

## **Modelo de gestão de flexibilidade de equipamentos domésticos para auxiliar solicitações do DSO em redes inteligentes**

**TIAGO DANIEL ROCHA DE SOUSA**

novembro de 2018

# Modelo de gestão de flexibilidade de equipamentos domésticos

Tiago Daniel Rocha de Sousa



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia



Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de DSEE -  
Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

Candidato: Tiago Daniel Rocha de Sousa, Nº 1121208, 1121208@isep.ipp.pt

Orientação científica: João Soares, jan@isep.ipp.pt

GECAD – Grupo de Investigação em Engenharia e Computação Inteligente para a  
Inovação e o Desenvolvimento

Supervisão: Fernando Lezama, flzcl@isep.ipp.pt



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

**2018**



“A tecnologia move o mundo”. (**Steve Jobs**)



## *Agradecimentos*

Gostaria de demonstrar o meu profundo agradecimento a todas as pessoas que, de forma direta ou indireta, fizeram parte de todo este meu percurso académico e que contribuíram para que a realização da presente dissertação fosse possível.

Agradeço primeiramente à minha família, nomeadamente aos meus pais e irmão, pois foram eles que possibilitaram a minha ingressão no ensino superior e estiveram comigo nos momentos mais difíceis.

Agradeço também aos meus amigos e colegas de curso, por todos os momentos de amizade, companheirismo e apoio prestado.

Agradeço ainda, o apoio e a confiança demonstrados pelos meus orientadores, o Doutor João Soares, o Doutor Fernando Lezama e a Mestre Cátia Silva, que me disponibilizaram o seu amplo conhecimento na área, proveniente de vários anos de trabalho, pela disponibilidade demonstrada sempre que solicitados e pelos conselhos dirigidos durante a execução da dissertação e deste relatório.



## *Resumo*

A flexibilidade energética desempenhará um papel fundamental no funcionamento dos sistemas energéticos, introduzindo um conjunto de benefícios a todas as partes interessadas envolvidas e mudando o mercado energético como o conhecemos. Espera-se que novas entidades com diferentes interesses emergjam nesse contexto, particularmente os agregadores, que permitirão que os utilizadores finais estejam cientes do valor da flexibilidade no seu consumo, ou simplesmente facilitar a participação destes, por exemplo, através do uso de *Demand Response* (DR) no mercado, para atender às necessidades do sistema. No entanto, para retirar o maior proveito possível da flexibilidade adquirida de pequenos clientes, uma resposta rápida do sistema será necessária, permitindo a interação entre agregadores e utilizadores residenciais. Portanto, o chamado sistema de gestão de energia residencial torna-se uma ferramenta essencial para a comunicação entre utilizadores finais e agregadores, realizando mudanças necessárias nos perfis de consumo em benefício de todas as partes envolvidas.

Nesta dissertação é introduzido um modelo com o objetivo de conseguir uma correspondência entre a flexibilidade exigida por um agregador e a flexibilidade oferecida pelos utilizadores residenciais através da capacidade de um sistema de gestão de energia residencial de realizar um conjunto de tarefas que são abordadas com maior detalhe ao longo da dissertação. Este modelo é desenvolvido usando a ferramenta informática R, que com determinados dados de entrada, devolve parâmetros otimizados usando a otimização por enxame de partículas (PSO). A ferramenta considera uma minimização de uma função objetivo com os seguintes termos: custo dos diferentes tipos de equipamentos em estudo, flexibilidade oferecida pelo sistema de gestão residencial e flexibilidade requerida pelo agregador. Assim sendo, a metodologia apresentada é aplicada a um conjunto de utilizadores residenciais de forma a testar a sua eficácia e eficiência. A análise dos resultados comprova a viabilidade, a adequação, robustez e versatilidade da metodologia proposta para esta dissertação.

### *Palavras-Chave*

Agregador, flexibilidade, resposta à procura, sistema de gestão de energia.



## *Abstract*

Energy flexibility will play a key role in the proper functioning of energy systems, introducing a set of benefits to all involved stakeholders and changing the shape of electricity markets as we know them. It is expected that new players with different interests will emerge in this context. Particularly, the aggregators might allow end-users to be aware of their consumption flexibility value, or merely facilitate consumer's participation, for instance through the use of demand response in the market to meet system requirements. However, to take full advantage of the flexibility procurement of small customers, a prompt system response allowing the interaction between aggregators and residential users is needed. Therefore, the so-called Home Energy Management System (HEMS) becomes an active tool to communicate end-users with aggregators, performing the necessary changes in the consumption profiles in the benefit of all involved parts.

In this dissertation, a model is introduced to match the flexibility required by an aggregator to the flexibility offered by residential users through the ability of a HEMS to perform a set of tasks that are addressed with detail throughout the dissertation. This model is developed using the R software, which with certain input data returns optimized parameters using particle swarm optimization (PSO). The tool considers a minimization of an objective function with the following terms: cost of the different types of equipment under study, flexibility offered by the residential management system and flexibility required by the aggregator. Thus, the presented methodology is applied to a set of residential users in order to test its effectiveness and efficiency. The analysis of the results, prove the feasibility, adequacy, robustness and versatility of the methodology proposed for this dissertation.

### ***Keywords***

Aggregator, flexibility, demand response, home energy management system.



# Índice

Agradecimentos.....	I
Resumo.....	III
Abstract .....	V
Índice de Figuras .....	IX
Índice de Tabelas.....	XI
Siglas e Acrónimos .....	XIII
Notação .....	XIV
1. Introdução .....	1
1.1 Contextualização .....	1
1.2 Objetivos do estudo.....	3
1.3 Formulação do problema.....	3
1.4 Limitações .....	3
1.5 Calendarização .....	4
1.6 Organização do relatório .....	4
2. Estado da arte .....	7
2.1 Smart Home .....	7
2.1.1 Sistema de gestão de energia.....	7
2.2 Sistemas de armazenamento de energia .....	9
2.3 Demand Response .....	10
2.3.1 Programas de DR .....	12
2.4 Flexibilidade.....	15
2.4.1 Mercados locais de flexibilidade.....	16
2.5 Agregação .....	19
2.5.1 Importância da agregação.....	19
2.5.2 Definição de agregação .....	19
2.5.3 Agregadores de demand side response.....	19
2.5.4 Valor da agregação e categorias .....	20
3. Formulação matemática do problema e método de resolução.....	23
3.1 Problemas de otimização.....	23
3.2 Formulação matemática do problema .....	25
3.3 Particle Swarm Optimization (PSO) .....	29
3.4 Codificação de partículas PSO para provisão de flexibilidade .....	30
4. Casos de estudo .....	33
4.1 Introdução .....	33
4.2 Caso de estudo 0.....	34

4.2.1	Formulação do problema 0.....	34
4.2.2	Caso de estudo.....	35
4.3	Caso de estudo 1.....	38
4.4	Caso de estudo 2.....	43
4.4.1	Formulação do problema 2.....	43
4.4.2	Caso de estudo.....	43
4.5	Caso de estudo 3.....	52
4.5.1	Formulação do problema 3.....	52
4.5.2	Caso de estudo.....	52
4.5.3	Tuning dos parâmetros do PSO.....	55
4.6	Caso de estudo 4.....	60
4.6.1	Caso de estudo.....	60
5.	Conclusões .....	67
5.1	Conclusões finais .....	67
5.2	Principais contributos.....	70
5.3	Contributos e interação com projetos nacionais.....	70
5.4	Trabalhos futuros .....	70
	Referências .....	72

## Índice de Figuras

Figura 1 – Calendarização da Dissertação .....	4
Figura 2 – Smart home .....	7
Figura 3 – Arquitetura geral de um sistema de gestão de energia residencial.....	9
Figura 4 – Ilustração da suavização da procura de eletricidade em períodos de pico.....	10
Figura 5 – Diferentes efeitos que o DR pode causar .....	11
Figura 6 – Programas de DR .....	12
Figura 7 – Controlo de mecanismo centralizado.....	13
Figura 8 – Exemplos de escalonamento de tarefas e métodos DR de gestão de energia .....	14
Figura 9 – Ilustração das três dimensões para flexibilidade: faixa, taxa de rampa e duração .....	15
Figura 10 – Visão geral dos agentes do mercado de flexibilidade local .....	17
Figura 11 – Interação entre compradores e vendedores por intermédio de trocas num mercado local.....	18
Figura 12 – Valor dos agregadores baseado em tecnologia e contextos regulatórios .....	21
Figura 13 – Rede de distribuição na qual um agregador controla a gestão de dispositivos com consumo flexível .....	25
Figura 14 – Esquema geral de funcionamento do PSO.....	32
Figura 15 – Diagrama do HEMS.....	34
Figura 16 – Dados de entrada do programa, perfil base (esquerda) e flexibilidade requerida pelo DSO (direita).....	35
Figura 17 – Perfil base de consumo do utilizador .....	36
Figura 18 – Perfil após otimização. Equipamento 1 (vermelho). Equipamentos 2 (amarelo). Equipamento 3 (verde). Equipamentos 2 e 3 (azul) .....	37
Figura 19 – Flexibilidade agregada .....	38
Figura 20 – Perfil de consumo de uma máquina de lavar roupa .....	39
Figura 21 – Perfil de consumo de uma máquina de secar roupa .....	39
Figura 22 – Perfil de consumo de uma máquina de lavar louça.....	40
Figura 23 – Perfil de energia agregado antes e depois da otimização. a) Perfil base do consumo agregado de eletrodomésticos. b) Perfil de consumo após otimização .....	41
Figura 24 – Flexibilidade solicitada pelo agregador a) e flexibilidade fornecida pelo HEMS b).....	42
Figura 25 – Perfil de consumo sistema de iluminação a LED's.....	45
Figura 26 – Perfil de consumo da televisão .....	45
Figura 27 – Perfil de consumo do computador portátil.....	46
Figura 28 – Perfil de consumo do sistema de ar condicionado .....	46
Figura 29 – Flexibilidade requerida pelo DSO .....	47
Figura 30 – Perfil base de consumo pré-otimização .....	48
Figura 31 – Novo perfil pós-otimização .....	48
Figura 32 – a) Solicitação de flexibilidade pelo DSO. b) Provisão de flexibilidade pelo agregador após a aplicação deslocamento / redução de dispositivos de energia.....	49
Figura 33 – Perfil base, reescalonamento e flexibilidade. a) Dispositivos do perfil base tipo A. b) Dispositivos do perfil base tipo B. c) Dispositivos reagendados do tipo A. d) Dispositivos reagendados do tipo B. e) Flexibilidade oferecida pelos dispositivos do tipo A. f) Flexibilidade oferecida pelos dispositivos do tipo B.....	51
Figura 34 – Dados do PV .....	54
Figura 35 – Perfil de consumo do termoacumulador .....	54
Figura 36 – Comparação da convergência entre diferentes parâmetros do PSO. A azul os valores médios obtidos no tuning para um swarm size de 50, a laranja os parâmetros predefinidos no software e a cinzento os valores médios obtidos no tuning para um swarm size de 10. ....	56
Figura 37 – Perfil base de consumo .....	57

Figura 38 – Comparação entre perfil base de consumo antes e após otimização. a) Perfil base pré-otimização. b) Perfil de consumo pós-otimização .....	58
Figura 39 – Gráfico relação convergência/número de iterações .....	64

## Índice de Tabelas

Tabela 1 – Consumo individual (e agregado) de uma (e 20) casas equipadas com os equipamentos considerados.....	44
Tabela 2 – Potência, compensação e percentagem de contribuição para cada tipo de aparelho .	52
Tabela 3 – Custo de cada equipamento.....	53
Tabela 4 – Resultados do tuning para um swarm size de 10.....	55
Tabela 5 – Resultados do tuning para um swarm size de 50.....	55
Tabela 6 – Fitness médio dos diferentes parâmetros em estudo .....	56
Tabela 7 – Compensação monetária a oferecer por equipamento.....	58
Tabela 8 – Compensação monetária a oferecer por tipo de aparelho.....	59
Tabela 9 – Custo de cada equipamento.....	60
Tabela 10 – Compensação monetária a oferecer por equipamento.....	61
Tabela 11 – Comparação entre a contribuição (em percentagem) de cada equipamento e as compensações financeiras do caso de estudo 3 e do caso de estudo 4 (30 equipamentos) .....	62
Tabela 12 – Comparação entre a contribuição (em percentagem) de cada equipamento para as compensações financeiras do cenário com 30 equipamentos e 10 equipamentos.....	63



## *Siglas e Acrónimos*

BRP – *Balance Responsible Party* (Entidade responsável pelo balanço)

CFL – *Compact Fluorescent Lamp* (Lâmpada fluorescente compacta)

DLC – *Direct Load Control* (Controlo direto de carga)

DSM – *Demand Side Management* (Gestão do lado da procura)

DSO – *Distribution System Operator* (Operador do sistema de distribuição)

DSR – *Demand Side Response* (Resposta do lado da procura)

EMS – *Energy Management System* (Sistema de gestão de energia)

FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia

FEDER – Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional

FSP's – *Flexibility Service Providers* (Prestadores de serviços de flexibilidade)

GECAD – Grupo de Investigação em Engenharia e Computação Inteligente para a Inovação e o Desenvolvimento

HEMS – *Home Energy Management System* (Sistema de gestão de energia residencial)

IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (Instituto de engenheiros eletrotécnicos e eletrónicos)

LED – *Light Emitting Diode* (Díodo emissor de luz)

PHEVs – *Plug-in Hybrid Electric Vehicles* (Veículos elétricos híbridos *plug-in*)

PSO – *Particle Swarm Optimization* (Otimização por enxame de partículas)

SESP – *Smart Energy Service Provider* (Provedor do serviço de energia inteligente)

SIMOCE – Sistema Inteligente para a Monitorização e Otimização do Consumo Energético

TSO – *Transmission System Operator* (Operador do sistema de transmissão)

TV – Televisão

## Notação

- Índices
  - $t$  – Período
  - $i$  – Índice de aparelho com capacidade de deslocamento no tempo (*shifting*)
  - $j$  – Índice de aparelho com recursos de redução (*real time*)
  - $k$  – Índice de duração dos perfis de carga
  - $p$  – Índice de bateria
  - $m$  – Índice de painel fotovoltaico
- Set
  - $A$  – Conjunto de aparelhos do tipo *shifting*
  - $B$  – Conjunto de aparelhos do tipo *real time*
  - $Z$  – Conjunto de baterias
  - $S$  – Conjunto de todos os painéis fotovoltaicos
- Parâmetros
  - $I$  – Número de aparelhos
  - $T$  – Número de períodos
  - $N_t$  – Número de períodos
  - $N_I$  – Número de aparelhos de *shifting*
  - $N_J$  – Número de aparelhos de *real time*
  - $N_P$  – Número de baterias
  - $N_M$  – Número de painéis fotovoltaicos
  - $t_{start(i)}$  – Período de início de funcionamento do aparelho  $i$
  - $O_t(i)$  – Perfil do tempo de operação do aparelho  $i$
  - $p_{A(i,k)}$  – Perfil de carga do aparelho  $i$  no período  $k$
  - $Int_{start(j,t)}$  – Intensidade do aparelho  $j$  no período  $t$
  - $P_{v(m,t)}$  – Valor de potência armazenado no painel fotovoltaico  $m$  no período  $t$
  - $p_{b(j)}$  – Potência máxima do aparelho  $j$  (kW)
  - $A_{base(i,t)}$  – Potência da linha de base do aparelho  $i$  no período  $t$  (kW)
  - $B_{base(i,t)}$  – Potência da linha de base do aparelho  $j$  no período  $t$  (kW)
  - $Z_{base(p,t)}$  – Potência da linha de base do aparelho  $p$  no período  $t$  (kW)
  - $S_{base(m,t)}$  – Potência da linha de base do aparelho  $m$  no período  $t$  (kW)
  - $P_{base(i,t)}$  – Perfil base agregado de todos os aparelhos no período  $t$  (kW)
  - $p_{b(i,t)}$  – Potência do aparelho  $i$  no período  $t$  (kW)
  - $F_{DSO(t)}$  – Flexibilidade requerida pelo DSO no período  $t$
  - $ch_{start(p,t)}$  – Carga/descarga da bateria  $p$  no período  $t$
  - $P_{v(m,t)}$  – Potência armazenada no painel fotovoltaico  $m$  no período  $t$

- $C_{shift}$  – Custos associados aos equipamentos de *shifting*
  - $C_{real}$  – Custos associados aos equipamentos *real time*
  - $C_{bat}$  – Custos associados à bateria
  - $C_i$  – Custo do equipamento  $i$
  - $C_j$  – Custo do equipamento  $j$
  - $C_p$  – Custo do equipamento  $p$
- Preferências do utilizador
    - $Pref_{A(i)}$  – Preferências do utilizador para o aparelho  $i$  do tipo  $A$
    - $Pref_{B(j)}$  – Preferências do utilizador para o aparelho  $j$  do tipo  $B$
    - $t_{allow(i)}$  – Período de início permitido para deslocamento / redução do aparelho  $i / j$
    - $D_{allow(i)}$  – Duração permitida para deslocamento / redução do aparelho  $i / j$
    - $I_{min(j)}$  – Redução da intensidade mínima permitida para o dispositivo  $j$
    - $I_{max(j)}$  – Aumento máximo permitido de intensidade para o dispositivo  $j$
- Variáveis de decisão
    - $t_{new(i)}$  – Novo período de início de funcionamento do aparelho  $i$
    - $p_{new(i,t)}$  – Potência do equipamento  $i$  no período  $t$  depois do reagendamento (kW)
    - $P_{new(t)}$  – Novo perfil agregado no período  $t$
    - $A_{flex(i,t)}$  – Potência do equipamento  $i$  no período  $t$  depois do reagendamento (kW)
    - $Int_{new(j,t)}$  – Nova intensidade do aparelho  $j$  no período  $t$
    - $ch_{new(p,t)}$  – Novo valor de carga e descarga aparelho  $p$  no período  $t$
    - $B_{flex(i,t)}$  – Potência do equipamento  $j$  no período  $t$  depois da redução (kW)
    - $Z_{flex(p,t)}$  – Valor de carga/descarga do equipamento  $p$  no período  $t$  (kW)
    - $P_{flex(i,t)}$  – Novo perfil agregado no período  $t$
    - $F_{agg(t)}$  – Flexibilidade fornecida pelo agregador no período  $t$  (ou seja, diferença entre perfil de base agregado e o novo perfil após a otimização)
- Notação do PSO
    - $l$  – Índice da partícula  $l$
    - $d \in D$  – Índice variável  $d$  no problema  $D$ -dimensional
    - $S_{size}$  – Tamanho do enxame
    - $\vec{x}_l$  – Posição da partícula  $l$
    - $\vec{v}_l$  – Velocidade da partícula  $l$
    - $\vec{p}_{Best\ l}$  – Melhor posição da partícula  $l$
    - $\vec{g}_{Best\ l}$  – Melhor posição global do enxame

➤  $c_1, c_2, w$  – Constantes de aceleração e peso da inércia





# 1. Introdução

## 1.1 Contextualização

Nos últimos anos a União Europeia tem vindo a aumentar a sua preocupação com o impacto ambiental do setor energético. Dessa forma tem tomado medidas para a sustentabilidade energética, estando já traduzida em metas que visam promover energia mais limpa e maior flexibilidade. Estas metas serão atingidas com base em três objetivos estratégicos: a segurança do abastecimento de eletricidade, a proteção ambiental e a promoção da competitividade dos mercados de energia elétrica. Isto fará com que a Europa se torne uma economia sustentável, com baixa emissão de carbono e mais ecológica. Esta liderará o caminho na produção de energia renovável e na luta contra o aquecimento global [1].

No entanto, as energias renováveis possuem um carácter volátil e pelo seu estágio de maturação tecnológica, estão ainda sujeitas a um grande risco regulatório por via da subsídio que exigem. Uma maior quantidade de eletricidade está a ser gerada a partir de energia solar e eólica, e isso está cada vez mais a ser descentralizado em vez de centralizado. Estes desenvolvimentos podem resultar em altos custos para o sistema de energia. Em primeiro lugar, os picos da rede podem ocorrer sendo a rede local incapaz de lidar com isso. O método tradicional para resolver o problema é o reforço da rede, mas é uma opção bastante dispendiosa. Em segundo lugar, o abastecimento e a procura de eletricidade estão a tornar-se mais difíceis de prever por causa do carácter flutuante da energia solar e eólica. Isto pode provocar momentos de falta de energia ou de excesso de energia. Para lidar com estes dois problemas, o sistema elétrico terá que ser mais flexível. A flexibilidade energética é geralmente definida como a quantidade de carga que é possível deslocar ao longo de várias escalas de tempo [2] e irá desempenhar um papel fulcral no novo modelo de mercado energético. No mercado atual, os consumidores são entendidos como elementos passivos, mas com a descentralização da produção de energia o paradigma irá mudar. Os consumidores passarão a ser “*prosumers*” (tanto produtores como consumidores de energia) [3] tornando-se um elemento ativo e essencial no novo design de mercado. Estes novos tipos de consumidores terão nas suas habitações sistemas de produção (ex. produção fotovoltaica) e armazenamento de energia (ex. baterias) onde o veículo elétrico será peça-chave, que deverão estar integrados numa rede inteligente que forneça ao utilizador informação relevante para uma melhoria significativa na eficiência energética de uma determinada habitação/edifício e, por outro lado, uma otimização da gestão energética. Sendo assim, serão necessários recursos que permitam o consumo flexível de eletricidade através da implementação de sistemas inteligentes que possibilitem a monitorização e otimização do consumo energético de forma a que o consumidor saiba quais as cargas que deverá ligar ou desligar mediante a comunicação dos preços de energia.

Do ponto de vista residencial, a flexibilidade pode ser conseguida através de alguns dispositivos, como máquinas de lavar roupa ou máquinas de lavar louça, que são equipamentos cujos perfis de operação podem ser deslocados para outros períodos de

tempo que são convenientes ao operador ou períodos onde o preço da energia é mais baixo, sem nunca negligenciar o conforto do utilizador. Estes tipos de equipamentos são denominados de equipamentos de deslocamento no tempo (*shifting*). Além dos dispositivos com estas características, equipamentos que permitam que o seu consumo seja controlado de forma a ser aumentado ou reduzido também contribuem para a obtenção de flexibilidade residencial. Estes dispositivos em tempo real possuem um baixo grau de flexibilidade, dependendo das necessidades básicas e da prioridade dos consumidores e são denominados de equipamentos em tempo real (*real time*). Estes tipos de ações fazem parte de programas de resposta à procura (*Demand Response*). O Departamento de Energia dos EUA define DR como mudanças no uso de energia elétrica por parte dos utilizadores finais no seu padrão normal de consumo em resposta a mudanças no preço da eletricidade ao longo do tempo, ou a pagamento de incentivos destinados a induzir o menor consumo de eletricidade nas horas em que o preço de mercado grossista é mais elevado ou quando a fiabilidade do sistema é comprometida. DR é um tipo específico de gestão do lado da procura gestão do lado da procura que na literatura anglo-saxónica se refere a *Demand Side Management*, entendido como o conjunto de iniciativas e tecnologias que estimulam os consumidores a otimizar seu uso de energia onde os operadores de energia controlam as necessidades dos consumidores [4]. Para auxiliar programas de DSM, os sistemas de gestão de energia (HEMS) emergem como uma ferramenta essencial para a monitorização e otimização do fluxo e uso de energia, proporcionando aos clientes uma forma de verificar como a potência dos seus dispositivos está a ser utilizada para reduzir o preço da eletricidade com sacrifício mínimo no conforto da habitação [5]–[7]. Portanto, um HEMS geralmente pode ser entendido como um sistema que fornece serviços de gestão de energia para monitorizar e gerir eficientemente a geração, o armazenamento e o consumo de energia em residências inteligentes [8].

Diversos trabalhos estudaram a relação entre DR e HEMS e propuseram algumas técnicas modernas de otimização para esse fim. Em [9] é apresentado um projeto chamado LINEAR, na Bélgica, onde a flexibilidade oferecida pelos participantes-piloto foi objeto de um caso de estudo. Publicações associadas ao projeto dão uma visão sobre a flexibilidade dos aparelhos no projeto LINEAR usando cinco tipos de dispositivos (máquinas de lavar, máquinas de secar, máquinas de lavar louça, termoacumuladores e veículos elétricos).

Em [10] a arquitetura geral do EMS numa rede local (ou seja, uma rede contida na casa do utilizador que conecta os dispositivos digitais de uma pessoa, de vários computadores e os seus dispositivos periféricos a telefones, televisões, sistemas de segurança domésticos e aparelhos inteligentes) e outros dispositivos digitais ligados à rede são introduzidos. Uma formulação matemática é desenvolvida com o objetivo de reduzir as despesas relativas à eletricidade e reduzir a taxa de pico média de energia do EMS na habitação, e um algoritmo genético é implementado para resolver o problema de otimização. No mesmo paradigma em [11] foi usado o algoritmo de *Dijkstra* (um processo passo-a-passo para encontrar o caminho mais curto entre dois vértices em um gráfico ponderado [12]) para facilitar o processo de encontrar a melhor solução que reduza os custos de pico.

Em suma, flexibilidade energética será um elemento essencial num futuro próximo, pois permitirá que o sistema reaja no caso de mudanças, sejam estas previstas ou imprevistas, podendo ainda atuar nos preços da energia e numa utilização mais

eficiente da rede. Este estudo servirá para verificar de que forma a flexibilidade influencia o comportamento dos consumidores, tendo em conta as suas preferências e a sua interação com o operador de energia e quais os benefícios para ambas as partes, inerentes a esta temática.

