

Por isso, os objetivos deste trabalho de mestrado são:

- Utilização de uma medida de flexibilidade baseada em curvas de energia acumulada máxima e mínima, que deverão:
 1. ter em conta as características (limitações) físicas dos equipamentos bem como as condições impostas pelos utilizadores;
 2. traduzir a medida da flexibilidade numa forma que seja adequada ao *DSO* (*Distribution System Operator*) poder tomar decisões sobre a utilização desta flexibilidade.
- Utilização da flexibilidade como reação a determinadas condicionantes (diminuição de custos para o utilizador, redução da potência pico da habitação).
- Utilização da flexibilidade por pedido do *DSO*.

Na medida de flexibilidade utilizada são considerados dois estados: o estado de energia acumulada máxima e o estado de energia acumulada mínima, nos quais o objetivo é, respetivamente, antecipar a utilização das cargas e adiar esta utilização. No caso concreto desta dissertação, o objetivo é aplicar alterações por forma a obter estados intermédios que originem, por exemplo, o menor custo energético para o utilizador. Isto é, ao invés de antecipar ou adiar o máximo possível, é feito apenas a um nível que gere o maior benefício. Desta forma, através de simulações e da aplicação da metodologia, será criada uma curva que percorrerá uma variação alternativa dentro dos limites mínimo e máximo. O intervalo de tempo a considerar será ditado por limitações impostas pelo utilizador, e o mesmo se poderá aplicar relativamente às preferências da rede (limitação da potência disponível, por exemplo).

Para simular a flexibilidade, será utilizado um ambiente de simulação focado inicialmente num edifício, e posteriormente numa comunidade, através de *software Matlab* e do modelo de *Richardson* [12].

1.4 Descrição do Documento

O presente documento é composto por cinco capítulos (introdução, estado de arte, solução proposta, resultados e conclusão), nos quais as tabelas e figuras são representadas por uma numeração referente ao capítulo em que estão enquadradas, e uma numeração incremental adicional que identifica cada figura e tabela.

A constituição do documento é a descrita de seguida:

1. Capítulo 1 - Introdução - Refere o enquadramento histórico e motivação para a investigação e conseqüente desenvolvimento tecnológico da metodologia em causa;
2. Capítulo 2 - Estado de Arte - Faculta informação base relativa aos conceitos abordados no estudo desta dissertação, apresentando também um conjunto de aplicações comerciais desenvolvidas até hoje neste âmbito;

3. Capítulo 3 - Solução Proposta - Apresenta o procedimento efetuado para o desenvolvimento e aplicação da metodologia considerada, fazendo referência aos algoritmos genéticos e definindo a função objetivo utilizada por estes na situação concreta deste trabalho. Refere também detalhes relativos às condições e indicadores a simular, e apresenta a aplicação desenvolvida para representação das simulações efetuadas.
4. Capítulo 4 - Resultados - Representa o conjunto de dados extraídos das simulações dos cenários considerados nos indicadores selecionados, efetuando também uma comparação destes resultados.
5. Capítulo 5 - Conclusão - Conclui acerca dos resultados obtidos, apresentando análises e consequências da aplicação da metodologia desenvolvida. Inclui também um conjunto de sugestões relativamente ao trabalho futuro na investigação e desenvolvimento deste tema.

ESTADO DE ARTE

Tendo em conta o enquadramento deste trabalho, é essencial ter em consideração os avanços relativos à investigação e à tecnologia atuais. É relevante a existência de estudos nas várias áreas englobadas, por forma a ter informação consistente para o desenvolvimento do algoritmo, seja, por exemplo, em termos de valores de consumo energético habituais, ou na capacidade de comunicação de tomadas que possibilite a automatização dos equipamentos.

Constitui objetivo da União Europeia de Energia atualmente garantir energia segura, sustentável, competitiva e acessível aos consumidores e desenvolver a investigação e inovação por forma a melhorar a qualidade do ambiente e promover, através da eficiência energética, uma utilização mais consciente da energia [13]. Para isso, foram estipuladas medidas, através das diretivas Energy Performance of Buildings Directive 2010/31/EU e Energy Efficiency Directive 2012/27/EU, que promovem um ambiente estável para investimentos, aumentam a consciencialização de consumidores na sua tomada de decisão em poupança tanto de energia como de dinheiro, para alcançar em 2050 um conjunto de edifícios energeticamente eficientes e descarbonizados [6]. Nesse sentido, também a legislação tem vindo a ser adaptada com frequência no sentido da sustentabilidade, pelo que é necessário, para a compreensão do remanescente da presente dissertação, conhecer alguns conceitos e as suas definições oficiais, assim como as normas descritas pelo Direito da União Europeia.

Os conceitos necessários à compreensão dos capítulos seguintes serão abordados nas secções 2.1 a 2.3. Nas secções 2.1 e 2.2 são definidas as noções de *nZEB* (*nearly zero energy building*) e de flexibilidade energética. Na secção 2.1.1, introduz-se o conceito de *prosumer*, um consumidor que tanto consome energia da rede de distribuição como a produz e exporta. Na secção 2.3 é descrito o funcionamento geral da monitorização não intrusiva de cargas, assim como os seus benefícios. Estas secções apresentam conceitos que fazem

parte do contexto em que se insere o algoritmo, visto que, para se poder considerar uma habitação com produção fotovoltaica, é importante conhecer a existência de *prosumers* e, para compreender a comunicação entre as cargas e algum tipo de gestor de energia, é essencial conhecer o conceito de monitorização não intrusiva de cargas, ainda que no contexto desta tese não tenha sido utilizado esse tipo de monitorização. A secção posterior apresenta alguns exemplos de sistemas no mercado que resolvem problemas na área de gestão de energia elétrica. Assinale-se que o sigilo associado aos negócios emergentes nesta área, nomeadamente em termos dos métodos utilizados, dificulta a recolha objetiva de informação e resultantes conclusões sobre a eficiência real da gestão realizada.

2.1 nZEB

Um edifício com necessidades quase nulas de energia, ou *nZEB* (*nearly zero energy building*), é um edifício cujo balanço energético é aproximadamente nulo. Este balanço deve-se, não só a um desempenho energético bastante eficiente, mas também à produção local ou próxima de energia através de fontes renováveis da maior parte do seu consumo [14].

Existem dois tipos de *nZEBs*, os *Autonomous Zero Energy Buildings* (*AZEBs*) e os *Net-Zero Energy Buildings* (*Net-ZEBs*). O primeiro refere-se a edifícios autónomos, ou seja, edifícios que não estão ligados à rede de distribuição, o que tem por consequência uma necessidade de maior geração e armazenamento de energia. O segundo diz respeito a edifícios ligados à rede de distribuição, que apenas utilizam essa energia nos momentos em que a geração não é suficiente, tendo no entanto, uma exportação e importação de energia da rede igual a zero num período definido - *zero Net Balance* [15].

Sendo as fontes mais utilizadas de produção com variabilidade temporal, devido à natureza variável da energia do vento e da energia solar, existem, temporalmente, discrepâncias energéticas, as quais podem originar, entre outros problemas, flutuações de tensão [16] [17] [18].

2.1.1 Prosumer

Um *prosumer* define-se como uma agregação entre produtor e consumidor, ou seja, tanto faz uso da energia da rede como partilha a sua energia com a rede [19]. Um conjunto de *prosumers* ligados à mesma alimentação pode ser considerada uma micro-rede, sendo que, também os *distributed energy resources* e cargas adjacentes podem ser vistos como uma micro-rede. [20]. Apesar de um *nZEB* ter um balanço energético aproximadamente nulo existem transferências com a rede, pelo que se este partilhar a sua energia com o exterior pode ser um *prosumer*.

O aparecimento de sistemas de divisão de *prosumers* em *clusters* (comunidades de *prosumers*) traz vantagens para os utilizadores na sua união, pois permitem tornar o mercado energético mais liberal [21] [22].

2.1.2 Comunidade *nZEB*

O conjunto de várias habitações *nZEB*, ligado a uma rede elétrica local, é denominado de *Cooperative Net Zero Energy Community (CNet-ZEC)*. Cada habitação produz a sua própria energia (*Building Produced Energy*) que disponibiliza com a comunidade inteira, originando a energia disponível da comunidade (*Community Available Energy*). Esta energia é, de seguida, distribuída pela comunidade, por forma a melhorar o aproveitamento energético total da comunidade [23]. De acordo com [15], no exemplo concreto apresentado pelo autor, comparando um único edifício sem *DSM* com um *CNet-ZEC* temos uma melhoria da *load cover factor* (percentagem de eletricidade necessária para alimentar as cargas que é produzida localmente) de 18-20% e da *supply cover factor* (percentagem de geração local que é utilizada no edifício) de 14-15% e aplicando *DSM* no primeiro caso, a melhoria continua a ser de 8-15% e 5-9%, respetivamente.

Mais concretamente, o controlo energético de uma comunidade traz benefícios em várias vertentes (segundo o estudo dos autores do artigo [7]):

- **Balaceamento de cargas:** a colaboração permite que os *nZEB* partilhem a energia renovável excedente entre outros edifícios ou baterias da comunidade, por forma a diminuir o envio de energia para a rede e conseqüente aumento do aproveitamento da energia produzida localmente (aumento da eficiência em até 45%).
- **Interação da rede:** a partilha de energia entre elementos da comunidade origina uma supressão de trocas de energia com a rede e permite controlar picos gerais ao invés de individuais, o que reduz, nalgumas circunstâncias, a limitação de potência individual existente de outra forma (aumento da eficiência em até 82%).
- **Custo económico:** as colaborações possibilitam uma redução nos custos da importação de energia da rede, visto que a importação pode ser feita de um *nZEB* para o outro até ao limite da capacidade da comunidade (aumento da eficiência em 55%).

2.2 Flexibilidade Energética

A flexibilidade energética representa a possibilidade de desviar cargas consoante determinadas condições (climáticas, requisitos do cliente e da rede de distribuição) que, por sua vez, podem ser influenciadas pela produção e consumo local. Isto é, devido a variações no consumo relativamente à produção, a flexibilidade torna possível efetuar uma coordenação mais adequada da utilização de algumas cargas com o propósito de relacionar mais eficientemente a energia consumida com a energia produzida, cumprindo os requisitos exigidos [24]. Independentemente da produção, pode utilizar-se a flexibilidade energética para outros fins, como a redução de emissões, nos quais até podem ser originadas perdas de eficiência.

Relativamente ao aproveitamento da produção fotovoltaica esta técnica torna-se mais vantajosa quando, não só a produção é local, mas também se existir alguma forma de

armazenamento energético, pois aumenta o controlo horário do consumo e a liberdade de utilização da produção energética. Existem dois tipos de flexibilidade energética, tirando ambos partido deste tipo de armazenamento. Existe uma flexibilidade mais explícita, na qual os equipamentos podem sofrer movimentos temporais diretamente, seja por um utilizador, gestor da rede de distribuição, etc [25] [26]. Além disso, existe também um tipo de flexibilidade implícita, na qual apenas são aplicadas tarifas variáveis que impactuam o desempenho energético através da influência dos clientes a consumir em determinados horários. A modificação da utilização temporal de cargas de um consumidor para benefício, por exemplo, da rede, chama-se *Demand Side Management*. O *DSM* permite, entre outros objetivos, minimizar a potência exigida à rede em picos de consumo energético, podendo assim minimizar a potência máxima da rede [27].

Na gestão de energia é necessário ter em consideração alguns dispositivos e alterações de funcionamento destes, e atuar respetivamente. Para utilizar o máximo de energia local, devem ser priorizadas as fontes de energia renovável locais. O conjunto de técnicas que tornam possível o armazenamento de energia em alturas de pouco consumo, e a utilização da energia armazenada em ocasiões nas quais a procura se torna mais elevada denomina-se *Load Matching* e é composto por uma interligação entre armazenamento energético e *DSM* [23]. Todas estas técnicas fazem uso da flexibilidade energética fornecida pelo edifício ou conjunto de edifícios.

Torna-se também essencial a comunicação entre os vários elementos de gestão da rede para uma melhor otimização do sistema, pelo que surgem vários sistemas de redução de custos, poupança de energia e balanceamento de cargas [28] [29] [30]. No entanto, nem todo o tipo de cargas são reagendáveis sem impactuar o conforto dos clientes, como luzes, microondas, televisão, etc. As cargas reagendáveis são equipamentos como máquinas de lavar, ar condicionado, etc, que possibilitam, mediante disponibilidade do cliente, o agendamento em momentos mais favoráveis, seja em termos de preço para o utilizador, seja em termos de capacidade para a rede [31].

2.2.1 Flexibilidade Agregada

A flexibilidade pode aumentar a eficiência energética, no entanto o número de cargas deslocáveis num único edifício é reduzido. Com o aumento do número de cargas deslocáveis existe um maior controlo relativamente ao aproveitamento energético destas. Por esse motivo, surge o conceito de flexibilidade agregada, na qual várias habitações são integradas como uma única. O número de cargas controláveis aumenta, pelo que os graus de liberdade na movimentação destas idem.

Na flexibilidade agregada as habitações não têm necessariamente que ser *nZEB*, o que permite uma união de cargas também em habitações com maiores consumos.

2.2.2 Metodologias para Quantificação da Flexibilidade

Para uma melhor utilização da flexibilidade é importante existir uma medição dessa própria flexibilidade, por isso existem metodologias que a caracterizam. As medidas de flexibilidade estudadas utilizam determinadas variáveis na sua caracterização através das quais é possível fazer a sua quantificação (figura 2.1):

τ (tempo) é o atraso desde a variação do preço da energia até ao efeito na procura;

Δ (potência) é a variação máxima de potência na procura após a variação do preço;

α (tempo) é o tempo que demora desde a alteração na procura até ao seu mínimo;

β (tempo) é o tempo total durante o qual a energia consumida é menor;

A (energia) é o total da diminuição da procura de energia;

B (energia) é o total do aumento da procura de energia;

A quantificação da flexibilidade pode ser feita de várias formas. No caso da figura 2.1 essa quantificação é baseada na resposta a sinais de penalidade.

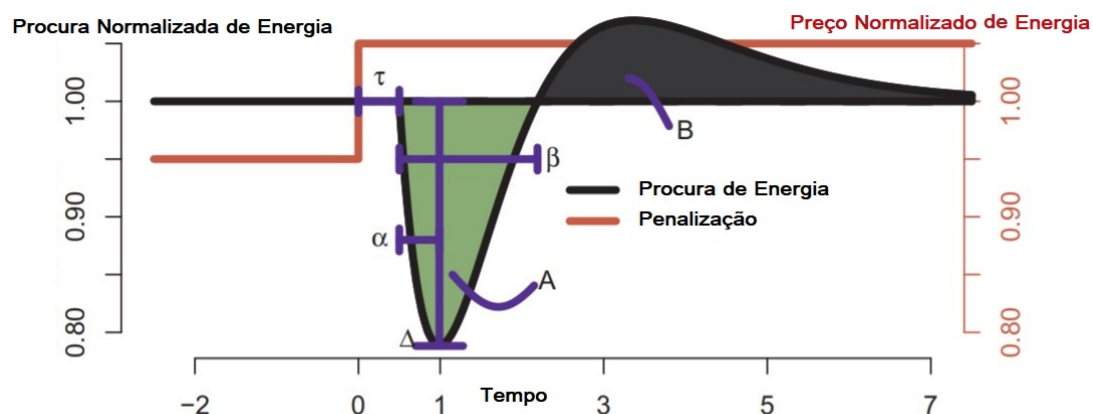


Figura 2.1: Variação da Procura Energética consoante Penalizações (Adaptado de [32]).

Sit et al. e (posteriormente) Thomas Nuytten et al. [33] desenvolveram uma metodologia que identifica a flexibilidade de um sistema como a capacidade de mover temporalmente potência elétrica, quantificando a flexibilidade de acordo com o número de horas em que é possível movimentar cargas sem ultrapassar as curvas máxima e mínima de energia (figura 2.2) [34].

A metodologia desenvolvida por De Coninck e Helsen [35] [36] permite a alteração temporal do consumo de energia de acordo com os custos associados a esse consumo através de três métodos de controlo. O primeiro método consiste em manter a temperatura interior da habitação dentro de limites confortáveis para o utilizador. O segundo e terceiro métodos são, respetivamente, a minimização e maximização do consumo de energia de determinadas cargas durante um intervalo de tempo, mantendo a temperatura interior nos limites desejados [34]. Os valores de flexibilidade e custos estão representados na figura 2.3.

A metodologia para quantificação da flexibilidade utilizada na presente dissertação é a flexibilidade quantificada pelo aumento ou diminuição de potência, combinada com o

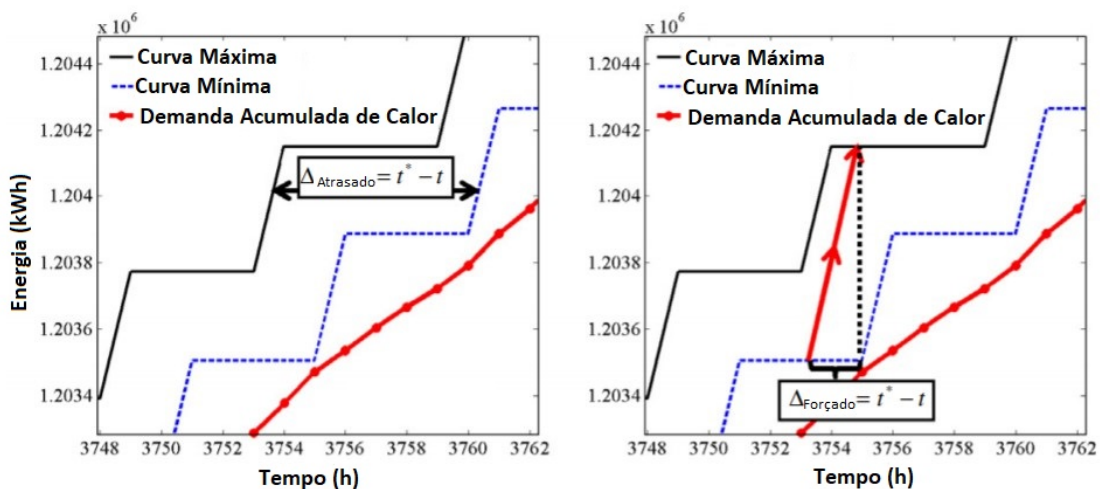


Figura 2.2: Perfis de flexibilidade (esquerda) operação atrasada; (direita) operação forçada (Traduzido de [33]).

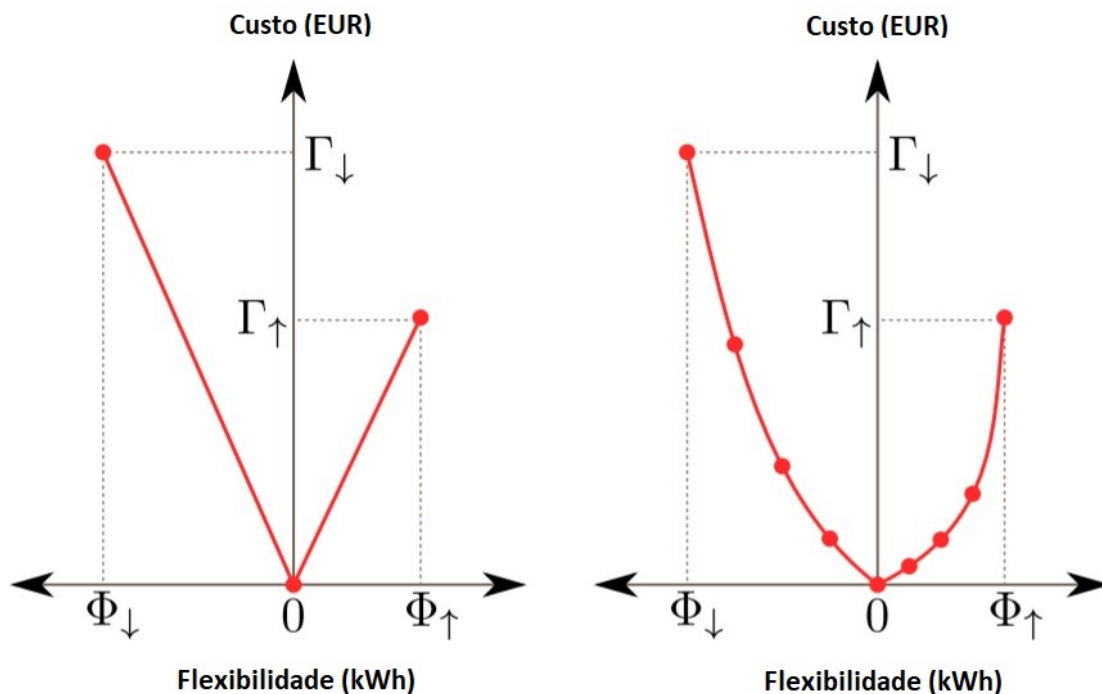


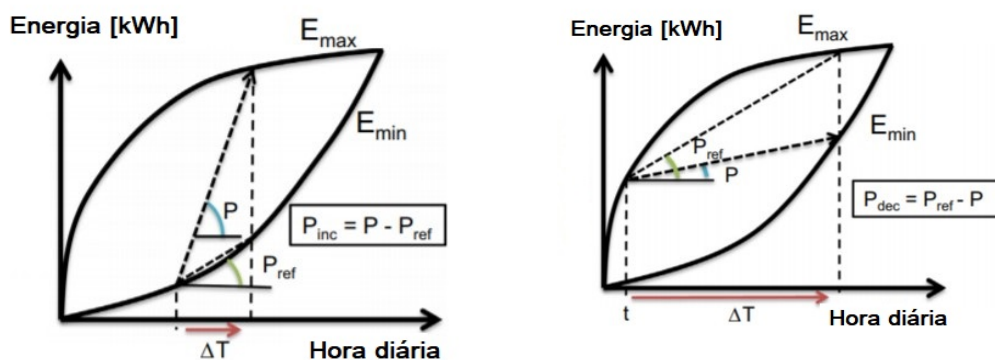
Figura 2.3: Curvas de custos sem (esquerda) e com pontos intermédios (direita) (Traduzido de [37]).

tempo em que essas alterações podem ser consideradas. Esta metodologia é visualmente intuitiva e quantifica a flexibilidade apenas dentro de limites estipulados. Neste caso, a quantificação não usa a resposta a sinais de penalidade, utilizando os consumos de energia mínima e máxima acumulada como limites.

