



UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Luís Barreiro Carvalho Quesado

Desenvolvimento de um algoritmo para a gestão integrada de Recursos Energéticos Distribuídos num ambiente de Virtual Power Plant

Dissertação submetida para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
Área de Especialização em Energia

Fevereiro/2018





FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

**Desenvolvimento de um algoritmo para a gestão integrada de
Recursos Energéticos Distribuídos num ambiente de Virtual Power
Plant**

Luís Barreiro Carvalho Quesado

Júri

Professora Doutora Rita Cristina Girão Coelho da Silva (Presidente)

Professor Doutor Pedro Manuel Soares Moura (Vogal)

Professor Doutor Álvaro Filipe Peixoto Cardoso de Oliveira Gomes (Orientador)

Coimbra 2018

Agradecimentos

Ao meu orientador, Professor Doutor Álvaro Filipe Peixoto Cardoso de Oliveira Gomes, pelo desafio e estímulo para construir este percurso com confiança e autonomia, pela serenidade ética na crítica aos meus desacertos, pela paciência e dedicação que teve comigo, pela orientação científica que me permitiu chegar até aqui.

Aos meus pais e irmãos, pela educação dos valores mais altos da dignidade humana, pelo amor, compreensão, paciência e apoio constantes, pelo caminho da honestidade e da persistência que me ensinaram a trilhar.

À minha Raquel, que esteve sempre do meu lado, tanto para partilhar momentos de alegria como para me acudir nos abalos de desencanto. Que nunca me deixou desistir e acreditou sempre nas minhas capacidades.

Resumo

As crescentes necessidades energéticas e preocupações ambientais, associadas à diminuição dos custos das tecnologias, permitiram acelerar o processo de desenvolvimento e integração de pequenas unidades geradoras, muitas vezes de fonte primária renovável e produção intermitente. Este tipo de geração, apesar do seu potencial contributo para uma operação mais eficiente dos Sistemas de Energia Elétrica (SEE), levanta também algumas preocupações, quer relativamente à capacidade de assegurar a continuidade e estabilidade do fornecimento de energia, quer relativamente à qualidade do abastecimento. Para além disso, a proliferação de uma grande quantidade de unidades geradoras de pequena capacidade coloca questões quanto à gestão e controlo dos SEE. Por outro lado, a digitalização da rede elétrica, com a possibilidade de comunicação bidirecional entre a rede e o consumidor permite que mesmo recursos do lado da procura, possam ser considerados na gestão global do SEE. É neste contexto que surge o conceito de Virtual Power Plant (VPP), definida como um conjunto de geradores distribuídos (DGs) despacháveis e não despacháveis, de elementos de armazenamento de energia e de cargas controláveis acompanhado de tecnologias de informação e comunicação que permite gerir todos estes recursos distribuídos como se fosse um recurso único (por exemplo, uma central), planeando, monitorizando a operação e coordenando os fluxos de energia nos seus componentes, habitualmente com objetivos de minimizar os custos de geração, minimizar a produção de gases de efeito de estufa; e/ou maximizar os lucros/receitas.

A presente dissertação foi desenvolvida com o propósito de criar um algoritmo em ferramenta Matlab®, capaz de executar a gestão integrada de Recursos Energéticos Distribuídos (DER) num ambiente VPP com o objetivo de maximizar lucro através da sua participação no mercado diário. Neste trabalho a definição de VPP e os problemas socioeconómicos, tecnológicos, e de regulamentação que esta enfrenta, bem como os possíveis DERs a agregar num ambiente VPP, são analisados de forma sucinta e objetiva. Alguns exemplos práticos, em desenvolvimento ou de investigação científica, no contexto de VPP, são descritos, dando especial ênfase à gestão integrada de DERs. É desenvolvido um algoritmo genético para a gestão integrada de DER e analisados os resultados de estudo de caso.

Assim, este trabalho permite concluir que o conceito de VPP é uma forma inovadora e eficaz de efetuar a gestão dos diferentes DERs, visando a maximização de lucro no mercado diário, mas que poderá ter outras funções como, por exemplo, a prestação de serviços de sistema. Para tal, é necessário ter um conhecimento rigoroso dos recursos energéticos a integrar numa VPP, bem como dos sistemas de gestão elétrica e algoritmos a utilizar para a otimização da gestão de recursos.

Palavras-Chave: Virtual Power Plant, Algoritmo Genético, Mercado Diário, Gestão Integrada de Recursos Energéticos, Recursos Energéticos Distribuídos.

Abstract

The increasing energy needs and environmental concerns associated with lower technology costs have made it possible to accelerate the process of developing and integrating small generating units, often from renewable primary sources and intermittent production. This type of generation, despite its potential contribution to a more efficient operation of the Electric Power Systems, has some concerns, both regarding the capacity to ensure the continuity and stability of the energy supply and the quality of supply. In addition, the proliferation of a large number of small capacity generating units raises concerns about the management and control of the Electric Power Systems. On the other hand, network scanning, with the possibility of bidirectional communication between the network and the consumer, allows even demand-side resources to be considered in the overall management of Electric Power System. It is in this context that the concept of VPP arises, defined as a set of dispatchable and non-dispatchable distributed generators, energy storage elements and controllable loads accompanied by information and communication technologies that allows to manage all these distributed resources as if it were a single resource, planning, monitoring the operation and coordinating the energy flows in its components, usually with the aim of minimizing generation costs, minimizing the production of greenhouse gases; and/or maximize profits/revenues.

The present dissertation was developed with the purpose of creating an algorithm in Matlab®, capable of performing integrated Distributed Energy Resources (DER) management in a VPP environment with the objective of maximizing profit through its participation in the day-ahead market. In this work, the definition of VPP and the socioeconomic, technological, and regulatory problems that it faces, as well as the possible DERs to be aggregated in a VPP environment, are analyzed in a succinct and objective way. Some practical examples, under development or scientific research, in the context of VPP, are described, with special emphasis on the integrated management of DERs. A genetic algorithm is developed for the integrated management of DERs and the results of case studies are analyzed. This study allows to conclude that the concept of VPP is an innovative and effective way of managing the different DERs not only in order to maximize profit in the day-ahead market. To do this, it is necessary to have a thorough knowledge of the energy resources to be integrated in a VPP, as well as the electrical management systems and algorithms to be used for the optimization of resource management. The present dissertation was developed within the scope of the Master Dissertation Integrated in Electrical and Computer Engineering, taught in the Department of

Electrical and Computer Engineering of the Faculty of Sciences and Technologies of the University of Coimbra.

Keywords: Virtual Power Plant, Genetic Algorithm, Day-ahead Market, Integrated Management of Energy Resources, Distributed Energy Resources.

Lista de Conteúdos

Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1. Motivação.....	1
1.2. Estrutura	2
Capítulo 2	3
Caracterização de Recursos Energéticos Distribuídos	3
2.1 Recursos Energéticos Distribuídos.....	3
2.2 Sistemas de Cogeração (CHP)	3
2.3. Armazenamento de Energia Elétrica.....	4
2.4 Energia Fotovoltaica	6
2.5 Energia Eólica	7
2.6 Centrais Mini-Hídricas	8
2.7 Demand Side Management	9
Capítulo 3	11
Definição, estrutura e componentes da Virtual Power Plant.....	11
3.1. Definição de Virtual Power Plant.....	11
3.2. Modelo e Componentes das VPP	14
3.3. Estrutura de uma VPP	16
3.5. Vantagens e desvantagens desta forma de organização e produção de eletricidade	18
Capítulo 4	20
VPP – Exemplos de casos reais e de estudo.....	20
4.1. A Configurable VPP With Managed Energy Services: A Malmo Western Harbour Case	20
4.2. Scheduling of a Virtual Power Plant with High Penetration of Distributed Generation....	22
4.3. Operation of a Datacenter as a Virtual Power Plant.....	23
4.4. RWE Virtual Power Plant na Alemanha	26
4.5. A Ilha Dinamarquesa de Bornholm.....	26
4.6. A Market-Based Virtual Power Plant.....	27

4.7. Bidding Strategy of Virtual Power Plant for Participating in Energy and Spinning Reserves Markets.....	28
4.8. Aspectos a ter em consideração	28
Capítulo 5	30
Algoritmo desenvolvido	30
5.1. Descrição das diferentes etapas do algoritmo	30
Capítulo 6	40
Estudo de caso	40
6.1. Cenário de referência	40
6.2. Produção renovável e sistemas de armazenamento elétrico.....	43
Capítulo 7	49
Conclusão e trabalho futuro	49
Bibliografia.....	51
ANEXO A	55
Tabela de características de operação e custos típicos de diferentes tecnologias de Cogeração e Micro-Cogeração.....	55
ANEXO B	56
Descrição de diferentes Tecnologias de Armazenamento Elétrico, características e aplicações..	56
ANEXO C	63
Tabelas de dados referentes ao caso de estudo	63
ANEXO D	85
Código Matlab	85

Lista de Figuras

Figura 1 - Comportamento diário de instalação com autoconsumo [12]	6
Figura 2 - Perfil de geração fotovoltaica semana típica para todos os PV em Braunschweig, Alemanha [12].....	6
Figura 3 - Diagrama de produção eólica - 11 de fevereiro de 2018.....	8
Figura 4 - Alterações ao diagrama de cargas promovidas pela gestão de procura [19].....	9
Figura 5 - Programas de Gestão de Procura [19]	10
Figura 6 - Aspectos críticos do desenvolvimento de uma VPP [1]	12
Figura 7 - Modelo Simplificado de VPP [3]	14
Figura 8 - Diagrama de Blocos do Algoritmo Desenvolvido.....	31
Figura 9 - Recombinação com ponto de corte.....	38
Figura 10 - a) Produção para o dia 09/09/2017. b) Preço de Compra vs Receita obtida no dia 09/09/2017.....	41
Figura 11 - a) Produção para o dia 24/01/2018. b) Preço de Compra vs Receita obtida no dia 24/01/2018.....	42
Figura 12 - a) Produção para o dia 12/08/2017. b) Preço de Compra vs Receita obtida no dia 12/08/2017.....	43
Figura 13 - Preço de Compra vs Receita por Intervalo de Tempo para o dia 9 de setembro de 2017	44
Figura 14 - a) Diagrama da energia da bateria. b) Diagrama de potência da bateria.	45
Figura 15 - Preço de Compra vs Receita por Intervalo de Tempo para o dia 24 de janeiro de 2018	45
Figura 16 – a) Diagrama da energia da bateria. b) Diagrama de potência da bateria.	46
Figura 17 - Preço de Compra vs Receita por Intervalo de Tempo para o dia 12 de agosto de 2017	47
Figura 18 - a) Diagrama da energia da bateria. b) Diagrama de potência da bateria.	47
Figura 19 – Maturidade aproximada das tecnologias ESS [42]	60

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Questões técnicas, socioeconómicas e de regulamentação de uma VPP	13
Tabela 2 - Representação das possíveis decisões do algoritmo	32
Tabela 3 - Dados técnicos dos sistemas de armazenamento de energia elétrica utilizados no modelo de simulação	40
Tabela 4 - Dados de desempenho do algoritmo para o dia 9 de setembro de 2017	45
Tabela 5 - Dados de desempenho do algoritmo para o dia 24 de janeiro de 2018.....	46
Tabela 6 - Dados de desempenho do algoritmo para o dia 12 de agosto de 2017	48
Tabela 7 - Tabela de características de operação e custos típicos de diferentes tecnologias de Cogeração e Micro-Cogeração [6]	55
Tabela 8 - Custo e eficiência das tecnologias EES [42].....	60
Tabela 9 – Aplicações dos diferentes ESS [9]	62
Tabela 10 - Dados de produção de eólica e fotovoltaica a nível nacional e preços do mercado diário para o dia 9 de setembro de 2017	63
Tabela 11 - Dados de produção de eólica e fotovoltaica a nível nacional e preços do mercado diário para o dia 24 de janeiro de 2018	65
Tabela 12 - Dados de produção de eólica e fotovoltaica a nível nacional e preços do mercado diário para o dia 12 de agosto de 2017	67
Tabela 13 - Dados de produção de eólica e fotovoltaica da VPP e preços do mercado diário para o dia 9 de setembro de 2017.....	69
Tabela 14 - Dados de produção de eólica e fotovoltaica da VPP e preços do mercado diário para o dia 24 de janeiro de 2018	72
Tabela 15 - Dados de produção de eólica e fotovoltaica da VPP e preços do mercado diário para o dia 12 de agosto de 2017	74
Tabela 16 - Resultados da simulação para o dia 9 de setembro de 2017	76
Tabela 17 - Resultados da simulação para o dia 24 de janeiro de 2018.....	78
Tabela 18 - Resultados da simulação para o dia 12 de agosto de 2017	81

Abreviaturas

DG	Geração Distribuída
SEE	Sistema de Energia Elétrica
DER	Recursos de Energia Distribuídos
VPP	Virtual Power Plant
CHP	Sistemas de Cogeração
RE	Energias Renováveis
ESS	Sistema de Armazenamento de Energia
PV	Painéis Fotovoltaicos
CMH	Centrais Mini-hídricas
DSM	Demand Side Management
DR	Gestão da Procura
EE	Energia Elétrica
SS	Serviços de Sistema
CDC	Controlo Direto de Carga
AC	Ar Condicionado
TA	Termoacumuladores
SEM	Sistema de Gestão de Energia
TIC	Tecnologias de Informação e Comunicação
DSO	Operador do Sistema de Distribuição
TSO	Operador do Sistema de Transmissão
CVPP	Comercial Virtual Power Plant
TVPP	Technical Virtual Power Plant
CL	Cargas Controláveis
FLC	Fuzzy Logic Control
HEMS	Home Energy Management System
ToU	Time of Use
DEMS	Distributed Energy Management System
AG	Algoritmo Genético

Capítulo 1

Introdução

1.1. Motivação

A integração de pequenas unidades de geração no Sistema de Energia Elétrica tem atraído grande atenção nos últimos anos. A DG desempenha um papel complementar importante no reforço das principais centrais de geração, para satisfazer a crescente procura de energia. Para além da sua dimensão, usualmente pequena, e da fonte primária de energia, parte das vezes solar ou eólica, uma das características diferenciadoras mais importantes da DG é a sua flexibilidade que lhe permite, com facilidade, entrar e sair de serviço. Apesar do seu potencial contributo para uma mais eficiente operação do SEE, com menos perdas, maior fiabilidade e qualidade de energia [1] [2], a disseminação deste tipo de geração pode levantar problemas graves ao nível do funcionamento das redes. Por exemplo: perfis de tensão indesejáveis, inversão de fluxos de potência, operação não adequada dos sistemas de proteção, desequilíbrios entre o consumo e a geração e até aumento das perdas, entre outros [1] [2] [3]. Parte destes problemas poderão ser atenuados ou eliminados se houver um controlo efetivo deste tipo de geração. Por outro lado, parece cada vez mais viável a participação ativa de recursos do lado da procura na gestão operacional dos SEE. De entre estes recursos podem identificar-se, como, por exemplo, alguns tipos de cargas controláveis (habitualmente cargas termostáticas como ar condicionados, termoacumuladores, bombas de calor, etc.) e sistemas de armazenamento (por exemplo, veículos elétricos ou mesmo sistemas estacionários).

Portanto, para obter uma operação otimizada da rede principal, o operador de rede deve ter controlo e conhecimento das características dos diferentes DERs [1].

Os aspetos negativos do aumento da penetração não coordenada de DG, a par com a possibilidade de gestão integrada de DER, são as principais motivações básicas para a introdução do conceito de Virtual Power Plant. VPP é a aglomeração de unidades DG, cargas controláveis e dispositivos de armazenamento sob gestão/controlo de um grupo/entidade responsável pela gestão dos recursos dentro do grupo, e pela troca de energia com a rede. Inicialmente, a instalação dos DER foi feita com uma abordagem "fit and forget" [3], tal abordagem, além de poder levantar os problemas atrás referidos, não permite a utilização otimizada dos recursos, inibindo, por isso, receitas potenciais.

O conceito de VPP agrega todos os DERs numa única entidade, através da qual os DERs teriam controlabilidade no sistema e impacto no mercado [1]. Diferentes estudos analisaram o conceito VPP em três grandes direções:

- A Primeira direção está relacionada com a classificação das DG dentro da estrutura das VPPs, de acordo com as suas capacidades e propriedades. Foram descritas três categorias: *Domestic DG* (DDG), *Public DG* (PDG) e *Independent Power Producers DGs* (IPPDG). Outro método de classificação da DG foi apresentado tendo em conta a sua natureza operacional; despachável ou não despachável [3].
- A Segunda direção faz a análise da estrutura da VPP tanto, na vertente técnica como na vertente comercial: VPP Técnica (TVPP) e VPP Comercial (CVPP), e suas funcionalidades [3].
- A Terceira direção inclina-se para a otimização da operação das VPPs. Alguns destes estudos focam-se na otimização da estrutura VPP, selecionando o tamanho ótimo e a localização dos componentes das VPP. Outros têm como objetivo a maximização do lucro da VPP [3].

O objetivo desta dissertação consiste na construção de um algoritmo em ferramenta Matlab®, capaz de executar a gestão integrada de DERs num ambiente VPP, visando maximizar lucro no mercado diário. Para tal, é preciso conhecer e caracterizar os possíveis DERs a agregar numa VPP, bem como ter presente a definição e estrutura da mesma.

1.2. Estrutura

Após este primeiro capítulo onde se fez o enquadramento da temática, no capítulo 2 é feita a caracterização dos possíveis DERs a agregar numa VPP, dando especial ênfase aos sistemas de armazenamento de energia elétrica, devido ao impacto que estes terão posteriormente no estudo de caso.

No capítulo 3 é apresentada a definição atual de VPP, a sua origem e desenvolvimento, bem como a sua estrutura e componentes. Alguns problemas técnicos, socioeconómicos, e de legislação são apresentadas e discutidos.

No capítulo 4 são apresentados exemplos reais e de estudos das VPPs, com diferentes objetivos, dando especial ênfase à gestão integrada de recursos.

No capítulo 5 é apresentado e descrito o algoritmo desenvolvido. No capítulo 6 é feito o estudo de caso e, finalmente, no capítulo 7 são apresentadas as conclusões da dissertação.

Capítulo 2

Caracterização de Recursos Energéticos Distribuídos

2.1 Recursos Energéticos Distribuídos

A maioria das DER apresenta vários benefícios, quando comparadas com as tecnologias tradicionais de geração elétrica, destacando-se a alta eficiência; flexibilidade no seu uso; tempo de construção reduzida; diminuição da dependência das centrais emissoras de carbono; elevada qualidade e redução da dependência energética [4]. Devido a estes fatores, verifica-se uma aposta crescente na substituição de tecnologias tradicionais de produção elétrica por DER.

Neste capítulo, são caracterizados os seguintes tipos de DER:

- Sistemas CHP e Míni-CHP;
- Sistemas de armazenamento de energia elétrica;
- Sistemas Fotovoltaicos;
- Sistemas de Geração Eólica;
- Mini-Hidráulica;
- Demand Side Management;

2.2 Sistemas de Cogeração (CHP)

O sistema de Cogeração (CHP) é um dos métodos de geração de energia atuais mais eficientes, sendo utilizado para ajudar a cumprir muitos objetivos da política energética, para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, e o custo de energia para os consumidores.

As centrais modernas estão limitadas a uma eficiência entre os 33% e os 60%, pelo que 40% a 67% da energia térmica é desperdiçada [5]. No passado, este excedente térmico era normalmente largado no meio-ambiente ou descartado em torres de arrefecimento [5]. Os sistemas de cogeração construídos utilizam este excedente térmico para aquecimento e canalização de água quente, nos edifícios que rodeiam as centrais em questão, ou em processos industriais [5].

De acordo com a Diretiva Europeia 2004/8/CE, as tecnologias de cogeração de elevada eficiência com uma capacidade máxima de produção de energia elétrica até 50 kW são denominadas por

tecnologias de micro-cogeração [6]. Tal como as tecnologias de cogeração, a micro-cogeração assenta na produção combinada de calor e eletricidade.

Existe uma larga variedade de tecnologias de conversão, sendo as mais conhecidas as microturbinas. Porém, as tecnologias mais atuais e competitivas são compostas por motores de combustão interna; motores Stirling; células de combustível e ainda sistemas de turbina a vapor. Os tipos de combustíveis utilizados por estas tecnologias tanto podem ser de origem fóssil como renovável (biogás, óleo vegetal, hidrogénio, *pellets*).

A tabela observada no anexo A lista as características de operação mais relevantes, bem como custos típicos, em termos de investimento inicial, operação e manutenção dos vários equipamentos, comparando-os com as tecnologias tradicionais de cogeração de maior dimensão [7].

Atualmente, a capacidade instalada em cogeração, em Portugal, encontra-se na ordem dos 1,6 GW [8].

2.3. Armazenamento de Energia Elétrica

Os sistemas de armazenamento de energia (ESS) permitem a captura e armazenamento de Energias Renováveis (RE) para uso posterior, em vez de desperdiçar o excesso de eletricidade para o qual não há procura. Além disso, estes são usados para suavizar a saída de geradores intermitentes para reduzir a troca de energia com a rede [9]. Além dos benefícios listados acima, os ESS melhoram a flexibilidade no fornecimento de energia, tornando menos relevante a diferença entre a oferta e a procura [9]. Portanto, os ESS podem aumentar a eficiência dos sistemas de energia; melhorar a estabilidade e a fiabilidade da rede, bem como contribuir para a continuidade do fornecimento e segurança energética [9].

Os ESS revelam grande importância perante a penetração dos sistemas de produção descentralizada de energia elétrica, permitindo aos utilizadores de vários setores aproveitarem as tarifas dinâmicas da rede [6]. Estes podem assegurar ao consumidor o fornecimento de energia elétrica, quer quando apresentar vantagens económicas quer quando ocorrer interrupções na rede [6].

De acordo com [6], os sistemas de armazenamento surgem, neste contexto, como importantes ferramentas que permitem:

- contribuir para o alisamento do diagrama de carga, com todos os benefícios associados: capacidade, perdas, gestão do sistema, custos, fiabilidade;
- gerir o desfasamento entre a disponibilidade de algumas fontes alternativas e a procura;
- lidar com a variabilidade de algumas fontes;

- a gestão económica de recursos, possibilitando a diminuição da dependência externa e minimizando os impactos da volatilidade dos preços dos combustíveis fósseis.

Trazem então benefícios financeiros e técnicos, quer para o sistema quer para o consumidor, contribuindo também para:

- assegurar a fiabilidade do sistema de energia elétrica;
- minimizar a necessidade de investir em novas centrais, quando aliados a sistemas de gestão que permitam controlar a procura.

Existem muitos critérios que são considerados ao escolher um ESS para uma aplicação específica, alguns dos quais estão descritos nesta secção de acordo com [9] e [10]:

a. Potência e Energia Nominal: para indicar a potência (kW) e a energia (kWh), isto é, a taxa máxima de carga ou descarga em qualquer instante, e a capacidade da energia armazenada.

b. Eficiência cíclica: relaciona o valor de energia utilizada no processo de armazenamento face ao valor de energia útil que o sistema disponibiliza. As perdas de energia ocorridas ao longo do ciclo podem ser causadas por transferências de calor com o meio exterior, fugas de ar, degradação química das baterias, entre outras.

c. Ciclo de Vida: para explicar a degradação durante cada ciclo de carga e descarga, sendo essa degradação exibida pela maioria dos tipos de ESS e, particularmente, pelas baterias eletroquímicas, dependendo de muitas variáveis, como o tipo de tecnologia de armazenamento e as condições de operação.

d. Energia de manutenção: valor mínimo de energia que permite minimizar a degradação dos componentes químicos ao longo dos ciclos.

e. Percentagem de autodescarga diária: representa a percentagem de autodescarga diária provocada pela dissipação de energia sob a forma de dissipação de calor, fugas de ar e perdas elétricas, durante o período de repouso ou de descarga.

f. Outras características: incluem tempo de resposta; facilidade de manutenção; custo; efeitos de memória; impacto ambiental; fiabilidade e nível de maturidade;

Existem três aplicações principais para o armazenamento de energia elétrica: **fiabilidade**; **deslocamento de tempo e geográfico de energia**; e **serviços de sistema** [11].

Fiabilidade envolve a gestão do armazenamento de energia para prevenir ou evitar a perda de fornecimento para a carga. **Deslocamento de tempo e geográfico de energia** consiste na gestão do armazenamento de energia para atrasar o consumo ou a geração de energia elétrica [11]. Se a energia fornecida ao ESS for obtida a partir de uma fonte remota, há efetivamente uma combinação de deslocamento de tempo e geográfico na geração. O objetivo dos **serviços de sistema** é a gestão do armazenamento de energia para operações de controlo da rede, quando solicitado pelos

operadores de rede. Estas operações incluem controlo de tensão, controlo de frequência e *system restart* [11].

No anexo B, encontra-se uma breve descrição das diferentes tecnologias de armazenamento elétrico, respetivas características e principais utilizações.

2.4 Energia Fotovoltaica

Citando [12], “ a energia solar fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da luz em eletricidade (Efeito Fotovoltaico), sendo a célula fotovoltaica um dispositivo fabricado com material semicondutor, a unidade fundamental deste processo de conversão”.

As figuras 1 e 2 representam a produção diária de energia, através de painéis fotovoltaicos (PV), comparando com o consumo de energia e o perfil de geração fotovoltaica semanal típica para todos os PV, em Braunschweig, na Alemanha, respetivamente.

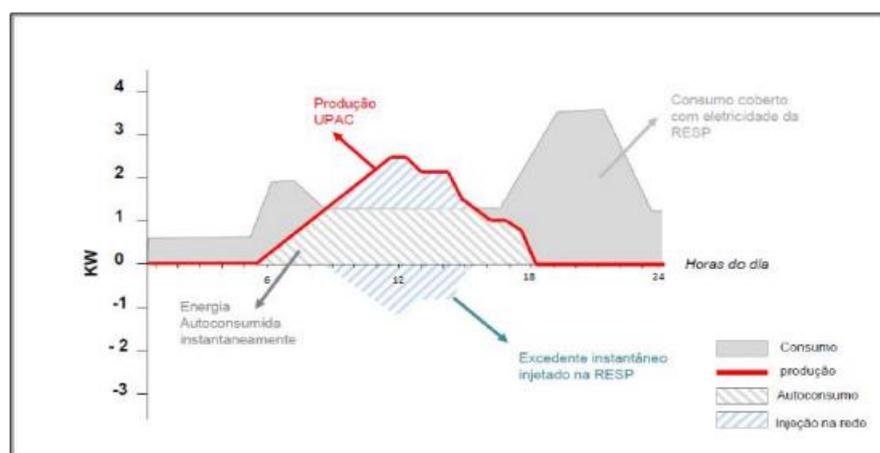


Figura 1 - Comportamento diário de instalação com autoconsumo [12]

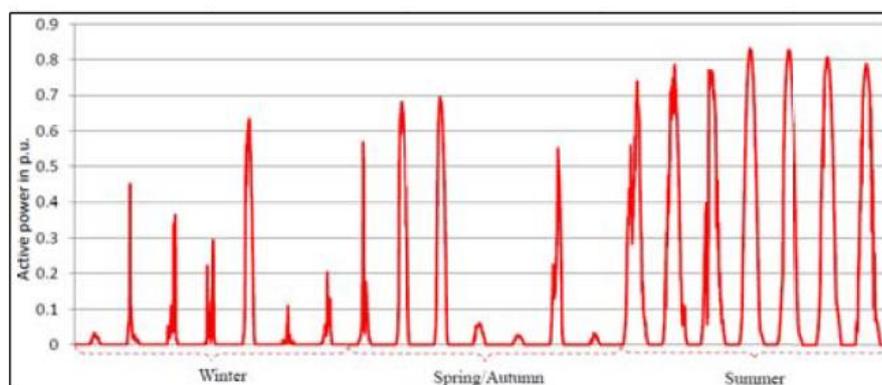


Figura 2 - Perfil de geração fotovoltaica semanal típica para todos os PV em Braunschweig, Alemanha [12]

A crescente instalação e desenvolvimento de tecnologias solar fotovoltaicas, em conjunto com a economia de escala, tiveram como consequência a redução do custo de energia PV e o aumento

da sua eficiência. Assim, o seu custo médio de geração elétrica desta fonte tornou-se competitivo com as fontes de energia convencionais num crescente número de regiões geográficas, atingindo a paridade de rede [12].

