

# Escalonamento de recursos elétricos usando a técnica de campos de potencial

Tânia Filipa Alves Cerdeira N°31011

Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e Gestão do  
Instituto Politécnico de Bragança para obtenção do grau de Mestre em  
Engenharia Industrial – Especialização em Engenharia Eletrotécnica

Trabalho realizado sob a orientação de  
**Prof. Dr. Paulo Leitão**

junho de 2019



# Escalonamento de recursos elétricos usando a técnica de campos de potencial

Tânia Filipa Alves Cerdeira N°31011

Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e Gestão do  
Instituto Politécnico de Bragança para obtenção do grau de Mestre em  
Engenharia Industrial – Especialização em Engenharia Eletrotécnica

junho de 2019

A Escola Superior de Tecnologia e de Gestão não se responsabiliza pelas opiniões expressas neste relatório.

# Dedicatória

Aos meus pais, Fernanda e José, à minha irmã Sônia, e a toda a minha família que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa da minha vida. À minha madrinha Rosa e tia Arminda, “In Memoriam”, pois sem elas muitos dos meus sonhos não se realizariam.

# Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao orientador, Professor Doutor Paulo Leitão, pela paciência, tempo e pelo conhecimento transmitido na elaboração deste projeto, contribuindo para o meu crescimento tanto a nível profissional como pessoal.

Em segundo, um grandioso obrigada ao Jonas Queiroz do Centro de Investigação em Digitalização e Robótica Inteligente (CeDRI) por toda a ajuda prestada, a qual foi essencial para a conclusão deste projeto.

Em terceiro, obrigada ao Professor Adriano Ferreira, pela paciência e interesse demonstrado.

Ao pessoal do CeDRI pela amizade e palavras de incentivo.

À minha família, em especial aos meus pais e irmã pelo apoio incondicional, por nunca deixarem que me faltasse nada, pelas palavras de carinho e de conforto que fizeram sempre com que tivesse forças para chegar mais longe.

Por fim, aos meus amigos e namorado, que me acompanharam nesta fase de forma incansável. Ficarão para sempre na minha memória todos os momentos que passei ao longo da realização deste projeto.

O meu profundo e sentido agradecimento a todas as pessoas que contribuíram para a concretização deste projeto.

# Resumo

A grande transformação no sistema elétrico de energia de que estamos a ser alvo deve-se ao aumento do uso de energias renováveis juntamente com a liberalização do mercado energético, transformando o sistema tradicional e centralizado numa *smart grid*, ou seja, rede elétrica inteligente. O principal objetivo desta rede inteligente é a capacidade de produção, transporte, distribuição e o uso final de energia elétrica de modo eficiente, ambientalmente sustentável, viável economicamente e de forma confiável e segura deixando assim a rede de energia elétrica estar estabelecida na estrutura tradicional (centralizada) passando então a estar estabelecida numa estrutura descentralizada.

A rede elétrica inteligente é uma rede modernizada que utiliza as Tecnologias de Informação e Comunicação (TICs) para reunir e agir sobre informações de modo automático de forma a melhorar a fiabilidade e eficiência dos sistemas elétricos. Uma micro rede é parte integrante de uma rede inteligente que integra recursos energéticos (normalmente renováveis) em pequena escala.

Tendo por objetivo aumentar a sustentabilidade em micro redes, é fundamental a aplicação de métodos de priorização, escalonamento e deslastre de cargas. Este trabalho tem por objetivo aplicar técnicas inovadoras que visem otimizar os recursos existentes numa rede elétrica inteligente que opera desconectada da rede principal. Em particular pretende-se aplicar o conceito de campos de potencial elétrico de modo a conseguir distribuir a produção de energia a partir de recursos energéticos renováveis pelas diversas cargas e ao longo do tempo (isto é, ajustar a procura de energia elétrica pelas cargas à oferta de energia elétrica oferecida pelos recursos de produção de energia), focando a priorização, escalonamento e deslastre de cargas elétricas. Esta alocação considera os perfis

do utilizador final, assim como o nível de utilidade das cargas de modo a que o impacto seja minimizado.

A abordagem proposta foi testada num caso de estudo compreendendo uma micro rede elétrica, pertencente à empresa Locionni em Itália, esta contém seis consumidores (habitações unifamiliares) e nove produtores de energia elétrica.

**Palavras-chave:** redes elétricas inteligentes, micro redes, priorização de cargas, escalonamento de cargas, campos de potencial.



# Abstract

The major transformation in the energy system we are targeting is due to the increased use of renewable energy along with the liberalization of the energy market, transforming the traditional and centralized system into a smart grid. The main objective of this intelligent network is the capacity to produce, transport, distribute and use electricity in an efficient, environmentally sustainable, economically viable and reliable and safe way, thus leaving the electricity grid established in the traditional structure (centralized) and then established in a decentralized structure. The smart grid is a modernized grid that uses the TICs to gather and act on information automatically to improve the reliability and efficiency of electrical systems. A microgrid is part of an intelligent network that integrates energy resources (usually renewable) on a small scale.

With the objective of increasing sustainability in microgrid, it is fundamental to apply methods of prioritization, scheduling and load shedding. The objective of this work is to apply innovative techniques that optimize the existing resources in an intelligent electrical grids that operates disconnected from the main grids. In particular, it is intended to apply the concept of electric potential fields in order to be able to distribute the energy production from renewable energy resources by the various loads and over time (that is, to adjust the electric energy demand by the loads to the supply of electricity offered by energy production resources), focusing on the prioritization, scheduling and shedding of electric charges. This allocation considers the end-user profiles as well as the level of utility of the loads so that the impact is minimized.

The proposed approach was tested in a case study comprising a microgrid owned by Locionni in Italy, which contains six consumers (single family dwellings) and nine

electricity producers.

**Keywords:** intelligent electrical grid, microgrid, load prioritization, load scheduling, potencial fields.

# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Enquadramento . . . . .	1
1.2	Objetivos . . . . .	3
1.3	Estrutura do documento . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Estado da arte</b>	<b>5</b>
2.1	Redes elétricas inteligentes . . . . .	5
2.2	Micro redes inteligentes . . . . .	7
2.3	Deslastre e escalonamento de cargas elétricas . . . . .	8
2.4	Priorização de cargas elétricas . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Escalonamento utilizando campos de potencial</b>	<b>17</b>
3.1	Técnica de campos de potencial elétrico . . . . .	19
3.2	Escalonamento baseado em campos potenciais . . . . .	19
3.2.1	Cálculo do campo potencial nos produtores . . . . .	21
3.2.2	Cálculo do campo potencial nos consumidores . . . . .	21
3.2.3	Cálculo do poder de atração entre produtores e consumidores . . . . .	23
3.3	Consumidores compostos . . . . .	23
<b>4</b>	<b>Caso de estudo</b>	<b>27</b>
4.1	Recursos produtores e de armazenamento . . . . .	28
4.2	Descrição das cargas elétricas . . . . .	29

4.3	Descrição dos perfis de utilização . . . . .	30
<b>5</b>	<b>Implementação e análise de resultados</b>	<b>33</b>
5.1	Implementação do método de campos potenciais . . . . .	33
5.1.1	Cálculo da utilidade das cargas elétricas . . . . .	33
5.1.2	Cálculo dos campos potenciais . . . . .	34
5.2	Cenários de implementação . . . . .	36
5.2.1	Cenário 1: sem escalonamento . . . . .	36
5.2.2	Cenário 2: escalonamento . . . . .	37
5.2.3	Cenário 3: escalonamento baseado em campos potenciais . . . . .	37
5.3	Análise de resultados . . . . .	37
5.3.1	Dia típico de inverno . . . . .	37
5.3.2	Dia típico de verão . . . . .	38
5.3.3	Semana típica de inverno . . . . .	40
5.3.4	Semana típica de verão . . . . .	41
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>43</b>
<b>A</b>	<b>Algoritmos em linguagem R</b>	<b>49</b>

# Lista de Tabelas

4.1	Descrição das cargas elétricas. . . . .	29
4.2	Priorização das cargas elétricas. . . . .	30
5.1	Resultados para um dia típico de inverno . . . . .	38
5.2	Resultados para um dia típico de verão . . . . .	39
5.3	Resultados para uma semana típica de inverno . . . . .	40
5.4	Resultados para uma semana típica de verão . . . . .	42

# Lista de Figuras

2.1	Rede elétrica inteligente [6]. . . . .	6
3.1	Conceito de campo potencial, adaptada de [27]. . . . .	20
3.2	Conceito de campo potencial para o escalonamento de cargas em micro redes. 20	
3.3	Negociação entre consumidores compostos e consumidores simples. . . . .	24
4.1	Circuito elétrico do caso de estudo. . . . .	27
5.1	Fluxograma do cálculo da utilidade das cargas elétricas . . . . .	34
5.2	Fluxograma do escalonamento utilizando campos potenciais. . . . .	35
5.3	Resultado dos três cenários num dia típico de inverno. . . . .	38
5.4	Resultado dos três cenários num dia típico de verão. . . . .	39
5.5	Resultado dos três cenários numa semana típica de inverno. . . . .	40
5.6	Resultado dos três cenários numa semana típica de verão. . . . .	41

# Siglas

**C** consumidor. 21

**CHP** Combinação de calor e energia. 9

**Ct** consumidor composto. 24

**DERs** Recursos de Energia Distribuída. 9

**ESS** Sistemas de Armazenamento de Energia. 9

**HEM** Sistema de Gestão de Energia Doméstica. 14

**IoT** Internet das Coisas. 17

**P** produtor. 21

**RTDS** Simulador Digital em Tempo Real. 9

**TICs** Tecnologias de Informação e Comunicação. vii

**VOLL** Valor de carga perdida. 14





# Capítulo 1

## Introdução

O presente relatório descreve o trabalho desenvolvido no âmbito da Unidade Curricular de Projeto do Mestrado de Engenharia Industrial, Especialização em Engenharia Eletrotécnica, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança. O seu foco centra-se no estudo e aplicação de técnicas inovadoras que visem otimizar os recursos existentes numa micro rede elétrica inteligente que opera desconectada da rede principal, visando aumentar a sua autossustentabilidade.

Neste capítulo apresenta-se a contextualização das redes de energia elétrica nos dias que correm face à sua evolução com o passar do tempo, assim como os objetivos associados a este trabalho e a organização do presente relatório.

### 1.1 Enquadramento

O ser humano desde sempre necessitou de energia para desenvolver as suas atividades. Quando o fogo foi descoberto, a sua qualidade de vida melhorou, e aumentou mais ainda quando se descobriu a eletricidade.

A época da revolução industrial foi uma época negra para o ambiente. O uso exagerado dos combustíveis fósseis, libertou para a atmosfera terrestre imensas quantidades de dióxido de carbono e outros gases tóxicos, que a longo prazo podem afetar bastante a vida no planeta. Ainda hoje em dia os combustíveis fósseis são a fonte de energia mais

utilizada no mundo. Para além de serem poluentes, são também não renováveis, isto é, a velocidade em que são utilizados para gerar energia é superior à velocidade com que a Natureza os gera, o que leva ao seu esgotamento. O petróleo, por exemplo, tem uma duração estimada de cinquenta anos. Estes dois fatores levaram o ser humano a apostar nas energias renováveis, as quais nunca se esgotam pois estão em constante regeneração, o que faz com que seja um investimento com retorno assegurado. Para além disso, a grande maioria das energias renováveis são também não poluentes. Isto permite-nos não piorar a condição ambiental do nosso planeta e esperar que esta melhore naturalmente [1].