São considerados dois perfis de consumo acumulado máximo e mínimo correspondentes, respetivamente, ao início mais antecipado e mais tardio das cargas. Estes perfis representam os extremos na alteração do sistema do estado inicial (em $t=0$) para o estado final (em $t=T_{\text{final}}$). A flexibilidade energética é expressa pela variação de potência consumida durante um intervalo de tempo ΔT . Sabendo o intervalo de tempo durante o qual se pretende efetuar o aumento, ou diminuição do consumo de energia, e a energia associada à variação, obtém-se uma potência necessária para a concretizar. No caso do aumento, por exemplo, é necessária uma potência P para alcançar o estado pretendido. Como existe uma potência de P_{ref} mantendo o consumo energético no estado anterior, o incremento de potência tem de ser $P_{\text{inc}} = P - P_{\text{ref}}$ (figura 2.4a). O inverso acontece para a situação de redução de consumo energético num determinado intervalo de tempo, sendo o decréscimo de potência de $P_{\text{dec}} = P_{\text{ref}} - P$ (figura 2.4b) [34].

A existência de flexibilidade nas cargas permite que haja controlo de determinadas condicionantes à medida que é necessário. Se a intenção for limitar potência, basta raciocinar de forma contrária e assumir uma potência máxima e mínima ao invés de um consumo acumulado máximo e mínimo. Se a intenção for limitar custos, basta relacionar os custos com o consumo energético e limitar o consumo associado ao custo máximo num intervalo de tempo, por exemplo.

O desenvolvimento da presente dissertação tem como objetivo possibilitar uma adaptação das cargas consoante especificação, ou seja, possibilitar não só uma curva intermédia entre os dois perfis exemplificados, mas também considerar várias possíveis intenções, fazendo variar diferentes fatores (potência, energia, custo energético, etc). Para efeitos de exemplificação, as variáveis utilizadas na análise de resultados serão baseadas em custos para os utilizadores.



(a) Aumento da Energia Consumida.

(b) Diminuição da Energia Consumida.

Figura 2.4: Consumo Energético (Adaptado de [38]).

2.3 Monitorização não intrusiva de cargas

A utilização de técnicas de flexibilidade permite explorar, entre outras finalidades, o aumento da eficiência energética dos edifícios através do deslocamento de cargas. No entanto, torna-se impossível deslocar cargas específicas quando não é possível identificá-las individualmente, visto que nem todas as cargas podem ser movimentadas de igual forma. Além disso, é importante ter uma boa caracterização de cada carga. Como tal, surge a necessidade de efetuar uma monitorização das várias cargas.

Esta monitorização tem que evidenciar as cargas em utilização sem perturbar o funcionamento destas, de onde surge o termo não intrusiva. A monitorização intrusiva necessita, para instalação do sistema, que todos os equipamentos estejam desligados, além de que normalmente exige um conjunto de sensores instalados nos vários equipamentos, ao invés da monitorização não intrusiva, na qual apenas é necessário um conjunto de sensores e análises junto à entrada de energia elétrica na habitação.

Na figura 2.5, é possível verificar a variação da potência ao longo do tempo, e a análise dos equipamentos em questão. A monitorização pode ser efetuada por recurso a diferentes metodologias, podendo destacar-se os algoritmos baseados em transformada-S [39], transformada de Fourier e algoritmos genéticos [40].

No desenvolvimento do projeto desta dissertação é prevista a utilização de tomadas inteligentes, sendo desnecessários algoritmos de monitorização não intrusiva de cargas. No entanto, o mesmo projeto poderia aplicar-se a uma habitação sem tomadas inteligentes, pelo que este seria o método utilizado para distinguir as várias cargas.

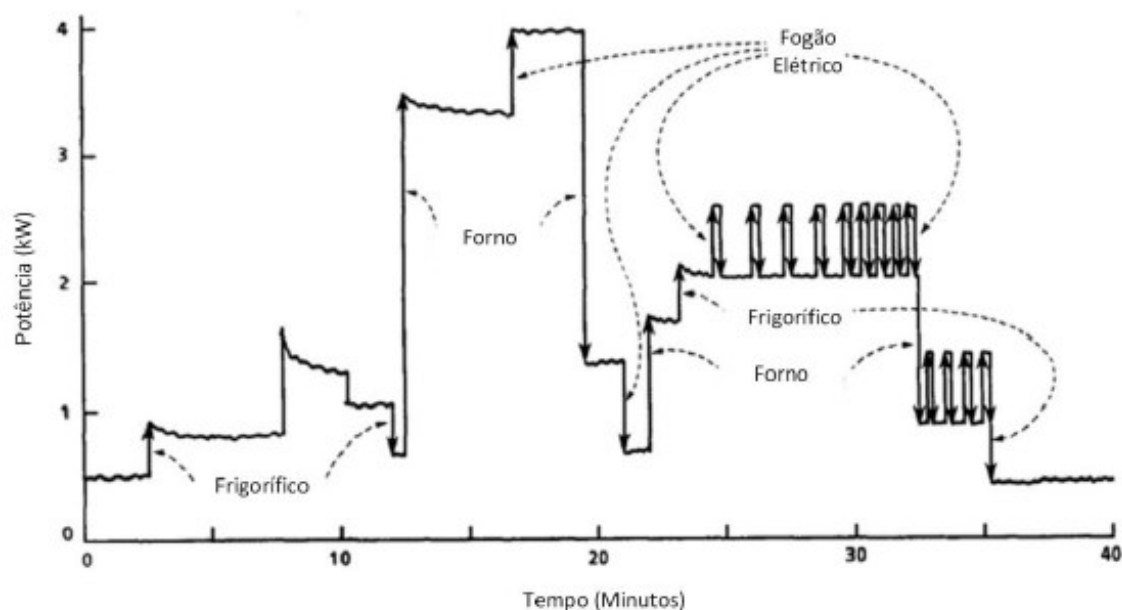


Figura 2.5: Variação da Potência Temporalmente (Retirado de [41]).

2.4 Aplicações Comerciais

O mercado acompanha também a investigação relativamente a alguma inovação na área. Não tendo sido encontrado nenhum produto com características idênticas às da presente dissertação, existem alguns produtos relevantes que trabalham alguns dos seus aspetos.

A verificação e análise do consumo energético de um edifício é possível através de determinadas aplicações, que tornam os utilizadores mais cientes da sua utilização, e permite uma redução de custos dependente da ação manual dos utilizadores. Algumas aplicações investigadas são *Discovergy* [42], *Electric Kiwi* [43], *Fresh Energy* [44], *Greenely* [45], *Lichtblick* [46] e *Redback Energy* [47].

Outras aplicações tornam possível, não só a verificação de informação relativa à sua utilização energética, mas tendo uma conexão a equipamentos, permitem que o utilizador os ligue ou desligue pela aplicação de acordo com o seu interesse. As vantagens não só são a simplicidade, como também podem estar relacionadas com a alteração de funcionamento do sistema à distância. Alguns destes casos são *Cside* [48], *Energycurb* [49] e *edp re:dy* [50]. As aplicações que permitem a utilização de um plano flexível permitem uma redução no custo do consumo energético calculada através de algoritmos. Dentro deste conjunto, existem sistemas dependentes do utilizador e sistemas automáticos. No primeiro caso incluem-se os sistemas nos quais o utilizador decide quando prefere utilizar o plano automático ou o manual. Neste caso, temos os sistemas *Ecoisme* [51] e *Wattcost* [52].

No segundo caso os sistemas são automáticos, podendo ter escolhas do utilizador que influenciarão os algoritmos. O automatismo pode aumentar a eficiência não só no lado do utilizador, mas também na rede. Sistemas com estas características são *SolarWatt* [53], *EasyOptimize* [54] e *Smappee* [55].

Apenas os algoritmos de plano flexível aplicam a flexibilidade para proporcionar uma melhoria na eficiência energética. No entanto, mesmo estes algoritmos podem ser aprimorados pois têm focos em áreas muito concretas, sendo o objetivo da presente dissertação utilizar a flexibilidade para lidar com variadas áreas.

Em termos nacionais a única aplicação existente é a *edp re:dy*, que mostra aos seus utilizadores os seus consumos energéticos ao longo do dia, permite controlar os equipamentos da habitação à distância e otimiza a potência por forma a garantir energia continuamente (não ultrapassando a potência contratada). Sendo a metodologia da presente dissertação um complemento interessante a esta aplicação, participou-se no concurso *EDP University Challenge* com o objetivo de incorporar a metodologia desenvolvida na aplicação. Este complemento ganhou o 1º lugar nacional do concurso e ficou no top 3 internacional, pelo que se confirma o seu valor no mercado.

SOLUÇÃO PROPOSTA

3.1 Metodologia

A metodologia do estudo considerada baseou-se num conjunto de passos iniciados por uma análise de dados a simulações tanto de consumo como de produção energética para as várias habitações (figura 3.1).

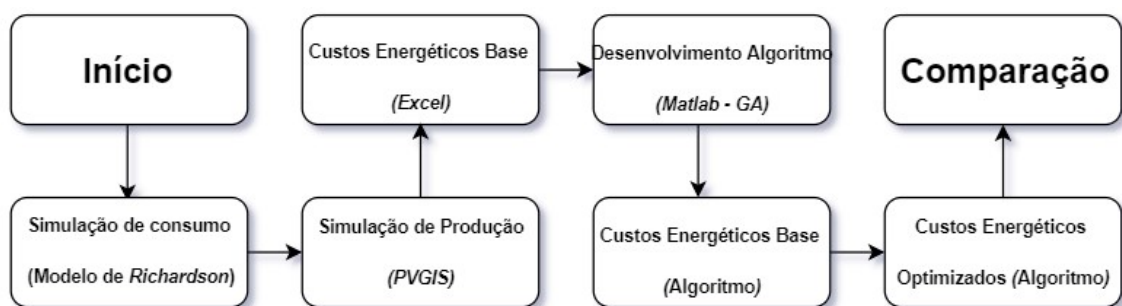


Figura 3.1: Fluxograma da metodologia do estudo efetuado para desenvolvimento do algoritmo.

Procedeu-se a um cálculo de custos base, relativos ao custo energético obtido nas várias situações, considerando o consumo e a produção simulados, através de *Excel*.

O desenvolvimento do algoritmo foi efetuado posteriormente, através do *software Matlab* e de bibliotecas baseadas em algoritmos genéticos. Para fazer a verificação do algoritmo em questão, fez-se um teste de custos com o algoritmo desenvolvido, excluindo a otimização criada, por forma a comparar custos com os obtidos previamente pelo *Excel*.

Após confirmação de resultados, aplicou-se o algoritmo de otimização às várias habitações, e efetuou-se uma comparação de custos energéticos.

Este capítulo descreverá em maior detalhe a informação prévia considerada e os vários passos relativos à seleção de dados e simulações realizadas, apresentando os custos

energéticos obtidos antes da aplicação do algoritmo.

3.1.1 Foco

O foco do algoritmo desta dissertação está nos equipamentos domésticos com possibilidade de deslocamento temporal existentes numa comunidade *nZEB* com flexibilidade, sem armazenamento energético.

No entanto, considera-se também como opção a inexistência de comunidade energética por forma a tornar o algoritmo mais generalizável e os resultados mais informativos. Os resultados de ambas as vertentes podem permitir aos utilizadores tomar decisões relativamente a uma posterior união em comunidade energética.

3.1.2 Simulação de Dados

3.1.2.1 Simulação de Consumo

A seleção dos dados a utilizar fez-se utilizando o método de *Richardson*, através do qual foi possível criar uma base de dados variada com toda a informação relativa à simulação de consumos necessária à aplicação do algoritmo desenvolvido. A simulação feita origina consumos de determinado tipo de habitações consoante a ocupação, o mês a considerar e o dia da semana (dia de semana ou fim de semana).

A base de dados escolhida contém uma comunidade com doze habitações com diferentes características (tabela 3.1) relativamente à ocupação e às máquinas existentes e a simulação foi efetuada utilizando as mesmas condições para todos os meses, em modo de dia de semana.

Cada uma das habitações simuladas contém um conjunto de máquinas cuja utilização pode ser controlada pelo algoritmo desenvolvido.

Estas máquinas estão organizadas consoante o seu consumo, tendo sido codificadas de 1 a 4 de acordo com a tabela 3.2. Foi necessário identificar o consumo de cada tipo de máquina para posteriormente retirar esse perfil de consumo aos vários minutos durante os quais a máquina trabalhava na simulação, e adicionar aos minutos durante os quais passa a trabalhar no caso otimizado. Apenas desta forma é possível verificar o impacto da potência instantânea consumida e conseqüentemente o custo (ou outro resultado a analisar) associado a esse consumo, antes e depois da otimização.

Aferiu-se que o mesmo tipo de máquina chegou a ter comportamentos diferentes, verificados no resultante do modelo de *Richardson*, pelo que as variações foram tidas em conta na análise do consumo energético de cada uma. A potência de algumas das máquinas nos primeiros minutos do dia pode ser visível na tabela 3.3, de onde se retira um funcionamento diferente para máquinas com o mesmo código para habitações distintas. Os valores a considerar para a potência de cada carga tiveram então de ser adaptados não só consoante o seu código, mas também à habitação associada a esta carga. Na tabela 3.3 Min representa os minutos diários a que a potência se refere, MLL significa Máquina de Lavar

Tabela 3.1: Características das habitações simuladas.

Tipo de Habitação	Nº de Residentes	Máquinas
1	5	2,3
2	5	3,4,1,3,3
3	2	4
4	3	3,1,3
5	4	2
6	2	3
7	3	3,3
8	4	3,2
9	5	3
10	5	2
11	2	2,3,2
12	1	1,3

Tabela 3.2: Tipos de máquinas consideradas.

Código	Tipo de Máquina
1	Máquina de Lavar Loiça
2	Máquina de Secar
3	Máquina de Lavar Roupa
4	Máquina de Lavar e Secar Roupa

Loiça, MS significa Máquina de Secar, MLR significa Máquina de Lavar Roupa e MLSR significa Máquina de Lavar e Secar Roupa, pelo que a numeração adicional representa outras máquinas do mesmo tipo em habitações diferentes.

Tabela 3.3: Potência nos primeiros minutos de funcionamento para algumas das máquinas utilizadas.

Min	MLL1(W)	MS1(W)	MLR(W)	MLSR(W)	MLL2(W)	MLL3(W)	MS2(W)	MS3(W)
1	2532	2494	73	73	1161	1082	2690	2555
2	2532	2494	73	73	1161	1082	2690	2555
3	2532	2494	73	73	1161	1082	2690	2555
4	2532	2494	73	73	1161	1082	2690	2555
5	2532	2494	73	73	1161	1082	2690	2555
6	2532	2494	73	73	1161	1082	2690	2555
7	2532	2494	73	73	1161	1082	2690	2555
8	2532	2494	73	73	1161	1082	2690	2555
9	2532	2494	2056	2056	1161	1082	2690	2555
10	2532	2494	2056	2056	1161	1082	2690	2555

3.1.2.2 Simulação Fotovoltaica

Para cada uma das habitações, foram dimensionados painéis fotovoltaicos independentes de acordo com o consumo de cada qual ao longo de um ano, por forma a originar um conjunto de habitações com produção total anual igual ao consumo total anual. O dimensionamento dos painéis desta forma garante um balanço energético anual nulo, ou seja, origina *nZEB*.

A localização tida em conta foi Évora (coordenadas 38°33'57.6"N 7°54'03.6"W) e o ano 2016. Para calcular a potência pico necessária para cada uma das habitações obteve-se primeiro o seu consumo anual. Sendo a produção anual necessária idêntica ao consumo, auferiu-se a produção anual de um painel fotovoltaico de 1kWp e fez-se uma regra de três simples entre a produção anual necessária e os valores correspondentes ao painel fotovoltaico, o que resultou na potência pico necessária.

No entanto, após simulação dos painéis resultantes, verificou-se uma margem relativa à produção, visto que seria possível reduzir a potência instalada e ainda cumprir com o consumo anual da habitação. Por isso, foi tida em conta a comunidade por forma a aproximar a diferença de consumo-produção da comunidade inteira a zero.

Por fim, obteve-se a tabela 3.4, relativa à potência pico a instalar.

Tabela 3.4: Potência pico instalada para cada habitação.

Tipo de Habitação	Potência Pico Instalada (kWp)
1	3,4
2	3,8
3	2,9
4	2,4
5	2,7
6	2,5
7	2,5
8	2,5
9	2,8
10	2,8
11	2,0
12	1,5

3.1.2.3 Custo Energético

Após obter os consumos e produções diárias para as várias habitações tornou-se possível apurar o excesso e escassez energética para cada minuto diário, visto que, apesar de a produção e o consumo energético anual serem iguais, ao longo do ano e mesmo de um dia normalmente a produção e consumo energéticos não se igualam.

Para simular os custos em energia associados a cada habitação, foi escolhida uma tarifa bi-horária, sendo que esta tarifa permite uma valorização de determinadas horas

superior à tarifa simples, evitando porém a complexidade da tarifa tri-horária. Também com o intuito de simplificar os custos ao longo do ano, e porque os dados extraídos da simulação de consumos diziam respeito a dias de semana, foi escolhida a opção de ciclo diário - Hora Legal de Verão e Inverno (figura 3.2).



Figura 3.2: Opções de tarifas bi-horárias (Retirado de [56]).

Como tal, foram considerados preços para uma potência contratada de 6,9kVA, selecionada como valor médio de acordo com os equipamentos existentes nas habitações [57]. Os tarifários consultados foram os da EDP para clientes com solução de energia solar, como pode ser visível na figura 3.3. Para uma potência contratada de 6,9kVA, o custo no vazio é de 0,1012€/kWh e fora do vazio é de 0,1883€/kWh.

Além do preço de compra da energia, existe o preço de venda da mesma. Este preço é considerado sempre que a produção seja superior ao consumo, no entanto é inferior ao custo da compra, pelo que é útil reduzir a compra e a venda de energia. Existe uma variação do preço de venda para cada mês de cada ano. Visto que o ano cuja produção foi utilizada foi 2016, este foi o ano selecionado para aplicação da venda de energia.

O preço médio diário apresenta-se na tabela 3.5, sendo o preço de venda calculado através da multiplicação do preço médio diário por 0.9, de acordo com o Decreto-Lei n.º 153/2014 [60].

ELETRICIDADE - TARIFA BI-HORÁRIA

POTÊNCIA CONTRATADA (kVA)	DESCONTO SOBRE O PREÇO EDP COMERCIAL	PREÇO COM DESCONTO		
		POTÊNCIA (€/dia)	FORA DE VAZIO (€/kWh)	VAZIO (€/kWh)
3,45	0%	0,2409	0,1875	0,1008
4,6	0%	0,2953	0,1881	0,1011
5,75	0%	0,3492	0,1882	0,1012
6,9	0%	0,4031	0,1883	0,1012
10,35	0%	0,5632	0,1879	0,1010
13,8	0%	0,7267	0,1886	0,1014
17,25	0%	0,8881	0,1900	0,1015
20,7	0%	1,0524	0,1906	0,1018

Figura 3.3: Opções de tarifas bi-horárias para cada potência contratada (Retirado de [58]).

Tabela 3.5: Preços médios de mercado e preço de venda associado a cada mês.

Mês	Preço Médio Diário (€/MWh) [59]	Preço Venda (€/kWh) [60]
1	27,62	0,024858
2	45,95	0,041355
3	29,46	0,026514
4	32,41	0,029169
5	13,54	0,012186
6	37,07	0,033363
7	43,19	0,038871
8	43,12	0,038808
9	42,62	0,038358
10	44,01	0,039609
11	50,13	0,045117
12	64,31	0,057879

3.1.2.4 Pre-otimização

Na situação original, antes de aplicar qualquer tipo de otimização, é possível verificar pela figura 3.4 o funcionamento de duas máquinas quase de seguida e antes do pico de produção fotovoltaica. O início de funcionamento de cada máquina está representado através de segmentos de reta verticais. Na imagem b) verifica-se que a energia relativa às cargas deslocáveis é consumida quase instantaneamente por volta do minuto 600 do dia, no momento em que as máquinas são ligadas, ultrapassando a produção fotovoltaica. Após o fim do seu programa, a produção fotovoltaica excede o consumo energético, pelo que não é consumida pela habitação.

O funcionamento mais desfasado e numa altura mais adequada durante o dia permitiria um melhor aproveitamento da produção fotovoltaica e conseqüente menor custo para um mesmo consumo. Os custos associados ao funcionamento original simulado para as doze habitações podem ser visualizáveis na tabela 3.6.

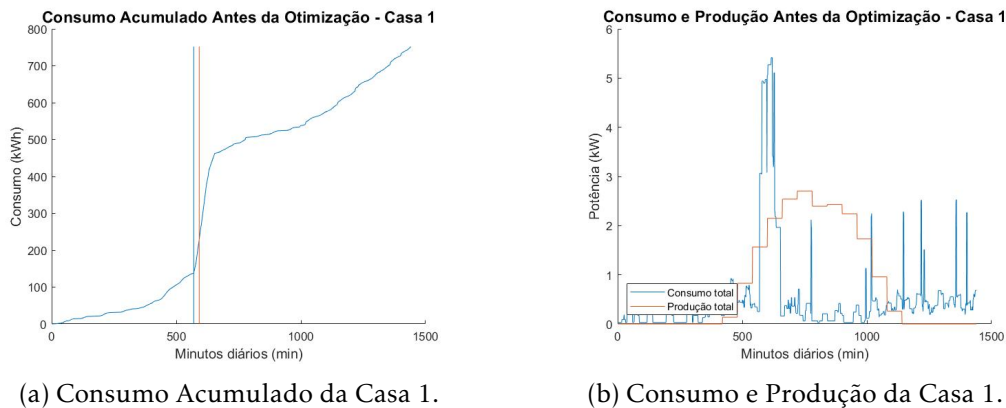


Figura 3.4: Impacto das máquinas no consumo da casa 1.

Tabela 3.6: Custos diários associados a cada habitação.

Tipo de Habitação	Custo (€/dia)
1	0,624
2	0,623
3	0,225
4	1,199
5	0,414
6	0,508
7	0,579
8	0,985
9	0,825
10	0,778
11	1,676
12	0,900

3.2 Algoritmos Genéticos

Tendo como objetivo otimizar a utilização das cargas controláveis de acordo com determinadas condicionantes (redução de custo ou diminuição de potência), o algoritmo genético apresenta-se como uma solução notável. Possibilita a otimização de variáveis dentro de limites especificados, tem um funcionamento simples e permite a simulação de uma curva de energia consumida acumulada nas condições encontradas para a melhor solução¹.