## 1.2 Objetivos do estudo

- a) **Objetivo geral** – Estudo do escalonamento no tempo de aparelhos de *shifting* e dos consumos de aparelhos *real time* em várias habitações em conjunto com baterias de armazenamento e painéis fotovoltaicos, e o seu impacto para os consumidores, agregadores e BRP's.

Este é o objetivo que caracteriza o propósito do projeto. De forma sucinta, expressa o que vai ser estudado e desenvolvido ao longo da dissertação e quais vão ser os tipos de equipamentos envolvidos no estudo.

- b) **Outros objetivos:**

- Elaboração do modelo matemático no qual os casos de estudo do problema assentam, considerando todos os recursos: restrições dos aparelhos relativamente aos períodos e intensidades de funcionamento; modelação da função objetivo;
- Elaboração do programa em linguagem R;
- Análise dos casos de estudo identificados;

## 1.3 Formulação do problema

Neste contexto, aborda-se a seguinte questão de investigação principal: *até que ponto a otimização de aparelhos de shifting, real time e de baterias de armazenamento numa habitação é importante, do ponto de vista económico, para os consumidores e para o operador de energia?*

Para responder a esta questão, irão ser realizadas inúmeras simulações considerando uma panóplia de cenários com recurso a casos reais, desde habitações com poucos aparelhos que forneçam flexibilidade energética até habitações com inúmeros equipamentos em conjunto com baterias de armazenamento e painéis fotovoltaicos.

## 1.4 Limitações

Entre as limitações do estudo é preciso mencionar que, apesar da metodologia permitir alcançar os objetivos principais, possibilitando a obtenção de resultados satisfatórios que levaram a bom porto aquilo que foi previsto no início do projeto, outras questões que poderiam ser interessantes no estudo tiveram que ser descartadas. Começando pelo facto da investigação apenas utilizar métodos estocásticos em vez de determinísticos, impossibilitando uma exatidão dos resultados finais, obtendo-se por outro lado resultados aproximados. Além disso, em todos os casos de estudo o período máximo nunca foi superior a um dia (24 horas), tendo-se apenas alterado o número de

períodos ao longo do dia (períodos de 15 minutos ou períodos de 1 hora). Tendo ainda em conta os casos de estudo, foram usados poucos agregadores, a rede nunca foi considerada e cada aparelho apenas possuía um perfil de funcionamento. Por fim, limitações técnicas relativas ao portátil impediram a celeridade em casos de estudo com milhares de variáveis, assim como a incapacidade de guardar uma grande quantidade de informação, obrigando a certas alterações em alguns casos de estudo.

## 1.5 Calendarização

O estudo efetuado para o trabalho relativo ao “Modelo de gestão de flexibilidade de equipamentos domésticos” teve uma duração de aproximadamente 9 meses e foi elaborado no âmbito da Unidade Curricular de Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia. Este trabalho culminou no desenvolvimento de uma ferramenta informática em R e, graças ao Grupo de Investigação em Engenharia e Computação Inteligente para a Inovação e o Desenvolvimento (GECAD) do Instituto Superior de Engenharia do Porto, grupo reconhecido mundialmente na área da investigação científica, foram fornecidas todas as ferramentas de suporte para a realização deste estudo. A Figura 1 mostra as tarefas que foram concluídas durante este período.

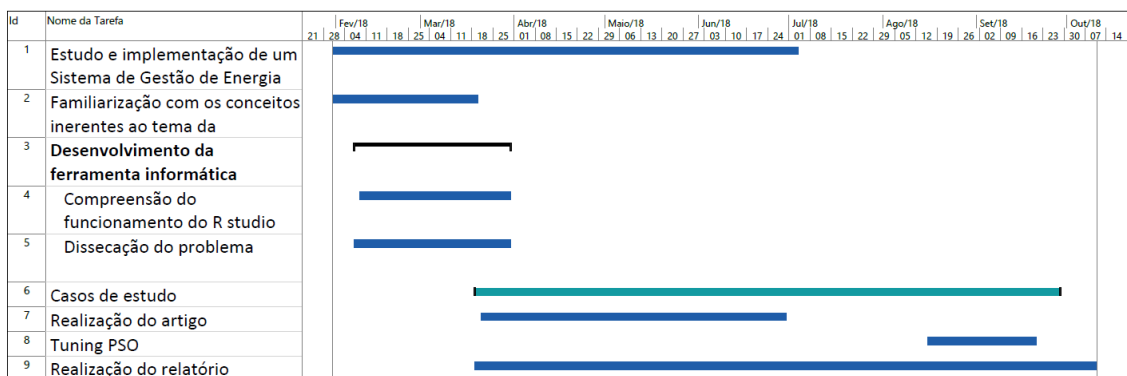


Figura 1 – Calendarização da Dissertação

## 1.6 Organização do relatório

A presente dissertação é composta por 5 capítulos, sendo estes descritos de forma sucinta em seguida:

- Capítulo 1: apresenta uma contextualização do tema abordado, a definição do problema, as limitações, os objetivos principais a atingir, a calendarização do trabalho desenvolvido e a organização estrutural da tese.
- Capítulo 2: apresentação do estado da arte onde são abordados temas como: *smart homes*, flexibilidade energética, *demand response*, sistemas de armazenamento e modelos de agregação.

- Capítulo 3: análise de diferentes conceitos matemáticos e de otimização fundamentais para a formulação do problema apresentado na tese.
- Capítulo 4: aplicação da metodologia a casos de estudo de forma a comprovar a viabilidade do estudo.
- Capítulo 5: principais conclusões retiradas deste trabalho, principais contributos e propostas para trabalhos futuros na área.



# 2. Estado da arte

## 2.1 Smart Home

*Smart home*, ou casa inteligente, é uma habitação que incorpora sistemas avançados de automação para fornecer aos residentes uma monitorização e controlo sofisticados sobre as funções do edifício, que envolve incorporar inteligência às habitações para conforto, assistência médica, segurança, proteção e conservação de energia, bem como muitas outras funções como ilustra a figura seguinte [8].



Figura 2 – Smart home adaptado de [13]

### 2.1.1 Sistema de gestão de energia

Para esta dissertação a função que mais interessa é a da gestão de energia. Um sistema de gestão de energia pode ser definido como um sistema que fornece serviços de gestão de energia a fim de monitorizar e gerir eficientemente a geração, o armazenamento e o consumo de eletricidade em residências inteligentes [8]. As principais funções dos sistemas inteligentes de gestão de energia residenciais são monitorizar, controlar e otimizar o fluxo e o uso de energia. Estes sistemas são constituídos por 5 partes.

A primeira parte é constituída pelos aparelhos de medida, os denominados *smart meters* que são medidores de energia avançados que medem o consumo de energia do consumidor e fornecem informação tanto para o utilizador como para o operador de energia [6].

A segunda parte é um dispositivo de deteção, mais concretamente um conjunto de sensores que detetam corrente, tensão, temperatura, movimento, luz e ocupação. Estes detetam os parâmetros desejados em diferentes locais e enviam sinais para um sistema

centralizado. Usando esses parâmetros, os aparelhos inteligentes podem ser monitorizados, controlados ou agendados para operar nos períodos desejados [6].

A terceira parte é relativa às tecnologias da informação e comunicação. Estas são o pino de ligação que conecta o sensor, os medidores e os dispositivos à unidade de monitorização ou controlo. Ambas as tecnologias de comunicação com e sem fios são desenvolvidas para a integração de vários dispositivos domésticos. Wi-Fi, redes, *Home-Plug* e *Z-wave* são algumas das principais tecnologias que facilitam redes de áreas residenciais [6].

A quarta parte é a integração de aparelhos inteligentes. Estes fornecem aos utilizadores residenciais uma visão do seu uso de energia, além de permitir uma maior eficiência energética. São aparelhos domésticos com inteligência integrada e sistemas de comunicação que permitem que os dispositivos sejam monitorizados e controlados remotamente [6].

Por fim, a quinta parte, é o sistema de gestão de energia. As características de cada sistema variam consoante o fabricante, tendo o consumidor que adquirir a solução que melhor satisfaz as suas necessidades. No entanto, no geral, estes sistemas têm as seguintes funcionalidades:

- Primeiro, uma visão geral informativa sobre as várias formas gráficas relativas ao uso de energia;
- Em segundo lugar, as funções avançadas que incluem informações, automação e controlo tanto localmente como por terceiros;
- Terceiro, sistemas integrados com todas as características das funções avançadas, mas também inclui a possibilidade de previsão e agendamento de cargas e produção local a níveis domésticos;
- Finalmente, as operações automatizadas fornecem aos utilizadores a possibilidade de determinar a prioridade dos equipamentos domésticos e da produção local.

Na Figura 3 apresenta-se a arquitetura geral de um sistema de gestão de energia residencial [8] [6].

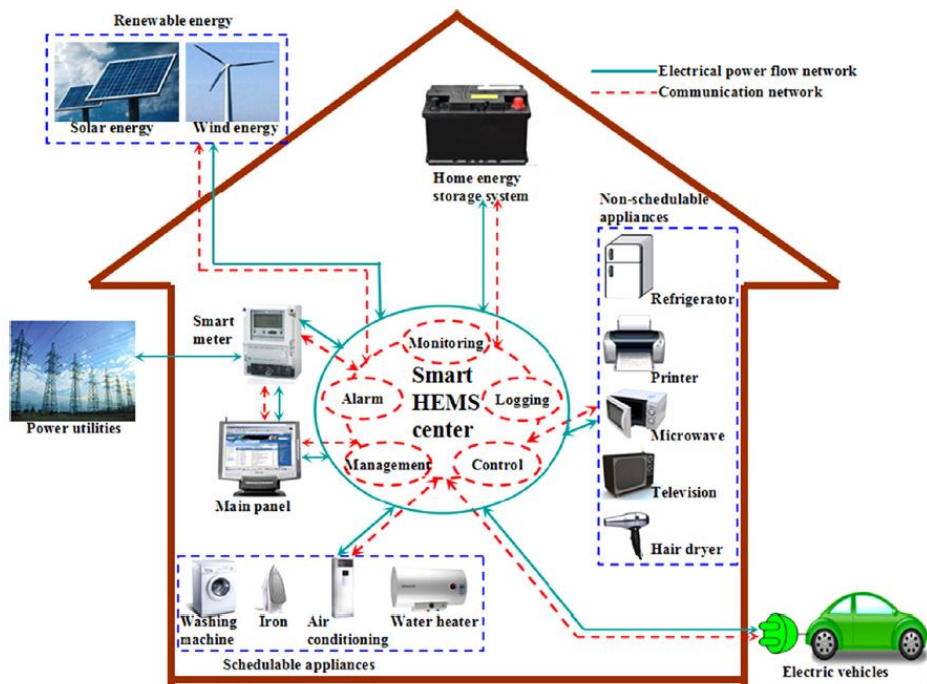


Figura 3 – Arquitetura geral de um sistema de gestão de energia residencial [8]

## 2.2 Sistemas de armazenamento de energia

O armazenamento de energia é importante para nivelamento das cargas, veículos elétricos, sistemas de energia solar, fontes de energia ininterrupta e sistemas de energia em locais remotos. A capacidade de armazenar energia nos momentos em que o fornecimento excede a procura será crucial para a utilização efetiva das energias renováveis, pois estas possuem um carácter imprevisível por estarem dependentes das condições climáticas, da época do ano e da hora do dia. Estes sistemas permitem manter o equilíbrio entre a produção e o consumo e possuem inúmeras vantagens, tanto para as empresas de transmissão e distribuição, como para os utilizadores, ou mesmo para os produtores de energia renovável [14]. Como vantagens apresentam-se as seguintes:

- Estabilidade da rede;
- Possibilidade de usar diferentes recursos na produção de energia;
- Redução da necessidade de reservas de contingência;
- Adiamento da instalação ou atualização de linhas ou subestações de transporte de distribuição;
- Regulação de frequência, reserva girante e outros serviços auxiliares;
- Diminuição dos picos de potência pedida à rede provocados pela elevada procura de energia;
- Qualidade e fiabilidade no abastecimento;
- Facilidade de integração de energias renováveis;

- Diminuição dos custos para o utilizador devido à inutilização de energia nos períodos de pico [15].

### 2.3 Demand Response

Segundo o *U.S. Department of Energy*, DR pode ser definido como: mudanças no uso de energia elétrica por parte dos utilizadores finais no seu padrão normal de consumo em resposta a mudanças no preço da eletricidade ao longo do tempo, ou a pagamento de incentivos destinados a induzir o menor consumo de eletricidade nas horas em que o preço de mercado grossista é mais elevado ou quando a fiabilidade do sistema é comprometida [4]. DR inclui todas as modificações intencionais nos padrões de consumo de eletricidade de clientes finais que se destinam a alterar o tempo, o nível de procura instantânea ou o consumo total de eletricidade [16]. DR é um tipo específico de DSM, entendido como o conjunto de iniciativas e tecnologias que estimulam os consumidores a otimizar seu uso de energia onde os operadores de energia controlam as necessidades dos consumidores [5]. Sendo assim, os sistemas de energia podem beneficiar do deslocamento do consumo de energia dos períodos de pico para outros períodos como demonstra a Figura 4.

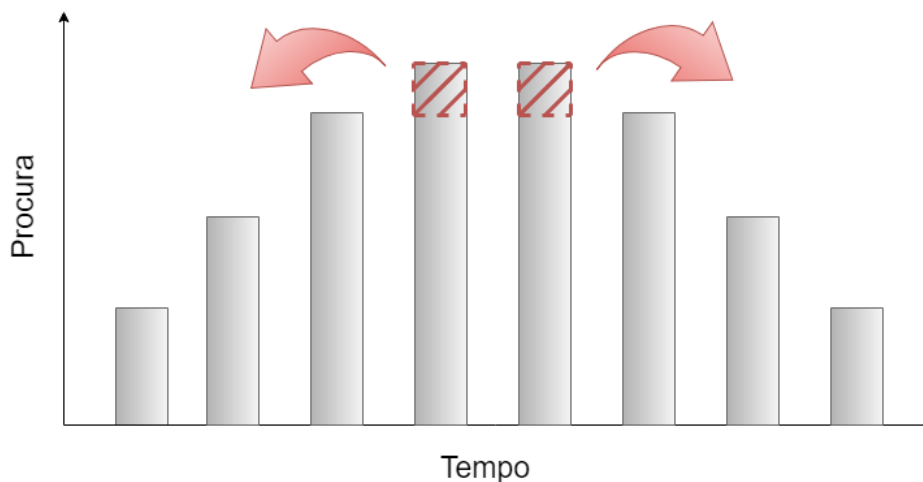


Figura 4 – Ilustração da suavização da procura de eletricidade em períodos de pico, adaptado de [17]

Embora a maioria das ações de DR envolvam a mudança do uso de eletricidade dos horários de pico para os horários fora de pico, ou simplesmente menor uso de energia nas horas de pico, a DR também pode significar o aumento do uso de eletricidade. O diagrama abaixo apresenta os diferentes efeitos que os incentivos de DR podem ter [18].

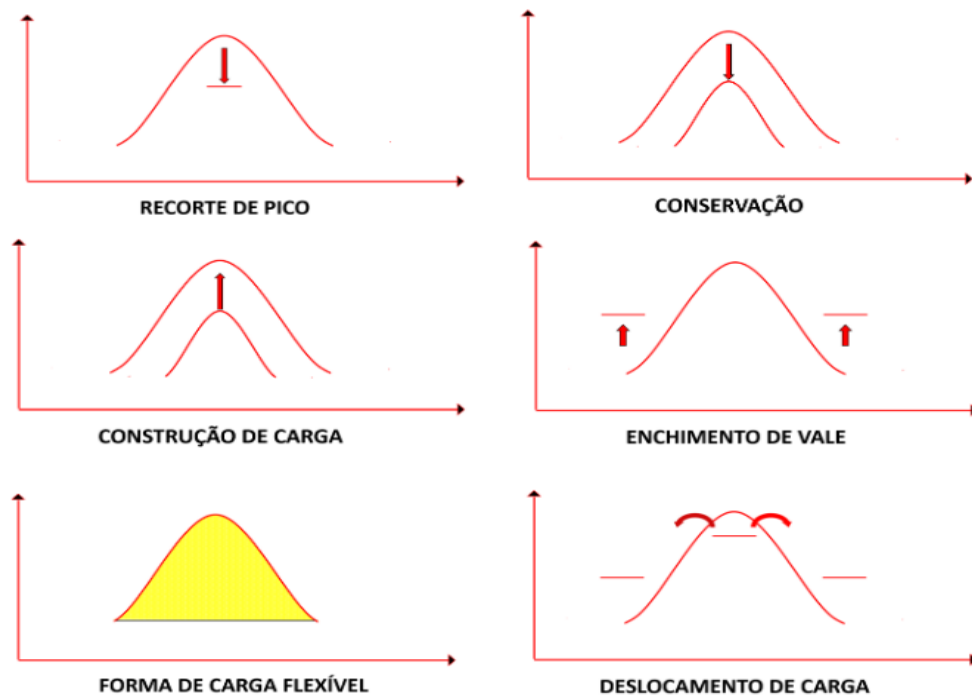


Figura 5 – Diferentes efeitos que o DR pode causar, adaptado de [18]

Através da figura anterior, enquanto a DR na grande maioria dos casos diminui a procura geral nas horas de ponta e tende na maioria dos casos a diminuir o consumo geral, pode, no entanto, encorajar maior uso fora dos horários de pico (por exemplo, *valley filling* e *load shifting*). Portanto, DR trata de otimizar o uso do sistema elétrico e não apenas de reduzir o uso de energia [18].

Sendo assim, este conceito introduz uma série de benefícios não apenas para o consumidor, mas também para o mercado e para a rede. O seu benefício principal é melhorar a eficiência dos recursos utilizados na produção de eletricidade devido ao alinhamento entre os preços da energia dos clientes e o valor que eles colocam na energia. Este aumento de eficiência cria uma variedade de benefícios, que se dividem em quatro grupos:

- **Benefícios financeiros do participante** que são as poupanças e os pagamentos de incentivos obtidos pelos clientes que ajustam a sua procura de energia em resposta a tarifas energéticas variáveis no tempo ou programas baseados em incentivos.
- **Benefícios financeiros em todo o mercado**, diminuição dos preços do mercado grossista devido à DR que evita a necessidade de serem usadas centrais de produção energia mais dispendiosas durante períodos de elevada procura, gerando custos de produção e preços baixos para todos os compradores de eletricidade.
- **Benefícios em termos de fiabilidade** que se traduzem numa segurança operacional e poupanças financeiras que resultam da diminuição da probabilidade e consequências de interrupções forçadas que impõem custos financeiros e inconvenientes aos clientes.

- **Benefícios no desempenho do mercado** relativos à capacidade da DR atenuar a possibilidade dos fornecedores de exercer o poder de mercado elevando os preços da energia significativamente acima dos custos de produção [4].

### 2.3.1 Programas de DR

Os programas de DR são geralmente classificados tendo em conta os incentivos oferecidos sendo subdivididos em 2 categorias: **Programas Baseados em Incentivos** e **Programas Baseados em Preços**. Nos programas baseados em incentivos, os clientes participantes recebem um pagamento para reduzir as suas cargas, por vezes solicitadas pelo detentor do programa, desencadeada por um problema de fiabilidade da rede por ou preços elevados da eletricidade. Por outro lado, nos programas baseados em preços, são oferecidas aos clientes tarifas variáveis no tempo (p.ex.: *Time of Use* e *Critical Peak Pricing*) que refletem o valor e o custo da energia em diferentes períodos de tempo. Munidos desta informação, os clientes tendem a usar menos energia nos períodos em que os preços da energia são elevados [19].

No entanto, os autores do artigo [20] sugerem outras duas classificações além das referidas anteriormente. DR baseada em mecanismos de controlo que está subdividida em programas centralizados e programas distribuídos. Além desta classificação, sugerem ainda DR baseada em variáveis de decisão. Esta está subdividida em DR baseada em gestão de energia e DR baseado em escalonamento de tarefas. Na Figura 6 apresenta-se um quadro resumo dos diferentes tipos de programas de DR.

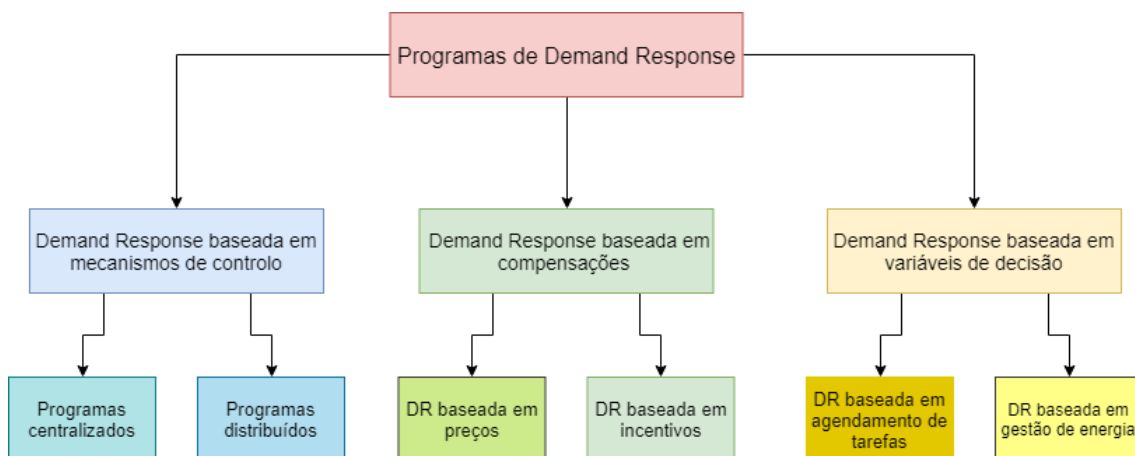


Figura 6 – Programas de DR, adaptado de [20]

Nesta dissertação foram usados programas baseados em mecanismos de controlo e em variáveis de decisão, nomeadamente **programas centralizados**, **DR baseada em gestão de energia**, **DR baseada em incentivos** e **DR baseada em escalonamento de tarefas**. Por essa razão estes programas serão explicados com maior detalhe nos parágrafos seguintes.

Relativamente ao modo centralizado, os consumidores comunicam diretamente com o operador de energia, sem interagirem uns com os outros. Num esquema centralizado, o procedimento de DR é monitorizado e coordenado por um controlador central, que recolhe informações sobre a procura dos consumidores, e as decisões de DR são feitas para o agendamento da procura. As decisões de agendamento poderão ser realizadas por um agregador [20]. A Figura 7 exemplifica o funcionamento deste modo.

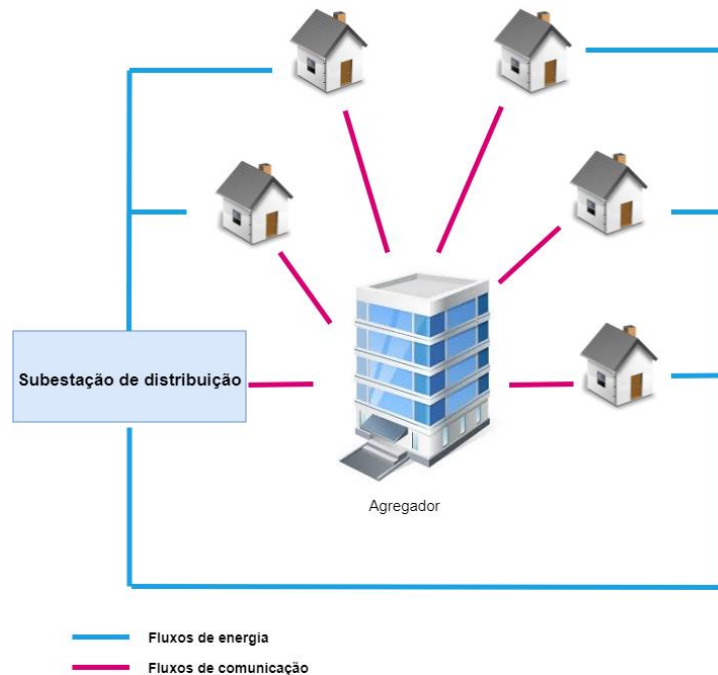


Figura 7 – Controlo de mecanismo centralizado, adaptado de [20]

A gestão centralizada de cargas é uma solução efetiva para o controlo de aparelhos termostáticos controlados, edifícios e estações de carregamento para PHEVs. Controladores centrais são usados em *microgrids* isoladas que foram introduzidas como uma abordagem coordenada. Estes são usados para facilitar a penetração de unidades de produção distribuída na rede de serviços públicos [20].

Por outro lado, os clientes em esquemas de DR baseados em incentivos recebem pagamentos fixos ou variáveis no tempo, para motivar a redução do uso de eletricidade durante períodos de stress do sistema, mas também estão sob restrições específicas ou são penalizados por não participarem no programa. A inscrição e a resposta do cliente são voluntárias, embora alguns desses programas penalizem os clientes que falham na resposta contratual quando os eventos são declarados. Os programas de DR baseados em incentivos podem ser subdivididos em programas clássicos e programas baseados no mercado, enquanto podem ser oferecidos nos mercados retalhista e grossista. Os consumidores que participam nos programas clássicos baseados em incentivos recebem pagamentos pela participação, geralmente créditos na faturação ou taxas de desconto. Em programas baseados no mercado, os participantes são recompensados com dinheiro pelo

seu desempenho, dependendo da redução do uso de eletricidade durante condições críticas [20].