Ao longo dos anos, os sistemas de energia elétrica, quase não alteraram sua concepção estrutural. Grandes centrais geradoras produzem energia elétrica que é transmitida aos centros de consumo por um sistema de transmissão e, nesses centros, a energia é distribuída aos consumidores em vários níveis de tensão. A rede de transmissão garante uma operação mais económica e segura pela otimização das fontes de energia e reprogramação dessas fontes em casos de emergências. Esta concepção centralizada de sistemas de energia elétrica está a sofrer uma grande alteração. A viabilidade económica de fontes de energia de pequeno porte, os avanços nas tecnologia de informação e comunicação de dados, a disponibilidade de instrumentos de medição inteligente e remota, o sensoriamento e controlo inteligente, têm vindo a proporcionar a introdução de uma nova abordagem, designada por redes elétricas inteligentes [2].

O termo *smart grid*, ou redes elétricas inteligentes, utiliza tecnologias de informação e comunicação emergentes nas infraestruturas elétricas convencionais, automatizando o seu funcionamento e permitindo aumentar o nível de monitorização e controlo da rede, assim como uma maior interação entre os participantes (produtores e consumidores) na operação do sistema elétrico de energia. Nesta abordagem, os consumidores constituem participantes ativos na gestão do sistema elétrico de energia através do seu papel como produtores, existindo ainda a integração de veículos elétricos que funcionam como consumidores e como armazenadores de energia elétrica [2], [3].

O conceito de micro rede pertence á concepção geral de uma rede inteligente. Uma micro rede é composta por vários elementos geradores de energia elétrica, cargas elétricas

e térmicas, sistemas de armazenamento de energia, rede de distribuição que faz a ligação dos elementos anteriormente mencionados, e equipamento de gestão e controlo. Nestas redes, os recursos geradores de energia elétrica usam fontes de energia renováveis.

Uma micro rede pode operar em dois modos diferentes:

- Normal, quando se encontra ligada à rede de distribuição;
- Isolada, quando projetada para alimentar zonas remotas ou em modo crítico em caso de colapso parcial ou generalizado da rede de distribuição.

A capacidade de funcionar em modo isolado é lhe conferida pela presença de micro fontes e dispositivos de armazenamento de energia que possibilitam que a carga, ou pelo menos uma parte significativa da mesma, continue a ser alimentada. A micro rede funciona autonomamente e para que não haja problemas de existir consumo superior à produção e para garantir a sua autossustentabilidade, são precisas estratégias de controlo e gestão apropriadas, como:

- Priorização de carga: analisa e seleciona as cargas mais importantes a cada momento, permitindo que o algoritmo opere com impacto mínimo para o consumidor.
- Escalonamento de carga: permite otimizar a distribuição das cargas de acordo com a produção gerada.
- Deslastre de carga: permite desligar, de maneira controlada, as cargas de baixa prioridade, a fim de reduzir o consumo e assim manter o sistema equilibrado [4].

## 1.2 Objetivos

Este projeto tem como objetivo aplicar técnicas inovadoras que visem otimizar os recursos existentes numa micro rede elétrica inteligente que opera desconectada da rede principal.

Em particular pretende-se aplicar o conceito de campos de potencial elétrico de modo a conseguir distribuir a produção de energia a partir de recursos energéticos renováveis pelas

diversas cargas e ao longo do tempo, focando a priorização, escalonamento e deslastre de cargas elétricas, seguindo o objetivo de atingir a máxima autossustentabilidade da micro rede sem degradar a qualidade de serviço. Esta alocação deve considerar os perfis do utilizador final de modo a que o impacto seja minimizado.

### **1.3 Estrutura do documento**

Este projeto divide-se em 6 capítulos. O Capítulo 1 descreve o enquadramento do trabalho assim como a sua motivação e objetivos a atingir no decorrer do mesmo. De seguida, no Capítulo 2, foi realizada uma revisão da literatura existente, relativa aos conceitos de priorização, escalonamento e deslastre de cargas elétricas. No Capítulo 3 é descrita a abordagem baseada em campos de potencial para realizar o escalonamento e priorização visando o aumento da autosustentabilidade. Por sua vez, o Capítulo 4 descreve o caso de estudo considerado neste trabalho, e em particular as cargas elétricas e os perfis de utilização. No Capítulo 5 é realizada a implementação da abordagem proposta e uma análise dos resultados obtidos através da simulação dos modelos implementados para diferentes cenários. Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho e aponta algumas propostas para trabalhos futuros. Em anexo encontram-se os algoritmos implementados na linguagem R.

# Capítulo 2

## Estado da arte

Na realização deste projeto foi fundamental uma pesquisa detalhada de pontos fulcrais, como o escalonamento, deslastre e priorização de cargas elétricas, para rever as técnicas existentes, utilizadas por outros autores.

Neste capítulo será apresentada uma breve revisão bibliográfica relativa aos conceitos de redes elétricas inteligentes, micro redes, e em particular aos conceitos e algoritmos existentes de priorização, escalonamento e deslastre.

### 2.1 Redes elétricas inteligentes

A rede elétrica convencional consiste num fluxo de energia unidirecional que parte das unidades geradoras para os consumidores. A energia é produzida em grandes centrais de geração, transmitida até às centrais de distribuição localizadas em regiões próximas dos consumidores e por fim distribuída aos consumidores. As redes elétricas inteligentes ou “smart grids”, ilustrada na Figura 2.1, referem-se ao uso intensivo de tecnologias de informação e de comunicação modernas para garantir maior confiabilidade e oferecer mais qualidade ao sistema. Nas redes elétricas inteligentes os fluxos de energia e de comunicação são bidirecionais. O consumidor pode produzir energia, ou seja, pode ser produtor e consumidor de energia ao mesmo tempo, sendo conhecido por *prosumer*[5].

As redes elétricas inteligentes trarão outros benefícios como seja a geração distribuída

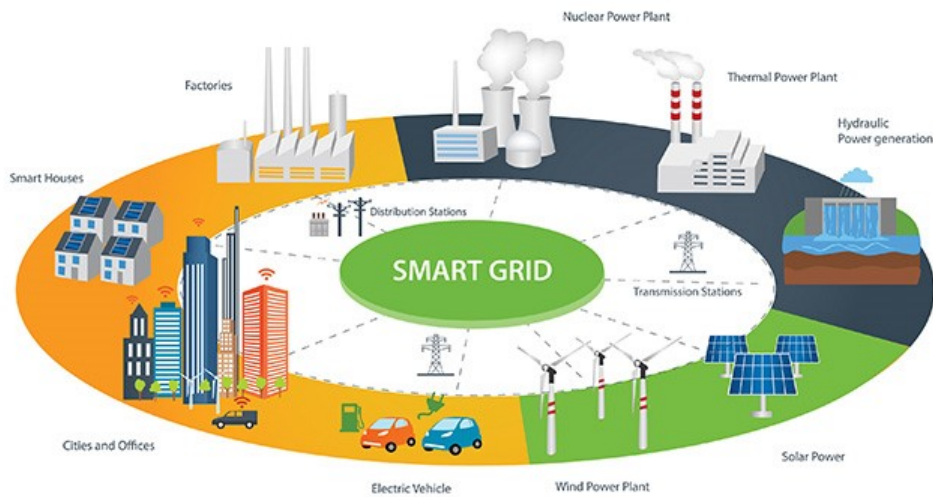


Figura 2.1: Rede elétrica inteligente [6].

e a incorporação de recursos energéticos com fontes renováveis, as micro redes, e uma maior participação do consumidor.

Algumas das características geralmente atribuídas às redes elétricas inteligentes são, a auto-recuperação, tolerância a ataques externos, fornecer energia com qualidade e reduzir o impacto ambiental do sistema produtor de eletricidade [7].

Essas características poderão ser alcançadas através da introdução de algumas áreas de inovação tecnológica como automação e controlo digital da rede elétrica, utilizando controlo eletrónico inteligente, capaz de antecipar a ocorrência de anomalias e corrigi-las antes que as estas ocorram e a integração de um grande número de fontes de geração e armazenamento de energia de pequena e média capacidade, permitindo ao consumidor comprar e vender energia da rede [7].

A necessidade de reduzir emissões poluentes no campo da produção de energia elétrica, avanços tecnológicos recentes no campo da micro geração, e a reestruturação do sector elétrico, são os principais fatores responsáveis pelo crescente interesse na utilização da micro geração. Esta pode ser definida como sendo um tipo de produção de energia elétrica suportada por unidades geradoras de pequenas dimensões, designadas por micro fontes. Devido às suas características, são fáceis de ser instaladas em qualquer habitação,

não sendo necessário garantir condições de espaço muito exigentes. Por este motivo, é frequente encontrar micro geradores instalados em habitações comuns. A sua aquisição é fortemente incentivada pelas entidades governamentais, essencialmente devido a vantagens ecológicas e protocolos ambientais existentes. A integração na rede elétrica da micro geração em particular, traz diversas vantagens à operação do sistema, entre as quais [8], [9]:

- Descongestionamento de linhas de distribuição e conseqüente redução de perdas;
- Deferimento de investimento no reforço de redes;
- Melhoria de qualidade de serviço e aumento de fiabilidade do sistema.

Em contrapartida, é possível citar algumas desvantagens, como [8], [9]:

- Aumento na complexidade de operação da rede devido ao fluxo bidirecional;
- Dificuldade de controlo da tensão nos períodos de carga leve;
- Aumento da distorção harmónica na rede;
- Intermitência de geração devido às fontes estocásticas;
- custo de implantação.

## 2.2 Micro redes inteligentes

O conceito de micro rede está enquadrado na conceção geral de uma rede inteligente.

Numa micro rede elétrica existem vários componentes que a constituem, nomeadamente elementos geradores de energia elétrica (por exemplo painéis solares fotovoltaicos, aerogeradores eólicos e mini-hídricas), cargas elétricas e térmicas (por exemplo, frigoríficos e televisões), sistemas de armazenamento de energia (por exemplo banco de baterias), rede de distribuição em média tensão que faz a ligação dos elementos anteriormente mencionados, e equipamento de gestão e controlo (usualmente designado por controlador central da

micro rede que está geralmente instalado no lado da baixa tensão na zona de interligação à rede de média tensão) [2].

Nestas redes, os recursos geradores de energia elétrica usam fontes renováveis de energia. Uma micro rede pode operar de duas formas diferentes, sendo a primeira considerada conectada à rede elétrica normal pois é quando se encontra ligada à rede de média tensão, e a segunda é isolada, estando a operar desconetada da rede elétrica por estar em zonas remotas ou em modo crítico de colapso parcial ou geral da rede de média tensão. A capacidade de funcionar em modo isolado é-lhe conferida pela presença de micro fontes (por exemplo, painéis fotovoltaicos) e dispositivos de armazenamento de energia que possibilitam que a carga, ou pelo menos uma parte significativa da mesma, continue a ser alimentada. A micro rede funciona autonomamente e para que não haja problemas de existir consumo superior à produção, são necessárias estratégias de controlo e gestão apropriadas, como por exemplo o deslastre, escalonamento e priorização de cargas [10].

## 2.3 Deslastre e escalonamento de cargas elétricas

O termo deslastre de carga está definida pelo regulamento de operação das redes elétricas [11] como a interrupção da alimentação de alguns consumos de energia elétrica com o objetivo de preservar o funcionamento do sistema elétrico, a nível local ou nacional, em condições aceitáveis de tensão e frequência.

Existe a interrupção total da alimentação e a interrupção parcial, ou seja, a alimentação não é totalmente interrompida, sendo apenas reduzida, por exemplo utilizando um regulador de intensidade da luz, sendo que este não interrompe a alimentação mas apenas reduz a sua intensidade, reduzindo a potência.

O escalonamento implica uma optimização na utilização de uma carga, num determinado período, onde o consumo é deslocado para uma outra altura onde o consumo não seja muito elevado, por exemplo, a máquina de lavar a roupa pode funcionar durante a noite, por duas razões, não há tanto consumo como durante o dia e a tarifa da eletricidade á noite é menor.