3.2.1 Conceito de Algoritmo Genético

Os algoritmos evolutivos são algoritmos utilizados em inteligência artificial que têm em conta teorias de evolução baseadas na natureza para resolver paradigmas. A luta pela sobrevivência dos diversos seres vivos encontrada na natureza traduz este algoritmo

¹a melhor solução atingida através de um algoritmo genético nem sempre é a solução ótima, dependendo assim do número de iterações realizadas.

evolutivo. Na natureza, após reprodução, os seres vivos criam uma próxima geração tendencialmente mais apta que a anterior.

Esta verdade sobre a natureza serve de base ao algoritmo evolutivo, que visa e procura resolver problemas de complexidade computacional, através de gerações com cada vez mais capacidades. Assim, sempre que é encontrada uma melhor solução, as seguintes vão partir dessa mesma melhor, criando um ciclo de otimização.

O algoritmo genético é um dos algoritmos evolutivos mais utilizados e tem como função resolver problemas de otimização, sendo composto por um conjunto de técnicas que permitem encontrar os extremos de uma dada função, representativos da melhor solução existente.

A composição de uma população num algoritmo genético baseia-se também na composição de uma população biológica, sendo o gene a base da constituição de um cromossoma. Cada cromossoma tem associado um conjunto de genes, que na sua individualidade representam uma característica (figura 3.5). O conjunto dos cromossomas originam uma população passível de solucionar a otimização pretendida [40].

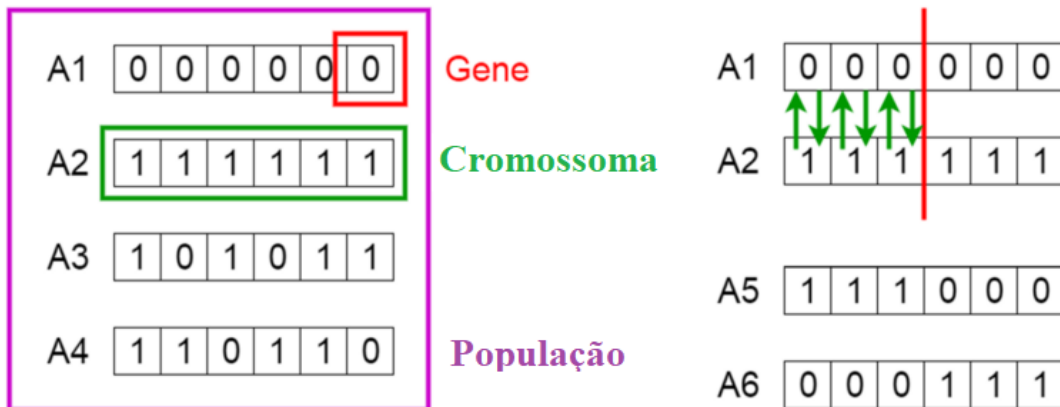


Figura 3.5: Representação de população através de cromossomas e genes (Adaptado de [61]).

As técnicas de variação genética existentes são baseadas em mecanismos evolutivos semelhantes aos existentes na natureza, tais como mutações e recombinações (também denominadas de *crossover*), presentes na seleção natural biológica. Estes procedimentos são efetuados nos indivíduos cujos valores sejam mais convenientes, ou seja, na porção da população com maior nível de pontuação (*fitness*). O nível de *fitness*, por sua vez, depende da função considerada tanto em termos de variável selecionada como objetivo a alcançar (maximizar ou minimizar essa variável). Isto é, a evolução tende a selecionar uma população mais *fit* relativamente aos parâmetros exigidos, tal como a natureza seleciona os indivíduos melhor adaptados ao meio, segundo a teoria evolutiva de Darwin [62] [63] [64].

O funcionamento de um algoritmo genético passo a passo pode ser analisado no fluxograma da figura 3.6.

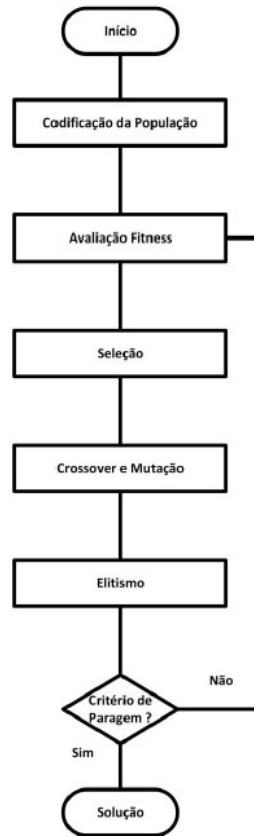


Figura 3.6: Fluxograma dos processos inerentes a um algoritmo genético (Retirado de [40]).

3.2.2 Técnicas de Variação e Seleção Genética

Os processos existentes num algoritmo genético podem ser divididos em dois tipos de processos, os de variação e os de seleção.

Nos processos de variação genética existem variações através de:

- *Crossover*: processo no qual múltiplos cromossomas são combinados por forma a gerar uma descendência com uma combinação dos genes dos pais. Na figura 3.7, considerando os genes óptimos representados a verde, torna-se possível obter um cromossoma óptimo através de dois outros cromossomas não tão adequados através do *crossover*.
- *Mutação*: esta técnica permite uma variação das características da geração seguinte relativamente à geração anterior. Isto é, através da mutação é possível alterar aleatoriamente uma característica de um cromossoma, o que pode trazer um gene relevante e inexistente nas gerações anteriores.

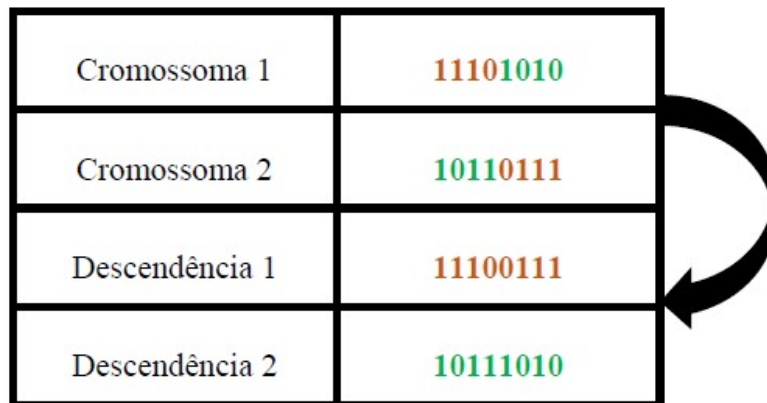


Figura 3.7: Modo de funcionamento da técnica de *crossover* (Retirado de [40]).

Nos processos de seleção genética existe:

- Avaliação *Fitness*: avaliação das pontuações de cada cromossoma relativamente ao objetivo.
- Seleção: seleção dos melhores cromossomas após análise da Avaliação *Fitness*.
- Elitismo: seleção do melhor cromossoma para se manter na geração seguinte.

Estes operadores funcionam de forma aleatória, podendo ou não gerar a solução ótima. Porém, uma determinada população inicial evolui sempre no sentido de alcançar a solução ótima, não havendo uma população final pior do que as anteriores.

Este ciclo ocorre até atingir um determinado limite estipulado, seja uma pontuação específica da população obtida ou finalização de um dado número de ciclos.

3.3 Aplicação

Após a definição de doze *nZEB* tornou-se possível avaliar as situações existentes e planear o tipo de análise mais conveniente para a verificação da redução de custos.

Para isso, foi desenvolvido um sistema em *Matlab* baseado em algoritmos genéticos que alcançasse uma redução de custos através da flexibilidade quantificada pelo aumento ou diminuição de potência (como descrito no subcapítulo 2.2.2, na página 13).

O desenvolvimento fez-se tendo em consideração uma liberdade da parte do utilizador para seleccionar os horários durante os quais as cargas têm capacidade para funcionar. Isto é, no caso de uma máquina de lavar, a hora mínima seria colocada quando estas já tivessem conteúdo no seu interior para lavar, e a hora máxima dependente da hora a que o utilizador quisesse o conteúdo lavado.

Durante este intervalo de tempo, e utilizando a flexibilidade quantificada pela potência, torna-se possível adaptar, através de algoritmos genéticos, a hora de funcionamento

das cargas de acordo com a sua potência e duração, por forma a reduzir o custo associado a esse consumo energético.

Também o *DSO (Distribution System Operator)* associado a esse utilizador tem a capacidade de alterar as cargas dentro do limite horário estipulado pelo utilizador. Nesta situação, o operador assegura a compensação monetária ao utilizador do desvio de custos da situação de menor custo à situação escolhida. Esta situação pode dar-se devido a uma limitação de potência em determinada área a determinada hora, pelo que o *DSO* comunica ao sistema o seu limite de potência e o algoritmo volta a correr nas aplicações dos clientes, alterando a hora de funcionamento das cargas deslocáveis, mas mantendo o custo associado previamente estipulado para estes.

3.3.1 Modelo Funcional

O algoritmo desenvolvido considera uma população inicial com determinados tempos de início atribuídos aleatoriamente às cargas deslocáveis associadas a cada habitação. Cada uma dessas cargas tem associada, por sua vez, um consumo de energia por cada minuto e um intervalo de tempo de funcionamento específico.

A função objetivo utilizada pelo algoritmo genético (??) é representativa do custo associado a um consumo energético em determinadas condições. Isto é, através dos tempos de início atribuídos e das características das cargas, torna-se possível calcular o custo associado ao funcionamento de cada máquina, no horário definido. Este custo é dado pela soma do consumo geral da habitação com as máquinas em funcionamento no mesmo instante, ao que se subtrai a produção fotovoltaica do momento. Tendo em conta as tarifas consideradas (explicadas no sub-capítulo 3.1.2.3), é calculado o custo (valor *fitness*) associado a esse funcionamento, o funcionamento da população inicial.

A função custo é baseada num ciclo realizado tantas vezes quantos os minutos diários, e é matematicamente representada pelas seguintes condições e equações:

$$if\ energia < 0 \quad tarifa = precoVenda$$

$$if\ energia > 0 \quad tarifa = precoCompra$$

$$preco = (energia/60000) \times tarifa + preco$$

Se o número de populações verificadas ultrapassar o número limite de ciclos, a geração final é a escolhida. O número limite de gerações é dado por $100 \times Nvar$, em que $Nvar$ representa o número de cargas consideradas (tanto pode ser o número de máquinas de uma casa, como o de uma comunidade inteira).

Caso o número de populações não ultrapasse o limite, existe um conjunto de procedimentos (descritos na página 25) que ocorrem por forma a fazer variar a geração em relação à anterior, e proporcionar uma possível melhor solução. Para isso, são criados

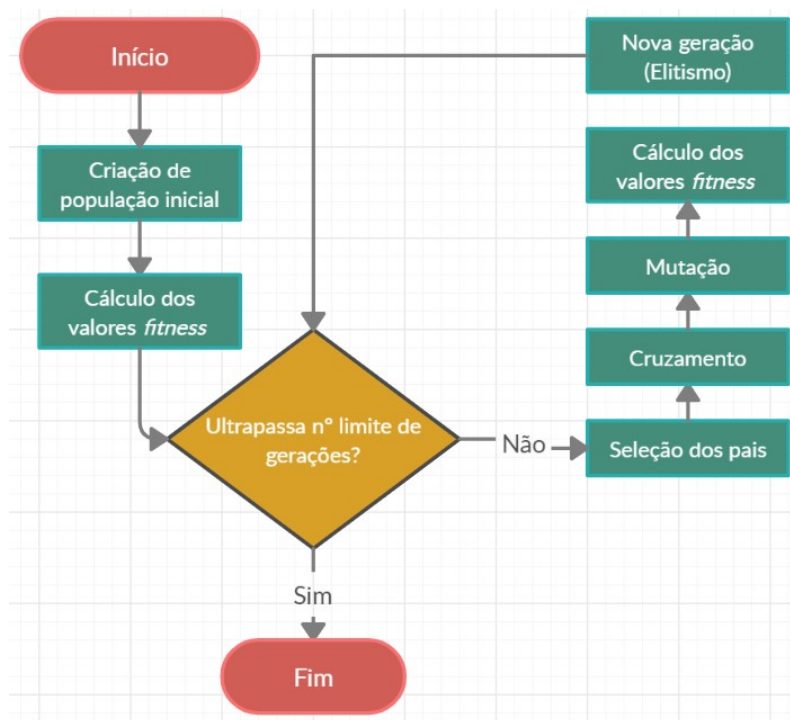


Figura 3.8: Fluxograma dos processos inerentes ao algoritmo genético desenvolvido.

novos tempos de início para cada máquina, calculados os novos custos e feitas as comparações, para garantir o menor custo possível. Este processo repete-se até ao limite ser atingido, e estar garantida a solução ótima dentro do conjunto de soluções analisadas. Da mesma forma que o algoritmo desenvolvido considera custos, podem ser consideradas quaisquer variáveis à escolha do utilizador.

O utilizador tem a possibilidade de, ao correr o algoritmo, decidir um conjunto de horas iniciais e finais para cada máquina. Quanto maior o intervalo de permissão temporal dado ao algoritmo, melhores serão os resultados. No entanto, não fazendo sentido, por exemplo, ligar uma máquina de lavar roupa sem roupa no interior, esta informação é essencial. Ao aceitar o funcionamento do sistema, recebe um *feedback* relativo às poupanças alcançadas pela alteração.

O fornecedor e/ou gestor de energia tem também a possibilidade de impor restrições, conseguindo limitar a potência máxima instantânea de uma determinada habitação durante um intervalo selecionado. Estas restrições estão limitadas aos intervalos previamente estipulados pelo utilizador, e as alterações de custo proporcionadas pela decisão do fornecedor são também cobertas ao utilizador pelo operador.

3.3.2 Protótipo Desenvolvido

O desenvolvimento de uma aplicação permite mostrar o funcionamento e benefícios práticos do algoritmo de otimização de custos, pelo que foram colocadas imagens da aplicação desenvolvida como exemplo das escolhas existentes.

A página inicial da aplicação permite visualizar os quatro tipos de cenários trabalhados, pelo que o utilizador pode escolher o tipo de cenário em que se encontra (figura 3.9).

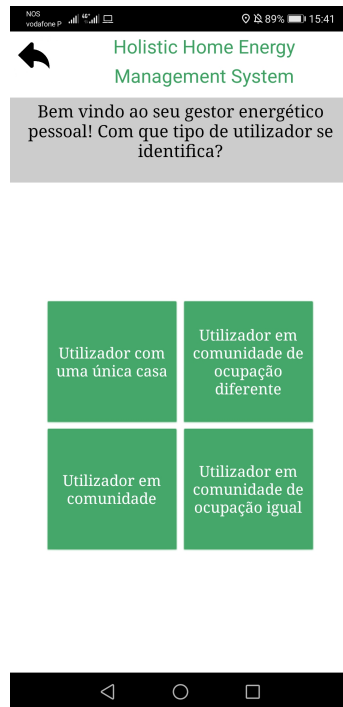


Figura 3.9: Página inicial do protótipo desenvolvido.

De acordo com o cenário, apresenta-se a representação dos consumos previstos sem aplicação de nenhuma otimização. Para o caso de um utilizador individual, existe a possibilidade de escolher entre as doze habitações trabalhadas. Na figura 3.10 visualiza-se o exemplo da casa 1.

Após a seleção de uma hora inicial e final para o conjunto de cargas deslocáveis, o utilizador clica em "Optimizar!" e obtém a redução, em percentagem, dos custos associados à deslocação temporal da hora de funcionamento dos equipamentos (figura 3.11).

O mesmo acontece para comunidades, como pode ser visualizado nas figuras 3.12 e 3.13.

Num caso real a comparação não seria feita com dados fixos de habitações concretas, visto que os utilizadores podem desconhecer o tipo de cenário em que se encontram. Esta informação teria, na realidade, de se basear nos dados anteriores de consumo dos utilizadores inscritos na aplicação. Na situação de inexistência de dados prévios, a informação seria baseada em simulações adaptadas às características da casa (equipamentos, número de utilizadores da habitação, etc).

O protótipo da aplicação é testável através de um *Browser* ou de um *smartphone* com *Android* como sistema operativo. O desenvolvimento foi efetuado na plataforma *MIT App Inventor* que, de forma intuitiva, contém todas as condições para o desenvolvimento de um protótipo completo.



Figura 3.10: Representação da energia consumida pela casa 1 antes de efetuar a otimização.



Figura 3.11: Comparação da energia consumida pela casa 1 antes e depois de efetuar a otimização.

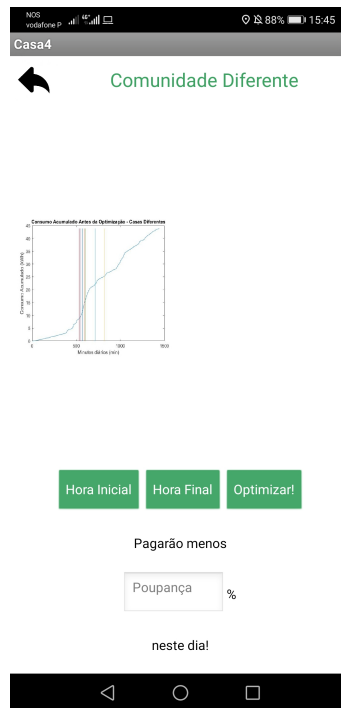


Figura 3.12: Representação da energia consumida por uma comunidade de habitações de diferente ocupação antes de efetuar a otimização.

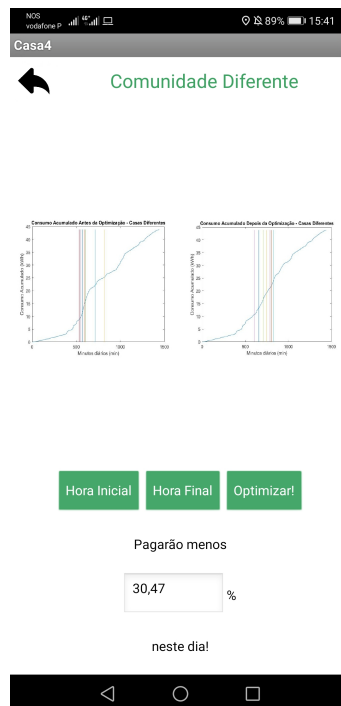


Figura 3.13: Comparação da energia consumida por uma comunidade de habitações de diferente ocupação antes e depois de efetuar a otimização.

3.3.3 Cenários

Por forma a verificar se para todos os casos era verificável uma redução de custos, foi efetuada uma análise a vários cenários diferentes.

- Cenário 1: Habitações individuais *nZEB*.
 - Neste cenário são consideradas doze habitações com agregados familiares diferentes entre elas, não existindo partilha de energia para um núcleo comum partilhado por todas elas (as habitações consideradas podem ser encontradas na tabela 3.1).
- Cenário 2: Comunidade de doze habitações.
 - Neste cenário são consideradas doze habitações com agregados familiares diferentes entre elas, existindo partilha de energia para um núcleo comum partilhado por todas elas (o conjunto de habitações unidas em comunidade podem ser encontradas na tabela 3.1).
- Cenário 3: Comunidade de habitações com agregados familiares iguais.
 - Neste cenário são consideradas quatro habitações com agregados familiares iguais, existindo partilha de energia para um núcleo comum partilhado por todas elas (o conjunto de habitações unidas nesta comunidade podem ser encontradas na tabela 3.7).

Tabela 3.7: Características das habitações com igual ocupação.

	Tipo de Habitação	Nº de Residentes	Máquinas
	1	5	2,3
–	2	5	3,4,1,3,3
	9	5	3
	10	5	2

- Cenário 4: Comunidade agregada de habitações com agregados familiares diferentes.
 - Neste cenário são consideradas quatro habitações com agregados familiares diferentes, existindo partilha de energia para um núcleo comum partilhado por todas elas (o conjunto de habitações unidas nesta comunidade podem ser encontradas na tabela 3.8). Este cenário tem como objetivo visualizar o impacto da união de habitações totalmente diferentes, visto que a comunidade geral de doze habitações engloba também alguns agregados familiares iguais.
- Cenário 5: Consequências da alteração do padrão de consumo a pedido do *DSO*.

Tabela 3.8: Características das habitações com ocupação diferente.

	Tipo de Habitação	Nº de Residentes	Máquinas
	1	5	2,3
-	3	2	4
	4	3	3,1,3
	5	4	2

- Neste cenário é considerada a otimização de uma habitação com um aviso cuja importância de cumprimento é elevada. Neste cenário, a prioridade primária é a seleção horária dos utilizadores, sendo a prioridade secundária o cumprimento das ordens do operador e apenas a prioridade terciária se foca em redução de custos. A seleção horária dos utilizadores define-se como a escolha das horas durante as quais os seus equipamentos poderão estar a funcionar, tendo um minuto inicial e final para cada um dos equipamentos, que define o momento a partir do qual ele poderá começar a funcionar e o momento máximo até ao qual ele poderá funcionar.

Neste cenário, são estipulados limites horários pelo utilizador como é hábito, no entanto, havendo um pedido do operador para garantir determinada potência de uma determinada hora, o deslocamento das cargas é efetuado por forma a cumprir o limite de horas selecionadas pelo utilizador. É feita uma compensação monetária aos utilizadores, para que estes tenham sempre os custos associados à hora ótima de funcionamento das cargas, mediante as horas disponibilizadas por eles na utilização da aplicação.

3.3.4 Indicadores

Para garantir que os resultados vão de acordo com o objetivo, torna-se necessário saber ao certo os indicadores a analisar após o desenvolvimento e aplicação do sistema.

O indicador primário selecionado neste sistema foi o custo por unidade de energia ou, comparativamente, o custo energético de cada habitação ao longo de um intervalo de tempo definido. Ou seja, quanto maior a redução de custo, maior será o impacto positivo criado pelo algoritmo². Este indicador é principalmente virado para os consumidores, pois reduzirá o valor a pagar na sua fatura mensal.

Durante o desenvolvimento do algoritmo genético foi tido em conta um indicador secundário relativo à potência máxima atingida. Apesar de não ter sido um foco primário, tornou-se visível que era possível reduzir esta potência aplicando o mesmo algoritmo genético.

Esta redução permite contratar uma potência inferior, e reduzir novamente os custos associados a um mesmo consumo energético. Aumentando o foco neste indicador, ou seja,

²Esta redução depende também da situação base considerada. Quanto maior o custo energético inicial, mais facilmente se verão melhorias.

aplicando algoritmos genéticos com foco na potência máxima, poderia ser possível obter resultados ainda melhores do que os alcançados. Relativamente a este indicador, será vantajoso para o consumidor, que poderá reduzir os custos relativos à potência a contratar, e à rede de distribuição, que poderá reduzir a potência máxima de uma habitação.