No que toca a DR baseada em gestão de energia, o principal objetivo destes programas é reduzir o consumo de energia de cargas específicas, de modo que o consumo total de energia em horas de ponta máxima seja reduzido. Isto é realizado controlando a operação do aparelho para que este não possua consumo de energia ou um consumo reduzido durante o stress do sistema. Por exemplo, num dia de verão, um sistema de ar condicionado pode ser ajustado para 25 ° C em vez de 22 ° C, permitindo, assim, que menos energia seja consumida e as pessoas poderão sentir-se igualmente confortáveis (Figura 8). Para motivar os consumidores a controlar o consumo de energia dos seus aparelhos, reduções na fatura de energia ou outros incentivos são fornecidos pelo operador de energia. Relativamente a DR baseada no escalonamento de tarefas, a sua principal função é controlar o tempo de ativação de cargas. São considerados dois tipos de cargas: cargas de execução obrigatória (ou não programáveis) que não podem ter qualquer atraso de ativação e cargas programáveis que podem ser interrompidas, ajustadas ou deslocadas para outros intervalos de tempo. O seu principal objetivo é reduzir o consumo de energia no horário de procura máxima, deslocando as cargas para as horas fora do horário de pico. Também neste programa de DR, a mudança do tempo de ativação deve ser seguida por reduções de contas de eletricidade ou provisões de incentivo [20]. Na figura seguinte são fornecidos exemplos de escalonamento de tarefas e métodos DR de gestão de energia.

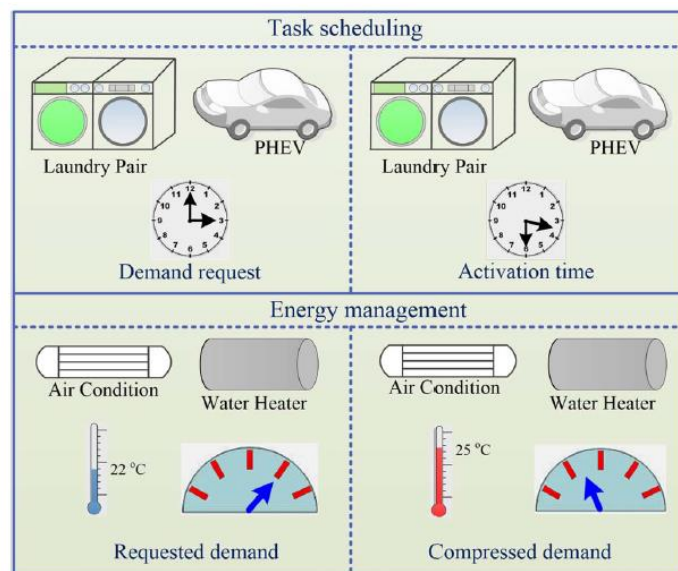


Figura 8 – Exemplos de escalonamento de tarefas e métodos DR de gestão de energia [20]

## 2.4 Flexibilidade

As energias renováveis possuem um carácter flutuante derivado ao seu estágio de maturação tecnológica, estão ainda sujeitas a um grande risco regulatório por via da subsídio que exigem. Atualmente uma grande quantidade de energia está a ser gerada a partir de energia solar e eólica, e isso está cada vez mais a ser descentralizado em vez de centralizado. Estes desenvolvimentos podem resultar em altos custos para os sistemas de energia. Em primeiro lugar, os picos da rede podem ocorrer sendo a rede local incapaz de lidar com isso. O método tradicional para resolver o problema é o reforço da rede, mas é uma opção bastante dispendiosa. Em segundo lugar, o abastecimento e a procura de eletricidade estão a tornar-se mais difíceis de prever por causa do carácter flutuante da energia solar e eólica. Isto pode provocar momentos de falta de energia ou de excesso de energia. Para lidar com estes dois problemas, o sistema elétrico terá que ser mais flexível.

Desta forma, entende-se por flexibilidade de um sistema energético como a capacidade de um sistema responder a mudanças na procura e geração de energia variável [21]. Atualmente e no futuro, este conceito será peça chave no bom funcionamento dos sistemas e mercados de energia e a sua introdução levará a um conjunto de benefícios. A flexibilidade poderá ajudar a reduzir os custos gerais do sistema e preços do consumidor, através de uma operação mais eficiente do sistema de energia. Poderá ainda melhorar os impactos ambientais das operações no sistema de energia através de melhor otimização da resposta à procura e uso mais eficiente da transmissão de energia [22].

A flexibilidade pode ser caracterizada em três dimensões: primeiro, a potência de saída absoluta (MW); em segundo lugar, a velocidade da mudança de potência ou a taxa de rampa (MW / min); e em terceiro lugar, a duração dos níveis de energia (MWh) [23] como ilustra a Figura 9.

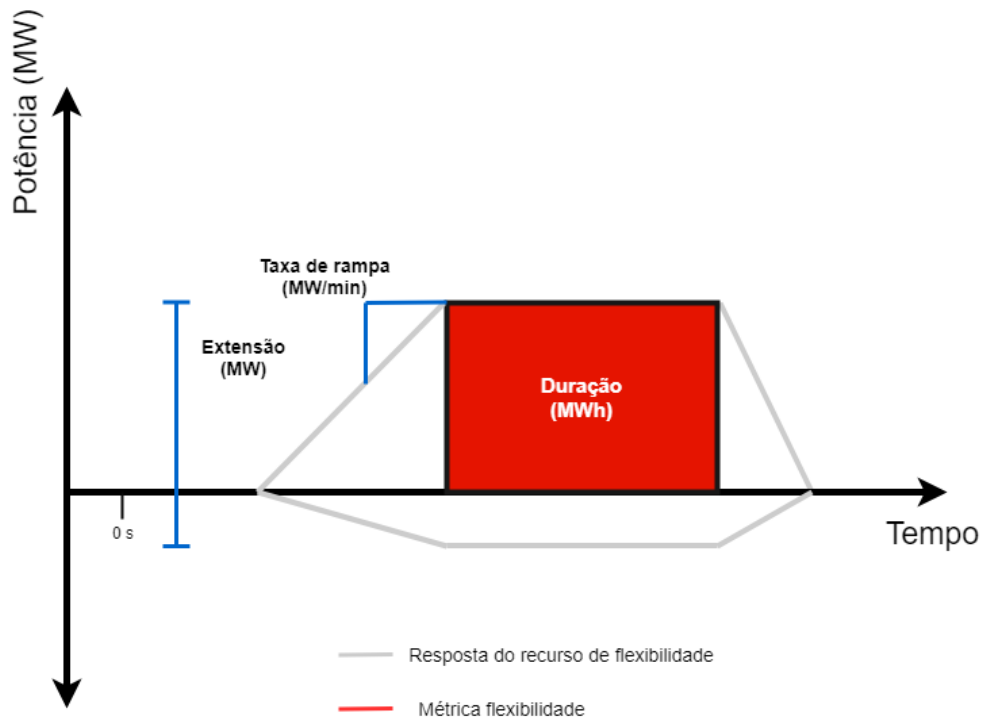


Figura 9 – Ilustração das três dimensões para flexibilidade: faixa, taxa de rampa e duração, adaptado de [23]

Os recursos que têm um intervalo maior entre o *output* mínimo e máximo de MW podem fornecer flexibilidade de forma a se ajustar a uma faixa mais ampla de condições do sistema de energia. Os recursos que podem alterar rapidamente o seu *output* ou podem ser facilmente ligados ou desligados têm uma taxa de rampa mais alta e são mais flexíveis porque ajustam-se mais rapidamente a mudanças nas condições do sistema de energia. Recursos que podem fornecer energia por períodos mais longos aumentam a flexibilidade, pois podem solucionar perturbações prolongadas ou interrupções [23].

#### 2.4.1 Mercados locais de flexibilidade

A fim de tornar o sistema de energia ao mesmo tempo sustentável, fiável e acessível, tanto a gestão de energia como da rede não pode continuar a ser baseada na abordagem tradicional de cima para baixo. Em vez disso, é necessária uma abordagem mais ascendente com um maior envolvimento dos operadores de rede regionais (locais) e dos utilizadores finais proativos (*prosumers*). Isso pode ser conseguido através da introdução de mercados locais. Tais mercados podem permitir uma contribuição mais ativa dos consumidores nos sistemas de energia [24]. De uma forma geral estes mercados possibilitam:

- Equilibrar a procura local para combinar fontes renováveis variáveis em condições de congestionamento;
- Gerir estrangulamentos nas redes de transmissão e distribuição;
- Otimizar de portfólios para agentes do mercado, tendo em consideração as necessidades da rede em momentos específicos;
- Adiar o investimento na rede se a flexibilidade puder ser efetivamente utilizada como parte do planeamento da rede do *Distribution System Operator* (DSO) [25].

Um mercado local de flexibilidade pode ser definido como uma plataforma de comércio de energia para vender e comprar flexibilidade em áreas geograficamente limitadas, como bairros e pequenas cidades [26]. Atualmente ainda não está estabelecida uma estrutura oficial para este tipo de mercado, apenas hipóteses sugeridas por diversas entidades. De seguida serão apresentadas algumas *frameworks* retiradas de artigos científicos relativos a esta temática.

Os autores do artigo [26] sugerem a existência de um *Smart Energy Service Provider* (SESP) que é o provedor da plataforma de mercado local e agregador de comunidades. Ao mesmo tempo, o SESP é um *Balance Responsible Party* (BRP) do ponto de vista regulatório, porque realiza propostas nos mercados grossistas. Para executar esses mercados, os comerciantes locais precisam da Plataforma SESP para enviar informações, negociar flexibilidade e agendamentos. Na Figura 10, estão representados os quatro agentes desta estrutura de mercado [26].

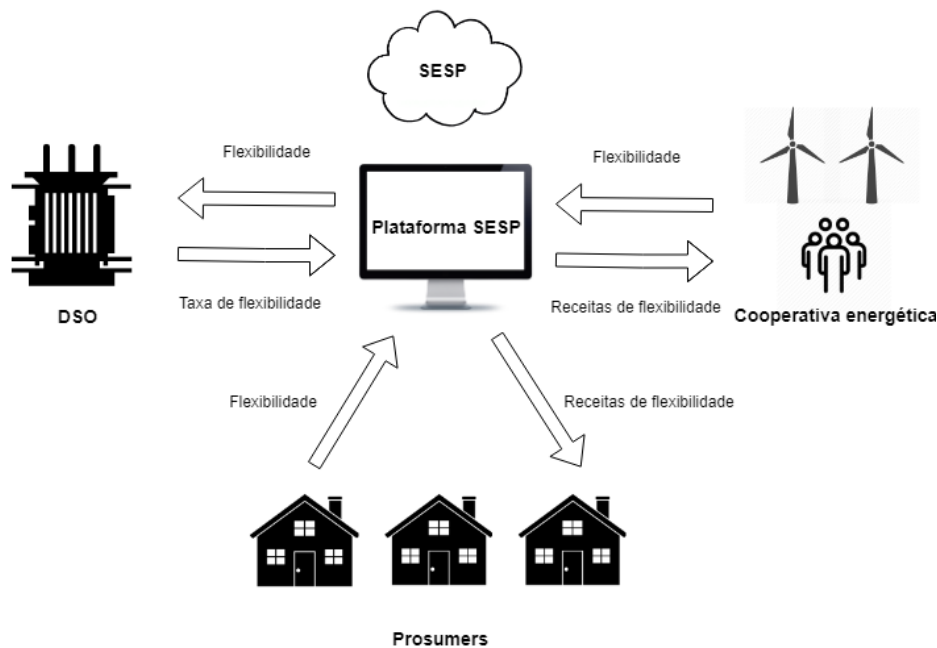


Figura 10 – Visão geral dos agentes do mercado de flexibilidade local, adaptado de [26]

- DSO adquire flexibilidade e a compensação económica correspondente;
- O SESP atua como fornecedor da plataforma de mercado que recebe ofertas e solicitações de flexibilidade;
- Operadores de energia e *prosumers* que realizam ofertas de flexibilidade [26].

No artigo [25] são sugeridos três *designs* para os mercados locais de flexibilidade:

1. Contratação de flexibilidade através dos mercados grossistas já existentes (*day-ahead*, *intraday* e *balancing*) em termos iguais à produção.

Os participantes submetem propostas que consistem no local, quantidade e preço. Uma plataforma de mercado centralizada calcula o equilíbrio da oferta e procura, assim como o estado da rede. O preço nodal resultante consiste em três componentes: energia, congestionamento e perdas. Esta abordagem, no entanto, foi criticada por falta de transparência, pois os preços específicos são frequentemente difíceis de explicar.

Os mecanismos de compensação são necessários quando os agregadores que não têm responsabilidade no equilíbrio afetam o perímetro de um BRP. Conflitos podem surgir quando uma ativação de flexibilidade viola um contrato ou compromisso pré-existente no mercado *day-ahead*. Desvios no cronograma *day-ahead* submetido, são geralmente penalizados através de preços de desequilíbrio, que o BRP deve pagar ao operador do sistema. No caso em que a flexibilidade pertencente ao perímetro de um BRP é ativada por outro participante, como o DSO ou um agregador, o BRP não deve ser penalizado. Portanto, deve haver alguma compensação entre a parte que ativará a flexibilidade e o BRP, apropriada à direção do desvio.

## 2. Criação de um mercado novo e separado de troca de flexibilidade local.

Este *design* pode refletir o mercado grossista em dimensões temporais, contratuais e de compensação de preços, mas possui uma componente espacial específica. A Figura 11 mostra as interações entre os operadores do sistema, o mercado e os provedores de serviços de flexibilidade.

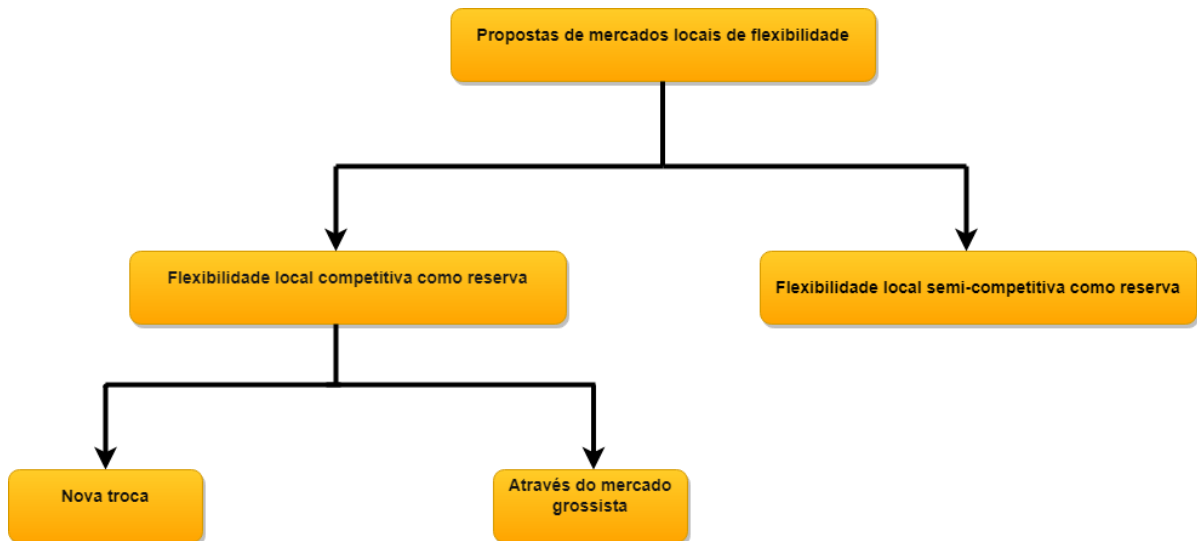


Figura 11– Interação entre compradores e vendedores por intermédio de trocas num mercado local [25]

O DSO e o *Transmission System Operator* (TSO) devem coordenar a operação da rede e o uso dos recursos. Estes podem emitir pedidos de serviços de flexibilidade aos mercados quando necessário pela rede. Esses pedidos devem conter informações sobre o tempo, a quantidade e a localização dos serviços. Da mesma forma, os participantes do mercado podem colocar pedidos de flexibilidade quando eles têm necessidades de equilíbrio numa área específica. O mercado combina pedidos de serviços com recursos disponíveis. Uma comunicação eficiente entre os mercados garante que os recursos sejam reservados apenas uma vez. Os *Flexibility Service Providers* (FSP's) oferecem serviços aos mercados, diretamente ou através de um agregador. Para evitar o risco da troca local competir por recursos com o mercado grossista em condições de congestionamento, ele deve ser projetado como um mercado hierárquico.

## 3. Contratação de flexibilidade como reserva de sistema.

Os TSOs tradicionalmente adquirem serviços de suporte da rede para garantir a operação confiável e segura do sistema. Os serviços de controlo de frequência de carga são geralmente fornecidos em três intervalos de tempo após um desvio de frequência variando de 10 s a 15 min. Os mercados de equilíbrio e de reserva são operados pelo mesmo operador de mercado que administra o mercado *day-ahead* ou diretamente pelo TSO. A flexibilidade pode ser pensada como um recurso para situações de emergência. Uma quantidade de "flexibilidade técnica" pode ser definida pelo DSO. Desta forma, uma certa quantidade de flexibilidade disponível é facilmente acessível quando necessário. Da mesma forma, a flexibilidade pode ser adquirida através de contratos de conexão

limitados, onde a capacidade não é garantida durante um certo número de horas por período. Estas duas opções não são consideradas soluções de mercado, mas sim decisões arbitrárias que o operador do sistema tem em mãos e são apropriadas apenas para situações de emergência.

## 2.5 Agregação

### 2.5.1 Importância da agregação

Como já foi referido anteriormente, com a necessidade de mudança estrutural do mercado energético, novos agentes de mercado irão surgir. Do ponto de vista do sistema, DR só é útil se um grande número de recursos dispersos de DR (consumidores flexíveis) puder fornecer uma resposta coordenada aos seus requisitos. Assim, a coordenação de recursos de DR por uma entidade agregadora, ou agregador de DR, é essencial para facilitar a interação entre os consumidores (aumentando o seu poder de negociação) e o operador de sistema independente. Neste contexto, um agregador de DR poderia participar nos mercados grossistas de eletricidade como intermediário entre o sistema independente e os consumidores flexíveis, oferecendo recursos de DR agregados de um grande número de consumidores e coordenando a sua resposta. A agregação oferece uma oportunidade de explorar o potencial de flexibilidade dos consumidores e facilitar o seu acesso ao mercado. A agregação de DR pode ser feita por diferentes agentes de mercado, como fornecedores ou agregadores, e deve primeiro beneficiar os consumidores [27].

### 2.5.2 Definição de agregação

Segundo [28], agregação pode ser definida como o ato de agrupar agentes distintos num sistema de energia (consumidores, produtores ou *prosumers*) para atuar como uma única entidade ao envolver-se em mercados de energia ou vender serviços para o (s) operador (es) do sistema. Os autores de [28] adotam a definição de [29] de agregador, definindo-o como uma entidade que atua como intermediário entre os utilizadores finais de eletricidade, os operadores energéticos e os participantes do sistema de energia que desejam atender a esses utilizadores finais ou explorar os serviços prestados por esses operadores.

### 2.5.3 Agregadores de *demand side response*

O Agregador *demand side response* (DSR) é uma empresa independente especializada na participação do lado da procura de eletricidade. Na prática, o agregador de DSR contrata os locais de procura individuais (consumidores industriais, comerciais ou residenciais) e agrega-os para operar como um único provedor de DSR para:

- Operador do Sistema de Transmissão (TSO),
- *Balance Responsible Party* (BRP);

- Operador do Sistema de Distribuição (DSO).

Os locais de procura individuais podem usar uma combinação de aumento de geração no local e/ou desligar ou redução de processo para fornecer o serviço de redução de procura de energia ativa. O agregador DSR recebe uma percentagem do valor criado pelo consumo evitado para reduzir as procuras de pico, equilibrar a geração intermitente, fornecer um serviço de balanceamento ou aumentar a segurança do fornecimento [30].

#### 2.5.4 Valor da agregação e categorias

Em [28] é respondida à questão de a quem a agregação cria valor, fornecendo dois tipos de valor económico: sistema e privado. A agregação tem valor de sistema quando aumenta a eficiência económica do sistema de energia como um todo. O valor privado é um aumento no bem-estar económico de um único agente ou subconjunto de agentes. A criação de valor privado pode ou não alinhar-se com a criação de valor do sistema. A agregação também pode simplesmente levar a uma transferência de receitas entre os agentes de mercado.

Ainda em [28] são distinguidas três grandes categorias de agregação. Em primeiro lugar, as agregações com valor “fundamental” ou “intrínseco” não dependem de regulamentações específicas, do nível de consciencialização de mercado dos consumidores ou de tecnologias implementadas no sistema de energia, e serão permanentes ou quase permanentes no tempo. Agregações com valor “transitório” contribuem para o melhor funcionamento do sistema de energia sob condições no presente e num futuro próximo. No entanto, o valor das agregações transitórias pode diminuir à medida que as condições técnicas, administrativas ou reguladoras melhorem. Finalmente, as agregações com valor apenas “oportunista” emergem em resposta a “falhas” normativas ou de design de mercado. Devido a compensações inerentes aos princípios regulatórios, não há um sistema regulatório ideal único. As regulamentações no design dos sistema e operações são intrinsecamente afetadas por informações imperfeitas ou assimétricas, restrições tecnológicas, interferências políticas e princípios regulatórios conflitantes, etc. Esta realidade abre a porta a diferentes níveis de arbitragem. Como indicado na Figura 12, as agregações que criam um valor transitório podem existir tanto agora (sob os atuais contextos regulatórios e tecnológicos) como no futuro (sob regulamentos avançados, mas “imperfeitos” e tecnologias avançadas).

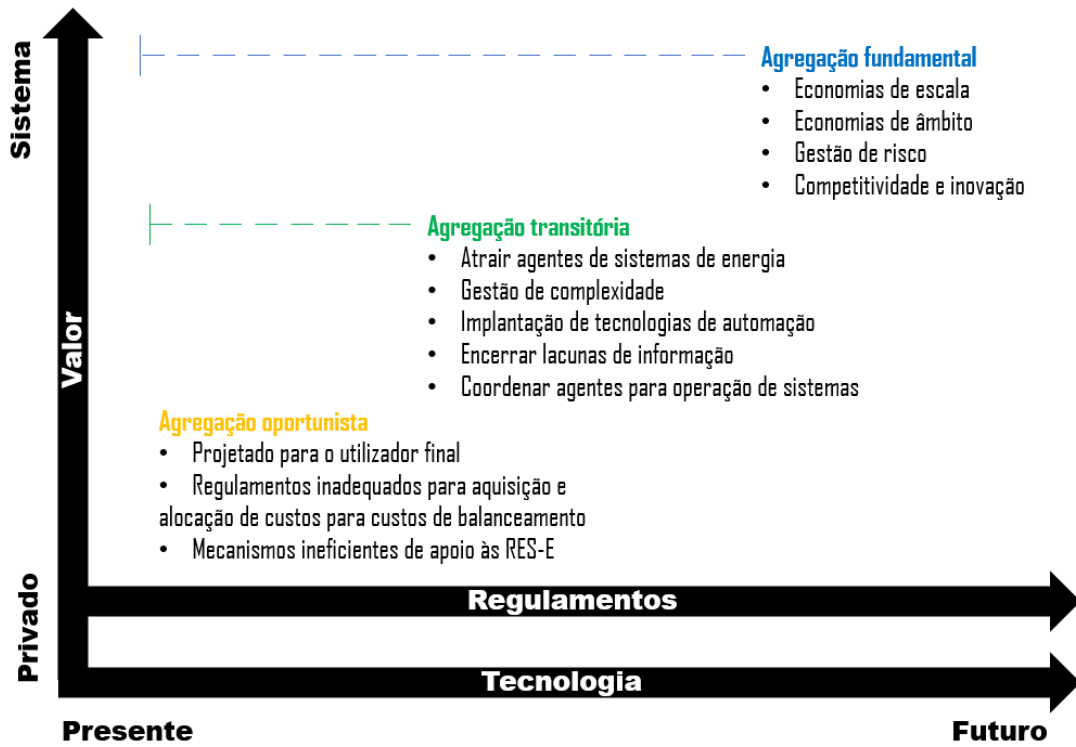


Figura 12 – Valor dos agregadores baseado em tecnologia e contextos regulatórios, adaptado de [28]



# 3. Formulação matemática do problema e método de resolução

As técnicas e os métodos de otimização possuem aplicação em muitos campos para lidar com vários problemas práticos. Atualmente, a sociedade é motivada a alcançar sempre os melhores resultados e da maneira mais eficiente. À luz dos avanços nos sistemas de computação, as técnicas de otimização tornaram-se cada vez mais importantes e populares em diferentes atividades, onde a engenharia não é exceção. Sendo assim, técnicas e métodos de otimização tornam-se fulcrais não só no cotidiano, mas também no mundo da engenharia, uma vez que os custos de investimento, eficiência, poupanças de energia, entre outros, são aspetos críticos. Em particular, as diferentes áreas da engenharia têm que desenvolver métodos de otimização matemáticos e computacionais para melhorar a eficiência dos processos, ou seja, desenvolver ferramentas que auxiliem na eleição das melhores alternativas.

## 3.1 Problemas de otimização

Uma das definições mais simples para otimização é “fazer mais com o menos”. Lockhart e Johnson definem otimização como “o processo de encontrar o valor ou condição mais efetiva ou favorável” [31].