A energia solar fotovoltaica é hoje a terceira fonte de energia renovável mais importante em termos de capacidade instalada a nível global, após a hidroelétrica e a eólica, com uma capacidade instalada de 227GW, o suficiente para fornecer 1% da procura mundial de eletricidade [13]. Em alguns países como a Itália, Grécia ou Alemanha, a energia fotovoltaica contribui para o consumo doméstico atual em 8%, 7,4% e 7,1% respetivamente [13]. Em Portugal, a capacidade instalada é de 454 MW [13].

A intermitência e a natureza não despachável da energia solar fotovoltaica são a sua principal desvantagem. Para redes elétricas de resposta rápida de reserva, para compensar as variações de frequência, estas desvantagens podem ter impacto significativo na estabilidade do sistema. Portanto, soluções de armazenamento e técnicas de gestão de carga, como deslastre de carga, são normalmente usadas para equilibrar a produção de energia de sistemas fotovoltaicos, quando o seu nível de penetração num sistema é relativamente alto [4].

2.5 Energia Eólica

Apesar das vantagens ambientais em termos de emissões de CO_2 , o carácter variável da energia eólica faz com que a sua contribuição para dar resposta às necessidades da ponta dos consumos seja limitada. Isto deve-se ao facto de a sua produção variar com a velocidade do vento, dependendo assim, da zona geográfica e inerentes condições ambientais. A sua natureza não-despachável torna-a limitada perante períodos de maior pressão em termos de consumo.

A produção eólica varia não só sazonalmente entre o Verão e o Inverno [6], mas também em janelas de tempo mais reduzidas (por exemplo, a nível das horas - Figura 3) [6]. Apesar de ser possível prever a densidade de potência eólica para o ano inteiro para uma dada localização, o mesmo não se verifica para a densidade diária e horária. Para complementar a natureza variável da produção eólica, deve-se recorrer a sistemas de produção de energia alternativos, ESS, ou a técnicas de gestão da procura, visando diminuir o consumo quando a produção eólica é menor.

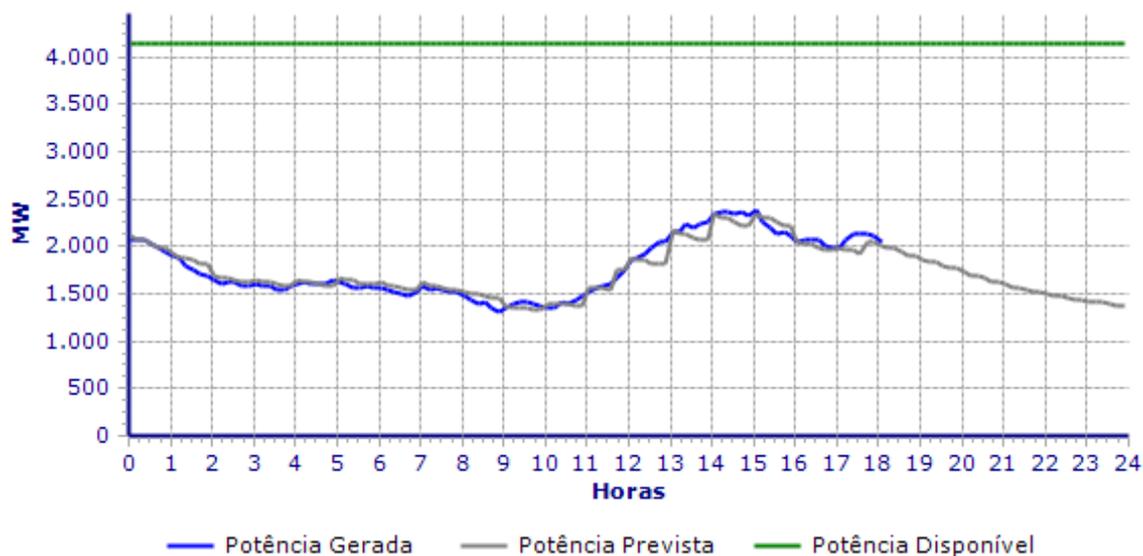


Figura 3 - Diagrama de produção eólica - 11 de fevereiro de 2018

Em 2014, a energia eólica mundial expandiu 16%, o equivalente a 369553 MW [14] e, pelo menos, 83 países usam energia eólica para alimentar as suas redes elétricas [15]. Cerca de 11,4% da energia consumida na EU provém de fontes eólicas [14]. Em 2015, a energia eólica constituía 42,1% da produção elétrica na Dinamarca [16]. Em Portugal, a potência instalada de energia eólica é de 4914 MW [14].

2.6 Centrais Mini-Hídricas

A energia hídrica é caracterizada pela sua elevada eficiência, disponibilidade e, acima de tudo, pela alta capacidade de produção [17]. Estas possuem capacidade de armazenamento e produção, sendo o seu contributo energético elevado.

As Centrais Mini-Hídricas (CMH) assumem uma particular importância para a segurança de abastecimento, constituindo uma tecnologia que beneficia das características da produção de energia elétrica descentralizada, estando assim mais próxima dos locais do consumo, o que possibilita a redução de perdas nas linhas de transmissão. Este tipo de produção de energia elétrica revela-se um dos métodos mais económicos, pois apresenta elevada flexibilidade e fiabilidade de operação, consequência da presença de mecanismos que lhe permitem dar uma resposta imediata a mudanças rápidas do sistema [17]. Para além destas vantagens, o seu tempo de vida útil é elevado, podendo atingir valores superiores a 50 anos, sendo o período de construção relativamente curto (um a dois anos).

No que diz respeito ao potencial hidroelétrico nacional, segundo dados do final de 2015, existem cerca de 6146 MW instalados, sendo 422 MW produzidos a partir de CMH [18].

2.7 Demand Side Management

Demand Side Management (DSM) refere-se a uma larga gama de aplicações do lado da procura. O seu principal objetivo é a alteração de consumo de energia elétrica. As estratégias DSM podem ser usadas não só para alterar o diagrama de carga, mas também para o fornecimento de Serviços de Sistema (SS).

As atividades realizadas no âmbito do condicionamento da procura são a gestão de cargas, ou seja, o corte de pontas, enchimento de vales, desvios de consumos e diagrama de carga flexível, a conservação estratégica e o crescimento estratégico. Estas alterações ao diagrama de carga promovidas pela Gestão da Procura (DR) estão representadas na figura 4.

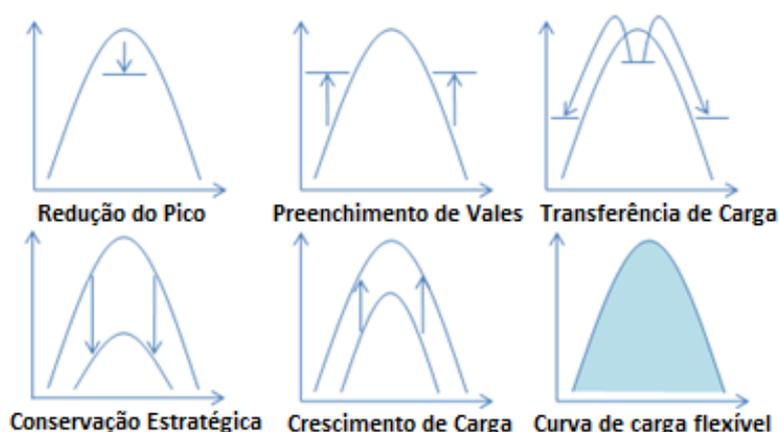


Figura 4 - Alterações ao diagrama de cargas promovidas pela gestão de procura [19]

De acordo com [19], os programas de DSM, caracterizados como ferramentas, podem ser usados num curto espaço de tempo, de forma a resolver situações críticas em que é necessário reduzir a procura, divididos em duas categorias principais: *Price-based Program*, ou seja, programas baseados no período horário e *Incentive-based Program*, conhecidos como programas baseados em incentivos.

Nos programas baseados em incentivos, o utilizador recebe incentivos para modificar o seu padrão de consumo quando solicitado, sendo entre programas contratualizados. O Controlo Direto de Cargas (CDC) aplica-se a cargas onde existe uma capacidade de armazenamento e que podem ser interrompidas, por breves instantes, sem degradar a qualidade do serviço de energia fornecido, como, por exemplo, Ar Condicionado (AC), ou Termoacumuladores (TA) [19].

Os programas baseados no período de horário são caracterizados pela variação do preço de eletricidade ao longo do tempo, de acordo com os custos de geração. O desvio de consumos pode aplicar-se a cargas que não tenham um funcionamento contínuo e possam fornecer o seu serviço a qualquer hora do dia, sem causar desconforto ou inconveniência ao consumidor [19]. A figura 5 representa esquematicamente a estrutura dos Programas de Gestão da Procura [19].

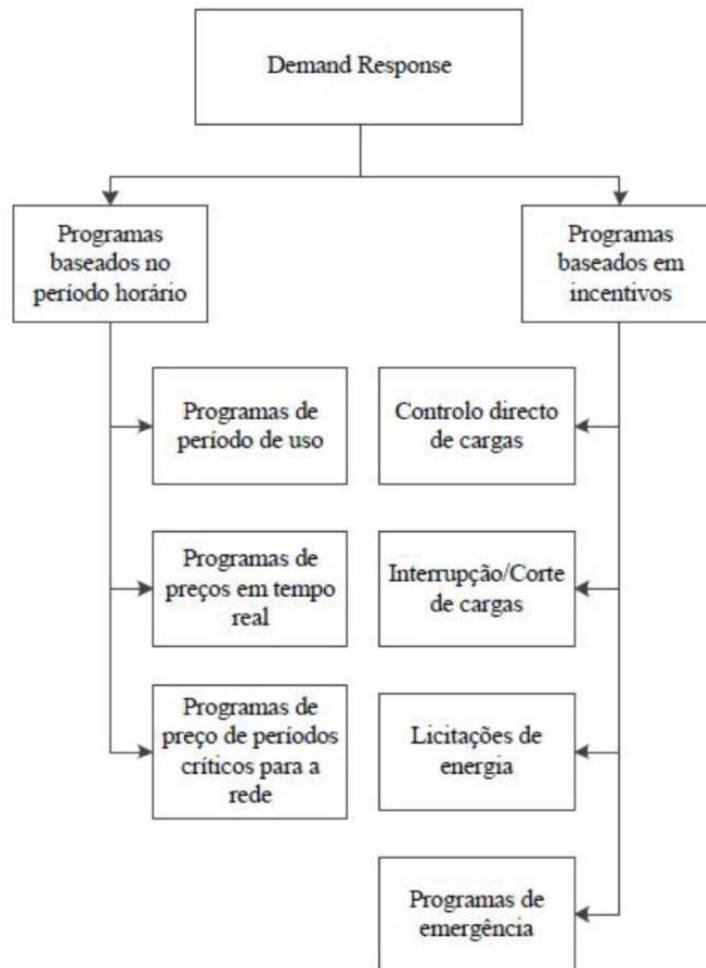


Figura 5 - Programas de Gestão de Procura [19]

Capítulo 3

Definição, estrutura e componentes da Virtual Power Plant

3.1. Definição de Virtual Power Plant

O conceito de VPP abrange várias definições que têm em comum a visão de VPP como uma agregação de diferentes DERs, para operar como uma única central de energia que possui capacidade para controlar as unidades agregadas e gerir os fluxos de energia elétrica, de forma a obter melhor operação do sistema [3]. Em [20], VPP é definido como "Uma representação flexível de um portfólio de recursos energéticos distribuídos que pode ser usado para fazer contratos no mercado grossista e oferecer serviços ao operador do sistema". Em [1], a VPP é apresentada como "Um sistema de informação e comunicação com controlo centralizado sobre uma agregação de DGs, cargas controláveis e dispositivos de armazenamento". Em [21], como "Uma agregação de diferentes tecnologias DER que, quando integrados, possuem flexibilidade e controle similar às grandes centrais convencionais". Em [22], VPP é definido como "Um conjunto de unidades DG, cargas controláveis e sistemas de armazenamento, agregados para operar como uma central de energia única. Os geradores podem usar combustíveis fósseis e fontes de energia renováveis. O coração de uma VPP é um Sistema de Gestão de Energia (EMS) que coordena os fluxos de energia provenientes dos geradores, cargas controláveis e armazenamento". Em [23], a VPP surge como "Uma agregação de diferentes tipos de recursos distribuídos que podem ser dispersos em diferentes pontos de redes de distribuição de média tensão".

Das definições anteriores, surge uma mais abrangente que designa a VPP como "Um conjunto de DGs despacháveis e não despacháveis, de elementos de armazenamento de energia e cargas controláveis acompanhadas de tecnologias de informação e comunicação para formar uma única central hipotética que planeia, monitoriza a operação e coordena os fluxos de energia entre os seus componentes para minimizar os custos de geração, minimizar a produção de gases de efeito de estufa, maximizar os lucros e aumentar o comércio no mercado elétrico" [3].

Além de fornecer um sistema de controlo e gestão de DER, a VPP deve oferecer soluções flexíveis para a sua presença no mercado de energia, em relação aos aspetos de regulamentação, técnicos e socioeconómicos. A VPP também deve lidar com questões e restrições relativas ao seu operador e aos proprietários de DER, bem como a outros participantes. Assim, na situação atual, o

desenvolvimento de uma VPP depende do sucesso de seu operador e dos proprietários de DER em lidar com aspectos críticos interdependentes, como ilustrado na figura 6.

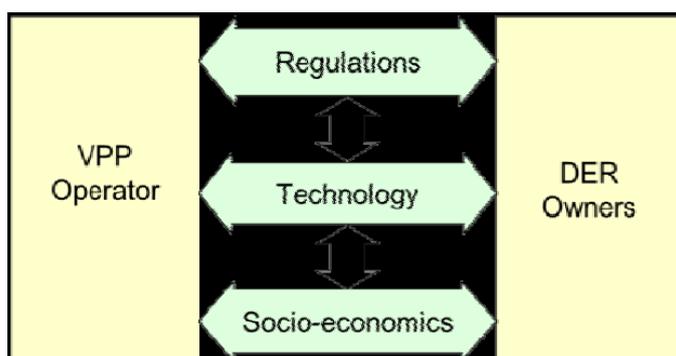


Figura 6 - Aspectos críticos do desenvolvimento de uma VPP [1]

Além disso, diferentes questões precisam de ser respondidas em relação a aspectos técnicos, socioeconômicos e de regulamentação. A seguinte tabela retirada de [2] faz um resumo das questões relevantes e respostas sugeridas para a definição proposta de VPP, no contexto do Sistema de Energia Elétrica Holandês.

Definição (Questões)	Sugestões (Mercado Elétrico Holandês)
Técnicas	
Escala de capacidade de geração instalada por DG e RES	≥ 10 MW (contratos)
Número mínimo de unidades DG e RES	≥ 2 (≥ 10 MW)
Topologia de controlo de VPP	Entrada e saída remota da capacidade contratada
Controlo avançado: qualidade de energia, fluxo de energia, etc.	Mínimo: conforme regulamentado em códigos e padrões
Regulatório e auxiliar	
Operador	Operador comercial, TSO e DSO por contrato
Relação entre operador e proprietário	Contrato bilateral
Autorização do operador para controlar (despachar) unidades	Permissão das autoridades relevantes
Responsável por contratos comerciais e serviços de sistema	Operador
Responsável pela operação e manutenção da unidade	Proprietário (o operador pode oferecer serviços)

Socioeconómico	
Administração financeira de contratos de entrega de energia	Por operador
Monitoramento e medição de energia produzida	DSO e TSO
Custos do ciclo de vida da unidade	Proprietário
Ciclo de vida do sistema de controlo e gestão	Operador
Responsável por riscos financeiros	Operador

Tabela 1 - Questões técnicas, socioeconómicas e de regulamentação de uma VPP

A topologia de controlo para uma VPP pode diferir consoante o seu objetivo [2]. Além disso, as especificações técnicas do sistema de controlo e gestão para assegurar os objetivos dos proprietários de DER, requisitos comerciais e restrições regulatórias também determinarão a topologia de controlo. No entanto, a VPP inicialmente definida e estabelecida não impede o desenvolvimento de uma VPP mais sofisticada no futuro, pelo contrário, pode incentivar ao aumento de DER [2].

A possibilidade de agrupar diversas DER com diferentes proprietários numa VPP, além de permitir otimizar a operação integrada dos diferentes recursos, permite também maximizar a sua utilização em situações (mercados) que até aí lhe estariam vedados, quer devido às suas características técnicas quer devido à falta de capacidade/conhecimento adequado de gestão dos seus proprietários. Um exemplo é a participação da VPP nos mercados grossistas. No ambiente político e económico atual, a VPP terá primeiramente como objetivo o controlo e gestão de potência de um conjunto de unidades DG e RES, enquanto no futuro será possível proporcionar mais serviços de sistema através de uma gestão integrada e profissional de todos os recursos da VPP. Para atender aos desenvolvimentos futuros do mercado de energia, é proposto em [2] que a evolução da VPP ocorra através de três estados de transição.

1 Na primeira fase, muitos desafios técnicos, regulatórios e socioeconómicos devem ser superados principalmente pelo operador da VPP. O objetivo principal da VPP, nesta etapa, é introduzir um sistema de controlo e gestão para despachar potência e energia e normalizar as condições socioeconómicas e regulatórias.

2 O objetivo da segunda etapa deve ser o aperfeiçoamento das possibilidades técnicas da VPP.

3 O sistema de controlo e gestão da VPP típica evoluirá nesta etapa, levando a uma VPP sofisticada com a capacidade de oferecer, entre outros, serviços auxiliares de sistema e de qualidade de energia.

3.2. Modelo e Componentes das VPP

A VPP agrega essencialmente os dois seguintes componentes: recursos energéticos distribuídos (onde se encontram incluídos os ESS e o DSM) e tecnologias de informação e comunicação, como mostrado na Fig. 7.

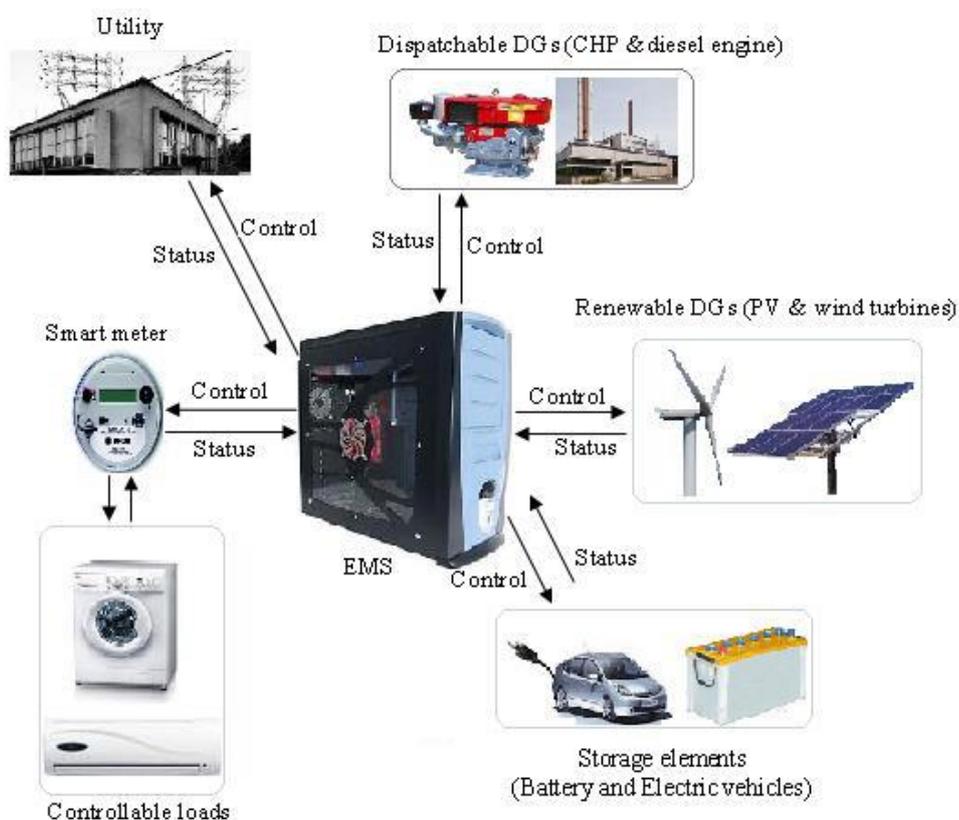


Figura 7 - Modelo Simplificado de VPP [3]

3.2.1. Recursos Energéticos Distribuídos

Como as tecnologias ESS e estratégias de DSM já foram caracterizadas no capítulo 2, neste subcapítulo serão abordadas apenas as diferentes classificações de DGs nas instalações de uma VPP, de acordo com os autores de [3].

a. Tipo de Fonte de Energia Primária:

De acordo com o tipo de fonte de energia primária, as DG podem ser classificadas em duas categorias [3]:

- Geradores que utilizam RES (como geradores eólicos, painéis fotovoltaicos, sistemas solares térmicos e pequenas centrais hidroelétricas).
- Geradores que utilizam fontes que não RES (como geradores a gasóleo, turbinas a gás e células de combustível (FC), entre outros).

b. Capacidade das unidades da DG:

De acordo com as capacidades das unidades das DG, estas podem ser classificadas em duas categorias [3];

- DG de capacidade de pequena escala que deve ser conectada à VPP para obter acesso ao mercado de eletricidade.
- DG de capacidade de médio e grande porte que podem participar individualmente no mercado de eletricidade, mas podem optar por estar conectadas à VPP para obter uma receita estável ótima.

c. Proprietários das unidades da DG:

DGs dentro das instalações do VPP podem ser [3];

- As DGs residenciais, comerciais e de propriedade industrial. Costumam fornecer parte/a totalidade da sua carga nas suas próprias instalações. Podem ser referidas como *Domestic DGs* (DDG).
- DGs de utilidade pública que são usadas para suportar a falta de fornecimento da rede principal. Podem ser denominados *Public DGs* (PDG).
- DGs de empresas comerciais, que visam obter lucros da venda de produção de energia à rede. São denominados *Independent Power Producers DGs* (IPPDG).

d. Natureza operacional das DGs:

A natureza operacional das DG pode ser classificada em dois casos [3]:

- **Natureza não-despachável:** no caso de unidades DG eólicas e fotovoltaicas, a potência de saída não é facilmente controlável, pois depende de um recurso de entrada variável. Para superar esta natureza, este tipo de DG deve estar equipado com um ESS para poder controlar a potência de saída.
- **Natureza despachável:** Trata-se de tecnologias DG cuja potência de saída não depende de um recurso de entrada variável e que, portanto, são capazes de entrar/sair de serviço ou variar a sua operação rapidamente.

Em geral, a VPP deve idealmente incluir cargas controláveis, tecnologias ESS e DG despacháveis para compensar a vulnerabilidade do tipo DG de natureza não despachável.

3.2.2. Sistemas de Informação e Comunicação

O sistema de gestão de energia (EMS) representa o coração do sistema de informação e comunicação. A sua função é gerir a operação de outros componentes da VPP, através de tecnologias de comunicação de maneira bidirecional, conforme mostrado na fig. 7.

O EMS tem as seguintes responsabilidades [3];

- Receber informações sobre o estado de cada elemento dentro da VPP.
- Prever fontes primárias RES e potência de saída.
- Prever e gerir cargas.
- Coordenar o fluxo de energia entre os elementos VPP.
- Controlar o funcionamento de DGs, elementos de armazenamento e cargas controláveis.

O propósito do EMS é alcançar um ou mais dos seguintes objetivos [3]:

- Minimizar custos de geração.
- Minimizar perdas de energia.
- Minimizar gases de efeito de estufa.
- Maximizar o lucro.
- Melhorar o perfil de tensão.
- Melhorar a qualidade de energia.

3.3. Estrutura de uma VPP

Uma VPP pode envolver grande número de DGs, cargas controláveis e elementos de armazenamento sob uma camada de Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC). A VPP é responsável por controlar o fornecimento e gerir o fluxo de energia elétrica não só dentro do seu

agregado, mas também na troca com a rede principal. Além disso, a VPP também pode oferecer serviços de sistema e de qualidade de energia.

Por uma questão de especialização, VPP pode ser subdividida em duas entidades, tal como previsto no programa *FENIX*; *Technical Virtual Power Plant* (TVPP) e *Comercial Virtual Power Plant* (CVPP) [3], que no fundo, representam a componente técnica e a componente comercial da Virtual Power Plant. Estas duas entidades operam juntas para realizar as funções da VPP.

A TVPP é responsável pelo funcionamento correto do DER e dos ESS para gerir o fluxo de energia dentro do grupo da VPP e a execução de serviços auxiliares. A TVPP recebe informações da CVPP sobre as DG contratuais e as cargas controláveis. Esta informação deve incluir:

- A capacidade máxima e o compromisso de cada unidade da DG;
- A previsão de produção e consumo;
- A localização das unidades DG e cargas;
- A capacidade e os locais dos sistemas de armazenamento de energia;
- A estratégia de controlo disponível das cargas controláveis em todos os momentos, durante o dia, de acordo com as obrigações contratuais entre a VPP e as cargas.

Com base nas informações recebidas da CVPP, além da informação detalhada sobre a topologia da rede de distribuição, a TVPP garante que o sistema de energia seja operado de forma otimizada e segura, levando em conta as restrições físicas e potenciais serviços oferecidos pela VPP. Nos trabalhos [24] e [25] são definidas as seguintes funções da TVPP:

- Gerir o sistema local para operadores de sistemas de distribuição (DSO);
- Fornecer equilíbrio, gestão da rede e execução de serviços auxiliares.
- Fornecer informação e controlo sob os diferentes DERs na rede de distribuição ao operador do sistema de transmissão (TSO), permitindo que a DG e a procura contribuam para as atividades de gestão do sistema de transmissão.
- Cuidar da operação dos DER de acordo com os requisitos obtidos da CVPP e informações sobre o estado do sistema.
- Fazer a gestão de ativos - suportada por dados estatísticos.
- Autoidentificar as componentes do sistema.
- Determinar a localização da falha.
- Facilitar a manutenção.
- Otimizar o portfólio de projetos e análise estatística.

Uma CVPP considera os DERs como entidades comerciais que podem disponibilizar uma quantidade de energia a um determinado preço, otimizando a utilização económica do portfólio da VPP para o mercado elétrico [3]. A CVPP realiza contratos bilaterais com as unidades da DG e os

clientes. Para a realização de estudos técnicos, a informação desses contratos é enviada à TVPP, para que seja analisada a quantidade de energia contratada [3]. As unidades DG de pequena escala não podem participar individualmente no mercado da eletricidade. Portanto, CVPP permite agregar estas unidades, tornando possível que estas participem como um conjunto no mercado de eletricidade. As funcionalidades CVPP são resumidas da seguinte forma em [21] e [25]:

- Programação da produção com base nas necessidades previstas dos consumidores.
- Negociação no mercado grossista de eletricidade.
- Balanço e/ou negociação de Portefólios.
- Prestação de serviços ao operador do sistema.
- Apresentação das características, custos e manutenção do DERs.
- Previsão de produção e consumo com base na previsão do tempo e dos diagramas de carga.
- Construção de ofertas de DER para a participação no mercado elétrico.
- Programação de geração e otimização diária.
- Vender energia DER no mercado de eletricidade.

A operação dos DER em termos técnicos é gerida pela TVPP. Assim, em termos de camadas de serviço, a TVPP pertence a uma camada inferior que fornece serviços à CVPP, como uma camada mais alta [25].