RESULTADOS

Após a aplicação do algoritmo em todos os cenários efetuou-se a comparação e respetiva análise dos resultados. Estes resultados dizem respeito ao custo energético de um dia típico de semana para os utilizadores da situação base e da situação otimizada, sendo o custo o indicador principal selecionado para análise do algoritmo.

No entanto, tendo sido verificadas alterações na potência máxima, fez-se também uma análise aos resultados relativos à potência máxima diária de cada habitação e/ou conjunto de habitações, visto que a redução de potência a contratar permite uma redução de custos adicional.

Este capítulo está dividido nos vários cenários analisados e correspondentes indicadores, em que cada cenário representa o tipo de habitação considerada, e os indicadores analisados são o custo energético e a potência máxima. No fim do capítulo efetua-se uma análise global de todos os cenários e indicadores selecionados.

4.1 Cenário 1

O cenário 1 descreve um conjunto de doze habitações individualizadas cujas características são descritas na tabela 3.1 da página 21.

A análise dos resultados deste cenário tem como objetivo a verificação do impacto do algoritmo de otimização da presente dissertação numa única habitação nos indicadores respetivos (custo e potência necessária), considerando características habitacionais diferentes, como o tipo de máquinas utilizadas e o número de residentes da habitação.

4.1.1 Custo Energético

Segundo a tabela 4.1, independentemente do tipo de habitação considerada é visível uma redução de custos após aplicação do algoritmo desenvolvido.

Em termos numéricos, em todas as habitações há uma redução diária de custo que origina no seu mínimo uma poupança mensal de 0,09€ e no seu máximo 10,35€ por habitação. Em termos percentuais, tem-se uma poupança entre 0,43% e 55,22%, o que indica que nalguns casos existe uma poupança de mais de metade dos gastos em energia.

De notar que a poupança não é afetada diretamente pelo número de residentes da habitação, pois para duas habitações com o mesmo número de residentes (habitação 1 e 2) a poupança após otimização é consideravelmente distinta. Para o primeiro caso tem-se uma poupança de 55,22% e no segundo a poupança é apenas de 5,87%. Isto deve-se ao facto de o número de máquinas e de vezes em que estas trabalham durante o dia variar.

Tabela 4.1: Custos diários associados a cada habitação antes e depois da otimização.

Tipo de Habitação	Custo Antes (€/dia)	Custo Depois (€/dia)
1	0,624	0,279
2	0,623	0,586
3	0,225	0,110
4	1,199	1,095
5	0,414	0,227
6	0,508	0,377
7	0,579	0,433
8	0,985	0,882
9	0,825	0,822
10	0,778	0,689
11	1,676	1,292
12	0,900	0,733

Nas figuras 4.1 e 4.2 tem-se gráficos de consumo de energia acumulada durante um dia para, respetivamente, a habitação 1 e 2. As linhas verticais dos gráficos referem-se ao início do funcionamento de cada máquina. Tendo em conta que cada máquina tem uma duração específica, é normal que durante o funcionamento de uma máquina possa haver outra em funcionamento simultâneo, independentemente de não começarem a funcionar no mesmo minuto.

A primeira habitação tem apenas duas cargas movimentáveis durante o dia, estando previamente colocadas antes da produção fotovoltaica, pelo que o aproveitamento da produção fotovoltaica é quase nulo. Após otimização aumenta-se significativamente o aproveitamento da energia produzida pois, tal como está representado na figura 4.1, o consumo é concentrado nas horas de maior produção energética.

A segunda habitação tem um maior número de cargas movimentáveis. Porém, antes da otimização estas já se encontram com um bom aproveitamento fotovoltaico, pelo que a aplicação do algoritmo pouco influencia o aproveitamento da energia produzida (figura 4.2).

Os gráficos relativos às habitações remanescentes encontram-se no apêndice da página 61.

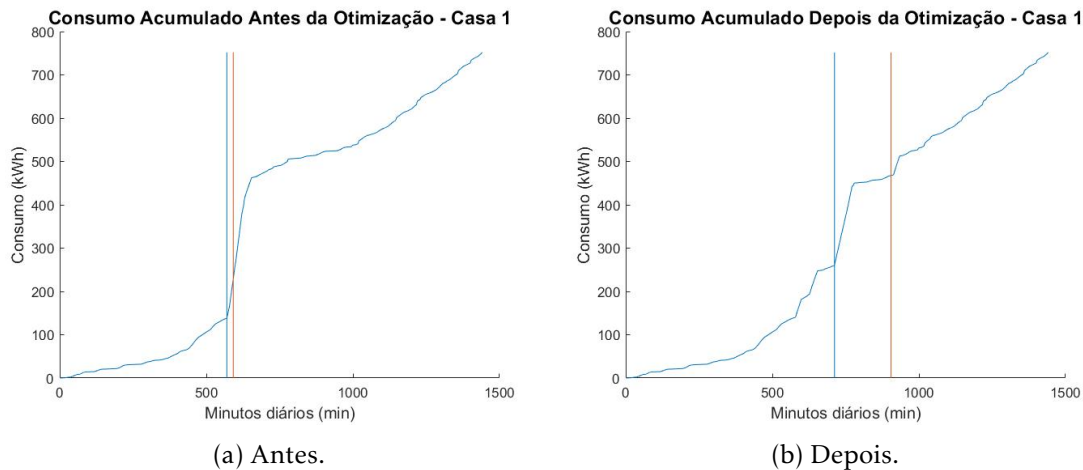


Figura 4.1: Consumo Acumulado da Casa 1 Antes e Depois da Otimização.

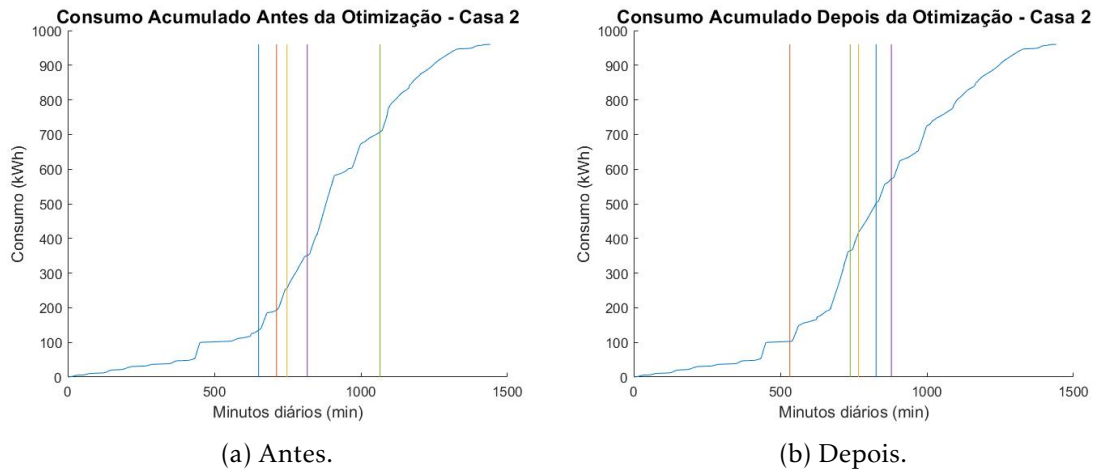


Figura 4.2: Consumo Acumulado da Casa 2 Antes e Depois da Otimização.

4.1.2 Potência Máxima

Segundo a tabela 4.2 verifica-se que, apesar de o foco da otimização ser o custo, não alterando os tempos de funcionamento das cargas para redução das potências contratadas, há, no entanto, uma melhoria nestas. Na realidade, para todas as habitações analisadas ocorre uma melhoria das potências máximas diárias.

Esta melhoria pode explicar-se por uma maior potência (mais do que uma máquina em simultâneo) geralmente não ser coberta inteiramente pela produção fotovoltaica, pelo que a sua distribuição ao longo do dia (primariamente durante o funcionamento máximo do sistema fotovoltaico e secundariamente nas alturas com menor tarifa) acaba por se tornar mais repartida e a potência máxima reduz-se.

Relativamente aos benefícios de custo da melhoria secundária causada pela otimização, estes podem ser analisados através da figura 3.3 da página 24. Nesta tabela pode ver-se as várias potências contratadas e o custo associado a elas. Para generalização do custo da energia pelas habitações, foi considerada para os cálculos do presente algoritmo

Tabela 4.2: Potências máximas associadas a cada habitação antes e depois da otimização.

Tipo de Habitação	Potência Antes (kW)	Potência Depois (kW)
1	3,496	2,529
2	4,872	2,831
3	3,223	3,221
4	9,846	2,702
5	4,013	2,491
6	2,607	2,588
7	2,532	0,760
8	3,574	2,749
9	3,358	3,357
10	4,137	4,136
11	3,358	3,071
12	3,935	2,909

uma potência contratada de 6,9kVA, no entanto a potência máxima associada ao consumo de cada habitação permite adaptar a potência contratada por forma a otimizar as habitações, a rede e reduzir custos mensais relativos à contratação de maior potência.

Selecionando as potências contratadas necessárias, de acordo com as potências máximas obtidas, encontra-se um conjunto de valores mais ajustados a cada habitação, antes e depois da otimização, como demonstrado na tabela 4.3. É verificável que, em doze habitações, e sem dar prioridade a uma redução de potência, cinco habitações apresentam uma possível diminuição da potência contratada, o que reduz diretamente o custo diário aos utilizadores. Também o distribuidor de energia beneficia pois ganha a capacidade de distribuir a potência de sobra para outros utilizadores, atrasando investimentos na rede.

Tabela 4.3: Potências Contratadas associadas a cada habitação antes e depois da otimização.

Tipo de Habitação	Potência Contratada Antes (kVA)	Potência Contratada Depois (kVA)
1	4,6	3,45
2	5,75	3,45
3	3,45	3,45
4	10,35	3,45
5	4,6	3,45
6	3,45	3,45
7	3,45	3,45
8	4,6	3,45
9	3,45	3,45
10	4,6	4,6
11	3,45	3,45
12	4,6	3,45

Concretizando as poupanças médias e máximas obtidas pela redução da potência contratada, verifica-se que a redução mais habitual é a de 4,6kVA para 3,45kVA, pelo que a poupança mais habitual é de $0,2953 - 0,2409 = 0,0544$ €/dia. A poupança máxima obtida é a da habitação 4 cujos valores são de $0,5632 - 0,2409 = 0,3223$ €/dia (tabela 4.4).

É relevante notar que, apesar de estas reduções de potência serem possíveis durante um dia típico como o analisado, este processo teria de ser efetuado para todo o ano para garantir que, no pior caso possível de produção fotovoltaica, estas potências contratadas seriam suficientes. Apenas nessa situação, poderíamos ter a redução de custos com potência contratada analisada.

Tabela 4.4: Poupança em reduções de potência contratada para cada habitação.

Tipo de Habitação	Poupança em Potência Contratada (€/dia)
1	0,0544
2	0,1083
3	0
4	0,3223
5	0,0544
6	0
7	0
8	0,0544
9	0
10	0
11	0
12	0,0544

4.2 Cenário 2

O cenário 2 descreve um conjunto de doze habitações em comunidade cujas características individuais são as mesmas do cenário anterior, descritas na tabela 3.1 da página 21.

Os resultados deste cenário permitem verificar o efeito da aplicação de uma otimização da utilização das cargas numa comunidade que, teoricamente, devido à partilha energética com um núcleo comum, já reduz por si só os custos associados ao consumo energético. Em termos de potência instantânea utilizada, o facto de estarem ou não incluídos numa comunidade tem pouca importância, visto que os graus de liberdade ganhos são utilizados no sentido de diminuir o custo por consumo ao invés de utilizar esta liberdade para reduzir a potência instantânea.

4.2.1 Custo Energético

Na tabela 4.5 é possível comparar a otimização efetuada com a situação original, numa comunidade. Na tabela comparativa 4.6 é visível que, na maioria dos casos, é mais favorável estar inserido numa comunidade em termos de redução de custos do que estar

isolado das outras habitações. Porém, existem casos representados a verde em que a sua inserção não lhes seria positiva, visto que os consumos são, em média, inferiores aos da comunidade.

Tendo em conta estes casos nota-se que, para inserir estas habitações em comunidades como esta, seria necessário fazer uma distribuição de custos não equitativa entre as habitações.

Tabela 4.5: Custos diários associados a uma comunidade antes e depois da otimização.

Organização	Custo Antes (€/dia)	Custo Depois (€/dia)
Comunidade	5,83	4,56
Média por Habitação	0,4857	0,3799

Tabela 4.6: Custos diários comparativos associados a cada habitação antes e depois da otimização.

Tipo de Habitação	Custo Antes (€/dia)	Custo Depois (€/dia)
1	0,624	0,279
2	0,623	0,586
3	0,225	0,110
4	1,199	1,095
5	0,414	0,227
6	0,508	0,377
7	0,579	0,433
8	0,985	0,882
9	0,825	0,822
10	0,778	0,689
11	1,676	1,292
12	0,900	0,733

De acordo com a figura 4.3, somando todos os custos das habitações antes e depois da otimização, verifica-se uma redução de custo de 1,811€/dia.

Juntando estas habitações numa comunidade, ou seja, por forma a partilharem recursos, tem-se, sem otimização nenhuma, uma poupança diária de 3,506€ relativa à situação de habitações individualizadas.

Considerando a situação na qual não há nem otimização nem comunidade e transforma-se numa comunidade otimizada as poupanças diárias atingem os 4,776€/dia, equivalente a 0,398€/dia de poupança média por cada habitação. Este valor só é superior ao custo individual da habitação 3, devido aos seus consumos reduzidos. Logo, esta é a única habitação prejudicada com uma possível divisão equitativa de custos.

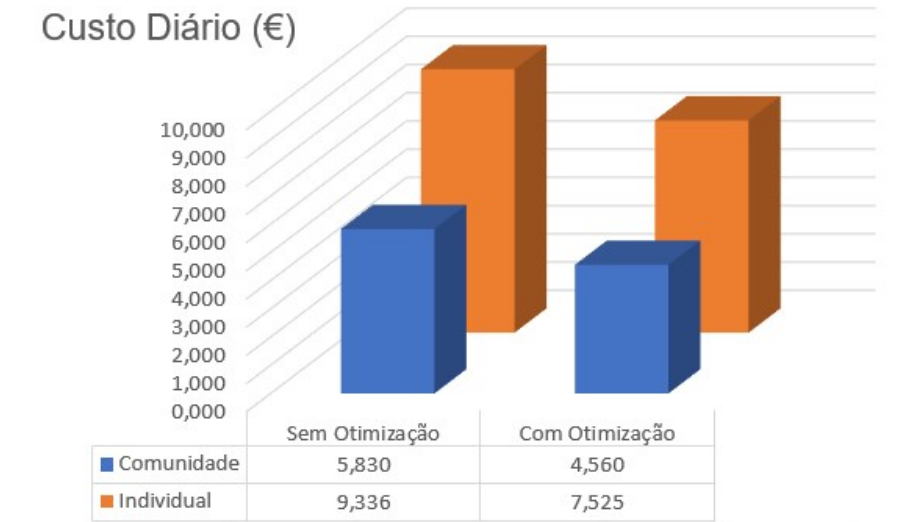


Figura 4.3: Comparação de custos entre comunidades e casas individualizadas antes e depois da otimização.

4.2.2 Potência Máxima

Na tabela 4.7 verifica-se uma otimização da potência após aplicar o algoritmo para otimização de custos para ambos os casos. Na primeira linha está representada a potência máxima alcançada por toda a comunidade, excluindo a potência correspondente à produção fotovoltaica da comunidade, pois esta não é pedida à rede. Na segunda linha representa-se o somatório de potências máximas de todas as doze habitações (tendo em conta a produção fotovoltaica individual), ou seja, representa o comportamento individual de todas as habitações ao invés do seu comportamento como comunidade. Após otimização de custo, estas têm um comportamento mais adequado relativamente às potências máximas do que considerando a comunidade toda junta. Isto pode ser explicado devido ao foco no custo, visto que os graus de liberdade numa comunidade são maiores e o consumo da comunidade acaba por se concentrar na fase de produção fotovoltaica para permitir uma redução mais eficiente de custos.

Tabela 4.7: Potências máximas associadas a uma comunidade antes e depois da otimização.

Organização	Potência Antes (kW)	Potência Depois (kW)
Comunidade	16,095	15,014
Conjunto Individual	16,098	12,278

O total da potência máxima para o conjunto individual obtém-se através dos resultados que dão origem à tabela 4.2 da página 40. Isto é, somou-se as potências das doze habitações durante um dia e retirou-se o valor máximo diário desta soma. Este processo foi efetuado para as potências correspondentes às habitações no seu estado normal e no

seu estado otimizado, sendo que o estado otimizado se obtém através da aplicação do algoritmo desenvolvido, e a soma efetua-se posteriormente. Para a situação de comunidade, torna-se necessário aplicar o algoritmo à união das habitações, pelo que o algoritmo tem de ser aplicado a todas as cargas de todas as habitações. Por isso, ao invés de somar a potência resultante das várias habitações, para calcular a potência durante um dia numa comunidade é aplicado o algoritmo a todas as cargas da comunidade, retirando a potência durante o dia, e obtendo assim o valor máximo da comunidade.

4.3 Cenário 3

Neste cenário colocaram-se habitações com a mesma ocupação, visto que teoricamente teriam um consumo semelhante (apesar de o consumo não ser sempre diretamente linear com a ocupação). Os resultados foram analisados tanto para habitações individualizadas como em termos de comunidade energética.

4.3.1 Custo Energético

Não estando numa comunidade energética, podemos verificar uma redução total de 0,474€/dia¹ (tabela 4.8). Esta redução gera um custo individual diário médio de 0,594€, o que é inferior ao custo de qualquer uma das habitações deste cenário antes da otimização, e superior a apenas uma habitação individual após otimização.

Estando numa comunidade temos uma poupança de 0,276€/dia (tabela 4.9) ao aplicar o algoritmo de otimização. Comparando a situação de inexistência de comunidade e de algoritmo com a aplicação destes, temos uma poupança de 1,053€/dia, logo uma poupança média por habitação de 0,263€/dia.

Tabela 4.8: Custos diários comparativos associados a cada habitação antes e depois da otimização, para habitações de igual ocupação.

Tipo de Habitação	Custo Antes (€/dia)	Custo Depois (€/dia)
1	0,624	0,279
2	0,623	0,586
9	0,825	0,822
10	0,778	0,689

4.3.2 Potência Máxima

Mais uma vez é possível retirar, através da tabela 4.10, uma redução de potências máximas pela utilização do algoritmo de otimização de custos, apesar de as reduções não serem muito significativas. Novamente, é de assinalar que a redução alcançada pelo conjunto de habitações individuais é ligeiramente melhor do que a alcançada pela comunidade.

¹Somando as reduções das quatro habitações.

Tabela 4.9: Custos diários associados a uma comunidade de habitações com ocupações iguais antes e depois da otimização.

Organização	Custo Antes (€/dia)	Custo Depois (€/dia)
Comunidade	2,072	1,796
Média por Habitação	0,518	0,449

Tabela 4.10: Potências máximas associadas a uma comunidade de habitações iguais antes e depois da otimização.

Organização	Potência Antes (kW)	Potência Depois (kW)
Comunidade	7,138	7,066
Conjunto Individual	7,139	7,064

4.4 Cenário 4

Neste cenário colocaram-se habitações com ocupações diferentes. A análise efetuada tem em conta tanto habitações individualizadas como unidas numa comunidade energética.

4.4.1 Custo Energético

No caso individualizado temos uma redução de 0,75€/dia (tabela 4.11). Distribuído pelas quatro habitações, o consumo otimizado é de 0,428€, valor este superior a duas das habitações, antes da otimização, devido às discrepâncias de consumo.

Mesmo após a união das habitações em comunidade, apesar de termos uma poupança significativa (0,279€/dia) (tabela 4.12), gera um custo médio individual de 0,25€/dia, ainda superior comparativamente com a habitação 3 antes da otimização.

No geral, comparando o cenário sem comunidade e otimização com a existência destes fatores, temos uma redução de custos na comunidade de 1,46€/dia. Em termos individuais esta poupança atinge uma média de 0,365€/dia.

Tabela 4.11: Custos diários comparativos associados a cada habitação antes e depois da otimização, para habitações de diferente ocupação.

Tipo de Habitação	Custo Antes (€/dia)	Custo Depois (€/dia)
1	0,624	0,279
3	0,225	0,110
4	1,199	1,095
5	0,414	0,227

Tabela 4.12: Custos diários associados a uma comunidade de habitações com ocupações diferentes antes e depois da otimização.

Organização	Custo Antes (€/dia)	Custo Depois (€/dia)
Comunidade	1,280	1,001
Média por Habitação	0,320	0,250

4.4.2 Potência Máxima

Curiosamente, segundo a tabela 4.13 é verificável que em qualquer um dos casos (comunidade ou conjunto individual) não existem melhorias após otimização de custos. Tal pode acontecer por as potências instantâneas já serem consideravelmente baixas, isto é, estarem bem distribuídas ao longo do dia, ou pelo facto de o custo mais reduzido ser atingido com uma distribuição de potências semelhante ao inicial.

Tabela 4.13: Potências máximas associadas a uma comunidade de habitações diferentes antes e depois da otimização.

Organização	Potência Antes (kW)	Potência Depois (kW)
Comunidade	9,554	9,554
Conjunto Individual	2,388	2,388

Através da figura 4.4 é possível verificar que a razão é a segunda, sendo que a alteração pelo algoritmo de otimização é pouca, no entanto esta pequena alteração proporciona uma alteração de custos relevante.

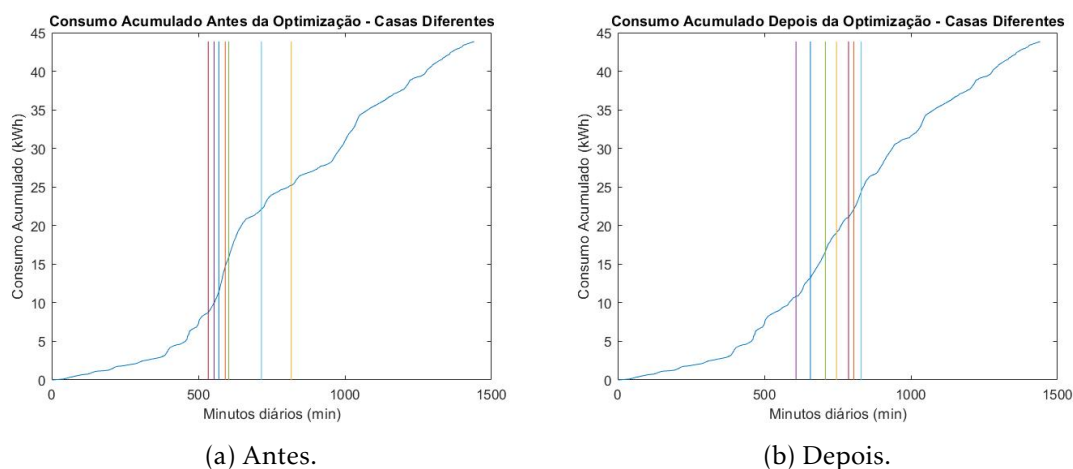


Figura 4.4: Consumo Acumulado de Comunidade de Habitações Diferentes Antes e Depois da Otimização.