Matematicamente, Griva, Nash e Sofer [32] expõem que, atendendo às características da função objetivo e de todo o conjunto de restrições, o problema pode ser:

- i. Linear, caso a função objetivo e todas as restrições intrínsecas ao problema forem lineares, em relação às variáveis;
- ii. Não linear, caso a função objetivo ou qualquer uma das restrições associadas for não linear, em relação às variáveis.

Dias [33] acrescenta ainda que o problema de otimização pode também ser qualificado consoante o tipo de variáveis de decisão:

- i. Problema de otimização discreta ou combinatória, quando as variáveis de decisão podem assumir valores discretos, ou seja, valores inteiros (por exemplo binários);
- ii. Problema de otimização contínua, no caso de as variáveis de decisão assumirem valores reais;

- iii. Problema de otimização mista, em que podemos ter tanto variáveis de decisão contínuas como discretas no mesmo problema.

Nesta dissertação os problemas de otimização serão do tipo mista.

Problemas de otimização combinatória ou discreta surgem quando é necessário selecionar de um conjunto discreto de dados, o melhor subconjunto que satisfaz determinados critérios, normalmente designados de restrições. Em termos práticos, consiste em determinar em primeiro lugar o conjunto das soluções do problema e depois selecionar desse conjunto a melhor solução [34]. Quase sempre o processo de seleção da melhor solução é feito em simultâneo com a determinação do conjunto solução. Dado que o conjunto solução de problemas reais é normalmente demasiado extenso para ser completamente explorado, o grande desafio da otimização combinatória consiste em determinar em tempo útil uma boa solução para o problema [34].

Desta forma os problemas de otimização combinatória podem ser resolvidos da seguinte forma:

- Levantamento dos requisitos do problema;
- Desenvolvimento do modelo do problema:
  - Definição das Variáveis;
  - Definição das Restrições;
  - Definição da Função de Otimização.
- Desenvolvimento do Método de Pesquisa;
- Verificação e Validação [34].

Na otimização contínua, as variáveis no modelo podem assumir um intervalo contínuo de valores, geralmente números reais. É esta possibilidade que distingue a otimização contínua da otimização discreta ou combinatória, na qual as variáveis podem ser binárias (restritas aos valores 0 e 1), inteiras (para o qual somente valores inteiros são permitidos) ou objetos mais abstratos extraídos de conjuntos com muitos elementos [35].

Geralmente, os problemas de otimização contínua são resolvidos usando algoritmos que geram uma sequência de valores das variáveis, conhecidas como iterações, que convergem para uma solução do problema. Ao decidir como passar de uma iteração para outra, o algoritmo faz uso do conhecimento obtido em iterações anteriores e informações sobre o modelo na iteração atual, possivelmente incluindo informações sobre sua sensibilidade a perturbações nas variáveis. A natureza contínua do problema permite que as sensibilidades sejam definidas em termos de primeira e segunda derivadas das funções que definem os modelos [35].

### 3.2 Formulação matemática do problema

O problema pode ser modelado como PSO na qual o agregador tentará corresponder a um pedido de flexibilidade do DSO / BRP recebendo uma compensação por cada unidade de energia modificada em relação a um perfil de linha de base.

Neste modelo, seja  $A = \{1, \dots, N_I\}$  o conjunto de todos os dispositivos com recursos de deslocamento (*shifting*),  $B = \{1, \dots, N_J\}$  o conjunto de todos os dispositivos com recursos de redução (*real time devices*),  $Z = \{1, \dots, N_P\}$  o conjunto de todas as baterias e sendo  $S = \{1, \dots, N_M\}$  o conjunto de todos os painéis fotovoltaicos, registrados no agregador EMS. Cada aparelho com capacidade de deslocamento é caracterizado por  $A_i = [t_{start(i)}, O_{t(i)}, p_{A(i,k)}] \in A$ , onde  $t_{start(i)}$  representa o período inicial do programa de funcionamento do equipamento  $i$ ,  $O_{t(i)}$  é o tempo de duração do programa de funcionamento do aparelho  $i$ , e  $p_{A(i,k)}$  é o perfil de potência de um determinado programa de funcionamento do aparelho  $i$  definido no intervalo  $k = \{1, \dots, O_{t(i)}\}$ . Por outro lado, cada dispositivo com capacidades de redução é caracterizado por  $B_j = [p_{B(j)}, Int_{start(j,t)}] \in B$ , onde  $p_{B(j)}$  é a potência máxima do dispositivo  $j$ , e  $Int_{start(j,t)}$  é a intensidade de linha de base do aparelho  $j$  no tempo  $t$ . Cada bateria, é caracterizada por  $Z_p = ch_{start(p,t)} \in Z$ , em que  $ch_{start(p,t)}$  representa o valor de carga e descarga da bateria  $p$  no período  $t$  e os painéis fotovoltaicos, caracterizados por  $S_m = P_{v(m,t)} \in S$ , em que  $P_{v(m,t)}$  representa o valor de potência armazenada no painel fotovoltaico  $m$  no período  $t$ .

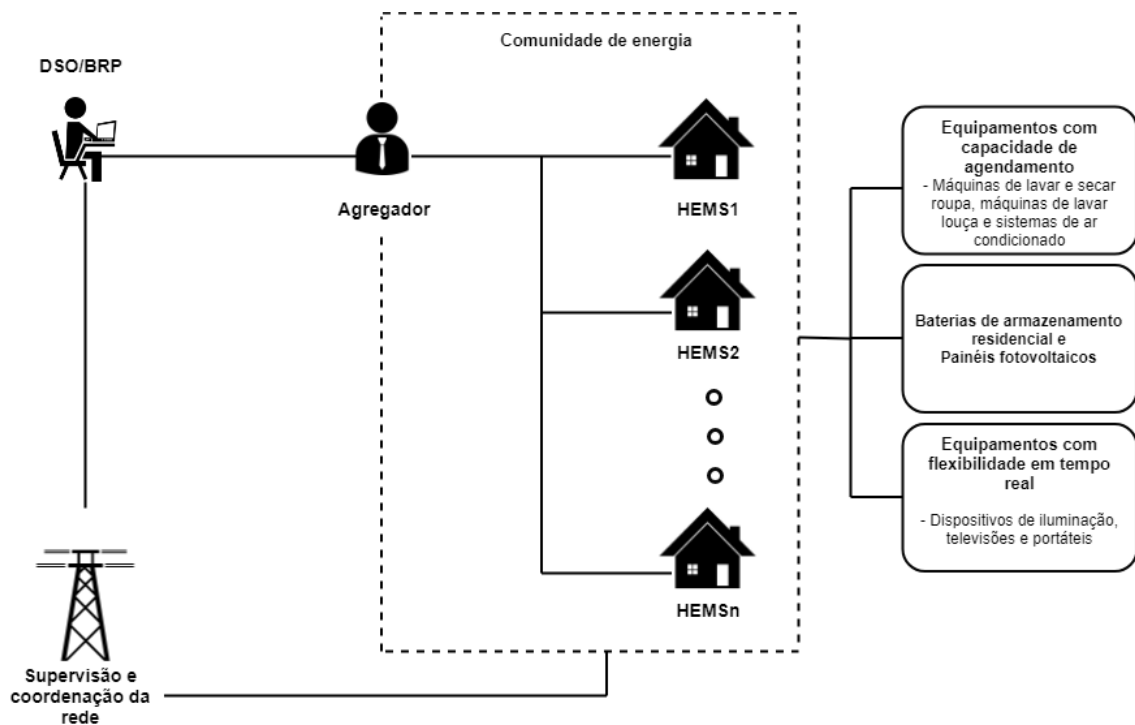


Figura 13 – Rede de distribuição na qual um agregador controla a gestão de dispositivos com consumo flexível

Para maximizar os lucros do agregador combinando o pedido de flexibilidade do DSO / BRP, a função objetivo pode ser modelada como a minimização da diferença quadrada entre a flexibilidade oferecida pelo agregador e a flexibilidade solicitada pelo DSO / BRP, somando os custos associados aos aparelhos de *shifting* e *real time* da seguinte forma:

$$\text{Minimizar } f(\vec{x}) = \min \sum_{t=1}^{N_t} (F_{agg(t)} - F_{DSO(t)})^2 + C_{shift} + C_{real} + C_{bat} \quad (1)$$

onde  $F_{DSO}$  é a flexibilidade (ou seja, o aumento ou a diminuição de energia) exigida pelo DSO/BRP no tempo  $t$ , e  $F_{agg(t)}$  é a flexibilidade provisionada pelo agregador depois de programar o deslocamento ou a redução dos aparelhos disponíveis ou os novos valores de carga e descarga da bateria e  $C_{shift}$ ,  $C_{real}$  e  $C_{bat}$  significam os custos associados aos equipamentos de *shifting*, de *real time* e da bateria, respetivamente. Notar que quanto menor este valor, mais flexibilidade é provisionada para o DSO, o que de facto representa receitas para o agregador e para os utilizadores que participam neste serviço de flexibilidade.

A flexibilidade fornecida pelo agregador (ou seja,  $F_{agg(t)}$ ) é definida como a diferença entre o perfil da linha de base e o novo perfil agendado da seguinte forma:

$$F_{agg(t)} = P_{base(t)} - P_{flex(t)} \quad (2)$$

onde  $P_{base(t)}$  é o perfil de linha de base dos aparelhos disponíveis. Importa salientar que esta linha de base deve ser determinada por um terceiro, uma vez que representa o consumo de energia esperado dos dispositivos se nenhum replaneamento ou modificação for realizada. Pelo contrário,  $P_{flex(t)}$  representa o perfil de consumo de energia após o replaneamento dos dispositivos. Portanto, a diferença entre o perfil de linha de base e o novo perfil planeado representam a flexibilidade provisionada pelo agregador.

As equações (5-9) representam a determinação do perfil da linha de base:

$$P_{base(t)} = \sum_{i=1}^{Ni} A_{base(i,t)} + \sum_{j=1}^{Nj} B_{base(j,t)} + \sum_{p=1}^{Np} Z_{base(p,t)} - \sum_{m=1}^{Nm} P_{v(m,t)} \quad (3)$$

$$A_{base(i,t)} = \begin{cases} p_{A(i,t-t_{start(i)+1})} & \text{se } t_{start(i)} \leq t \leq t_{start(i)} + O_t(i) - 1 \\ 0 & \end{cases} \quad (4)$$

$$B_{base(j,t)} = p_{B(j)} * Int_{start(j,t)} \quad (5)$$

$$Z_{base(p,t)} = ch_{start(p,t)} \quad (6)$$

$$S_{base(m,t)} = P_{v(m,t)} \quad (7)$$

onde Eq. (3) capta a potência agregada de todos os aparelhos num determinado momento  $t$ . Eq. (4) representa a potência de deslocar o dispositivo  $i$  num determinado momento  $t$  e depende diretamente do início da linha de base  $t_{start(i)}$ , que é um parâmetro de entrada. Em relação aos aparelhos com capacidade de redução, a Eq. (5) capta a potência da linha de base do aparelho  $j$  no tempo  $t$  considerando uma dada intensidade de linha de base  $Int_{start(j,t)}$ . No caso das baterias a Eq. (6) capta o valor de carga e descarga da bateria  $p$  no período  $t$ . No que diz respeito aos painéis fotovoltaicos a Eq. (7) representa o valor de potência armazenada no painel fotovoltaico  $m$  no período  $t$ . De notar que as variáveis  $t_{start(i)}$ ,  $Int_{start(j,t)}$ ,  $ch_{start(p,t)}$  e  $P_{v(m,t)}$  são parâmetros de entrada fornecidos por um terceiro, uma vez que representam o funcionamento normal no caso de nenhuma gestão estar presente. Portanto, o agregador é responsável por determinar os novos períodos iniciais  $t_{new(i)}$  para os aparelhos com consumo flexível, novas intensidades  $Int_{new(j,t)}$  para os aparelhos com capacidade de redução e novos valores de carga e descarga  $ch_{new(p,t)}$  para a bateria de armazenamento. As Eq. (8-11) representam a determinação do novo perfil de consumo:

$$P_{flex(t)} = \sum_{i=1}^{Ni} A_{flex(i,t)} + \sum_{j=1}^{Nj} B_{flex(j,t)} + \sum_{p=1}^{Np} Z_{flex(p,t)} - \sum_{m=1}^{Nm} P_{v(m,t)} \quad (8)$$

$$A_{flex(i,t)} = \begin{cases} p_{A(i,t-t_{new(i)+1})} & \text{se } t_{new(i)} \leq t \leq t_{new(i)} + O_t(i) - 1 \\ 0 & \end{cases} \quad (9)$$

$$B_{flex(j,t)} = p_{B(j)} * Int_{new(j,t)} \quad (10)$$

$$Z_{flex(p,t)} = ch_{new(p,t)} \quad (11)$$

onde Eq. (8) representa o novo perfil de consumo após a determinação dos períodos iniciais ótimos  $t_{new(i)}$  (Eq. 9), intensidades  $Int_{new(j,t)}$  (Eq. 10) para todos os dispositivos geridos pelo agregador e  $ch_{new(p,t)}$  (Eq. 11) os novos valores de carga e descarga todas as baterias de armazenamento residencial. A formulação matemática também está sujeita a algumas restrições relacionadas aos limites impostos pelos utilizadores e restrições técnicas.

Supõe-se que os utilizadores tenham acesso a uma interface HEMS na qual possam configurar as suas preferências. Por exemplo, os utilizadores podem definir períodos específicos nos quais o agregador pode ter acesso ao controlo de dispositivos. Para modelar isto, usou-se a seguinte notação:  $Pref_{A(i)} = [t_{allow(i)}, D_{allow(i)}]$  é definida pelo utilizador, especificando o período de início permitido  $t_{allow(i)}$  e a duração  $D_{allow(i)}$  duração do acesso ao controlo pelo agregador. Com esses parâmetros, os períodos de mudança dos dispositivos são restringidos da seguinte forma:

$$t_{allow(i)} \leq t_{new(i)} \leq t_{allow(i)} + D_{allow(i)} \quad (12)$$

Da mesma forma, as intensidades dos aparelhos do tipo B só podem ser modificadas nos períodos permitidos pelo utilizador. Além disso, neste caso, os estes também podem configurar a redução / aumento máximo permitido do consumo de tais dispositivos. A modelação pode ser feita da seguinte forma:  $Pref_{B(j)} = [t_{allow(i)}, D_{allow(i)}, Int_{start(j,t)}, I_{min(j)}, I_{max(j)}]$  e as restrições são desenvolvidas:

$$I_{min(j)} \leq Int_{new(j,t)} \leq I_{max(j)} \quad (13)$$

$$Int_{new(j,t)} = \begin{cases} Int_{new(j,t)} & \text{se } t_{allow(i)} \leq t \leq t_{allow(i)} + D_{allow(i)} \\ Int_{start(j,t)} & \end{cases} \quad (14)$$

### 3.3 Particle Swarm Optimization (PSO)

Devido à complexidade do problema (derivado à possível otimização em grande escala quando um grande número de dispositivos é considerado), adotou-se o PSO como o principal método computacional para resolver o problema de otimização. A implementação foi, como dito anteriormente, realizada na linguagem R usando o pacote “*psoptim CRAN-R package1*”. Modelos não lineares são ideais para serem manipulados por meta heurísticas uma vez que os *solvers* de programação não linear de *open source* são escassos e tipicamente ineficazes para problemas em grande escala. Por outro lado, meta heurísticas implementadas em *software open source* podem obter soluções quase ótimas sem exigir o investimento em *software* e integrações caras.

O PSO é uma técnica de otimização estocástica de base populacional desenvolvida por Dr. Eberhart e Dr. Kennedy em 1995, inspirada no comportamento social de um bando de aves ou cardume de peixes. O PSO é sem dúvida uma das heurísticas mais poderosas na literatura, demonstrando capacidades satisfatórias para otimização global e problemas complexos. [36], [37] Este é semelhante a um algoritmo genético, na medida em que o sistema é inicializado com uma população de soluções aleatórias. Um enxame de partículas de  $S_{size}$  representa as soluções que se movem em torno de um espaço de pesquisa  $D$  - dimensional. A posição da partícula  $l$  é representada por  $\vec{x}_l = (x_{l1}, x_{l2}, \dots, x_{lD})$  que é um vetor que codifica uma solução de um problema. Uma função objetivo é usada para medir o desempenho de uma posição, avaliando, dessa forma, quão boa é a posição em relação a outras partículas. As partículas movem-se com uma certa velocidade  $\vec{v}_l = (v_{l1}, v_{l2}, \dots, v_{lD})$  que representa variações das variáveis contidas em  $\vec{x}_l$ . A posição de cada partícula é definida por limites variáveis do problema no intervalo  $[x_{min}, x_{max}]^D$ . As velocidades também são limitadas por  $[v_{min}, v_{max}]^D$  limitando as variações que uma variável pode sofrer em cada iteração. As partículas no enxame desenvolvem a sua posição usando a sua própria memória e o conhecimento das partículas vizinhas. Esse processo é capturado pelos principais operadores do PSO da seguinte forma:

$$\vec{v}_{l,G+1} = w + \vec{v}_l + c_1 * r_1 * (\vec{p}_{Best\ l} - \vec{x}_l) + c_2 * r_2 * (\vec{g}_{Best\ l} - \vec{x}_l) \quad (15)$$

onde Eq. (15) capta a velocidade atualizada da partícula  $l$  utilizando a sua própria informação (isto é, a sua posição actual  $\vec{x}_l$  e a sua melhor posição encontrada  $\vec{p}_{Best}$ ) e a posição da partícula global melhor encontrada (isto é,  $\vec{g}_{Best}$ ). O operador principal do PSO possui alguns parâmetros de controlo que afetam a convergência do algoritmo, ou seja, o fator de inércia  $w$ , e as constantes de aceleração  $c_1$ ,  $c_2$ . Além disso,  $r_1$  e  $r_2$  são números aleatórios definidos no intervalo  $(0, 1)$  para fornecer alguns recursos de diversidade ao operador. Estudos preliminares sugeriram valores de  $c_1 = c_2 = 2$  e um peso de inércia  $w = 0.5 + rand/2$ .

A nova posição para a próxima iteração  $G + 1$  é calculada com a Eq. (16).

$$\overrightarrow{x_{l,G+1}} = \overrightarrow{x_l} + \overrightarrow{v_{l,G+1}} \quad (16)$$

O PSO tem sido amplamente estudado e várias variantes têm sido empregadas sob diferentes tipos de problemas e domínios. Nesta dissertação, usa-se o PSO clássico como uma prova de conceito, já que nosso objetivo principal é propor um modelo para a provisão de flexibilidade, em vez de desenvolver uma meta-heurística moderna para esse fim. Mais à frente nesta dissertação, irá ser abordado o *tuning* dos parâmetros do PSO de forma a obter-se os melhores resultados possíveis aquando da otimização. Na Figura 14 encontra-se esquematizado o funcionamento geral do PSO para esta dissertação.

### 3.4 Codificação de partículas PSO para provisão de flexibilidade

Um aspeto fundamental dos algoritmos baseados em populações é a codificação das soluções. Dependendo do problema, as partículas / vetores devem conter todas as informações associadas a uma solução e devem ser avaliadas numa função *fitness* para medir seu desempenho.

Para o problema específico abordado, uma determinada solução  $\vec{x}$  deve conter todos os novos períodos de início de funcionamento de dispositivos de *shifting* (tipo A), as novas intensidades de dispositivos *real time* (tipo B) e valores de carga e descarga das baterias de armazenamento residencial (tipo Z).

As informações relacionadas com aparelhos do tipo A podem ser codificadas num vetor:

$$\overrightarrow{x_{shift}} = [t_{new(1)}, t_{new(2)}, \dots, t_{new(N_I)}] \quad (17)$$

onde  $\overrightarrow{x_{shift}}$  contém as variáveis de decisão  $t_{new(i)}$  correspondentes ao novo período de início de operação do aparelho  $i \in A$ .

Por outro lado, as informações referentes aos aparelhos do tipo B podem ser codificadas num vetor:

$$\overrightarrow{x_{int}} = [(Int_{new(1,1)}, Int_{new(1,N_T)}), \dots, (Int_{new(N_J,N_T)})] \quad (18)$$

onde  $\overrightarrow{x_{int}}$  contém as variáveis de decisão  $Int_{new(j,t)}$  correspondentes às novas intensidades do aparelho  $j$  no período  $t$ .

Por fim, as informações relacionadas com aparelhos do tipo Z podem ser codificadas num vetor:

$$\overrightarrow{x_{bat}} = [ch_{new(1,1)}, ch_{new(1,2)}, \dots, ch_{new(2,1)}, \dots, ch_{new(N_p, N_T)}] \quad (19)$$

onde  $\overrightarrow{x_{bat}}$  contém as variáveis de decisão  $ch_{new(p,t)}$  correspondentes aos novos valores de carga e descarga do aparelho  $j$  no período  $t$ .

Os três vetores definidos podem ser concatenados num vetor de posição de partícula  $\vec{x} = (\overrightarrow{x_{shift}}, \overrightarrow{x_{int}}, \overrightarrow{x_{bat}})$ , que contém todos os novos períodos de deslocamento, intensidades e cargas e descargas de uma solução. Tal vetor  $\vec{x}$  pode, portanto, ser avaliado na função de *fitness* equivalente à função objetivo na Eq. (1).

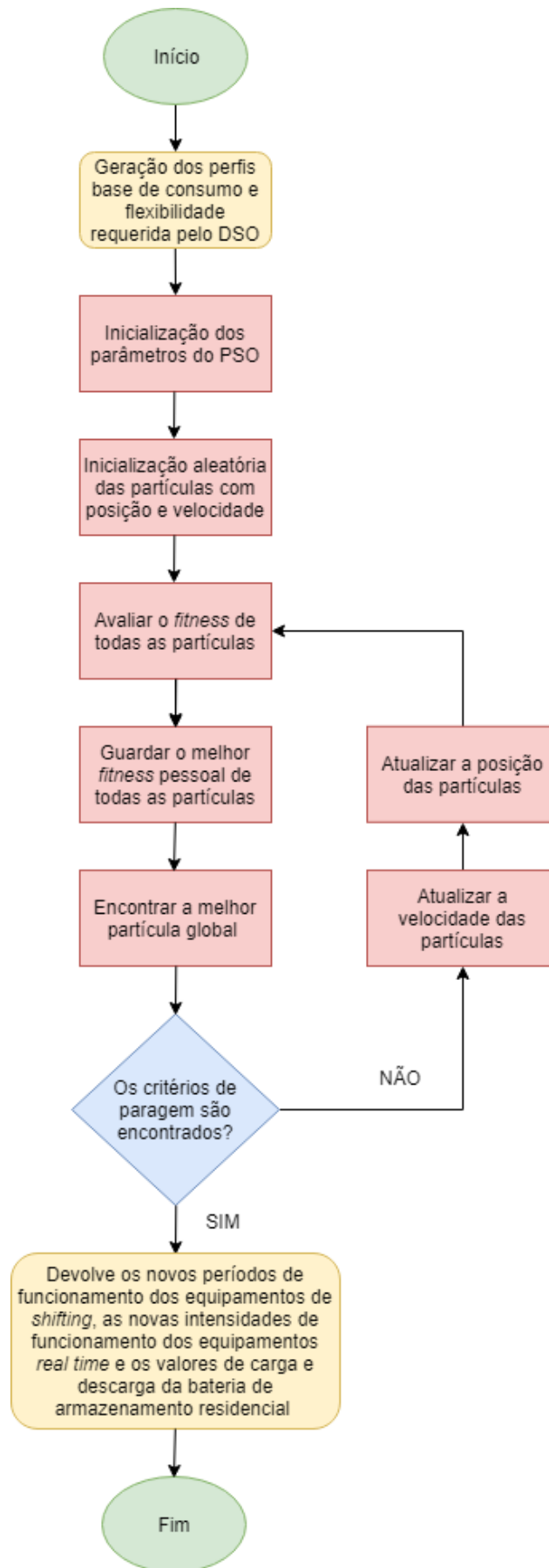


Figura 14 – Esquema geral de funcionamento do PSO

# 4. Casos de estudo

## 4.1 Introdução

Ao longo deste capítulo é avaliada a metodologia proposta nesta tese, apresentada no capítulo 1, através de várias simulações considerando diferentes cenários.

Os dois primeiros casos de estudo (caso de estudo 0 e 1) apenas consideram equipamentos de *shifting*, apenas variando entre si o número de dispositivos em estudo. O caso de estudo 0 tem como objetivo fornecer ao leitor uma visão muito simplista da metodologia em estudo, sendo de fácil compreensão.

O terceiro caso de estudo (caso de estudo 2) contempla não só, equipamentos de *shifting*, mas também equipamentos de *real time*. Além da introdução de um novo tipo de equipamento, o número de variáveis passou de algumas dezenas para centenas tornando a simulação muito mais complexa.

O objetivo do caso de estudo 3 é verificar a contribuição de cada aparelho para as compensações financeiras quando são introduzidos novos equipamentos como a bateria de armazenamento residencial, o termoacumulador e o painel fotovoltaico. Além disso serão ainda, estudados os parâmetros de otimização do PSO, tendo sido efetuado o seu *tuning*.

Por fim, no caso de estudo final serão os estudados os tempos de simulação de maneira a melhorar a sua eficiência e qual o impacto na contribuição de cada equipamento nas compensações financeiras quando se introduz milhares de aparelhos.

Com a introdução de novos os equipamentos, a complexidade do problema aumenta. A formulação matemática apresentada em 3.2 é geral, ou seja, é uma formulação que considera a complexidade do problema até ao máximo. Isto é, no caso do estudo 0 que apenas possui equipamentos de *shifting*, o perfil base é apenas composto por equipamentos desse tipo. Portanto nesse caso de estudo a Eq. (3) é composta apenas por equipamentos de *shifting*. Assim como, a Eq. (1) que modeliza a função objetivo, que considera custos na sua formulação, mas esses custos apenas são introduzidos pela primeira vez no caso de estudo 3. Desta forma, a formulação matemática apresentada é adaptada conforme as características de cada caso de estudo.