3.5. Vantagens e desvantagens desta forma de organização e produção de eletricidade

Podemos indicar as seguintes vantagens, em relação a esta forma de organização da produção de eletricidade [26]:

- Permite contornar a imprevisibilidade inerente às fontes renováveis;
- Possibilita uma maior autonomia e sustentabilidade da rede, otimizando-a e garantindo uma maior eficiência operacional;
- Permite lidar melhor com picos de consumo/disponibilidade, e causa menos congestionamentos energéticos, o que acaba por se traduzir em menores custos de manutenção e expansão da rede elétrica;
- Traduz-se no ganho de dimensão, que permite otimizar a participação no mercado, o que não aconteceria se cada um dos donos dos DERs tentasse participar por si no mercado, já que é exigida uma dimensão mínima;

No que respeita às desvantagens, são de destacar [26]:

- Os elevados investimentos iniciais e a dificuldade em obter retorno (já que o custo de produção da “eletricidade verde” é mais elevado, mas a VPP pode ser vantajosa neste ponto e permitir a redução do custo da energia, a médio e longo prazo);
- O “*risk-aversion of DER owners*”, ou seja, a incerteza que se gera, visto que os estudos sobre instalações de centrais deste tipo têm de ter em conta o facto de os produtores não serem (todos) profissionais. A falta de informação e conhecimento dos donos dos DER, ou a sua aversão à venda, pode condicionar a atividade da VPP.

Quanto aos desafios envolvidos, estes são vários e é ainda necessário muito trabalho para que as VPPs possam assumir maior importância nos mercados. Desde logo, a principal tarefa, em países como o nosso, passa pela educação cívica e ambiental da população, que ainda não é sensível a muitas das questões ambientais e de eficiência energética, preocupando-se apenas com o preço a pagar. Por outro lado, são necessários apoios estatais, para que se possam desenvolver novos projetos. Finalmente, e mais importante, a criação de legislação e regulação deste sistema, pois esta falha legislativa causa incerteza, que não pode ser colmatada apenas com um bom aconselhamento jurídico [26].

Capítulo 4

VPP – Exemplos de casos reais e de estudo

Neste capítulo, serão descritos vários projetos ou estudos relacionados com Virtual Power Plants, dando-se especial ênfase àqueles que demonstram as vantagens da gestão agregada de diferentes DERs, seja para maximizar lucros, reduzir custos ou colmatar excessos de produção/consumo, e as respetivas ferramentas usadas para a gestão destes mesmos recursos.

Os trabalhos 4.1, 4.2 e 4.3 permitem observar o comportamento dos diferentes DERs, quando integrados numa VPP. Em 4.4 e 4.5 são relatados casos reais da implementação de VPP. O trabalho descrito em 4.6 propõe um modelo de VPP baseado no mercado, como mecanismo para permitir que as unidades DER individuais participem no mercado. O estudo descrito em 4.7 aborda a participação de uma VPP num mercado conjunto de energia e serviços auxiliares.

4.1. A Configurable VPP With Managed Energy Services: A Malmo Western Harbour Case

O artigo [27] descreve uma μ VPP estabelecida e operada com sucesso, durante ano e meio em Malmo, Suécia. Este projeto surge da colaboração entre a Universidade de Birmingham e as empresas E.ON UK e E.ON Suécia, para implementar um sistema pré-comercial de uma μ VPP com todas as interfaces necessárias para a agregação vertical numa VPP maior. A μ VPP representa uma comunidade residencial típica de oito apartamentos e é composta por ESS, micro-geração PV, cargas controláveis (CL), tais como EVs e Bombas de calor elétricas (eHeat Pump) e HEMS genéricos. Cada apartamento contém o seu próprio sistema PV e cada ESS é responsável por otimizar o fluxo de energia entre quatro apartamentos conectados entre si. O HEMS hospedado num PC incorporado (EPC) conecta-se a todos os dispositivos geridos via ZigBee, para obter dados de monitorização de microgeração e consumo, além de enviar comandos de controlo para os dispositivos. Para o controlo e otimização do ESS e das CL's é usado um algoritmo Fuzzy Logic Control (FLC).

Neste artigo, identificam-se, essencialmente, três contributos: 1. o nível de implementação da infraestrutura de hardware e software atinge o padrão industrial e define esta μ VPP como um produto pré-comercial, em vez de um protótipo de laboratório. 2. Os múltiplos serviços fornecidos

por esta μ VPP demonstram que é possível explorar plenamente diferentes DER de forma a otimizar o uso de energia e capital. 3. O modelo de negócios detalhado neste artigo explora o cenário em que ocorre uma diminuição do preço de custo dos ESS nos anos seguintes, e comprova a viabilidade da promoção em massa desta tecnologia no mercado, num futuro próximo.

O modelo de negócios da μ VPP descrita no artigo em questão é elaborado de forma a promover transações internas de energia entre apartamentos ou entre apartamentos e o ESS.

Uma empresa de serviços públicos age como representante da μ VPP e investe o capital inicial para o seu software e hardware. A mesma empresa está também incumbida de pagar ao utilizador final, um preço maior do que o da tarifa feed-in para que este contribua com a energia excedente (energia restante produzida pela geração de PV, após satisfação do consumo elétrico do apartamento) para ser armazenada no ESS ou ser usada imediatamente por outro apartamento. Para incentivar a ação de carga do ESS, a empresa de serviços públicos oferece também receita ao utilizador final, se este importar mais do que o seu consumo, durante o período de preço de retalho baixo, recebendo assim uma receita pelos kWh extra, importados no preço atual do mercado retalhista. Por sua vez, o utilizador final compra eletricidade do ESS a um preço mais barato do que o preço no mercado retalhista.

Assim, a empresa de serviços públicos, ao pagar pelo excedente de energia do utilizador final um preço maior do que o da tarifa feed-in, e ao cobrar um preço menor do que o do mercado retalhista pela energia fornecida pelo ESS, está a oferecer incentivos para que os utilizadores finais envolvam negociações com o ESS, ao invés de o fazerem com a rede.

Para análise de resultados são discutidos 4 casos:

- 1. Maxself Service:** Considerando a tarifa feed-in reduzida, este caso visa utilizar a microgeração local da propriedade, tanto quanto possível, reduzindo assim a energia importada da rede. As CLs não estão ativadas neste serviço.
- 2. Dynamic Tariff Service:** Este caso utiliza a tarifa dinâmica da rede para economizar na fatura elétrica, carregando o ESS através da energia importada da rede, quando esta é mais barata. A energia armazenada pelos ESS é posteriormente utilizada para satisfazer o consumo dos apartamentos, durante o período de preço mais elevado. As CLs não estão ativadas, neste serviço.
- 3. Dynamic Tariff With Controllable Load:** Com base no caso 2, o caso 3 adiciona a característica de programar as CLs de acordo com a tarifa dinâmica de rede, atingindo assim novas reduções nas contas de eletricidade.
- 4. Dynamic Tariff With Load Shedding:** Com base no caso 3, o Serviço 4 adiciona a característica de limitação de carga às CL, durante o período de consumo interno elevado.

Para a análise de resultados, o preço da eletricidade no mercado retalhista em tempo real é extraído dos dados de preços do Nord Pool 2015, a tarifa feed-in e a taxa mensal de uso da rede são

fornecidas pela E.ON Suécia. O investimento inicial atual para a instalação do ESS é alto, mas prevê-se que diminua 20-30% ao ano e atinja um nível comercial em 2020 [27]. No artigo analisado, dois períodos de retorno de investimento são apresentados: o *payback period* com base no investimento de capital atual do ESS; e o *shortened payback period*, que representa o período de retorno do investimento do capital do ESS, num cenário em que o seu custo é 33% mais baixo do que o custo original, de forma a analisar o tempo de retorno de investimento no futuro, onde esta tecnologia já existe em massa no mercado. A taxa de aluguer da μ VPP é fixada em 40% das economias finais da fatura elétrica do lado do cliente, garantindo assim que a maior percentagem da receita chegue ao utilizador final, enquanto a empresa de serviços públicos recebe ainda receitas consideráveis, para recuperar o capital investido. Todos os dados da operação VPP, incluindo a geração de PV, consumo e uso de CLs de janeiro de 2015 a dezembro de 2015, são registados pelo smart meter no local. O ESS do sistema possui uma capacidade de 6kWh com uma vida estimada de 4500 ciclos e a capacidade da bateria EV é 4.4kWh.

Para análise económica, são exibidas as economias totais de energia elétrica para os utilizadores finais, os períodos de retorno do investimento de capital do ESS "*payback period*" e "*shortened payback period*" e a vida útil do ESS. As economias são derivadas através da criação de um cenário de referência chamado "Nenhum serviço", onde cada apartamento possui apenas uma geração PV, mas não possui ESS ou outras infraestruturas da μ VPP. Diferentes dimensões de ESS estão incluídas na análise, para determinar se vale a pena redimensionar a sua capacidade.

Após análise dos casos descritos, conclui-se que o caso 4, com a exploração completa dos potenciais recursos, é aquele que obtém as maiores economias na fatura elétrica. Os utilizadores finais no Serviço 4 pagam até 11% menos, quando comparado com os casos anteriores. Com o uso deste serviço, uma μ VPP com 3.6kWh de ESS é já comercialmente viável, apesar do alto investimento inicial atual, uma vez que o *payback period* foi reduzido para 10 anos. Com o *shortened payback period*, este investimento inicial pode ser recuperado num curto período de 4 a 7 anos, dependendo do tamanho do ESS.

4.2. Scheduling of a Virtual Power Plant with High Penetration of Distributed Generation

A coordenação dos numerosos e diversos DER que podem ser agregados numa VPP é uma tarefa complexa, com inúmeras soluções, que exige um planeamento e programação sofisticados. Em [28], foi utilizado um algoritmo genético de coevolução cooperativa para um alocamento de vários DERs no mercado diário, de forma a otimizar a satisfação da procura elétrica e térmica de uma

VPP que consiste em geradores distribuídos, incluindo CHPs, centrais de energia solar, armazenamento de energia e cargas despacháveis. O algoritmo permite manipular uma VPP com diversos recursos e fornece um suporte de decisão eficaz para o operador VPP.

Neste estudo [28], a carga elétrica é satisfeita por cinco unidades DG e duas unidades ES. A redução de carga elétrica pode ser feita através de três cargas interrompíveis. A carga térmica, por outro lado, é fornecida por duas unidades de CHP.

O problema de programação da VPP é modelado e simulado, usando MATLAB.

A simulação cobre os seguintes casos de teste. No **caso 1**, todas as unidades DER estão em operação; no **caso 2**, as unidades DG e ES mais baratas não funcionam e as taxas de compensação de interrupção de carga são aumentadas; no **caso 3**, apenas os CHPs e os ESS estão em operação e o sistema está sujeito a novos preços de ToU (Time of Use); no **caso 4**, somente as DGs estão em operação, há uma mudança no preço das DG (novas curvas de custo) e o sistema é sujeito a novos requisitos de procura de calor.

Os resultados dos casos acima descritos demonstram que o algoritmo consegue adaptar-se a diferentes cenários de forma bastante eficiente. Assim, o algoritmo dá prioridade à produção das DGs e ESSs com menor custo de funcionamento inerentes. Como seria de esperar, os ESSs são carregados durante a altura em que os preços de venda de eletricidade são baixos, de forma a estar preparados para descarregar nos períodos de pico, onde os preços do mercado elétrico são altos. As cargas interrompíveis funcionam de forma bastante semelhante ao comportamento dos ESS. Durante os momentos em que os preços da eletricidade do mercado são altos e a procura de carga está no seu pico, o algoritmo dá prioridade à limitação de cargas, de modo a evitar mais despesas, ao invés de ativar as DG ou a descarga dos ESS para fornecer o pico da procura.

O uso de um algoritmo genético de coevolução cooperativa para gerir e alocar diversos DER permite criar estratégias muito complexas, para a maximização do lucro da VPP na presença de mudanças de preços, mudanças de curvas de carga e de procura de calor, levando em consideração várias restrições técnicas. Assim, a gestão agregada de DER com este tipo de algoritmo numa VPP permite uma integração mais apta da mesma no SEE e, conseqüentemente, aumenta a fiabilidade do sistema perante as incertezas da produção renovável, bem como perante variações repentinas de consumo.

4.3. Operation of a Datacenter as a Virtual Power Plant

Em [29], é analisado o uso dos recursos de um Datacenter para a implementação de uma VPP, com o objetivo de minimizar o custo de geração.

A infraestrutura de energia dos Datacenters é projetada com redundância significativa e com grandes sistemas de armazenamento, para garantir uma fonte de energia fiável. Isso inclui uma grande variedade de recursos energéticos, como geradores RE, sistemas de armazenamento de energia, estratégias de DSM e geradores de reserva para utilização, quando a rede não está disponível [29]. Normalmente, os Datacenters usam energia da rede. Portanto, o banco de baterias e o gerador de reserva permanecem inativos. Com um esquema de gestão de energia eficaz, as fontes de energia renováveis e os recursos disponíveis no Datacenter podem ser agregados num sistema maior, que funciona como uma central única, uma VPP [29].

A flexibilidade na operação dos Datacenters pode fornecer características semelhantes às das centrais de energia. A potência de saída necessária pode ser ajustada, usando recursos internos e abordagens de gestão do lado da procura. Por exemplo, num determinado momento, o Datacenter pode suportar a carga e injetar energia na rede, através de geradores internos e fontes renováveis. Ao mesmo tempo, pode consumir energia da rede e comportar-se como uma carga.

Este estudo baseia-se numa estrutura de Datacenter de 100MW, localizada no Texas. É constituída por uma central solar de 50 MW, uma central eólica de 50 MW, geradores a gás natural e uma bateria de chumbo-ácido de 192 MWh (para reserva de 1 hora). Os geradores a gás natural permanecem inativos e são usados apenas como fontes de reserva, quando necessário. A função de custo e outras características dos geradores a gás natural estão descritas em [29]. A decomposição da carga do Datacenter baseia-se em dados fornecidos pelo Laboratório Nacional Lawrence Berkeley (LBNL).

Para executar o Datacenter como uma VPP, é necessária uma arquitetura de controlo avançada. A unidade de controlo monitoriza o estado atual das fontes e carga e gere os recursos agregados através do TIC, para despachar e otimizar o seu funcionamento. A operação do VPP baseia-se principalmente no sistema de software. A gestão de energia é descrita nas seguintes etapas:

A. Recolha de dados de geração/procura e alocação de recursos: O primeiro passo do EMS do Datacenter como VPP é a recolha dos dados da geração e da procura. Os dados recolhidos são então enviados para o módulo de previsão do Datacenter. O módulo de previsão usa uma técnica avançada de previsão, para calcular os dados de radiação solar e de intensidade do vento do próximo dia, bem como da procura. Esses dados são transferidos para o módulo de alocação de recursos e previsão de custos no sistema EMS, através do canal de comunicação. Ao usar os dados previstos, calcula-se a carga líquida, que resulta da carga do Datacenter menos geração PV e geração eólica. Obtém-se assim a quantidade de excesso de energia produzida, a partir de energia renovável ou da quantidade de energia necessária para fornecer à carga do Datacenter. Ao usar essas informações, podemos determinar o intervalo de operação da VPP, que poderá funcionar como carga ou como fornecedor de energia.

B. Operador do sistema de rede: O operador do sistema de rede é o mediador que permitirá que a VPP participe no mercado de energia. O operador VPP envia as informações de produção, consumo da VPP e dos seus consequentes custos por hora associados. Por sua vez, o operador da rede envia a cada hora informações com os requisitos da rede. Neste artigo, assume-se que o operador da rede está interessado em reduzir o pico de carga na área local, com ajuda da VPP do Datacenter. Para este cenário, assume-se que a VPP fornece energia durante esses períodos e consome, durante as horas fora do horário de pico.

Caso se verifique uma variação de geração de energia fotovoltaica e eólica, durante a operação em tempo real, o intervalo de operação da VPP mudará. Essa variação pode ser compensada com os ESS. Assim, a energia gerada em excesso pode ser armazenada, ou a energia armazenada pode ser usada para compensar uma redução de energia fotovoltaica e eólica gerada.

Dois casos foram utilizados para analisar a operação VPP. No **caso 1**, a geração e consumo da VPP estão sempre dentro do intervalo previsto. No **caso 2**, devido à variação da geração de energia solar e eólica, a procura ultrapassa o alcance da VPP e, conseqüentemente, o seu intervalo de operações é alterado.

C. Despacho em tempo real: O módulo de despacho em tempo real envia os recursos de acordo com o combinado com o operador de sistema, e executa as ações necessárias para resolver a incerteza. Se ocorrerem desvios imprevistos de produção/consumo, um sinal corretivo imediato é enviado para o operador da VPP, e esse desvio é compensado pelo banco de bateria operacional ou por energia fornecida por outro gerador.

Os resultados mostram que a VPP não serve apenas a carga do Datacenter, mas também contribui para a rede, vendendo energia a partir de recursos subutilizados. O valor do lucro obtido pelo proprietário da VPP é calculado, usando o preço de venda atual da energia da rede para a área do Texas. Para este estudo, o preço de venda foi o preço da hora máxima, porque a VPP é usada principalmente para reduzir o pico.

No estudo em questão conclui-se que a operação integrada de diversos DER permite uma maior flexibilidade de gestão do SEE e a minimização dos custos de produção. Nos períodos do dia em que a geração de RE é maior que a procura, é possível armazenar energia elétrica nos ESS para posterior utilização nas horas de pico. Os geradores a gás natural, por sua vez, podem entrar em serviço sempre que a geração de RE não for suficiente, para colmatar totalmente a carga. É também possível usar toda a energia produzida por RE's para venda no mercado, satisfazendo a carga do Datacenter apenas com energia armazenada e com os geradores a gás natural, caso este processo se demonstre mais lucrativo do que usar os geradores de gás natural apenas como reserva.

Considerando sempre o modelo de otimização do uso dos ESS, de forma a poupar a vida útil das baterias e nos custos inerentes à sua utilização, é possível usar os ESS não só para fornecer energia

elétrica ao sistema, sempre que a procura não puder ser satisfeita pelo conjunto de geradores RE e de gás natural, mas também para vender energia à rede, nos períodos em que a mesma é mais cara.

4.4. RWE Virtual Power Plant na Alemanha

Este estudo descreve uma estrutura VPP em funcionamento na Alemanha [30], [31] e [32]. A RWE, uma importante empresa de energia, em parceria com a Siemens, executou um projeto VPP que procurava integrar centrais CHP, eólica e biomassa, visando que a capacidade de geração combinada participasse no mercado europeu de troca de energia e no fornecimento de serviços auxiliares à rede.

O departamento comercial da RWE Energy assumiu as funções de agregação, enquanto a Siemens forneceu o conhecimento e tecnologia IT com soluções inovadoras. Uma dessas características é o *Distributed Energy Management System* (DEMS) que, combinado com controladores de geração local, monitoriza e controla centralmente a produção em cada unidade, com informações do lado da procura, como preços de eletricidade e requisitos de carga.

Numa etapa primária (2008), nove unidades hidroelétricas em Sauerland, Renânia do Norte-Vestefália, com uma capacidade de produção global de 8,6 MW, constituíram a VPP inicial. Em 2015, com a introdução de novas centrais dispersas em toda a Alemanha, a capacidade total representava cerca de 200 MW.

O estudo realça a importância do sistema de comunicação para o funcionamento de uma VPP, uma vez que os mercados de troca de energia exigem informações em tempo quase real sobre as estimativas de produção. Além disso, uma capacidade mínima de 500 kW foi indicada como o limite para a atividade económica bem-sucedida de estruturas semelhantes, devido a custos de investimento iniciais significativos. Outro aspeto importante para a operação foi a relação com os clientes, que precisa ser transparente e confiável.

4.5. A Ilha Dinamarquesa de Bornholm

O relatório [33] refere outro exemplo de VPP em funcionamento. Neste caso, cerca de 2000 domicílios em Bornholm, Dinamarca, estão conectados à rede de forma a permitir a redução do uso de energia durante as cargas de pico, com o comércio de capacidade não utilizada a preços de mercado. Com uma grande parcela da energia eólica na ilha, este sistema revela-se de grande importância.

Em resposta aos picos nos preços da eletricidade e, de acordo com condições previamente definidas, os domicílios equipados com controladores de gateway desligam automaticamente os aparelhos ou ajustam o termostato. A capacidade de energia não utilizada é então agregada e vendida aos consumidores necessitados, permitindo reduções de cerca de 20% nas cargas máximas. A alternativa para cumprir essa procura seria aumentar a produção, o que teria custos económicos e ambientais significativos.

Assim como no trabalho analisado em 4.4, é indicada a importância do sistema de comunicação entre gestão central e controlo local de produção, já que muitos equipamentos de DERs parecem não ter sido projetados para interagir com tecnologia de informação moderna (IT). Também é sugerido que, quando uma infraestrutura de comunicação capaz é definida, muito mais pode ser feito em termos de controlo operacional e pode, até mesmo, moldar o comportamento energético dos clientes.

4.6. A Market-Based Virtual Power Plant

No artigo apresentado em [34], propõe-se um modelo de VPP baseado no mercado, como mecanismo para permitir que as unidades DER individuais participem nos mercados eléctricos. De acordo com o que se descreve, cada pequeno produtor tem acesso a atividades de mercado, mas apenas para vender a geração que excede o seu consumo individual.

Dois cenários diferentes de operação de mercado são apresentados. O primeiro é um cenário *general bidding*, em que as unidades DER enviam ofertas de geração através da VPP, de acordo com as previsões de preços para a sessão de mercado em questão. Um segundo cenário é o *price signal control*, onde o operador VPP envia uma série de sinais de preços aos quais os produtores individuais respondem sobre a disponibilidade para vender, até ser atingindo um valor final.

Estes dois sistemas operacionais são testados num ambiente simulado que contém quatro casas equipadas com unidades CHP idênticas que funcionam com gás, cada uma com diferentes perfis de carga diária de eletricidade. É fornecida uma estimativa do preço de mercado diário, bem como o preço pelo qual as famílias recebem gás e energia. É assumido um sistema de comunicação sem falhas.

Como resultado, ambos os cenários de mercado produzem resultados semelhantes em relação ao funcionamento da VPP. Os sócios só parecem dispostos a fornecer a sua energia excedente, quando o preço do mercado é igual ao preço da eletricidade comprada da rede e está bem acima do preço do gás necessário para executar a unidade CHP.

4.7. Bidding Strategy of Virtual Power Plant for Participating in Energy and Spinning Reserves Markets.

O estudo descrito em [35] e [36] aborda a participação de uma VPP num mercado conjunto de energia e serviços auxiliares. Um modelo é proposto para projetar a estratégia de licitação, considerando vários tipos de restrições, como restrições individuais dos DER, o equilíbrio entre geração e procura, e as limitações da rede de distribuição.

Neste documento, a VPP é composta por geradores distribuídos, unidades capazes de armazenamento de energia e consumidores finais com cargas controláveis. Uma forma de controlo centralizado é assumida onde a VPP administra todas as operações de mercado, sendo responsável por todas as funções técnicas e económicas em toda a estrutura, com o objetivo de maximizar o lucro.

Com estimativas de cargas e preços de mercado com base em dados históricos, taxas de retalho para consumidores finais e funções de custo de produção e armazenamento, a VPP pode colocar as suas ofertas em ambos os mercados. Analisando todas as restrições e condições iniciais, um problema de otimização é formulado e a solução, baseada num algoritmo genético, é testada em diferentes cenários, em relação à participação em um ou ambos os mercados e vários níveis de preços de mercado.

Verificou-se que, para ser lucrativa, a VPP deve atuar no mercado de energia quer como produtor quer como consumidor. Quando o preço de mercado da energia está acima dos custos de produção ou acima da taxa de retalho, a energia é vendida ao mercado, por geração direta ou redução de carga, respetivamente. Quando os preços do mercado são baixos, a VPP pode comprar energia e vendê-la mais cara aos consumidores finais. Quanto à atividade no mercado de capacidade de reserva, os autores descobriram que era independente do papel assumido no mercado de energia.

4.8. Aspetos a ter em consideração

Depois de analisar este conjunto de estudos no campo da VPP, vários aspetos importantes foram concluídos:

- **Gestão eficiente dos diferentes DERs:** A coordenação dos numerosos e diversos DER que podem ser agregados numa VPP é uma tarefa complexa com inúmeras soluções que exige um planeamento e programação sofisticados. É portanto imperativo não só conhecer as características dos diferentes DER a integrar na VPP, como escolher a ferramenta que permita uma gestão eficiente dos mesmos.

- **Importância vital dos sistemas de comunicação:** a troca de informações entre unidades de produção, cargas controláveis e administração VPP é crucial para toda a operação.
- **Relacionamento com os proprietários domésticos ou proprietários de DGs:** o contacto com os clientes deve ser claro e transparente para que o projeto seja executado corretamente, desde os horários de produção até à permissão para controlar cargas.
- **O preço do mercado é importante para o sucesso do projeto:** as unidades de produção individuais beneficiam, a maior parte do tempo, da agregação numa VPP, mas estão altamente dependentes do preço pelo qual vendem energia. Os custos de produção, investimento e as tarifas *feed-in* são obstáculos ao sucesso, na atividade de mercado.
- **Controlo centralizado ou distribuído da VPP:** dependendo da situação, uma forma diferente de controlo da VPP pode ser aconselhada.
- **Limite de capacidade de geração para viabilidade económica:** há sempre uma quantidade mínima de energia disponível para que o projeto VPP seja bem-sucedido financeiramente, dependendo das condições gerais de cada projeto.

Capítulo 5

Algoritmo desenvolvido

Para avaliar as vantagens da gestão integrada de DERs numa VPP, com o objetivo de maximização de lucro no mercado diário, foi desenvolvido um Algoritmo Genético (AG), visando otimizar a gestão de um conjunto de recursos, composto por geração eólica, fotovoltaica e uma bateria de lítio. A escolha desta estratégia de otimização deve-se à natureza combinatória e ao elevado número de possíveis soluções do problema proposto. Estas decisões são influenciadas pela variação do preço no mercado diário, pela natureza intermitente da geração de energia renovável eólica e fotovoltaica, pela prioridade de preservar a bateria, respeitando a energia de manutenção, e pela decisão de vender ou armazenar energia.

Um algoritmo evolutivo é baseado nos pressupostos apresentados por Darwin, em que o processo de evolução natural recorre a dois mecanismos básicos: a seleção e a reprodução com variação [37]. A formulação, no início do século XX, da teoria genética da hereditariedade permitiu integrar o conceito de gene no processo evolutivo. A variabilidade das espécies passa a ser explicada, através da aplicação de um conjunto de operadores genéticos, como o operador de recombinação ou de mutação [37].

Adotando este pressuposto, o algoritmo desenvolvido começa por criar e analisar um conjunto de elementos do espaço de procura (potenciais soluções para o problema). Este conjunto, usualmente denominado população, é composto por 100 membros. De seguida, um processo de seleção probabilístico é utilizado para determinar os membros da população mais aptos para ser progenitores. Finalmente, operadores de transformação, designados operadores genéticos, atuam sobre os elementos selecionados para introduzir diversidade e evitar que a solução fique presa em ótimos locais de fraca qualidade [37].

5.1. Descrição das diferentes etapas do algoritmo

No âmbito do trabalho desenvolvido nesta dissertação, foi criado um modelo de simulação computacional em ambiente Matlab®. Este modelo permite receber um ficheiro no formato Excel, contendo os dados de preço do mercado, preço de venda de energia, a energia na bateria, potência de geração eólica e fotovoltaica ao longo do dia, distribuídos por intervalos à escolha do utilizador.

Neste capítulo, é apresentado o algoritmo desenvolvido, seguido da explicação detalhada do seu funcionamento. Na Figura 8, pode observar-se o diagrama de blocos que representa o funcionamento e diferentes etapas do algoritmo.