4.5 Cenário 5

O cenário 5 retrata a situação na qual a operadora da rede tem problemas ou, pelo menos, beneficia de um ajuste de potências disponíveis. Devido a este benefício, impõe uma limitação de potência a um conjunto de habitações durante um determinado intervalo de tempo.

Para exemplificar o comportamento neste cenário, representou-se a produção e consumo energéticos para uma potência limite de 3000W entre os 1000 e os 1300 minutos (algures entre as 16:40 e as 21:40), ao que se obteve o gráfico da figura 4.5.

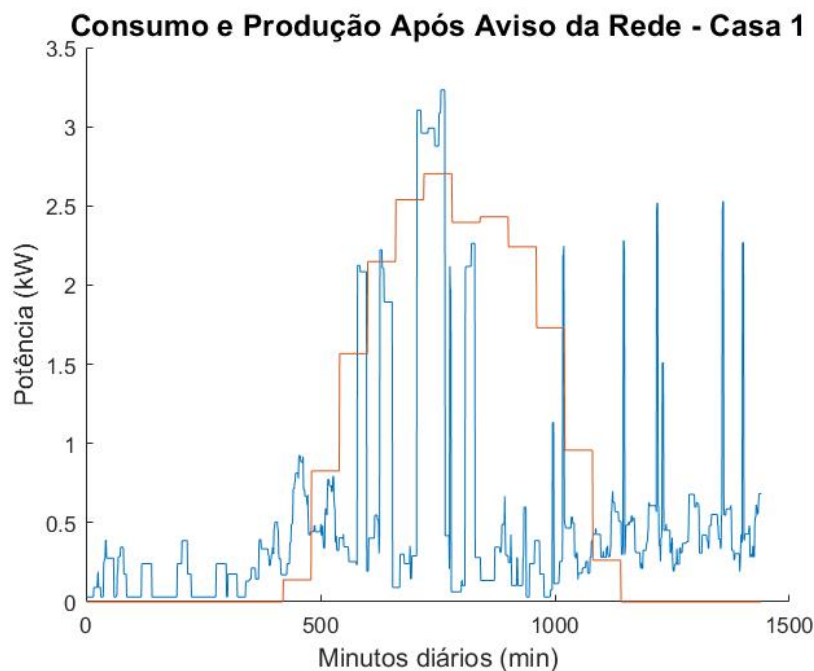


Figura 4.5: Consumo e produção da casa 1 após ajuste de potência máxima, a pedido do DSO.

Nesta figura é possível verificar que as cargas se adaptam por forma a impedir o consumo instantâneo superior ao limite durante o intervalo estipulado. Como consequência, o custo também se altera, totalizando 0,284€ num dia, ao invés dos 0,624€ antes da otimização e 0,279€ no estado ótimo de otimização obtido anteriormente.

Como tal, a rede teria de compensar a diferença de custo do estado ótimo para o estado pós alerta ($0,284€ - 0,279€ = 0,005€$), por forma a não causar incómodos para os utilizadores.

4.6 Comparação de Resultados

Em termos de indicadores, fazendo um foco no indicador primário do exemplo selecionado para esta tese, têm-se variações nos benefícios existentes em função do número de máquinas presentes em cada habitação. O aumento do número de máquinas permite uma

maior variação horária. Porém, a existência de muitas cargas implica que algumas destas estejam, normalmente, com o seu funcionamento numa altura adequada, pelo que nestas situações a melhoria pode não ser tão visível. Ao mesmo tempo, para impedir consumos instantâneos excessivos, torna-se mais difícil distribuir um número maior de máquinas de forma eficiente.

Por outro lado, as poupanças obtidas dependem não só do resultado final da otimização (ou seja, da sua proximidade à solução ótima), mas também da situação inicial considerada. Numa situação inicial de consumo energético durante horas caras e sem produção fotovoltaica, a melhoria seria mais visível do que numa situação base em que as máquinas funcionassem em simultâneo com painéis solares.

Sendo as cargas movimentáveis uma percentagem muito elevada dos consumos energéticos da habitação, nos casos em que apenas existe um número reduzido de cargas e estas estão temporalmente mal posicionadas, torna-se possível deslocá-las de forma eficaz e reduzir assim os custos com os consumos para praticamente metade, como se pôde ver nas habitações 1, 3 e 5. No exemplo da habitação 9 verificou-se que o estado inicial já era consideravelmente bom, visto que a máquina existente funcionava durante uma fase de produção fotovoltaica intensa, pelo que as melhorias eram praticamente inexistentes.

- O total poupado no primeiro cenário através da redução de custo foi de 1,811€/dia = 54,33€/mês.
- O total poupado do primeiro cenário para o segundo cenário sem redução de custo foi de 105,18€/mês.
- O total poupado do primeiro cenário para o segundo cenário com redução de custo foi de 143,28€/mês.
- O total poupado no segundo cenário com redução de custo foi de 1,27€/dia = 38,1€/mês.

A união das habitações em comunidade energética permite a este conjunto de habitações uma poupança global de mais de 100€, poupando ainda mais quase 50€ aplicando o algoritmo de otimização de custos. Se os indivíduos não pretendessem unir-se numa comunidade poupariam, através da otimização de custos, mais de 50€ mensais.

Relativamente aos resultados relativos à redução da potência contratada, obteve-se uma poupança total das doze habitações de 0,648€/dia com a redução de seis potências contratadas, o que equivale a uma poupança mensal de 19,44€ a acrescer aos valores previamente obtidos (tabela 4.4 da página 41). Considerando a união das casas em comunidade, as reduções não foram tão notáveis (tabela 4.6 da página 42), não reduzindo a potência a contratar pela comunidade como um todo. Este resultado pode dever-se a uma compensação bem distribuída entre a produção e o consumo da comunidade mesmo antes da otimização, ou a uma menor redução de custos para menores potências. No entanto, um estudo neste sentido seria valorizável.

4.6. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Considerando as poupanças nas potências contratadas e utilizando a otimização de custos, obteve-se uma poupança final de:

- $54,33\text{€/mês} + 19,44\text{€/mês} = 73,77\text{€/mês}$ para habitações individualizadas;
- $38,1\text{€/mês}$ para habitações já incluídas numa comunidade;
- $143,28\text{€/mês}$ para habitações individualizadas que se juntam em comunidade.

CONCLUSÃO

A comparação de resultados torna possível tirar conclusões relativamente à aplicabilidade do sistema, como será analisado na secção 5.1. A análise destas conclusões permitirão propor continuidade de investigação em melhorias futuras no sentido de desenvolver ainda mais o sistema em vertentes ainda mais inovadoras, por exemplo, por meio de otimização de outras variáveis. A secção 5.2 foca-se, por isso, na abertura que este projeto de dissertação traz relativamente a trabalho futuro.

5.1 Síntese

O funcionamento do sistema desenvolvido tem resultados diferentes para cada cenário, o que permite tirar conclusões relativamente ao cenário no qual poderá ser melhor aplicado.

Relativamente à comunidade de habitações iguais, verifica-se que a comunidade é benéfica para todas as habitações, isto é, para todas as habitações individualmente, o custo alcançado após união em comunidade e aplicação de redução de custos é inferior ao custo prévio.

Para uma comunidade de habitações diferentes o mesmo não se verifica, havendo uma habitação que, em comunidade e após aplicação de redução de custos, ficaria prejudicada (pagaria mais) em comparação com o seu estado anterior.

Este estudo mostra que, se a comunidade for construída tendo em conta o número de habitantes e de máquinas incluídas, o aproveitamento é muito superior do que numa comunidade mais variável. Numa comunidade mais distinta, para garantir que todos os intervenientes beneficiam do sistema, seria necessário adaptar os custos associados a cada habitação, por exemplo através de níveis percentuais de custo relativos ao número de habitantes e/ou cargas.

A utilização de aplicações para redução de custos associados ao consumo de energia

não só diminui os desperdícios relativos à energia produzida, como pode aumentar a consciencialização dos utilizadores ao mostrar o impacto da alteração efetuada no meio ambiente.

Através da obtenção do 1º lugar nacional e melhores 3 internacionais no âmbito do *EDP University Challenge*, comprova-se o valor e inovação da metodologia desenvolvida. A figura 5.1 apresenta o certificado obtido pela participação no concurso.



Figura 5.1: Certificado de participação no *EDP University Challenge*.

Este sistema aumenta o controlo por parte da operadora da rede elétrica, reduz os custos dos utilizadores e aumenta a sustentabilidade da utilização de energia.

5.2 Trabalho Futuro

Apesar de terem sido obtidos resultados claros quanto ao benefício da deslocação de cargas, existem determinadas condicionantes que o podem tornar mais ou menos valorizável para os utilizadores e que podem vir a ser incluídas numa versão posterior da aplicação.

O trabalho foi todo desenvolvido considerando uma opção de tarifa bi-horária num ciclo diário, pelo que num ciclo semanal (figura 3.2 da página 23) os resultados podem diferir. O mesmo se aplica a tarifas tri-horárias ou mesmo simples. Incluindo os estudos para as várias tarifas, poderia ser incluído na aplicação uma comparação entre as várias tarifas, por forma a que o utilizador pudesse alterar o seu tipo de tarifa de acordo com os resultados e poupanças associadas.

Sendo a potência um segundo nível de poupança para os utilizadores, e visto que com facilidade se reduziram potências máximas, poderia ser um foco de investigação futura a possibilidade de aplicar um algoritmo genético a ambos estes indicadores de maneira a otimizar ambos simultaneamente. Para além disso, esta investigação pode demonstrar uma menor diferença entre os resultados individuais e em comunidade relativamente às potências máximas.

O sistema foi dimensionado por forma a ser utilizado antes das vinte e quatro horas durante as quais as cargas são movimentáveis, para permitir um estudo generalizado dos próximos dias. No entanto, este sistema tem ainda mais valor se puder ser utilizado durante o próprio dia planeado, ou seja, se tiver em conta máquinas que já funcionaram, e otimizar o funcionamento de menos máquinas durante um intervalo de tempo mais curto. Tendo esta capacidade, torna-se possível que a rede relate anomalias ou limites de potência durante o dia e a o sistema se adapte utilizando os métodos de limitação de potência desenvolvidos.

Para além disto, também pode ser considerado num trabalho futuro a existência de armazenamento energético e de veículos elétricos, considerando este último como uma carga e um equipamento de armazenamento energético em simultâneo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] I. E. Agency. *World Energy Outlook 2019*. 2019, p. 810. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1787/caf32f3b-en>. URL: <https://www.oecd-ilibrary.org/content/publication/caf32f3b-en>.
- [2] RECOMENDAÇÃO (UE) 2019/786 DA COMISSÃO. Acedido em: 28-01-2020. 2019. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019H0786&from=EN>.
- [3] Eurostat. Acedido em: 14-07-2020. 2020. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Archive:Consumption_of_energy.
- [4] *Accelerating clean energy in buildings*. Acedido em: 01-10-2020. 2016. URL: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/1_en_annexe_autre_acte_part1_v9.pdf.
- [5] R. Veríssimo. “Ferramenta para estudar os impactos dos edifícios nZEB na rede de distribuição de energia elétrica”. Tese de mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2018.
- [6] *Energy performance of buildings directive*. Acedido em: 28-01-2020. 2019. URL: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/energy-performance-of-buildings/energy-performance-buildings-directive>.
- [7] P. Huang, H. Wu, G. Huang e Y. Sun. “A top-down control method of nZEBs for performance optimization at nZEB-cluster-level”. Em: 159 (jul. de 2018), pp. 891–904. DOI: 10.1016/j.energy.2018.06.199.
- [8] RECOMENDAÇÃO (UE) 2019/786 DA COMISSÃO de 8 de maio de 2019 relativa à renovação dos edifícios. Acedido em: 13-10-2020. 2019. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019H0786>.
- [9] DIRETIVA (UE) 2018/2001 DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO. Acedido em: 03-02-2020. 2018. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX:32018L2001>.
- [10] *Decreto-Lei n.º 162/2019*. Acedido em: 03-02-2020. 2019. URL: <https://dre.pt/pesquisa/-/search/125692189/details/maximized>.

- [11] S. Garshasbi, J. Kurnitski e Y. Mohammadi. “A hybrid Genetic Algorithm and Monte Carlo simulation approach to predict hourly energy consumption and generation by a cluster of Net Zero Energy Buildings”. Em: *Applied Energy* 179 (2016), pp. 626–637. ISSN: 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.033>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916309758>.
- [12] I. Richardson, M. Thomson, D. Infield e C. Clifford. “Domestic electricity use: A high-resolution energy demand model”. Em: *Energy and Buildings* 42 (out. de 2010), pp. 1878–1887. DOI: [10.1016/j.enbuild.2010.05.023](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.023).
- [13] *REGULATION (EU) 2018/1999 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL*. Acedido em: 26-10-2020. 2018. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32018R1999>.
- [14] *DIRECTIVE 2010/31/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL*. Acedido em: 28-01-2020. 2010. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2010/31/oj>.
- [15] R. M. A. Lopes. “Extending nearly Zero-Energy Buildings Load Matching Improvement to Community-Level”. Tese de doutoramento. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2017.
- [16] J. Baillieul, M. C. Caramanis e M. D. Ilic. “Control Challenges in Microgrids and the Role of Energy-Efficient Buildings”. Em: *Proceedings of the IEEE* 104 (2016), pp. 692–696. ISSN: 0018-9219.
- [17] M. Bollen, Y. Yang e F. Hassan. “Integration of Distributed Generation in the Power System”. Em: New Jersey, USA: IEEE, 2011, pp. 31–32. ISBN: 978-0-470-64337-2.
- [18] T. Nuytten, B. Claessens, K. Paredis, J. Bael e D. Six. “Flexibility of a combined heat and power system with thermal energy storage for district heating”. Em: *Applied Energy* 104 (abr. de 2013), 583–591. DOI: [10.1016/j.apenergy.2012.11.029](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.029).
- [19] S. Bellekom, M. Arentsen e K. van Gorkum. “Prosumption and the distribution and supply of electricity”. Em: 6 (2016), pp. 1–17. ISSN: 2192-0567. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13705-016-0087-7>.
- [20] M. Ruiz-Cortes, E. Gonzalez-Romera, R. Amaral-Lopes, E. Romero-Cadaval, J. Martins, M. Milanés-Montero e F. Barrero-Gonzalez. “Optimal Charge/Discharge Scheduling of Batteries in Microgrids of Prosumers”. English. Em: *IEEE Transactions on Energy Conversion* 34.1 (jan. de 2019). This work was supported in part by the Spanish Agencia Estatal de Investigaci ’ on (AEI) and in part by the Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), under Project TEC2016-77632-C3-1-R (AEI/FEDER, UE). Paper no. TEC-00288-2018. (Corresponding author: Eva Gonz ’ alez-Romera.), pp. 468–477. ISSN: 0885-8969. DOI: [10.1109/TEC.2018.2878351](https://doi.org/10.1109/TEC.2018.2878351).

- [21] D. Vergados, I. Mamounakis, P. Makris e M. Varvarigos. “Prosumer clustering into virtual microgrids for cost reduction in renewable energy trading markets”. Em: *Sustainable Energy, Grids and Networks* 7 (jul. de 2016). DOI: [10.1016/j.segan.2016.06.002](https://doi.org/10.1016/j.segan.2016.06.002).
- [22] I. Mamounakis, D. Vergados, P. Makris, M. Varvarigos e N. Doulamis. “Renewable energy prosumers clustering towards target aggregated prosumption profiles based on recursive predictions”. Em: jun. de 2017, pp. 1–6. DOI: [10.1109/PTC.2017.7981174](https://doi.org/10.1109/PTC.2017.7981174).
- [23] R. Amaral Lopes, J. Martins, D. Aelenei e C. Lima. “A cooperative net zero energy community to improve load matching”. Em: *Renewable Energy* 93 (ago. de 2016), pp. 1–13. DOI: [10.1016/j.renene.2016.02.044](https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.044).
- [24] G. Reynders, R. A. Lopes, A. Marszal-Pomianowska, D. Aelenei, J. Martins e D. Saelens. “Energy Flexible Buildings: An evaluation of definitions and quantification methodologies applied to thermal storage”. Em: 166 (2018), pp. 372–390. ISSN: 0362-1340. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.02.040>.
- [25] P. Denholm e M. Hand. “Grid flexibility and storage required to achieve very high penetration of variable renewable electricity”. Em: 39 (2011), pp. 1817–1830. ISSN: 0301-4215. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.01.019>.
- [26] R. Pereira, A. Fagundes, R. Melício, V. Mendes, J. Figueiredo, J. Martins e J. Quadrado. “A fuzzy clustering approach to a demand response model”. Em: 81 (2016), pp. 184–192. ISSN: 0142-0615. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2016.02.032>.
- [27] P. Palensky e D. Dietrich. “Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads”. Em: *Industrial Informatics, IEEE Transactions on* 7 (set. de 2011), pp. 381–388. DOI: [10.1109/TII.2011.2158841](https://doi.org/10.1109/TII.2011.2158841).
- [28] R. Zafar, A. Mahmood, S. Razzaq, W. A. e U. Naeem e K. Shehzad. “Prosumer based energy management and sharing in smart grid”. Em: 82 (2018), pp. 1675–1684. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.018>.
- [29] F. Mohamed e H. Koivo. “Online management genetic algorithms of microgrid for residential application”. English. Em: *IREC 2011, The International Renewable Energy Congress*. 2012, pp. 562–568. DOI: [10.1016/j.enconman.2012.06.010](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.06.010).
- [30] A. Mahesh e K. S. Sandhu. “A genetic algorithm based improved optimal sizing strategy for solar-wind-battery hybrid system using energy filter algorithm”. Em: *Frontiers in Energy* (2017). ISSN: 2095-1698. DOI: [10.1007/s11708-017-0484-4](https://doi.org/10.1007/s11708-017-0484-4). URL: <https://doi.org/10.1007/s11708-017-0484-4>.
- [31] Y. Chen, P. Xu, J. Gu, F. Schmidt e W. Li. “Measures to improve energy demand flexibility in buildings for demand response (DR): A review”. Em: *Energy and Buildings* 177 (ago. de 2018). DOI: [10.1016/j.enbuild.2018.08.003](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.08.003).

- [32] R. Junker, A. Ghasem Azar, R. Amaral Lopes, K. Lindberg, G. Reynders, R. Relan e H. Madsen. “Characterizing the energy flexibility of buildings and districts”. Em: *Applied Energy* 225 (set. de 2018), pp. 175–182. DOI: [10.1016/j.apenergy.2018.05.037](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.037).
- [33] T. Nuytten, B. Claessens, K. Paredis, J. Van Bael e D. Six. “Flexibility of a combined heat and power system with thermal energy storage for district heating”. Em: (2013), pp. 583–591. DOI: [10.1016/j.apenergy.2012.11.029](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.029).
- [34] R. Amaral Lopes, A. Chambel, J. Neves, D. Aelenei e J. Martins. “A Literature Review of Methodologies Used to Assess the Energy Flexibility of Buildings”. Em: *Energy Procedia* 91 (jun. de 2016), pp. 1053–1058. DOI: [10.1016/j.egypro.2016.06.274](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.274).
- [35] R. De Coninck e L. Helsen. “BOTTOM-UP QUANTIFICATION OF THE FLEXIBILITY POTENTIAL OF BUILDINGS”. eng. Em: Wurtz, E. INT BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOC-IBPSA, 2013, pp. 3250–3257.
- [36] R. De Coninck. “Grey-Box Based Optimal Control for Thermal Systems in Buildings - Unlocking Energy Efficiency and Flexibility”. Tese de doutoramento. Jun. de 2015. DOI: [10.13140/RG.2.1.4761.6166](https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4761.6166).
- [37] R. De Coninck e L. Helsen. “Quantification of flexibility in buildings by cost curves – Methodology and application”. Em: *Applied Energy* 162 (jan. de 2016), pp. 653–665. DOI: [10.1016/j.apenergy.2015.10.114](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.114).
- [38] R. D’hulst, W. Labeeuw, B. Beusen, S. Claessens, G. Deconinck e K. Vanthournout. “Demand response flexibility and flexibility potential of residential smart appliances: Experiences from large pilot test in Belgium”. Em: *Applied Energy* 155 (out. de 2015). DOI: [10.1016/j.apenergy.2015.05.101](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.05.101).
- [39] R. A. Lopes. “Monitorização não intrusiva de cargas”. Tese de mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2012.
- [40] J. Gomes. “Sistema de Monitorização não Intrusiva de Cargas”. Tese de mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2017.
- [41] N. Asa Esa, M. P. Abdullah e M. Y. Hassan. “A review disaggregation method in Non-intrusive Appliance Load Monitoring”. Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 66 (dez. de 2016), pp. 163–173. DOI: [10.1016/j.rser.2016.07.009](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.009).
- [42] *Discoverygy*. Acedido em: 13-10-2020. URL: <https://discoverygy.com/>.
- [43] *Electric Kiwi*. Acedido em: 13-10-2020. URL: <https://electrickiwi.co.nz/mobile-app/>.
- [44] *Fresh Energy*. Acedido em: 13-10-2020. URL: <https://blog.getfresh.energy/die-fresh-energy-android-app-ist-verfuegbar/>.
- [45] *Greenely*. Acedido em: 13-10-2020. URL: <https://www.greenely.se/>.

