

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



FEUP

**Utilização de Soluções de Armazenamento
Distribuído para Maximização de Integração de
Produção Renovável**

Pedro Miguel Gregório Amaro

VERSÃO FINAL

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
Major Energia

Orientador: Prof. Doutor João Abel Peças Lopes

Julho de 2012

© Pedro Amaro, 2012

Resumo

Nos dias de hoje a sustentabilidade energética é um tema de importância crescente. Para esse fim, a utilização de fontes de energia renováveis surge como alternativa aos combustíveis fósseis, permitindo uma produção de energia mais amigável ao ambiente. As fontes de energia renovável possibilitam a implementação em potências mais reduzidas, implementadas em redes de baixa tensão. Neste trabalho estudam-se os eventuais problemas nos valores de tensão que a inclusão de geração renovável numa rede de baixa tensão pode causar. Procura-se corrigir estes problemas através da inclusão de sistemas de armazenamento distribuído que aparecerão como carga adicional para corrigir eventuais problemas de violação dos limites de tensão. É realizado um estudo tendo por base a maximização da integração de produção renovável (no caso, solar fotovoltaica) através desses sistemas de armazenamento, que evitarão o corte da produção, e consequente desperdício de energia. É ainda analisada a transferência inter-temporal da energia da fonte renovável. Utiliza-se uma meta-heurística para a resolução deste problema.

Abstract

Nowadays, energy sustainability is a topic of growing importance. The utilization of renewable energy sources is an alternative to fossil fuels, allowing energy production in a more environment friendly way. The renewable energy sources allow its implementation in smaller values of power, installed in low voltage networks. In this study, it is studied the eventual voltage problems that the introduction of renewable generation in a low voltage network may cause. To correct this problem are implemented distributed storage systems, that will appear as an additional load to correct eventual voltage limit violation problems. It is done a study in order to maximize the integration of renewable generation (in this case, photovoltaic) through this storage systems, that will avoid generation shedding, and therefore energy losses. It is also analysed the inter-temporal transfer of energy from the renewable source. It is used a meta-heuristic to find a solution for this problem.

Agradecimentos

Gostaria de expressar o meu agradecimento ao meu Orientador, o Professor Doutor João Abel Peças Lopes, por toda a ajuda, disponibilidade, ideias partilhadas e entusiasmo demonstrado.

Gostaria de agradecer a todos os meus amigos pela força e apoio que deram ao longo da realização do trabalho.

Gostaria de agradecer à minha família pela força e apoio que sempre me deram.

Gostaria de agradecer aos meus pais pela força, confiança e apoio que sempre existiu.

Índice

Resumo	iii
Abstract	v
Agradecimentos	vii
Índice	ix
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiii
Abreviaturas e Símbolos	xv
Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1 Motivação	2
1.2 Objetivos	3
1.3 Estrutura do documento	4
Capítulo 2	5
Estado de Arte	5
2.1 Estudos sobre a Integração de Produção Renovável	5
2.2 Tipos de Armazenamento	7
2.2.1 Bombagem	7
2.2.2 Baterias	8
2.2.3 Baterias de fluxo regenerativas	9
2.2.4 Volantes de Inércia	9
2.2.5 Ar Comprimido	10
2.2.6 Super-Condensadores	10
2.2.7 PHEV's (Plug In Electric Vehicles) e BEV's (Battery Electric Vehicles)	10
2.3 Duração do Armazenamento	11
2.4 Tipos de Geração por fontes renováveis	12

2.4.1	Solar Fotovoltaico	12
2.4.2	Aerogeradores	15
Capítulo 3	.....	17
Utilização de Sistemas de Armazenamento Distribuído para Maximização da Integração da Produção Renovável.....		17
3.1	Formulação do Problema	17
3.2	Metodologia do Algoritmo	23
3.3	A Rede	29
Capítulo 4	.....	33
Resultados		33
4.1	FASE 1.....	33
4.2	FASE 2.....	36
4.2.1	Situação 1 – Verão com carga mediana	36
4.2.2	Situação 2 – Verão com carga reduzida	38
4.2.3	Situação 3 – Verão com produção renovável variável	41
4.2.4	Situação 4 – Inverno.....	43
4.2.5	Situação 5 – Meia-Estação	45
4.3	Localização do sistema de armazenamento	48
4.4	Análise Económica do sistema de armazenamento	48
Capítulo 5	.....	51
Conclusões		51
5.1	Perspetivas de Desenvolvimento/Outras análises possíveis	53
Referências	.....	55
Anexo A	.....	57
Dados da Rede.....		57
A.1	Linhas.....	57
A.2	Cargas	58
A.3	Geradores Fotovoltaicos	59

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Sistema de dois barramentos que ilustra a situação da equação (1.1).	3
Figura 2.1 – Comparação de diferentes tecnologias de baterias em relação a capacidade de armazenamento por quilograma e por litro [16]......	9
Figura 2.2 - Comparação de diferentes tecnologias de armazenamento tendo em conta tempos de descarga e potências de interligação [19 citado por 11]......	11
Figura 2.3 - Imagem da distribuição na Península Ibérica da irradiação solar durante um ano que incide numa superfície horizontal [21 citado por 20]......	13
Figura 2.4 - Ilustração do efeito fotovoltaico, demonstrando a criação do par elétron-lacuna pela incidência de um fóton no semicondutor [20]......	13
Figura 2.5 - Diferentes irradiâncias ao longo do dia para os meses de Julho e Dezembro [20].	14
Figura 2.6 - Evolução da potência instalada (GW) em geradores eólicos na Europa e no Mundo [20]......	15
Figura 2.7 - Distribuição de Weibull que descreve a percentagem de ocorrência de velocidades do vento [20]......	15
Figura 3.1 - Ilustração da equação de movimento para uma partícula no EPSO. Uma partícula i localizada em X , numa iteração k , origina um descendente na iteração $k+1$, sob a influência dos termos de inércia, memória e cooperação [22].	24
Figura 3.2 - Representação gráfica de uma função de penalização quadrática $w(x_i)$ para um domínio de x_i de X_i^{\min} a X_i^{\max} [23].	28
Figura 3.3 - Imagem da rede de baixa tensão.....	29
Figura 4.1 - Diagrama de Carga e Produção Renovável para a fase 1 do algoritmo.	34
Figura 4.2 - Plano de Operação para as baterias para a fase 1.	34
Figura 4.3 - Diagrama de carga e produção renovável para a fase 1 do algoritmo numa situação com menor produção.....	35
Figura 4.4 - Plano de Operação para as baterias na fase 1 numa situação com menor produção renovável.....	35
Figura 4.5 - Diagrama de Carga e Produção Renovável para a Situação 1.....	36
Figura 4.6 - Plano de operação obtido para as baterias na Situação 1.	37
Figura 4.7 - Variação da Energia armazenada ao longo do tempo na Situação 1.....	37
Figura 4.8 - Variação do módulo da tensão no barramento 37 ao longo do tempo na Situação 1.	38
Figura 4.9 - Diagrama de Carga e Produção Renovável para a Situação 2.....	39

Figura 4.10 - Plano de operação obtido para as baterias na Situação 2.....	39
Figura 4.11 - Variação da Energia armazenada ao longo do tempo na Situação 2.	40
Figura 4.12 - Variação do módulo da tensão no barramento 37 ao longo do tempo na Situação 2.....	40
Figura 4.13 - Diagrama de Carga e Produção Renovável para a Situação 3.....	41
Figura 4.14 - Plano de operação obtido para as baterias na Situação 3.....	42
Figura 4.15 - Variação da Energia armazenada ao longo do tempo na Situação 3.	42
Figura 4.16 - Variação do módulo da tensão no barramento 37 ao longo do tempo na Situação 3.....	43
Figura 4.17 - Diagrama de Carga e Produção Renovável para a Situação 4.....	43
Figura 4.18 - Plano de operação obtido para as baterias na Situação 4.....	44
Figura 4.19 - Variação da Energia armazenada ao longo do tempo na Situação 4.	44
Figura 4.20 - Variação do módulo da tensão no barramento 37 ao longo do tempo na Situação 4.....	45
Figura 4.21 - Diagrama de Carga e Produção Renovável para a Situação 5.....	46
Figura 4.22 - Plano de operação obtido para as baterias na Situação 5.....	46
Figura 4.23 - Variação da Energia armazenada ao longo do tempo na Situação 5.	47
Figura 4.24 - Variação do módulo da tensão no barramento 37 ao longo do tempo na Situação 5.....	47
Figura 4.25 - Horas de Ponta, Cheia e Vazio [24].	49

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Trânsito de Potência com carga a 50 % e sem produção renovável.	30
Tabela 3.2 - Trânsito de Potências com carga a 30 % e produção fotovoltaica no máximo.	31
Tabela 4.1 - Custo da eletricidade nos diferentes períodos [25].	49
Tabela 4.2 - Proveito, Custo e Lucro obtidos com os sistemas de armazenamento e os planos de operação acima definidos.	49
Tabela A.1 - Dados das linhas que compõe a rede.	57
Tabela A.2 - Cargas da rede.	58
Tabela A.3 - Localização e potência dos geradores fotovoltaicos existentes na rede.	59

Abreviaturas e Símbolos

Lista de Abreviaturas (ordenadas por ordem alfabética):

AC	Corrente Alternada
BT	Baixa Tensão
BEV	<i>Battery Electric Vehicle</i>
DC	Corrente Contínua
E_D	Energia desperdiçada por intervalo de tempo
E_{dump}	Energia desperdiçada
E_{st}	Energia armazenada
EPSO	<i>Evolutionary Particle Swarm Optimization</i>
kg	Quilograma (unidade de massa)
kW	<i>KiloWatt</i> (unidade de potência ativa)
kWh	<i>KiloWatt-hora</i> (unidade de energia)
kVA	<i>KiloVolt-Ampere</i> (unidade de potência)
MW	<i>Mega-Watt</i> (unidade de potência)
OLTC	<i>On Load Tap Change</i>
P_D	Potência Desperdiçada
P_{m-n}	Trânsito de Potência do Barramento m para o Barramento n
P_{ent}	Potência fornecida por sistema de armazenamento à rede
P_{PV}	Potência produzida por solar fotovoltaico
P_{abs}	Potência absorvida (consumida por sistema de armazenamento)
p.u.	por unidade (sistema p.u.)
PHEV	<i>Plug In Electric Vehicle</i>
R	Resistência Elétrica
U	Tensão
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i>
V_n	Valor de tensão no barramento n
Wh	<i>Watt-hora</i> (unidade de energia)

Lista de Símbolos

η_{ent}	Rendimento a entregar energia
η_{abs}	Rendimento a absorver energia
Δt	Intervalo de tempo
$\cos(\varphi)$	Fator de potência
€	Euro (unidade monetária)

Capítulo 1

Introdução

Atualmente existe uma busca por sustentabilidade em diversos setores. O setor da energia não é exceção. A crescente necessidade de diminuir a dependência dos combustíveis fósseis, a existência de formas de gerar energia através de fontes renováveis e endógenas que são uma alternativa aos combustíveis fósseis, a maturação das tecnologias que permitem a utilização de energias renováveis para gerar energia elétrica e a busca por uma maior implementação delas em substituição dos combustíveis fósseis, levando a benefícios do ponto de vista ambiental e económico, levam a investimentos crescentes e à maior incorporação destas no sistema elétrico. Certas tecnologias de produção de energia através de fontes renováveis podem ser implementadas em valores de potência mais reduzidos que os comumente usados para centrais convencionais, e podem ainda ser implementadas em redes de baixa tensão, próximas da carga, e num estilo de produção dispersa. Isto traz consigo vantagens do ponto de vista de operação do sistema. Ao aproximar a geração da carga, reduzem-se as perdas no sistema de transporte e distribuição de energia, devido à menor necessidade de energia proveniente das grandes centrais produtoras, localizadas a uma maior distância do consumidor final. Além disso, a exploração das fontes renováveis, especialmente a solar fotovoltaico, em produção dispersa leva a que se possa reduzir o impacto de certas intermitências, como por exemplo nuvens passageiras. Caso as nuvens aparecessem-se na zona de uma grande central de produção de energia através da radiação solar retirariam a fonte primária a um elevado valor de potência, desaparecendo a entrega desta à rede. No caso com produção dispersa é mais improvável retirar a exposição solar a todos os geradores se estes estiverem numa área mais abrangente (no caso de nuvens passageiras, no caso de céu completamente coberto a produção desapareceria toda). Como é possível instalar em redes baixa tensão, permite ainda aos consumidores tornarem-se microprodutores, pois as potências em jogo são reduzidas, podendo ser instaladas em habitações e permitindo a estes obter algum lucro com a exploração da produção renovável (e redução do custo da fatura energética).