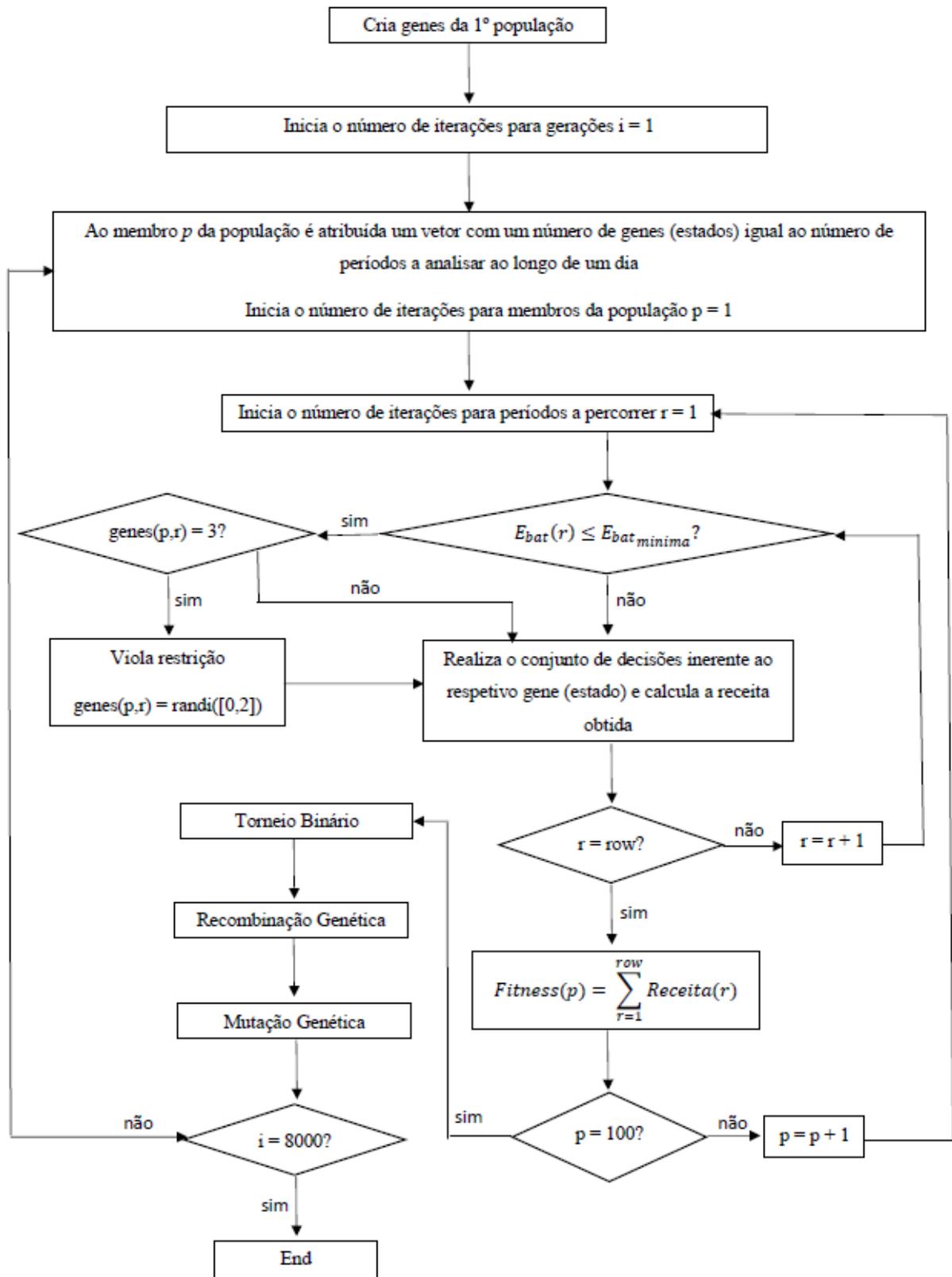


Figura 8 - Diagrama de Blocos do Algoritmo Desenvolvido

5.1.1. Aptidão

Inicialmente o algoritmo recebe um ficheiro no formato Excel, com os vários dados de entrada. Os dados de potência eólica e fotovoltaica, bem como os diferentes preços do mercado e de venda de energia ao longo do dia são guardados nos respetivos vetores. A equação

$$x = \frac{row}{24} (1)$$

permite dividir a potência por x , para obter a energia correspondente, e a multiplicar x pela energia para que esta seja convertida em potência. O número total de linhas (períodos de tempo) do ficheiro Excel é representado por row .

De seguida, o algoritmo cria uma matriz de 100 linhas e row colunas, onde estão guardados os genes da primeira geração. A representação genética é feita por variáveis inteiras (estados) no intervalo de 0 a 3. Cada estado representa um conjunto de possíveis decisões descritas na tabela seguinte:

Estado	Conjunto de decisões	Estado da Bateria
0	<ul style="list-style-type: none">• Vende produção eólica e fotovoltaica• Não compra energia à rede elétrica	<ul style="list-style-type: none">• Bateria Inativa
1	<ul style="list-style-type: none">• Armazena produção eólica e fotovoltaica• Não compra energia à rede elétrica	<ul style="list-style-type: none">• Bateria a carregar
2	<ul style="list-style-type: none">• Armazena produção eólica e fotovoltaica• Compra energia à rede elétrica	<ul style="list-style-type: none">• Bateria a carregar
3	<ul style="list-style-type: none">• Vende produção eólica e fotovoltaica• Não compra energia à rede elétrica.• Energia da bateria é vendida	<ul style="list-style-type: none">• Bateria a descarregar

Tabela 2 - Representação das possíveis decisões do algoritmo

Começa então o processo de aptidão. O número de iterações (gerações) é de 8000, o número de membros da população é de 100. Estes valores foram escolhidos após exaustivos testes, tendo sido testadas até 10000 iterações e entre 10 a 400 membros da população.

A cada membro da população é atribuído um vetor de row genes. A cada período de tempo (iteração de r) corresponde um possível conjunto de decisões (estado). No início de cada período, o algoritmo verifica se a energia na bateria é menor ou igual à energia mínima (energia de manutenção que permite minimizar a degradação dos componentes químicos ao longo dos ciclos). Caso isto se verifique, e o gene do respetivo período seja o estado 3, o algoritmo altera o gene para um estado diferente de 3, de forma a preservar a bateria, e só de seguida é que vai analisar a decisão

correspondente a este novo estado. De seguida, os 4 possíveis estados e as variáveis utilizados nas fórmulas que os descrevem são enumerados.

- **Receita**(r) representa a receita obtida no período r ;
- **Preço**_{venda}(r) representa o preço de venda de energia no mercado diário. O seu valor é 90% do valor do preço de compra no mercado;
- **P_{eolica}**(r) representa o nível de potência eólica disponível no instante r
- **P_{fotovoltaica}**(r) representa o nível de potência fotovoltaica disponível no instante r ;
- **E_{bat}**(r) representa a energia disponível na bateria no instante r ;
- **E_{bat_nominal}** representa o valor de energia nominal da bateria. Caso a soma entre o valor disponível pela bateria no instante $r-1$ mais a produção da VPP no instante r seja superior a **E_{bat_nominal}**, a bateria é carregada com o valor de energia necessário para atingir o valor de **E_{bat_nominal}**, e o excedente de energia é vendido;
- **P_{bat_nominal}** representa o valor de potência nominal da bateria. Por motivos de simplificação, este é também o valor nominal de potência de descarga ou carga da bateria. Caso o valor de potência disponível pela produção da VPP no instante r seja maior que **P_{bat_nominal}**, o valor de energia correspondente ao excedente de potência é vendido;
- **P_{bat}**(r) representa a potência de carga ou descarga da bateria no instante r .
- **n** representa a eficiência da bateria;
- **E_{impor}**(r) representa o valor de energia importado da rede no instante r ;
- **Preço**(r) representa o preço de energia no mercado diário no instante r ;
- **E_{bat_min}** representa o valor de energia mínima da bateria (energia de manutenção);
- **%autodescarga** representa a percentagem de autodescarga diária da bateria;

0. Corresponde à venda da energia produzida pela geração da VPP. O lucro é dado pela **equação 2**:

$$Receita(r) = Preço_{venda}(r) * \frac{P_{eolica}(r) + P_{fotovoltaica}(r)}{x} \quad (2)$$

A bateria permanece inativa e não é comprada energia à rede.

1. Corresponde à decisão de carregar a bateria com a energia produzida pela geração da VPP. As equações que auxiliaram na modelação da bateria foram retiradas de [10]. Aqui verificam-se 4 possíveis situações:

$$\text{i. Se } \begin{cases} E_{bat}(r-1) + \frac{P_{eolica}(r) + P_{fotovoltaica}(r)}{x} > E_{bat_{nominal}} & (3) \\ e \\ P_{eolica}(r) + P_{fotovoltaica}(r) < P_{bat_{nominal}} & (4) \end{cases}$$

A energia produzida pela VPP no instante r mais a energia na bateria no período $r-1$, é maior que o valor nominal de energia da bateria. Assim existe excedente de energia. A potência disponível pela produção da VPP é menor que a potência nominal da bateria. Aqui, a potência e energia na bateria são dadas pelas **equações 5 e 6**, respetivamente:

$$P_{bat}(r) = (E_{bat_{nominal}} - E_{bat}(r-1)) * x * (2 - n) \quad (5)$$

$$E_{bat}(r) = E_{bat_{nominal}} \quad (6)$$

A energia excedente, após a bateria estar carregada, é vendida, sendo a receita dada pela **equação 7**:

$$Receita(r) = Preço_{venda}(r) * \left(\frac{P_{eolica}(r) + P_{fotovoltaica}(r)}{x} - (E_{bat_{nominal}} - E_{bat}(r-1)) \right) \quad (7)$$

$$\text{ii. Se } \begin{cases} E_{bat}(r-1) + \frac{P_{eolica}(r) + P_{fotovoltaica}(r)}{x} \leq E_{bat_{nominal}} & (8) \\ e \\ P_{eolica}(r) + P_{fotovoltaica}(r) \leq P_{bat_{nominal}} & (9) \end{cases}$$

Tanto o valor de energia como o valor da potência do sistema não são suficientes para atingir a potência e a energia nominal. Aqui a potência e energia na bateria são dadas pelas **equações 10 e 11**, respetivamente:

$$P_{bat}(r) = P_{eolica}(r) + P_{fotovoltaica}(r) \quad (10)$$

$$E_{bat}(r) = E_{bat}(r-1) + n * \frac{P_{eolica}(r) + P_{fotovoltaica}(r)}{x} \quad (11)$$

Como toda a energia foi usada para carregar a bateria a receita é dada pela **equação 12**:

$$Receita(r) = 0 \quad (12)$$

$$\text{iii. Se } \left\{ \begin{array}{l} E_{bat}(r-1) + \frac{P_{eolica}(r) + P_{fotovoltaica}(r)}{x} > E_{bat_{nominal}} \quad (13) \\ e \\ P_{eolica}(r) + P_{fotovoltaica}(r) > P_{bat_{nominal}} \quad (14) \end{array} \right.$$

Tanto o valor da potência como da energia produzida pelo sistema são maiores que o valor de potência e energia nominal da bateria. Assim sendo, o valor de energia disponível pelo sistema é maior que o necessário para carregar a bateria. Após a bateria estar totalmente carregada, o excedente de energia é vendido.

O valor de potência na bateria é dado pela **equação 5**. O valor de energia na bateria é o nominal **(6)** e a receita é dado pela **equação 7**.

iv. Se se verificarem as condições descritas pelas equações 8 e 14

Apesar de o valor da potência disponível pela produção da VPP ser maior que o valor da potência nominal da bateria, o valor correspondente de energia não é suficiente para carregar completamente a bateria. Assim sendo, a potência na bateria é dada pela **equação 15**

$$P_{bat}(r) = P_{bat_{nominal}} \quad (15)$$

A energia é dada pela **equação 16**

$$E_{bat}(r) = E_{bat}(r-1) + n * \frac{P_{bat_{nominal}}}{x} \quad (16)$$

O valor de energia correspondente à diferença entre a potência disponível pela produção da VPP e a potência nominal da bateria é vendido, sendo a receita dado pela **equação 17**

$$Receita(r) = \left(\frac{P_{eolica}(r) + P_{fotovoltaica}(r)}{x} - \frac{P_{bat_{nominal}}}{x} \right) * Preço_{venda}(r) \quad (17)$$

2. Corresponde à decisão de carregar a bateria com energia importada da rede e com a energia produzida pela geração da VPP. Os mesmos casos descritos para o estado 1 são aplicados no estado 2, com a exceção do caso **ii**. O estado 2 dita que, se a **equação 8 e 9** se verificam, o valor de energia correspondente à potência em falta para atingir o valor de potência nominal da bateria é importado da rede. Assim, a potência na bateria e a energia na bateria são dadas pelas **equações 15 e 16**, respetivamente. A energia importada da rede é dada pela **equação 18**

$$E_{import}(r) = \frac{P_{bat_{nominal}}}{x} - \frac{P_{eolica}(r) + P_{fotovoltaica}(r)}{x} \quad (18)$$

A *Receita(r)*, neste caso, será a despesa pelo preço a pagar pela energia importada à rede, dado pela **equação 19**

$$Receita(r) = \left(\frac{P_{eolica}(r) + P_{fotovoltaica}(r)}{x} - \frac{P_{bat_{nominal}}}{x} \right) * Preço(r) \quad (19)$$

Também é possível que o valor de potência necessário para carregar completamente a bateria seja menor que o nominal. Assim, a energia na bateria é dada pela **equação 6**, a energia importada da rede pela **equação 20**, o valor de potência na bateria pela **equação 21**, e a despesa pela **equação 22**.

$$E_{import}(r) = E_{bat_{nominal}} - \frac{P_{eolica}(r) + P_{fotovoltaica}(r)}{x} + E_{bat}(r - 1) \quad (20)$$

$$P_{bat} = P_{eolica}(r) + P_{fotovoltaica}(r) + (E_{bat}(r - 1) - E_{bat_{nominal}}) * x * (2 - n) \quad (21)$$

$$Receita(r) = \left(\frac{P_{eolica}(r) + P_{fotovoltaica}(r)}{x} + E_{bat}(r - 1) - E_{bat_{nominal}} \right) * Preço(r) \quad (22)$$

3. Corresponde à venda da energia produzida pela VPP e armazenada na bateria. Assim sendo, a bateria está em fase de descarga. Nesta variável observam-se duas situações distintas

i. Se $E_{bat}(r - 1) - \frac{P_{bat_{nominal}}}{x} \leq E_{bat_{min}}$ (23)

Não é possível descarregar o valor de energia correspondente ao valor da potência nominal. Assim, a energia e potência na bateria são dadas pelas **equações 24 e 25**, respetivamente

$$E_{bat}(r) = E_{bat_min} \quad (24)$$

$$P_{bat}(r) = (E_{bat_min} - E_{bat}(r - 1)) * x \quad (25)$$

A receita é dada por

$$Receita(r) = \left(\frac{P_{eolica}(r) + P_{fotovoltaica}(r)}{x} + E_{bat}(r - 1) - E_{bat_min} \right) * Preço_{Venda}(r) \quad (26)$$

ii. **Se** $E_{bat}(r - 1) - \frac{P_{bat_nominal}}{x} > E_{bat_min}$ **(27)**

É possível descarregar o valor de energia correspondente ao da potência nominal. A energia na bateria e potência na bateria são dadas pelas **equações 28 e 29** respetivamente

$$E_{bat}(r) = E_{bat}(r - 1) - n * \frac{P_{bat_nominal}}{x} \quad (28)$$

$$P_{bat}(r) = -P_{bat_nominal} \quad (29)$$

A receita é dado por

$$Receita(r) = \left(\frac{P_{eolica}(r) + P_{fotovoltaica}(r)}{x} + \frac{P_{bat_nominal}}{x} \right) * Preço_{Venda}(r) \quad (30)$$

É importante realçar que, no final de cada período, independentemente do estado correspondente aos genes, e caso a energia na bateria seja maior que zero, existe sempre autodescarga da mesma.

A equação da autodescarga é dada pela **equação 31**:

$$E_{bat}(r + 1) = E_{bat}(r) * (1 - \%_{autodescarga}) \quad (31)$$

No final de todos os períodos serem analisados, correspondente a um dia, o Fitness (qualidade da solução) do indivíduo é calculado. Este é dado pelo somatório da receita ao longo dos períodos analisados, como se pode observar na **equação 32**

$$Fitness(p) = \sum_{r=1}^{row} Receita(r) \quad (32)$$

5.2.1. Torneio binário

A seleção dos progenitores faz-se por torneio, estando também presente um comportamento elitista. Nesta etapa, e de forma a manter o número da população constante, são efetuados 99 torneios binários, escolhendo os dois participantes no torneio de forma aleatória, e 1 membro é selecionado por um processo elitista para passar automaticamente a progenitor. O torneio binário decide qual dos dois membros do torneio passarão a progenitores. As Fitnesses de dois membros selecionados são comparadas, e o de maior Fitness é escolhido para ser progenitor. Um processo elitista dita que o algoritmo guarde na variável *Solução_Optima* o membro de maior Fitness de entre todas as gerações. Este membro passa automaticamente a progenitor e só é atualizado quando uma solução de maior Fitness é encontrada.

5.2.2. Recombinação Genética

Após a seleção, os progenitores são agrupados em pares, aos quais é aplicado o operador de recombinação. Neste algoritmo recorreremos ao operador original proposto por Holland (1975), designado recombinação com ponto de corte [37]. De acordo com este operador, dois indivíduos são alinhados, um ponto de corte é escolhido aleatoriamente ao longo dos vetores de genes e os descendentes são criados a partir de sequências complementares dos dois progenitores [37]. Neste algoritmo, todos os progenitores sofrem recombinação. Na figura 9, exemplifica-se o efeito da aplicação da recombinação com um ponto de corte. Considera-se que os pares de progenitores são formados de acordo com a ordem pela qual foram selecionados.

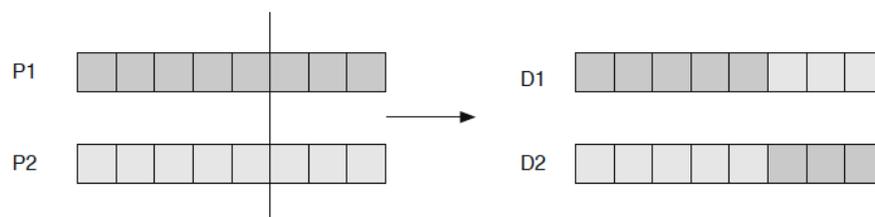


Figura 9 - Recombinação com ponto de corte

5.2.3. Mutação Genética

Os descendentes passam agora por um processo de mutação genética. Neste processo, todos os elementos do vetor de genes de cada descendente é percorrido, e a cada gene é atribuída uma probabilidade de 5% de ser alterada. Esta probabilidade foi escolhida, após um exaustivo número de testes. Quando a mutação genética é aplicada, o gene troca o seu estado atual por um dos 3 estados possíveis. Uma variável decimal de valor aleatório denominada m é gerada em cada gene. Se m for menor que 0.05, ocorre mutação genética no gene em questão. Existem, no entanto, três situações especiais na mutação genética, que servem para facilitar que o descendente convirja para uma solução mais próxima do ideal. Estas situações são as seguintes:

$$\text{Se } \begin{cases} m < 0.05 \text{ e } \text{Preço}_{\text{venda}}(r) \geq \text{Preço}_{\text{máximo de venda}} * 0.98 \text{ e } E_{\text{bat}}(r) > E_{\text{bat}_{\text{mínima}}} & (33) \\ m < 0.05 \text{ e } \text{Preço}_{\text{venda}} \geq \text{Preço}_{\text{máximo de venda}} * 0.98 \text{ e } E_{\text{bat}}(r) \leq E_{\text{bat}_{\text{mínima}}} & (34) \\ m < 0.05 \text{ e } \text{Preço}_{\text{venda}}(r) \geq 0.85 * \text{Preço}_{\text{máximo de venda}} & (35) \end{cases}$$

Caso a **condição 33** se verifique, o gene em questão passa a ser o estado 3. Ou seja, este descendente vai vender toda a produção e energia armazenada na bateria, no período de maior preço de venda. A **condição 34** muda o gene para o estado 0. Assim, o descendente vai vender toda a produção e manter a bateria inativa, respeitando a condição de que a energia na bateria nunca deve ser menor que a energia mínima, e aproveitando o período de maior preço para vender energia. Para que o descendente não compre energia ao mercado quando o seu preço é mais elevado, a **condição 35** muda o gene de estado 2 para qualquer outro estado.

5.2.4. Medidas de desempenho

Para a compreensão do desempenho do algoritmo foram utilizados 2 critérios:

- Das melhores soluções de cada geração, o algoritmo devolve a de maior Fitness e a de menor valor, e de seguida calcula a diferença percentual dada por

$$\frac{\text{Solução}_{\text{Optima}} - \text{Solução}_{\text{fraca}}}{\text{Solução}_{\text{Optima}}} * 100 \quad (36)$$

- Média entre todas as soluções de maior Fitness de todas as gerações

$$\text{Média} = \frac{\sum_{i=1}^{8000} \text{Maior}}{8000} \quad (37)$$

Onde *Maior* corresponde à solução com maior Fitness de cada geração.

Capítulo 6

Estudo de caso

Para a realização do presente estudo de caso, foi implementada uma VPP fictícia constituída por 3.75 MW de geração eólica, 1.75 MW de geração PV, sendo a capacidade total de geração de 5MW. A VPP inclui também uma bateria de lítio, cujas características estão descritas na tabela seguinte:

Potência nominal (MW)	Energia nominal (MWh)	Energia mínima (%)	Energia mínima (MWh)	Eficiência cíclica (%)	Auto descarga diária (%)
2.5	5	20	1	93,5	0,2

Tabela 3 - Dados técnicos dos sistemas de armazenamento de energia elétrica utilizados no modelo de simulação

De forma a observar as vantagens de um ESS num cenário VPP, e analisar a capacidade gestão do algoritmo, é concebido um cenário de referência em que apenas está disponível geração eólica e PV. Este cenário é posteriormente comparado com vários cenários em que é incluída uma bateria de lítio, para que seja possível tirar partido da tarifa dinâmica da rede. Os dados de produção eólica e fotovoltaica, bem como os diferentes preços do mercado diário, são retirados do site da REN [38] [39]. O preço de venda de energia é sempre 90% do preço do mercado diário. Para análise, foram utilizados os dados de três dias diferentes. Dois são caracterizados pelos níveis de produção de renovável eólica e fotovoltaica (elevado e reduzido). O terceiro dia analisado foi o dia 12 de agosto de 2017. A análise deste dia, em específico, é interessante devido à variação brusca entre a produção eólica e PV, entre as 7 e as 20 horas.

6.1. Cenário de referência

A natureza não despachável da geração eólica e fotovoltaica obriga a que a energia produzida pelas mesmas seja vendida no instante em que está disponível. Assim sendo, não existe possibilidade de alocar ou otimizar a gestão de recursos, e a receita obtida no mercado diário é limitada pelos períodos em que os recursos estão disponíveis, bem como pelos seus níveis de geração.

O estudo deste cenário permite também ter conhecimento do total de geração específica do gerador eólico e PV nos dias analisados, bem como a receita diária, obtida com a utilização de apenas estes recursos.

6.1.1. 9 de setembro de 2017

O dia 9 de setembro de 2017 é caracterizado por uma elevada produção nacional de energia renovável eólica e fotovoltaica, com um total de 306960 MWh. A produção eólica e fotovoltaica é de 297341,4 MWh e 9616,3 MWh, respetivamente.

Prevê-se que a VPP desenvolvida tenha uma geração 226,87 MWh de eólica, e 26,47 MWh de PV, com um total de energia produzida de 253,34 MWh. A receita obtida no mercado diário é de 2279,9 €

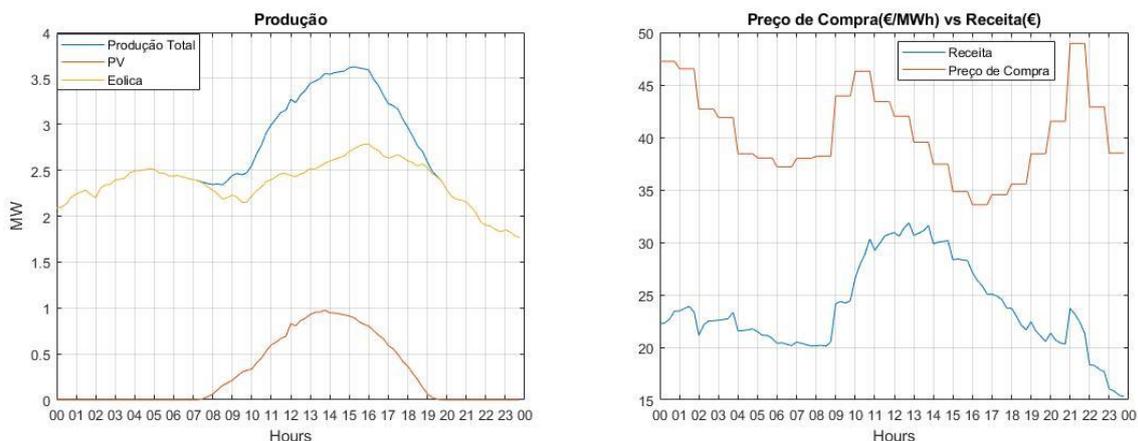


Figura 10 - a) Produção para o dia 09/09/2017. b) Preço de Compra vs Receita obtida no dia 09/09/2017

6.1.2. 24 de janeiro de 2018

No dia 24 de janeiro de 2018, a produção nacional de energia renovável eólica e fotovoltaica foi bastante reduzida, com apenas 54914 MWh produzidos. A produção eólica e fotovoltaica é de 50686 MWh e 4232,6 MWh, respetivamente.

A VPP produz apenas 50,33 MWh, sendo a produção eólica e fotovoltaica 38,67 MWh e 11,65 MWh, respetivamente. Assim sendo, a VPP produziu apenas 20% de energia, quando comparado com o caso anterior. A receita da VPP será de 644,17€, apenas 28%, quando comparado com o caso anterior.

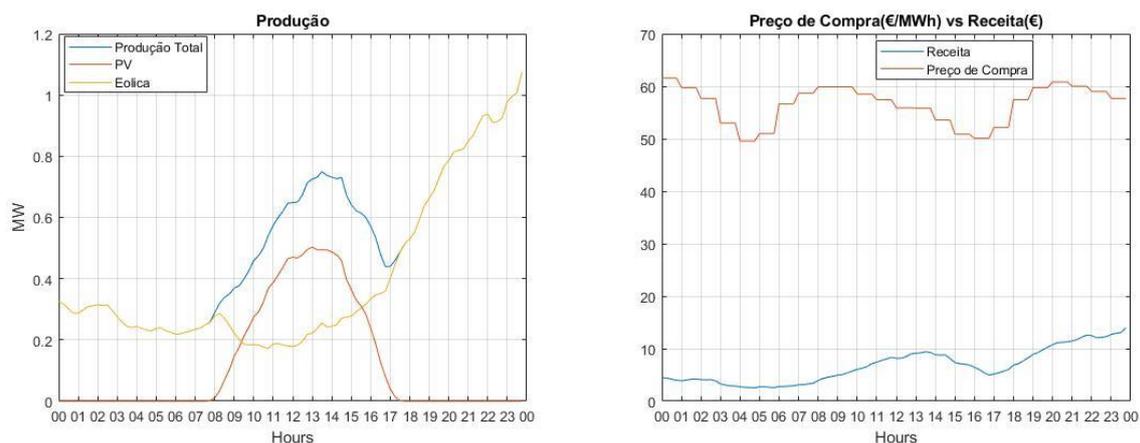


Figura 11 - a) Produção para o dia 24/01/2018. b) Preço de Compra vs Receita obtida no dia 24/01/2018

6.1.3. 12 de agosto de 2017

O Verão é normalmente caracterizado por elevada geração fotovoltaica. No dia 12 de agosto de 2017, entre as 7 horas e as 20 horas, ocorreu uma redução brusca de produção eólica, chegando mesmo a ser superada pela produção fotovoltaica. Como uma das características da VPP em estudo é a geração eólica ser 75% da geração total, constituindo a geração fotovoltaica apenas 25% do total de capacidade instalada, o estudo do comportamento da VPP no dia em questão poderá ser de interesse.

Neste dia, a produção de fotovoltaica e eólica a nível nacional foi de 11991 MWh e 65663 MWh respetivamente. A produção total foi de 77654MWh.