-
- [46] *Lichtblick*. Acedido em: 13-10-2020. URL: <https://content.lichtblick.de/sparassistent/~>.
- [47] *Redback Energy*. Acedido em: 13-10-2020. URL: <https://redbacktech.com/home-2/smart-hybrid-system/>.
- [48] *Cside*. Acedido em: 13-10-2020. URL: <http://www.cside.pt/pt/soluções/casa-inteligente/>.
- [49] *Energycurb*. Acedido em: 13-10-2020. URL: <https://energycurb.com/>.
- [50] *EDP re:dy*. Acedido em: 13-10-2020. URL: <https://www.edp.pt/particulares/servicos/rody/funcionalidades/>.
- [51] *Ecoisme*. Acedido em: 13-10-2020. URL: <https://www.indiegogo.com/projects/ecoisme-intelligent-energy-monitoring-system>.
- [52] *Wattcost*. Acedido em: 13-10-2020. URL: <https://www.wattcost.com/>.
- [53] *SolarWatt*. Acedido em: 13-10-2020. URL: <https://www.solarwatt.de/energie-management/energymanager>.
- [54] *EasyOptimize*. Acedido em: 13-10-2020. URL: <https://www.crunchbase.com/organization/easyoptimize-gmbh>.
- [55] *Smappee*. Acedido em: 13-10-2020. URL: <https://www.smappee.com/>.
- [56] *Opções Horárias*. Acedido em: 16-07-2020. 2020. URL: <https://www.edp.pt/particulares/apoio-cliente/perguntas-frequentes/pt/contratos/novo-contrato/o-que-e-a-opcao-horaria-e-qual-a-melhor-para-mim/faq-4823>.
- [57] *Simulador de Potência Contratada*. Acedido em: 16-07-2020. 2020. URL: <https://www.edp.pt/particulares/apoio-cliente/simulador-potencia/>.
- [58] *Tarifários EDP Comercial*. Acedido em: 16-07-2020. 2020. URL: <https://helpcenter.edp.pt/media/1766/plano-de-energia-campanha-solar-2020.pdf>.
- [59] *Preço horário do mercado diário*. Acedido em: 16-07-2020. 2020. URL: <https://www.omie.es/pt/market-results/daily/daily-market/daily-hourly-price>.
- [60] *Decreto-Lei n.º 153/2014*. Acedido em: 16-07-2020. 2014. URL: <https://dre.pt/application/conteudo/58406974>.
- [61] *Introduction to genetic algorithms*. Acedido em: 22-07-2020. 2017. URL: <https://towardsdatascience.com/introduction-to-genetic-algorithms-including-example-code-e396e98d8bf3>.
- [62] U. Maulik e S. Bandyopadhyay. “Genetic Algorithm-Based Clustering Technique”. Em: *Pattern Recognition* 33 (set. de 2000), pp. 1455–1465. DOI: 10.1016/S0031-3203(99)00137-5.
- [63] J. Mora, J. Barón, J. Santos e M. Payán. “An evolutive algorithm for wind farm optimal design”. Em: *Neurocomputing* 70 (out. de 2007), pp. 2651–2658. DOI: 10.1016/j.neucom.2006.05.017.

- [64] G. Pereira. “Genetic Optimization of Artificial Neural Networks to Forecast Virioplankton Abundance from Cytometric Data”. Em: *Journal of Intelligent Learning Systems and Applications* 05 (jan. de 2013), pp. 57–66. DOI: [10.4236/jilsa.2013.51007](https://doi.org/10.4236/jilsa.2013.51007).



GRÁFICOS DE CONSUMO ACUMULADO

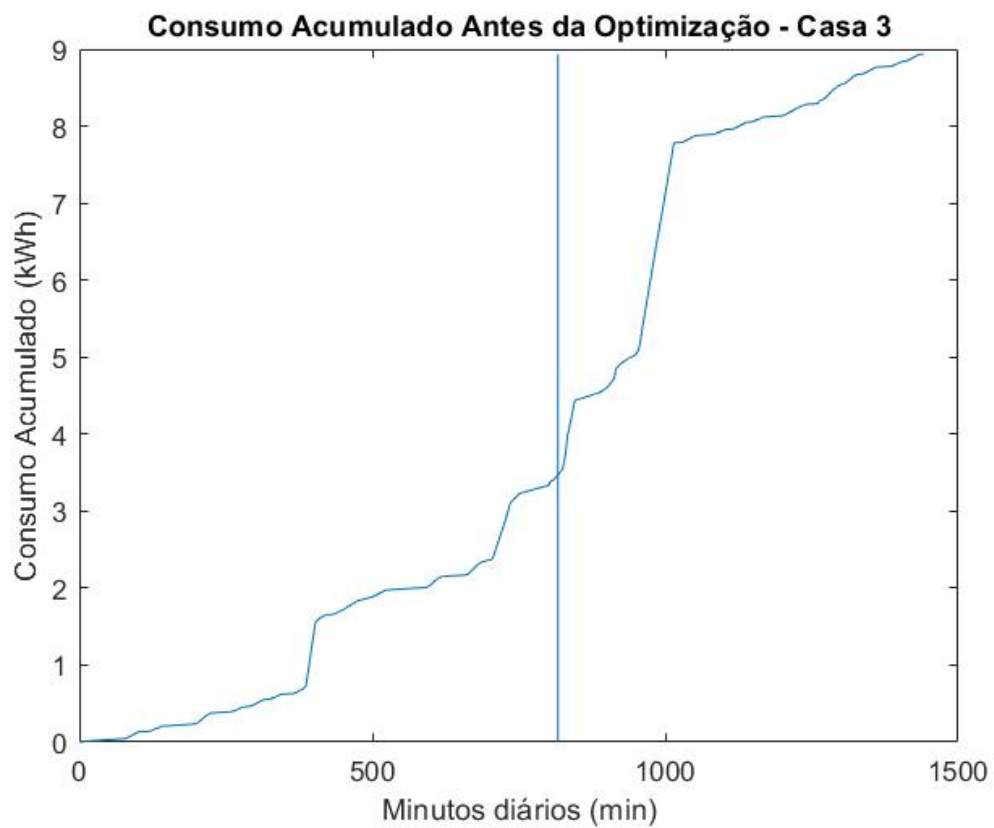


Figura A.1: Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para a casa 3, antes da otimização.

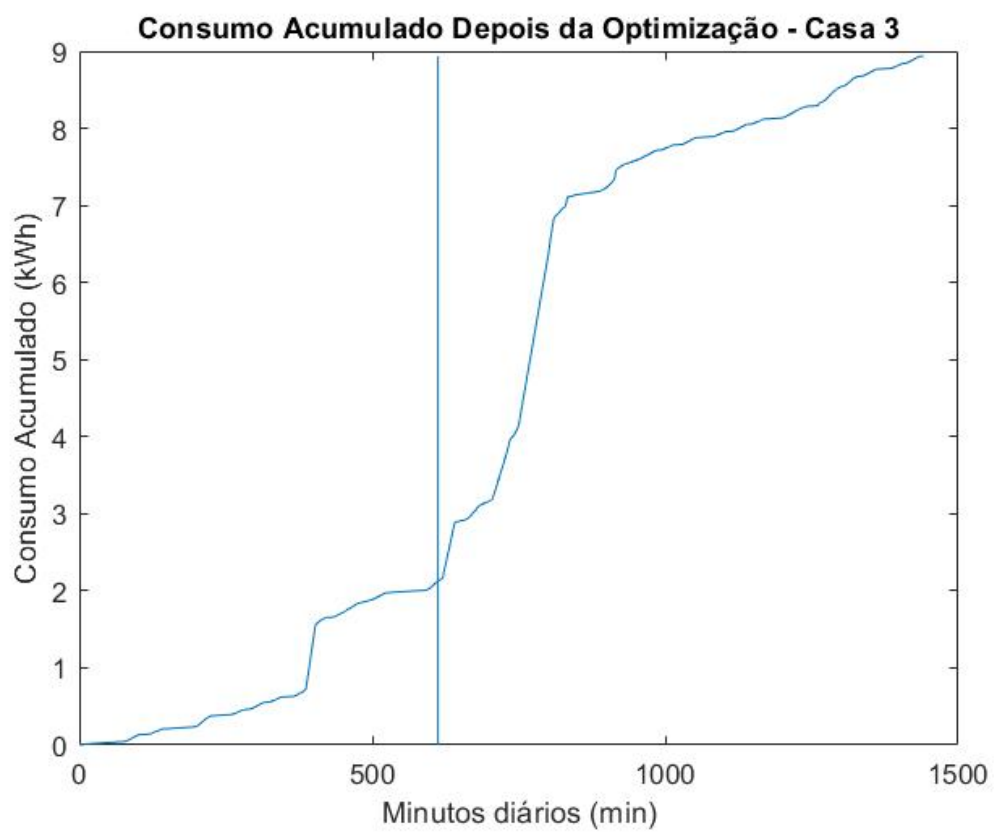


Figura A.2: Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para a casa 3, depois da otimização.

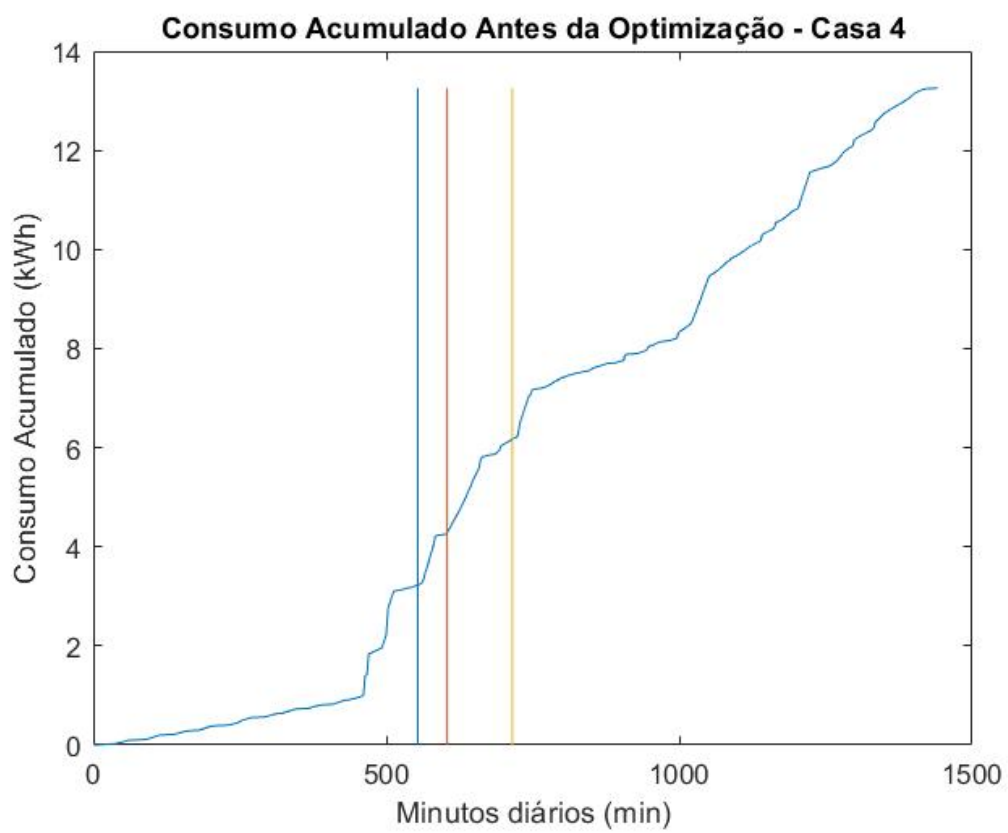


Figura A.3: Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para a casa 4, antes da otimização.

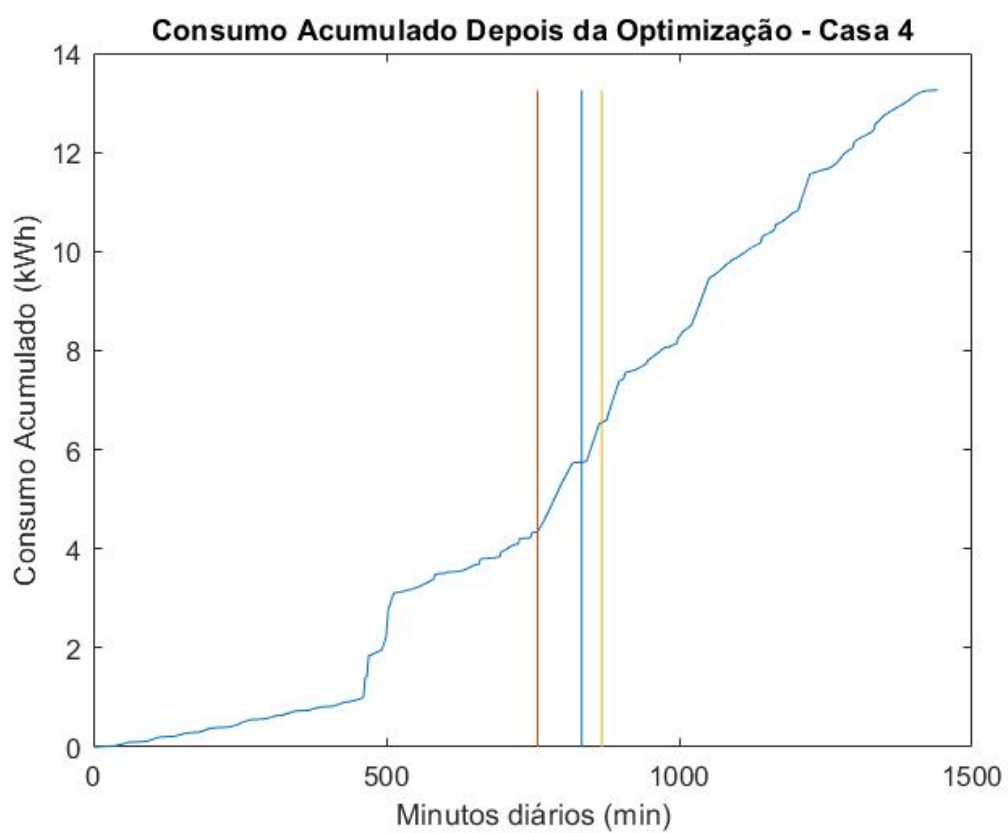


Figura A.4: Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para a casa 4, depois da otimização.

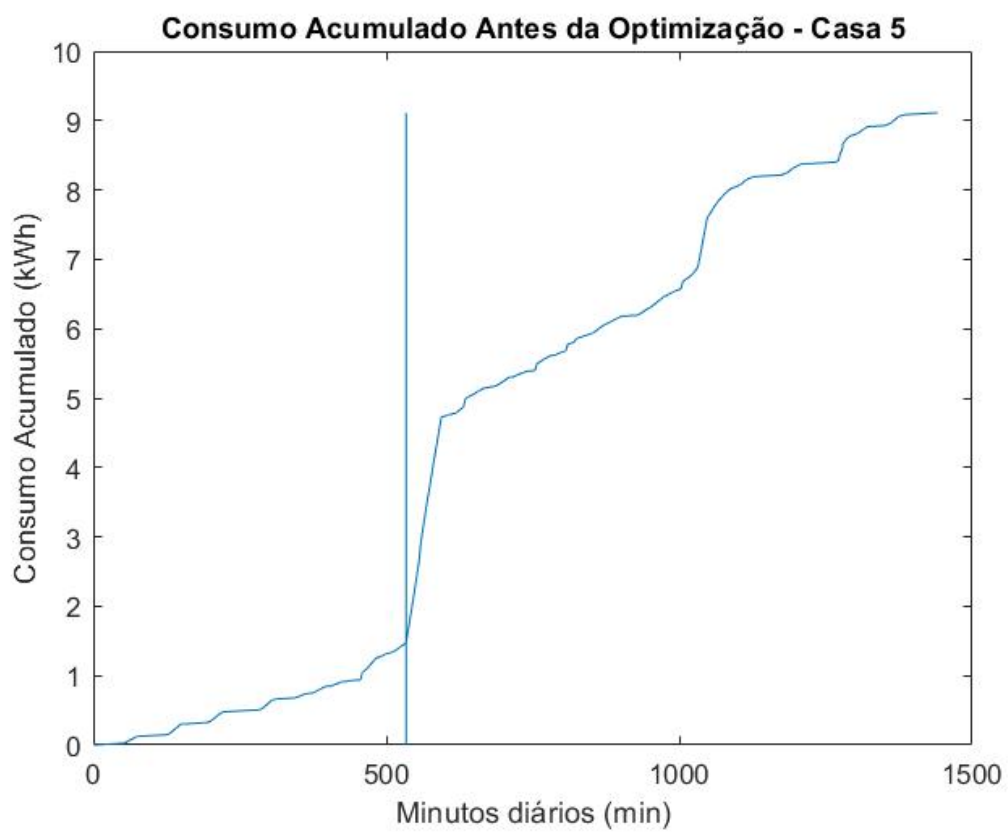


Figura A.5: Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para a casa 5, antes da otimização.

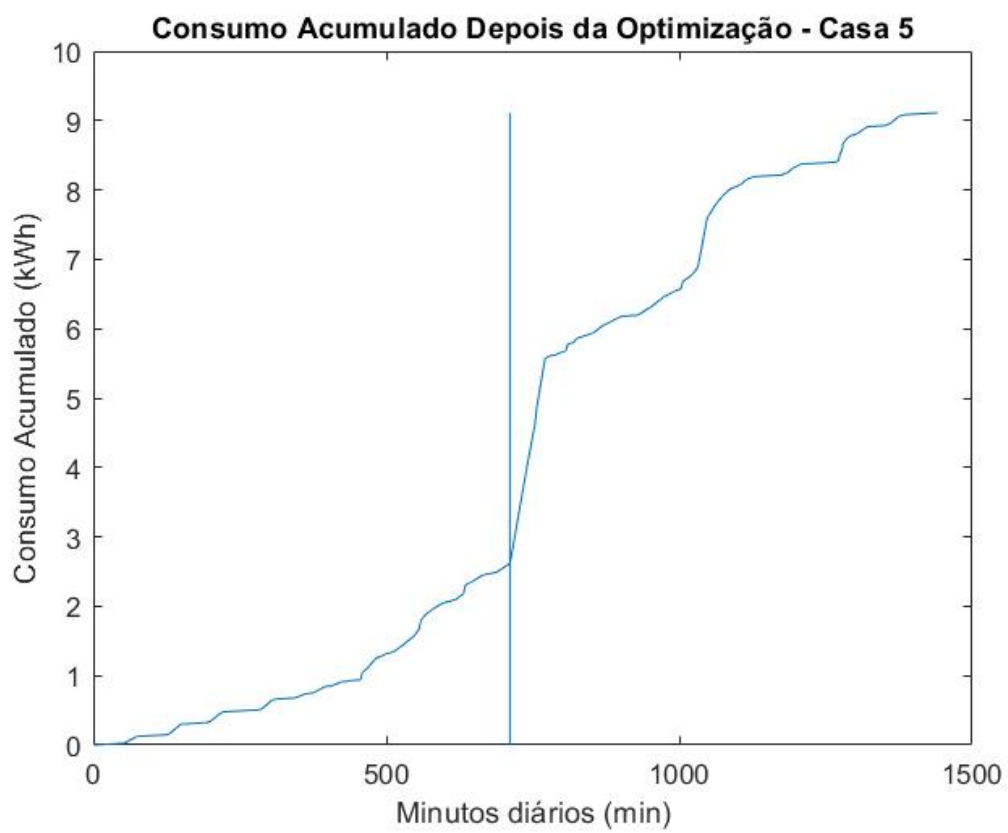


Figura A.6: Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para a casa 5, depois da otimização.

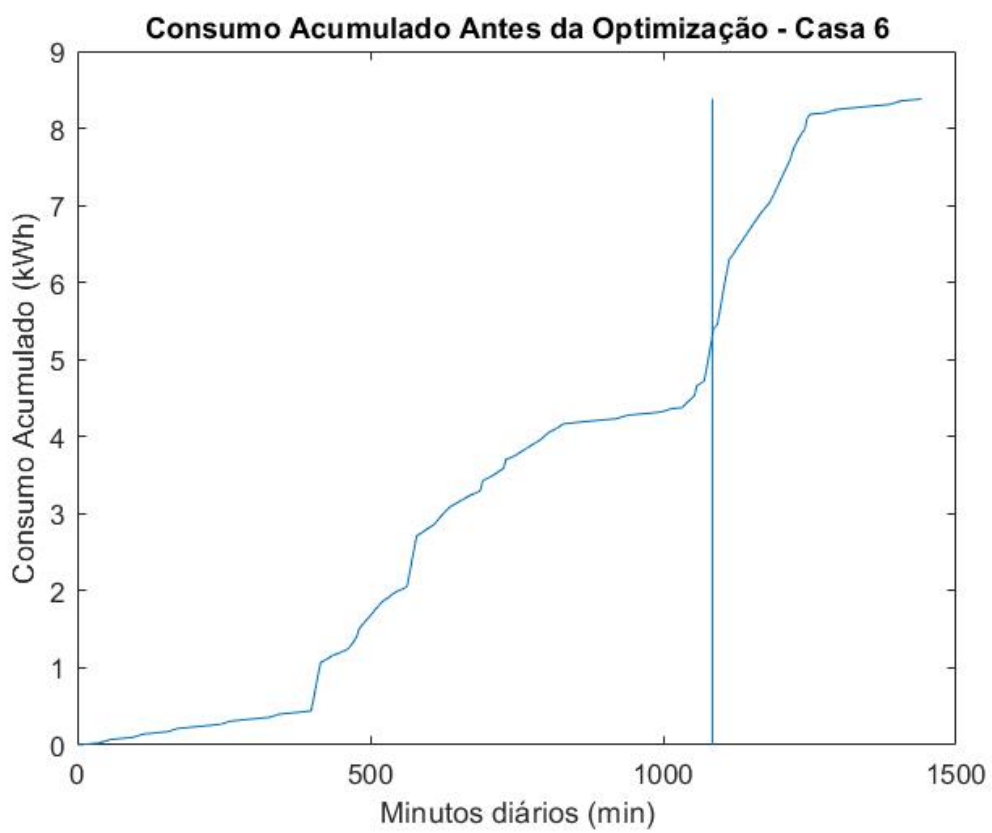


Figura A.7: Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para a casa 6, antes da otimização.