## 4.2 Caso de estudo 0

### 4.2.1 Formulação do problema 0

O problema considera um HEMS com o objetivo de obter flexibilidade energética para um agregador usando eletrodomésticos com consumo flexível. O HEMS faz parte de *smart homes* e é geralmente definido como um sistema que fornece serviços de gestão de energia a fim de monitorizar e gerir eficientemente a geração, o armazenamento e o consumo de eletricidade em residências inteligentes e consiste em 5 funções: alarme, gestão, monitorização, registo e controlo [8]. O agregador comunica diretamente com o utilizador residencial por meio do HEMS, havendo uma interação entre o agregador e o utilizador. O agregador recolhe a flexibilidade individual de alguns utilizadores e entrega-os ao DSO. Os utilizadores residenciais alteram os seus padrões de perfil através de controlo direto de carga (*direct load control*) e o agregador compensa financeiramente ou fornece contratos aos utilizadores que aceitam a mudança de perfil. Neste caso específico, o HEMS é conectado a um medidor inteligente e aos aparelhos de *shifting*. Tal como [12] explica, este tipo de aparelhos são totalmente flexíveis e podem ser ligados quando o preço da energia é mais baixo. No caso estudo 0, serão utilizados 3 tipos de dispositivos de *shifting* (máquina de lavar roupa, máquina de secar e máquina de lavar louça). De seguida apresenta-se um diagrama com o funcionamento do HEMS.

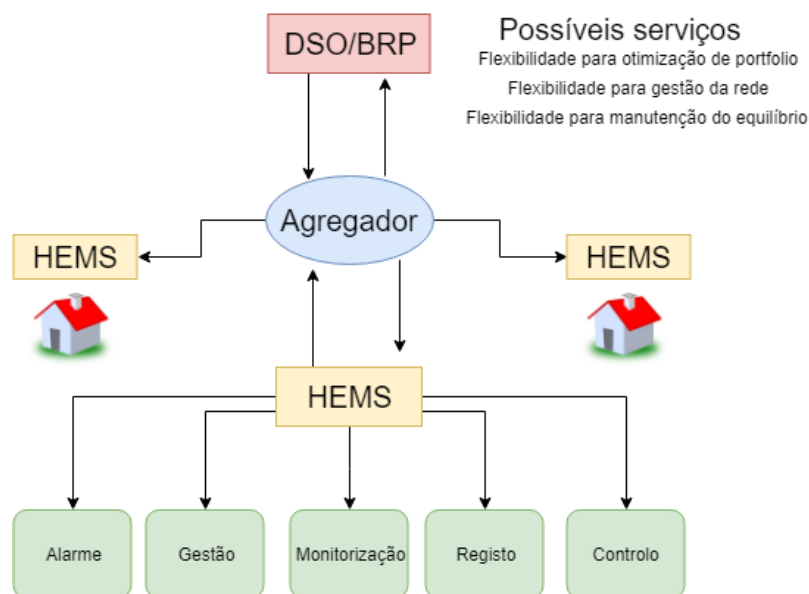


Figura 15 – Diagrama do HEMS

#### 4.2.2 Caso de estudo

A ideia básica inerente ao modelo prestado será explicada usando um caso de estudo muito simples, considerando  $I = 3$  equipamentos e uma solicitação de flexibilidade por um agregador num horizonte temporal de  $T = 21$ . As seguintes características são identificadas:

- Dados de entrada (*inputs*): Perfil base dos equipamentos (Figura 16) determinado por  $A_i = [t_{start(i)}, O_{t(i)}, p_{A(i,k)}]$  e Flexibilidade pedida pelo agregador realizado no intervalo  $T = 21$  (Figura 16);

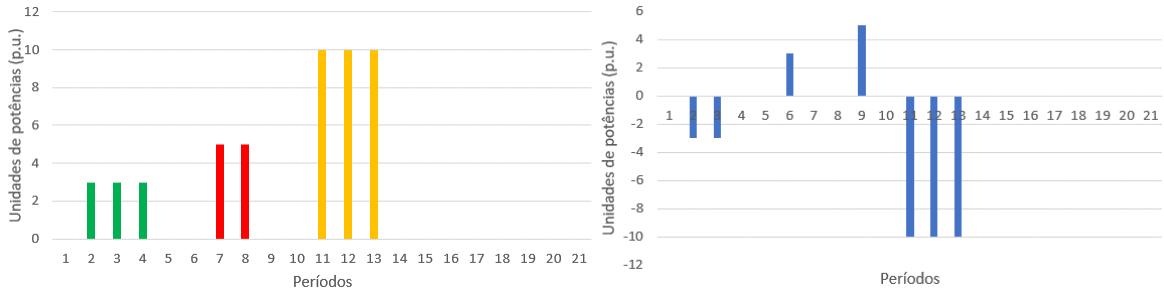


Figura 16 – Dados de entrada do programa, perfil base (esquerda) e flexibilidade requerida pelo DSO (direita)

- Dados de saída (*outputs*): Novos períodos  $t_{new(i)}$  onde deverão ser alocados os equipamentos através de uma otimização do modelo apresentado e Flexibilidade Agregada que é a diferença entre o perfil base e o resultado obtido na otimização.

Portanto, neste estudo considera-se  $i = \{1,2,3\}$  equipamentos definidos como  $A_i$ :

$$A_1 = \{7,2, |5,5|\} \quad (20)$$

$$A_2 = \{11,3, |10,10,10|\} \quad (21)$$

$$A_3 = \{2,3, |3,3,3|\} \quad (22)$$

Com estas informações, podemos determinar o perfil base de cada equipamento. Por exemplo, o aparelho  $A_{(1)}$  tem o período 7 como período inicial de funcionamento  $t_{s(1)} = 7$ , e tendo uma duração de  $O_{t(1)} = 2$  e um perfil de operação  $p_{A(1)} = [5,5]$ . Assim, é possível representar a linha base deste dispositivo usando a Eq. (4). do seguinte modo:

$$A_{base(1,t)} = \begin{cases} p_{A(1,t-7+1)} & \text{se } 7 \leq t \leq 7 + 2 - 1 \\ 0 & \text{outros casos} \end{cases} \quad (23)$$

Depois de determinar os perfis base para cada dispositivo, determina-se o perfil base total com base na Eq. (3) resultando no vetor seguinte:

$$P_{base} = [0,3,3,3,0,0,5,5,0,0,10,10,10,0,0,0,0,0,0,0] \quad (24)$$

A Figura 17 mostra graficamente o perfil total da linha de base ao longo do período considerado para otimização.

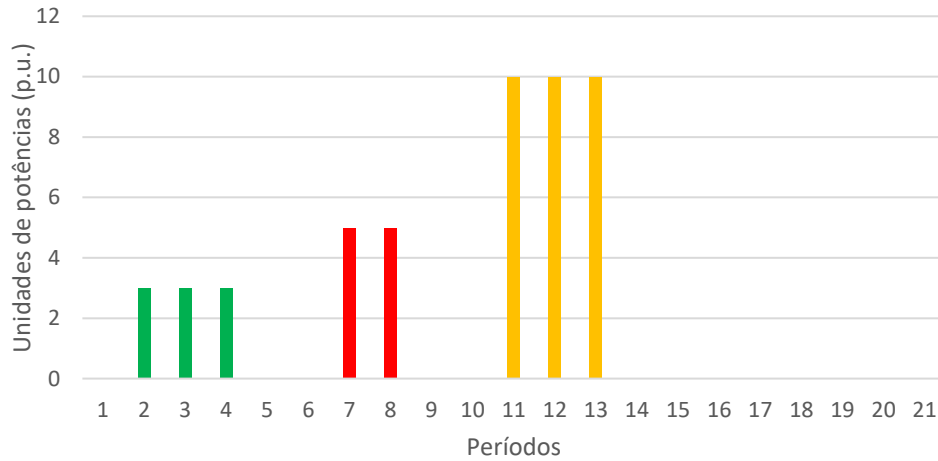


Figura 17 – Perfil base de consumo do utilizador

A flexibilidade requerida pelo agregador é representada por um vetor com valores de potência de *shifting* necessários em cada período. Valores positivos significa que o agregador requer um aumento de potência, enquanto valores negativos referem-se a solicitações de redução de potência. Por exemplo, os valores de flexibilidade solicitados pelo agregador neste estudo são representados pelo seguinte vetor com 21 valores:

$$F_{agg} = [0, -3, -3, 0, 0, -3, 0, 0, 5, 0, -10, -10, -10, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0] \quad (25)$$

- **Perfil pós-otimização**

O programa realiza a otimização do problema usando o modelo apresentado previamente e retorna os períodos nos quais os dispositivos deverão ser colocados a funcionar. Esse processo leva em consideração o período de início e a duração dos perfis, bem como a sua potência operacional. Após a otimização, os (novos) períodos de funcionamento dos dispositivos são retornados. Neste caso particular, o programa obteve os seguintes resultados:

$$\vec{x} = [15, 8, 6] \quad (26)$$

Significa que o aparelho 1 deve mudar o seu período de início de funcionamento do período 7 para o período 15, o aparelho 2 deve passar do período 11 para o período 8 e o aparelho 3 deve passar do período 2 para o período 6. Tendo em conta os novos

períodos de funcionamento para todos os aparelhos, podemos calcular o novo perfil de potência como a soma da potência individual. Por exemplo, considerando o novo período inicial do dispositivo 1 (ou seja, período 15), o novo perfil de potência Eq. (9) é definido como:

$$A_{flex(1,t)} = \begin{cases} p_{A(1,t-15+1)} & \text{se } 15 \leq t \leq 15 + 2 - 1 \\ 0 & \text{outros casos} \end{cases} \quad (27)$$

A Figura 18 mostra o novo perfil agregado obtido após a realocação dos dispositivos para os novos períodos iniciais. Notar que, com estes valores, o funcionamento dos aparelhos 2 e 3 coincidirá em alguns períodos para atender à solicitação do agregador. Assim representa-se essa sobreposição no novo perfil pela cor azul.

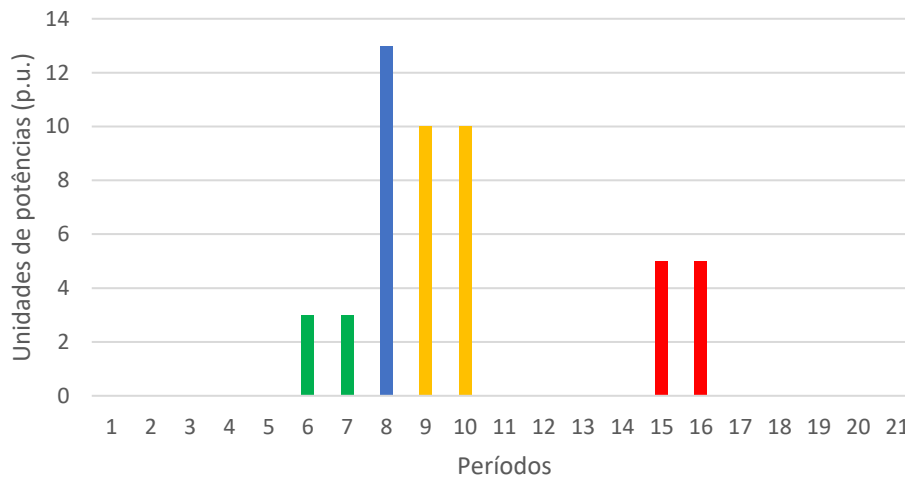


Figura 18 – Perfil após otimização. Equipamento 1 (vermelho). Equipamentos 2 (amarelo). Equipamento 3 (verde). Equipamentos 2 e 3 (azul)

Após a determinação do novo perfil de potência, a flexibilidade oferecida pelo HEMS é obtida pela aplicação da Eq. (2) (ou seja, calcular a diferença entre o perfil da linha de base e o novo perfil considerando os novos períodos de início de operação). A Figura 19 mostra a flexibilidade fornecida pelo HEMS após a aplicação do nosso modelo. Pode-se ver que essa flexibilidade irá coincidir com a flexibilidade solicitada pelo agregador (Figura 16 (direita)), resultando em lucros máximos se o agregador pagar um valor de unidade monetária (u.m.) por cada provisão de unidade de potência de flexibilidade (p.u.).

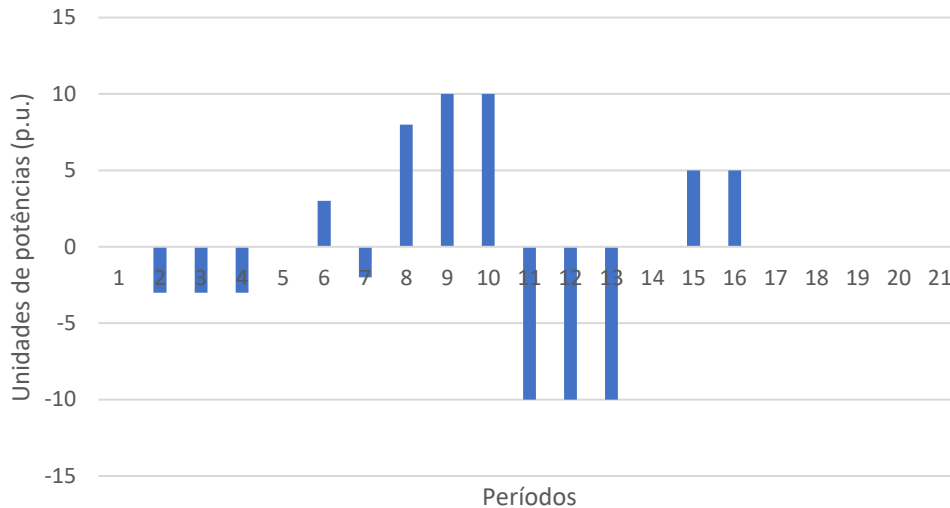


Figura 19 – Flexibilidade agregada

### 4.3 Caso de estudo 1

Neste caso de estudo, é apresentada a aplicação do modelo num cenário mais realista considerando 15 aparelhos de *shifting* e 96 períodos correspondendo a intervalos de 15 minutos num período 24 horas (ou seja,  $T = 15 * 24 = 96$ ).

Assume-se que o HEMS tem o controlo de 15 aparelhos com consumo flexível que pertencem a um edifício residencial. Os dispositivos podem ser alterados pelo HEMS de acordo com os novos períodos de início fornecidos pelo modelo após receber uma solicitação de um agregador. Foram criados 15 perfis de consumo de energia com base em perfis reais de eletrodomésticos. As figuras seguintes mostram os perfis de consumo usados para gerar perfis de linha de base aleatórios para o caso de estudo 1.

- Máquina de lavar roupa

Presente na maioria de todas as casas da Europa (na Europa ocidental, 95% das casas têm uma máquina de lavar roupa e na Europa Oriental, a proporção é entre 50 e 95%, e está tendendo para 95%), então é normal integração neste estudo de caso [38].

Cerca de 80-90% da energia utilizada por uma máquina de lavar roupa é utilizada para aquecer a água, a menos que a máquina de lavar seja ligada especificamente a uma ligação de água quente [39]. O seu perfil de consumo típico é mostrado na figura seguinte:

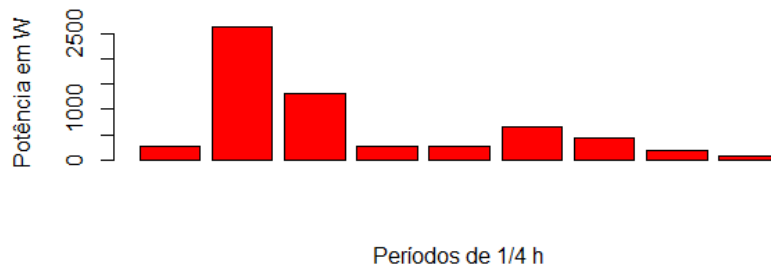


Figura 20 – Perfil de consumo de uma máquina de lavar roupa, adaptado de [38]

- Máquina de secar roupa

No caso das máquinas de secar roupa, quando comparados com as máquinas de lavar, a sua abundância é menor nos lares europeus. Em média, na Europa Ocidental, 35% das casas têm uma máquina de secar roupa, mas esta proporção varia entre 2 e 61%. Na Europa Oriental, menos de 1% das casas têm uma máquina de secar roupa [38].

Estes equipamentos usam bastante energia porque precisam girar e produzir calor [39]. O seu perfil de consumo típico é mostrado na figura seguinte:

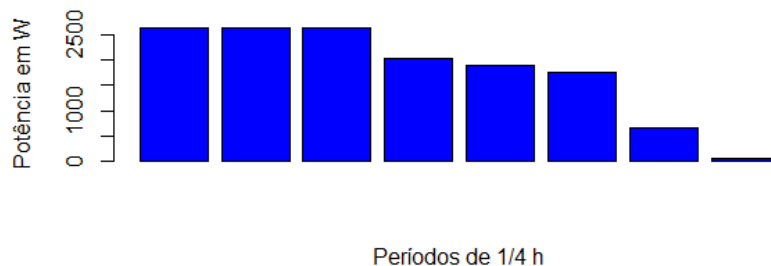


Figura 21 – Perfil de consumo de uma máquina de secar roupa, adaptado de [38]

- Máquina de lavar louça

A máquina de lavar louça está presente em menos de 50% das residências da Europa. Em média, na Europa Ocidental, 42% das casas têm uma máquina de lavar louça, mas essa relação varia entre 0 e 60%. Na Europa Oriental, o número médio de residências equipadas é de 3%. No entanto, estes rácios estão a aumentar em todos os países europeus [38].

As máquinas de lavar louça mais modernas são energeticamente eficientes e não usam muita água [39]. O seu perfil de consumo típico é mostrado na figura seguinte:

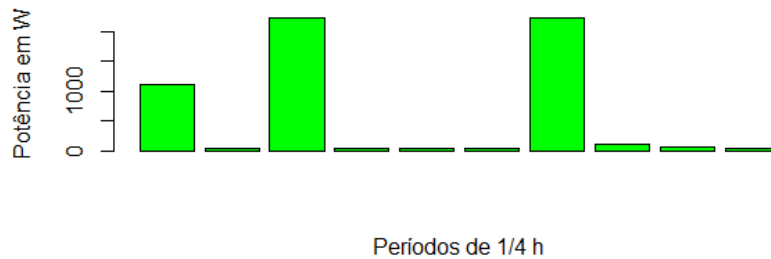
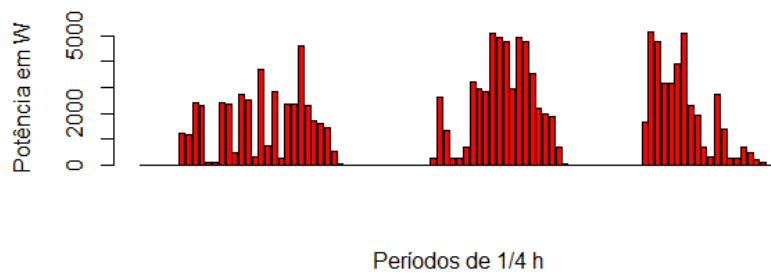


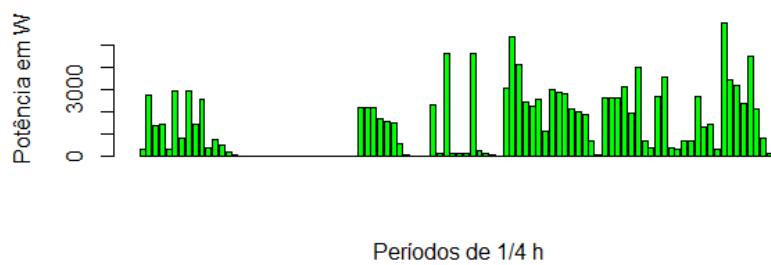
Figura 22 – Perfil de consumo de uma máquina de lavar louça, adaptado de [38]

- **Resultados**

Foi aplicado o modelo apresentado, quando um pedido de agregador de flexibilidade para o dia seguinte for recebido pelo HEMS. A Figura 23 mostra o perfil de linha de base agregado dos 15 aparelhos antes e depois da otimização. Atentar que o perfil da linha de base mostrado na Figura 23 a) (isto é, usando os períodos iniciais ( $t_{start}$ ) para cada aparelho) deve ser determinado por uma terceira parte, já que isto representa o funcionamento normal dos dispositivos antes de uma mudança no seu consumo. Após a otimização, o HEMS determinou novos períodos de inicialização ( $t_{new}$ ) para modificar o perfil agregado dos dispositivos, a fim de corresponder à solicitação do agregador para aumento / diminuição do consumo e, portanto, receber alguma compensação monetária por modificação no perfil. A Figura 23 b) mostra o novo perfil agregado pós-otimização.



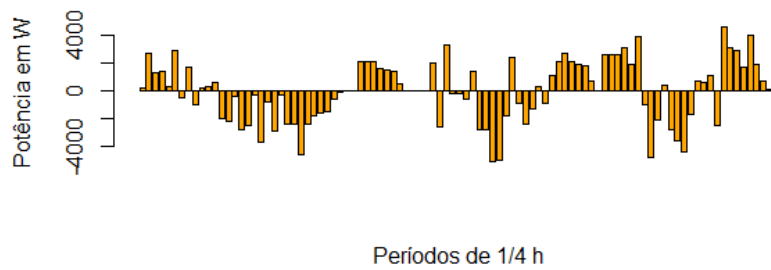
a)



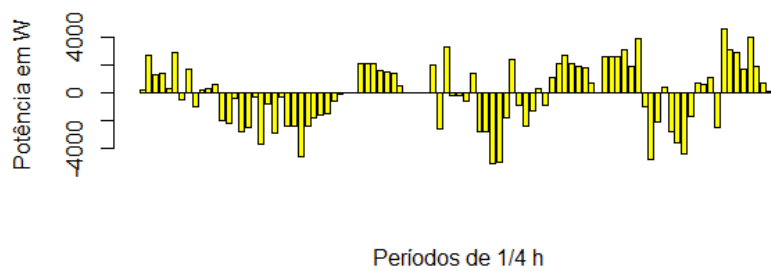
b)

*Figura 23 – Perfil de energia agregado antes e depois da otimização. a) Perfil base do consumo agregado de eletrodomésticos. b) Perfil de consumo após otimização*

Finalmente, a Figura 24 mostra a flexibilidade solicitada pelo agregador e a flexibilidade fornecida pelo HEMS após a modificação dos períodos de início dos aparelhos disponíveis. Ao analisar a flexibilidade agregada fornecida pelo HEMS, é possível verificar que o HEMS alcançou uma combinação perfeita entre o que foi solicitado pelo agregador e o que o edifício é capaz de oferecer. Os novos perfis de energia são gerados tentando atender o pedido do agregador, tanto quanto possível, uma vez que isso representa receitas para o edifício.



a)



b)

Figura 24 – Flexibilidade solicitada pelo agregador a) e flexibilidade fornecida pelo HEMS b)

Por cada unidade de energia que o utilizador possa alterar para outro período de tempo respeitando a solicitação do agregador, o utilizador recebe uma compensação. Neste caso, cada unidade de potência era equivalente a 0.01, então o utilizador receberia o valor de 1691.283 u.m. (unidades monetárias) como recompensa por alterar seu perfil de consumo.

## • Conclusões

Neste caso de estudo foi proposto um modelo com o objetivo de maximizar os proveitos financeiros a partir de uma combinação entre a flexibilidade exigida pelo agregador e a flexibilidade oferecida pelos usuários residenciais. Através dos resultados da simulação do caso de estudo que contemplou o modelo em destaque e 15 dispositivos de *shifting*, podemos inferir que o modelo apresenta resultados satisfatórios, relativamente ao deslocamento do período de operação dos dispositivos e a compensação a ser fornecida ao usuário ao alterar o seu perfil de consumo. Nos casos de estudo seguintes, irá ser considerado o desenvolvimento do modelo apresentado a fim de introduzir casos de estudo mais robustos, utilizando dispositivos em tempo real, baterias de armazenamento e painéis fotovoltaicos, juntamente com dispositivos de *shifting* já estudados neste trabalho.

## 4.4 Caso de estudo 2

### 4.4.1 Formulação do problema 2

Na formulação do problema anterior, foram considerados sistemas modernos de gestão de energia residencial (HEMS) instalados em casa dos utilizadores finais, com a capacidade de gerir dispositivos com consumo flexível em resposta a uma solicitação de flexibilidade de um agregador. O HEMS era capaz de otimizar o período de mudança de uma panóplia de aparelhos e recolocá-los para maximizar a compensação monetária recebida pela provisão de flexibilidade. Neste capítulo, estendemos o modelo apresentado anteriormente da seguinte forma:

- Focou-se na perspetiva de um agregador que é responsável por um número considerável de HEMS com diferentes dispositivos com recursos de DR;
- Dois tipos de dispositivos são considerados para DR, ou seja, dispositivos que podem ser realocados (*shifting*) e dispositivos com capacidade de controlo em tempo real (*real time devices*) [11];
- O agregador está preparado para responder a uma solicitação de flexibilidade de um DSO ou BRP, que paga uma compensação monetária por cada unidade de energia (p.u.) de flexibilidade provisionada;
- O agregador faz uso de um sistema de gestão de flexibilidade para realocar alguns aparelhos, a fim de corresponder à curva de flexibilidade solicitada.
- Os utilizadores finais têm a capacidade de registar dispositivos para provisão de flexibilidade, configurando as suas preferências, como por exemplo restrições quanto a períodos de troca permitidos, dispositivos específicos que podem ser controlados, remuneração esperada pela participação ou a prioridade dos dispositivos;
- O DSO / BRP e o agregador têm acesso ao consumo de energia da linha de base prevista. A linha de base deve ser fornecida por uma terceira parte, representando o consumo esperado, caso nenhum DR seja ativado [3].