O escalonamento e deslastre em micro redes é bastante investigado na literatura. Os autores, Basu et al. [12] apresentaram um modelo de escalonamento planejado para o problema de despacho económico numa micro rede com Combinação de calor e energia (CHP). Os locais ideais, tamanhos e tipos de Recursos de Energia Distribuída (DERs) foram selecionados pela primeira vez considerando as perdas mínimas de energia como a função objetivo. A partilha económica de energia entre uma mistura de DERs foi realizado usando a evolução diferencial enquanto satisfizes todas as restrições. No entanto, o trabalho apresentado não considerou nenhum tipo de recurso renovável e estudou o sistema apenas durante o modo conectado à rede. Além disso, a técnica de otimização aplicada, isto é, a evolução diferencial, é uma técnica meta-heurística que não pode garantir uma solução ótima.

Tsikalakis e Hatzigiorgiou [13] estudaram o funcionamento de um controlador central usado para otimizar a operação de uma micro rede durante o modo conectado à rede. Foram analisadas duas políticas de mercado: minimizar as despesas e maximizar a receita. Os autores resolveram o problema de comprometimento de unidade do dia seguinte, usando a lista de prioridades, e o problema de despacho económico usando programação quadrática sequencial. Nenhuma tentativa foi feita para estudar a micro rede no modo isolado. Além disso, incertezas devido a erros de previsão não foram abordadas na formulação do modelo.

Logenthiran et al. [14] propuseram um sistema multi-agente para a operação em tempo real de uma micro rede incluindo programação de geração e gestão do lado da procura. O escalonamento da geração foi realizado usando um processo de dois estágios que incluiu o escalonamento em dia e em tempo real. Um Simulador Digital em Tempo Real (RTDS) foi utilizado para modelar o funcionamento de uma micro rede. O RTDS forneceu o *feedback* necessário para realizar o escalonamento em tempo real. Técnicas de inteligência computacional, como o algoritmo genético, foram aplicadas nos módulos de tomada de decisão.

Chen et al. [15] desenvolveram um novo método para dimensionar os Sistemas de Armazenamento de Energia (ESS) numa micro rede. O problema de comprometimento

da unidade do dia seguinte foi utilizado para facilitar o método proposto no modo conectado à rede e isolado. Foram levados em consideração, erros de previsão de carga e energia renovável, aumentando a quantidade necessária de reserva de fiação. A eficiência de descarga do ESS também foi incluída nos critérios de reserva. Apesar da reserva adicional, a formulação do comprometimento unitário proposto permaneceu determinista. Os autores não consideraram modelos estocásticos multi cenários que poderiam ter coberto um espectro mais amplo de incertezas.

Sofana Reka e Ramesh V. [16] apresentaram um algoritmo de escalonamento energético para consumidores residenciais num cenário de redes inteligentes, usando programação estocástica. As casas residenciais consideradas são equipadas com painéis fotovoltaicos para produção de energia e baterias para armazenar a energia. É considerado um grupo de aparelhos numa rotina diária para um cenário familiar de classe média normal. Os usos de eletrodomésticos de acordo com as preferências dos utilizadores também são considerados. Todo o módulo de planeamento funciona em um plano diário (24h) para programação e o esquema de preços é analisado usando uma tarifa fixa de uma hora. O método proposto é baseado em programação dinâmica estocástica e os resultados de simulação com incorporação de energia renovável são estudados para os dias de verão e inverno.

Jin Xiao et al. [17] lidaram com a otimização da gestão de energia em utilizadores residenciais usando programação inteira mista. Estes, utilizaram o minMax como função objetivo, demonstram que o cronograma produzido pelo algoritmo de escalonamento min-Max tem várias vantagens importantes: desvio significativo de picos, redução de custos e aversão ao risco para os consumidores. Provaram que o algoritmo encontra soluções quase ótimas e o estudo de simulação mostra que o desempenho real é melhor que o limite do pior caso. O algoritmo é simples de implementar e eficiente na escala de grandes empresas.

Barbato, Antimo, et al. [18] estudaram um sistema inteligente de gestão de energia multi-objetivo para aplicações em micro redes residenciais, onde as residências são equipadas com aparelhos inteligentes, como lava-loiças, secador e aquecimento elétrico. O desempenho superior e a eficiência do sistema proposto são estudados através de vários

cenários e casos de estudo, sendo estes validados em comparação com os modelos convencionais. Os resultados da simulação demonstram que o sistema inteligente de gestão de energia proposto tem a capacidade de reduzir o uso residencial de energia e melhorar o grau de satisfação do utilizador por meio do gestão ideal dos lados da procura / geração.

Mohsenian-Rad, Amir-Hamed, et al. [19] apresentam um sistema de gestão de energia autónomo e distribuído do lado do consumo entre os utilizadores, que tira proveito de uma infraestrutura de comunicação digital bidirecional que está prevista na futura rede inteligente. Utilizam a teoria dos jogos e formulam um jogo de escalonamento de consumo de energia, onde os jogadores são os utilizadores e as suas estratégias são os horários diários dos seus eletrodomésticos e cargas. Neste trabalho é assumido que a empresa de serviços públicos possa adotar tarifas de preços adequadas que diferenciem o uso de energia no tempo e no nível. Mostram que, para um cenário comum, com uma única empresa de serviços públicos atendendo a vários clientes, o desempenho ideal global em termos de minimizar os custos de energia é alcançado no equilíbrio de Nash do jogo de escalonamento de consumo de energia formulado. A estratégia de gestão de energia distribuída proposta no lado do consumo exige que cada utilizador simplesmente aplique a sua melhor estratégia de resposta à carga total atual e às tarifas no sistema de distribuição de energia. Os resultados da simulação confirmam que a abordagem proposta pode reduzir a relação entre o pico e a média da procura total de energia, os custos totais de energia, bem como as tarifas de eletricidade diárias individuais de cada utilizador.

Matallanas, E., et al. [20] desenvolveram um sistema de controlo para gestão de consumo no setor residencial com geração distribuída. O sistema elétrico em estudo incorpora a geração de energia fotovoltaica local, sistema de armazenamento de eletricidade, conexão à rede e sistema de automação residencial. O sistema de controlo distribuído é composto por dois módulos: um planeador e um coordenador, ambos implementados com redes neurais. O sistema de controlo melhora o desempenho energético local, escalonando as tarefas escolhidas pelo utilizador e maximizando o uso da geração local.

Radhakrishnan e Selvan [21] alegam que a resposta à procura é uma técnica promissora

que poderia ser implementada de forma eficaz com base na rede inteligente. A descentralização da geração de energia com o advento de fontes de energia renováveis beneficiará tanto o utilizador como a rede central, juntamente com a redução da dependência de fontes convencionais de energia. A gestão de energia no consumidor final, controlando as cargas irá ajudar o consumidor também a participar e compartilhar a responsabilidade na gestão adequada de energia. Radhakrishnan, Selvan [21] propõem um Algoritmo de Programação de Carga Offline que visa maximizar a economia de energia junto com a redução no custo de consumo de energia. Este algoritmo tenta deslocar cargas para horas fora de pico e horas com menor custo de eletricidade, aliviando assim a rede elétrica na hora de pico, ao mesmo tempo proporcionando benefícios económicos para o consumidor.

Palma-Behnke et al. [22] propuseram um novo sistema de gestão de energia para uma micro rede renovável. O sistema fornece pontos de ajuste online para cada unidade de geração, modos de operação para um sistema de abastecimento de água e sinais para os consumidores com base num mecanismo de gestão do lado do consumo. A micro rede inteligente é composta por painéis fotovoltaicos, uma turbina eólica, um gerador a diesel, um banco de baterias e um sistema de abastecimento de água. O sistema de gestão de energia minimiza os custos operacionais enquanto fornece os consumos de água e carga elétrica. Neste trabalho é considerada uma previsão de dois dias à frente das condições meteorológicas. Além disso, é projetada uma rede neural para dois dias de previsão do consumo elétrico. O sistema é implementado e testado usando um conjunto de dados reais de um local de referência.

Da revisão bibliográfica efetuada, técnicas de escalonamento e deslastre de carga têm sido amplamente estudadas no campo das redes elétricas inteligentes com o objetivo de reduzir custos e o consumo por parte dos utilizadores. Incentivos de preços, levam os consumidores a aplicar técnicas de escalonamento de carga para mudar os seus hábitos e consumos para horários fora de pico, onde os preços da energia são mais baixos. Algoritmos de escalonamento combinados com técnicas de previsão, bem como técnicas de gestão do lado do consumo, ajudam os consumidores a minimizar os gastos com a eletricidade e a desenvolver uma melhor capacidade de gestão no uso da eletricidade. Entretanto, essas

técnicas são mais adequadas para ambientes previsíveis com dados históricos conhecidos, tanto do lado do consumo quanto do lado da produção, criando restrições bem definidas de preço / consumo para o utilizador. Nos casos em que as micro redes podem ser isoladas da rede principal, é criado um ambiente altamente incerto, exigindo um ajuste do consumo para manter um balanceamento entre o consumo e a geração. Então, o principal objetivo é aplicar técnicas inovadoras que visem otimizar os recursos existentes numa rede elétrica inteligente que opera desconectada da rede principal. Em particular pretende-se aplicar o conceito de campos de potencial elétrico de modo a ajustar dinamicamente a alocação dos recursos elétricos existentes numa micro rede inteligente, focando a priorização, escalonamento e deslastre de cargas elétricas.

## 2.4 Priorização de cargas elétricas

Nestas situações em que se pretende realizar o escalonamento e deslastre das cargas, é fundamental priorizar as cargas elétricas. O objetivo da priorização de cargas é a definição das cargas mais prioritárias, utilizando um ou mais critérios estabelecidos pelo utilizador. Por exemplo, numa habitação com um frigorífico e uma televisão, o frigorífico deverá ter uma prioridade superior à televisão, pois aquele contém alimentos que se podem degradar; outro exemplo, num hospital, as máquinas de suporte de vida têm de ter prioridade máxima, em relação a outros equipamentos que não são tão imprescindíveis.

Na literatura, existem vários métodos de priorização de cargas. Os autores, Guzmán et al. [23] desenvolveram uma estratégia de gestão de carga no sistema solar fotovoltaico. Em instalações autónomas do sistema fotovoltaico não existe ligação à rede, pelo que o gerador solar e o banco de baterias têm de ser cuidadosamente dimensionados para conseguir responder à procura de energia durante um determinado período de tempo. Neste trabalho, foi desenvolvido um algoritmo de controlo de carga prioritário para obter uma gestão de energia ótima sobre as cargas do sistema e o armazenamento da bateria, proporcionando assim uma melhor eficiência de gestão de energia e garantindo o fornecimento de energia para cargas críticas, isto aumentará a confiabilidade do sistema e a satisfação

do utilizador final. Neste artigo as cargas foram classificadas em quatro categorias gerais, dependendo de sua prioridade (conveniente, essencial, crítica e de emergência). Foi dada uma prioridade variável ao banco de baterias dependente do estado de carga. O problema é matematicamente formulado tendo em conta as prioridades, e a solução ótima é obtida através de técnicas de programação dinâmica. As cargas não controláveis estão incluídas no algoritmo, que o estende para ser utilizado em cenários mistos com cargas controláveis e não controláveis.

Rastegar, Mahmud Fotuhi-Firuzabad e Zareipour [24] propuseram um Sistema de Gestão de Energia Doméstica (HEM), nos quais se persuadem os clientes residenciais a participar de forma ativa em programas de resposta à procura baseada nos preços. Nestes métodos HEM baseados no preço, um controlador agenda o consumo de energia dos aparelhos controláveis do agregado familiar em resposta a sinais de preço de eletricidade, considerando várias preferências do cliente. Embora numerosos métodos tenham sido recentemente propostos para a aplicação de HEM, não foi abordada a priorização da operação de aparelhos controláveis do ponto de vista do cliente em HEM com base nos preços. Para fazer isso, o Valor de carga perdida (VOLL) de cada aplicação é definido para indicar a prioridade operacional dessa aplicação do ponto de vista do cliente. Por exemplo, se a operação da máquina de lavar num dia não é tão importante quanto o custo da eletricidade para o cliente, o VOLL da máquina de lavar é definido para um valor inferior à taxa de tarifa. Assim, o sistema de gestão de energia prefere desligar a máquina de lavar, que impõe a confiabilidade do cliente e minimiza o custo de energia. Considerando as tarifas de eletricidade e as restrições operacionais dos aparelhos, um problema de otimização é proposto para minimizar os custos de energia e confiabilidade do cliente.