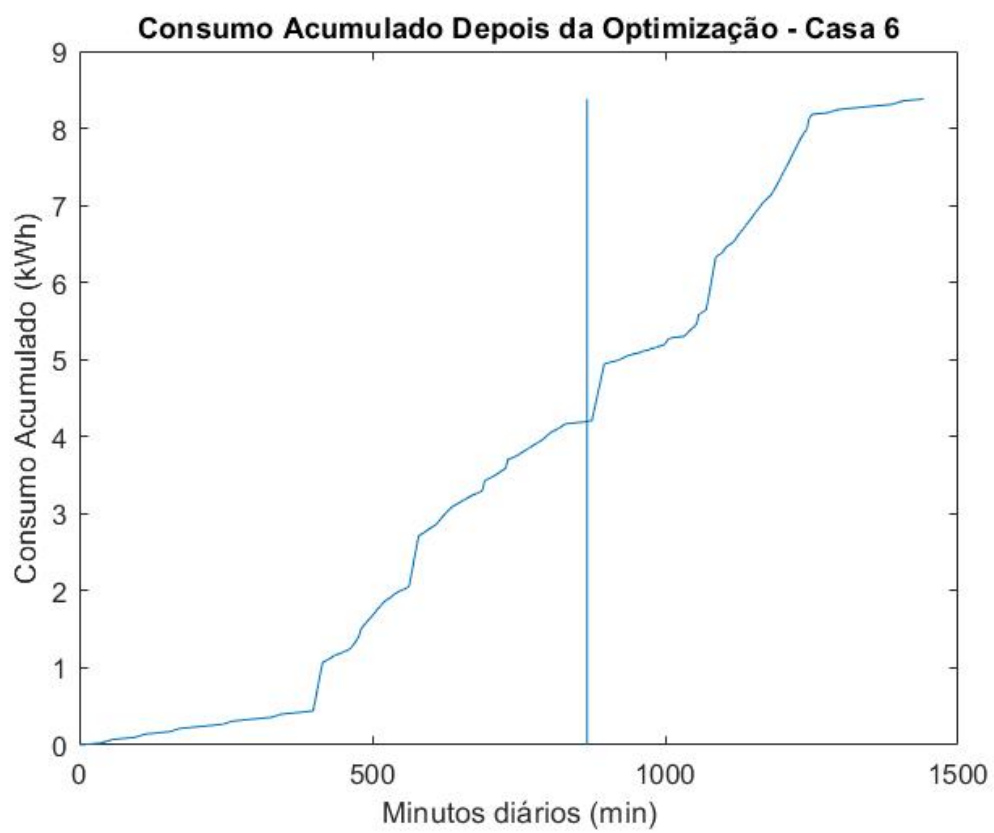


Figura A.8: Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para a casa 6, depois da otimização.

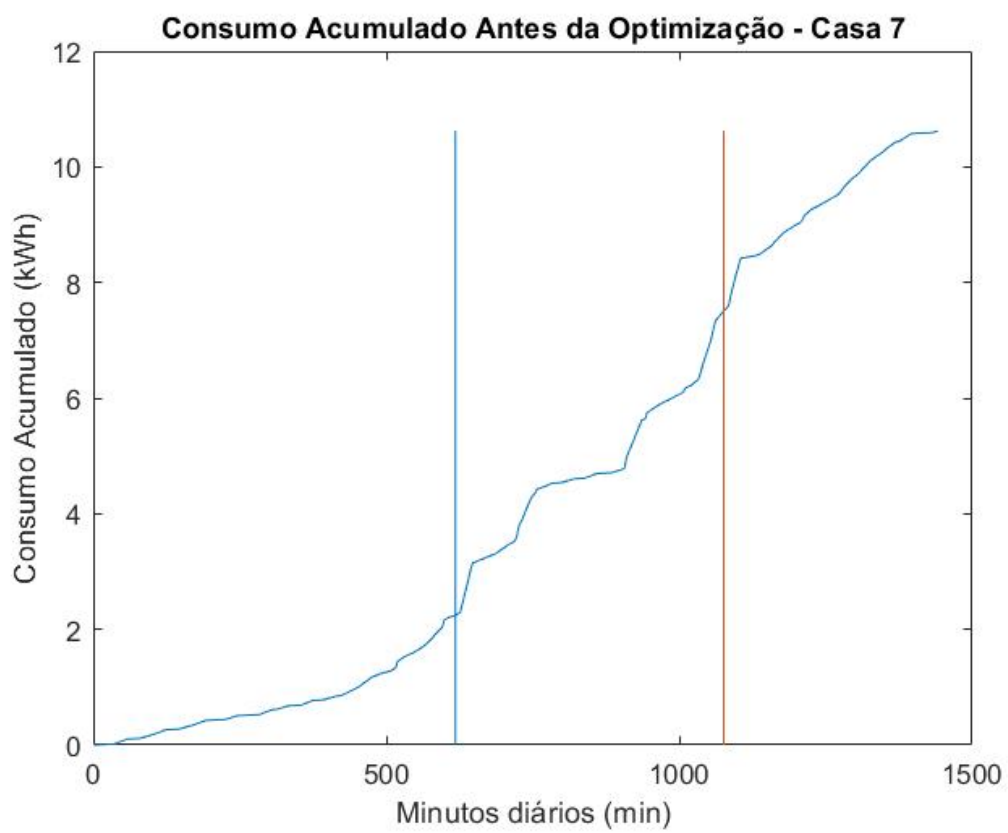


Figura A.9: Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para a casa 7, antes da otimização.

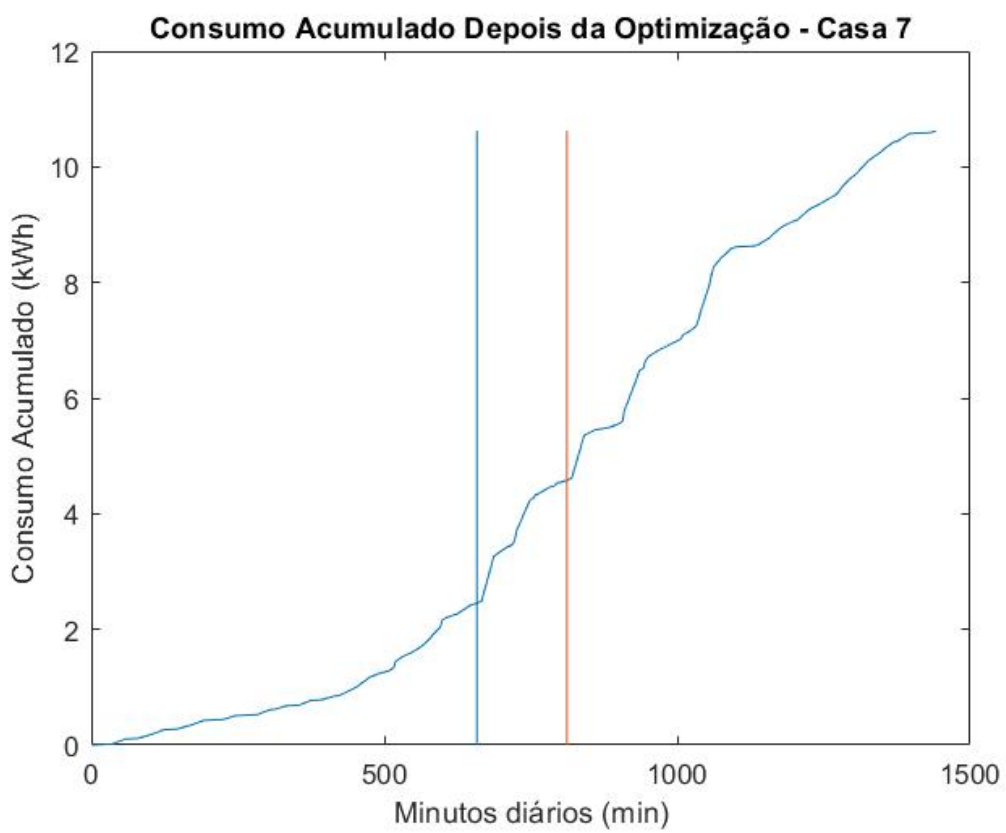


Figura A.10: Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para a casa 7, depois da otimização.

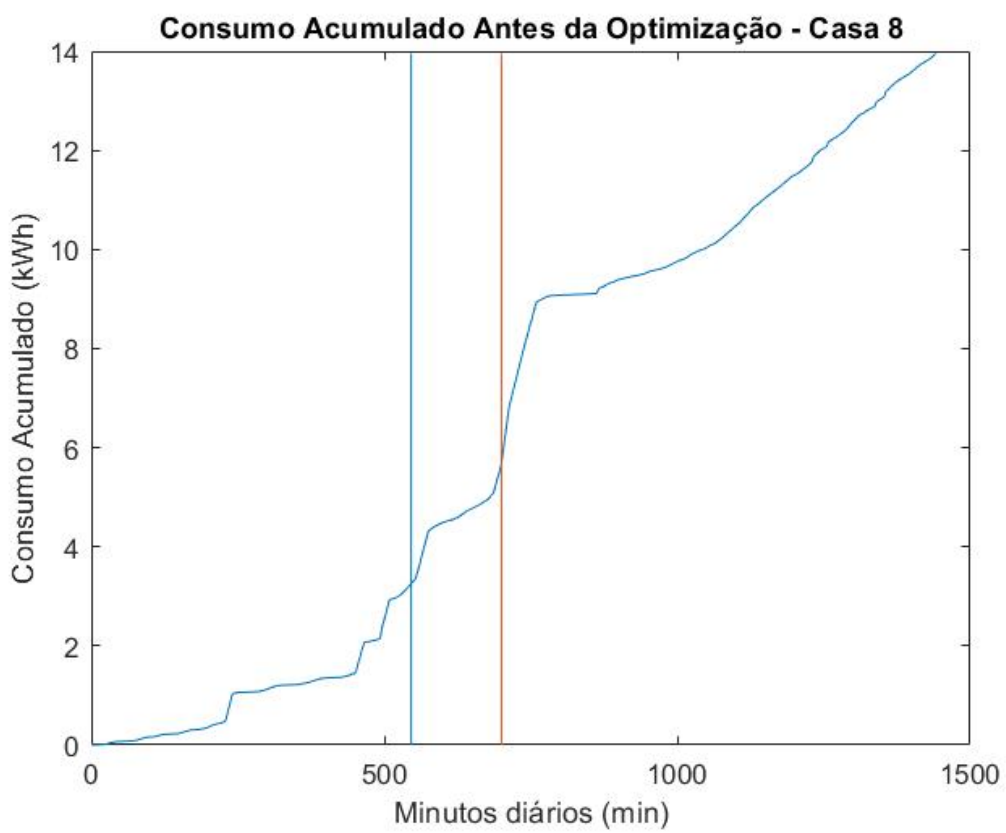


Figura A.11: Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para a casa 8, antes da otimização.

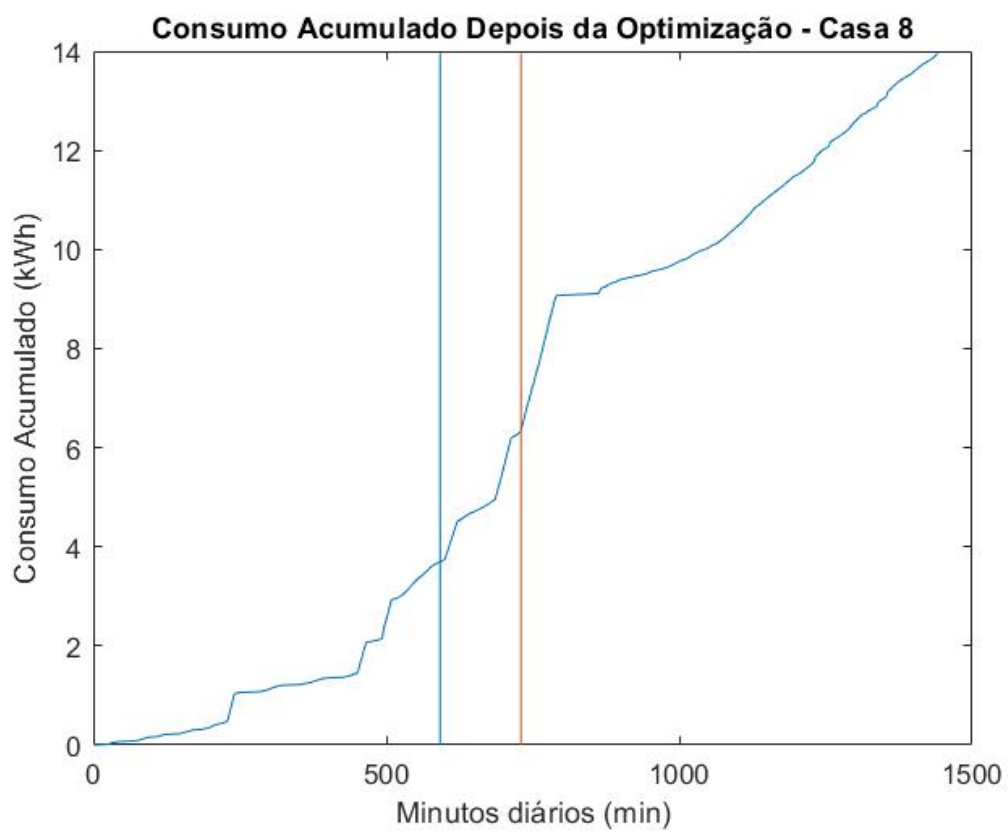


Figura A.12: Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para a casa 8, depois da otimização.

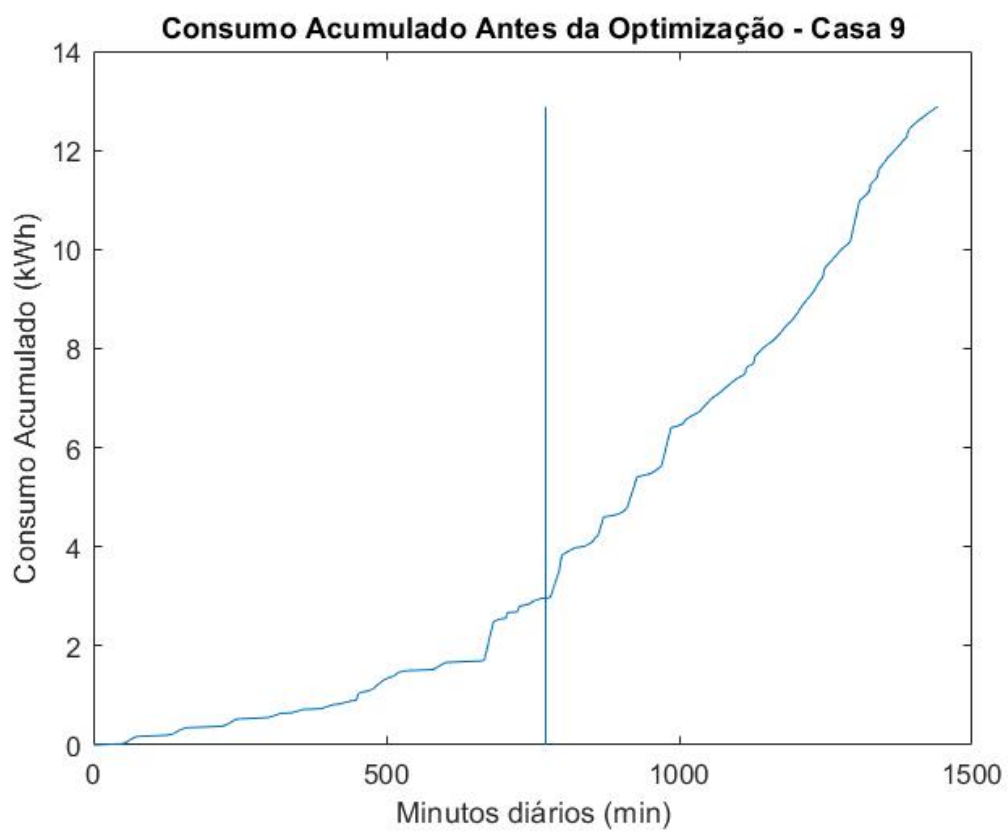


Figura A.13: Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para a casa 9, antes da otimização.

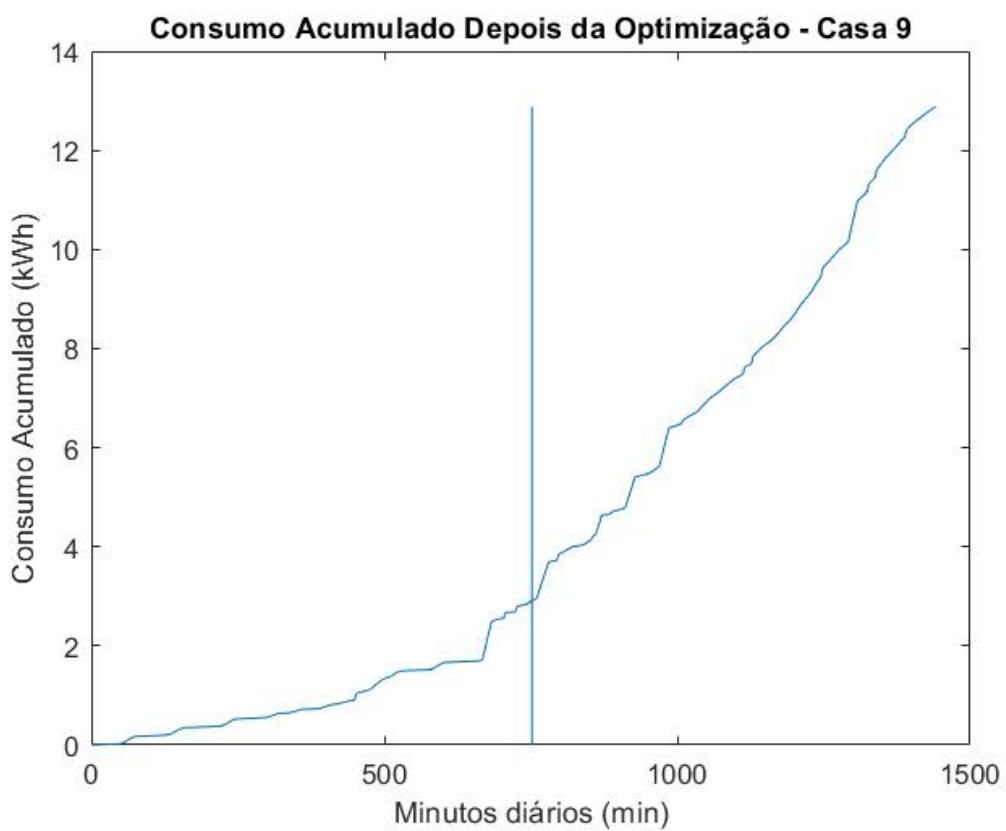


Figura A.14: Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para a casa 9, depois da otimização.

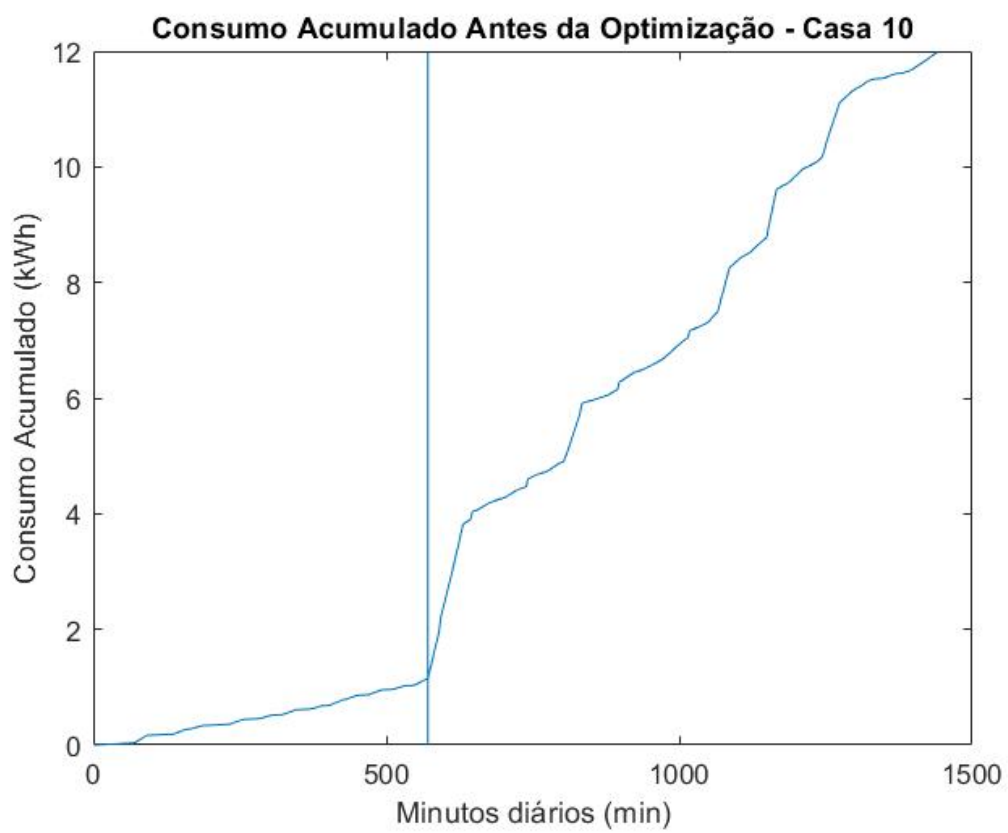


Figura A.15: Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para a casa 10, antes da otimização.

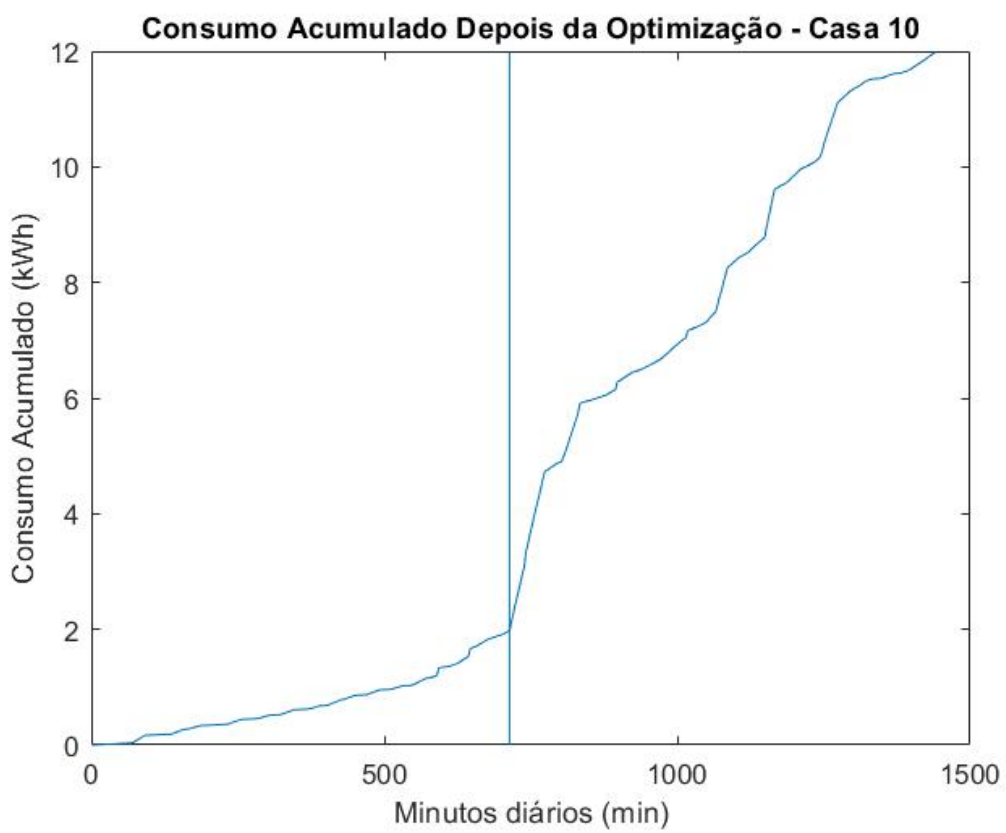


Figura A.16: Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para a casa 10, depois da otimização.