### 4.4.2 Caso de estudo

Neste caso de estudo além de equipamentos de *shifting*, também serão introduzidos equipamentos do tipo *real time*. Sendo assim, iremos considerar uma casa de tamanho médio com os seguintes aparelhos principais de consumo de eletricidade: máquina de lavar louça, máquina de lavar e secar roupa, dispositivos de iluminação, televisão e computadores.

Assume-se que o HEMS tem o controlo de 140 aparelhos com consumo flexível que pertencem a um edifício residencial. Os dispositivos podem ser alterados pelo HEMS de acordo com os novos tempos de início fornecidos pelo nosso modelo após receber uma

solicitação de um agregador. Foram criados 140 perfis de consumo de energia de linha de base com base em perfis reais de eletrodomésticos.

Um estudo sobre como os agregadores de Demand Side Response (DSR) decidem a adequação de um cliente, levado a cabo por [40] revela que os clientes precisam de um mínimo de 200 kW de potencial de DSR para serem avaliados como financeiramente viáveis. Sendo assim, no nosso caso de estudo, tendo em conta os aparelhos que constituem a nossa casa modelo, será preciso agregar 20 clientes com habitações semelhantes para perfazer a potência necessária, como é apresentado na tabela seguinte:

Tabela 1 – Consumo individual (e agregado) de uma (e 20) casas equipadas com os equipamentos considerados.

<b>Tipo de Equipamento</b>	<b>Consumo do Equipamento (kW)</b>
Máquina de Lavar Roupa	2.5
Máquina de Lavar Louça	1.3
Máquina de Secar Roupa	4.0
Sistema de Ar Condicionado	3.0
Portátil	0.1
Sistema de Iluminação	0.8
Televisão	0.150
<b>Total</b>	<b>11.85</b>
<b>Total (x20)</b>	<b>237</b>

Como as características e os consumos das máquinas de lavar e secar roupa e a máquina de lavar louça já foram caracterizados, vai-se de seguida caracterizar os novos equipamentos que fazem parte do caso de estudo.

- Sistema de iluminação a LED's

O LED ou a lâmpada de díodos emissores de luz é uma boa opção de energia eficiente para iluminação, muitas vezes batendo as lâmpadas CFL (*Compact Fluorescent Lamp*) em eficiência e longevidade a um preço similar [39]. O seu perfil de consumo típico é demonstrado na figura seguinte:



Figura 25 – Perfil de consumo sistema de iluminação a LED's

- **Televisão**

O consumo de energia dos monitores de computador ou TV varia significativamente com base na tecnologia de exibição usada, fabricante, qualidade de construção, o tamanho do ecrã, o que o ecrã está a mostrar (imagens estáticas versus imagens em movimento), brilho do ecrã e configurações de economia de energia ativadas [39]. Estudos tais como o de [41] indicam que, em média por dia, os ocupantes de uma habitação usam a televisão entre 3 a 4 horas. O seu perfil de consumo típico é mostrado na figura seguinte:



Figura 26 – Perfil de consumo da televisão

- **Computador portátil**

Computadores portáteis geralmente usam menos energia do que os computadores de mesa, porque são projetados para funcionar com bateria o que requer menos consumo de energia. Além disso, raramente têm uma placa gráfica poderosa e geralmente usam placas gráficas integradas, o que requer menor consumo de eletricidade. O consumo de energia de um computador portátil depende do tamanho do ecrã. Normalmente, o consumo de energia varia desde 20 W até 100 W quando a bateria está a acabar. Ao carregar o consumo de energia da bateria vai aumentar entre 10 a 20%, estimando-se que 60 W é o consumo médio de energia para um computador portátil de 14-15 polegadas quando conectado [39]. O seu perfil de consumo típico é mostrado na figura seguinte:

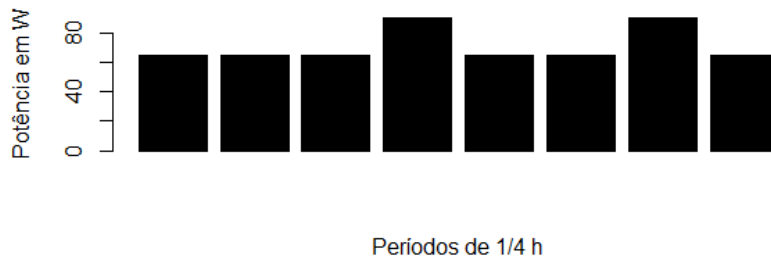


Figura 27 – Perfil de consumo do computador portátil

- Sistema de ar condicionado

Os sistemas de ar condicionado variam em tamanho e potência [39]. O seu perfil de consumo típico é mostrado na figura seguinte:

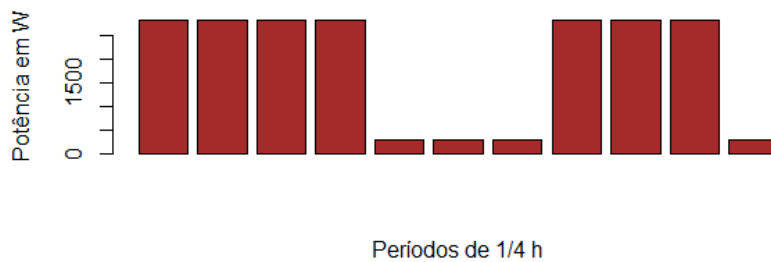


Figura 28 – Perfil de consumo do sistema de ar condicionado

- **Solicitação de flexibilidade pelo DSO / BRP.**

O modelo é baseado na ideia de que um DSO / BRP pode estar interessado em comprar flexibilidade de um agregador. Essa ideia foi explorada noutros estudos como o da USEF [42], no qual o DSO e o agregador possuem uma relação contratual para o comércio de flexibilidade. Portanto, neste estudo de caso, consideramos uma solicitação de flexibilidade por um agregador para o dia seguinte. A Figura 29 mostra um pedido de flexibilidade por um DSO. O pedido de flexibilidade é representado como um vetor de entrada  $F_{DSO}(t)$  com 96 valores (correspondendo a 24 horas em intervalos de 15 minutos) representando o valor da potência quer para a regulação positiva (aumento do consumo) ou para a regulação descendente (diminuição do consumo).

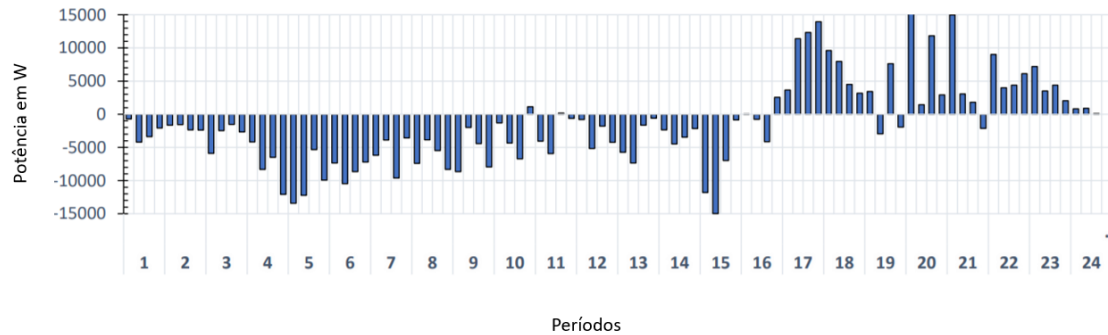


Figura 29 – Flexibilidade requerida pelo DSO

- **Perfil de linha de base e perfil reagendado para fornecimento de flexibilidade.**

Avaliar o desempenho de um agregador que comercializa flexibilidade tem sido um problema significativo no *design* de modelos de flexibilidade. Esta questão surge porque a flexibilidade é uma mudança no perfil de consumo que só pode ser estimada comparando com o perfil de consumo se a flexibilidade não tivesse sido ativada [42]. Por outras palavras, apenas o perfil de consumo real pode ser medido e o perfil de consumo previsto (ou linha de base) nunca existe. Portanto, assume-se que uma linha de base é definida de tal forma que os parceiros envolvidos no comércio de flexibilidade (ou seja, DSO e agregador) concordam com isso. Existem diferentes maneiras pelas quais a linha de base pode ser definida (por exemplo, a linha de base pode ser definida por um terceiro sem interesse na flexibilidade).

Com isso em mente, supõe-se a existência de um agendamento inicial de dispositivos e do seu próprio consumo que estejam disponíveis e sejam aceites como a linha de base. A Figura 30 mostra o perfil da linha de base, correspondendo ao vetor  $P_{Base(t)} \cdot P_{Base(t)}$ , que contém 96 valores de consumo de energia correspondentes à potência agregada de todos os aparelhos para as próximas 24 horas em intervalos de 15 minutos. Como foi especificado na Eq. (2), o modelo deve encontrar um reagendamento ótimo dos dispositivos para modificar o perfil da linha de base e ajustar a solicitação de flexibilidade do DSO.

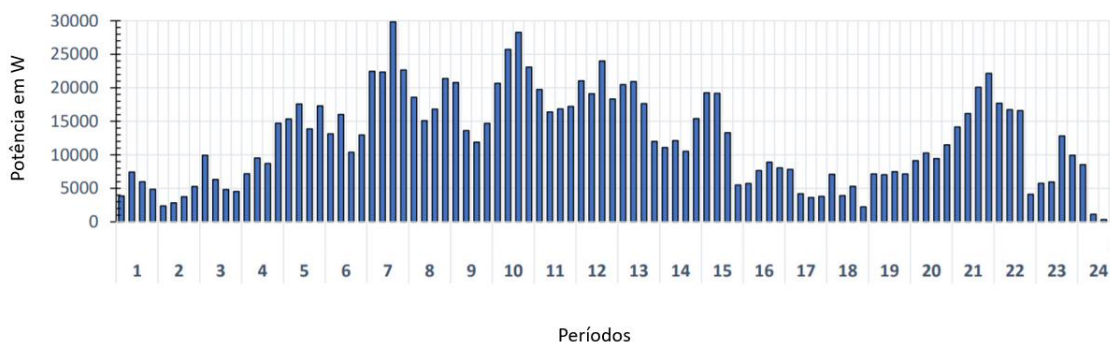


Figura 30 – Perfil base de consumo pré-otimização

A Figura 31 mostra o “novo” perfil após a aplicação do modelo de otimização. Pode notar-se que o consumo é deslocado para a direita, o que representa um aumento no consumo nos períodos correspondentes às horas 17-20. A mudança no consumo (e o seu aumento resultante em horas posteriores) também tem um impacto (ou seja, uma redução) nas primeiras horas do dia. É importante salientar que essa modificação só ocorrerá caso a flexibilidade seja comprada e ativada pelo DSO. Um acordo contratual deve existir, com as regras de remuneração e liquidação entre agregador e DSO para este fim.

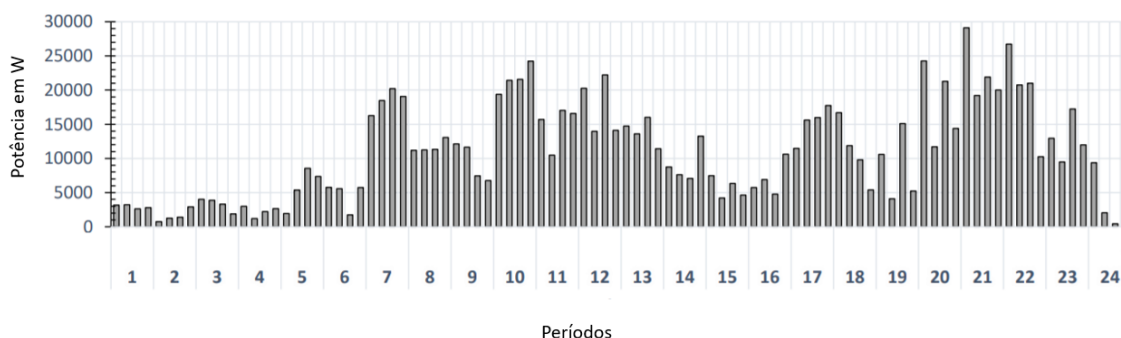
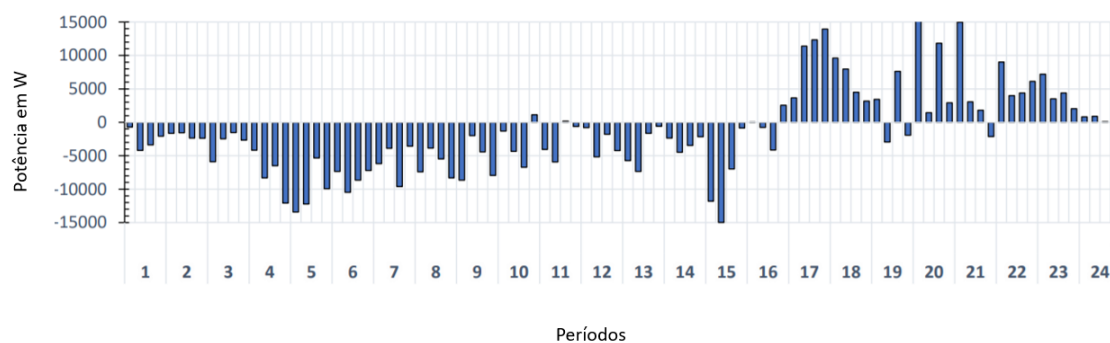


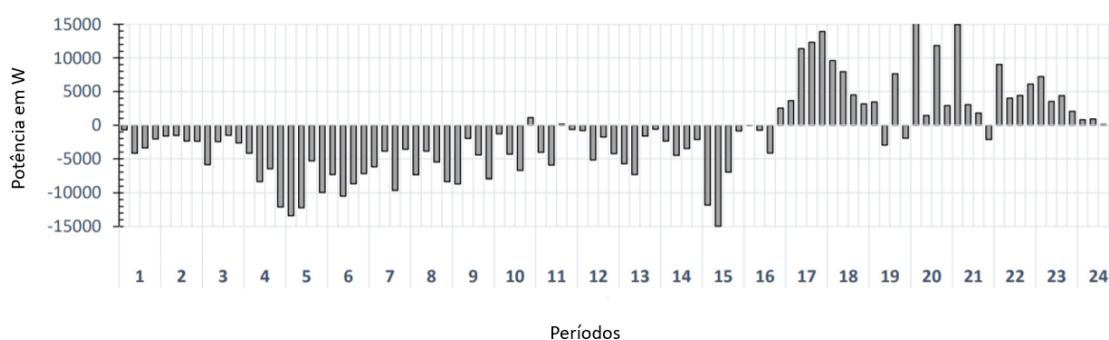
Figura 31 – Novo perfil pós-otimização

- **Provisão de flexibilidade pelo agregador**

Nesta secção, é analisada a provisão de flexibilidade. Para este fim, parte-se do facto de que uma modificação do poder agregado foi realizada usando o modelo apresentado na formulação matemática e aplicando o PSO. As Figura 32 a) e b) mostram a flexibilidade solicitada pelo DSO e a flexibilidade fornecida pelo agregador após o reescalonamento, respetivamente. De notar que o agregador é capaz de encontrar um novo cronograma de dispositivos (modificando o perfil de carga da linha de base) que pode ser perfeitamente compatível com a solicitação feita pelo DSO. É importante salientar que a modificação do cronograma do perfil base, a partir da perspetiva do agregador, implica uma modificação do escalonamento ótimo dos dispositivos (supondo que o agregador esteja equipado com a tecnologia para realizar uma gestão de recursos de energia ideal dos dispositivos). Portanto, uma compensação pela flexibilidade provisionada poderá justificar a modificação do cronograma original dos eletrodomésticos.



a)



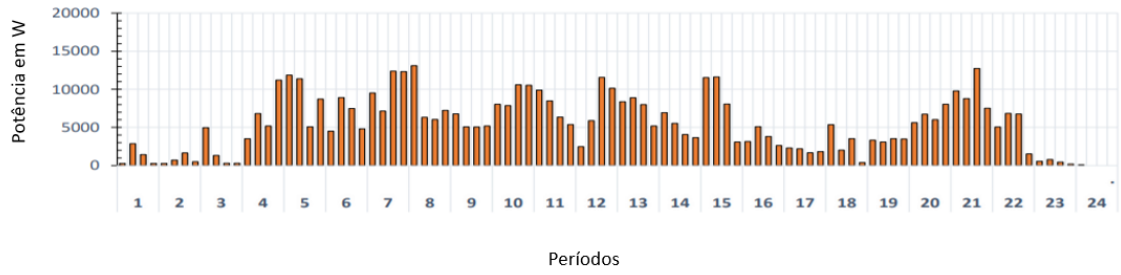
b)

Figura 32 – a) Solicitação de flexibilidade pelo DSO. b) Provisão de flexibilidade pelo agregador após a aplicação deslocamento / redução de dispositivos de energia.

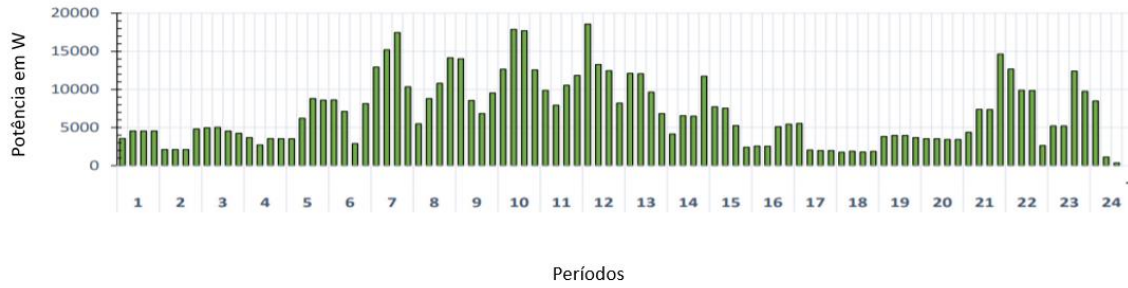
- **Impacto monetário e análise da contribuição dos aparelhos**

Por fim, foi analisado o impacto da flexibilidade oferecida pelo agregador para cada tipo de dispositivo (ou seja, a flexibilidade de dispositivos de *shifting* e *real time*). A diferença na contribuição da flexibilidade desempenha um papel crucial na determinação da partilha de remuneração entre os aparelhos que participam do processo.

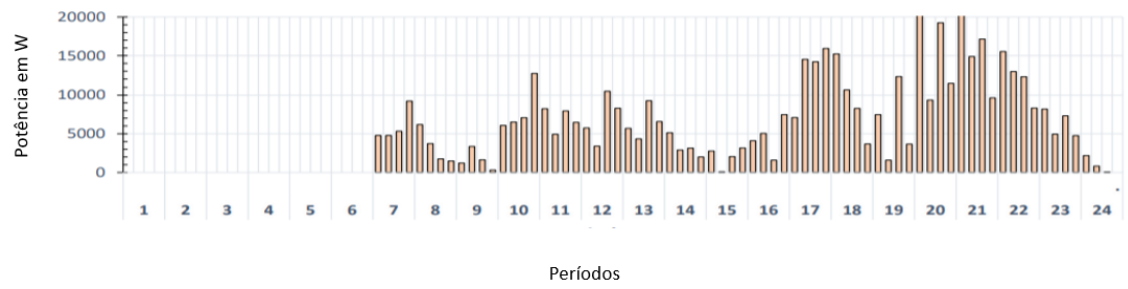
A Figura 33 mostra o perfil base desagregado, o reescalonamento e a flexibilidade fornecida por aparelhos de *shifting* (isto é, as Figura 33 a), c) e e)) e aparelhos *real time* (isto é, Figura 33 b), d) e f)). É de fácil percepção que a contribuição dos dispositivos de *shifting* supera a contribuição dos dispositivos *real time*, isto é, a energia total que é deslocada de uma hora para outra é maior do que a energia que é reduzida com os dispositivos *real time* (ver Figura 33 e) e f)). Esse acontecimento pode ser explicado também pelo facto de que, enquanto se transfere uma carga de um período para outro, está-se a contribuir duas vezes na modificação do perfil original (isto é, reduzindo a carga no período original em que foi programado e aumentando a carga no período em que é deslocado ou reagendado). Por outro lado, os dispositivos em tempo real têm um melhor grau de controlo no sentido de que uma redução / aumento na sua operação pode ser realizada num período específico sem afetar a energia programada no futuro.



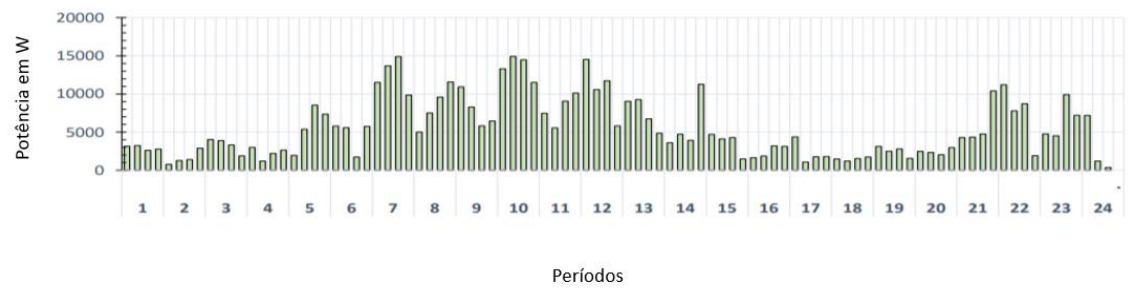
a)



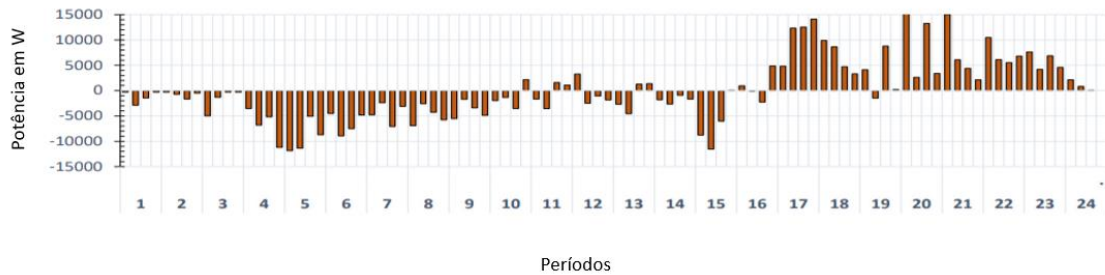
b)



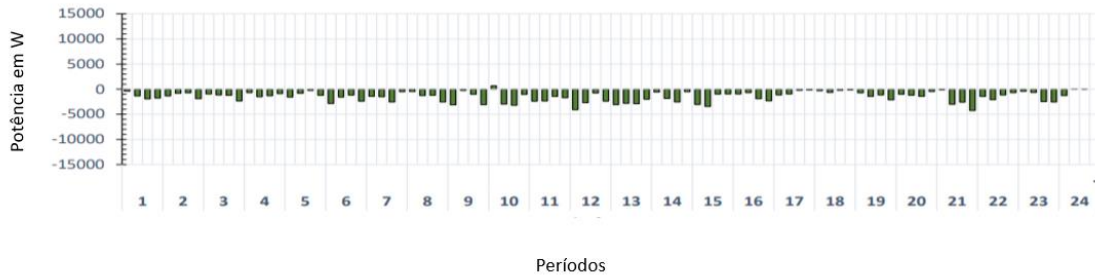
c)



d)



e)



f)

Figura 33 – Perfil base, reescalonamento e flexibilidade. a) Dispositivos do perfil base tipo A. b) Dispositivos do perfil base tipo B. c) Dispositivos reagendados do tipo A. d) Dispositivos reagendados do tipo B. e) Flexibilidade oferecida pelos dispositivos do tipo A. f) Flexibilidade oferecida pelos dispositivos do tipo B.

Assumindo uma compensação de 0.01 u.m. por cada unidade de potência solicitada, neste caso de estudo, o agregador receberia do DSO a quantia de 4923.11 u.m. (correspondente ao pagamento de 492.311 kW de energia reagendada).

A Tabela 2 mostra a flexibilidade solicitada pelo DSO e a flexibilidade fornecida pelo agregador (desagregada por tipo de aparelho). Pode-se notar que, para corresponder ao pedido do DSO, o agregador deve usar recursos extras. Por exemplo, nas Figura 33 e) e f), entre as 17-24 horas, o agregador deve aumentar o consumo com alguns dispositivos e, ao mesmo tempo, diminuir o consumo com os outros para alcançar uma flexibilidade perfeita. Esse aumento / diminuição no consumo resulta em + 17% de recursos necessários, o que também significa que o agregador precisará reduzir a compensação oferecida aos usuários finais para obter lucro (ou seja, se o agregador oferecer a mesma compensação de 0.01 u.m. para usuários finais, pagaria um preço mais alto do que a compensação monetária oferecida pelo DSO, resultando em perdas). Duas maneiras possíveis podem ser consideradas para evitar esse problema em trabalhos futuros. O primeiro está relacionado com a inclusão de custo e compensação no modelo. Desta forma, o agregador irá procurar não apenas a combinação perfeita da provisão de flexibilidade, mas também a redução do uso de recursos (isto é, reduzindo a quantidade de + 17%). Uma segunda solução será a análise de estratégias de mercado, na qual o intermediário entre usuários finais e DSO é eliminado.