Para além dos benefícios acima descritos, a colocação de produção de energia na rede de baixa tensão pode causar alguns problemas do ponto de vista da manutenção da correta operação da rede. Neste trabalho, pretende-se estudar como soluções de armazenamento distribuído colocadas em rede de baixa tensão com produção renovável incorporada podem mitigar alguns problemas de sobretensão. Como passa a existir uma fonte geradora na rede, a

2 Introdução

entrega de potência ativa à rede provoca um elevar de tensão no barramento em que há injeção de potência, como é explicado em maior detalhe à frente. Esta tensão pode ultrapassar limites regulamentares, o que causa problemas de exploração e técnicos. Para a corrigir, a solução mais evidente seria cortar a produção renovável. Porém, após o investimento realizado para instalar os sistemas de geração de energia utilizando essa fonte, cortar a produção leva a que não exista venda de energia e ao desperdício de energia elétrica de origem renovável, levando a perdas económicas e ambientais, sendo assim uma solução desinteressante. O aparecimento de uma carga adicional, de mais um ponto de consumo, leva a que a tensão reduza. Uma carga puramente dissipativa resolveria o problema, porém continuaria a ser energia desperdiçada. Se a carga armazenar a energia, esta pode ser aproveitada posteriormente e o problema da sobretensão é resolvido. Assim, um sistema de armazenamento integrado numa rede com produção renovável é uma solução com interesse em ser estudada. Primeiro, permite resolver os problemas de tensão. Depois, permite transferir energia inter-temporalmente, pois a produção renovável surge ao longo do dia, numa altura em que a carga é normalmente reduzida. Nas horas típicas de ponta (19:00 às 21:00) não há produção fotovoltaica. Com um sistema de armazenamento, pode-se colocar nesses períodos energia produzida por fontes renováveis em períodos anteriores.

1.1 Motivação

As fontes de energia renovável surgem atualmente com importância crescente e como alternativas necessárias aos combustíveis fósseis. Estas fontes de energia trazem consigo grandes vantagens, mas também alguns problemas. A sua variabilidade, intermitência e o facto de ser difícil proceder ao armazenamento desta energia para utilização em períodos de maior necessidade que aqueles em que é gerada (ao contrário do que acontece com a hídrica ou os combustíveis fósseis) são alguns dos problemas que surgem. A variabilidade é ultrapassada com previsões melhoradas e melhores algoritmos para prever antecipadamente variações na fonte primária. O impacto da intermitência do recurso pode ser ultrapassado com a existência de outras fontes de energia preparadas entrar em serviço e compensar eventuais quedas na produção imprevistas das fontes renováveis. O armazenamento é uma área de grande estudo atualmente. A bombagem, realizada nas centrais hídricas, permite armazenar grandes quantidades de energia, porém as perdas possuem valores razoáveis e as centrais localizam-se normalmente a grande distância das cargas e da eventual microgeração. Além disso, sendo que algumas fontes de energia renováveis podem ser exploradas, com bastantes benefícios, como produção descentralizada, localizada em rede de baixa tensão, armazenar a energia produzida pelos geradores explorados em baixa tensão em centrais hídricas obrigaria a utilizar a rede de transporte, trazendo ainda mais perdas. Surgem tecnologias como volantes de inércia e baterias de acumuladores que possuem capacidades de armazenamento mais reduzidas que as albufeiras porém rendimentos superiores. Devido à menor capacidade de armazenamento, a sua utilização em microgeração, incluídas em redes de baixa tensão, surge como uma solução a explorar.

As tecnologias de geração de energia elétrica que exploram fontes renováveis (solar, eólica) podem ser aplicadas em potências reduzidas, próximas das cargas (na própria rede de BT). Este facto traz consigo a vantagem de que, ao aproximar a geração da carga, desaparecem perdas existentes no transporte. No entanto, por estarem numa zona da rede em que o sentido do trânsito de potências seria de montante para jusante e agora pode deixar de ser, poderão aparecer situações em que surjam valores de tensão acima dos limites exigidos. Para evitar esta situação

poderão então ter que ser utilizados sistemas de armazenamento de energia, que atuarão como “cargas” (no sentido em que consomem energia) e provocarão abaixamento do valor de tensão, trazendo-o para valores que respeitem os limites. Além desse controlo do valor de tensão, surge ainda a possibilidade de transferir entre períodos de tempo a energia produzida por fontes renováveis, sendo a energia solar ou eólica guardada para ser utilizada em horas de ponta ou quando for necessário.

Numa rede de baixa tensão, a resistência da linha é superior à reatância desta, podendo desprezar-se a segunda. A equação do trânsito de potências é então definida como:

$$P_{2-1} = \frac{V_2^2}{R} - \frac{V_1 \cdot V_2}{R} \cos(\varphi) \quad (1.1)$$

(em que P_{2-1} é a potência transferida do barramento 2 para o barramento 1, V_1 é a tensão a jusante e V_2 a tensão a montante. R é a resistência da linha).

Analisando esta equação verifica-se que, para haver uma alteração no sentido do trânsito de potência (P_{2-1} terá que ser negativa), terá que ocorrer que $V_1 > V_2$, sendo que nessa situação poderá acontecer que V_1 atinja um valor superior ao limite regulamentar. Como a figura 1.1 demonstra, a inclusão de produção renovável no barramento 1 pode levar a uma situação em que o sentido do fluxo da potência se inverta, passando circular de 1 para 2. Numa situação sem produção renovável, a potência para alimentar a carga 2 e 1 viria do posto de transformação, sendo V_2 maior que V_1 e P_{2-1} positivo.

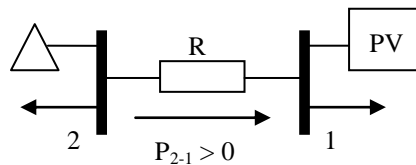


Figura 1.1 - Sistema de dois barramentos que ilustra a situação da equação (1.1).

Quando surge produção numa rede de baixa tensão, podem ocorrer situações em que o controlo da tensão se torna uma necessidade, existindo alguns mecanismos para realizar este controlo. A elevação da tensão que pode surgir pela introdução de geração pode ser eliminada pelo simples corte da produção, havendo nesta situação interesse em minimizar o que é necessário cortar, visto que é energia que é perdida [1]. Outra estratégia poderá surgir na rede de média tensão, por alteração das tomadas do transformador da subestação de onde sai a linha que alimenta a rede baixa tensão, reduzindo a tensão a jusante do transformador com OLTC (*on load tap change*), recorrendo às tomadas dos transformadores com capacidade de regulação automática em carga. Uma outra alternativa passa por armazenar a energia proveniente da geração. Além de permitir a transferência da energia, esta alternativa basicamente cria uma carga adicional na rede durante o armazenamento, reduzindo o valor da tensão nos nós e permitindo um controlo adicional desta.

1.2 Objetivos

Neste trabalho pretende-se estudar uma rede de baixa tensão com problemas de violação do limite máximo de tensão devido à existência de produção renovável nela. Para resolver o

4 Introdução

problema pretende-se dimensionar sistemas de armazenamento, em capacidade e potência, que permitam evitar a violação dos limites de tensão na rede.

Pretende-se também identificar estratégias de operação para sistemas de armazenamento integrados em redes de baixa tensão com produção renovável. Estes planos de operação deverão garantir que as tensões na rede se mantêm dentro dos limites, minimizando simultaneamente o desperdício de energia gerada por fontes renováveis. Será estudado como as estratégias de exploração podem influenciar a transferência inter-temporal de energia e os fatores que afetam a definição dessas estratégias. Será ainda feita uma análise de critérios a ter em conta na localização dos sistemas de armazenamento na rede.

Para este estudo será utilizada uma meta-heurística para identificar a potência e a capacidade dos sistemas de armazenamento e estratégias de exploração para os mesmos que minimizem a energia desperdiçada.

1.3 Estrutura do documento

Este documento está estruturado em cinco capítulos. No primeiro é realizada uma introdução ao tema objeto deste trabalho, é descrita a motivação que leva à realização deste trabalho, é feito o devido enquadramento e é apresentada uma descrição dos objetivos do trabalho e a descrição da estrutura do mesmo. No segundo capítulo, designado “Estado de Arte”, são analisados estudos já realizados sobre as consequências da integração de produção renovável em redes de energia elétrica e também sobre a conjugação de sistemas de armazenamento com produção renovável. São ainda estudadas diferentes tecnologias de armazenamento existentes, diferenciado o tipo de armazenamento em relação ao tempo durante o qual deverá armazenar energia e são ainda brevemente descritas tecnologias de produção de energia através de fontes renováveis.

No terceiro capítulo é descrita a formulação matemática do problema, a metodologia utilizada e o algoritmo criado para a sua resolução e também a rede utilizada para o estudo.

O quarto capítulo é o de apresentação dos resultados obtidos, com respetivos comentários e análises, sendo referidas algumas conclusões retiradas a partir dessas análises. É ainda realizada uma descrição de critérios a adotar para a escolha da localização dos sistemas de armazenamento e também uma análise económica dos resultados obtidos.

No quinto capítulo são descritas as conclusões que foram retiradas no trabalho realizado e perspetivas de desenvolvimentos ou estudos futuros que com ele possam estar relacionados.

Capítulo 2

Estado de Arte

Neste capítulo é realizada uma análise sobre estudos acerca da integração de geração renovável em redes de energia elétrica, analisando as eventuais consequências que pode trazer. Também se estudam abordagens à conjugação de sistemas de armazenamento com produção de energia através de fontes primárias de origem renovável. Procura-se saber quais as análises realizadas e quais as considerações a fazer para a elaboração de estratégias de operação para sistemas de armazenamento. São ainda analisadas tecnologias de armazenamento existentes, bem como tecnologias de produção de energia através de fontes renováveis implementáveis em redes de baixa tensão.

2.1 Estudos sobre a Integração de Produção Renovável

Estudos como [1] procuram minimizar a quantidade de potência produzida por fontes renováveis que é cortada para manter os valores de tensão dentro de limites. Este estudo, que não considera armazenamento, estuda como é que se pode controlar a tensão, evitando que esta ultrapasse o valor limite, cortando o mínimo possível da produção renovável. Também não considera a maximização do uso de renovável, embora procure minimizar a energia que é cortada. O estudo refere que o controlo da tensão através da injeção de potência reativa pode não ser suficiente para um controlo eficaz dos níveis de tensão, até porque com bastante injeção de potência ativa a tensão tende a aumentar de uma forma que deixa de ser possível controlá-la com recurso apenas à injeção de potência reativa. A rede de baixa tensão a simular neste trabalho baseia-se na considerada no estudo [1], com a implementação adicional de sistemas de armazenamento.