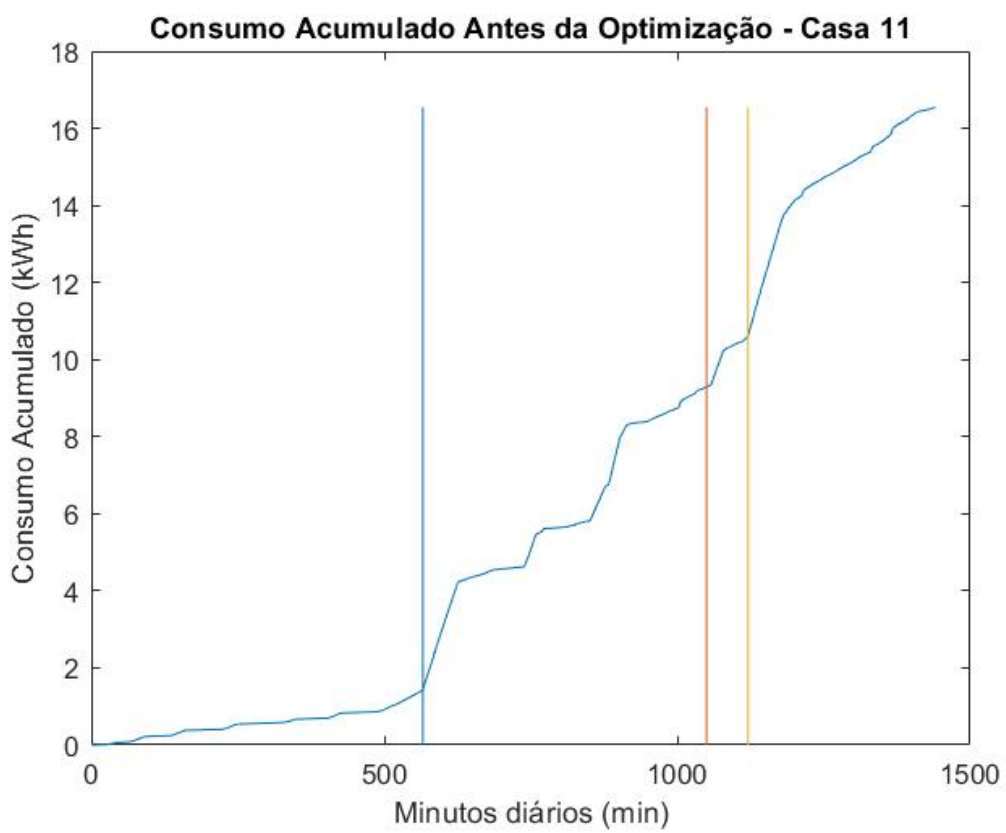


Figura A.17: Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para a casa 11, antes da otimização.

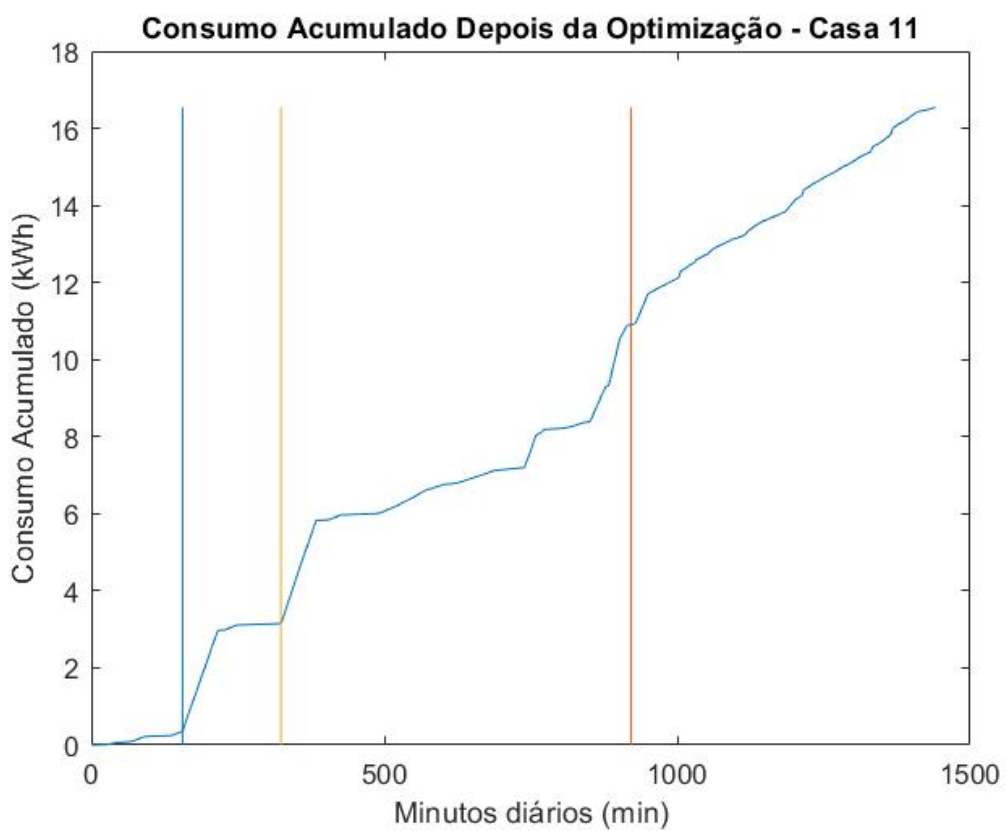


Figura A.18: Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para a casa 11, depois da otimização.

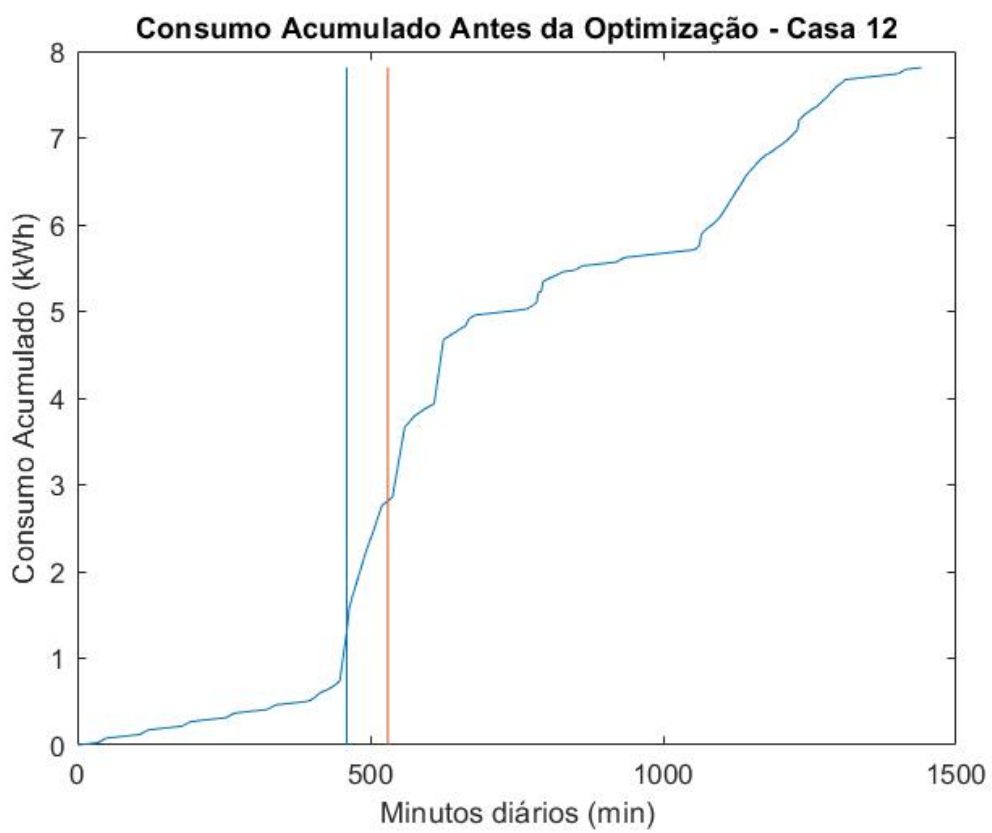


Figura A.19: Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para a casa 12, antes da otimização.

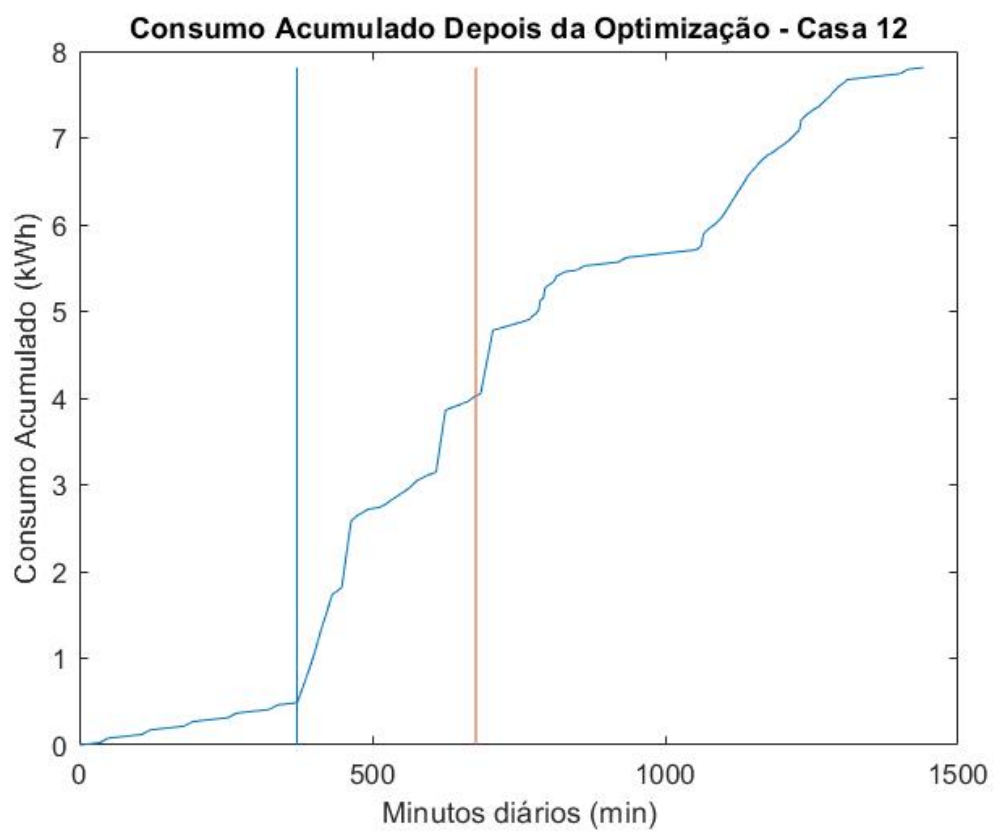


Figura A.20: Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para a casa 12, depois da otimização.

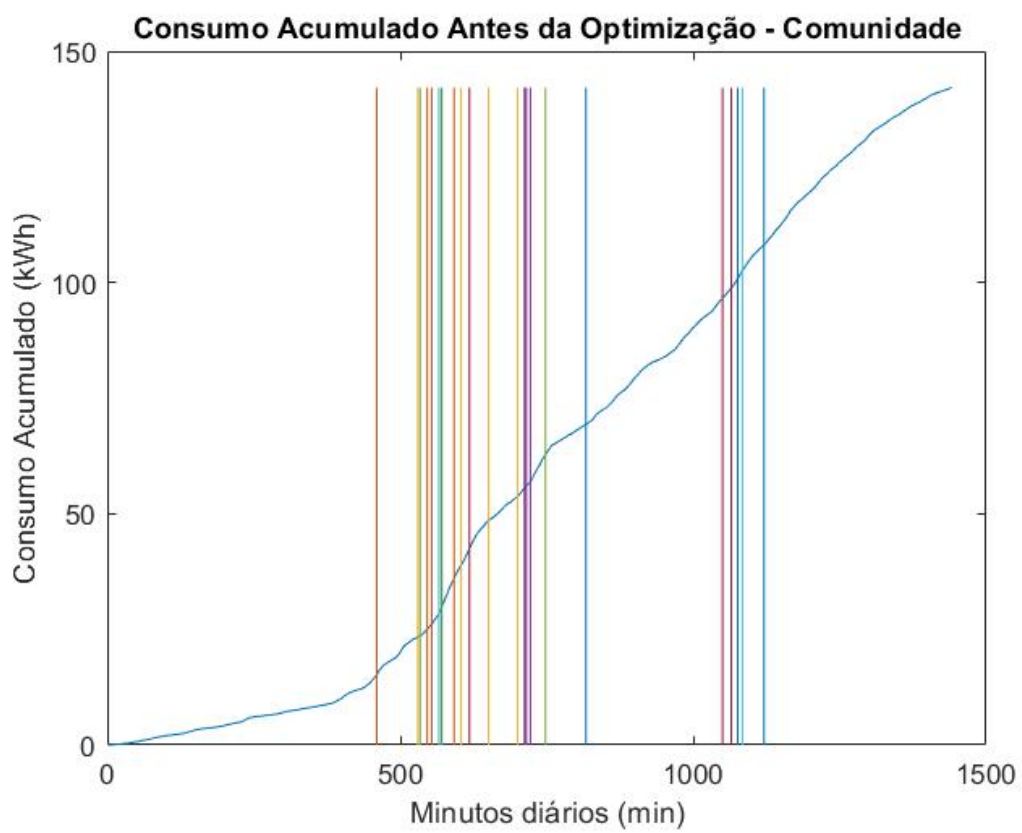


Figura A.21: Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para a comunidade, antes da otimização.

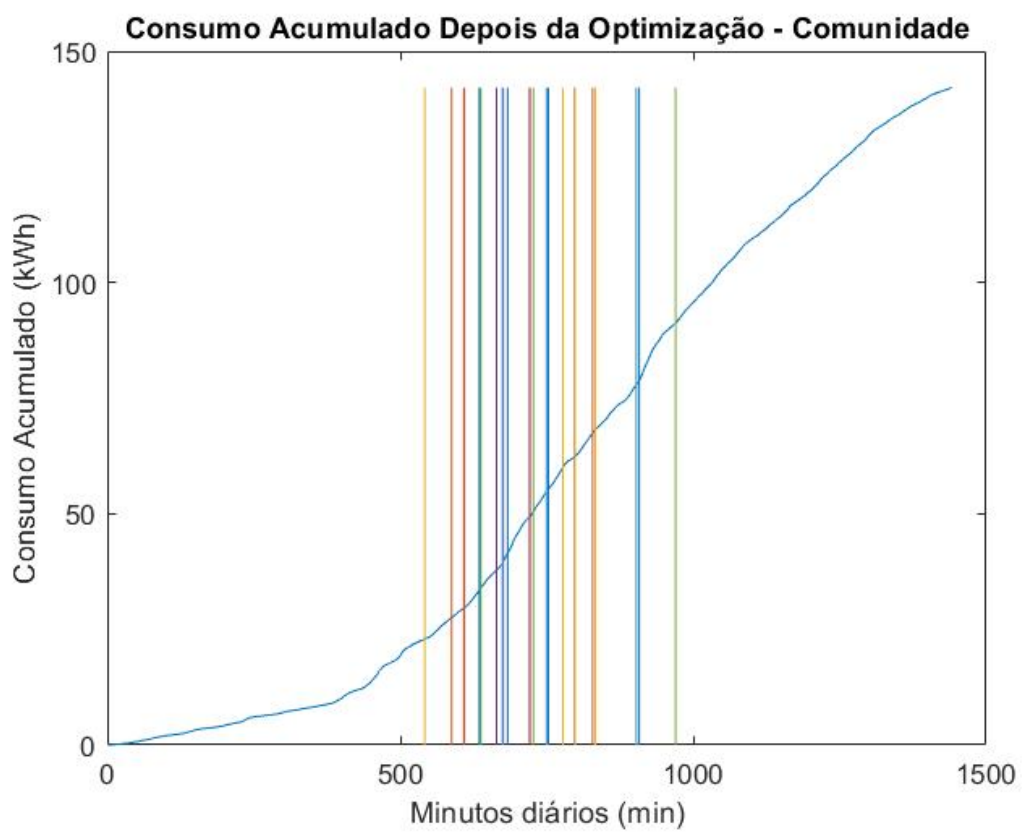


Figura A.22: Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para a comunidade, depois da otimização.

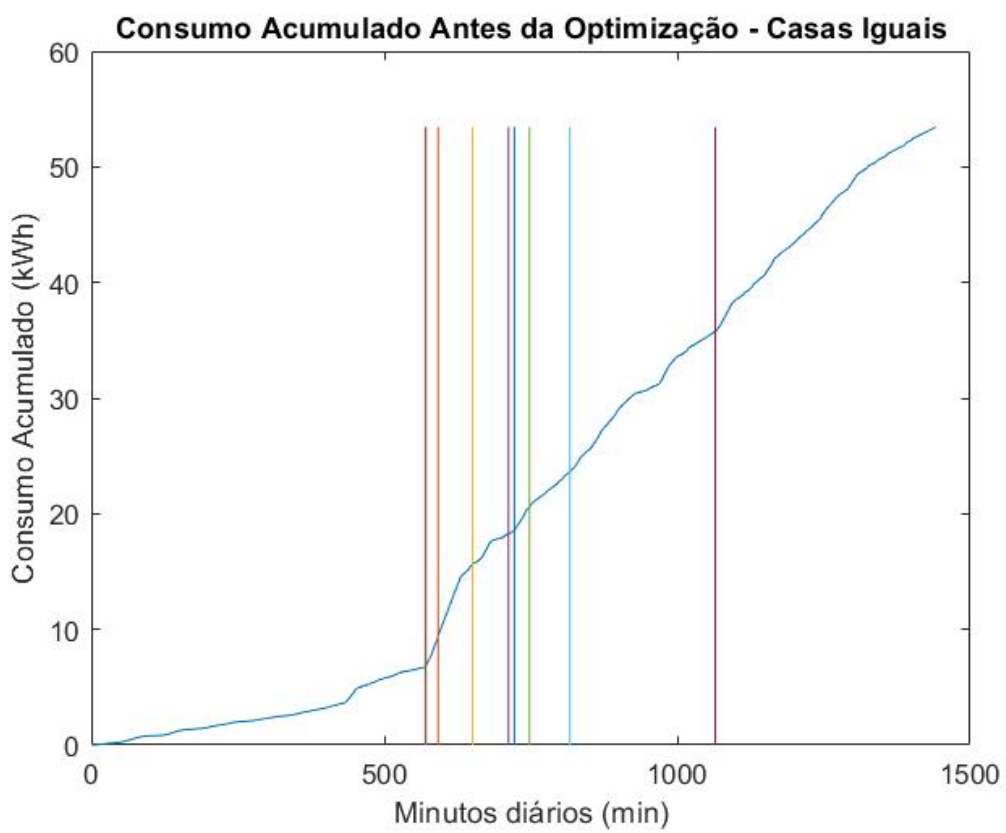


Figura A.23: Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para uma comunidade igual, antes da otimização.

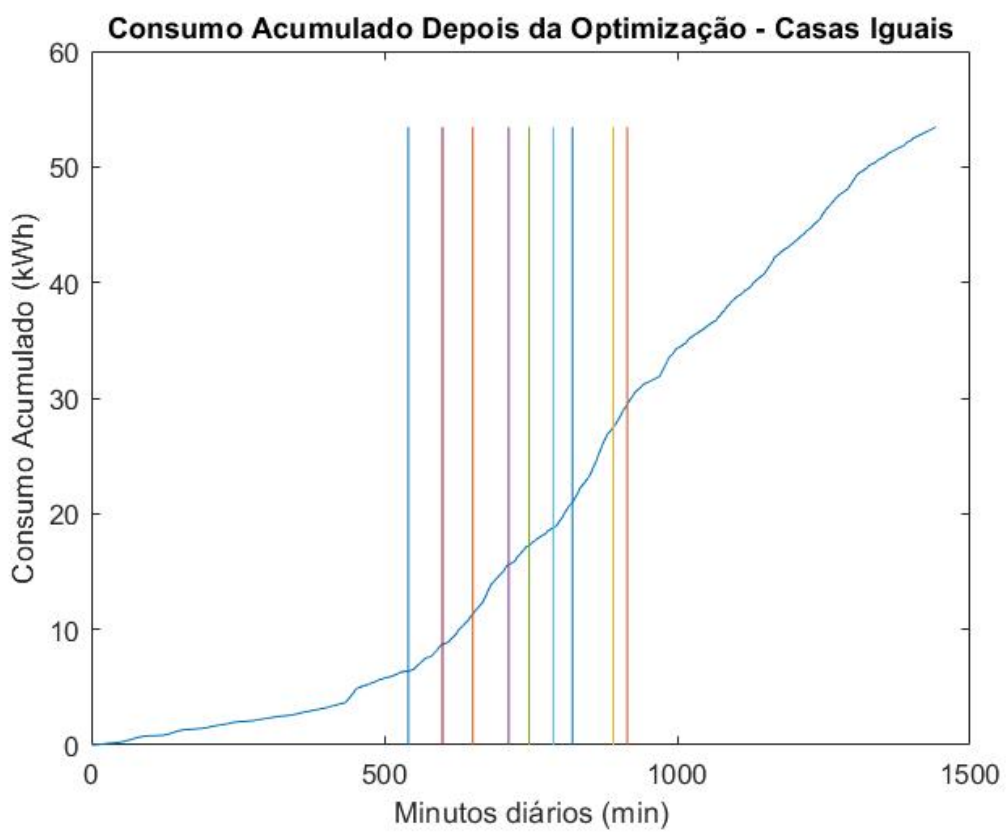


Figura A.24: Gráfico representativo do consumo acumulado e respetivo funcionamento das cargas para uma comunidade igual, depois da otimização.