Tabela 2 – Potência, compensação e percentagem de contribuição para cada tipo de aparelho

	<i>Total requerido</i>	<i>Dispositivos shifting</i>	<i>Dispositivos real-time</i>	<i>Total</i>
Potência (kW)	492.311	437.001	143.427	580.428
Compensação (u.m.)	4923.11	4370.017	1434.277	5804.28
Percentagem (%)	100	88.76	29.13	+17.89

## • Conclusões

Nesta dissertação, um modelo matemático para a provisão de flexibilidade, direcionado ao DSO / BRP, foi proposto para auxiliar um agregador na gestão de eletrodomésticos. Aplicando o modelo proposto, o agregador é capaz de corresponder completamente a uma solicitação de flexibilidade do DSO, realizando um reagendamento de aparelhos domésticos de dois tipos, ou seja, dispositivos com capacidade de reescalonamento (tipo *A*) e com recursos de redução / aumento de energia em tempo real (tipo *B*). A formulação resulta de um problema não linear de larga escala que é resolvido usando o PSO. Uma *toolbox* do R relativa ao PSO (*psoptim*) é usada para fornecer a solução ideal num tempo aceitável. Os resultados mostraram que o agregador é capaz de encontrar uma combinação perfeita entre a flexibilidade provisionada e a flexibilidade solicitada pelo DSO. No entanto, várias suposições foram feitas no modelo para atingir o valor ideal. Por exemplo, os valores monetários (e relações contratuais) entre usuários-agregadores da DSO foram negligenciados e são deixados como pesquisas futuras. Além disso, foi mostrado que, sob este modelo, o agregador alcança uma combinação perfeita da curva de flexibilidade usando uma quantidade extra de recursos (por exemplo, aumentando a carga de alguns dispositivos e diminuindo a carga de outros no mesmo período).

## 4.5 Caso de estudo 3

### 4.5.1 Formulação do problema 3

- Introdução de custos associados aos aparelhos de *shifting* e *real time* e bateria, permitindo assim ao agregador saber quais os aparelhos que o utilizador considera serem mais importantes para o seu bem-estar e rotina;
- Introdução do painel fotovoltaico que estará interligado com a bateria.

### 4.5.2 Caso de estudo

Este novo caso de estudo é uma adaptação do caso de estudo anterior, introduzindo a bateria residencial nas habitações dos utilizadores, que estarão interligadas ao painel fotovoltaico. O número de equipamentos de *real time* e *shifting* serão 6 e 10,

respetivamente e os tipos de equipamentos também serão os mesmos (à exceção do termoacumulador). Porém, desta vez associados a estes equipamentos estarão custos que permitirão ao programa saber quais são os equipamentos prioritários para o utilizador, cujas alterações no período de funcionamento ou intensidade de funcionamento poderão ter mais ou menos impacto no seu bem-estar. Os equipamentos mais importantes para o conforto do utilizador terão custos superiores àqueles cuja qualquer alteração no seu funcionamento não coloque em causa o bem-estar dos ocupantes da habitação. Sendo assim, de seguida apresenta-se a tabela com os custos correspondentes a cada um dos diversos aparelhos utilizados no estudo.

*Tabela 3 – Custo de cada equipamento*

<b><i>Tipo de Equipamento</i></b>	<b><i>Custo (Unidades Monetárias)</i></b>
Máquina de Lavar Roupa	0.02
Máquina de Lavar Louça	0.04
Máquina de Secar Roupa	0.01
Sistema de Ar Condicionado	0.2
Computador Portátil	0.03
Bateria	0.04
Sistema de Iluminação	0.07
Televisão	0.03
Termoacumulador	0.15

De salientar ainda que os perfis de consumo de todos os aparelhos estarão compreendidos num período de 24 horas (de hora a hora), de forma a tornar mais perceptível o funcionamento do programa.

No caso específico da bateria de armazenamento residencial, a sua função é armazenar energia proveniente do painel fotovoltaico que será posteriormente utilizada para uso residencial.

Relativamente ao PV, os dados relativos à geração de energia a partir deste equipamento foram fornecidos por um caso real e subtraídos ao perfil base dos aparelhos previamente gerado. Na figura seguinte, apresentam-se os dados relativos ao PV de forma gráfica.

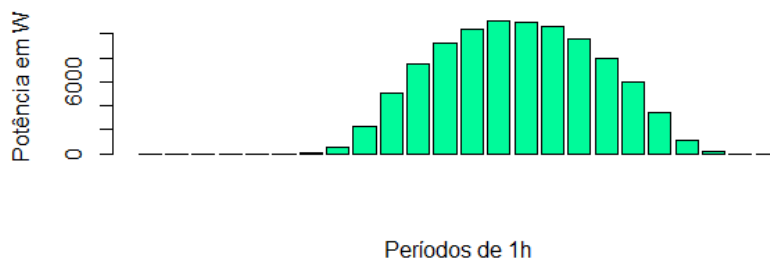


Figura 34 – Dados do PV

No que diz respeito ao termoacumulador, por ser novo aparelho introduzido será realizada uma breve explicação sobre o seu funcionamento e o porquê da sua aplicação neste caso de estudo e para os restantes. Este é o aparelho que efetua o aquecimento da água fornecendo-a ao utilizador residencial para este satisfazer as suas necessidades diárias e está presente em praticamente todas as habitações. Na figura seguinte, apresenta-se o perfil de consumo do termoacumulador em estudo para um período de 24 horas dividido em 96 períodos de 15 minutos, pelo facto do seu perfil de consumo ser mais perceptível num período mais extenso (neste caso de estudo serão 24 períodos em vez de 96).

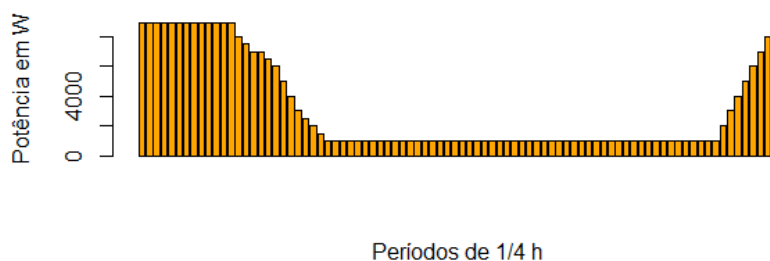


Figura 35 – Perfil de consumo do termoacumulador

Por fim, os restantes equipamentos utilizados neste caso de estudo têm como base os perfis de consumo previamente utilizados, só que desta vez, ao contrário dos casos de estudo anteriores, estarão compreendidos num período de 24 horas divididos de hora em hora em vez de períodos de 15 minutos.

O primeiro tópico a ser estudado será o *tuning* do PSO, que fornecerá os parâmetros que permitirão uma otimização com os melhores resultados possíveis.

#### 4.5.3 *Tuning* dos parâmetros do PSO

Nesta secção irá ser abordado o *tuning* do PSO, que tem como objetivo obter os parâmetros ideais para conseguir os melhores resultados possíveis aquando da otimização. Para o *tuning* do PSO foi utilizado este caso de estudo por possuir poucos equipamentos domésticos e estar apenas considerado num período de 24 horas dividido em períodos de 1 hora. Por ter estas características seria o ideal para testar os parâmetros do PSO e verificar quais seriam os mais favoráveis. O PSO possui diversos parâmetros, no entanto aqueles que foram estudados foram os seguintes:  $w$ ,  $c.p$  e  $c.g$ . O  $w$  é a constante de exploração. Um vetor de comprimento 1 ou 2. Se o comprimento for 2, a constante real usada é gradualmente alterada de  $w$  [1] para  $w$  [2] à medida que o número de iterações ou avaliações da função se aproximam do limite fornecido e o seu valor padrão é  $1 / (2 * \log(2))$ . O parâmetro  $c.p$  é referente à constante de exploração local, sendo o seu valor padrão  $0.5 + \log(2)$  enquanto que  $c.g$  é a constante de exploração global possuindo como valor padrão  $0.5 + \log(2)$  [43].

Para o estudo foram realizados dois tipos de simulações, uma com um *swarm size* de 10 e outro com 50, mas ambas com o mesmo número de iterações (500). O parâmetro  $w$  foi testado com valores no intervalo [0.1:1] variando 0.1 em cada ciclo. Os parâmetros  $c.p$  e  $c.g$  foram testados no intervalo [0.2:2] variando 0.2 em cada ciclo. Cada conjunto de valores era testado 10 vezes foram armazenados numa matriz com os valores médios. No final das simulações foram obtidos os seguintes valores com a melhor média:  $w=0.7$ ,  $c.p=1.0$  e  $c.g=1.6$  para um *swarm size* de 10 e  $w=0.5$ ,  $c.p=1.2$  e  $c.g=1.2$  para um *swarm size* de 50. Nas tabelas seguintes apresentam-se os resultados do *tuning*, não só o melhor valor médio, mas também informação adicional sobre qual foi o valor mínimo e máximo e quais os parâmetros que deram origem a esses resultados.

Tabela 4 – Resultados do *tuning* para um *swarm size* de 10

<i>Swarm Size</i>	<b>Média</b> $w=0.7, c.p=1.0$ e $c.g=1.6$	<b>Máximo</b> $w=0.1, c.p=0.2$ e $c.g=0.6$	<b>Mínimo</b> $w=0.1, c.p=0.2$ e $c.g=0.6$
10	5490.674	79642304	2155.026

Tabela 5 – Resultados do *tuning* para um *swarm size* de 50

<i>Swarm Size</i>	<b>Média</b> $w=0.5, c.p=1.2$ e $c.g=1.2$	<b>Máximo</b> $w=0.3, c.p=0.4$ e $c.g=1.8$	<b>Mínimo</b> $w=0.6, c.p=1.4$ e $c.g=0.2$
50	3056.514	4942099	1706.671

Na figura seguinte mostra-se a convergência obtida com diferentes parâmetros, os obtidos e os predefinidos no R, para um *swarm size* de 50 e 500 iterações.

## Comparação da convergência entre diferentes parâmetros do PSO

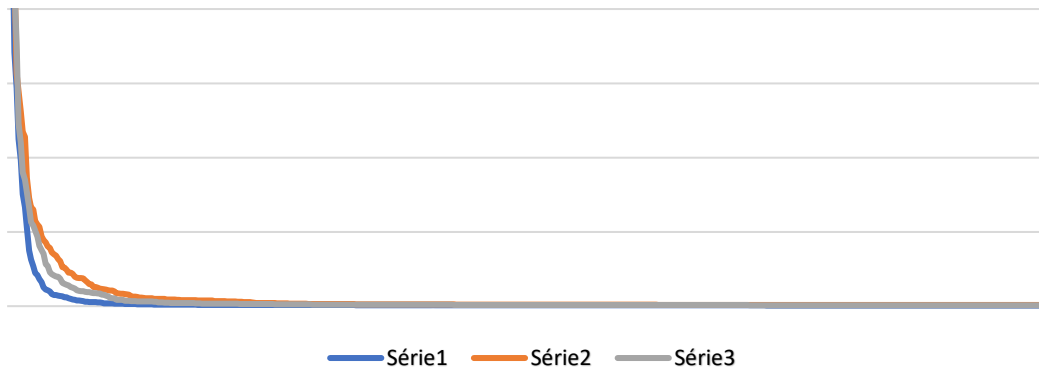


Figura 36 – Comparação da convergência entre diferentes parâmetros do PSO. A azul os valores médios obtidos no *tuning* para um *swarm size* de 50, a laranja os parâmetros predefinidos no software e a cinza os valores médios obtidos no *tuning* para um *swarm size* de 10.

Pela Figura 36 é possível concluir que efetivamente, os melhores parâmetros são os obtidos no *tuning* para um *swarm size* de 50 (convergem mais rapidamente). Na tabela seguinte demonstra-se o *fitness* médio obtido em 20 experiências deste caso de estudo para os parâmetros em causa, validando mais uma vez o sucesso deste *tuning* (consultar anexo x para verificar o *fitness* obtido em cada iteração).

Tabela 6 – *Fitness* médio dos diferentes parâmetros em estudo

<i>Parâmetros</i>	<i>Fitness médio</i>
$w=0.7213475$ , $c.p=1.193147$ e $c.g=1.193147$	7704.35
$w=0.5$ , $c.p=1.2$ e $c.g=1.2$	4262.49
$w=0.7$ , $c.p=1.0$ e $c.g=1.6$	5799.75

## • Resultados

O objetivo deste caso de estudo é comprovar a validade do programa e do modelo matemático utilizando os parâmetros obtidos aquando do *tuning*. A análise dos resultados experimentais provenientes do programa será feita da mesma forma que foi realizada nos casos de estudos prévios. No entanto, com a introdução de novos equipamentos, de pequenas mudanças nos seus perfis e principalmente com a introdução dos custos associados aos diferentes tipo de equipamentos, os resultados serão substancialmente diferentes. Sendo assim, haverá parâmetros aos quais será dada maior ênfase em

detrimento de outros pelo facto das mudanças introduzidas provocarem alterações em alguns dos resultados que merecem uma análise mais exaustiva.

- **Perfil pré e pós-otimização**

O perfil base dos aparelhos permite visualizar a potência e a duração dos equipamentos de uma residência. A sua definição será igual aos outros casos de estudo, mas desta vez serão introduzidos o termoacumulador e a bateria. O perfil base estará compreendido em apenas 24 períodos, como se demonstra na figura seguinte:

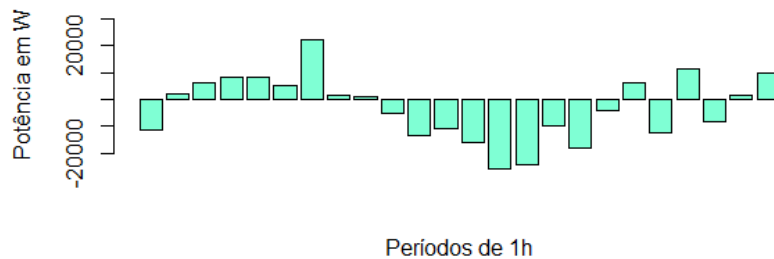
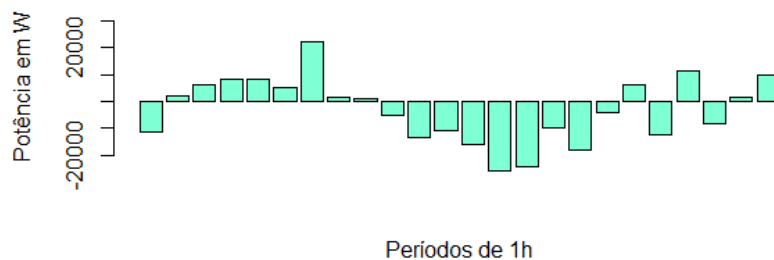


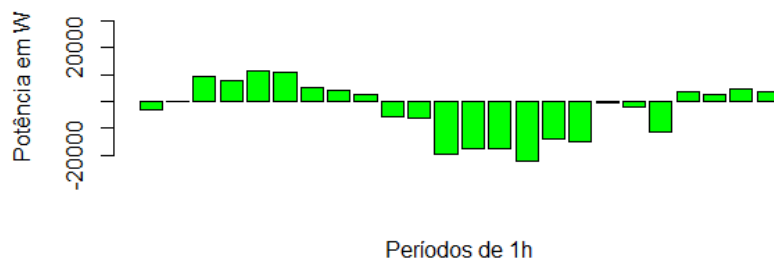
Figura 37 – Perfil base de consumo

Porém, além da introdução da bateria e do termoacumulador, seria ainda introduzida a geração fotovoltaica, cujos valores de potência seriam subtraídos ao perfil base pois estes não constituem consumo de energia, mas sim de produção de energia. Devido às subtrações provocadas pela inserção da bateria de armazenamento e do painel fotovoltaico o perfil base da Figura 37 apresenta valores negativos, o que não aconteceu nos casos de estudo anteriores.

Os custos dos aparelhos, que é um dos novos parâmetros introduzidos neste caso de estudo, permite identificar quais os equipamentos que terão mais prioridade para o utilizador. O deslocamento dos aparelhos no tempo, para períodos não tão confortáveis para o cliente ou a simples diminuição do brilho de um computador ou televisão, terão que trazer compensações financeiras ao utilizador que aceita alterações no seu bem-estar diário (ver Figura 38 para verificar graficamente a diferença entre o perfil de consumo inicial e o perfil de consumo otimizado).



a)



b)

Figura 38 – Comparação entre perfil base de consumo antes e após otimização. a) Perfil base pré-otimização. b) Perfil de consumo pós-otimização

- **Compensação**

Posto isto, tendo em conta o custo de equipamento dado pela Tabela 3 e a diferença entre o perfil de consumo inicial de cada equipamento e o novo perfil de consumo o programa devolve o valor a compensar o cliente. A tabela seguinte demonstra o valor das compensações calculadas por equipamento.

Tabela 7 – Compensação monetária a oferecer por equipamento

<b>Tipo de Equipamento</b>	<b>Compensação (Unidades Monetárias)</b>	<b>Percentagem (%)</b>
Máquina de Lavar Roupa	107.69	1.79
Máquina de Lavar Louça	28.17	0.47
Máquina de Secar Roupa	157.03	2.61
Sistema de Ar Condicionado	332.83	5.53
Portátil	1.592	0.03
Bateria	4921	81.8
Sistema de Iluminação	61.434	1.02
Televisão	5.041	0.08
Termoacumulador	403.93	6.71
<b>Total</b>	<b>6018.7</b>	<b>100</b>

Da tabela é possível verificar que a bateria é o equipamento que obrigará a uma maior compensação financeira, demonstrando o impacto que tem a modificação do seu

perfil base. Com a tabela seguinte será possível perceber qual o tipo de equipamentos (*shifting*, *real time* ou bateria) dos quais resultarão maior valor monetário a ressarcir.

Tabela 8 – Compensação monetária a oferecer por tipo de aparelho

<i>Tipo de Equipamento</i>	<i>Compensação (Unidades Monetárias)</i>	<i>Porcentagem (%)</i>
<i>Shifting</i>	292.89	4.87
<i>Real Time</i>	804.82	13.37
Bateria	4920.96	81.76

### • Conclusões

Os objetivos deste caso de estudo eram: introduzir novos equipamentos domésticos, nomeadamente o termoacumulador, a bateria de armazenamento residencial e o painel fotovoltaico, verificar o impacto da sua introdução no estudo e realizar o *tuning* dos parâmetros do PSO. Relativamente ao primeiro objetivo, e a partir dos resultados obtidos é possível inferir que, principalmente, a bateria tem um grande impacto no estudo, o que é perfeitamente aceitável pois esta opera 24 horas diariamente com potências elevadas associadas ao seu perfil e modificações no seu perfil base acarretarão compensações financeiras consideráveis (81.76% das compensações financeiras são relativas à bateria de armazenamento residencial). Por outro lado, o termoacumulador, apesar da sua introdução não possuir um impacto tão grande como a bateria, pelo facto do seu perfil de consumo operar durante quase todo o dia, o seu impacto não é tão significativo como a bateria. No entanto, é responsável por 6.71% das compensações financeiras. Relativamente ao painel fotovoltaico, a sua introdução constituiu o único equipamento que gerava energia em vez de consumir. Com a sua introdução, o utilizador pode, em horas de ponta utilizar a energia armazenada ao longo do dia não colocando tanto *stress* na rede contribuindo para uma maior flexibilidade desta. Em caso de não utilização da energia proveniente do painel fotovoltaico, esta seria armazenada na bateria de armazenamento residencial. Por fim, no que diz respeito ao *tuning* dos parâmetros do PSO, este foi levado a cabo com o intuito de os resultados provenientes das simulações serem os melhores possíveis. É uma técnica bastante usada [44], [45] tendo sido também adotada nesta dissertação. Os resultados mais relevantes das milhares de simulações estão representados nas Tabela 4 e Tabela 5 e foram realizadas neste caso de estudo mais simples por possuir as características ideais para o *tuning*.

## 4.6 Caso de estudo 4

### 4.6.1 Caso de estudo

Neste caso de estudo final será importante aglomerar tudo o que foi feito nos casos de estudo prévios. Verificar as diferenças que ocorrem quando se introduz uma grande quantidade de aparelhos agregados, analisar de forma mais detalhada o impacto dos custos associados aos equipamentos (verificando de que forma estes são minimizados e como o programa reage quando é introduzida uma grande quantidade de equipamentos), realizar uma análise gráfica do tempo de convergência do programa, modificando o número iterações, e demonstrar o porquê de algumas simulações serem desaconselhadas em casos reais pelo facto de serem bastante longas, sendo portanto impeditivas de realizar num contexto real.

Sendo assim, este caso de estudo possui os seguintes dados:

- 30 equipamentos de cada tipo de aparelho (30 máquinas de lavar, 30 televisões, etc.);
- As potências dos equipamentos manter-se-ão inalteradas ao longo das simulações;
- Os custos seriam os mesmos do caso de estudo anterior:

*Tabela 9 – Custo de cada equipamento*

<b><i>Tipo de Equipamento</i></b>	<b><i>Custo (Unidades Monetárias)</i></b>
Máquina de Lavar Roupa	0.02
Máquina de Lavar Louça	0.04
Máquina de Secar Roupa	0.01
Sistema de Ar Condicionado	0.2
Computador Portátil	0.03
Bateria	0.04
Sistema de Iluminação	0.07
Televisão	0.03
Termoacumulador	0.15

- Os perfis de consumo de todos os aparelhos estarão compreendidos num período de 24 horas (períodos de 15 minutos perfazendo um total de 96 períodos em 24 horas);
- Os parâmetros do PSO serão  $w=0.5$ ,  $c.p=1.2$  e  $c.g=1.2$ );
- Número de iterações será 2000 e o número de partículas será 50.

- **Resultados**

Começou-se por verificar como o programa otimizaria tendo em conta a alteração do número de aparelhos, isto é, passar de 2 equipamentos para 10 e 30. Com esse intuito, mantiveram-se os custos dos equipamentos e as suas potências tendo sido apenas alterado o número de equipamentos agregados. De seguida apresenta-se a tabela (relativa à simulação de 30 equipamentos de cada tipo de aparelho), com o valor monetário por equipamento a ser ressarcido ao cliente por modificações no seu perfil de consumo e a percentagem que cada equipamento possui no total das compensações financeiras a serem atribuídas.

*Tabela 10 – Compensação monetária a oferecer por equipamento*

<b>Tipo de Equipamento</b>	<b>Compensação (Unidades Monetárias)</b>	<b>Percentagem (%)</b>
Máquina de Lavar Roupa	6990.9	3.75
Máquina de Lavar Louça	2400.3	1.29
Máquina de Secar Roupa	28874.9	15.50
Sistema de Ar Condicionado	20537.8	11.02
Portátil	92.6	0.05
Bateria	75142.5	40.32
Sistema de Iluminação	2877.6	1.54
Televisão	174.8	0.09
Termoacumulador	49255.8	26.43
<b>Total</b>	<b>186347.1</b>	<b>100</b>

Como seria de esperar a bateria continua a ser o equipamento que mais contribui no valor a ressarcir aos clientes. No entanto, pela tabela seguinte, verifica-se que a sua contribuição diminui consideravelmente quando comparado com o caso de estudo anterior.

Tabela 11 – Comparação entre a contribuição (em percentagem) de cada equipamento e as compensações financeiras do caso de estudo 3 e do caso de estudo 4 (30 equipamentos)

<b>Tipo de Equipamento</b>	<b>Percentagem caso de estudo 3 (%)</b>	<b>Percentagem caso de estudo 4 (30 equipamentos) (%)</b>	<b>Diferença (%)</b>
Máquina de Lavar Roupa	1.79	3.75	+2.46
Máquina de Lavar Louça	0.47	1.29	+0.82
Máquina de Secar Roupa	2.61	15.50	+13.71
Sistema de Ar Condicionado	5.53	11.02	+5.49
Portátil	0.03	0.05	+0.02
Bateria	81.8	40.32	-41.48
Sistema de Iluminação	1.02	1.54	+0.52
Televisão	0.08	0.09	+0.01
Termoacumulador	6.71	26.43	+19.72
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>-</b>

Pela análise dos resultados obtidos e dispostos na tabela, verifica-se um decréscimo de 41.48% no impacto da bateria no valor total das compensações e um aumento da contribuição dos restantes aparelhos, nomeadamente o aumento em 19.72% do termoacumulador. No caso de estudo anterior foram agregados dois aparelhos de cada tipo, perfazendo um total de 18 aparelhos, mas neste caso de estudo final o número total de aparelhos é de 270, ou seja, como no caso de estudo 3, o número de aparelhos era muito inferior ao atual, pelo facto da bateria operar durante as 24 horas diárias e estar associada a potências elevadas, o programa estava muito restringido em termos de opções aquando da otimização. Com a introdução de mais equipamentos a otimização pôde ser realizada tendo em conta não só a bateria, mas também os outros equipamentos, diminuindo o impacto da bateria na otimização. Por outras palavras, permitiu efetuar *demand response* sem recorrer tanto à bateria.

Para validar esta premissa, foi realizada ainda uma comparação entre uma simulação com 10 equipamentos de cada tipo e outra com 30 equipamentos de cada tipo. Na tabela seguinte apresenta-se essa comparação.