Moran [25] defende que o controlo e gestão de cargas é uma componente chave de uma micro rede. É essencial em todos os momentos para manter o equilíbrio de geração versus consumo. O sistema de controlo de uma micro rede precisa avaliar continuamente e priorizar cargas para manter esse equilíbrio. Moran examinou metodologias para medir, avaliar, priorizar e controlar cargas sob todas as condições para maximizar o desempenho

do micro rede. Este apresentou estratégias para a classificação de cargas por criticalidade, identificando cargas ativas versus inativas e mantendo dados quantitativos em tempo quase real para correspondência de cargas à geração. A necessidade de operação de controlo de alta velocidade é analisada, assim como a relação entre a gestão da carga ativa e o armazenamento de energia.

Majid Ahmadi et al. [19] estudaram um modelo analítico para uma micro rede residencial sob um ambiente colaborativo. O modelo assume que a comunidade micro rede residencial está sob um acordo social referido como consumo colaborativo. O modelo inclui uma estrutura para micro redes residenciais usando um método exclusivo de resposta à procura com base nas características particulares das cargas residenciais. As cargas residenciais são categorizadas em três tipos com base na sua necessidade e capacidade de serem re-escalonáveis. Os consumidores atribuem prioridade aos seus aparelhos, e em seguida, a micro rede informa os consumidores sobre o seu consumo em tempo real e os benefícios económicos associados à sua participação no consumo colaborativo. Assim, os consumidores podem avaliar as alternativas sugeridas antes de usar os aparelhos, e, conseqüentemente, tomar melhores decisões.

Takumi Kato e Hideyuki Takahashi [26] propuseram um sistema de gestão operacional hierárquico baseado em prioridades para micro redes baseadas em multi-agentes. O sistema proposto é uma nova biblioteca de difusão de carga baseada num conjunto de agentes e num supervisor hierárquico, o qual revela a existência de microrregiões resistentes. A avaliação da abordagem proposta foi realizada através da implementação de um sistema protótipo.

Na realização deste projeto, o desenvolvimento dos algoritmos que suportam o escalonamento e deslastre de cargas eléctricas, e a definição da prioridade associada a cada carga ao longo do tempo, considerou algumas das ideias subjacentes em alguns dos trabalhos descritos anteriormente.

No capítulo seguinte será descrito como é realizado o escalonamento utilizando campos de potencial.





## Capítulo 3

# Escalonamento utilizando campos de potencial

Nas micro redes, quando estas operam de modo isolado, necessitam de sistemas de gestão de controlo inteligente para se tornarem autossustentáveis durante o seu período de operação.

As TICs e as técnicas de inteligência artificial, nomeadamente Internet das Coisas (IoT), análise de dados e sistemas multi-agentes, já provaram ser robustas, modulares e flexíveis para lidar com a complexidade das micro redes. No entanto, essas abordagens atualmente não exploram aspetos importantes relacionados com as micro redes autossustentáveis, onde é necessário um controlo rigoroso dos recursos energéticos disponíveis.

A autossustentabilidade em micro redes inteligentes, pode ser bastante desafiadora e difícil de atingir, especialmente quando estas dependem de fontes de energias renováveis como a sua principal fonte de geração. Essas fontes são caracterizadas como recursos intermitentes, pois dependem de fatores ambientais que os fazem variar significativamente ao longo do tempo, sendo difícil prever com precisão.

No lado do consumidor, a procura de energia tende a definir períodos de consumo específicos, o que pode levar a períodos de tempo em que algumas cargas não podem ser desligadas ou escalonadas.

Este problema torna-se ainda mais complicado se considerarmos que existem cargas com alta prioridade que não podem ser desligadas e outras que são necessárias para realizar as necessidades dos utilizadores. A combinação de consumo e geração de energia, aliada à incerteza do comportamento dos consumidores, cria um desafio de controlo muito complexo que precisa de ser trabalhado antecipadamente, prevendo o comportamento do sistema, particularmente o consumo.

Este projeto, tem por objetivo aplicar técnicas inovadoras que visem otimizar os recursos existentes numa rede elétrica inteligente que opera desconectada da rede principal. Em particular pretende-se aplicar o conceito de campos de potencial elétrico de modo a ajustar dinamicamente a alocação dos recursos elétricos existentes numa micro rede inteligente, focando a priorização, escalonamento e deslastre de cargas elétricas de forma a conseguir gerir a produção de energia a partir de recursos energéticos renováveis pelas diversas cargas e ao longo do tempo (isto é, ajustar a procura de energia elétrica pelas cargas à oferta de energia elétrica oferecida pelos recursos de produção de energia).

A utilização de campos potenciais é muito usada para influenciar o comportamento reativo de entidades num dado ambiente, onde as entidades individuais não precisam de ter conhecimento global do sistema para realizar a alocação de recursos, mas pelo contrário, elas só confiam no conhecimento individual, gerado de acordo com o campo potencial de cada entidade. Isto significa que a alocação de recursos é executada de maneira distribuída, ao contrário do modo centralizado tradicional. As principais diferenças entre o sistema distribuído e centralizado são as seguintes:

- Pontos de falha / manutenção: sistemas centralizados são fáceis de manter, pois há apenas um único ponto de falha. Os sistemas distribuídos são os mais difíceis de manter.
- Tolerância / estabilidade de falhas: centralizado pode ser altamente instável. Se o nó central falhar todo o sistema falha. Os sistemas distribuídos são mais robustos e uma única falha não causa muito impacto no sistema.
- Escalabilidade / População Máxima: a abordagem centralizada tem uma baixa

escalabilidade, enquanto a distribuída apresenta uma escalabilidade ilimitada.

- Evolução / Diversidade: uma vez que os sistemas centralizados seguem uma estrutura rígida, estes não têm diversidade e evoluem lentamente. Mas para os sistemas distribuídos, a evolução é contínua e dinâmica.

Como se pretende um sistema rápido, em termos de processamento e reação a falhas, e o sistema é constituído por um grande conjunto de DERs, neste trabalho pretende-se utilizar uma abordagem distribuída.

### **3.1 Técnica de campos de potencial elétrico**

Os físicos usam o conceito de campo para explicar a interação de partículas ou corpos através do espaço, ou seja, a força de "ação à distância" entre dois corpos que não estão em contato físico. A terra modifica o espaço circundante de tal forma que qualquer corpo com massa, como a lua, é atraído por ele. O campo gravitacional fica mais fraco à medida que este se afasta da fonte. Um eletrão modifica o espaço em torno dele de tal forma que outras partículas com carga semelhante são repelidas, enquanto as partículas com carga oposta são atraídas, como se pode ver na Figura 3.1. Como o campo gravitacional, o campo elétrico fica mais fraco com a distância da fonte, mas nunca desaparece completamente.

Qualquer carga colocada num campo elétrico experimentará a força, assim como qualquer massa colocada num campo gravitacional [28].

### **3.2 Escalonamento baseado em campos potenciais**

No presente projeto, a abordagem do escalonamento de cargas elétricas consiste na aplicação da técnica de campo potencial, na qual são utilizados dois tipos de entidades, os consumidores e produtores, que emitem um conjunto de campos potenciais com base nos seus recursos.

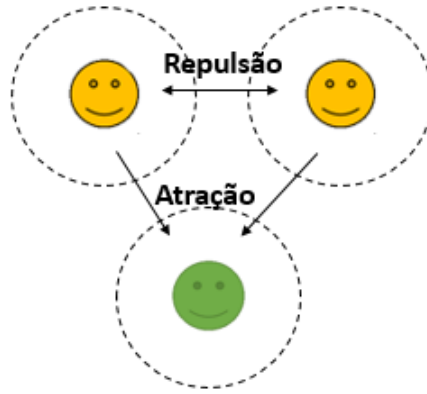


Figura 3.1: Conceito de campo potencial, adaptada de [27].

Na Figura 3.2, é possível visualizar a interação entre as entidades produtoras e consumidoras usando campos de potencial para implementar o escalonamento de cargas elétricas. Nesta interação entre as entidades, cada produtor seguindo o ponto de vista da física,

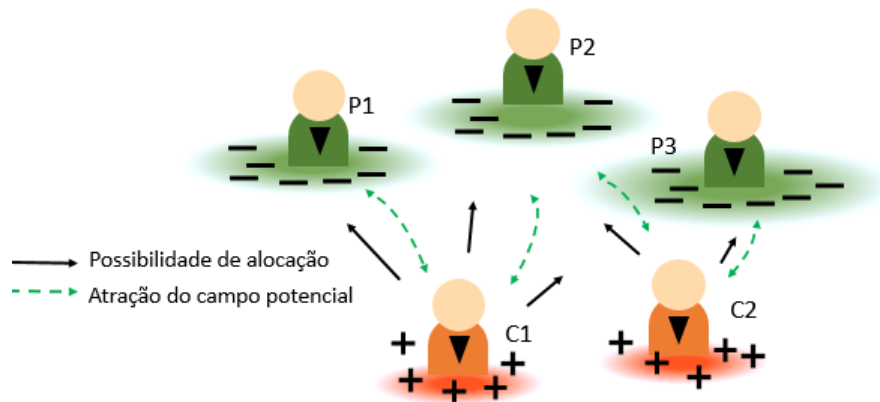


Figura 3.2: Conceito de campo potencial para o escalonamento de cargas em micro redes.

gera um campo potencial negativo, para representar o poder de oferta e cada consumidor gera um campo potencial positivo, para representar o recurso de cada consumidor, este método é iterativo e termina após toda a energia ter sido alocada ou então quando todas as cargas elétricas já estão satisfeitas, e neste ultimo caso se ainda sobrar energia elétrica,

esta é armazenada no banco de baterias.

### 3.2.1 Cálculo do campo potencial nos produtores

O produtor (P) pode estar a produzir ou não (on/off) energia elétrica. Quando um ou mais produtores estão a produzir energia, o campo potencial gerado é igual em todos esses produtores, sentindo-se de forma diferenciada pelos consumidores dependendo da distância entre eles. O valor do campo potencial do P  $i$ , no instante  $t$  é dado por:

$$CPP_{i,t} = \begin{cases} 0, & \text{se não existe produção elétrica} \\ 1, & \text{se existe produção elétrica} \end{cases} \quad (3.1)$$

### 3.2.2 Cálculo do campo potencial nos consumidores

Considerando o crescente consumo de energia elétrica no setor residencial, é necessário conhecer o padrão de consumo de eletricidade de forma detalhada, impulsionando a mudança do comportamento dos utilizadores finais, com o objetivo de reduzir o consumo global e a racionalização do uso da energia elétrica. Portanto, conhecer o perfil da curva de carga, com antecedência, é importante para detetar os picos de consumo, e incentivar os utilizadores a mudar os seus hábitos de consumo de energia, principalmente durante os períodos em que as tarifas são mais caras.

No lado do consumidor (C), aquele que possui um campo potencial mais elevado será o primeiro a ser alocado, o que significa que o cálculo do campo potencial depende das prioridades e preferências do utilizador. Adicionalmente, cada carga elétrica tem características diferentes, e horários diferentes de utilização de acordo com o perfil de cada utilizador. Isto significa que a prioridade atribuída pelo utilizador e as suas preferências influenciarão o cálculo do valor do campo potencial do C, que é dado por:

$$CPC_{j,t} = U_{k,t} * Pr_{k,t} \quad (3.2)$$

onde,  $U_{k,t}$  é definido como o critério de utilidade da carga elétrica  $k$ , no instante  $t$ , e  $Pr_{k,t}$

é a prioridade da carga elétrica  $k$ , no instante  $t$ .