No dia analisado, a VPP produz um total de 83 MWh, sendo a produção fotovoltaica e eólica de 33,01MWh e 50.1MWh respetivamente. A receita obtida é de 1272,8€. Esta receita é quase o dobro do valor obtido durante a análise do dia com reduzida produção de renovável (24 de janeiro de 2018) e 55% da receita obtida no caso de elevada produção de renovável (9 de setembro de 2017). Tendo em conta que a capacidade eólica instalada perfaz 75% da capacidade instalada, e analisando os resultados obtidos, pode concluir-se que, num dia em que se observe reduzida produção de eólica e elevada produção fotovoltaica, apesar das diferenças elevadas entre as capacidades instaladas, estas complementam-se, obtendo resultados bastante razoáveis.

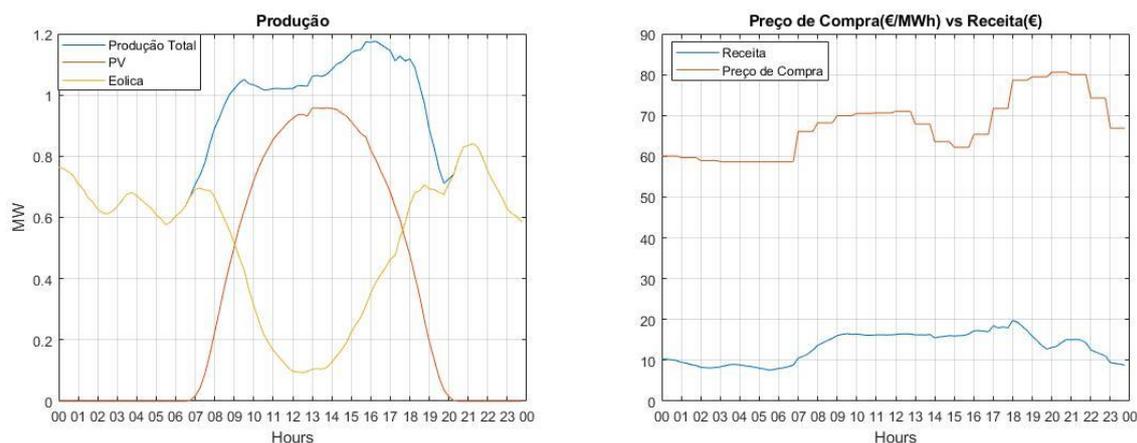


Figura 12 - a) Produção para o dia 12/08/2017. b) Preço de Compra vs Receita obtida no dia 12/08/2017

6.2. Produção renovável e sistemas de armazenamento elétrico.

A instalação de um ESS, visando aproveitar a tarifa dinâmica da rede, pode contribuir para um incremento de receita. Assim, pretende-se que a bateria carregue, quando o preço no mercado diário é baixo, e descarregue, quando o mesmo é elevado. Neste estudo de caso será analisado o impacto da instalação de uma bateria de lítio cujas características estão descritas na tabela 3. Para a compreensão e modelação da bateria a testar, foi feito um exaustivo estudo sobre ESS. Em [40], são descritas algumas metodologias existentes para a resolução do problema de dimensionamento dos sistemas ESS aplicados em centrais fotovoltaicas. Algumas das características da bateria testada, bem como o diagrama de blocos do algoritmo utilizado para o cálculo da energia armazenada e descarregada das baterias foi retirado de [10] e [41]. Em [9] e [42] estão expostas tabelas de descrição de várias tecnologias ESS, respetivos valores de potência e energia nominal para diferentes objetivos, bem como projetos reais com implementação de ESS. Para a percepção do comportamento esperado por um ESS, no contexto de uma VPP, é de realçar o estudo dos papers [27] e [28].

Devido à falta de dados, o impacto do investimento inicial para a instalação da ESS, não é analisado. Por motivos de simplificação, a potência máxima de carga e descarga é igual à potência nominal, e como são analisados apenas 3 dias, a degradação da bateria não é considerada. Porém, o algoritmo deve sempre respeitar a energia mínima de manutenção da bateria, correspondente a 20% da energia nominal. O valor de energia mínima é também o valor de energia na bateria, no início da simulação.

O sistema de armazenamento para este caso consiste numa bateria de lítio com capacidade de 5 MWh e potência nominal de 2,5 MW. Assim sendo, a capacidade da bateria é igual à capacidade instalada de geração.

6.2.1. 9 de setembro de 2017

A receita total obtida para o dia 9 de setembro de 2017 é de 2330€, sendo a diferença entre este caso e o de referência de 48,6€.

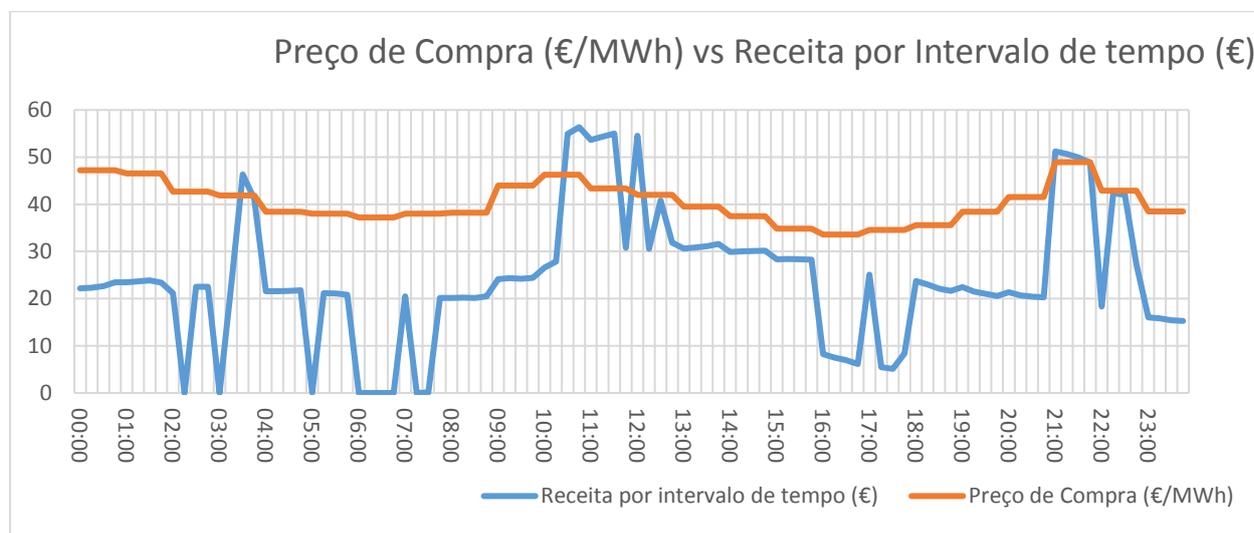


Figura 13 - Preço de Compra vs Receita por Intervalo de Tempo para o dia 9 de setembro de 2017

Na figura 13, observa-se que a VPP obtém mais receita nas horas de maior preço, entre as 10h e 12h e as 21h e 22h, atingindo o pico de receita entre as 10h e 12h. Neste caso, o pico de receita não acontece nas horas de maior preço, mais sim de maior produção. Como se observa na figura 14, entre as 9h e as 11h, a bateria descarrega até ao valor de energia mínima. O mesmo se verifica no período de maior preço (entre as 21h e 22h). Em ambos os períodos, a bateria descarrega o valor de energia equivalente à de potência nominal, visando assim vender a energia armazenada nos dois períodos do dia em que os preços são mais elevados. O período em que se verifica o pico de receita acontece entre as 10h e 12h, pois o total obtido da venda de energia descarregada na bateria e energia produzida, neste período, faz com que o valor total de energia vendida seja de tal maneira elevado que a receita, neste período, ultrapassa a receita feita no período de maior preço, onde a produção é menor.

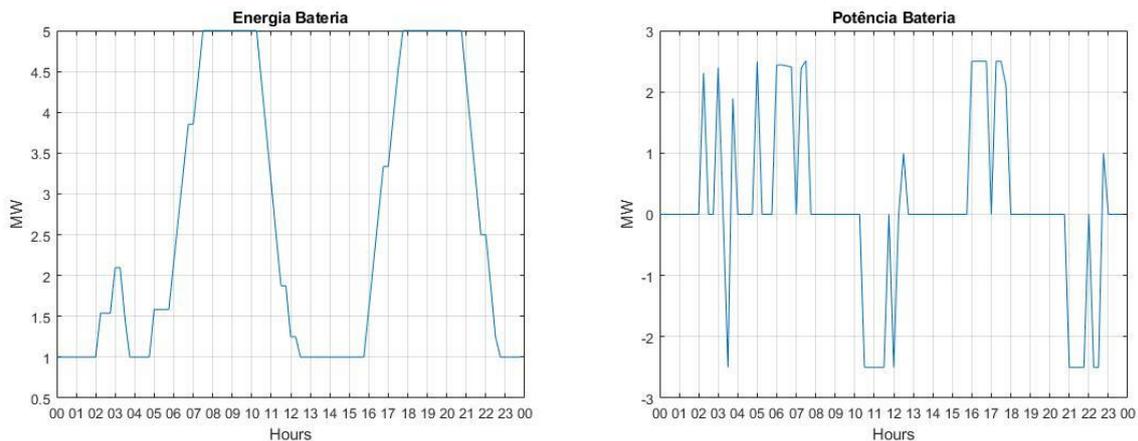


Figura 14 - a) Diagrama da energia da bateria. b) Diagrama de potência da bateria.

Devido aos elevados níveis de produção, a VPP não tem necessidade de importar energia da rede elétrica. A tabela seguinte fornece dados importantes, referentes ao desempenho do algoritmo.

Maior solução	Menor solução	Geração onde ocorre maior solução	Diferença % entre maior e menor solução	Média
2.3300e+03	2.2511e+03	2461	3.3858	2.3277e+03

Tabela 4 - Dados de desempenho do algoritmo para o dia 9 de setembro de 2017

6.2.2. 24 de janeiro de 2018

A receita total obtida para o dia 24 de janeiro de 2018 foi de 656,11€, sendo a diferença entre este caso e o de referência de 11,95€.

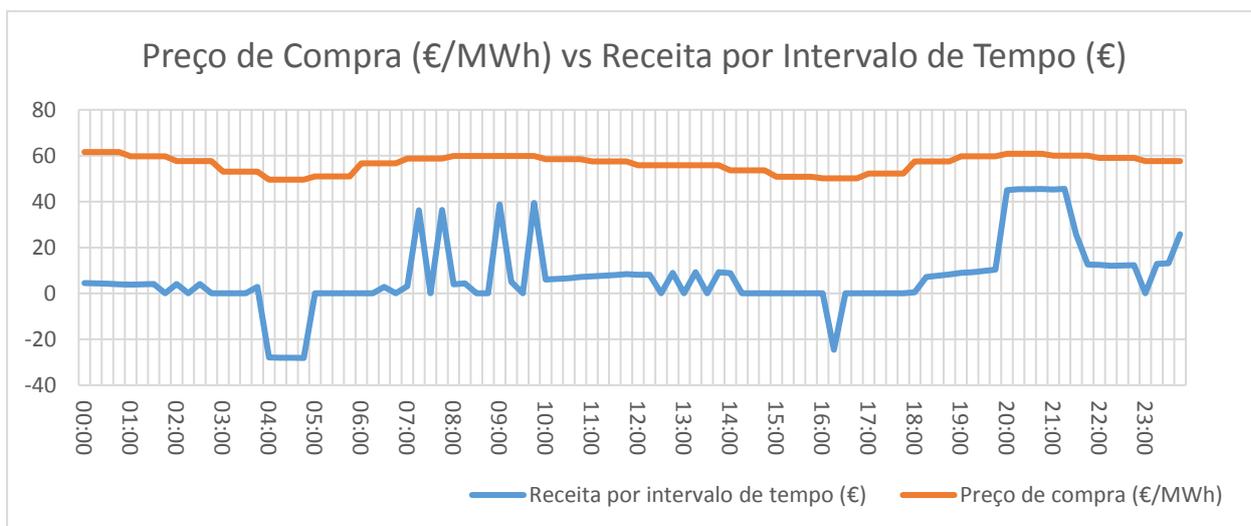


Figura 15 - Preço de Compra vs Receita por Intervalo de Tempo para o dia 24 de janeiro de 2018

Como se pode observar na figura 15, a VPP obtém mais receita nas horas de maior preço, entre as 8h e 10h e as 20h e 21h, atingindo o pico de receita entre as 20h e 21h. Este pico deve-se não só ao elevado preço de venda, como ao facto de a bateria descarregar o valor da potência nominal, aproveitando assim este período para vender a energia armazenada, tal como se observa na figura 16.

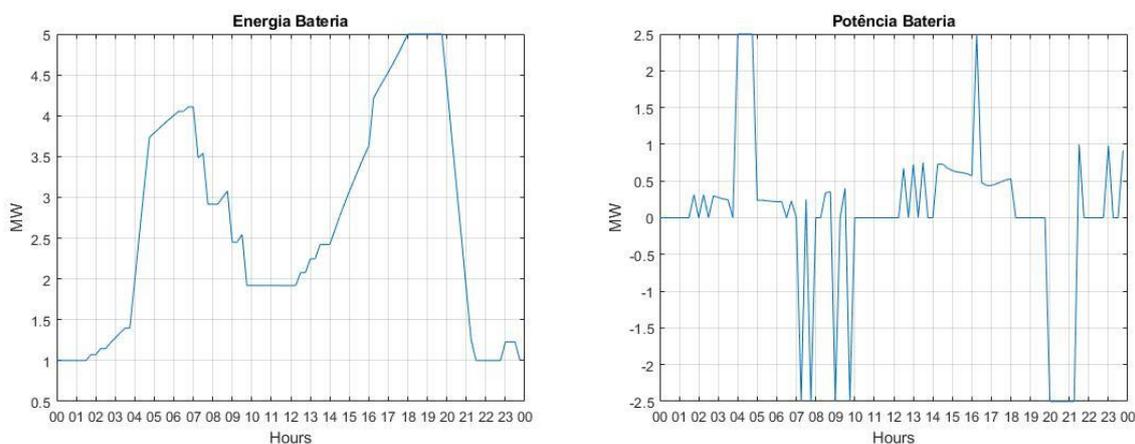


Figura 16 – a) Diagrama da energia da bateria. b) Diagrama de potência da bateria.

Observa-se que a bateria carrega totalmente no período de menor preço do mercado diário, entre as 15h e as 17h. Assim sendo, o algoritmo gere a VPP de forma a aproveitar este período para importar a energia da rede a um preço baixo, aproveitando também a produção do sistema, para carregar a bateria. Foi importado da rede um total de 2,75 MWh e a despesa total é de 136,84€. A diferença de receita reduzida, quando comparada com os outros dias, deve-se à falta de produção renovável. Assim, a VPP não só tem escassez de energia renovável para vender, como para armazenar na bateria, vendo-se obrigada a importar elevados valores de energia à rede elétrica.

A tabela seguinte fornece dados importantes, referentes ao desempenho do algoritmo.

Maior solução	Menor solução	Geração onde ocorre maior solução	Diferença % entre maior e menor solução	Média
656.1138	570.3865	6805	13.0659	655.509

Tabela 5 - Dados de desempenho do algoritmo para o dia 24 de janeiro de 2018

6.2.3. 12 de agosto de 2017

A receita obtida no dia 12 de agosto de 2017 é de 1333,6€. A diferença de receita entre este caso e o de referência é de 60,8€. Como se pode observar na figura 22, a VPP obtém mais lucro nas horas de maior preço, entre as 18h e as 21h, atingindo o pico de lucro entre as 18h e 19h.

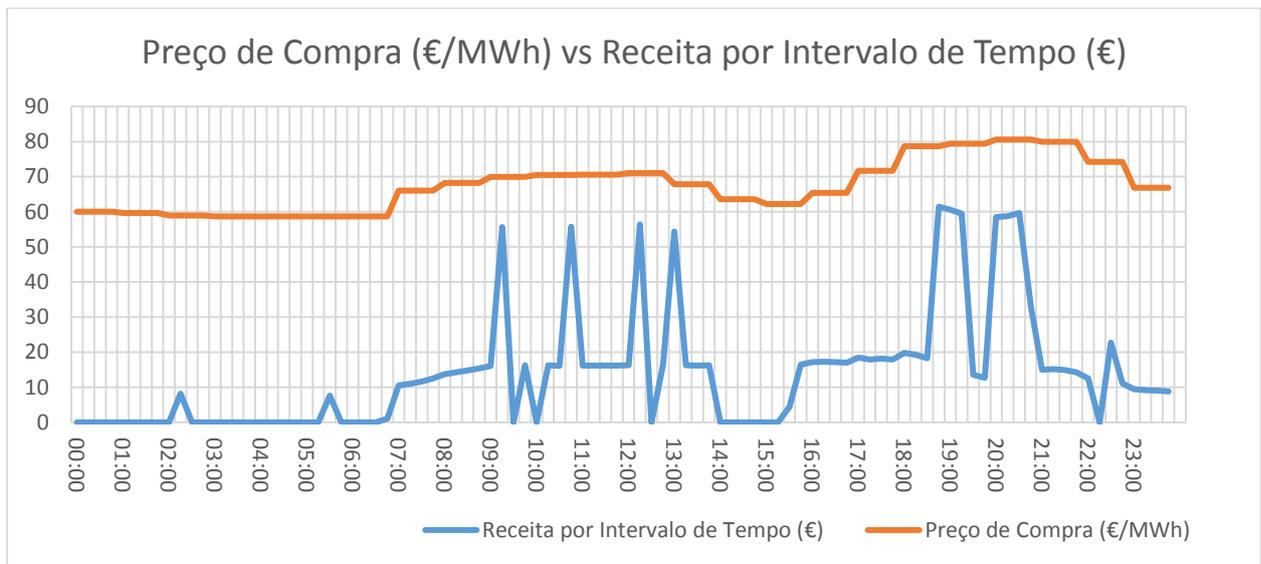


Figura 17 - Preço de Compra vs Receita por Intervalo de Tempo para o dia 12 de agosto de 2017

A receita máxima, para este dia, não sucede nas horas de maior preço, mas sim entre as 18h e 19h, devido à elevada produção de renovável (figura 17), em conjunto com a energia descarregada da bateria (figura 18). A partir das 18h, a bateria descarrega até ao valor de energia mínima, de forma a maximizar a receita neste período de maior preço.

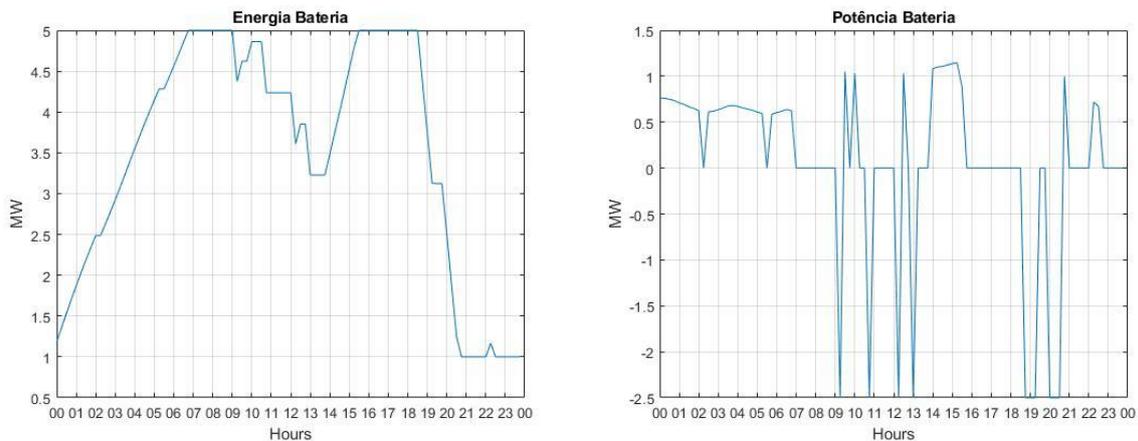


Figura 18 - a) Diagrama da energia da bateria. b) Diagrama de potência da bateria.

Em nenhum momento a VPP importa energia da rede elétrica.

É importante realçar o dimensionamento da geração e capacidade da bateria da VPP. Assim, num cenário de variação brusca de uma das fontes de produção, esta variação pode ser colmatada pela fonte complementar. A combinação entre a capacidade de geração e capacidade de bateria permite que, neste cenário, a necessidade de importar energia da rede seja nula. O dimensionamento da bateria permite-lhe não só permanecer carregada por longos períodos de tempo, como descarregar e carregar de forma a aproveitar períodos de preço de mercado altos e baixos, respetivamente.

A tabela que se segue mostra dados importantes, relativos ao desempenho do algoritmo.

Maior solução	Menor solução	Geração onde ocorre maior solução	Diferença % entre maior e menor solução	Média
1.3336e+03	1.2263e+03	5316	8.0518	1.3231e+03

Tabela 6 - Dados de desempenho do algoritmo para o dia 12 de agosto de 2017

Capítulo 7

Conclusão e trabalho futuro

A crescente disseminação de DGs com uma abordagem “fit-and-forget” levantou problemas graves, como, por exemplo, perfis de tensão indesejáveis, inversão de fluxos de potência, operação não adequada dos sistemas de proteção, desequilíbrios entre o consumo e a geração e até aumento das perdas. Da necessidade de resolução destes problemas, surgiu o conceito de VPP, que consiste num conjunto de DGs despacháveis e não despacháveis, de elementos de armazenamento de energia e cargas controláveis, acompanhadas de tecnologias de informação e comunicação para formar uma única central imaginária que planeia, monitoriza a operação e coordena os fluxos de energia entre os seus componentes, para minimizar os custos de geração, minimizar a produção de gases de efeito de estufa, maximizar os lucros e aumentar o comércio no mercado elétrico. Este conceito pode ter múltiplos objetivos, entre outros, a maximização de lucros, minimização de custos, prestação de serviços de sistema.

Para a modelação, dimensionamento, projeção e desenvolvimento de uma VPP é necessário conhecer com rigor as características das diferentes DERs a agregar na mesma. Estes DERs, em conjunto com um Sistema de Gestão de Energia, constituem a estrutura de uma VPP. Devido à sua natureza recente, é necessário estudar e discutir as várias barreiras socioeconómicas, tecnológicas e de legislação que esta enfrenta, e que podem variar, dependendo do objetivo da VPP ou do país em que se encontra.

O algoritmo desenvolvido em ferramenta Matlab®, permite simular uma VPP composta por geração eólica e fotovoltaica e um sistema de armazenamento de energia elétrica, visando a maximização de lucro no mercado diário de energia.

O estudo de caso valida e comprova a eficácia do algoritmo desenvolvido, demonstrando que o mesmo gere os recursos de forma a adaptar-se às variações de preço do mercado diário, e à variação das fontes de geração renováveis. Os dados obtidos das várias simulações mostram que a VPP aproveita a tarifa dinâmica para armazenar energia nos períodos de menor preço, para vender, posteriormente, à rede nos períodos de maior preço. Os resultados obtidos no estudo de caso validam a eficiência e vantagens da agregação de diferentes DERs, num cenário de VPP.

Sendo a temática das VPPs extremamente abrangente e complexa, as possibilidades de trabalhos para continuidade deste estudo, são diversas e úteis, sugerindo-se a inserção de recursos do lado da procura no algoritmo desenvolvido; abordagem de diferentes algoritmos para a gestão de uma

VPP; análise económica da criação de um VPP, visando os custos iniciais da instalação da geração e sistema de armazenamento; análise de VPP com o objetivo de participar no mercado de serviços.

Bibliografia

- [1] K. E. Bakari e W. L. Kling, “Virtual Power Plants: An Answer to Increasing Distributed Generation,” IEEE, 2010.
- [2] K. E. Bakari e W. L. Kling, “Integration of Distributed Energy Resources With Virtual Power Plants,” *International Journal of Energy and Power*, vol. 3, pp. 35-41, 2014.
- [3] M. M. Othman, Y. G. Hegazy e A. Y. Abdelaziz, “A Review of Virtual Power Plant Definitions Components. Frameworks and Optimization,” *International Electrical Engineering Journal*, vol. 6, pp. 2010-2024, 2015.
- [4] S. You, “Developing Virtual Power Plant for Optimized Distributed Energy Resources Operation and Integration,” Technical University of Denmark, 2010.
- [5] G. Coppez, S. Chowdhury e S. Chowdhury, “Battery Storage and Testing Protocols for CHP Systems,” IEEE, 2011.
- [6] A. Soares, “Gestão Integrada de Recursos Energéticos - Contextualização e Análise,” FCTUC, 2011.
- [7] A. Sá, “Guia de Aplicações de Gestão de Energia e Eficiência Energética,” PUBLINDUSTRIA, 2010.
- [8] E. Commission, “EU Energy in Figures - Statistical Pocketbook 2016,” 2016. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/pocketbook_energy-2016_web-final_final.pdf . [Acedido em 16 Março 2017].
- [9] A. Alhmali, M. E. Farrag, G. Bevam e D. M. Hepburn, “Review of Energy Storage Systems in Electric Grid and their Potential in Distribution Networks,” Glasgow Caledonian University, 2016.
- [10] J. A. A. Ferreira, “Análise técnica e económica de tecnologias de armazenamento de energia eléctrica para a Integração em larga escala de geração renovável intermitente,” FCTUC, 2017.
- [11] B. Donnellan, D. Vowles e W. Soong, “A Review of Energy Storage and its Application in Power Systems,” School of Electrical and Electronic Engineering, University of Adelaide, Australia, 2015.
- [12] J. Pinho e M. Galdino, “Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos,” CEPTEL - CRESESB, 2014.

- [13] I. E. Agency, “2015 - Snapshot of Global Photovoltaic Markets,” 2016. [Online]. Available: http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/PICS/IEA-PVPS_-_A_Snapshot_of_Global_PV_-_1992-2015_-_Final_2_02.pdf . [Acedido em 18 Março 2017].
- [14] GWEC, “Global Wind Statistics 2014,” 2014. [Online]. Available: http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2015/02/GWEC_GlobalWindStats2014_FINAL_10.2.2015.pdf . [Acedido em 13 Março 2017].
- [15] REN21, “Renewables 2011: Global Status Report,” 2011. [Online]. Available: <http://germanwatch.org/klima/gsr2011.pdf>. [Acedido em 13 Março 2017].
- [16] H. Jacobsen, “Denmark breaks its own world record in wind energy,” 2016. [Online]. Available: <http://www.euractiv.com/section/climate-environment/news/denmark-breaks-its-own-world-record-in-wind-energy/> . [Acedido em 13 Março 2017].
- [17] H. Teixeira, “Caracterização da Produção de Centrais Mini-Hídricas,” FEUP, 2009.
- [18] REN, “Dados Técnicos,” REN, 2015.
- [19] C. A., “Ferramenta para identificação de recursos no lado da Procura no fornecimento de Serviços de Sistema,” FCTUC, 2016.
- [20] D. Pudjianto e C. R. a. G. Strabac, “Virtual Power Plant and system integration of distributed energy resources,” IET Renewable Power Generation, 2007.
- [21] C. Tarazona, M. Muscholl e R. L. a. G. Passelergue, “Integration of Distributed Energy Resources in the Operation of Energy Management Systems,” IEEE PES/IAS conference on Sustainable Alternative Energy (SAE), 2009.
- [22] P. Lombardi e M. P. a. K. Rudion, “Optimal Operation of a Virtual Power Plant,” Power & Energy Society General Meeting, Calgary, Canada, 2009.
- [23] D. Hropko e J. I. a. J. Turcek, “Optimal Dispatch of Renewable Energy Sources Included in a Virtual Power Plant Using Accelerated Particle Swarm Optimization,” ELEKTRO, Rajeck Teplic, 2012.
- [24] H. Saboori e M. M. a. R. Taghe, “Virtual Power Plant (VPP), Definition, Concept, Components and Types,” Power and Energy Engineering Conference Asia-Pacific, 2011.
- [25] S. Lukovic, I. Kaitovic e M. M. a. U. Bondi, “Virtual Power Plant as a bridge between Distributed Energy Resources and Smart Grid,” 43rd Hawaii international conference on system science, 2010.