Tabela 12 – Comparação entre a contribuição (em porcentagem) de cada equipamento para as compensações financeiras do cenário com 30 equipamentos e 10 equipamentos

<b>Tipo de Equipamento</b>	<b>Porcentagem caso de estudo final 10 (%)</b>	<b>Porcentagem caso de estudo final 30 (%)</b>	<b>Diferença (%)</b>
Máquina de Lavar Roupa	3.14	3.75	+0.61
Máquina de Lavar Louça	1.25	1.29	+0.04
Máquina de Secar Roupa	13.99	15.50	+1.51
Sistema de Ar Condicionado	10.56	11.02	+0.46
Portátil	0.04	0.05	+0.01
Bateria	48.85	40.32	-8.528
Sistema de Iluminação	1.20	1.54	+0.34
Televisão	0.14	0.09	-0.05
Termoacumulador	20.81	26.43	+5.52
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>-</b>

Mais uma vez, pelos resultados presentes na tabela anterior verifica-se que a contribuição da bateria diminui, o que permite inferir que com o aumento de equipamentos a contribuição deste dispositivo diminui. Porém, neste caso, a diminuição é mais baixa, cerca de 8.258%, mas validando o que foi demonstrado anteriormente.

Relativamente às simulações e aos seus parâmetros, como havia sido referido estes eram os seguintes:

- Os parâmetros do PSO foram  $w=0.5$ ,  $c.p=1.2$  e  $c.g=1.2$ ;
- Número de iterações igual a 2000 e o número de partículas igual a 50.

Tanto o número de iterações (2000) como o número de partículas (50) pareceu ser, inicialmente, um valor razoável como critério de paragem do programa. Os parâmetros do PSO foram os obtidos aquando do *tuning* do PSO.

Relativamente ao critério de paragem do programa, verificou-se aquando das simulações que estas demoravam um tempo considerável. Para obtenção dos resultados da Tabela 10, foram precisos 17205 segundos para concluir a simulação (quase 5 horas). No entanto, esse valor poderia ser diminuído consideravelmente se o número de iterações fosse reduzido. O gráfico seguinte permite verificar que ao fim de 500 iterações a otimização não melhora substancialmente.

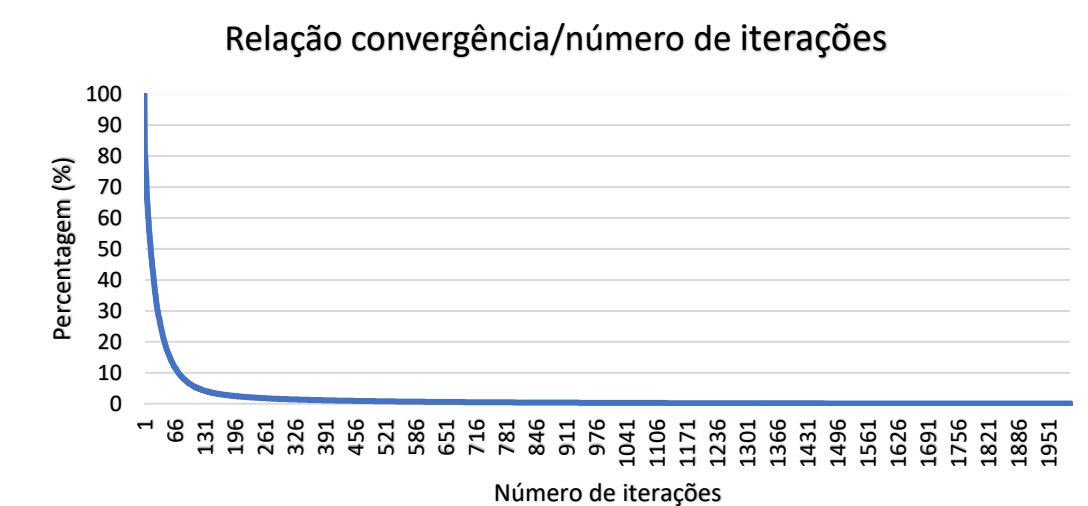


Figura 39 – Gráfico relação convergência/número de iterações

Logo, se fossem usadas 500 iterações como critério de paragem, o tempo de simulação diminuiria cerca de 12904 segundos, demorando apenas 4301 segundos (pouco mais de 1 hora), tornando a simulação mais exequível num contexto real.

- **Conclusões**

Neste caso de estudo foi dada importância a parâmetros que ainda não tinham sido estudados de forma aprofundada nos casos de estudos anteriores, nomeadamente a contribuição dos equipamentos nas compensações monetárias a serem dadas aos utilizadores que participam nestes programas de provisão de flexibilidade e o tempo de simulação dos cenários em causa.

Desta forma, de acordo com as características deste caso de estudo, no que diz respeito ao impacto dos aparelhos nos valores a ressarcir ao cliente, concluiu-se que com o aumento dos equipamentos, dispositivos como a bateria que possuem um perfil de consumo muito singular, que opera nas 24 horas de um dia e possui associadas a si elevados valores de potência, tendem a ter menor contribuição nas compensações. Ao passo que os restantes equipamentos do perfil base de consumo tendem a ver a sua contribuição aumentar, nomeadamente o termoacumulador que apesar de não operar nas 24 horas diárias como a bateria, opera em grande parte do dia. Com o aumento do número de equipamentos, o programa passa a ter mais opções para realizar a otimização não dependendo tanto de dispositivos como a bateria.

Por outro lado, o tempo de simulação também foi um parâmetro que mereceu análise. Nas simulações efetuadas verificou-se que o tempo necessário para que o programa finalizasse as otimizações era excessivo. Num cenário onde estavam em estudo 270 equipamentos e as características da simulação eram as descritas, as otimizações demoraram quase 5 horas. Sendo assim, foi efetuada uma análise da convergência do programa, tendo sido verificado que ao fim de 500 iterações o *fitness* da função objetivo

não melhorava substancialmente. Indicando que o critério de paragem do programa poderia ser alterado, passando o número de iterações a ser 500 em vez de 2000. O tempo de simulação passou de sensivelmente 5 horas para pouco mais de 1 hora, demonstrando ser mais exequível num cenário mais realista.



# 5. Conclusões

## 5.1 Conclusões finais

Nos dias de hoje, a eletricidade é um bem essencial no cotidiano de grande parte da população mundial. Um bem que se tornou indispensável na rotina diária da sociedade. A sua importância é melhor entendida quando, durante alguns períodos de tempo há uma falha no fornecimento de energia. De maneira a que o seu fornecimento seja contínuo sem qualquer tipo de interrupções que afetem o cotidiano social, é necessário um esforço de todos os agentes que operam nos sistemas elétricos de energia. Desde a produção até ao transporte e distribuição, é preciso que seja assegurado que o produto final é entregue ao consumidor de forma segura, adequada ao uso pretendido e da forma mais económica. Logo, é necessário que todos os intervenientes do setor operem em sintonia e garantam a fiabilidade do sistema em períodos de incerteza na produção de energia. Como solução surge a flexibilidade energética. Todos os sistemas de energia têm algum nível inerente de flexibilidade, projetado para equilibrar a oferta e a procura em todos os momentos. Além de permitir lidar com o problema da incerteza associada à produção de energia por meios renováveis, é uma solução muito vantajosa em termos financeiros, pois permite que os investimentos no reforço da rede sejam colocados de parte ou adiados. No entanto a flexibilidade energética não poderá ser explorada se o mercado energético como o conhecemos não for alterado. Devido aos problemas mencionados, o design atual do mercado necessita de mudanças que não passam apenas por aqueles que operam nos sistemas elétricos de energia, isto é, os agentes responsáveis pela comercialização, transmissão e distribuição de energia. Um dos intervenientes essenciais nesta mudança de paradigma serão os utilizadores finais, que terão nas suas instalações, sistemas de gestão de energia que fornecem em tempo real informações sobre os consumos energéticos do utilizador em questão, não só aos próprios, mas também ao agregador/operador energético, permitindo monitorização e otimização do consumo energético.

Sendo assim, inserida na temática da constante melhoria do setor elétrico, a presente dissertação teve como objetivo principal do trabalho realizado o desenvolvimento de um modelo com o objetivo de conseguir uma correspondência entre a flexibilidade requerida por um agregador e a flexibilidade oferecida por utilizadores residenciais através da capacidade de um sistema de gestão de energia residencial de realizar um conjunto de tarefas. Estes modelos foram resolvidos usando uma ferramenta informática desenvolvida em R que com determinados dados de entrada, devolvia parâmetros otimizados usando a otimização por enxame de partículas (PSO). O nível de complexidade dos modelos foi aumentando ao longo dos diferentes casos de estudo, começando apenas por considerar dezenas de aparelhos de *shifting*, até considerar equipamentos de *real time* em conjunto com os de *shifting*, baterias de armazenamento residencial e painéis fotovoltaicos, resultando num problema de otimização com milhares de variáveis a serem otimizadas.

Para formulação dos casos de estudo, diversos parâmetros tiveram que ser levados em conta. Como dados de entrada, todos os consumos domésticos dos tipos de aparelhos mencionados eram considerados sendo depois agregados. Além desse parâmetro de entrada, a flexibilidade requerida pelo DSO completava o conjunto de *inputs* do programa. O programa por seu lado, retornava os novos períodos de funcionamento dos aparelhos de *shifting*, as novas intensidades dos equipamentos de *real time* e no caso das baterias o valor a carga e descarga em cada período. Todos agrupados, resultavam num novo perfil otimizado. Através do programa seria ainda possível verificar quais os equipamentos que resultariam numa maior compensação financeira ao utilizador, por este aceitar realizar alterações no seu perfil de consumo.

Não menos importante, ao longo do desenvolvimento dos modelos, foi assegurado também o cumprimento das diversas restrições associadas ao conforto e bem-estar do utilizador, tais como: configuração das preferências do utilizador, isto é, restrições quanto a períodos de troca permitidos, dispositivos específicos que podem ser controlados ou prioridade dos dispositivos.

Com o intuito de verificar a validade da metodologia proposta, começou-se por gerar um caso de estudo muito simples que serviria como introdução aos restantes. Nesse caso de estudo foram apenas considerados 3 equipamentos de *shifting* onde eram explicados os dados de entrada e os dados de saída do programa e como eram gerados esses dados. O objetivo deste caso de estudo era providenciar ao leitor uma explicação simples e sucinta sobre o que estava a ser estudado, como eram gerados e obtidos os parâmetros e resultados associados ao programa. O passo seguinte foi introduzir mais alguns equipamentos de *shifting* ao programa, neste caso foram 15. Esse caso de estudo, ligeiramente mais complexo, serviu como validação do modelo proposto anteriormente, obtendo-se resultados satisfatórios, uma vez que houve um *match* perfeito entre aquilo que o agregador pretendia e aquilo que os utilizadores poderiam oferecer. Estes dois casos de estudo foram utilizados na escrita de um artigo de conferência, cuja submissão foi aceite, comprovando o mérito do modelo proposto.

Num patamar superior de complexidade surgiu o caso de estudo nº2, que coincidiu com a introdução dos equipamentos de *real time*. Estes equipamentos possuem características diferentes dos de *shifting* e a sua otimização é igualmente diferente, visto que o programa, aquando da otimização, não devolve o novo período de operação, mas sim o valor das intensidades desses dispositivos em cada período de funcionamento. Em comparação com o caso de estudo anterior, o programa deixou de ter apenas umas dezenas de variáveis para passar a ter centenas (dependendo do número de equipamentos introduzidos, neste caso o número de variáveis foram 920). O aumento do número de variáveis torna o problema mais complicado de resolver, aumentando a complexidade da otimização e o tempo de simulação (embora os tempos de simulação fossem estudados apenas no caso de estudo final). No entanto, apesar da complexidade do caso de estudo, mais uma vez os resultados obtidos permitiram inferir o sucesso do modelo, conseguindo-se mais uma vez um *match* perfeito entre a flexibilidade exigida pelo DSO e a flexibilidade oferecida pelos utilizadores participantes do programa. A partir dos resultados obtidos foi ainda possível realizar um pequeno estudo sobre as compensações financeiras a oferecer aos utilizadores, verificando o impacto de cada tipo de aparelho na compensação final. Importa ainda salientar, que foi neste caso de estudo que foram

introduzidas as restrições relativas ao conforto do utilizador tendo o caso de estudo, pela sua complexidade e pertinente relevância, permitido a escrita de um artigo de revista.

No caso de estudo seguinte, foi dada mais ênfase às compensações financeiras resultantes das alterações nos consumos dos utilizadores para ir de encontro àquilo que é pedido pelo agregador e aos parâmetros do PSO. Além disso, foram introduzidos novos equipamentos, a bateria de armazenamento residencial, o termoacumulador e o painel fotovoltaico, tendo-se verificado que o termoacumulador e a bateria de armazenamento residencial contribuem para grande parte das compensações financeiras, nomeadamente a bateria com um contributo superior a 80%. Esse contributo pode ser explicado pelo facto do equipamento funcionar durante as 24 horas diárias, ter associadas a si potências elevadas e pelo facto de neste caso de estudo terem sido muitos poucos equipamentos agregados. Estes fatores, principalmente o último, levaram a que a contribuição da bateria para as compensações fosse extremamente elevada, como o caso de estudo final comprovou. Ainda neste caso de estudo, foram estudados os parâmetros de otimização do PSO. Em todos os casos de estudo anteriores os parâmetros do PSO utilizados foram os predefinidos no *software*, tendo-se utilizado este caso de estudo para efetuar o chamado “*tuning* dos parâmetros do PSO” de forma a obter otimizações com os melhores resultados possíveis. O *tuning* foi realizado com sucesso, tendo-se obtido novos parâmetros para o PSO que resultavam em valores de *fitness* inferiores àqueles obtidos com os parâmetros predefinidos. O *tuning* foi realizado neste caso de estudo pelo facto de este possuir características mais simples, tornando mais fácil a obtenção dos resultados e num espaço de tempo mais reduzido.

Por fim, o último caso de estudo foi criado com o intuito de verificar qual seria o impacto na contribuição de certos aparelhos para as compensações financeiras caso o número de aparelhos em estudo aumentasse e como seria possível melhorar os tempos de simulação. Relativamente ao primeiro objetivo, verificou-se que, de facto, com a introdução de mais aparelhos, a contribuição de certos equipamentos diminuía ao passo que a contribuição de outros aumentava. O caso mais relevante foi a bateria, que para a situação estudada viu a sua contribuição diminuir em mais de 40%, ao passo que equipamentos como a máquina de secar roupa e o termoacumulador viram a sua contribuição aumentar. No que toca aos tempos de simulação, o critério de paragem do método adotado foi o número de iterações. Porém, através da análise dos valores de *fitness* obtidos, observou-se que ao fim de 500 iterações o *fitness* não possuía melhorias significativas. Isto é, as simulações efetuadas podiam ter como critério de paragem 500 iterações ao invés de 2000, poupando sensivelmente 4 horas no tempo de simulação, tornando os tempos de simulações mais exequíveis num contexto real.

Em suma, através do que foi referido, pelo aparente sucesso dos resultados obtidos e pela validação internacional obtida através da publicação do artigo redigido em paralelo com o desenvolvimento desta dissertação, a ferramenta desenvolvida é apropriada para o fim a que se destina, contudo, possuindo limitações que podem ser ultrapassadas através dos trabalhos futuros sugeridos.

## 5.2 Principais contributos

Ao longo dos anos o mercado energético tem vindo a sofrer alterações, devido em grande parte, à produção de energia descentralizada e ao carácter flutuante das energias renováveis. Sendo assim, nos últimos anos diversos autores têm sugerido novas formas de operar no mercado. Inúmeras propostas têm sido realizadas, mas nesta dissertação foi adotada aquela em que o agregador possui uma carteira de clientes e lhes adquire flexibilidade energética. Atualmente e no futuro, este conceito será peça chave no bom funcionamento dos sistemas e mercados de energia e sua introdução levará a um conjunto de benefícios, não só para o cliente, mas também para o operador do sistema de energia. Tendo presente esta temática, nesta dissertação foi levada a cabo um estudo em que se simulou diferentes cenários, ou seja, a interação entre o agregador e clientes por intermédio de um HEMS, assente em modelos matemáticos que foi transposto a um programa desenvolvido em R e otimizado a partir do PSO.

A partir do trabalho desenvolvido e apresentado nesta dissertação, foram submetidas e aceites as seguintes publicações científicas:

- *A Flexibility Home Energy Management System to Support Aggregator Requests in Smart Grids* por Tiago Sousa, Fernando Lezama, João Soares, Sérgio Ramos e Zita Vale aceite na conferência SSCI2018.
- *Flexibility management model of home appliances to support DSO requests in smart grids* por Fernando Lezama, João Soares, Tiago Sousa, Bruno Canizes e Zita Vale submetido na revista “Wiley Energy Science & Engineering”.

## 5.3 Contributos e interação com projetos nacionais

Este trabalho contribuiu para o desenvolvimento do projeto nacional SIMOCE (ANI - P2020 17690) que recebeu financiamento dos fundos FEDER através do programa “COMPETE” e dos Fundos Nacionais através da FCT no âmbito do projeto UID / EEA / 00760/2013. Além disso, este trabalho beneficiou de ideias da proposta do projeto recentemente financiado com ref. 02 / SAICT / 2017/28983 - CENERGETIC no que toca aos aspetos do funcionamento dos modelos de flexibilidade.

## 5.4 Trabalhos futuros

Ao longo desta dissertação foi abordada uma metodologia com o intuito de conseguir uma correspondência entre a flexibilidade exigida por um agregador e a flexibilidade oferecida pelos utilizadores residenciais através da capacidade de um sistema de gestão de energia residencial. Sendo assim, sugere-se:

- Introdução de equipamentos com mais perfis de consumo;
- Casos de estudo com duração superior a 24 horas;
- Vários agregadores em vez de apenas um;
- Consideração da rede;

- Consideração de veículos elétricos;
- Comparação com métodos determinísticos.

## Referências

- [1] «EUROPA - Energia | União Europeia». [Em linha]. Disponível em: [https://europa.eu/european-union/topics/energy\\_pt](https://europa.eu/european-union/topics/energy_pt). [Acedido: 08-Mar-2018].
- [2] N. Sadeghianpourhamami, M. Strobbe, e C. Develder, «Real-world user flexibility of energy consumption», *Proc. 31st Annu. ACM Symp. Appl. Comput. - SAC '16*, pp. 2148–2153, 2016.
- [3] USEF Foundation, *USEF: The Framework Explained*. 2015.
- [4] O. Organized, B. Y. The, O. De, e O. F. The, «Benefits of Demand Response in electricity markets and recommendations for achieving them», n. February, pp. 13–14, 2009.
- [5] F. Elghitani e W. Zhuang, «Aggregating a Large Number of Residential Appliances for Demand Response Applications», *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3053, n. c, pp. 1–1, 2017.
- [6] Y. Liu, B. Qiu, X. Fan, H. Zhu, e B. Han, «Review of Smart Home Energy Management Systems», *Energy Procedia*, vol. 104, pp. 504–508, 2016.
- [7] M. Shakeri *et al.*, «An intelligent system architecture in home energy management systems (HEMS) for efficient demand response in smart grid», *Energy Build.*, vol. 138, pp. 154–164, 2017.
- [8] B. Zhou *et al.*, «Smart home energy management systems: Concept, configurations, and scheduling strategies», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 61, pp. 30–40, 2016.
- [9] 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», *Appl. Energy*, vol. 155, pp. 79–90, 2015.
- [10] Z. Zhao, W. C. Lee, Y. Shin, S. Member, e K. Song, «An Optimal Power Scheduling Method for Demand Response in Home Energy Management System», *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, n. 3, pp. 1391–1400, 2013.
- [11] A. B. and G. A. S. S. and A. M. and F. Gao, «Efficient and Autonomous Energy Management Techniques for the Future Smart Homes», *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. PP, n. 2, pp. 1–10, 2017.
- [12] «Dijkstra's Algorithm: Definition, Applications & Examples - Video & Lesson Transcript | Study.com». [Em linha]. Disponível em: <https://study.com/academy/lesson/dijkstra-s-algorithm-definition-applications-examples.html>. [Acedido: 12-Set-2018].
- [13] «Inifnite Smart». [Em linha]. Disponível em: <http://infinitemart.com.my/smarthome>. [Acedido: 01-Set-2018].
- [14] F. Pereira e S. I. D. E. A. R. D. E. E. Nergia, «ENERGY STORAGE SYSTEMS», pp. 17–28, 2012.

- [15] A. K. Rohit e S. Rangnekar, «An overview of energy storage and its importance in Indian renewable energy sector: Part II – energy storage applications, benefits and market potential», *J. Energy Storage*, vol. 13, pp. 447–456, 2017.
- [16] M. H. Albadi e E. F. El-Saadany, «Demand response in electricity markets: An overview», *2007 IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meet. PES*, pp. 1–5, 2007.
- [17] «Demand Side Management». [Em linha]. Disponível em: [https://www.ema.gov.sg/Demand\\_Side\\_Management.aspx](https://www.ema.gov.sg/Demand_Side_Management.aspx). [Acedido: 01-Set-2018].
- [18] COWI, AF Mercados, ECoFYS, THEMA Consulting Group, e VITO, «Impact Assessment Study on Downstream Flexibility , Demand», n. July 2016, p. 192, 2016.
- [19] Rocky Mountain Institute, «Demand Response: An Introduction», p. 46, 2006.
- [20] J. S. Vardakas, N. Zorba, C. V Verikoukis, e S. Member, «A Survey on Demand Response Programs in Smart Grids : Pricing Methods and Optimization Algorithms», vol. 17, n. 1, pp. 152–178, 2015.
- [21] P. Admi, «Transmission technology roadmap», n. February, 2013.
- [22] J. Cochran *et al.*, «Flexibility in 21st Century Power Systems», *21st Century Power Partnersh.*, vol. May, p. 14, 2014.
- [23] E. Hsieh e R. Anderson, «Grid flexibility: The quiet revolution», *Electr. J.*, vol. 30, n. 2, pp. 1–8, 2017.
- [24] S. S. Torbaghan, N. Blaauwbroek, P. Nguyen, e M. Gibescu, «Local market framework for exploiting flexibility from the end users», *Int. Conf. Eur. Energy Mark. EEM*, vol. 2016–July, 2016.
- [25] A. Ramos, C. De Jonghe, V. Gómez, e R. Belmans, «Realizing the smart grid’s potential: Defining local markets for flexibility», *Util. Policy*, vol. 40, pp. 26–35, 2016.
- [26] P. Olivella-Rosell *et al.*, «Optimization problem for meeting distribution system operator requests in local flexibility markets with distributed energy resources», *Appl. Energy*, vol. 210, n. April 2017, pp. 881–895, 2018.
- [27] Eurelectric, «Demand response aggregation», pp. 3–4, 2017.
- [28] S. Burger, J. P. Chaves-Ávila, C. Battle, e I. J. Pérez-Arriaga, «A review of the value of aggregators in electricity systems», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 77, n. April, pp. 395–405, 2017.
- [29] J. Ikäheimo, C. Evens, e S. Kärkkäinen, «DER Aggregator Business: the Finnish Case», p. 38, 2010.
- [30] «Demand Side Response Aggregator (DSR Aggregator)». [Em linha]. Disponível em: <https://www.emissions-euets.com/internal-electricity-market-glossary/855-demand-side-response-aggregator-dsr-aggregator>. [Acedido: 26-Set-2018].
- [31] T. R. Kelley, «Optimization, an important stage of engineering design», *Technol. Teach.*, vol. 69, n. 5, pp. 18–23, 2010.

- [32] I. Griva, G. N. Stephen, e S. Ariela, «Linear and nonlinear optimization», 2009.
- [33] F. M. T. de S. Dias, «Otimização de redes elétricas de distribuição - Planejamento e Operação», p. 239, 2015.
- [34] N. Gomes, «Optimização - Conceitos», 2015.
- [35] S. Wright, «Continuous Optimization (Nonlinear and Linear Programming)», *Found. Comput. Process Des.*, pp. 1–14, 1999.
- [36] M. R. AlRashidi e M. E. El-Hawary, «A Survey of Particle Swarm Optimization Applications in Electric Power Systems», *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 13, n. 4, pp. 913–918, 2009.
- [37] S. Singh, «A Review on Particle Swarm Optimization Algorithm», *int J Sci Eng Res*, vol. 5, n. 4, pp. 551–553, 2014.
- [38] R. Stammering, «Synergy Potential of Smart Appliances», *D2.3 WP2 from Smart-A Proj.*, p. 237, 2008.
- [39] «Energy Use Calculator – Calculate electricity usage and energy cost of any device». [Em linha]. Disponível em: <https://www.energyusecalculator.com/>. [Acedido: 01-Set-2018].
- [40] M. Curtis, «Demand side response aggregators: How they decide customer suitability», *Int. Conf. Eur. Energy Mark. EEM*, 2017.
- [41] «• Daily TV viewing time in European countries 2016 | Statistic». [Em linha]. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/422719/tv-daily-viewing-time-europe/>. [Acedido: 01-Set-2018].
- [42] USEF Foundation e Universal Smart Energy Framework, *USEF: The Framework explained*. 2015.
- [43] C. Bendtsen, «Package “pso” Title Particle Swarm Optimization», 2015.
- [44] G. S. Tewolde, D. M. Hanna, e R. E. Haskell, «Enhancing performance of PSO with automatic parameter tuning technique», *2009 IEEE Swarm Intell. Symp. SIS 2009 - Proc.*, n. 1, pp. 67–73, 2009.
- [45] E. Yeguas, M. V. Luzón, R. Pavón, R. Laza, G. Arroyo, e F. Díaz, «Automatic parameter tuning for Evolutionary Algorithms using a Bayesian Case-Based Reasoning system», *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 18, pp. 185–195, 2014.