O cálculo do critério de utilidade da carga elétrica é realizado analisando todo o histórico de utilização da carga num dado instante, usando a seguinte expressão:

$$U_{k,t} = \frac{nc_{k,t}}{ncT_t} \quad (3.3)$$

onde  $nc_{k,t}$  é o número de ocorrências de uma dada carga elétrica  $k$ , no instante  $t$  e  $ncT_{h,j}$  é o número de ocorrências totais de todas as cargas elétricas presentes na habitação/apartamento no instante  $t$ . Para realizar a contagem do número de ocorrências tem de se verificar e agrupar numa só semana todas as ocorrências efetuadas durante todas as semanas dos meses de verão e noutra semana todas as ocorrências nas semanas dos meses de inverno, por exemplo, todas as ocorrências realizadas ás segundas feiras, nos respetivos períodos do dia, na estação de verão são agrupadas todas numa só segunda nos respetivos períodos do dia e assim sucessivamente para todos os dias da semana, isto é realizado para as ocorrências de cada carga elétrica individualmente e para as ocorrências de todas as cargas elétricas juntas.

A atribuição de prioridades pode ser estática ou dinâmica. A prioridade estática como o nome indica, não é alterada ao longo do período de utilização do método de escalonamento baseado em campos potenciais, ou seja, inicialmente são atribuídas prioridades com base na importância que essa carga elétrica tem para o utilizador de acordo com as suas preferências, mantendo-se inalteradas ao longo do dia, enquanto que a prioridade dinâmica pode ser ajustada ao longo do dia, de acordo com alguns critérios definidos pelo utilizador.

Neste projeto considerou-se a prioridade estática, mas esta ao ser influenciada pelo critério de utilidade, acaba por tornar-se similar à prioridade dinâmica.

### 3.2.3 Cálculo do poder de atração entre produtores e consumidores

Como foi referido atrás, no conceito de campos de potencial, a força com que as cargas se atraem ou repelem depende do potencial de cada carga e da distância entre cargas. Assim, neste trabalho, a atração entre os produtores  $i$  e consumidores  $j$  no instante  $t$ , é calculado por:

$$A_{s,t} = CPC_{j,t} + (CPP_{i,t} * e^{-\left(\frac{dx}{dmax}\right)}) \quad (3.4)$$

onde  $CPC_{j,t}$  é o campo potencial do C  $j$ , calculado anteriormente na equação 3.2 no instante  $t$ ,  $CPP_{i,t}$  é o campo potencial do produtor  $i$  no instante  $t$ , referido na equação 3.1,  $dx$ , é a distância do produtor ao consumidor e  $dmax$ , é o ponto máximo a onde o produtor pode chegar.

Isto significa que  $A_{s,t}$  diminuirá exponencialmente com o aumento da distância entre C e P, o que garante que os consumidores mais próximos da produção de energia tenham maiores probabilidades de alocação. A distância entre o produtor e o consumidor, está contida nos seguintes intervalos:

$$\begin{cases} 100, dx \in [0, ax] \\ y, dx \in ]ax, dmax] \\ 0, dx > dmax \end{cases} \quad (3.5)$$

onde  $dx$  é a distância do produtor ao consumidor,  $ax$  é a área circundante do produtor,  $dmax$ , e é o ponto máximo até onde o produtor pode chegar.

## 3.3 Consumidores compostos

Os consumidores podem ser simples ou compostos. Os consumidores simples são aqueles que não contêm outros consumidores na sua constituição e o seu campo potencial é calculado através da equação 3.2.

Os consumidores compostos são a agregação de consumidores simples, por exemplo uma casa que agrega diversos consumidores simples, por exemplo frigorífico, televisão e máquina de lavar roupa. No caso dos consumidores compostos, após a alocação de energia a estas entidades através da utilização da abordagem de campos potenciais descrita atrás, é necessária, de forma recursiva, realizar uma alocação da energia obtida aos vários consumidores simples.

A Figura 3.3 ilustra a negociação entre os consumidores.

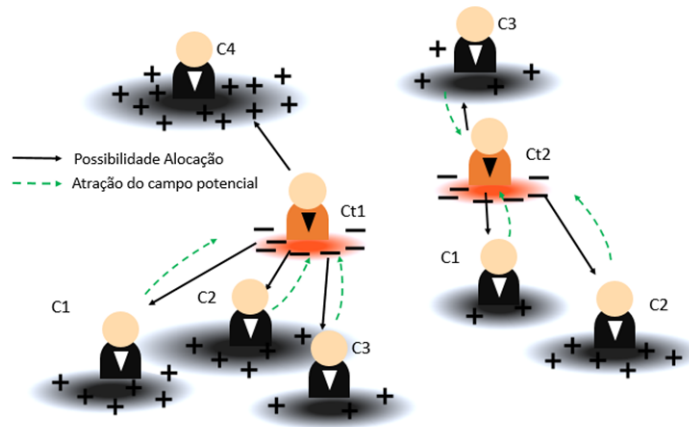


Figura 3.3: Negociação entre consumidores compostos e consumidores simples.

De maneira semelhante ao que acontece na atração entre produtores e consumidores, cada consumidor composto ( $C_t$ ) assume-se como um produtor virtual e gerará um campo potencial negativo que cada consumidor simples, perceberá, pois estes geram um campo potencial positivo. Os consumidores simples que contenham valores de campos potenciais mais altos são alocados primeiro.

De notar que na alocação entre consumidores e produtores, descrita nas secções anteriores, o valor do campo potencial gerado pelos consumidores compostos, é dado por:

$$CPC_{r,t} = \sum_{j=1}^n CPC_{j,t} \quad (3.6)$$

onde  $CPC_{r,t}$  é o campo de potencial do consumidor composto  $r$  e  $CPC_{j,t}$  é o campo potencial dos consumidores simples.



No próximo capítulo será descrito o caso de estudo escolhido para o presente projeto.



# Capítulo 4

## Caso de estudo

O caso de estudo utilizado neste projeto considerou uma pequena micro rede elétrica, ilustrada na Figura 4.1, pertencente à empresa Locionni em Itália, a qual contém seis habitações unifamiliares (consumidores compostos) e nove produtores de energia elétrica.

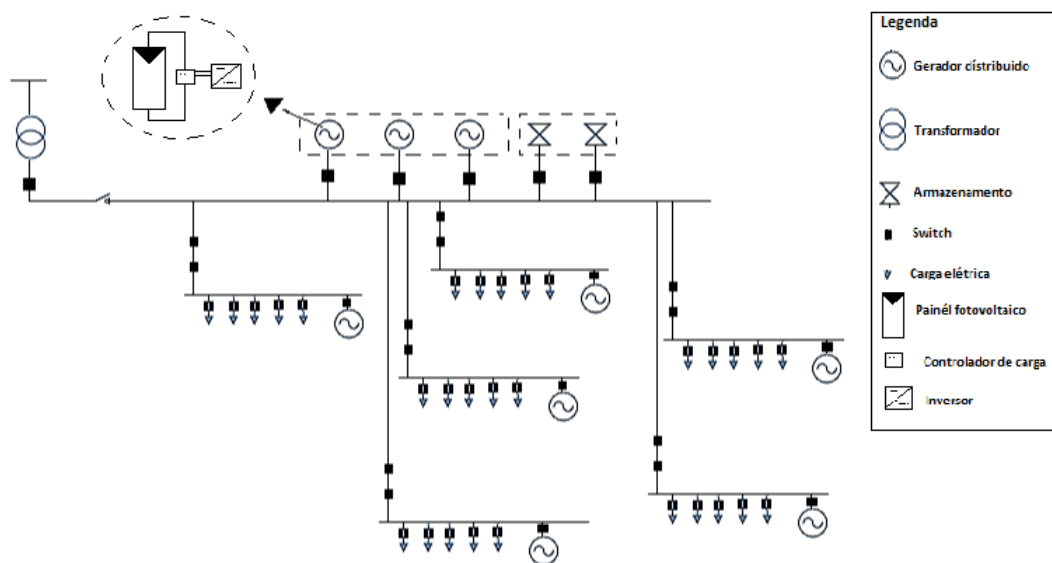


Figura 4.1: Circuito elétrico do caso de estudo.

O *dataset* utilizado consiste no consumo das seis habitações, com o registo individual do consumo de cada carga elétrica (consumidores simples), nomeadamente luzes, máquina de lavar roupa e frigorífico, assim como os valores da produção gerada pelos diferentes

recursos. Os dados são registados em intervalos de 15 minutos, durante um ano, sendo armazenados para cada registo, o *timestamp*, a energia consumida por cada carga e a energia total consumida na casa, num arquivo de dados *csv* (valores separados por vírgula).

## 4.1 Recursos produtores e de armazenamento

O caso de estudo escolhido, contém nove painéis fotovoltaicos, cada um de 5,5 kWp. Cada habitação tem seu próprio painel fotovoltaico e os três restantes são para utilização comum. A produção excedente dos painéis fotovoltaicos é armazenada em dois bancos de baterias, de uso comum.

A intensidade de corrente é usada para medir a capacidade de uma bateria, ou seja, a quantidade de eletricidade que pode armazenar durante o carregamento e retornar durante a descarga. Neste projeto, as baterias tem uma capacidade de 440 Ah cada uma, o que significa que teoricamente podem fornecer uma corrente de 440 A por hora. Para se saber a potência máxima armazenada ou consumida por hora das baterias, considerou-se que a tensão das baterias era de 24 Volt, então,

$$P = I * V \tag{4.1}$$

onde,  $I$  é a corrente elétrica e  $V$  é a tensão elétrica.

Substituindo os valores utilizados nestes caso de estudo na equação anterior, a potência armazenada numa bateria será:

$$P = 440 * 24 = 10.560Wh \tag{4.2}$$

Uma vez que o caso de estudo considera duas baterias, a potência máxima em Watt armazenada ou consumida por hora será:

$$P = 10.560 * 2 = 21.120Wh \tag{4.3}$$

Como os dados do *dataset* pertencente são registados de 15 em 15 minutos, é necessário saber o ciclo máximo de carga e descarga a cada 15 min. Assim, no resultado da equação 4.2, que é a potencia máxima armazenada ou consumida por hora, dividimos por 4 (que corresponde à frequência de registo por hora), e assim sabemos em média qual é o ciclo de carga e descarga máximo a cada 15 minutos.

$$P = \frac{10.560}{4} = 2.640W_{ciclo} \quad (4.4)$$

## 4.2 Descrição das cargas elétricas

Neste caso de estudo, existem seis habitações, sendo que em cada habitação encontram-se cerca de cinco cargas elétricas, nomeadamente, fogão, sôtão, frigorífico, máquina de lavar roupa e luzes.

Na Tabela 4.1 são descritas as várias cargas elétricas existentes nas habitações, sendo H1, a nomenclatura escolhida para a habitação 1, H2, para a habitação 2, e assim sucessivamente para as 6 habitações. Nesta tabela pode visualizar-se a potência de cada carga elétrica expressa em Watt e o escalonamento de cada uma das cargas nas diferentes habitações. O escalonamento consiste em “enviar” a execução das cargas elétricas para períodos onde o consumo não seja muito elevado, e haja produção excedente.

Tabela 4.1: Descrição das cargas elétricas.