- [26] M. R. C. Duarte, “Virtual Power Plant,” 2016. [Online]. Available: https://wikilaw.fd.uc.pt/mediawiki/index.php/Virtual_Power_Plant. [Acedido em 22 Junho 2017].
- [27] H. Fu, Z. Wu, J. Li, X.-P. Zhang e J. Brandt, “A Configurable uVPP With Managed Energy Services: A Malmo Western Harbour Case,” *IEEE Power and Energy Technology System Journal*, vol. 3, pp. 166-178, 2016.
- [28] M. G. K. M. B. a. M. A. A. Pedrasa, “Scheduling of a Virtual Power Plant with High Penetration of Distributed Generation,” University of the Philippines Dilman, 2016.
- [29] S. R. Awasthi, S. Chalise e R. Tonkoski, “Operation of Datacenter as Virtual Power Plant,” IEEE, 2015.
- [30] E. C. -. e.-B. W. Report, “Virtual Power Plant at RWE, Germany,” 2009.
- [31] P. Duvoor, “Virtual Power Plant in Competitive Wholesale Electricity Markets - Experience with RWE Virtual Power Plant in Germany,” Siemens Smart Grid Division, 2012.
- [32] S. a. R. j. p. release, “Siemens and RWE to expand Virtual Power Plant with additional Energy Sources,” 2012.
- [33] J. Kumagai, “Virtual Power Plant, Real Power,” IEEE, 2012.
- [34] B. Poulsen, “A Market-Based Virtual Power Plant,” Technical University of Denmark, 2009.
- [35] E. Mashhour e S. M. Moghaddas-Tafreshi, “Bidding Strategy of Virtual Power Plant for Participating in Energy and Spinning Reserves Makets - Part I: Problem Formulation,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, pp. 949-956, 2011.
- [36] E. Mashhour e S. Moghaddas-Tafreshi, “Bidding Strategy of Virtual Power Plant for Participating in Energy and Spinning Reserves Makets - Part II: Problem Formulation,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, pp. 957-964, 2011.
- [37] A. G. Cunha, R. Takahashi e A. C. Henggeler, “Manual de Computação Evolutiva e Metaheurística,” Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.
- [38] REN, “REN Sistemas de Informação de Mercados de Energia,” [Online]. Available: <http://www.mercado.ren.pt/PT/Electr/InfoMercado/InfOp/MercOmel/Paginas/Precos.aspx>. [Acedido em 3 Fevereiro 2018].

- [39] REN, “REN Centro de Informação,” [Online]. Available: <http://www.centrodeinformacao.ren.pt/PT/InformacaoExploracao/Paginas/EstatisticaDiariaDiagrama.aspx>. [Acedido em 03 Fevereiro 2018].
- [40] T. A. L. Torres, “Sistemas de Armazenamento de Energia Integrados em Centrais Fotovoltaicas,” FEUP, 2016.
- [41] D. F. N. Ferreira, “Avaliação de tecnologias para a integração em larga escala de energia solar fotovoltaica,” FCTUC, 2017.
- [42] R. E. Association, “Energy Storage in the UK - An Overview,” 2016. [Online]. Available: http://www.r-e-a.net/upload/rea_uk_energy_storage_report_november_2015_-_final.pdf . [Acedido em 16 Março 2017].

ANEXO A

Tabela de características de operação e custos típicos de diferentes tecnologias de Cogeração e Micro-Cogeração

Tipo de Tecnologia	Turbinas a gás	Motores Otto a Gás Natural	Motores Diesel	Turbinas a vapor	Micro - turbinas	Pilhas de Combustível
Rendimento elétrico	15% - 35%	22% - 40%	25% - 45%	10% - 40%	18% - 29%	35% - 40%
Rendimento térmico	40% - 60%	40% - 60%	40% - 60%	40% - 60%	40% - 60%	20% - 50%
Rendimento global	60% - 85%	70% - 80%	70% - 85%	60% - 85%	55% - 75%	55% - 90%
Potência típica (MWe)	0,2 - 100	0,05 - 5	0,0015 - 30	0,5 - 100	0,03 - 0,35	0,01 - 0,25
Relação Pt/Pe	1,25 - 2	0,4 - 1,7	0,4 - 1,7	2 - 10	1 - 2,5	1,1
Desempenho a carga parcial	Mau	Médio	Bom	Bom	Médio	Muito Bom
Custo de investimento (€/kWe)	600 - 800	700 - 1.400	700 - 1.400	700 - 1.900	1.300 - 2500	>2.500
Custos de Operação e manutenção (€/MWh)	2 - 7	7 - 15	6 - 12	3	10	2 - 12
Intervalos de manutenção	30.000 - 50.000	24.000 - 64.000	25.000 - 30.000	>50.000	5.000 - 40.000	10.000 - 40.000
Tempo de arranque	10m - 1h	10s	10s	1h - 1dia	1m	3h - 2 dias
Pressão do Combustível (bar)	8 - 35	0,07 - 3,1	<0,35	-	3 - 7	0,03 - 3
Ruído	Médio	Alto	Alto	Alto	Médio	Baixo
Uso do calor	Água Quente, Vapor a alta pressão, Vapor a baixa pressão	Água Quente, Vapor a baixa pressão	Água Quente, Vapor a baixa pressão	Vapor a alta pressão, Vapor a baixa pressão	Água Quente, Vapor a baixa pressão	Água Quente, Vapor a baixa pressão
Densidade de potência (kW/m ²)	20 - 500	35 - 50	35 - 50	>100	5 - 70	5 - 20
NOX (Kg/MWh total)	0,2 - 2	0,5	1 - 14	0,9	0,07	0,01

Tabela 7 - Tabela de características de operação e custos típicos de diferentes tecnologias de Cogeração e Micro-Cogeração [6]

ANEXO B

Descrição de diferentes Tecnologias de Armazenamento Elétrico, características e aplicações.

No trabalho [9] são enumeradas as quatro classificações de ESS (mecânica, elétrica, térmica e química) e descritos os principais ESS.

a. Armazenamento mecânico de energia

- **Armazenamento de energia do ar comprimido (CAES):** Os sistemas de ar comprimido podem armazenar enormes quantidades de energia. Huntorf, o maior na Alemanha com uma potência de descarga de 321MW, tem uma *Eficiência cíclica* de aproximadamente 41%. Tradicionalmente, para aumentar a eficiência, o ar comprimido é usado com gás natural. No entanto, a baixa *Eficiência cíclica* e a limitação geográfica dos locais são consideradas como desvantagens desta tecnologia [9]. Além dessas aplicações em larga escala, sistemas de pequena escala estão disponíveis usando reservatórios ou tubos distribuídos de alta pressão. Tais sistemas podem ter eficiências globais de 50%.
- **Armazenamento de energia com bombas hidráulicas (PHS):** Os esquemas hidroelétricos são o tipo mais conhecido de ESS, com uma capacidade instalada global em torno de 130 GW e quase 99% da capacidade total de armazenamento. A potência nominal das estações hidroelétricas individuais bombeadas varia de 1000 MW a 5000 MW, com eficiências operacionais de 75-85% e vida superior a 50 anos. O PHS proporciona uma boa estabilidade a longo prazo para aumentar as fontes de RE intermitentes. Os principais benefícios do PHS são a gestão de energia por meio de deslocamento de tempo, fonte de reserva e reserva não rotativa, bem como vida útil duradoura e estabilidade do ciclo praticamente ilimitada. As principais desvantagens são a necessidade de uma grande área de terreno para a sua implementação e a dependência de condições topográficas.
- **Flywheels (FESS):** FESS usam a conservação do momento angular de uma massa rotativa, sendo carregada e descarregada, usando um motor-gerador para converter eletricidade em energia cinética e vice-versa.. Estes sistemas apresentam altas eficiências de cerca de 93% e vidas de 20 anos, recarga e resposta rápidas e alta densidade de energia. No entanto, uma desvantagem é o alto nível de autodescarga, devido a perdas nos enrolamentos e resistência ao ar.

b. Armazenamento de energia térmica:

Os sistemas de armazenamento de energia criogénica (CES) usam energia fora do pico ou tipos de RE para refrigerar o fluido a ser utilizado em motores térmicos criogénicos, para gerar eletricidade [9]. O CES ainda não foi comprovado e encontra-se ainda em desenvolvimento, mas o custo de capital é baixo e a densidade de energia é alta. No entanto, a eficiência deste tipo de armazenamento é atualmente baixa (40-50%).

O armazenamento de energia térmica de alta temperatura está em uso e em desenvolvimento, incluindo sal derretido e armazenamento de calor sensível. O calor latente pode ser utilizado, sendo a energia gerada durante uma mudança de fase. Alternativamente, o calor sensível pode ser armazenado. Esta é uma tecnologia comum, sendo o reservatório de água quente doméstico, um exemplo. O armazenamento de energia térmica de alta temperatura tem uma longa vida útil com mais de 13000 ciclos e baixo impacto ambiental, enquanto a sua eficiência é muito baixa (30-60%).

c. Armazenamento de energia química

As tecnologias químicas podem ser categorizadas como baterias convencionais, avançadas e de fluxo.

i. Baterias convencionais

- **Bateria de chumbo-ácido (ácido-Pb):** com desenvolvimentos significativos desde sua invenção por Gaston Planet em 1859, são geralmente de baixo custo. As células dessas baterias compreendem um cátodo de ácido de chumbo e um ânodo de chumbo esponjoso, absorvido em um eletrólito de ácido sulfúrico diluído, com o chumbo como coletor de corrente. Ao longo da descarga, em ambos os elétrodos, o sulfato de chumbo é gerado. Possui alta eficiência (80-90%) e fiabilidade, sendo uma boa opção de armazenamento para aplicações de reserva girante, gestão de energia e qualidade de energia, mas sofre de uma vida útil curta (cerca de 2000 ciclos) e baixa densidade de energia (30-50 Wh/kg).
- **Baterias de níquel cádmio (Ni-Cd) e hidreto metálico de níquel (Ni-MH):** As baterias de Ni-Cd foram a escolha química entre 1970 e 1990 para aplicações de alto desempenho. Proibidas para uso do consumidor na UE desde 2006, são usadas apenas para aplicações estacionárias devido à toxicidade do cádmio. Mais recentemente, o íon de lítio e o hidreto de metal de níquel foram preferidos. Embora mais recentes do que as baterias de chumbo-ácido, os

dispositivos Ni-MH são considerados uma tecnologia mais madura e melhor em termos de densidade de energia, ciclo de vida e requisitos de manutenção. As baterias de hidreto de metal de níquel têm 300-500 ciclos de vida, eficiência de 70-75%, resposta rápida e densidades de energia muito maiores.

ii. Baterias avançadas

- **Baterias de íons de lítio (Li-ion):** As baterias de íons de lítio são comumente usadas em dispositivos eletrônicos portáteis, como telemóveis e veículos elétricos, mas podem ser caras e propensas a falhas catastróficas, como, por exemplo, os problemas de alto perfil com o Boeing 787 Dreamliners e os dispositivos Samsung Galaxy Note 7. As principais vantagens são a relação entre energia e peso, a falta de efeitos de memória e baixa autodescarga. Os níveis elevados da tensão celular chegam aos 3,7 volts nominais. Estas baterias têm uma eficiência muito alta (90-98%) e um elevado ciclo de vida.
- **Pilhas de sódio-enxofre (Na-S):** A temperatura das baterias Na-S é mantida entre 300°C e 350°C para manter os elétrodos liquefeitos [9]. Estas baterias são consideradas uma tecnologia emergente muito atraente, porque pode ser processada 2500 vezes e têm ciclos de descarga longos, resposta rápida, alta eficiência (85-90%) e alta densidade de potência (150-240W/kg) [9]. Uma limitação é exigir uma fonte de calor para manter a temperatura de operação, que usa a própria energia armazenada da bateria, em parte diminuindo o seu desempenho.
- **Cloreto de níquel de sódio (NaNiCl):** NaNiCl, ou ZEBRA, são baterias que usam cloreto de níquel como o ânodo. Como o Na-S, estas baterias são um sistema de alta temperatura (~ 300°C), mas podem operar a temperaturas de -40 a 70°C sem refrigeração. As baterias ZEBRA têm uma alta tensão celular (2,58 V) e melhores características de segurança do que as baterias Na-S, capazes de resistir a sobrecarga e descarga limitadas [9]. Estas podem ser usadas em aplicações de transporte, mas em comparação com as baterias Na-S têm menor densidade de potência (aproximadamente 150W/kg) e densidade de energia (aproximadamente 125Wh/kg).
- **Baterias de combustível (Armazenamento de energia por Hidrogénio FC- HES):** Os dispositivos de conversão de energia eletroquímica têm várias formas, incluindo óxido sólido (SOFC), ácido fosfórico (PAFC), alcalino (AFC), carbonato liquefeito (MCFC) e metanol direto (DMFC) [9]. Estes diferem em termos de eletrólito utilizado, design, gama de temperatura e aplicação final. Além disso, existem requisitos específicos de combustível para cada tipo. Com alta densidade de energia, resposta rápida e ciclos de vida superiores a 1000 ciclos, as células de combustível podem ser usadas para aplicações de grande e pequena escala, mas atualmente são caras e têm *Eficiência cíclica* muito baixa (29-59%).

iii. Baterias de fluxo

Um exemplo importante de uma bateria de fluxo ou redox é o desenvolvido pela Regenesys Technologies em 2002, com capacidade de 15-120MWh, usando brometo de polissulfureto. Mais recentemente, um sistema eletroquímico que depende do vanádio está em desenvolvimento. A eficiência é de aproximadamente 75%. As baterias de fluxo podem ser usadas para *ramp-up*, deslocamento de tempo, regulação de frequência e qualidade de energia. Algumas das principais vantagens são a alta capacidade de potência e energia; o uso de materiais não tóxicos; a capacidade de descarga completa e a operação em baixa temperatura. A principal desvantagem desta tecnologia é que são necessárias peças mecânicas em movimento. Outro exemplo de bateria de fluxo é zinkbrometo (ZnBr), a eficiência deste sistema é de cerca de 70-75% e a vida útil é aproximadamente 2000 ciclos. ZnBr não tem efeito de memória.

d. Armazenamento de Energia Elétrica

- **Condensadores e supercondensadores (EDLC):** Supercondensadores (condensadores elétricos de dupla camada) podem ser carregados consideravelmente mais rápido do que sistemas químicos e os seus ciclos de vida são cinco ordens de grandeza maiores. Este tipo é mais útil para aplicações de ciclo rápido, pois têm 84-95% *Eficiência cíclica*. Além disso, estas tecnologias são utilizadas para a qualidade da energia da rede e para regular a frequência. No entanto, apesar de terem uma vida muito longa, uma descarga rápida, e serem altamente reversíveis, os sistemas de condensadores elétricos são atualmente não competitivos para aplicações de energia, onde o tempo de descarga é de minutos ou mais, devido ao alto custo de energia armazenada por unidade e à baixa densidade de energia.

- **Sistemas supercondutores de armazenamento de energia magnética (SMES):** O SMES pode descarregar rapidamente, produzindo alta potência em curto período de tempo, quando a energia armazenada é necessária. As capacidades instaladas desta tecnologia são de cerca de 10MW e são utilizadas, na maior parte, para melhorar a qualidade de energia. As perdas de energia são zero, porque a resistência DC do SMES é quase zero. A eficiência do supercondutor magnético para armazenar eletricidade é muito alta. A potência é quase obtida imediatamente, e a potência de saída é muito alta por um curto período de tempo; no entanto, esta tecnologia é cara.

No gráfico e tabela seguinte, podemos observar a maturidade aproximada das tecnologias EES, custo, eficiência, entre outras características [42] .

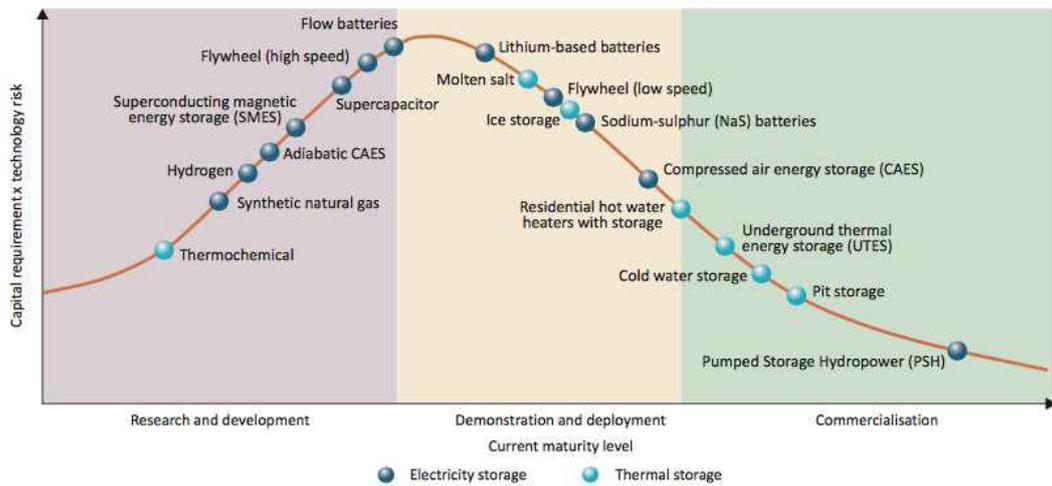


Figura 19 – Maturidade aproximada das tecnologias ESS [42]

Technology	Maturity	Cost (\$/kW)	Cost (\$/kWh)	Efficiency	Cycle Limited	Time Response
Pumped Hydro	Mature	1,500 – 2,700	138 - 338	80 – 82%	No	Seconds to Minutes
Compressed Air (Underground)	Demo to Mature	960 – 1,250	60 - 150	60 – 70%	No	Seconds to Minutes
Compressed Air (Above-ground)	Demo to Deploy	1,950 – 2,150	390 - 430	60 – 70%	No	Seconds to Minutes
Flywheels	Deployed to Mature	1950 – 2,200	390 - 430	85 – 87%	>100,000	Instantaneous
Lead Acid Batteries	Demo to Mature	950 – 5,800	350 – 3,800	75% - 90%	2,200 - >100,000	Milliseconds
Lithium-ion Batteries	Demo to Mature	1,085 - 4100	900 – 6,200	87 – 94%	4,500 - >100,00	Milliseconds
Flow Batteries (Vanadium Redox)	Develop to Demo	3,000 – 3,700	620 - 830	65 – 75%	>10,000	Milliseconds
Flow Batteries (Zinc Bromide)	Demo to Deploy	1,450 – 2,420	290 – 1,350	60 – 65%	>10,000	Milliseconds
Sodium Sulfur (NAS)	Demo to Deploy	3,100 – 4,000	445 - 555	75%	4,500	Milliseconds
Power to Gas	Demo	1,370 – 2,740	NA	30 – 45%	No	10 Minutes
High Temperature Thermal Storage	Demo to Deploy	NA	NA	30-60%	No	Storing: Seconds Generating: Minutes
Capacitor	Develop to Demo	-	-	90-94%	No	Milliseconds
SMES	Develop to Demo	-	-	95%	No	Instantaneous

Tabela 8 - Custo e eficiência das tecnologias EES [42]

Na tabela 2, observam-se as diferentes características dos diferentes tipos de ESS: PHS; CAES; SSCAES; HESS (Hybrid Electric Storage System); BESS (Batory Electric Storage System); FBES (Flow Batory Electric Storage); FESS; SCES e SMES, bem como as suas principais aplicações [9].

Applications			Applications requirement			ES Technologies											
			Power Rating (MW)	Discharge Duration (Hrs)	Response time	P H S	C A S	S E C A S	H E S S	B E S S	F E S S	F E S S	S C E S	S M E S			
Electric supply	Utility system	Provide system capacity/electricity supply capacity/base load investment deferral	1-1000	4-6	Mins	*	*										
	ISSO	Energy price arbitrage/time-shift/RE time-shift/load leveling and peak shaving	10-1000	2-10	Mins	*	*		*	*	*						
Ancillary Services		Load following/provide spin & non spin reserves/Electric supply reserve capacity/conventional spinning reserve/Tertiary Regulation	10-1000	2-4	Mins	*	*	*	*	*	*						
		Fast response spinning reserve/secondary regulation	10-1000	1-2	<30Secs	*	*	*	*	*	*						
		Provide voltage & frequency regulation/Area regulation/Primary Regulation	1-1000	15-30Mins	Immediate				*	*	*	*					*
		Provide Black-start and ramp/Power system start up	100-1000	1-6	Secs	*	*		*	*	*						
RE integration	Utility system	RE integration (seasonally output shifting/Renewable capacity firming/renewable Back-up	0,0001-400	2-4	Mins	*	*	*	*	*	*						
		RE integration (daily output shifting)/Renewable generation grid integration/ load leveling.	0,2-400	1-6	Mins	*	*	*	*	*	*						
		Centralized RE integration (smoothing)/renewable generation grid integration (short duration)/ fluctuation suppression	0,2-400	10 Secs-15Secs	Sec-Mins		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Grid System	Transmission	Transmission congestion relief/Defer Transmission investment/transmission Upgrade Deferral	0,25-100	2-6	Mins	*	*	*	*	*	*						
	Distribution	Reduce Outage Frequency – Duration/Electric Service Reliability/UPS	0,002-10	4-10	Sec-Mins			*	*	*	*	*					
		Defer Distribution Investment/Distribution Upgrade Deferral	0,25-10	2-6	Mins			*	*	*	*						
		Provide voltage support grid stabilization/	10-100	>15Mins	<1/4 Cycle	*		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

		transmission support/ voltage control support															
Customer	End-user	Improve power reliability/Electric service reliability/ UPS	0,002-10	5Mins-2	<1/4 Cycle				*	*	*	*	*				
		Improve power quality/electric service power quality/ transit and end use ride through oscillation damping	0,002-10	10Sec-15Mins	<1/4 Cycle				*	*	*	*	*	*			

Tabela 9 – Aplicações dos diferentes ESS [9]

ANEXO C

Tabelas de dados referentes ao caso de estudo

Tabela 10 - Dados de produção de eólica e fotovoltaica a nível nacional e preços do mercado diário para o dia 9 de setembro de 2017

Hora	Preço (€/MWh)	Eólica (MW)	PV (MW)	Preço de Venda (€/MWh)
00:00	61,59	2738,1	0	55,431
00:15	61,59	2751,4	0	55,431
00:30	61,59	2796,7	0	55,431
00:45	61,59	2890,4	0	55,431
01:00	59,75	2936,5	0	53,775
01:15	59,75	2964,7	0	53,775
01:30	59,75	2989,4	0	53,775
01:45	59,75	2925,9	0	53,775
02:00	57,69	2884,2	0	51,921
02:15	57,69	3020	0	51,921
02:30	57,69	3071,2	0	51,921
02:45	57,69	3072,8	0	51,921
03:00	53,01	3138,4	0	47,709
03:15	53,01	3148,6	0	47,709
03:30	53,01	3162,1	0	47,709
03:45	53,01	3242,4	0	47,709
04:00	49,57	3265,7	0	44,613
04:15	49,57	3271,3	0	44,613
04:30	49,57	3281,9	0	44,613
04:45	49,57	3297,1	0	44,613
05:00	51	3289,6	0	45,9
05:15	51	3238	0	45,9
05:30	51	3235,2	0	45,9
05:45	51	3194,1	0	45,9
06:00	56,65	3193	0	50,985
06:15	56,65	3199,7	0	50,985
06:30	56,65	3177,3	0	50,985
06:45	56,65	3156,2	0	50,985
07:00	58,7	3142	0	52,83
07:15	58,7	3123,6	0,4	52,83
07:30	58,7	3091,2	3,9	52,83
07:45	58,7	3038,1	12,9	52,83
08:00	59,9	2992,4	22,1	53,91
08:15	59,9	2939,1	39,1	53,91
08:30	59,9	2862,3	57	53,91

08:45	59,9	2886,8	66,2	53,91
09:00	59,9	2920,2	77,8	53,91
09:15	59,9	2891,3	93,2	53,91
09:30	59,9	2816,9	109,1	53,91
09:45	59,9	2818,5	116,9	53,91
10:00	58,51	2909	121	52,659
10:15	58,51	2983,7	145,9	52,659
10:30	58,51	3038,4	165	52,659
10:45	58,51	3116,1	193,4	52,659
11:00	57,45	3139,9	217,5	51,705
11:15	57,45	3188,6	228	51,705
11:30	57,45	3227	243	51,705
11:45	57,45	3226,5	250,9	51,705
12:00	55,9	3203	300,7	50,31
12:15	55,9	3185	292,5	50,31
12:30	55,9	3219,6	313	50,31
12:45	55,9	3250,6	323,3	50,31
13:00	55,83	3299,7	337,2	50,247
13:15	55,83	3295,5	346,5	50,247
13:30	55,83	3331,1	347,1	50,247
13:45	55,83	3375,4	354,4	50,247
14:00	53,56	3405	344	48,204
14:15	53,56	3432,1	343,1	48,204
14:30	53,56	3455,6	339,5	48,204
14:45	53,56	3480,5	336,1	48,204
15:00	50,86	3546	331	45,774
15:15	50,86	3579,4	324,8	45,774
15:30	50,86	3621,9	308,7	45,774
15:45	50,86	3646,1	298,7	45,774
16:00	50,09	3652,3	291,6	45,081
16:15	50,09	3586,7	273,6	45,081
16:30	50,09	3559,6	255,8	45,081
16:45	50,09	3475,7	241,4	45,081
17:00	52,17	3451,3	215,3	46,953
17:15	52,17	3469,5	201,2	46,953
17:30	52,17	3499,3	178,8	46,953
17:45	52,17	3457,9	151,1	46,953
18:00	57,45	3407,4	133,2	51,705
18:15	57,45	3385,1	104,7	51,705
18:30	57,45	3331,8	80,4	51,705
18:45	57,45	3369,1	49,8	51,705
19:00	59,75	3309,6	24,3	53,775
19:15	59,75	3228,8	9,1	53,775
19:30	59,75	3182,2	2,1	53,775
19:45	59,75	3113,8	0	53,775
20:00	60,82	2995,6	0	54,738

20:15	60,82	2903,1	0	54,738
20:30	60,82	2863,1	0	54,738
20:45	60,82	2849,8	0	54,738
21:00	60,01	2821,5	0	54,009
21:15	60,01	2753,6	0	54,009
21:30	60,01	2663,4	0	54,009
21:45	60,01	2533,9	0	54,009
22:00	59	2489,6	0	53,1
22:15	59	2478,5	0	53,1
22:30	59	2429,3	0	53,1
22:45	59	2397,1	0	53,1
23:00	57,69	2426,1	0	51,921
23:15	57,69	2395,6	0	51,921
23:30	57,69	2335,9	0	51,921
23:45	57,69	2315,2	0	51,921

Tabela 11 - Dados de produção de eólica e fotovoltaica a nível nacional e preços do mercado diário para o dia 24 de janeiro de 2018

Hora	Preço (€/MWh)	Eólica (MW)	PV (MW)	Preço de Venda (€/MWh)
00:00	61,59	427,5	0	55,431
00:15	61,59	414,5	0	55,431
00:30	61,59	395,6	0	55,431
00:45	61,59	375,9	0	55,431
01:00	59,75	377,5	0	53,775
01:15	59,75	390,3	0	53,775
01:30	59,75	404,2	0	53,775
01:45	59,75	408,6	0	53,775
02:00	57,69	412,6	0	51,921
02:15	57,69	409,5	0	51,921
02:30	57,69	411,8	0	51,921
02:45	57,69	388,1	0	51,921
03:00	53,01	361,7	0	47,709
03:15	53,01	337,2	0	47,709
03:30	53,01	320,2	0	47,709
03:45	53,01	315,8	0	47,709
04:00	49,57	320,6	0	44,613
04:15	49,57	311	0	44,613
04:30	49,57	304,6	0	44,613
04:45	49,57	300,5	0	44,613
05:00	51	311,4	0	45,9
05:15	51	313,4	0	45,9
05:30	51	301,5	0	45,9
05:45	51	294,5	0	45,9
06:00	56,65	285,7	0	50,985
06:15	56,65	288	0	50,985