Existem ainda estudos realizados sobre o armazenamento de energia elétrica produzida por fonte eólica e armazenada por bombagem. Tais estudos, como [2], [3] e [4] procuram uma solução ótima que maximize o lucro da exploração de um sistema hídrico-eólico. Assim, para além de uma alocação temporal da energia de fonte renovável, procura-se que esta maximize o lucro do sistema, considerando que deve ser armazenada em horas de vazio (energia barata) e disponibilizada em horas em que o preço de venda à rede seja superior. Tal solução, embora possua um incremento na quantidade de energia aproveitada, não procura maximizar a integração de energia de fontes renováveis diretamente, mas sim como consequência da

maximização do lucro. Deste modo, comparando com um sistema unicamente eólico sem armazenamento, embora o lucro obtido seja menor, a energia eólica utilizada pode não ser consideravelmente superior dada a existência de perdas no sistema de armazenamento. Podem surgir situações em que, para aumentar o lucro, saía mais barato cortar eólica, como no caso de não ser possível entregar a totalidade da energia armazenada à rede. Neste estudo também se procura garantir que o sistema hídrico-eólico siga um plano de produção pré-definido, sendo que o sistema hídrico permite compensar variações na produção eólica, derivadas da intermitência e variação desta, permitindo o cumprimento dos planos de produção acordados, além que o armazenamento permite fornecer energia em situações em que não exista produção eólica ou armazenar quando esta é excessiva. Este estudo fornece um plano de operação do sistema hídrico-eólico (consumo por bombagem, produção da central hídrica e produção de energia eólica, além do nível do armazenamento), tendo em conta a carga e as previsões de produção de energia eólica. Para simular que nem toda a energia eólica possível de ser ou entregue à rede ou armazenada, é utilizada uma “*power dump*”, que é basicamente energia produzida pelos geradores eólicos que não é utilizada.

Em [5] é referido que, aquando da decisão de instalar armazenamento devem ser colocadas duas questões: “Vale a pena instalar?” e “Se sim, quanto?”. É também formulado um algoritmo para minimizar o custo diário de operação, sendo estudada ainda a incerteza na produção eólica (modelizada com a introdução de erros na previsão da produção). É referido que o armazenamento permitirá reduzir custos de *start-up* e *shut-down* de outros geradores, nomeadamente diesel. Neste trabalho, para a criação de cenários, o ano é dividido em estações.

Existem também casos reais em que a solução de produção renovável com armazenamento já é implementada. Um desses casos é a ilha Graciosa, nos Açores, em que a produção eólica produz juntamente com geradores diesel e um volante de inércia, que possui capacidade de armazenamento e de entregar energia à rede energia quando necessário. A dissertação [6] estuda tal caso, referindo as tecnologias implementadas nos parques eólicos e no volante de inércia. Verifica-se nesse estudo que, para além de armazenar a energia eólica em horas de vazio, o volante de inércia permite uma exploração mais eficiente dos geradores diesel. Além disso, ainda permite minimizar os esforços dos geradores diesel em caso de saída de serviço de um aerogerador, sendo que a potência que deveria ser fornecida pelo gerador eólica que saiu de serviço é assegurada inicialmente pelo volante de inércia, passando depois suavemente para os geradores diesel. Deste modo, os esforços a que os geradores diesel estão sujeitos serão menores, sendo a tomada de carga por parte destes realizada a uma taxa mais reduzida que a que aconteceria sem a *flywheel*.

A tese [7] descreve um algoritmo para otimizar a capacidade a instalar como armazenamento, sendo a função objetivo minimizar os custos de operação e de instalação do sistema de armazenamento. Na formulação do problema, considera ainda a importância do armazenamento como reserva para garantir o controlo de frequência.

Na tese [8] são descritas algumas tecnologias de armazenamento e as mesmas são comparadas e são estabelecidos critérios para a escolha de quais as tecnologias a instalar para diferentes casos. É estudado o problema de maximização dos proveitos obtidos pela combinação de armazenamento com produção renovável, além de serem realizados testes para três tecnologias de armazenamento (bombagem, ar comprimido e baterias regenerativas de vanádio) sendo verificado que a escolha da tecnologia a aplicar depende da capacidade do armazenamento que se pretende instalar.

O artigo [9] refere que a energia armazenada pode ser utilizada para suavizar as variações que resultam da intermitência da produção renovável. É descrito um método utilizável em vários tipos de sistemas de armazenamento e para vários tipos de energias renováveis. É referido que, com armazenamento, podem-se mitigar problemas como possíveis sobrecargas nas linhas de transmissão (e evitar reforços na rede devido à inclusão de fontes renováveis, pois a produção não tem que ser toda entregue à rede quando é produzida, podendo parte ser armazenada), podem-se obter vantagens económicas de exploração tendo em conta as variações horárias dos preços do mercado e compensar eventuais erros na previsão da disponibilidade da fonte renovável. Refere-se ainda que a descrição do dispositivo de armazenamento deve referir a sua capacidade (energia que pode armazenar), potência a carregar, potência a descarregar, o rendimento a carregar e o rendimento a descarregar.

Em [10] são analisados os impactos da inclusão da geração distribuída e que metodologias utilizar na sua análise. Refere-se que a inclusão da geração distribuída provoca o aparecimento de problemas como a alteração dos perfis de tensão na rede; perdas adicionais; sobrecargas nas linhas; aumento dos níveis das potências de curto-circuito; transitórios de tensão (que podem ser provocados ao ligar ou desligar geradores, embora dependendo das potências em jogo, pois quanto maior for a potência do gerador, maior o risco de transitórios de tensão, mas se a rede for robusta não ocorrerão problemas); a fiabilidade é afetada bem como a coordenação de proteções. Relativamente à fiabilidade, esta pode ser aumentada caso o gerador existente na rede possua mecanismos de controlo que lhe permita manter a rede operacional em caso de falha da alimentação; ou pode ser diminuída caso a inclusão do gerador leve à construção de uma nova linha, aumentando a dimensão da rede, o que leva a um aumento das avarias que podem ocorrer, pois havendo uma rede maior há mais locais sujeitos à ocorrência avarias (especialmente em linhas aéreas).

2.2 Tipos de Armazenamento

As fontes de energia renovável, devido à sua variabilidade, não permitem satisfazer uma curva de carga com exatidão. Além disso, a energia a elas associada não é transferível temporalmente a não ser recorrendo a soluções indiretas de armazenamento. Neste âmbito, surgem tecnologias de armazenamento que permitem compensar falhas ou necessidades na produção, ajustar a carga ou transferir a energia entre períodos de tempo. O facto das fontes de energia renovável poderem ser utilizadas como produção descentralizada e colocadas na rede de baixa tensão levanta ainda problemas de estabilidade do sistema e de manutenção de níveis de tensão, que podem ser corrigidos com recurso a sistemas de armazenamento que, devidamente dimensionados, podem ser colocados em locais convenientes para satisfazer tais requisitos.

2.2.1 Bombagem

A bombagem é uma forma de armazenar energia que já possui algumas décadas de existência. Consiste em utilizar uma central hidroelétrica com albufeira que para além do sistema gerador tem também um sistema motor (ou o sistema gerador tem a capacidade de operar como motor). Caso haja capacidade disponível na albufeira, em vez de utilizar a água armazenada para produzir energia, consome energia para armazenar água na albufeira, podendo isto ser realizado em diversas configurações possíveis (uma conduta e um gerador com capacidade para funcionar como motor, uma conduta com um gerador e também um motor ou então duas condutas independentes, uma com um motor e outra com um gerador). Possui uma

capacidade de armazenamento elevada (embora dependa da dimensão da albufeira), porém possui perdas também consideráveis, dado que o sistema é composto por um motor, uma turbina e ainda condutas, sendo que existem perdas elétricas e mecânicas durante o processo de armazenamento. Para além disto, a sua localização é condicionada, pelo que pode encontrar-se bastante distante das cargas a alimentar e da geração a armazenar, o que leva a perdas por transporte. A eficiência típica deste sistema de armazenamento está entre 65% a 80% [11].

2.2.2 Baterias

As baterias de acumuladores utilizadas para armazenamento de energia são uma tecnologia com alguma maturidade, porém têm visto grandes desenvolvimentos nos últimos anos. Basicamente, realizam uma conversão entre energia elétrica e energia química, permitindo armazenar e gerar energia elétrica através de reações químicas reversíveis. Existem diversos tipos de tecnologias para efetuar este tipo de armazenamento (chumbo-ácido, níquel-cádmio, sódio-enxofre, iões de lítio). As principais características deste sistema de armazenamento são a elevada densidade de energia (de 150 a 2000 Wh/kg para as baterias de lítio), maturidade de algumas tecnologias e poderem ser portáteis (quando desenhadas para tal), o que as torna ideias para utilização em veículos elétricos. Podem ainda ser facilmente instaladas em redes de baixa tensão, pois as suas dimensões são reduzidas e não provocam ruído. Necessitam de conversão AC-DC para interligar com rede de distribuição. Têm contudo um tempo de vida reduzido tendo em conta o número de ciclos carga-descarga e a profundidade de descarga destes. O rendimento do ciclo energético das baterias depende do rendimento dos conversores (AC-DC a armazenar e DC-AC a entregar energia à rede) e também do rendimento intrínseco destas (perdas porque aquecem e ainda têm uma taxa de auto-descarga). Atendendo a que os conversores costumam possuir rendimentos relativamente elevados (90 % a 95 %, havendo atualmente melhorias na eficiência destes [12]), o rendimento global do ciclo varia entre 75 % a 85 %.

Seguidamente, é realizada uma breve descrição de algumas tecnologias de baterias [13].

Baterias de Chumbo-Ácido – Tecnologia mais madura, com elevada eficiência. Possuem um custo inicial de armazenamento mais elevado das baterias existentes e um tempo de vida reduzido (poucos ciclos carga-descarga). Não conseguem armazenar muita energia num pequeno volume.

Baterias de Níquel-Cádmio – Tecnologia madura, usada maioritariamente em controlo de potência e compensação de reativa. Possuem boa performance ao longo da vida e boa eficiência. Porém, têm cádmio na sua constituição, metal pesado e prejudicial para o ambiente. Contudo, baterias estacionárias são facilmente recicladas no fim do período de vida.

Baterias de Sódio-Enxofre – Tecnologia madura com bastante utilização em aplicações de equilíbrio do diagrama de carga no Japão [14 citado por 13]. A temperatura de funcionamento é de 325 °C e necessita de ser aquecida quando em standby, o que reduz a sua eficiência. Como a eficiência intrínseca é elevada, é comparável a outras tecnologias.

Baterias de Iões de Lítio – Tecnologia ainda com pouca maturidade. Porém possuem elevada densidade de energia, reduzida taxa de auto-descarga e não possuem efeito de memória (perda de capacidade de carga ao longo de ciclos carga-descarga). São especialmente indicadas para veículos elétricos ou veículos híbridos. É uma tecnologia promissora e ainda possuem uma grande margem de progressão, com um vasto campo de novos desenvolvimentos a poderem ser atingidos [15].