<b>Carga elétrica</b>	H1 (W)	H2 (W)	H3 (W)	H4 (W)	H5 (W)	H6 (W)	Escalonamento
Fogão	2.902	3.399	2.582	2.527	1.594	2.838	Não
Computador	311	267	301	250	201	238	Não
Máq. lavar loiça	2.225	2.253	2.311	2.160	2.350	2.410	Sim
Máq. lavar roupa	2.300	1.900	2.086	2.019	2.001	1.948	Sim
Luzes	313	371	379	312	420	394	Não

Como se pode verificar na Tabela 4.1, existem cargas elétricas nas habitações, que podem ser escalonadas, nomeadamente o frigorífico e a máquina de lavar a roupa.

Também se pode verificar as diferentes potências para as cargas existentes nas habitações, por exemplo, o fogão no H1 tem uma potência de 2.902 W, enquanto que no H5

tem uma potência menor, de 1.594 W.

### 4.3 Descrição dos perfis de utilização

Neste trabalho foi solicitado a seis utilizadores distintos que realizassem a definição da prioridade que achavam adequada para as cargas elétricas que se encontravam na habitação.

A definição da prioridade pode seguir vários métodos, podendo ser considerada uma variável continua ou discreta, e no caso desta última, tomar diferentes valores discretos. Neste trabalho foi considerada uma variável discreta, possuindo 4 níveis: Útil, Essencial, Crítica, Emergência. A definição do número de níveis de prioridade é essencial e deve ser devidamente ponderado no desenvolvimento do sistema: um número reduzido de níveis tem como vantagem a agregação de várias cargas e um número elevado de níveis permite uma definição mais fina da prioridade das diversas cargas elétricas.

A priorização solicitada aos seis consumidores, ilustrada na Tabela 4.2, foi realizada de acordo com diferentes níveis de priorização, sendo, Prioridade 1 (P1) = Útil, Prioridade 2 (P2) = Essencial, Prioridade 3 (P3) = Crítica e Prioridade 4 (P4) = Emergência.

Tabela 4.2: Priorização das cargas elétricas.

<b>Carga elétrica</b>	H1	H2	H3	H4	H5	H6
Fogão	P3	P3	P2	P2	P2	P2
Computador	P2	P2	P3	P3	P2	P3
Máq. lavar loiça	P2	P2	P3	P2	P3	P2
Máq. lavar roupa	P1	P2	P2	P2	P2	P1
Luzes	P3	P3	P3	P3	P3	P3

Na Tabela 4.2 pode verificar-se que comparando a atribuição da prioridade dos equipamentos elétricos realizada pelos seis utilizadores, existem algumas diferenças. Estas diferenças devem-se aos utilizadores terem preferências distintas, por exemplo no caso do fogão, para o utilizador do A1 este equipamento tem uma prioridade crítica, enquanto para o utilizador do A6 tem prioridade essencial, (desta forma pode afirmar-se que o utilizador do A1 necessita mais do fogão do que o utilizador do A6).

No capítulo seguinte será descrita a implementação do método proposto para o escalonamento de cargas para este caso de estudo, tendo como objetivo o aumento da auto-sustentabilidade da micro rede elétrica.





# Capítulo 5

## Implementação e análise de resultados

Neste capítulo será descrita a implementação do método de escalonamento baseado em campos de potencial para o caso de estudo descrito no capítulo anterior, assim como analisados os resultados obtidos.

### 5.1 Implementação do método de campos potenciais

A implementação do método de escalonamento baseado em campos de potenciais foi realizada utilizando a linguagem R. O R é uma linguagem e ambiente para computação estatística e gráfica, que fornece uma ampla variedade de métodos estatísticos, técnicas de análise de dados, técnicas de visualização gráfica e é altamente extensível [29].

#### 5.1.1 Cálculo da utilidade das cargas elétricas

A Figura 5.1 descreve os passos realizados para ser efetuado o cálculo da utilidade das cargas elétricas. Inicialmente, considerou-se o *dataset* da micro rede elétrica descrita no caso de estudo do capítulo anterior.



Figura 5.1: Fluxograma do cálculo da utilidade das cargas elétricas

Posteriormente, realizou-se uma análise e agrupamento de dados (*clustering*). O (*clustering*) efetuado serve para identificar quais os períodos e em que dia da semana uma determinada carga é utilizada. A fase de (*clustering*) permite calcular o número de ocorrências num determinado intervalo de tempo, que será utilizado no cálculo da utilidade das cargas elétricas. Em seguida foi efetuado o cálculo da utilidade de cada carga elétrica, utilizando a fórmula descrita anteriormente. O cálculo da utilidade das cargas elétricas foi realizado em cada habitação do caso de estudo (ver equação 3.3). Esses valores são guardados em vetores para serem utilizados posteriormente, no cálculo dos campos potenciais dos consumidores.

### 5.1.2 Cálculo dos campos potenciais

Na realização do cálculo dos campos potenciais foram efetuados os seguintes passos, como se pode verificar na Figura 5.2

Primeiramente, é inicializada a iteração  $i$ . Na realização do cálculo do campo potencial dos consumidores é necessário utilizar o resultado dos cálculos da utilidade das cargas

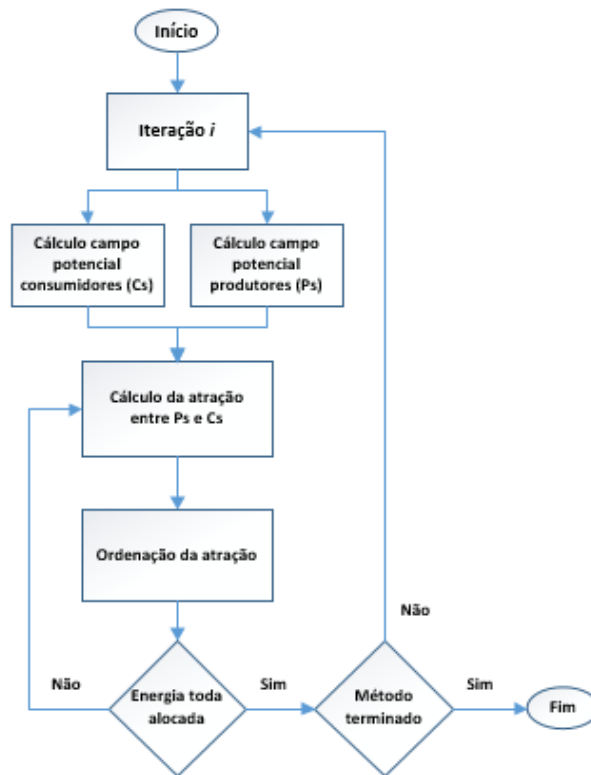


Figura 5.2: Fluxograma do escalonamento utilizando campos potenciais.

realizado anteriormente, e estabelecer as prioridades estáticas definidas pelos utilizadores (ver subcapítulo 3.2.2).

Tal como foi referido atrás, o campo de potencial dos produtores é 1 no caso de produzir energia elétrica ou 0 no caso de não produzir energia elétrica.

Em seguida é calculada a atração entre os produtores e os consumidores, que conforme descrito no subcapítulo 3.2.3 considera os seguintes parâmetros: o campo potencial dos produtores, distância geográfica entre os produtores e consumidores e o campo potencial dos consumidores. Após o cálculo da atração entre os produtores e consumidores, é disponibilizada uma ordenação de qual a alocação realizada. Após a alocação de energia às cargas, o sistema verifica se ainda existe energia disponível, e se não, aplica-se nova iteração no cálculo da atração entre os produtores e os consumidores; caso contrário, passa-se para o próximo passo que consiste em verificar se o método de escalonamento

baseado em campos potenciais está terminado, isto é já foi aplicado a toda a janela temporal pré-definida. Se ainda não chegou ao fim da janela temporal, o método inicia nova iteração, até chegar ao fim da janela temporal.

A execução do algoritmo de escalonamento baseado em campos potenciais demora 2 segundos para uma janela temporal de um dia. O cálculo da utilidade das cargas elétricas demora bastante mais tempo, aproximadamente 4 horas. No entanto, este tempo não afeta a questão de tempo real do método uma vez que este cálculo pode ser realizado em *background* (ou por exemplo no dia anterior de utilização).

## 5.2 Cenários de implementação

O teste e validação da abordagem proposta considerou três cenários, focando um dia típico de inverno e outro típico de verão, e uma semana típica das estações de verão e inverno.

### 5.2.1 Cenário 1: sem escalonamento

O cenário inicial não considerou métodos de escalonamento para realizar a alocação das cargas, ou seja as cargas são alocadas sem ter em consideração nenhuma estratégia, apenas foi realizado o armazenamento da energia excedente no banco de baterias após cada iteração, para que quando solicitada por algum consumidor possa ser utilizada, evitando assim desperdícios de energia.

Neste cenário, inicialmente cada habitação irá verificar se existe produção disponível nos próprios painéis. As cargas elétricas em cada habitação são alocadas sem ter em conta nenhuma ordem. Posteriormente cada habitação verifica se existe energia nos painéis de uso comum, isto é realizado de forma aleatória, ou seja não há ordem de qual habitação é alocada em primeiro lugar, depois em cada habitação se houver energia disponível, esta será disponibilizada para todos as habitações que necessitem dela, e mais uma vez não há ordem para qual habitação irá a energia. Por fim se alguma habitação ainda necessitar de energia elétrica, verifica na banco de baterias de uso comum se existe energia disponível. Neste cenário todas as alocações são realizadas de forma aleatória.

## 5.2.2 Cenário 2: escalonamento

O segundo cenário segue a mesma metodologia do cenário anterior, mas tem como vantagem um método de escalonamento simples. O escalonamento realizado apenas escalona certas cargas elétricas de forma "míope" ou seja sem considerar a utilidade e a prioridade de cada uma delas, estas são alocadas caso não tenham energia suficiente para serem utilizadas quando solicitadas.

## 5.2.3 Cenário 3: escalonamento baseado em campos potenciais

Por fim, o terceiro cenário considerou a abordagem proposta no capítulo 3, nomeadamente o escalonamento baseado em campos de potencial, de forma a conseguir uma melhor gestão da energia, de acordo com as utilidades e preferências de cada utilizador, adicionando baterias, para armazenar a energia excedente, para posteriormente ajudar a suprir as necessidades dos utilizadores, tentando assim um maior conforto para todos os utilizadores.

# 5.3 Análise de resultados

A implementação realizada utilizando a abordagem proposta para o caso de estudo foi testada considerando os três cenários. Os resultados obtidos são apresentados de seguida.

## 5.3.1 Dia típico de inverno

Na Figura 5.3 é possível observar os resultados alcançados para os três cenários testados, para um dia típico de inverno.

Verificando a Figura 5.3 e a Tabela 5.1, observa-se que comparando o cenário 1 com o cenário 2 existe melhorias, no consumo não suprido e conseqüentemente nos custos relacionados. Esta comparação de custos foi realizada com o preço médio da UE-28 que é de 0,205 €por kWh [30].

No cenário 1 não consideramos nenhuma estratégia apenas consideramos baterias para

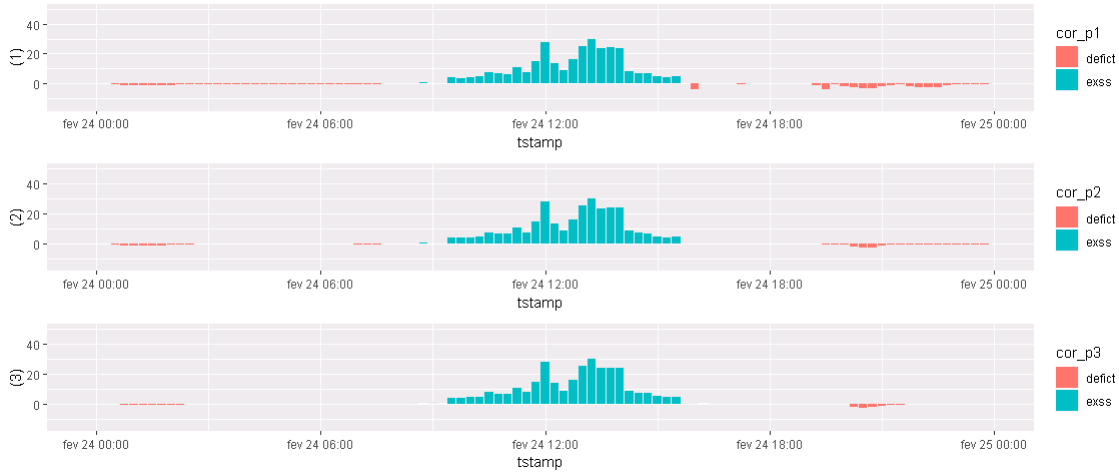


Figura 5.3: Resultado dos três cenários num dia típico de inverno.