06:30	56,65	294,7	0	50,985
06:45	56,65	300,2	0	50,985
07:00	58,7	308	0	52,83
07:15	58,7	312,4	0	52,83
07:30	58,7	326,1	0	52,83
07:45	58,7	336,1	0,4	52,83
08:00	59,9	365,2	3,9	53,91
08:15	59,9	375,2	12,1	53,91
08:30	59,9	354,1	25,1	53,91
08:45	59,9	324	37,2	53,91
09:00	59,9	291,6	53,3	53,91
09:15	59,9	263,9	63,7	53,91
09:30	59,9	243,9	77,3	53,91
09:45	59,9	241,4	87,7	53,91
10:00	58,51	242	99,9	52,659
10:15	58,51	241,3	105,9	52,659
10:30	58,51	231,1	117,7	52,659
10:45	58,51	226,1	134,1	52,659
11:00	57,45	245,1	140,6	51,705
11:15	57,45	246,4	149,5	51,705
11:30	57,45	239,9	158,9	51,705
11:45	57,45	236,9	169,3	51,705
12:00	55,9	233,7	170,8	50,31
12:15	55,9	239,6	169,8	50,31
12:30	55,9	256,2	173,9	50,31
12:45	55,9	286,3	179,9	50,31
13:00	55,83	291	182,8	50,247
13:15	55,83	310,8	179,5	50,247
13:30	55,83	334,9	179,6	50,247
13:45	55,83	318,1	179,5	50,247
14:00	53,56	320,4	177,1	48,204
14:15	53,56	326	173,4	48,204
14:30	53,56	355,1	167,2	48,204
14:45	53,56	360,5	144,6	48,204
15:00	50,86	363	132,6	45,774
15:15	50,86	382,4	120	45,774
15:30	50,86	397,5	113	45,774
15:45	50,86	414,5	102,9	45,774
16:00	50,09	437,6	86,1	45,081
16:15	50,09	454,4	68,1	45,081
16:30	50,09	460,9	46,4	45,081
16:45	50,09	471,5	28,9	45,081
17:00	52,17	525,3	14,3	46,953
17:15	52,17	585,4	5	46,953
17:30	52,17	636,3	0,6	46,953
17:45	52,17	674,9	0	46,953

18:00	57,45	694,5	0	51,705
18:15	57,45	723,3	0	51,705
18:30	57,45	779,1	0	51,705
18:45	57,45	837	0	51,705
19:00	59,75	869,2	0	53,775
19:15	59,75	902,5	0	53,775
19:30	59,75	953,5	0	53,775
19:45	59,75	1006,4	0	53,775
20:00	60,82	1030,4	0	54,738
20:15	60,82	1066,3	0	54,738
20:30	60,82	1074,1	0	54,738
20:45	60,82	1079,9	0	54,738
21:00	60,01	1113,2	0	54,009
21:15	60,01	1138,6	0	54,009
21:30	60,01	1180,4	0	54,009
21:45	60,01	1221,8	0	54,009
22:00	59	1229,6	0	53,1
22:15	59	1192,6	0	53,1
22:30	59	1197,1	0	53,1
22:45	59	1213,8	0	53,1
23:00	57,69	1283,8	0	51,921
23:15	57,69	1304,4	0	51,921
23:30	57,69	1321,4	0	51,921
23:45	57,69	1409	0	51,921

Tabela 12 - Dados de produção de eólica e fotovoltaica a nível nacional e preços do mercado diário para o dia 12 de agosto de 2017

Hora	Preço (€/MWh)	Eólica (MW)	PV (MW)	Preço de Venda (€/MWh)
00:00	60,07	1001,5	0	54,063
00:15	60,07	995,7	0	54,063
00:30	60,07	982,3	0	54,063
00:45	60,07	964,3	0	54,063
01:00	59,69	930,1	0	53,721
01:15	59,69	909,3	0	53,721
01:30	59,69	872	0	53,721
01:45	59,69	852	0	53,721
02:00	58,94	820	0	53,046
02:15	58,94	806,7	0	53,046
02:30	58,94	801,3	0	53,046
02:45	58,94	812,5	0	53,046
03:00	58,69	832,6	0	52,821
03:15	58,69	859,3	0	52,821
03:30	58,69	886,4	0	52,821
03:45	58,69	893	0	52,821
04:00	58,69	879,9	0	52,821

04:15	58,69	859,7	0	52,821
04:30	58,69	843	0	52,821
04:45	58,69	825	0	52,821
05:00	58,69	798,1	0	52,821
05:15	58,69	780	0	52,821
05:30	58,69	754,7	0	52,821
05:45	58,69	768,1	0	52,821
06:00	58,69	793,2	0	52,821
06:15	58,69	809,1	0	52,821
06:30	58,69	836,3	0	52,821
06:45	58,69	875,3	0,8	52,821
07:00	66,08	907,2	6,1	59,472
07:15	66,08	911	15,7	59,472
07:30	66,08	903,9	32,7	59,472
07:45	66,08	902,1	55,5	59,472
08:00	68,2	872,9	82,2	61,38
08:15	68,2	825,5	108,2	61,38
08:30	68,2	778,7	135,9	61,38
08:45	68,2	732,4	160,7	61,38
09:00	69,94	677,6	182,8	62,946
09:15	69,94	616,6	206,4	62,946
09:30	69,94	564,5	225,2	62,946
09:45	69,94	479,4	243,9	62,946
10:00	70,51	410,4	261,5	63,459
10:15	70,51	345,4	277	63,459
10:30	70,51	287,9	289,5	63,459
10:45	70,51	250,3	300,1	63,459
11:00	70,62	217,7	310,6	63,558
11:15	70,62	193,2	317,5	63,558
11:30	70,62	168,4	324	63,558
11:45	70,62	145,3	330,6	63,558
12:00	71,01	127,8	335,5	63,909
12:15	71,01	125,2	339,7	63,909
12:30	71,01	122,2	340,4	63,909
12:45	71,01	127,5	338,3	63,909
13:00	67,9	136,5	347,8	61,11
13:15	67,9	138,8	347,9	61,11
13:30	67,9	136,4	347,4	61,11
13:45	67,9	144,8	347,9	61,11
14:00	63,56	167,2	347,3	57,204
14:15	63,56	193,3	346,1	57,204
14:30	63,56	218,9	341,8	57,204
14:45	63,56	249,5	338,4	57,204
15:00	62,2	296,1	331,6	55,98
15:15	62,2	330,3	324,5	55,98
15:30	62,2	360,2	317,4	55,98

15:45	62,2	408,8	313,2	55,98
16:00	65,36	461,4	297,7	58,824
16:15	65,36	506,6	286,9	58,824
16:30	65,36	540,9	273,5	58,824
16:45	65,36	570,9	261,4	58,824
17:00	71,69	605,8	247,9	64,521
17:15	71,69	624,5	230,6	64,521
17:30	71,69	702,2	215	64,521
17:45	71,69	758,5	193,4	64,521
18:00	78,66	838,3	173,8	70,794
18:15	78,66	890,4	149,5	70,794
18:30	78,66	901,1	125,3	70,794
18:45	78,66	926,3	96,4	70,794
19:00	79,45	908	71	71,505
19:15	79,45	906,6	49,3	71,505
19:30	79,45	893,3	28,4	71,505
19:45	79,45	884,9	13,2	71,505
20:00	80,59	931,3	5,4	72,531
20:15	80,59	968,3	0,6	72,531
20:30	80,59	1038,5	0	72,531
20:45	80,59	1088,3	0	72,531
21:00	80	1094	0	72
21:15	80	1103,3	0	72
21:30	80	1085,1	0	72
21:45	80	1039,8	0	72
22:00	74,26	984,6	0	66,834
22:15	74,26	942,4	0	66,834
22:30	74,26	905,7	0	66,834
22:45	74,26	866,8	0	66,834
23:00	66,87	821,4	0	60,183
23:15	66,87	802,4	0	60,183
23:30	66,87	789,9	0	60,183
23:45	66,87	766	0	60,183

Tabela 13 - Dados de produção de eólica e fotovoltaica da VPP e preços do mercado diário para o dia 9 de setembro de 2017

Hora	Preço (€/MWh)	Eólica (MW)	PV (MW)	Preço de Venda (€/MWh)
00:00	47,25	2,0891703	0	42,525
00:15	47,25	2,0993182	0	42,525
00:30	47,25	2,1338821	0	42,525
00:45	47,25	2,2053752	0	42,525
01:00	46,54	2,2405495	0	41,886
01:15	46,54	2,2620661	0	41,886
01:30	46,54	2,2809122	0	41,886
01:45	46,54	2,2324617	0	41,886

02:00	42,7	2,2006446	0	38,43
02:15	42,7	2,30426	0	38,43
02:30	42,7	2,3433256	0	38,43
02:45	42,7	2,3445464	0	38,43
03:00	41,9	2,3945992	0	37,71
03:15	41,9	2,4023818	0	37,71
03:30	41,9	2,4126823	0	37,71
03:45	41,9	2,4739512	0	37,71
04:00	38,45	2,4917291	0	34,605
04:15	38,45	2,4960019	0	34,605
04:30	38,45	2,5040897	0	34,605
04:45	38,45	2,5156873	0	34,605
05:00	38,04	2,5099648	0	34,236
05:15	38,04	2,470594	0	34,236
05:30	38,04	2,4684576	0	34,236
05:45	38,04	2,4370983	0	34,236
06:00	37,2	2,436259	0	33,48
06:15	37,2	2,4413711	0	33,48
06:30	37,2	2,4242799	0	33,48
06:45	37,2	2,4081806	0	33,48
07:00	38	2,397346	0	34,2
07:15	38	2,3833068	0,001101	34,2
07:30	38	2,3585856	0,010737	34,2
07:45	38	2,3180703	0,035514	34,2
08:00	38,2	2,2832012	0,060841	34,38
08:15	38,2	2,2425333	0,107642	34,38
08:30	38,2	2,1839349	0,156921	34,38
08:45	38,2	2,2026284	0,182249	34,38
09:00	43,95	2,2281126	0,214183	39,555
09:15	43,95	2,2060619	0,25658	39,555
09:30	43,95	2,1492947	0,300352	39,555
09:45	43,95	2,1505155	0,321826	39,555
10:00	46,3	2,219567	0,333113	41,67
10:15	46,3	2,2765631	0,401663	41,67
10:30	46,3	2,3182992	0,454245	41,67
10:45	46,3	2,3775843	0,53243	41,67
11:00	43,4	2,3957437	0,598778	39,06
11:15	43,4	2,4329018	0,627684	39,06
11:30	43,4	2,462201	0,668979	39,06
11:45	43,4	2,4618195	0,690728	39,06
12:00	42,01	2,443889	0,827827	37,809
12:15	42,01	2,430155	0,805253	37,809
12:30	42,01	2,4565548	0,861689	37,809
12:45	42,01	2,4802078	0,890045	37,809
13:00	39,54	2,5176711	0,928312	35,586
13:15	39,54	2,5144665	0,953915	35,586

13:30	39,54	2,5416293	0,955566	35,586
13:45	39,54	2,5754302	0,975663	35,586
14:00	37,45	2,598015	0,947032	33,705
14:15	37,45	2,6186923	0,944554	33,705
14:30	37,45	2,6366228	0,934644	33,705
14:45	37,45	2,6556215	0,925283	33,705
15:00	34,83	2,705598	0,911243	31,347
15:15	34,83	2,7310822	0,894174	31,347
15:30	34,83	2,7635097	0,849851	31,347
15:45	34,83	2,7819743	0,822321	31,347
16:00	33,59	2,7867049	0,802775	30,231
16:15	33,59	2,7366521	0,753221	30,231
16:30	33,59	2,7159748	0,704217	30,231
16:45	33,59	2,6519591	0,664574	30,231
17:00	34,54	2,6333419	0,592721	31,086
17:15	34,54	2,6472285	0,553904	31,086
17:30	34,54	2,6699659	0,492236	31,086
17:45	34,54	2,6383777	0,415978	31,086
18:00	35,55	2,5998462	0,3667	31,995
18:15	35,55	2,5828313	0,288239	31,995
18:30	35,55	2,5421634	0,221341	31,995
18:45	35,55	2,5706233	0,137099	31,995
19:00	38,45	2,5252248	0,066898	34,605
19:15	38,45	2,4635744	0,025052	34,605
19:30	38,45	2,4280186	0,005781	34,605
19:45	38,45	2,3758294	0	34,605
20:00	41,53	2,2856428	0	37,377
20:15	41,53	2,2150653	0	37,377
20:30	41,53	2,1845453	0	37,377
20:45	41,53	2,1743974	0	37,377
21:00	48,95	2,1528045	0	44,055
21:15	48,95	2,1009968	0	44,055
21:30	48,95	2,0321742	0	44,055
21:45	48,95	1,9333657	0	44,055
22:00	42,9	1,8995648	0	38,61
22:15	42,9	1,8910955	0	38,61
22:30	42,9	1,8535559	0	38,61
22:45	42,9	1,8289873	0	38,61
23:00	38,5	1,8511143	0	34,65
23:15	38,5	1,8278428	0	34,65
23:30	38,5	1,7822917	0	34,65
23:45	38,5	1,7664976	0	34,65

Tabela 14 - Dados de produção de eólica e fotovoltaica da VPP e preços do mercado diário para o dia 24 de janeiro de 2018

Hora	Preço (€/MWh)	Eólica (MW)	PV (MW)	Preço de Venda (€/MWh)
00:00	61,59	0,3261825	0	55,431
00:15	61,59	0,3162635	0	55,431
00:30	61,59	0,3018428	0	55,431
00:45	61,59	0,2868117	0	55,431
01:00	59,75	0,2880325	0	53,775
01:15	59,75	0,2977989	0	53,775
01:30	59,75	0,3084046	0	53,775
01:45	59,75	0,3117618	0	53,775
02:00	57,69	0,3148138	0	51,921
02:15	57,69	0,3124485	0	51,921
02:30	57,69	0,3142034	0	51,921
02:45	57,69	0,2961203	0	51,921
03:00	53,01	0,2759771	0	47,709
03:15	53,01	0,2572836	0	47,709
03:30	53,01	0,2443126	0	47,709
03:45	53,01	0,2409554	0	47,709
04:00	49,57	0,2446178	0	44,613
04:15	49,57	0,237293	0	44,613
04:30	49,57	0,2324098	0	44,613
04:45	49,57	0,2292815	0	44,613
05:00	51	0,2375982	0	45,9
05:15	51	0,2391242	0	45,9
05:30	51	0,2300445	0	45,9
05:45	51	0,2247035	0	45,9
06:00	56,65	0,2179891	0	50,985
06:15	56,65	0,219744	0	50,985
06:30	56,65	0,2248561	0	50,985
06:45	56,65	0,2290526	0	50,985
07:00	58,7	0,235004	0	52,83
07:15	58,7	0,2383612	0	52,83
07:30	58,7	0,2488143	0	52,83
07:45	58,7	0,2564443	0,001101	52,83
08:00	59,9	0,2786476	0,010737	53,91
08:15	59,9	0,2862776	0,033311	53,91
08:30	59,9	0,2701783	0,0691	53,91
08:45	59,9	0,247212	0,102412	53,91
09:00	59,9	0,2224908	0,146735	53,91
09:15	59,9	0,2013557	0,175366	53,91
09:30	59,9	0,1860957	0,212807	53,91
09:45	59,9	0,1841882	0,241438	53,91
10:00	58,51	0,184646	0,275025	52,659
10:15	58,51	0,1841119	0,291543	52,659
10:30	58,51	0,1763293	0,324028	52,659

10:45	58,51	0,1725143	0,369177	52,659
11:00	57,45	0,1870113	0,387072	51,705
11:15	57,45	0,1880032	0,411574	51,705
11:30	57,45	0,1830437	0,437452	51,705
11:45	57,45	0,1807547	0,466083	51,705
12:00	55,9	0,1783131	0,470212	50,31
12:15	55,9	0,1828148	0,467459	50,31
12:30	55,9	0,1954806	0,478747	50,31
12:45	55,9	0,2184469	0,495265	50,31
13:00	55,83	0,222033	0,503248	50,247
13:15	55,83	0,2371404	0,494164	50,247
13:30	55,83	0,2555287	0,494439	50,247
13:45	55,83	0,2427103	0,494164	50,247
14:00	53,56	0,2444652	0,487556	48,204
14:15	53,56	0,248738	0,47737	48,204
14:30	53,56	0,2709413	0,460302	48,204
14:45	53,56	0,2750615	0,398084	48,204
15:00	50,86	0,276969	0,365048	45,774
15:15	50,86	0,2917712	0,33036	45,774
15:30	50,86	0,3032925	0,311089	45,774
15:45	50,86	0,3162635	0,283284	45,774
16:00	50,09	0,3338888	0,237033	45,081
16:15	50,09	0,3467072	0,187479	45,081
16:30	50,09	0,3516667	0,127739	45,081
16:45	50,09	0,3597545	0,079562	45,081
17:00	52,17	0,4008039	0,039368	46,953
17:15	52,17	0,4466602	0,013765	46,953
17:30	52,17	0,4854969	0,001652	46,953
17:45	52,17	0,5149487	0	46,953
18:00	57,45	0,5299035	0	51,705
18:15	57,45	0,5518779	0	51,705
18:30	57,45	0,5944533	0	51,705
18:45	57,45	0,638631	0	51,705
19:00	59,75	0,6631996	0	53,775
19:15	59,75	0,6886075	0	53,775
19:30	59,75	0,7275205	0	53,775
19:45	59,75	0,7678832	0	53,775
20:00	60,82	0,7861952	0	54,738
20:15	60,82	0,8135869	0	54,738
20:30	60,82	0,8195383	0	54,738
20:45	60,82	0,8239637	0	54,738
21:00	60,01	0,8493716	0	54,009
21:15	60,01	0,8687518	0	54,009
21:30	60,01	0,9006452	0	54,009
21:45	60,01	0,9322334	0	54,009
22:00	59	0,9381848	0	53,1

22:15	59	0,9099538	0	53,1
22:30	59	0,9133873	0	53,1
22:45	59	0,9261294	0	53,1
23:00	57,69	0,9795394	0	51,921
23:15	57,69	0,9952572	0	51,921
23:30	57,69	1,0082282	0	51,921
23:45	57,69	1,075067	0	51,921

Tabela 15 - Dados de produção de eólica e fotovoltaica da VPP e preços do mercado diário para o dia 12 de agosto de 2017

Hora	Preço (€/MWh)	Eólica (MW)	PV (MW)	Preço de Venda (€/MWh)
00:00	60,07	0,7641445	0	54,063
00:15	60,07	0,7597191	0	54,063
00:30	60,07	0,7494949	0	54,063
00:45	60,07	0,7357609	0	54,063
01:00	59,69	0,7096663	0	53,721
01:15	59,69	0,6937959	0	53,721
01:30	59,69	0,665336	0	53,721
01:45	59,69	0,650076	0	53,721
02:00	58,94	0,62566	0	53,046
02:15	58,94	0,6155121	0	53,046
02:30	58,94	0,6113919	0	53,046
02:45	58,94	0,6199375	0	53,046
03:00	58,69	0,6352738	0	52,821
03:15	58,69	0,6556459	0	52,821
03:30	58,69	0,6763232	0	52,821
03:45	58,69	0,681359	0	52,821
04:00	58,69	0,6713637	0	52,821
04:15	58,69	0,6559511	0	52,821
04:30	58,69	0,643209	0	52,821
04:45	58,69	0,629475	0	52,821
05:00	58,69	0,6089503	0	52,821
05:15	58,69	0,59514	0	52,821
05:30	58,69	0,5758361	0	52,821
05:45	58,69	0,5860603	0	52,821
06:00	58,69	0,6052116	0	52,821
06:15	58,69	0,6173433	0	52,821
06:30	58,69	0,6380969	0	52,821
06:45	58,69	0,6678539	0,002202	52,821
07:00	66,08	0,6921936	0,016793	59,472
07:15	66,08	0,695093	0,043222	59,472
07:30	66,08	0,6896757	0,090023	59,472
07:45	66,08	0,6883023	0,152792	59,472
08:00	68,2	0,6660227	0,226297	61,38
08:15	68,2	0,6298565	0,297875	61,38

08:30	68,2	0,5941481	0,374133	61,38
08:45	68,2	0,5588212	0,442407	61,38
09:00	69,94	0,5170088	0,503248	62,946
09:15	69,94	0,4704658	0,568219	62,946
09:30	69,94	0,4307135	0,619976	62,946
09:45	69,94	0,3657822	0,671457	62,946
10:00	70,51	0,3131352	0,71991	63,459
10:15	70,51	0,2635402	0,762581	63,459
10:30	70,51	0,2196677	0,796994	63,459
10:45	70,51	0,1909789	0,826175	63,459
11:00	70,62	0,1661051	0,855082	63,558
11:15	70,62	0,1474116	0,874078	63,558
11:30	70,62	0,1284892	0,891972	63,558
11:45	70,62	0,1108639	0,910142	63,558
12:00	71,01	0,0975114	0,923632	63,909
12:15	71,01	0,0955276	0,935194	63,909
12:30	71,01	0,0932386	0,937121	63,909
12:45	71,01	0,0972825	0,93134	63,909
13:00	67,9	0,1041495	0,957493	61,11
13:15	67,9	0,1059044	0,957769	61,11
13:30	67,9	0,1040732	0,956392	61,11
13:45	67,9	0,1104824	0,957769	61,11
14:00	63,56	0,1275736	0,956117	57,204
14:15	63,56	0,1474879	0,952813	57,204
14:30	63,56	0,1670207	0,940975	57,204
14:45	63,56	0,1903685	0,931615	57,204
15:00	62,2	0,2259243	0,912895	55,98
15:15	62,2	0,2520189	0,893349	55,98
15:30	62,2	0,2748326	0,873802	55,98
15:45	62,2	0,3119144	0,86224	55,98
16:00	65,36	0,3520482	0,819568	58,824
16:15	65,36	0,3865358	0,789836	58,824
16:30	65,36	0,4127067	0,752946	58,824
16:45	65,36	0,4355967	0,719634	58,824
17:00	71,69	0,4622254	0,682469	64,521
17:15	71,69	0,4764935	0,634842	64,521
17:30	71,69	0,5357786	0,591895	64,521
17:45	71,69	0,5787355	0,53243	64,521
18:00	78,66	0,6396229	0,478471	70,794
18:15	78,66	0,6793752	0,411574	70,794
18:30	78,66	0,6875393	0,344951	70,794
18:45	78,66	0,7067669	0,265389	70,794
19:00	79,45	0,692804	0,195463	71,505
19:15	79,45	0,6917358	0,135723	71,505
19:30	79,45	0,6815879	0,078185	71,505
19:45	79,45	0,6751787	0,03634	71,505

20:00	80,59	0,7105819	0,014866	72,531
20:15	80,59	0,7388129	0,001652	72,531
20:30	80,59	0,7923755	0	72,531
20:45	80,59	0,8303729	0	72,531
21:00	80	0,834722	0	72
21:15	80	0,8418179	0	72
21:30	80	0,8279313	0	72
21:45	80	0,7933674	0	72
22:00	74,26	0,7512498	0	66,834
22:15	74,26	0,7190512	0	66,834
22:30	74,26	0,6910491	0	66,834
22:45	74,26	0,6613684	0	66,834
23:00	66,87	0,6267282	0	60,183
23:15	66,87	0,6122312	0	60,183
23:30	66,87	0,6026937	0	60,183
23:45	66,87	0,584458	0	60,183

Tabela 16 - Resultados da simulação para o dia 9 de setembro de 2017

Hora	Produção (MWh)	Lucro (€)	Potência Bateria (MW)	Energia Bateria (MWh)	Despesa (€)	Energia Importada (MWh/€)
00:00	2,0891703	22,21049	0	0,9999792	0	0
00:15	2,0993182	22,31838	0	0,9999583	0	0
00:30	2,1338821	22,68583	0	0,9999375	0	0
00:45	2,2053752	23,4459	0	0,9999167	0	0
01:00	2,2405495	23,46191	0	0,9998958	0	0
01:15	2,2620661	23,68723	0	0,999875	0	0
01:30	2,2809122	23,88457	0	0,9998542	0	0
01:45	2,2324617	23,37722	0	0,9998333	0	0
02:00	2,2006446	21,14269	0	0,9998125	0	0
02:15	2,30426	0	2,3	1,5384333	0	0
02:30	2,3433256	22,5135	0	1,5384012	0	0
02:45	2,3445464	22,52523	0	1,5383692	0	0
03:00	2,3945992	0	2,39	2,0981068	0	0
03:15	2,4023818	22,64845	0	2,098063	0	0
03:30	2,4126823	46,31431	-2,5	1,4730324	0	0
03:45	2,4739512	41,16122	1,89	1	0	0
04:00	2,4917291	21,55657	0	0,9999792	0	0
04:15	2,4960019	21,59354	0	0,9999583	0	0
04:30	2,5040897	21,66351	0	0,9999375	0	0
04:45	2,5156873	21,76384	0	0,9999167	0	0
05:00	2,5099648	0,085289	2,5	1,5842587	0	0
05:15	2,470594	21,14581	0	1,5842257	0	0
05:30	2,4684576	21,12753	0	1,5841927	0	0
05:45	2,4370983	20,85912	0	1,5841596	0	0
06:00	2,436259	0	2,44	2,1536352	0	0

06:15	2,4413711	0	2,44	2,7243057	0	0
06:30	2,4242799	0	2,42	3,2909811	0	0
06:45	2,4081806	0	2,41	3,8538933	0	0
07:00	2,397346	20,49731	0	3,853813	0	0
07:15	2,384408	0	2,38	4,4111684	0	0
07:30	2,3693223	0,119665	2,51	5	0	0
07:45	2,353584	20,12314	0	5	0	0
08:00	2,3440425	20,14705	0	5	0	0
08:15	2,3501756	20,19976	0	5	0	0
08:30	2,3408559	20,11966	0	5	0	0
08:45	2,384877	20,49802	0	5	0	0
09:00	2,442296	24,15125	0	5	0	0
09:15	2,4626415	24,35245	0	5	0	0
09:30	2,449647	24,22395	0	5	0	0
09:45	2,4723412	24,44836	0	5	0	0
10:00	2,55268	26,59254	0	4,9998958	0	0
10:15	2,6782258	27,90042	0	4,9997917	0	0
10:30	2,7725442	54,92673	-2,5	4,3747005	0	0
10:45	2,9100145	56,35883	-2,5	3,7496224	0	0
11:00	2,9945212	53,654	-2,5	3,1245573	0	0
11:15	3,0605858	54,29912	-2,5	2,4995052	0	0
11:30	3,13118	54,98847	-2,5	1,8744662	0	0
11:45	3,1525472	30,78462	0	1,8744271	0	0
12:00	3,2717161	54,5557	-2,5	1,2494011	0	0
12:15	3,2354075	30,58188	0	1,2493751	0	0
12:30	3,3182438	40,79349	1	1	0	0
12:45	3,3702527	31,85647	0	0,9999792	0	0
13:00	3,4459827	30,65719	0	0,9999583	0	0
13:15	3,468381	30,85645	0	0,9999375	0	0
13:30	3,4971956	31,1128	0	0,9999167	0	0
13:45	3,5510934	31,5923	0	0,9998958	0	0
14:00	3,545047	29,87145	0	0,999875	0	0
14:15	3,5632466	30,02481	0	0,9998542	0	0
14:30	3,5712663	30,09238	0	0,9998333	0	0
14:45	3,5809048	30,1736	0	0,9998125	0	0
15:00	3,616841	28,34428	0	0,9997917	0	0
15:15	3,6252566	28,41023	0	0,9997709	0	0
15:30	3,6133608	28,31701	0	0,99975	0	0
15:45	3,6042954	28,24596	0	0,9997292	0	0
16:00	3,5894797	8,234015	2,5	1,5840712	0	0
16:15	3,4898729	7,481212	2,5	2,168401	0	0
16:30	3,4201922	6,954583	2,5	2,7527187	0	0
16:45	3,3165333	6,171155	2,5	3,3370242	0	0
17:00	3,2260628	25,07135	0	3,3369546	0	0
17:15	3,2011321	5,448848	2,5	3,9212479	0	0
17:30	3,1622023	5,146305	2,5	4,5055291	0	0