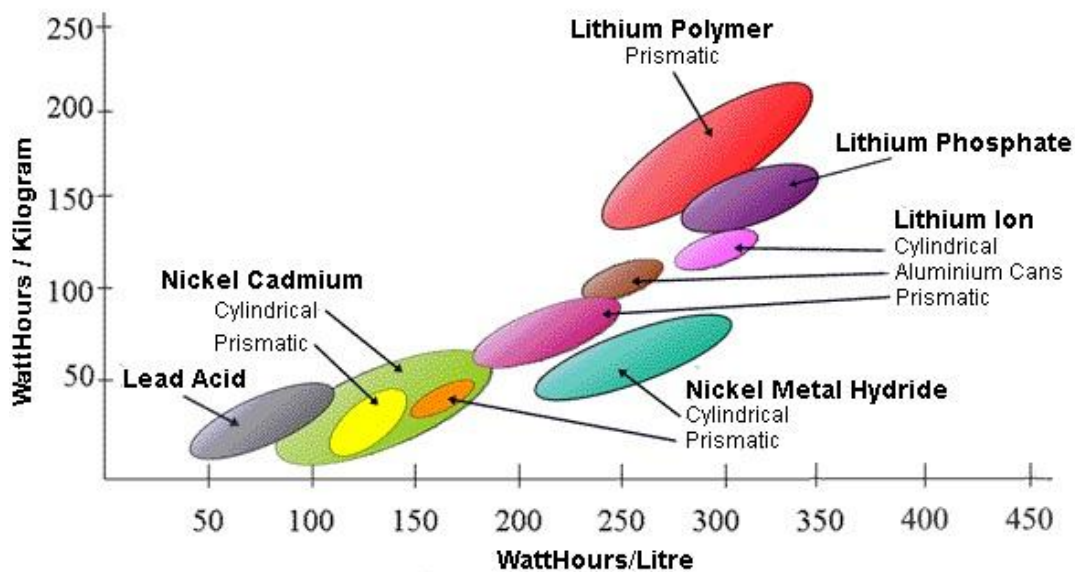


Figura 2.1 – Comparação de diferentes tecnologias de baterias em relação a capacidade de armazenamento por quilograma e por litro [16].

Como é possível verificar pela figura 2.1, as diferentes tecnologias de baterias fornecem várias soluções no que toca à relação da capacidade de armazenamento por unidade de massa ou volume. Assim, certas tecnologias, com elevada densidade de energia, apresentam soluções mais compactas, ideais para utilização em espaços mais reduzidos. No entanto, além do espaço que podem ocupar, é necessário analisar outras características atrás referidas, como a taxa de auto-descarga e o efeito de memória.

2.2.3 Baterias de fluxo regenerativas

Este tipo de baterias é composto por um sistema de dois eletrólitos, ambos no estado líquido, que armazenam e libertam energia elétrica através de reações eletroquímicas reversíveis entre os dois eletrólitos, através de uma membrana. Uma vantagem deste tipo de baterias é o facto da capacidade de armazenamento ser independente da potência, pois para maior armazenamento de energia basta aumentar a quantidade de eletrólito [11]. Deste modo, o custo destas pode ser dividido em módulo por kW e em eletrólito mais tanque por kWh. O custo do módulo é reduzido, porém o custo do eletrólito é elevado. [13]

2.2.4 Volantes de Inércia

Os volantes de inércia ou *flywhells* são dispositivos de armazenamento que armazenam energia cinética. Possuem um volante de inércia (massa rotativa) acoplado a um motor/gerador elétrico que aumenta a velocidade de rotação quando armazena e perde velocidade de rotação quando liberta energia. São muitas vezes designados por baterias eletromecânicas. Devido a armazenarem energia sob a forma de velocidade, possuem perdas por atrito, o que impede esta tecnologia de ser utilizada em armazenamento a longo prazo, pois a eficiência diminui com o passar do tempo, pelo aumento das perdas por fricção. Possuem um bom tempo de vida tendo em conta os ciclos de carga e descarga, podendo durar de 10000 a 100000 ciclos, embora esteja dependente de como seja desenhado para eliminar o desgaste por fadiga. A massa rotativa deve

estar em vácuo e suspensa por chumaceiras eletromagnéticas para reduzir as perdas por atrito. [11]

2.2.5 Ar Comprimido

Esta tecnologia de armazenamento baseia-se em utilizar energia elétrica para comprimir ar em horas de vazio e expandir o ar numa câmara de combustão, alimentando uma turbina e gerando energia elétrica em horas de ponta. Este tipo de armazenamento é realizado a altas pressões (40 a 70 bares) a temperaturas próximas da temperatura ambiente. Para armazenar o ar comprimido são utilizadas localizações como cavernas, minas de sal inutilizadas ou cavernas subterrâneas de gás natural [11]. Estas permitem armazenar grandes quantidades de energia, porém a sua localização é bastante condicionada. Podem ser utilizados tanques, que podem ser colocados nos locais mais propícios para minimizar perdas com transporte da energia, porém a energia que se pode armazenar é menor. O ar comprimido possui uma densidade energética de 12 kWh/m^3 [17 citado por 11] e rendimentos à volta de 70 % [18 citado por 11].

2.2.6 Super-Condensadores

Os Super-Condensadores são uma tecnologia de armazenamento de energia sob a forma de energia elétrica, isto é, a energia é armazenada em campos elétricos. O princípio é o mesmo de um condensador, mas aqui o dielétrico é um eletrólito. Possui uma densidade energética de 5 a 15 kWh/kg e uma eficiência de 95 %, porém possuem uma taxa de auto-descarga de 5 % por dia [18 citado por 11], o que implica que não deve ser utilizado para armazenamento a longo prazo.

2.2.7 PHEV's (Plug In Electric Vehicles) e BEV's (Battery Electric Vehicles)

A massificação dos veículos elétricos pode introduzir uma nova forma de armazenamento. Embora sejam baterias, estas não se encontram sempre ligadas à rede e são transportáveis. Segundo o conceito *Vehicle to Grid*, um veículo elétrico ou um conjunto de veículos elétricos, quando parados e ligados à rede, poderiam ser utilizados para transferir energia entre diversos períodos de tempo e para a manutenção da estabilidade da rede, em caso de falha desta. Assim, as baterias que estes possuem funcionariam não apenas como armazenamento de energia para a deslocação do veículo mas também poderiam ter ser utilizadas para uma melhor utilização da energia, através da transferência inter-temporal desta, além de poderem permitir a manutenção da estabilidade da rede.

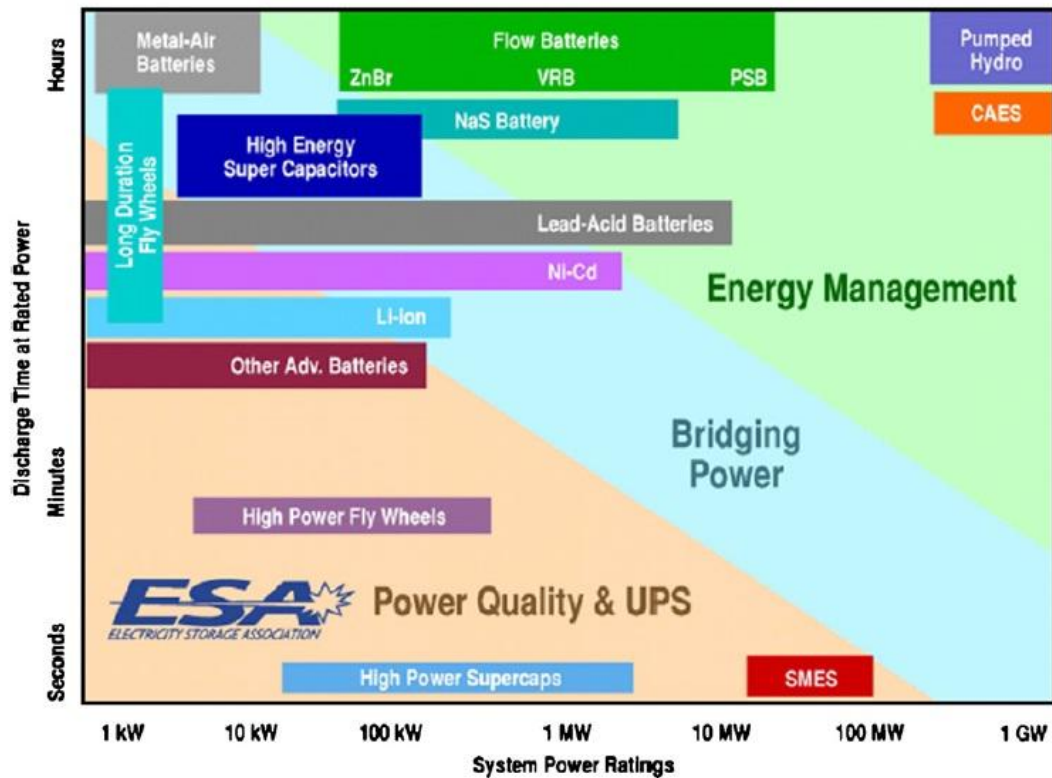


Figura 2.2 - Comparação de diferentes tecnologias de armazenamento tendo em conta tempos de descarga e potências de interligação [19 citado por 11].

A análise da figura 2.2 permite concluir que as tecnologias de baterias se enquadram no caso em estudo neste trabalho, pois existem para potências e tempos de descarga dentro dos espectáveis para uma aplicação com estratégias de exploração através da absorção e entrega de energia renovável em ciclos diários.

2.3 Duração do Armazenamento

O armazenamento pode ser categorizado tendo em conta a capacidade necessária e a potência de interligação (que, dependendo da necessidade, deve ser minimizada), o tipo de aplicação (portátil ou permanente) e a duração do armazenamento. No que toca à duração, esta pode ser de longo, médio ou curto prazo [7].

Numa duração a longo prazo, a tecnologia a escolher para armazenar deverá possuir uma taxa de auto-descarga o mais reduzida possível, para que a energia armazenada não se perca sem ser usada. A energia é armazenada por períodos de horas a semanas ou meses. Normalmente, este tipo de armazenamento é utilizado para retirar vantagem das diferenças de preços entre horas de pico e horas de vazio ou para equilibrar o diagrama de carga de um sistema. Também permite armazenar energia para alturas do ano em que esta seja mais escassa (hídrica no Verão, por exemplo). O ciclo normal de funcionamento quando o armazenamento é previsto para longa duração é armazenar durante a noite (horas de vazio) e entregar energia à rede em horas de ponta, retirando daí vantagens económicas e permitindo um melhor equilíbrio do diagrama de cargas.

O armazenamento a médio prazo permite assegurar o fornecimento de energia de alguns minutos a algumas horas. Este tipo de armazenamento é comumente usado em sistemas com geração renovável, pois permite transferir entre períodos a energia de fontes renováveis ou corrigir as intermitências desta. A transferência entre períodos de energia renovável é importante pois esta pode surgir numa fase do dia em que a carga seja reduzida (horas de vazio) mas encontrar-se indisponível em horas de ponta. Assim, torna-se possível transferi-la entre períodos. Além disso, permite obter vantagens económicas, armazenando a energia em horas em que esta seja barata e vendendo-a em horas cujo preço seja superior. Este tipo de armazenamento possibilita ainda o controlo do pico de produção, alisamento do diagrama de carga, controlo de frequência e a diminuir a capacidade de produção ligada (reserva girante).

Armazenamento a curto prazo é aquele que permite manter o sistema estável durante alguns segundos a poucos minutos. Enquadram-se neste tipo de armazenamento as UPS. São sistemas baseados em eletrónica de potência que permitem uma rápida atuação com potências elevadas para estabilização da tensão ou mesmo manutenção do sistema por curtos períodos de tempo. Este tipo de armazenamento é particularmente útil em instalações remotas (sujeitas a falhas do sistema elétrico) ou para proteção de equipamentos sensíveis (manter computadores a funcionar durante curto período de tempo).