Tabela 5.1: Resultados para um dia típico de inverno

Cenário	Consumo não suprido (W)	Custos (€)
Sem escalonamento	48,97	10,03
Com escalonamento	28,47	5,84
Escalonamento baseado em CP	27,83	5,71

armazenar a energia excedente, o que ajuda a suprir os consumos onde não existe produção e assim posteriormente, não retirar energia da rede elétrica. No cenário 2, houve melhorias devido a certas cargas poderem ser escalonadas. Comparando com cenário 3, este apresenta ainda mais melhorias, houve redução do consumo, devido a algumas cargas poderem ser escalonadas, e como neste método existe uma ordenação das cargas, foram supridas algumas cargas mais prioritárias que outras e as restantes que podiam ser escalonadas, foram sendo escalonadas uma hora á frente onde não conseguiram ser supridas, até encontrarem produção excedente para poderem ser alocadas. Comparando o cenário 1 com o cenário 3, houve uma redução no consumo não suprido (W) de 43%, e do cenário 2, para o 3, um redução de 2%.

### 5.3.2 Dia típico de verão

A Figura 5.4 ilustra os resultados alcançados para os três cenários testados para um dia típico de verão.

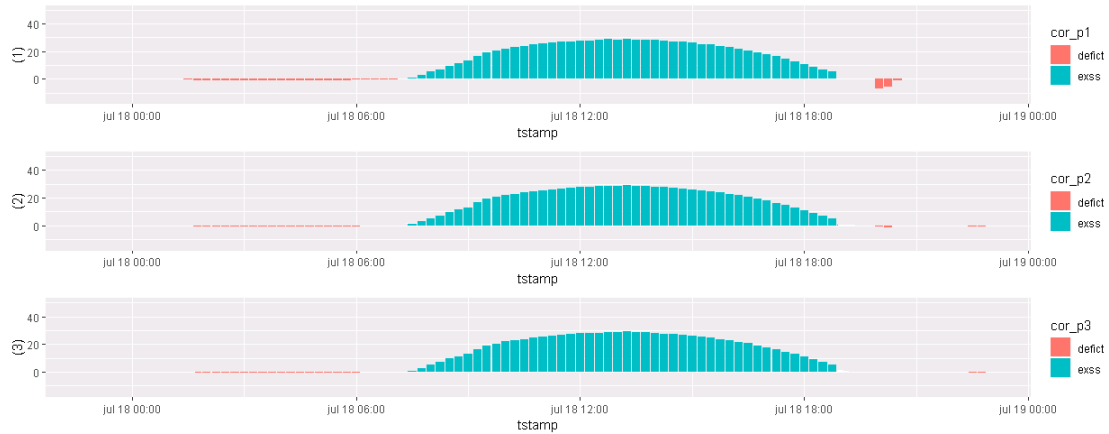


Figura 5.4: Resultado dos três cenários num dia típico de verão.

Visualizando a Figura 5.4 e a Tabela 5.2, verifica-se que do cenário 1 para o cenário 2 existem melhores resultados. Comparando com o cenário 3, este apresenta ainda melhores resultados. Como descrito anteriormente no cenário 1 não consideramos nenhuma estratégia apenas consideramos baterias para armazenar a energia excedente, o que ajuda a suprir os consumos onde não existe produção. No cenário 2, houve melhorias devido a certas cargas poderem ser escalonadas. Comparando com cenário 3, este revela mais melhorias, houve redução do consumo e nos custos, devido a algumas cargas poderem ser escalonadas, e como neste método existe uma ordenação das cargas, foram supridas algumas cargas mais prioritárias que outras e os restantes que podiam ser escalonadas, foram sendo escalonadas uma hora á frente onde não conseguiram ser supridas. Comparando o cenário 1 com o cenário 3, houve uma redução no consumo não suprido em Watt de 32%, e do cenário 2, para o 3, um redução de 5%.

Tabela 5.2: Resultados para um dia típico de verão

Cenário	Consumo não suprido (W)	Custos (€)
Sem escalonamento	29,92	6,13
Com escalonamento	21,45	4,40
Escalonamento baseado em CP	20,33	4,16

Comparando o dia típico de inverno, com o dia típico de verão escolhidos neste caso de estudo, a nível de consumo não suprido e consequentemente nos custos, existe uma redução no cenário 3, do inverno para o verão de 27%, isto devido a alguns fatores, no

verão, existe produção de energia durante mais tempo, logo não é necessário ir buscar tanta energia á rede elétrica como no inverno, em segundo os utilizadores por norma no verão não passam tanto tempo nas habitações como de inverno, devido ao estado do tempo e por consequente não existe tanto consumo.

### 5.3.3 Semana típica de inverno

A Figura 5.5 é referente os resultados obtidos para os três cenários testados para uma semana típica de inverno.

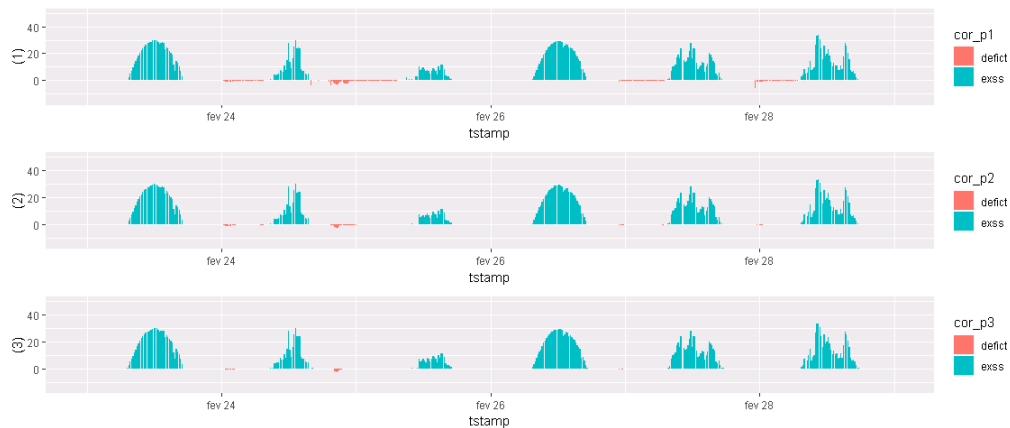


Figura 5.5: Resultado dos três cenários numa semana típica de inverno.

Analisando a Figura 5.5 e a Tabela 5.3, verifica-se que comparando o cenário 1 com o cenário 2 existe melhorias. No cenário 1 não consideramos nenhuma estratégia apenas consideramos baterias para armazenar a energia excedente, o que ajuda a suprir os consumos onde não existe produção e assim posteriormente não retirar energia da rede elétrica. No cenário 2, foi conseguido um melhor resultado porque algumas cargas podem ser escalonadas.

Tabela 5.3: Resultados para uma semana típica de inverno

Cenário	Consumo não suprido (W)	Custos (€)
Sem escalonamento	83,78	17,17
Com escalonamento	47,90	9,82
Escalonamento baseado em CP	46,54	9,54



Comparando com cenário 3, este apresenta mais melhorias, existe redução do consumo e conseqüentemente nos custos, devido às cargas que podem ser escalonadas, e como neste método existe uma ordenação das cargas, foram supridas algumas cargas mais prioritárias que outras e as restantes que podiam ser escalonadas, foram sendo escalonadas uma hora á frente onde não conseguiram ser supridos. Comparando o cenário 1 com o cenário 3, houve uma redução no consumo não suprido de 45%, e do cenário 2, para o 3, um redução de 3%. A nível de custos existe uma redução significativa do cenário 1 para o cenário 2, mas do cenário 2 para o cenário 3, houve uma redução mas não tão significativa, devido ao caso de estudo não ser muito grande, e só existir duas cargas elétricas que podem ser escalonadas. Mas mesmo assim pode afirmar-se que o método de escalonamento baseado em campos potenciais, é eficiente.

### 5.3.4 Semana típica de verão

Na Figura 5.6 são visíveis os resultados alcançados para os três cenários implementados para uma semana típica de verão.

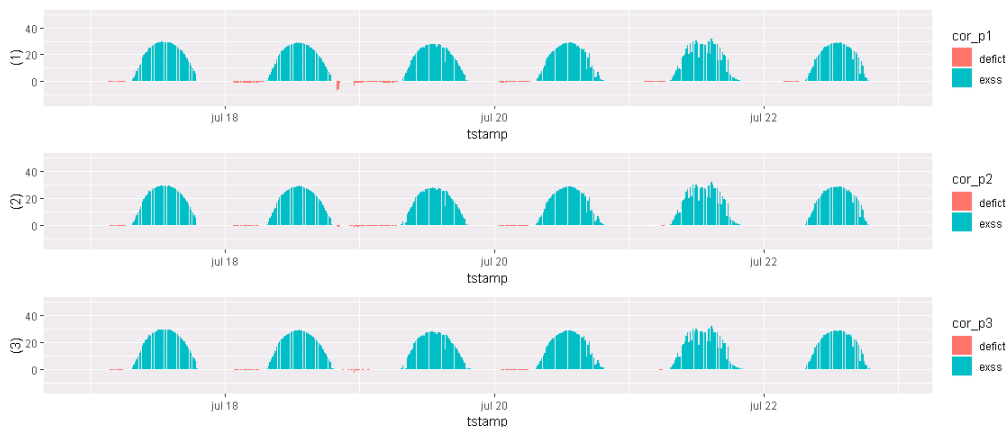


Figura 5.6: Resultado dos três cenários numa semana típica de verão.

Analisando a Figura 5.6 e a Tabela 5.4, denota-se melhorias do cenário 1 para o cenário 2, em todos os aspetos. Uma redução significativa, no consumo não suprido, que conseqüentemente diminui os custos. No cenário 2, houve melhores resultados por causa

das cargas que podem ser escalonadas. Comparando com cenário 3, este apresenta melhores resultados, houve redução do consumo e nos custos, isto porque mais uma vez existe cargas que podem ser escalonadas, e como neste método existe uma ordenação, foram supridos algumas cargas mais prioritárias e as restantes que podiam ser escalonadas, foram sendo escalonadas uma hora á frente onde não conseguiram ser supridas, até encontrarem produção excedente para poderem ser alocadas. Comparando o cenário 1 com o cenário 3, houve uma redução no consumo não suprido em Watt de 40%, e do cenário 2, para o 3, um redução de 5%.

Tabela 5.4: Resultados para uma semana típica de verão

<b>Cenário</b>	<b>Consumo não suprido (W)</b>	<b>Custos (€)</b>
Sem escalonamento	70,57	14,47
Com escalonamento	44,37	9,10
Escalonamento baseado em CP	42,29	8,67

Comparando a semana típica de inverno, com a semana típica de verão, a nível de consumo não suprido, existe uma redução no cenário 3, do inverno para o verão de 10%, isto acontece porque, no verão, existe produção de energia durante mais tempo, logo não é necessário ir buscar tanta energia á rede elétrica como no inverno, em segundo os utilizadores em geral no verão não passam tanto tempo nas habitações como de inverno, devido ao estado do tempo e por consequente não existe tanto consumo.