17:45	3,054356	8,365804	2,11	4,9998958	0	0
18:00	2,9665458	23,72866	0	4,9997917	0	0
18:15	2,8710704	22,96497	0	4,9996875	0	0
18:30	2,7635046	22,10458	0	4,9995833	0	0
18:45	2,7077227	21,64507	0	4,9998958	0	0
19:00	2,5921227	22,4251	0	4,9997917	0	0
19:15	2,4886267	21,52252	0	5	0	0
19:30	2,4337999	21,05541	0	5	0	0
19:45	2,3758294	20,55389	0	5	0	0
20:00	2,2856428	21,35762	0	5	0	0
20:15	2,2150653	20,69812	0	5	0	0
20:30	2,1845453	20,41294	0	5	0	0
20:45	2,1743974	20,31811	0	5	0	0
21:00	2,1528045	51,24483	-2,5	4,3749089	0	0
21:15	2,1009968	50,67423	-2,5	3,7498307	0	0
21:30	2,0321742	49,91623	-2,5	3,1247656	0	0
21:45	1,9333657	48,82798	-2,5	2,4997136	0	0
22:00	1,8995648	18,33555	0	2,4996615	0	0
22:15	1,8910955	42,38505	-2,5	1,8746224	0	0
22:30	1,8535559	42,0227	-2,5	1,2495964	0	0
22:45	1,8289873	27,29122	1	1	0	0
23:00	1,8511143	16,03528	0	0,9999792	0	0
23:15	1,8278428	15,83369	0	0,9999583	0	0
23:30	1,7822917	15,4391	0	0,9999375	0	0
23:45	1,7664976	15,30229	0	0,9999167	0	0

Tabela 17 - Resultados da simulação para o dia 24 de janeiro de 2018

Hora	Produção (MWh)	Lucro (€)	Potência Bateria (MW)	Energia Bateria (MWh)	Despesa (€)	Energia Importada (MWh/€)
00:00	0,326183	4,520156	0	0,999979	0	0
00:15	0,316264	4,382701	0	0,999958	0	0
00:30	0,301843	4,182862	0	0,999938	0	0
00:45	0,286812	3,974565	0	0,999917	0	0
01:00	0,288033	3,872237	0	0,999896	0	0
01:15	0,297799	4,003534	0	0,999875	0	0
01:30	0,308405	4,146114	0	0,999854	0	0
01:45	0,311762	0	0,311762	1,072728	0	0
02:00	0,314814	4,086362	0	1,072706	0	0
02:15	0,312449	0	0,312449	1,145741	0	0
02:30	0,314203	4,078439	0	1,145717	0	0
02:45	0,29612	0	0,29612	1,214935	0	0

03:00	0,275977	0	0,275977	1,279445	0	0
03:15	0,257284	0	0,257284	1,339585	0	0
03:30	0,244313	0	0,244313	1,396693	0	0
03:45	0,240955	2,873935	0	1,396664	0	0
04:00	0,244618	-27,9498	2,5	1,981039	27,9498	0,563846
04:15	0,237293	-28,0406	2,5	2,565414	28,0406	0,565677
04:30	0,23241	-28,1011	2,5	3,149789	28,1011	0,566898
04:45	0,229282	-28,1399	2,5	3,734164	28,1399	0,56768
05:00	0,237598	0	0,237598	3,789702	0	0
05:15	0,239124	0	0,239124	3,845598	0	0
05:30	0,230045	0	0,230045	3,899371	0	0
05:45	0,224704	0	0,224704	3,951895	0	0
06:00	0,217989	0	0,217989	4,00285	0	0
06:15	0,219744	0	0,219744	4,054215	0	0
06:30	0,224856	2,866072	0	4,054131	0	0
06:45	0,229053	0	0,229053	4,107672	0	0
07:00	0,235004	3,103815	0	4,107586	0	0
07:15	0,238361	36,16691	-2,5	3,482514	0	0
07:30	0,248814	0	0,248814	3,540674	0	0
07:45	0,257546	36,42028	-2,5	2,915613	0	0
08:00	0,289384	3,900177	0	2,915553	0	0
08:15	0,319589	4,307259	0	2,915492	0	0
08:30	0,339279	0	0,339279	2,994798	0	0
08:45	0,349624	0	0,349624	3,076523	0	0
09:00	0,369226	38,66999	-2,5	2,451472	0	0
09:15	0,376722	5,077268	0	2,451421	0	0
09:30	0,398903	0	0,398903	2,544664	0	0
09:45	0,425626	39,43013	-2,5	1,919624	0	0
10:00	0,459671	6,05145	0	1,919584	0	0
10:15	0,475655	6,261874	0	1,919544	0	0
10:30	0,500357	6,58708	0	1,919504	0	0

10:45	0,541692	7,131234	0	1,919464	0	0
11:00	0,574083	7,420742	0	1,919424	0	0
11:15	0,599577	7,750278	0	1,919384	0	0
11:30	0,620495	8,020679	0	1,919344	0	0
11:45	0,646838	8,361185	0	1,919304	0	0
12:00	0,648526	8,156829	0	1,919264	0	0
12:15	0,650274	8,178824	0	1,919224	0	0
12:30	0,674227	0	0,674227	2,076825	0	0
12:45	0,713712	8,976708	0	2,076781	0	0
13:00	0,725281	0	0,725281	2,246316	0	0
13:15	0,731304	9,186457	0	2,246269	0	0
13:30	0,749968	0	0,749968	2,421574	0	0
13:45	0,736874	9,256424	0	2,421524	0	0
14:00	0,732022	8,821591	0	2,421473	0	0
14:15	0,726108	0	0,726108	2,591201	0	0
14:30	0,731243	0	0,731243	2,762129	0	0
14:45	0,673145	0	0,673145	2,919477	0	0
15:00	0,642017	0	0,642017	3,069548	0	0
15:15	0,622131	0	0,622131	3,214971	0	0
15:30	0,614382	0	0,614382	3,358583	0	0
15:45	0,599547	0	0,599547	3,498727	0	0
16:00	0,570922	0	0,570922	3,63218	0	0
16:15	0,534187	-24,6169	2,5	4,216555	24,6169	0,491453
16:30	0,479406	0	0,479406	4,328616	0	0
16:45	0,439316	0	0,439316	4,431307	0	0
17:00	0,440172	0	0,440172	4,534197	0	0
17:15	0,460425	0	0,460425	4,641821	0	0
17:30	0,487149	0	0,487149	4,755692	0	0
17:45	0,514949	0	0,514949	4,876061	0	0
18:00	0,529904	0,441417	0,527979	5	0	0
18:15	0,551878	7,133712	0	4,999896	0	0
18:30	0,594453	7,684052	0	4,999792	0	0
18:45	0,638631	8,244332	0,000887	5	0	0
19:00	0,6632	8,91589	0	5	0	0

19:15	0,688608	9,257467	0	4,999896	0	0
19:30	0,727521	9,775002	0,000444	5	0	0
19:45	0,767883	10,32323	0	5	0	0
20:00	0,786195	44,96994	-2,5	4,374909	0	0
20:15	0,813587	45,34478	-2,5	3,749831	0	0
20:30	0,819538	45,42622	-2,5	3,124766	0	0
20:45	0,823964	45,48678	-2,5	2,499714	0	0
21:00	0,849372	45,22405	-2,5	1,874674	0	0
21:15	0,868752	45,48573	-2,5	1,249648	0	0
21:30	0,900645	25,644	0,998594	1	0	0
21:45	0,932233	12,58725	0	0,999979	0	0
22:00	0,938185	12,4544	0	0,999958	0	0
22:15	0,909954	12,07964	0	0,999938	0	0
22:30	0,913387	12,12522	0	0,999917	0	0
22:45	0,926129	12,29437	0	0,999896	0	0
23:00	0,979539	0	0,979539	1,228863	0	0
23:15	0,995257	12,91869	0	1,228838	0	0
23:30	1,008228	13,08705	0	1,228812	0	0
23:45	1,075067	25,83478	0,915248	1	0	0

Tabela 18 - Resultados da simulação para o dia 12 de agosto de 2017

Hora	Produção (MWh)	Lucro (€)	Potência Bateria (MW)	Energia Bateria (MWh)	Despesa (€)	Energia Importada (MWh/€)
00:00	0,764145	0	0,764145	1,178619	0	0
00:15	0,759719	0	0,759719	1,356203	0	0
00:30	0,749495	0	0,749495	1,531398	0	0
00:45	0,735761	0	0,735761	1,703382	0	0
01:00	0,709666	0	0,709666	1,869266	0	0
01:15	0,693796	0	0,693796	2,031441	0	0
01:30	0,665336	0	0,665336	2,186963	0	0
01:45	0,650076	0	0,650076	2,338919	0	0
02:00	0,62566	0	0,62566	2,485167	0	0
02:15	0,615512	8,162614	0	2,485115	0	0
02:30	0,611392	0	0,611392	2,628028	0	0

02:45	0,619938	0	0,619938	2,772938	0	0
03:00	0,635274	0	0,635274	2,921433	0	0
03:15	0,655646	0	0,655646	3,07469	0	0
03:30	0,676323	0	0,676323	3,232781	0	0
03:45	0,681359	0	0,681359	3,392049	0	0
04:00	0,671364	0	0,671364	3,54898	0	0
04:15	0,655951	0	0,655951	3,702309	0	0
04:30	0,643209	0	0,643209	3,852659	0	0
04:45	0,629475	0	0,629475	3,999798	0	0
05:00	0,60895	0	0,60895	4,142141	0	0
05:15	0,59514	0	0,59514	4,281255	0	0
05:30	0,575836	7,60406	0	4,281165	0	0
05:45	0,58606	0	0,58606	4,418157	0	0
06:00	0,605212	0	0,605212	4,559625	0	0
06:15	0,617343	0	0,617343	4,703929	0	0
06:30	0,638097	0	0,638097	4,853084	0	0
06:45	0,670056	1,088026	0,625861	5	0	0
07:00	0,708987	10,54122	0	5	0	0
07:15	0,738315	10,97727	0	5	0	0
07:30	0,779699	11,59256	0	5	0	0
07:45	0,841094	12,50538	0	5	0	0
08:00	0,892319	13,69264	0	5	0	0
08:15	0,927731	14,23603	0	5	0	0
08:30	0,968281	14,85827	0	5	0	0
08:45	1,001228	15,36385	0	5	0	0
09:00	1,020257	16,05528	0	5	0	0
09:15	1,038685	55,68652	-2,5	4,374909	0	0
09:30	1,050689	0	1,050689	4,620507	0	0
09:45	1,037239	16,32251	0	4,620411	0	0
10:00	1,033045	0	1,033045	4,861885	0	0
10:15	1,026121	16,27916	0	4,861784	0	0
10:30	1,016661	16,12908	0	4,861683	0	0
10:45	1,017154	55,79877	-2,5	4,236595	0	0
11:00	1,021187	16,22615	0	4,236506	0	0

11:15	1,021489	16,23095	0	4,236418	0	0
11:30	1,020461	16,21462	0	4,23633	0	0
11:45	1,021006	16,22327	0	4,236241	0	0
12:00	1,021143	16,31506	0	4,236153	0	0
12:15	1,030722	56,41122	-2,5	3,611078	0	0
12:30	1,03036	0	1,03036	3,851925	0	0
12:45	1,028622	16,43456	0	3,851844	0	0
13:00	1,061643	54,413	-2,5	3,226777	0	0
13:15	1,063673	16,25027	0	3,22671	0	0
13:30	1,060465	16,20126	0	3,226643	0	0
13:45	1,068251	16,32021	0	3,226575	0	0
14:00	1,083691	0	1,083691	3,479888	0	0
14:15	1,100301	0	1,100301	3,737084	0	0
14:30	1,107996	0	1,107996	3,996078	0	0
14:45	1,121984	0	1,121984	4,258341	0	0
15:00	1,138819	0	1,138819	4,52454	0	0
15:15	1,145367	0	1,145367	4,79227	0	0
15:30	1,148635	4,446413	0,88493	5	0	0
15:45	1,174154	16,43229	0	5	0	0
16:00	1,171616	17,22979	0	5	0	0
16:15	1,176372	17,29972	0	5	0	0
16:30	1,165652	17,14208	0	4,999896	0	0
16:45	1,155231	16,98883	0	4,999792	0	0
17:00	1,144694	18,45076	0,000887	5	0	0
17:15	1,111335	17,92612	0	4,999896	0	0
17:30	1,127674	18,18966	0	4,999792	0	0
17:45	1,111166	17,90994	0,000887	5	0	0
18:00	1,118094	19,78859	0	4,999896	0	0
18:15	1,090949	19,30816	0	4,999792	0	0
18:30	1,03249	18,25878	0,000887	5	0	0
18:45	0,972156	61,45195	-2,5	4,374909	0	0
19:00	0,888267	60,56951	-2,5	3,749831	0	0
19:15	0,827459	59,48248	-2,5	3,124766	0	0
19:30	0,759773	13,58189	0	3,124701	0	0

19:45	0,711518	12,71928	0	3,124635	0	0
20:00	0,725448	58,48624	-2,5	2,499583	0	0
20:15	0,740465	58,75854	-2,5	1,874544	0	0
20:30	0,792376	59,69982	-2,5	1,249518	0	0
20:45	0,830373	33,15475	0,998073	1	0	0
21:00	0,834722	15,025	0	0,999979	0	0
21:15	0,841818	15,15272	0	0,999958	0	0
21:30	0,827931	14,90276	0	0,999938	0	0
21:45	0,793367	14,28061	0	0,999917	0	0
22:00	0,75125	12,55226	0	0,999896	0	0
22:15	0,719051	0	0,719051	1,167974	0	0
22:30	0,691049	22,77277	0,671896	1	0	0
22:45	0,661368	11,05047	0	0,999979	0	0
23:00	0,626728	9,429596	0	0,999958	0	0
23:15	0,612231	9,211478	0	0,999938	0	0
23:30	0,602694	9,067979	0	0,999917	0	0
23:45	0,584458	8,793609	0	0,999896	0	0

ANEXO D

Código Matlab

```
clc
clear

%Lê Ficheiro Excel, tira número de colunas e linhas-----

filename = '12_08_2017-Sem produção.xlsx';
t = readtable (filename);
[row, column] = size(t)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Variaveis e Tabelas-----

Horas = xlsread(filename, 'A:A');
Preco = xlsread(filename, 'B:B');
Eolica = xlsread(filename, 'C:C');
PV = xlsread(filename, 'D:D');
Preco_Venda = xlsread(filename, 'E:E');
Ebat_excel = xlsread(filename, 'F:F'); %Bateria começa com os MW que estão no
excel
Pbat_nominal = 2.5;
Ebat_nominal = 5;
Ebat_minima = 1;
efic = 93.5/100;

Autodescarga = (0.2/row)/100;

Ebat = Ebat_excel

x = row/24

MaxPreco_Venda = max(Preco_Venda);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Ciclo para criar genes da primeira geração

for r = 1:100 %Corre as linhas

    for k = 1:row %Corre as colunas.

        genes(r,k) = randi([0,3]);

    end

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```

for i = 1:8000

    %APTIDÃO(Verifica a qualidade da solução)-----

    for p = 1:100 %Corre as linhas de genes e cria uma população de 100
    membros

        for r = 1:row %Corre as linhas do ficheiro Excel

            Producao(r) = Eolica(r) + PV(r); %Potência total do sistema em
            cada periodo

            %Condição para impedir que caso o valor de energia na bateria
            %seja o valor minimo, o gene desse periodo seja 3. Muda o gene
            %de forma a que a bateria não descarregue

            if Ebat <= Ebat_minima & genes(p,r) == 3

                genes(p,r) = randi([0,2]);

            else

            end

            %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

            %ESTADO 0: Vende Produção, Não interage com mercado, Bateria
            %Inactiva

            if genes(p,r) == 0

                %Garante que se já existia anteriormente energia na bateria,
                %existe autodescarga

                if Ebat > 0 %Se existe energia na bateria

                    Receita = Preco_Venda(r) * Producao(r)/x;

                    Pbat = 0;

                    Ebat = Ebat * (1 - Autodescarga);

                    Despesa = 0;

                    Energia_Comprada = 0;

                    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

                %%

                %Caso não exista energia na bateria, não existe
                %autodescarga

            else %Se não existe energia na bateria

                Receita = Preco_Venda(r) * Producao(r)/x;

                Pbat = 0;

```

```

Ebat = 0;

Despesa = 0;

Energia_Comprada = 0;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%

end %TERMINA ESTADO 0

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%

%ESTADO 1 = Armazena Produção, Não compra energia á rede,
%Bateria a carregar

elseif genes(p,r) == 1

%Caso 1:

if Producao(r) <= Pbat_nominal

    if (Ebat + Producao(r)/x) > Ebat_nominal;

        Pbat = (Ebat_nominal - Ebat)*x*(2-efic);

        Resto = Ebat_nominal-Ebat;

        Receita = ((Producao(r)/x) - Resto) * Preco_Venda(r);

        Ebat = Ebat_nominal;

        Despesa = 0;

        Energia_Comprada = 0;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%

%Caso 2:

else

    Receita = 0;

    Pbat = Producao(r);

    Ebat = (Ebat + efic*(Producao(r)/x));

    Despesa = 0;

    Energia_Comprada = 0;

end

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%

    %Caso3:

else

    if (Ebat + Pbat_nominal/x) >= Ebat_nominal;

        Pbat = (Ebat_nominal - Ebat)*x*(2-efic);

        Resto = (Ebat_nominal - Ebat);

        Receita = (Producao(r)/x - Resto) * Preco_Venda(r);

        Ebat = Ebat_nominal;

        Despesa = 0;

        Energia_Comprada = 0;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%

    %Caso 4:

else

    Pbat = Pbat_nominal;

    Resto = Producao(r)/x - Pbat_nominal/x;

    Receita = Resto * Preco_Venda(r);

    Ebat = (Ebat + efic*(Pbat_nominal/x));

    Despesa = 0;

    Energia_Comprada = 0;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%

end

    Ebat=Ebat*(1-Autodescarga); %Dá-se autodescarga

end %TERMINA ESTADO 1-----

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%
%%

%ESTADO 2 = Armazena Produção, Compra energia à rede, Bateria
a
%carregar-----

elseif genes(p,r) == 2

```

```

%Caso 1:

if Producao(r) < Pbat_nominal

    if (Ebat + Producao(r)/x) >= Ebat_nominal

        Pbat = (Ebat_nominal - Ebat)*x*(2-efic);

        Resto = Ebat_nominal-Ebat;

        Receita = ((Producao(r)/x) - Resto) * Preco_Venda(r);

        Ebat = Ebat_nominal;

        Despesa = 0;

        Energia_Comprada = 0;

        %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%

        %Caso 2:

    else

        %Se o valor de potência necessário a comprar à rede
para carregar totalmente a bateria é menor que
        %o de potencia nominal%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

        if (Ebat + efic*(Pbat_nominal/x)) > Ebat_nominal

            Ebat = Ebat + (Producao(r)/x)*efic;

            Despesa = (Ebat - Ebat_nominal) * Preco(r);

            Energia_Comprada = (Ebat_nominal - Ebat);

            Receita = (Ebat - Ebat_nominal) * Preco(r);

            Ebat = Ebat_nominal;

            Pbat = (Producao(r)) + (Ebat -
Ebat_nominal)*x*(2-efic);

            %Se o valor de potência necessário para carregar
a bateria é maior
            %que o da potencia nominal

        else

            Despesa = (Producao(r)/x - Pbat_nominal/x) *
Preco(r);

            Energia_Comprada = (Pbat_nominal/x -
Producao(r)/x);

            Receita = (Producao(r)/x - Pbat_nominal/x) *
Preco(r);

```

```

        Pbat = Pbat_nominal;

        Ebat = (Ebat + efic*(Pbat_nominal/x));

    end

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%

    %Caso3:

else

    if (Ebat + Pbat_nominal/x) >= Ebat_nominal

        Pbat = (Ebat_nominal - Ebat)*x*(2-efic);

        Resto = (Ebat_nominal - Ebat);

        Receita = (Producao(r)/x - Resto) * Preco_Venda(r);

        Ebat = Ebat_nominal;

        Despesa = 0;

        Energia_Comprada = 0;

        %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%

        %Caso 4:

    else

        Pbat = Pbat_nominal;

        Resto = Producao(r)/x - Pbat_nominal/x;

        Receita = Resto * Preco_Venda(r);

        Ebat = (Ebat + efic*(Pbat_nominal/x));

        Despesa = 0;

        Energia_Comprada = 0;

    end

    Ebat=Ebat*(1-Autodescarga); %Dá-se autodescarga

end %TERMINA ESTADO 2-----

%ESTADO 3: Vende produção, não compra energia à rede, bateria
%a descarregar-----

```

```

elseif genes(p,r) == 3

    %Caso 1:

    if Ebat - (Pbat_nominal/x) <= Ebat_minima

        Receita = Preco_Venda(r) * ((Producao(r))/x + (Ebat -
Ebat_minima));

        Pbat = (Ebat_minima - Ebat)*x;

        Ebat = Ebat_minima;

        Despesa = 0;

        Energia_Comprada = 0;

    else

        Receita = Preco_Venda(r) * (Producao(r)/x +
Pbat_nominal/x);

        Pbat = - Pbat_nominal;

        Ebat = (Ebat - Pbat_nominal/x) * (1-Autodescarga);

        Despesa = 0;

        Energia_Comprada = 0;

    end %TERMINA ESTADO 3-----

end %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Ebat_tab(p,r) = Ebat;
Pbat_tab(r) = Pbat;
Lucro_tab(r) = Receita;
Despesa_tab(r) = Despesa;
Energia_Comprada_tab(r) = Energia_Comprada;

end %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Receita = 0;
Ebat = Ebat_excel;
Pbat = 0;
Fitness(p) = sum(Lucro_tab);
Maior(i) = max(Fitness);
Menor(i) = min(Fitness);
Soluca_optima = max(Maior);
Soluca_optima_tab(i) = max(Maior);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if Fitness(p) >= Soluca_optima

    count_loop = i

```

```

Ebat_plot_final = Ebat_tab(p,:);
Pbat_plot_final = Pbat_tab;
Lucro_plot_final = Lucro_tab;
Energia_Comprada_final = Energia_Comprada_tab;
Despesa_final = Despesa_tab;
genes_optimos = genes(p,:);

else

end

end % TERMINA CICLO APTIDÃO-----

%TORNEIOTORNEIO(Escolhe dois membro aleatorios da população inicial e
compares as
%suas respectivas Fitness. O membro com maior Fitness torna-se
%progenitor. Processo elitista dita que o membro de maior Fitness de
%entre TODAS AS GERAÇÕES é sempre selecionado a participar no torneio
%-----

for p = 1:100 %Corre os membros da população

%Processo elitista. O membro de maior valor de todas as gerações é
%automaticamente vencedor de um torneio e torna-se progenitor

if Fitness(p) == Menor(i)

Winner(p) = max(Maior);
genes_winner(p,:) = genes_optimos;

else

r1 = randi([1,100]);

M1 = Fitness([r1]);

r2 = randi([1,100]);

M2 = Fitness([r2]);

if M2 <= M1

Winner(p) = M1;
genes_winner(p,:) = genes(r1,:);

else

Winner(p) = M2;
genes_winner(p,:) = genes(r2,:);

end

end

end %Termina TORNEIO

%-----

```

```

%COMBINAÇÃO(Aleatoriamente, escolhe diferentes combinações de binario de
%cada progenitor e cruza-os entre si %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%)

for r = 1:2:100

    r1 = randi([1,row-1]);

    y1 = genes_winner(r,[1:r1]);

    y2 = genes_winner(r+1,[r1+1:end]);

    y3 = genes_winner(r+1,[1:r1]);

    y4 = genes_winner(r,[r1+1:end]);

    genes_descend1(round(r/2),:) = horzcat(y1,y2);

    genes_descend2(round(r/2),:) = horzcat(y3,y4);

end

    genes = [genes_descend1; genes_descend2]; %Atualiza a matriz genes com
os genes dos descendentes

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%MUTAÇÃO GENÉTICA(Cria diversidade entre progenitores e descendentes de
forma a
%que a solução não fique presa num local de fraca qualidade, ou seja, de
%forma a garantir que as gerações seguintes não fiquem
estagnadas%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%)

for r = 1:100 %Estes dois ciclos garantem que todos os binarios (genes)
da matriz são analisados independentemente. Corre colunas

    for c = 1:row %Corre Linha

        m = rand; %Cria um valor aleatorio entre 0 e 1

        if m < 0.05 & Preco_Venda(c) >= MaxPreco_Venda * 0.98 &
Ebat_tab(r,c) > Ebat_minima

            genes(r,c) = 3;

        elseif m < 0.05 & Preco_Venda(c) >= MaxPreco_Venda * 0.98 &
Ebat_tab(r,c) <= Ebat_minima

            genes(r,c) = 0;

        elseif m < 0.05 & Preco_Venda(c) >= MaxPreco_Venda * 0.85

            while genes(r,c) == 2

                genes(r,c) = randi([0,3]);

            end

        end
    end
end

```

```

elseif m < 0.05 & genes(r,c) == 0
    while genes(r,c) == 0
        genes(r,c) = randi([0,3]);
    end
elseif m < 0.05 & genes(r,c) == 1
    while genes(r,c) == 1
        genes(r,c) = randi([0,3]);
    end
elseif m < 0.05 & genes(r,c) == 2
    while genes(r,c) == 2
        genes(r,c) = randi([0,3]);
    end
elseif m < 0.05 & genes(r,c) == 3
    while genes(r,c) == 3
        genes(r,c) = randi([0,3]);
    end
end

end %Termina mutação
genética%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clear var Fitness genes_descend1 genes_descend2 genes_winner y1 y2 y3
y4

end

end

Maior %Devolve a matriz com o maior valor de cada geração

Soluca_optima = max(Maior) %Devolve o valor máximo de todos membros

Soluca_fraca = min(Maior) %Devolve a solução mais fraca, das maiores soluções
de cada geração

erro = ((Soluca_optima-Soluca_fraca)/(Soluca_optima)) * 100 %Permite ver a
diferença percentual entre a solução optima e mais fraca

media = sum(Maior)/i % Faz a media das melhores soluções

Despesa_total = sum(Despesa_final) %Devolve despesa final

```

```

Energia_Comprada_Total = sum(Energia_Comprada_final) %Devolve energia
comprada

datestr(Horas, 'HH:MM'); %Converto os dados da coluna Hora para Horas:Minutos

% Cria plot com Producao de energia
plot(Horas, Producao, Horas, PV, Horas, Eolica)
legend('Produção Total', 'PV', 'Eolica')
xlabel('Horas') %Legenda x
ylabel('MW') %Legenda y
datetick('x', 'HH'); %O eixo de x passa a indicar as Horas
title('Produção')
grid on
figure

% Cria plot com a potência da bateria
plot(Horas, Pbat_plot_final)
xlabel('Horas') %Legenda x
ylabel('MW') %Legenda y
datetick('x', 'HH'); %O eixo de x passa a indicar as Horas
title('Potência Bateria')
grid on
figure

% Cria plot com a energia da bateria
plot(Horas, Ebat_plot_final)
xlabel('Horas') %Legenda x
ylabel('MWh') %Legenda y
datetick('x', 'HH'); %O eixo de x passa a indicar as Horas
title('Energia Bateria')
grid on
figure

plot(Horas, Preco, Horas, Lucro_plot_final)
legend('Preço de Compra', 'Receita por intervalo de tempo')
xlabel('Horas') %Legenda x
datetick('x', 'HH'); %O eixo de x passa a indicar as Horas
title('Preço de Compra (€/MWh) / Receita por intervalo de tempo(€)')
grid on

col_header = {'Produção', 'Receita', 'Potência Bateria', 'Energia Bateria',
'Despesa', 'Energia Comprada'};

A = [Producao(1:row)', Lucro_plot_final(1:row)', Pbat_plot_final(1:row)',
Ebat_plot_final(1:row)', Despesa_final(1:row)',
Energia_Comprada_final(1:row)'];
xlswrite('Resultados.xlsx', col_header, 'Folha1');
xlswrite('Resultados.xlsx', A, 'Folha1', '2');

```