2.4 Tipos de Geração por fontes renováveis

2.4.1 Solar Fotovoltaico

O Sol fornece 1 kW/m^2 ao planeta Terra sob a forma de radiação, de um total de $62,5 \text{ MW/m}^2$ que saem da superfície do Sol. A irradiação extraterrestre é a radiação no exterior da atmosfera, que é atenuada para metade enquanto a atravessa. Denomina-se por irradiância a potência que incide na superfície por unidade de área (kW/m^2) e por irradiação a energia que incide na superfície por unidade de área, para um dado período de tempo (kWh/m^2). A irradiação pode dividir em três componentes, a direta (que corresponde à que é recebida diretamente do Sol), a difusa (que corresponde à que vem de todo o céu visível excetuando o Sol, isto é, radiação não direta que é dispersa pela atmosfera) e a irradiação refletida no albedo (que vem do solo e corresponde à radiação refletida pela superfície do planeta). A irradiação global é a soma destas três componentes. A irradiação solar estende-se por todo o espectro, porém com maior amplitude na zona denominada por espectro visível, que corresponde à radiação que um ser humano consegue ver. Esta fonte de energia pode ser aproveitada, tanto para aquecimento como para geração de energia elétrica (por efeito térmico ou efeito fotoelétrico).

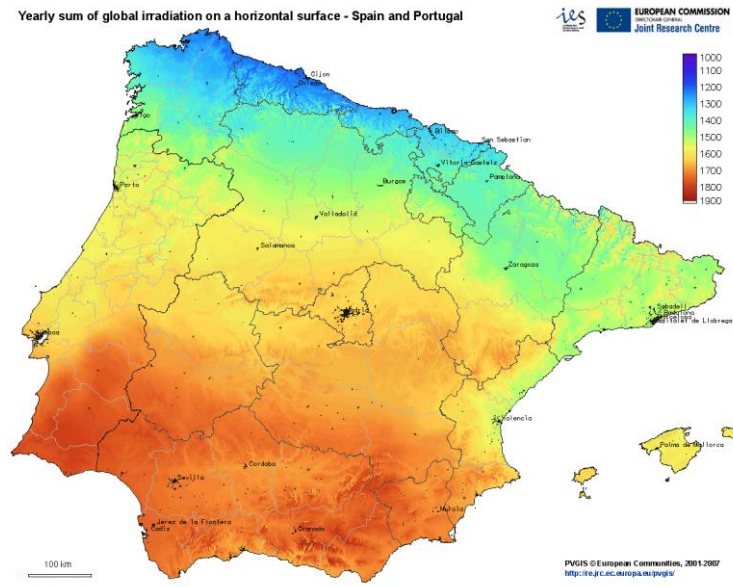


Figura 2.3 - Imagem da distribuição na Península Ibérica da irradiação solar durante um ano que incide numa superfície horizontal [21 citado por 20].

A figura 2.3 mostra que o recurso solar é abundante na Península Ibérica, especialmente no Sul. A existência deste recurso em grande quantidade potencia a sua utilização para geração de energia elétrica, sendo uma fonte limpa e endógena e uma alternativa aos combustíveis fósseis, que além de poluentes necessitam de ser importados.

O Solar Fotovoltaico refere-se ao efeito fotoelétrico, a partir do qual é possível gerar uma corrente elétrica DC quando a radiação solar incide num semicondutor, criando um par elétron-lacuna cuja circulação corresponde à corrente elétrica. Como é possível analisar na figura 2.4, a incidência de um fóton no semicondutor que possua energia superior à energia da banda de condução provoca a criação de um par elétron-lacuna. A ligação de uma carga às extremidades do semicondutor provocam a circulação destes elétrons, alimentando a carga com uma corrente elétrica contínua. Porém, existem perdas por reflexão (caso o fóton não chegue à camada n), por o fóton não ter energia suficiente para provocar a criação do par elétron-lacuna e por não transmissão (não cria o par na camada n). Como a energia criada na célula é fornecida em corrente contínua, a integração desta numa rede de energia elétrica ou mesmo numa habitação obrigará a aparelhagem de conversão DC-AC.

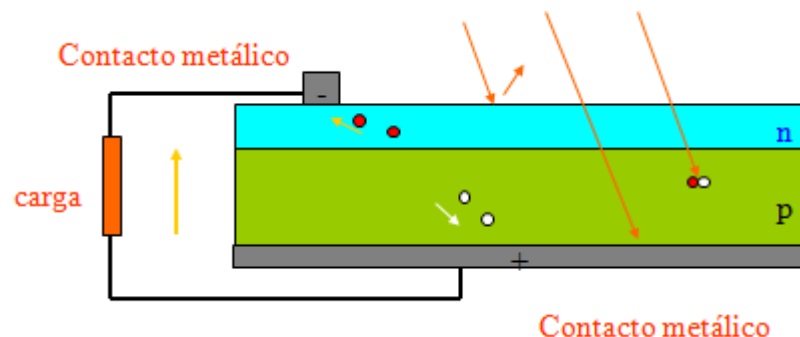


Figura 2.4 - Ilustração do efeito fotovoltaico, demonstrando a criação do par elétron-lacuna pela incidência de um fóton no semicondutor [20].

Existem diversas tecnologias para a geração de energia elétrica pelo efeito fotovoltaico, sendo definidas em termos do grau de cristalização das células do semicondutor (normalmente

silício, mas sendo também utilizados arsenieto de gálio, telurieto de cádmio ou disselenieto de cobre e índio). As células monocristalinas (células com um único cristal) são uma tecnologia da primeira geração de painéis fotovoltaicos, sendo das mais antigas. Mesmo assim, são a tecnologia com melhor eficiência (por volta dos 25 %). As células policristalinas são uma tecnologia também de primeira geração, com menor eficiência que as células monocristalinas mas apresentando preços mais reduzidos. Como o nome indica, as células policristalinas possuem múltiplos cristais, sendo os mesmos visíveis a olho nu. A outra tecnologia existente é com células amorfas, isto é, sem cristais definidos. Possuem rendimentos reduzidos, mas podem ser embutidas em edifícios sem ser num painel fotovoltaico, com vantagens do ponto de vista arquitetónico. Podem mesmo possuir propriedades físicas que lhes permitam desempenhar outra função que não apenas a produção renovável (Building-Integrated Photovoltaics).

Para caracterizar o recurso solar é necessário conhecer, para uma dada zona, a irradiação global, o número de horas de Sol (o número de horas de um dia em que a irradiação é superior a um dado valor, que varia consoante a estação do ano) e a temperatura média. A temperatura é um aspeto importante pois a eficiência de um painel fotovoltaico diminui com o aumento da temperatura, sendo necessário ajustá-la. A curva de produção típica é fortemente dependente da estação do ano, devido à inclinação do Sol e ao número de horas de Sol, porém possui um formato similar em dias de diferentes estações ao longo do ano.

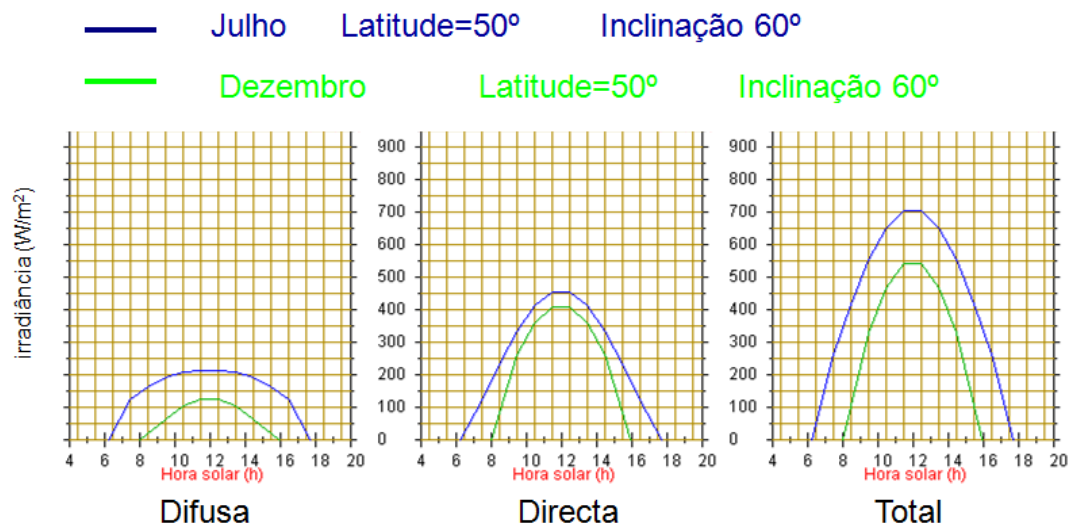


Figura 2.5 - Diferentes irradiâncias ao longo do dia para os meses de Julho e Dezembro [20].

Esta forma de geração de energia possui imensa disponibilidade, porém também possui grande intermitência. Eventuais alterações no estado do tempo (aparecimento de nuvens) provocam perdas de produção. Deste modo, a instalação de pequenas potências dispersas por uma vasta área surge como uma solução que permite gerar energia e minimizar algumas dessas intermitências (uma nuvem pode não cobrir uma cidade inteira). A aplicação do solar fotovoltaico em produção dispersa (em especial em redes de baixa tensão) permite ainda reduzir perdas no transporte e distribuição de energia. [20]

2.4.2 Aerogeradores

A energia eólica é uma energia que existe em todo o lado e é utilizada desde a antiguidade (os moinhos eram utilizados para moer cereais, os barcos eram movido com recurso à força do vento através de velas). A sofisticação da tecnologia e a crescente necessidade de gerar energia elétrica através de fontes renováveis e não poluentes levou à aplicação desta energia na produção de eletricidade. Pode ser descrita como uma forma de energia solar, visto que a circulação do vento é causada pelo aquecimento derivado da radiação solar.

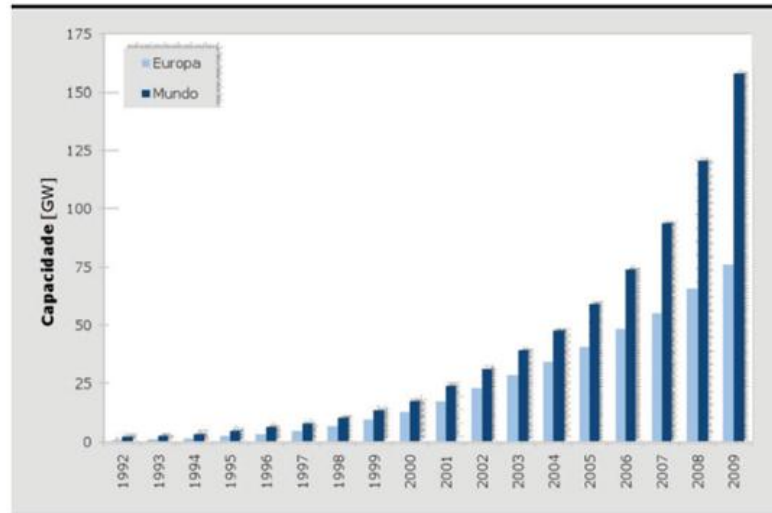


Figura 2.6 - Evolução da potência instalada (GW) em geradores eólicos na Europa e no Mundo [20].

A caracterização do recurso eólico é uma tarefa complexa, dada a variabilidade a que este é sujeito e os diversos fatores que o influenciam (temperatura, relevo, densidade do ar, distância ao solo). Porém, estudos demonstram que a frequência de ocorrência das diferentes velocidades do vento ao longo de um ano possui uma distribuição similar à distribuição de Weibull, representada na figura 2.7.