Os resultados obtidos mostram que o uso da abordagem baseada nos campo potenciais para o escalonamento de cargas controláveis permite aumentar a autossustentabilidade da micro rede e, no caso de conexão à rede, reduzir a dependência da rede principal e, particularmente, o custo a ser pago para adquirir a energia necessária.

No capítulo seguinte serão efetuadas as conclusões retiradas após o estudo e implementação dos algoritmos realizados, e serão também apresentadas propostas para trabalhos futuros, que possam melhorar este projeto.

# Capítulo 6

## Conclusões

No contexto de micro redes, em especial quando esta funciona em modo isolado, quando a oferta de produção de energia é menor que a procura pelas cargas existentes existe um problema de operacionalidade, sendo necessário selecionar quais as cargas que deverão continuar em funcionamento e quais as que podem ser desconetadas de forma a equilibrar o balanço energético.

Este projeto teve como objetivo aplicar técnicas inovadoras que visem otimizar os recursos existentes numa rede elétrica inteligente que opera desconectada da rede principal. Em particular aplicou-se conceitos de campos de potencial elétrico de modo a conseguir ajustar a procura de energia elétrica pelas cargas à oferta de energia elétrica oferecida pelos recursos de produção de energia, focando a priorização, escalonamento e deslastre de cargas elétricas e assim aumentar a autossustentabilidade da rede elétrica sem degradar a qualidade do sistema. Esta a alocação considerou os perfis do utilizador final de modo a que o impacto seja minimizado.

Os resultados obtidos mostram que o uso da abordagem baseada nos campo potenciais para o escalonamento de cargas controláveis permite aumentar a autossustentabilidade da micro rede e, no caso de conexão à rede, reduzir a dependência da rede principal e, particularmente, o custo a ser pago para adquirir a energia restante. Se o resultado fosse procurar uma solução ótima, utilizavam-se sistemas centralizados, mas como a nossa abordagem está assente sobre um solução rápida e eficaz, foram utilizados sistemas distribuídos. Os

resultados alcançados mostram que o método utilizado é eficaz, tendo-se verificado melhorias considerando este método, mas não muito significativas visto que o caso de estudo é pequeno, compreendendo poucas consumidores em cada habitação e os que existem só dois é que são possíveis de escalonar.

Como trabalho futuro, uma especial atenção deve ser dada ao estado de funcionamento das cargas elétricas, ou seja, quando alguma carga elétrica está ligada deve-se preservar a duração do seu funcionamento e garantir que não lhe falte energia elétrica.

Deve se ter em conta a integração de mecanismos de priorização dinâmica com a abordagem proposta de escalonamento baseado em campos potenciais, e assim conseguir alterar a prioridade das cargas ao longo do dia, aumentando ou diminuindo a sua importância, com base nas prioridades atribuídas pelo utilizador ao longo do dia, e assim conseguir aumentar ainda mais o conforto do utilizador.

Adicionalmente, devem ser considerados modelos de previsão da produção de energia para enfrentar a imprevisibilidade das fontes de energias renováveis, a fim de tornar as micro redes totalmente auto-sustentáveis durante a sua operação.

# Bibliografia

- [1] A. Oliveira, D. Pais, F. Baptista, J. Mata, M. Sousa, M. Oliveira, A. M. Baptista e J. A. Ferreira, “Energias renováveis e desenvolvimento sustentável: Novas tendências na produção de energia a partir de fontes renováveis, Equipa 517, Relatório para a disciplina de Projeto FEUP”, rel. téc., 2009. endereço: [https://paginas.fe.up.pt/~%7Dprojfeup/cd%7B%5C\\_%7D2009%7B%5C\\_%7D10/relatorios/R517.pdf](https://paginas.fe.up.pt/~%7Dprojfeup/cd%7B%5C_%7D2009%7B%5C_%7D10/relatorios/R517.pdf) (acedido em 08/03/2019).
- [2] R. Rivera e A. S. Esposito, “Redes elétricas inteligentes (smart grid): oportunidade para adensamento produtivo e tecnológico local”, rel. téc. endereço: [https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2927/1/RB%2040%20Redes%20el%C3%A9tricas%20inteligentes%7B%5C\\_%7DP.pdf](https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2927/1/RB%2040%20Redes%20el%C3%A9tricas%20inteligentes%7B%5C_%7DP.pdf) (acedido em 11/03/2019).
- [3] A. F. Cabello, “Redes elétricas inteligentes no Brasil: A necessidade de uma avaliação adequada de custos e benefícios”, rel. téc. endereço: [http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/4185/1/Radar%7B%5C\\_%7Dn19%7B%5C\\_%7DRedes.pdf](http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/4185/1/Radar%7B%5C_%7Dn19%7B%5C_%7DRedes.pdf) (acedido em 21/03/2019).
- [4] *(PDF) Smart grids e micro redes: o futuro já é presente.* endereço: [https://www.researchgate.net/publication/228473062%7B%5C\\_%7DSmart%7B%5C\\_%7DGrids%7B%5C\\_%7De%7B%5C\\_%7DMicroredes%7B%5C\\_%7Do%7B%5C\\_%7Dfuturo%7B%5C\\_%7Dja%7B%5C\\_%7De%7B%5C\\_%7Dpresente](https://www.researchgate.net/publication/228473062%7B%5C_%7DSmart%7B%5C_%7DGrids%7B%5C_%7De%7B%5C_%7DMicroredes%7B%5C_%7Do%7B%5C_%7Dfuturo%7B%5C_%7Dja%7B%5C_%7De%7B%5C_%7Dpresente) (acedido em 09/04/2019).
- [5] *Smart Grid- a rede elétrica inteligente - redes inteligentes.* endereço: <https://www.ebah.com.br/content/ABAAafALkAK/smart-grid-a-rede-eletrica-inteligente> (acedido em 24/06/2019).

- [6] *Smart grid evolution - Eolas Magazine*. endereço: <https://www.eolasmagazine.ie/smart-grid-evolution/> (acedido em 09/04/2019).
- [7] “Smart grid e PLC uma análise da regulação europeia e desenvolvimento de um sistema simples de integração destas tecnologias”, rel. téc. endereço: [http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/1910/1/CT%7B%5C\\_%7DC0EAU%7B%5C\\_%7D2013%7B%5C\\_%7D1%7B%5C\\_%7D03.pdf](http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/1910/1/CT%7B%5C_%7DC0EAU%7B%5C_%7D2013%7B%5C_%7D1%7B%5C_%7D03.pdf).
- [8] *Sistemas de microgeração*. endereço: <https://www.portal-energia.com/sistemas-microgeracao/> (acedido em 24/06/2019).
- [9] G. J. P. Vieira, *Desequilíbrios de tensão em micro-redes durante o funcionamento em modo isolado*, 2012.
- [10] J. Faxas-Guzmán, R. García-Valverde, L. Serrano-Luján e A. Urbina, “Priority load control algorithm for optimal energy management in stand-alone photovoltaic systems”, *Renewable Energy*, vol. 68, pp. 156–162, ago. de 2014.
- [11] *Portal ERSE - Glossário*. endereço: <http://www.erse.pt/pt/glossario/Paginas/glossario.aspx?folder=699df0cb-b81f-4371-a7fc-4156e75a0fa3> (acedido em 09/04/2019).
- [12] A. Kumar Basu, “Microgrid: Planning of solar PV incorporation to the optimal CHP-system-an evolutionary algorithmic approach”, pp. 2–14, jan. de 2019.
- [13] A. G. Tsikalakis, S. Member, N. D. Hatziargyriou e S. Member, “Centralized control for optimizing microgrids operation”, *IEEE transaction energy conversion*, vol. 23, nº 1, pp. 241–248, mar. de 2008.
- [14] T. Logenthiran, D. Srinivasan e A. M. Khambadkone, “Multi-agent system for energy resource scheduling of integrated microgrids in a distributed system”, vol. 81, pp. 138–148, jan. de 2011.
- [15] R. Rao Kolluri, J. de Hoog, K. Abdulla, I. Mareels, T. Alpcan, M. Brazil e D. Anne Thomas, “Siting and sizing distributed storage for microgrid applications”, pp. 1–6, out. de 2017.

- [16] S. S. Reka e V. Ramesh, “International journal of renewable energy research IJ-RER.”, vol. 5, n° 4, pp. 1196–1205, dez. de 2015.
- [17] Jin Xiao, Jae Yoon Chung, Jian Li, R. Boutaba e J. Won-Ki Hong, “Near optimal demand-side energy management under real-time demand-response pricing”, em *2010 International Conference on Network and Service Management*, IEEE, out. de 2010, pp. 527–532.
- [18] A. Barbato, P. Di Milano, A. Barbato, A. Capone, G. Carello, M. Delfanti, M. Merlo e A. Zaminga, “House energy demand optimization in single and multi-user scenarios sustainable energy solutions in humanitarian settings View project data plane acceleration API view project house energy demand optimization in single and multi-user Sscenarios”, pp. 1–6, out. de 2011.
- [19] A.-H. Mohsenian-Rad, V. W. S Wong, S. Member, J. Jatskevich, R. Schober e A. Leon-Garcia, “Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid”, *IEEE transation on smart grid*, vol. 1, pp. 320–331, dez. de 2010.
- [20] E. Matallanas, M. Castillo-Cagigal, A. Gutiérrez, F. Monasterio-Huelin, E. Caamaño-Martín, D. Masa e J. Jiménez-Leube, “Neural network controller for Active Demand-Side Management with PV energy in the residential sector”, *Applied Energy*, vol. 91, n° 1, pp. 90–97, mar. de 2012.
- [21] A. Radhakrishnan e M. P. Selvan, “Load scheduling for smart energy management in residential buildings with renewable sources”, pp. 1–6, dez. de 2014.
- [22] R. Palma-Behnke, C. Benavides, E. Aranda, J. Llanos e D. Saez, “Energy management system for a renewable based microgrid with a demand side management mechanism”, pp. 1–8, abr. de 2011.
- [23] J. Faxas-Guzmán, R. García-Valverde, L. Serrano-Luján e A. Urbina, “Priority load control algorithm for optimal energy management in stand-alone photovoltaic systems”, *Renewable Energy*, vol. 68, pp. 156–162, ago. de 2014.

- [24] M. Rastegar, M. Fotuhi-Firuzabad e H. Zareipour, “Home energy management incorporating operational priority of appliances”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 74, pp. 286–292, jan. de 2016.
- [25] B. Moran, “Microgrid load management and control strategies”, pp. 1–4, mai. de 2016.
- [26] T. Kato, H. Takahashi, K. Sasai, G. Kitagata, H.-M. Kim, T. Kinoshita, T. Kato, H. Takahashi, K. Sasai, G. Kitagata, H.-M. Kim e T. Kinoshita, “Priority-based hierarchical operational management for multiagent-based microgrids”, *Energies*, vol. 7, n° 4, pp. 2051–2078, mar. de 2014.
- [27] A. Ferreira e P. Leitao, “Holonc self-sustainable systems for electrical micro grids”, pp. 510–515, jul. de 2016.
- [28] A. H. Morrish e IEEE Magnetics Society., *The physical principles of magnetism*. IEEE Press, 2001, p. 680.
- [29] *O que é Programação ou Linguagem em R? | IBPAD*. endereço: <https://www.ibpad.com.br/blog/comunicacao-digital/o-que-e-programacao-ou-linguagem-em-r/> (acedido em 24/06/2019).
- [30] *Estatísticas sobre os preços da eletricidade - Statistics Explained*. endereço: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity%7B%5C\\_%7Dprice%7B%5C\\_%7Dstatistics/pt](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity%7B%5C_%7Dprice%7B%5C_%7Dstatistics/pt) (acedido em 12/06/2019).



# Apêndice A

## Algoritmos em linguagem R

Os algoritmos em linguagem R, encontram-se disponíveis no Gitlab da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Bragança, onde podem ser acedidos através do link:

<https://gitlab.estig.ipb.pt/a31011/dissertacao.git>