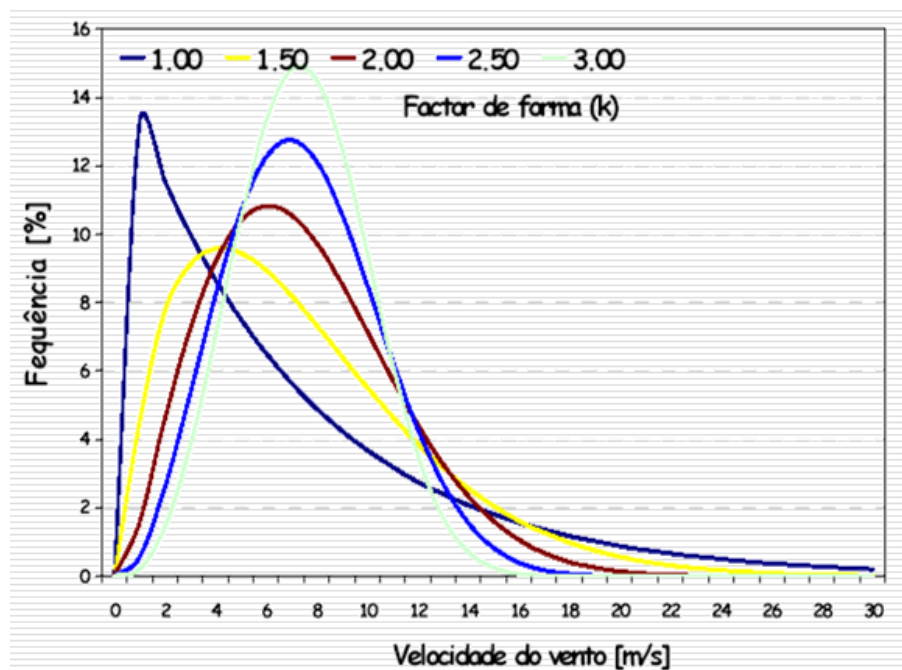


Figura 2.7 - Distribuição de Weibull que descreve a percentagem de ocorrência de velocidades do vento [20].

O estudo para a localização de aerogeradores é longo, sendo necessário analisar o recurso eólico através de medições por períodos de cerca de um ano. Conhecendo o recurso, a localização dos aerogeradores deve ser definida para a melhor eficiência da produção de energia elétrica através da energia eólica, tendo em atenção locais onde o vento é mais propício à geração de energia e também efeitos de esteira, isto é, os aerogeradores devem possuir um afastamento entre si para não introduzirem perdas e riscos de avarias mecânicas. É normal existir um afastamento na direção do vento dominante de 5 a 6 vezes o diâmetro do rotor e de 3 vezes o diâmetro do rotor na direção perpendicular ao vento dominante.

Existem fundamentalmente três tipos de aerogeradores, máquinas assíncronas (com ou sem controlo do ângulo de *pitch*), máquinas assíncronas duplamente alimentadas e máquinas síncronas de velocidade variável. As duas últimas tecnologias necessitam de conversores eletrónicos para interligação com a rede, devido à frequência da eletricidade gerada não ser necessariamente a da rede. O controlo de *pitch* atrás referido é o controlo do ângulo das pás. Alguns aerogeradores controlam toda a pá, enquanto outros apenas a extremidade. Este controlo auxilia o processo de arranque e paragem e permite a travagem.

Embora grande parte da produção de eletricidade através de energia eólica seja realizada em parques eólicos, com potências na ordem das centenas de kW, é possível também implementar geradores de pequenas dimensões e potências em edifícios residenciais, solução interessante pois trás as vantagens já referidas da produção dispersa. Neste caso trata-se de instalar micro-geradores eólicos que podem ser ligados sobre as redes de baixa tensão, à semelhança do que ocorre com os painéis solares fotovoltaicos. [20]

Capítulo 3

Utilização de Sistemas de Armazenamento Distribuído para Maximização da Integração da Produção Renovável

Neste capítulo será descrita a abordagem realizada ao problema da maximização da integração de produção renovável através da utilização de sistemas de armazenamento distribuído. Inicialmente é formulado o problema, dividido em duas fases, a primeira de dimensionamento do sistema de armazenamento (em potência e capacidade) e a segunda de elaboração de estratégias de exploração para o sistema de armazenamento que minimizem o desperdício de energia renovável, tendo em conta a produção renovável existente. Considera-se que existe desperdício se, para o sistema de armazenamento dimensionado na primeira fase do problema, não é possível armazenar toda a energia necessária armazenar para corrigir os eventuais problemas de tensão que possam surgir com a inclusão de produção renovável. Seguidamente é descrita a metodologia considerada para a resolução do problema e as considerações realizadas e a implementar. Por fim, é apresentada a rede que se considerou para o estudo.

3.1 Formulação do Problema

O problema a resolver é dividido em duas fases. Na primeira procura-se o valor de capacidade da bateria e valor da potência de interligação mínimos que garantem que não existe violação dos níveis de tensão na rede de baixa tensão pelo facto de ocorrer produção de energia proveniente de instalações de microgeração. Na segunda fase o algoritmo procura minimizar o eventual desperdício de energia proveniente da fonte renovável, isto é, tendo em conta os valores de energia e potência identificados na primeira fase, procura-se um plano de operação diário para os sistemas de armazenamento que garanta que os limites de tensão são satisfeitos minimizando simultaneamente o desperdício de produção renovável local. O objetivo é minimizar o desperdício de energia renovável, seja porque o armazenamento se encontrava completamente carregado ou porque a potência de interligação era inferior à necessária nesse momento. Em ambas as fases, considera-se que os sistemas de armazenamento se encontram vazios no início.

18 Utilização de Sistemas de Armazenamento Distribuído para Maximização da Integração da Produção Renovável

Para resolver o primeiro problema define-se um problema de otimização associado à minimização da capacidade do armazenamento das baterias, envolvendo a definição de uma função objetivo dada por:

$$\min E_{st,j,MAX} \quad (3.1)$$

Tal encontra-se sujeito às seguintes restrições de igualdade:

$$E_{st,j,MAX} = \sum_{i=1}^{24} MAXIMO (E_{st,i,j}) \quad (3.2)$$

$$P_{ent,i,j} = 0, \text{ se } P_{abs,i,j} > 0 \quad (3.3)$$

$$P_{abs,i,j} = 0, \text{ se } P_{ent,i,j} > 0 \quad (3.4)$$

$$P_{st,j}^{MAX} = MAXIMO(P_{abs,i,j}, P_{ent,i,j}) \quad (3.5)$$

$$E_{st,i,j} = (P_{abs,i,j} \cdot \eta_{abs} \cdot \Delta t_i) - \left(\frac{P_{ent,i,j}}{\eta_{ent}} \cdot \Delta t_i \right) \quad (3.6)$$

$$f(\underline{P}, \underline{Q}, U, \theta) = 0 \quad (3.7)$$

E às restrições de desigualdade definidas pelas equações:

$$P_{abs,i,j} \leq P_{PV,i} \quad (3.8)$$

$$0 \leq P_{abs,i,j} \quad (3.9)$$

$$0 \leq P_{ent,i,j} \quad (3.10)$$

$$U^{min} \leq U_{i,j} \leq U^{MAX} \quad (3.11)$$

Onde:

$E_{st,j,MAX}$ - Energia máxima do sistema de armazenamento j.

$P_{st,j}^{MAX}$ - Potência máxima do sistema de armazenamento j.

$E_{st,i,j}$ - Energia armazenada ou entregue à rede pelo sistema de armazenamento j no período

i.

$P_{abs,i,j}$ - Potência absorvida pelo sistema de armazenamento j no período i.

η_{abs} - Rendimento do sistema de armazenamento a absorver energia.

$P_{ent,i,j}$ - Potência entregue à rede pelo sistema de armazenamento j no período i.

η_{ent} - Rendimento do sistema de armazenamento a entregar energia à rede.

$P_{PV,i}$ - Potência gerada pelo gerador fotovoltaico no período i.

$U_{i,j}$ - Tensão no barramento j no período i.

U^{min} - Limite mínimo para o valor de tensão (0,95 p.u.).

U^{MAX} - Limite máximo para o valor de tensão (1,05 p.u.).

Δt_i – Duração do período i .

As variáveis de entrada são a previsão da produção renovável, a previsão da carga e os parâmetros da rede. A saída será o valor da capacidade do sistema de armazenamento $E_{st,MAX}$ e o valor da potência de interligação $P_{st,i,j}^{MAX}$. As variáveis de controlo são a potência entregue à rede pelo sistema de armazenamento $P_{ent,i,j}$ e a potência absorvida por este $P_{abs,i,j}$, que, para o mesmo sistema de armazenamento, nunca podem ser ambas superiores a zero no mesmo período.

A equação (3.2) refere que a capacidade escolhida para o armazenamento j é o somatório das energias que é necessário armazenar para todos os intervalos de tempo i .

A equação (3.3) estabelece que se a potência do sistema de armazenamento a absorver for maior que zero, a potência do sistema de armazenamento a entregar energia à rede deve ser nula.

A equação (3.4) estabelece que se a potência do sistema de armazenamento a entregar energia à rede for maior que zero, a potência do sistema de armazenamento a absorver energia deve ser nula.

A equação (3.5) estabelece que a potência escolhida para o armazenamento j é o máximo das potências entregues ou absorvidas encontradas para todos os intervalos de tempo i .

A equação (3.6) estabelece que o cálculo da energia armazenada no momento i no sistema de armazenamento j pode ser positiva (carrega a bateria) ou negativa (entregar potência à rede, descarregando a bateria). Da potência absorvida apenas é armazenada a que resultante da multiplicação pelo rendimento do retificador. Quando funciona como gerador, é removida mais energia do sistema de armazenamento do que a que é realmente entregue à rede, devido ao rendimento do inversor.

A expressão (3.7) define o conjunto de restrições associadas à necessidade de verificar o trânsito de potência, tendo como variáveis de entrada a potência ativa e a potência reativa e como resultados a tensão em módulo e fase. Para este ser calculado, necessita dos parâmetros elétricos da rede.

As variáveis de controlo deste problema consistem na potência entregue à rede e na potência absorvida pelo sistema de armazenamento para cada intervalo de tempo a considerar. O resultado do trânsito de potências é utilizado para avaliar a viabilidade de cada solução.

A restrição (3.8) determina que a potência a absorver pelo sistema de armazenamento não pode ser superior à potência gerada pela fonte renovável para um dado momento.

As restrições (3.9) e (3.10) impõe que os valores de potência não podem ser negativos.

A restrição (3.11) impõe que devem ser cumpridos os limites de tensão estabelecidos para a rede.

Na segunda fase, o problema a resolver pretende encontrar estratégias de exploração que conduzam à minimização do desperdício de energia renovável. Partindo do pressuposto que se perde energia quando se pretende armazenar mas não se pode porque o armazenamento está completo ou porque a potência do inversor é inferior à necessária armazenar para um dado intervalo de tempo, o problema a resolver pode descrever-se da seguinte forma:

$$\min E_{dump} \quad (3.12)$$

Estando sujeito às seguintes restrições de igualdade:

20 Utilização de Sistemas de Armazenamento Distribuído para Maximização da Integração da Produção Renovável

$$E_{dump} = \sum_{i=1}^{24} \sum_{j=1}^m \text{MAXIMO}(E_{D,i,j}, P_{D,i,j} \cdot \Delta t) \quad (3.13)$$

$$P_{D,i,j} = \begin{cases} P_{abs,i,j} - P_{st,j}^{MAX}, & \text{se } P_{abs,i,j} > P_{st,j}^{MAX} \\ 0, & \text{se } P_{abs,i,j} \leq P_{st,j}^{MAX} \end{cases} \quad (3.14)$$

$$E_{D,i,j} = \begin{cases} E_{st,i,j} - E_{st,j}^{MAX}, & \text{se } E_{st,i,j} > E_{st,j}^{MAX} \\ 0, & \text{se } E_{st,i,j} \leq E_{st,j}^{MAX} \end{cases} \quad (3.15)$$

$$P_{ent,i,j} = 0, \text{ se } P_{abs,i,j} > 0 \quad (3.16)$$

$$P_{abs,i,j} = 0, \text{ se } P_{ent,i,j} > 0 \quad (3.17)$$

$$E_{st,i,j} = E_{st,i-1,j} + P_{abs,i,j} \cdot \eta_{abs} \cdot \Delta t_i - \left(\frac{P_{ent,i,j}}{\eta_{ent}} \cdot \Delta t_i \right) \quad (3.18)$$

$$E_{st,i,j} = 0, \text{ se } P_{c,i} \leq 0,15 \times P_{cins} \text{ e } P_{PV,i} < 0,05 \times P_{PVins} \quad (3.19)$$

$$P_{abs,i,j} = 0, \text{ se } \frac{\sum_{t=i}^{i+8} P_{PV,t}}{8} \geq 0,45 \times P_{cins} \text{ e } U^{min} \leq U_{i,j} \leq U^{MAX} \quad (3.20)$$

$$P_{ent,i,j} = 0, \text{ se } P_{PV,i} > 0,3 \times P_{PVins} \text{ ou } P_{c,i} < 0,3 \times P_{cins} \quad (3.21)$$

$$f(\underline{P}, \underline{Q}, U, \theta) = 0 \quad (3.22)$$

E às restrições de desigualdade definidas por:

$$P_{abs,i,j} \leq P_{PV,i} \quad (3.23)$$

$$P_{D,i,j} \geq 0 \quad (3.24)$$

$$E_{D,i,j} \geq 0 \quad (3.25)$$

$$0 \leq P_{abs,i,j} \quad (3.26)$$

$$0 \leq P_{ent,i,j} \quad (3.27)$$

$$0 \leq E_{st,i,j} \quad (3.28)$$

$$P_{ent,i,j} \leq P_{st,j}^{MAX} \quad (3.29)$$

$$P_{ent,i,j} > 0, \text{ se } \frac{E_{st,i,j}}{\text{ponta} - i} \geq \frac{P_{st,j}^{MAX}}{\eta_{ent}} \quad (3.30)$$

$$U^{min} \leq U_{i,j} \leq U^{MAX} \quad (3.31)$$

Onde:

E_{dump} - Energia desperdiçada por incapacidade de armazenar a energia necessária para a manutenção dos limites de tensão.

$P_{D,i,j}$ - Potência desperdiçada no período i pelo sistema de armazenamento j , devido ao facto da potência necessária armazenar pelo sistema de armazenamento j nesse período ser superior à potência do inversor.

$E_{D,i,j}$ - Energia desperdiçada no período i pelo sistema de armazenamento j , devido ao facto de nesse período a capacidade necessária para o sistema de armazenamento ser superior à capacidade deste.

$E_{st,j,MAX}$ - Energia máxima do sistema de armazenamento j .

$P_{st,j}^{MAX}$ - Potência máxima do sistema de armazenamento j .

$E_{st,i,j}$ - Energia existente no sistema de armazenamento j no período i .

$P_{abs,i,j}$ - Potência absorvida pelo sistema de armazenamento j no período i .

η_{abs} - Rendimento do sistema de armazenamento a absorver energia.

$P_{ent,i,j}$ - Potência entregue à rede pelo sistema de armazenamento j no período i .

η_{ent} - Rendimento do sistema de armazenamento a entregar energia à rede.

$P_{c,i}$ - Potência consumida pela rede no período i .

$P_{PV,i}$ - Potência gerada pelo gerador fotovoltaico no período i .

P_{cins} - Potência de carga instalada na rede.

P_{PVins} - Potência de geradores fotovoltaicos instalada na rede.

$ponta$ - Último período de ponta do dia. Consiste num período de carga elevada seguido de um período de carga reduzida.

$U_{i,j}$ - Tensão no barramento j no período i .

U^{min} - Limite mínimo para o valor de tensão (0,95 p.u.).

U^{MAX} - Limite máximo para o valor de tensão (1,05 p.u.).

Δt_i - Duração do período i .

As variáveis de entrada são os parâmetros da rede, a curva de produção estimada e a curva de carga estimada. As variáveis de saída são a energia desperdiçada e um plano de operação do sistema de armazenamento, quando é que deve atuar como carga, quando deve atuar como gerador e qual a energia que tem armazenada em cada intervalo de tempo. As variáveis de controlo são assim a potência entregue pelo armazenamento à rede e a potência absorvida pelo sistema de armazenamento, que nunca poderão ser ambas superiores a zero, para o mesmo intervalo de tempo.

A equação (3.13) estabelece que a energia desperdiçada resulta do valor máximo entre a energia que não pode ser armazenada e a potência que é superior à necessária multiplicada pelo tempo. Tal deve-se a que, num intervalo de tempo, apenas uma destas restrições deve ser considerada como limitadora, e nunca as duas ao mesmo tempo, procurando assim evitar

22 Utilização de Sistemas de Armazenamento Distribuído para Maximização da Integração da Produção Renovável

ambiguidades. Devem ser consideradas para todos os intervalos de tempo (i) e para todos os armazenamentos (j).

A equação (3.14) estabelece que a potência desperdiçada é a diferença entre a que se pretende armazenar e a que se pode armazenar, para um dado armazenamento num dado intervalo de tempo.

A equação (3.15) estabelece que a energia desperdiçada é a diferença entre a energia que deveria ficar no armazenamento num dado intervalo de tempo e a capacidade máxima do armazenamento.

A equação (3.16) estabelece que se a potência do sistema de armazenamento a absorver for maior que zero, a potência do sistema de armazenamento a entregar energia à rede deve ser nula.

A equação (3.17) estabelece que se a potência do sistema de armazenamento a entregar energia à rede for maior que zero, a potência do sistema de armazenamento a absorver energia deve ser nula.

A equação (3.18) estabelece que a energia que será armazenada num dado intervalo de tempo depende da que já se encontra armazenada mais a energia absorvida no intervalo de tempo atual multiplicada pelo rendimento do retificador ou menos a energia fornecida pelo armazenamento no intervalo de tempo a dividir pelo rendimento do inversor (pois a energia fornecida à rede é inferior à que o armazenamento disponibiliza, devido a “perdas” no inversor).

A expressão (3.19) estabelece que durante a noite não deverá existir energia no sistema de armazenamento.

A expressão (3.20) estabelece que caso nos períodos seguintes exista elevada disponibilidade de energia renovável e se os limites de tensão estiverem a ser cumpridos no atual, não deverá ser absorvida energia no período atual.

A expressão (3.21) estabelece que durante o dia, quando a carga não é muita elevada, não exista entrega de energia à rede por parte do sistema de armazenamento.

A expressão (3.22) define o conjunto de restrições associadas à necessidade de verificar o trânsito de potência, tendo como variáveis de entrada a potência ativa e a potência reativa e como resultados a tensão em módulo e fase. Para este ser calculado, necessita dos parâmetros elétricos da rede.

As variáveis de controlo deste problema consistem na potência entregue à rede e na potência absorvida pelo sistema de armazenamento para cada intervalo de tempo a considerar. O resultado do trânsito de potências é utilizado para avaliar a viabilidade de cada solução.

A restrição (3.23) determina que a potência a absorver pelo sistema de armazenamento não pode ser superior à potência gerada pela fonte renovável para um dado momento.

As expressões (3.24) e (3.25) impõe que os valores da potência e da energia desperdiçadas nunca podem ser inferiores a zero.

As expressões (3.26), (3.27) e (3.28) impõe que os valores da potência a armazenar, da potência a entregar à rede e da energia existente no sistema de armazenamento nunca podem ser inferiores a zero.

A restrição (3.29) impõe que a potência entregue à rede pelos sistemas de armazenamento não deverá ser superior à potência máxima do inversor.

A restrição (3.30) impõe que ocorra entrega de energia à rede caso não seja possível libertar toda a energia armazenada no sistema de armazenamento até ao final do período de ponta.

A restrição (3.31) impõe que devem ser cumpridos os limites de tensão estabelecidos para a rede.

3.2 Metodologia do Algoritmo

O problema a resolver consiste em encontrar um plano de operação para os sistemas de armazenamento da rede que minimize o desperdício de energia renovável. Para tal, tendo em conta o problema formulado anteriormente, é necessário encontrar as potências que as baterias entregam e absorvem em cada intervalo de tempo e quando é que acontece, isto é, para um dado diagrama de cargas e para um dado diagrama de produção, tendo em conta a rede, quando e quanto deverão os sistemas de armazenamento absorver ou entregar para garantir uma operação do sistema sem violar os limites de tensão e minimizando o desperdício de energia renovável, que aconteceria se os limites de tensão fossem ultrapassados, o que forçaria a um corte da produção proveniente de geradores renováveis, havendo aí energia perdida.

Com esse objetivo, foi criado um algoritmo com o objetivo de encontrar, numa primeira fase, o valor da potência interligação do armazenamento com a rede e a capacidade dos sistemas de armazenamento aí localizados, e numa segunda fase, para os valores obtidos na primeira fase, criar um plano de operação para dois dias para o sistema de armazenamento. Para resolver os problemas de otimização identificados anteriormente e encontrar a solução do problema recorre-se a uma meta-heurística (EPSO), que em sucessivas iterações realiza uma busca por um valor de potência adequado, procurando minimizar o desperdício garantindo que as diversas restrições não são violadas.

O problema é resolvido para uma rede de baixa tensão, para um cenário de carga e para um cenário de produção renovável. São resolvidos trânsitos de potência, para os cenários de produção renovável e carga considerados, e analisados os resultados no que toca aos valores de tensão resultantes. Em caso de violação destes, é realizada uma busca por valores de potência a absorver pelos sistemas de armazenamento que anulem as eventuais violações dos limites de tensão. Para além disto, tendo em conta os sistemas de armazenamento, procura-se que o desperdício de energia renovável seja o menor possível, isto é, para além de se saber quando se armazena energia, é necessário também definir quando esta é entregue à rede. O algoritmo foi criado em *MATLAB*, utilizando para correr trânsitos de potência a ferramenta *MatPOWER 4.0*.

A meta-heurística utilizada é um EPSO (*Evolutionary Particle Swarm Optimization*). Esta meta-heurística realiza uma busca pelo espaço de soluções procurando convergir em soluções ideais através de uma análise do que já foi encontrado. Embora se possa considerar a base desta meta-heurística uma busca por exame de partículas, também possui uma análise por princípios de estratégias evolucionárias, através de mutações, comparação e sobrevivência do melhor.

Num EPSO, a próxima posição da partícula é definida através da posição atual e de um parâmetro de velocidade. Este parâmetro de velocidade determina a próxima posição da partícula, tendo em conta a posição atual, a posição anterior, a melhor posição encontrada pela população atual e a melhor posição encontrada de entre todas as populações do algoritmo. As fases de um EPSO podem ser descritas nas seguintes etapas:

- Replicação – cada partícula é duplicada.
- Mutação – cada partícula sofre uma mutação nos pesos, que definem quanto cada componente da equação de velocidade pesa.
- Reprodução – a partir de cada partícula é gerado um descendente, através da equação de movimento.
- Avaliação – cada descendente é avaliado (tendo em conta os parâmetros que se pretende promover ou penalizar).

24 Utilização de Sistemas de Armazenamento Distribuído para Maximização da Integração da Produção Renovável

- Seleção – as melhores partículas são selecionadas, através de uma competição entre si, sendo escolhidas as melhores por população e a melhor global, de entre todas as populações.

A equação de movimento que rege um algoritmo de busca através de enxame de partículas baseia o próximo valor (ou série de valores) a ser experimentado no valor atual somado de um termo de inércia (diferença entre o valor atual e o valor anterior), com um termo que promove uma tendência para convergir com o melhor resultado que esta população encontrou e com um termo que promove uma tendência para convergir com o melhor resultado de entre os melhores de todas as populações. Assim, a equação de movimento que altera o valor das partículas num EPSO é descrita por:

$$X_i^{novo} = X_i + W_1 \cdot (X_i - X_i^{ant}) + W_2 \cdot (b_{ind} - X_i) + W_3 \cdot (b_{global} - X_i) \quad (3.32)$$

Em que:

X_i^{novo} – valor da partícula para a próxima iteração (descendente).

X_i – valor atual da partícula.

X_i^{ant} – valor da partícula na interação anterior.

b_{ind} – melhor valor para partícula para a população em análise.

b_{global} – melhor valor para a partícula de entre todas as populações.

W_1 – peso da componente de inércia na equação.

W_2 – peso da componente “melhor individual” na equação.

W_3 – peso da componente “melhor global” na equação.

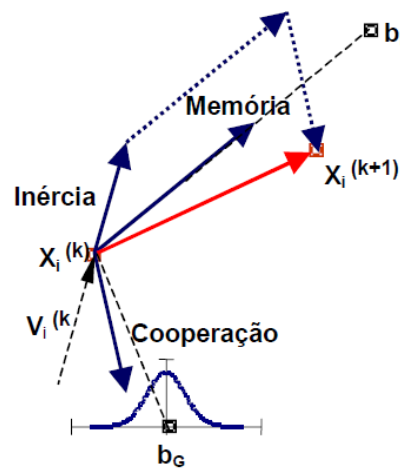


Figura 3.1 - Ilustração da equação de movimento para uma partícula no EPSO. Uma partícula i localizada em X_i , numa iteração k , origina um descendente na iteração $k+1$, sob a influência dos termos de inércia, memória e cooperação [22].

As partículas aqui referidas são, no problema em análise, as variáveis de controlo (potência a entregar ou a absorver pelas baterias) para as quais se procura um valor o mais próximo do ótimo possível, ou seja, as potências de interligação do armazenamento com a rede, quer a entregar energia à rede, quer a absorver energia.

Na meta-heurística, à medida que o algoritmo é corrido, deverão ser realizadas mutações que, posteriormente avaliadas e selecionadas, permitirão ao algoritmo uma convergência. Tais

mutações serão realizadas sobre os pesos das diversas componentes da equação de movimento, pois a importância dos pesos varia ao longo das iterações. Além disso, será introduzido um pequeno ruído no ótimo global por forma a não “prender” o algoritmo a uma solução global fixa, permitindo às diversas populações uma busca mais ampla pelo espaço de soluções. As mutações introduzidas possuirão uma distribuição normal de valor médio zero e variância 1, multiplicadas por um fator fixo que dependerá do elemento a mutar.

$$W_{mutado} = W_{atual} + \tau \cdot N(0,1) \quad (3.33)$$

$$b_{global\ mutado} = b_{global\ atual} + \tau \cdot N(0,1) \quad (3.34)$$

Para encontrar uma solução viável e que garanta que não há violação de limites ou mesmo princípios físicos, o algoritmo que realiza esta busca recebe, por cada solução encontrada, um valor que lhe permite comparar a solução com as restantes, sabendo qual é a melhor. As penalizações realizadas tentam evitar que soluções em que ocorram situações que não se pretendem sejam rejeitadas. Deste modo, para além de se comparar o valor da energia desperdiçada, é ainda verificado se não há violações dos limites de tensão (cujo valor deve estar entre 0,95 e 1,05 p.u.), se a energia que se encontra armazenada nas baterias nunca for inferior a zero, se a potência entregue à rede não for superior ao limite máximo do inversor (de notar que caso seja a potência absorvida, esta entra como energia desperdiçada), se a potência armazenada apenas provém de fontes renováveis (não sendo objeto de estudo neste trabalho a transferência entre períodos de energia proveniente da rede de média tensão, que poderia ter como objetivo aumentar o lucro para o explorador do sistema). Para além destas penalizações, há outras que existem não para evitar que certas situações indesejáveis aconteçam mas sim para tornar o algoritmo mais eficiente na busca por um plano de operação que reduza a energia desperdiçada ao mínimo possível. Assim, é realizada uma abordagem de não armazenamento que basicamente procura que o armazenamento possua capacidade disponível para armazenar em situações em que é necessário armazenar (quando vão ocorrer violações dos limites de tensão) não armazenando em situações em que, embora haja produção renovável, esta não crie problemas de operação da rede. Esta abordagem baseia-se em analisar os períodos subsequentes ao atual (caso no atual não existam problemas com os limites de tensão) e numa situação em que a capacidade das baterias possa não ser suficiente para as necessidades que virão, o algoritmo faz com que haja uma tendência para não armazenar no período atual. Isto faz com que a capacidade máxima do armazenamento não seja ultrapassada no período seguinte, sendo que deixa de ser necessário cortar geração renovável para garantir que os limites de tensão sejam cumpridos.

A energia armazenada durante o dia é libertada durante as horas de ponta. É conveniente que toda a energia seja libertada nas horas de ponta, por uma questão de obter maior proveito da exploração (embora este estudo não se debruce sobre isso, é um fator a ter em conta quando se elabora o plano de operação) e também para que o armazenamento esteja preparado para mais um ciclo no dia seguinte, pois se possuísse energia ainda nele a energia que poderia armazenar nesse dia seria menor. Para que isto aconteça, há uma penalização caso a energia que esteja no armazenamento no fim do período de ponta não seja zero.

A cada dia a energia armazenada deverá ser libertada, preferencialmente em hora de ponta, por forma a maximizar o lucro e permitir que o sistema de armazenamento tenha no dia seguinte toda a capacidade disponível para armazenar energia, pois caso possuísse alguma energia do dia (ou dias) anterior, a necessidade de armazenamento poderia ser superior à capacidade

26 Utilização de Sistemas de Armazenamento Distribuído para Maximização da Integração da Produção Renovável

disponível, visto esta ser determinada pelo mínimo necessário para regularizar a tensão para um dado cenário. Assim, libertando a energia na hora de máximo de carga torna-se possível utilizar melhor a capacidade de armazenamento existente, dedicando-a a um dia. Porém, por limitações derivadas pela potência do inversor, poderá não ser possível libertar toda a energia armazenada na hora (ou horas) de máximo de carga. Como a equação seguinte demonstra, a potência libertada a dividir pelo rendimento do inversor (as perdas no sistema inversor- armazenamento fazem com que a energia que “sai” do armazenamento seja superior à que é entregue à rede) é igual à energia libertada na rede e perdida a dividir pelo tempo. Assim, se o tempo restante até ao final da ponta multiplicado pela potência máxima do inversor for superior à energia armazenada, o sistema de armazenamento não poderá ficar a zero no fim da ponta.

$$\frac{P_{ent}}{\eta_{ent}} = \frac{E_{libertada}}{tempo} \quad (3.35)$$

Assim, é necessário uma análise para conhecer a partir de que hora é o limite máximo para iniciar a injeção da energia armazenada na rede, ou seja, a partir de quando se torna impossível libertar toda a energia até ao fim do período de ponta. Tal análise deve-se a se considerar ser melhor entregar potência antes da ponta, quando a carga ainda é razoável embora não máxima, do que nas horas de noite, em que a produção renovável fotovoltaica é nula mas a carga é muito reduzida também, sendo o lucro obtido pela venda de energia reduzido. Mesmo que a maximização do lucro obtido não seja um dos objetivos deste trabalho, é um fator que se deve ter em conta. Assim, no algoritmo de busca de soluções, caso não seja possível libertar toda a energia armazenada à potência máxima até ao fim do período de ponta, ocorre uma penalização, procurando aumentar a entrega de energia à rede, para que quando se chegue ao período de ponta este consiga colocar a zero (ou muito próximo de zero) a energia armazenada nas baterias.

Considerando as penalizações referidas, apresenta-se seguidamente a equação (3.36), que representa a avaliação da viabilidade de cada solução que a meta-heurística encontra em cada iteração. O termo resultante da soma das diversas componentes, denominado *fitness*, é objeto de minimização, para anular as situações que se pretendem evitar e que levam a penalizações segundo esta equação. Na equação (3.36) é também apresentado o desperdício de energia, sendo este também objeto de minimização e componente da avaliação de cada solução encontrada.

$$\begin{aligned} fitness = & \\ = E_{dump} + W_U \cdot Pen_U + W_{Neg} \cdot Pen_{Neg} + W_{Pmin} \cdot Pen_{Pmin} + W_{perd} \cdot Pen_{perd} + & \\ + W_{gan} \cdot Pen_{gan} + W_{ent} \cdot Pen_{ent} + W_{noite} \cdot Pen_{noite} + W_{lib} \cdot Pen_{lib} + W_{pv} \cdot Pen_{pv} & \end{aligned} \quad (3.36)$$

Nesta equação:

fitness - é o termo que resulta da soma de todas as penalizações existentes. É objetivo do algoritmo minimizar este termo.

E_{dump} - é a energia renovável desperdiçada para cada intervalo de tempo.

Pen_U - é a penalização que surge em caso de ocorrer a violação dos limites de tensão regulamentares. Corresponde ao quadrado da diferença entre o valor de tensão e o limite violado, multiplicado por W_U , o peso da penalização. Como a tensão se encontra em p.u., ocorrendo por vezes violações na ordem das milésimas, e como esta situação deve ser evitada, o valor do peso utilizado no algoritmo é 100'000'000.

Pen_{Energ} - é a penalização em caso da energia armazenada nos sistemas de armazenamento possuir um valor inferior a zero. Corresponde ao quadrado do valor da energia multiplicado por W_{Energ} . O valor do peso utilizado no algoritmo é $100'000'000$.

Pen_{Pmin} - é a penalização em caso da potência entregue à rede pelo sistema de armazenamento for superior à potência máxima do inversor, multiplicada pelo peso W_{Pmin} . Corresponde ao quadrado da diferença entre potência obtida pelo algoritmo na iteração em análise e o valor da potência do inversor. O valor do peso utilizado no algoritmo é $10'000$.

Pen_{perd} - quando a produção renovável nos períodos que se seguem ao período em análise possui um valor elevado, o sistema de armazenamento deverá possuir capacidade disponível para a absorver e evitar possíveis problemas de violação dos limites de tensão. Assim, é realizada uma abordagem de não armazenamento. Esta abordagem verifica se nos 8 períodos seguintes a produção renovável média não é superior a 45 % da potência renovável instalada e, caso não haja violação dos limites de tensão no período em análise e o sistema de armazenamento esteja a absorver energia no período atual, ocorre uma penalização de valor igual ao quadrado do valor da potência que está a ser armazenada, multiplicada pelo peso W_{perd} , de valor $10'000$.

Pen_{gan} - a abordagem de armazenamento é realizada com o objetivo de garantir que existe energia armazenada no sistema de armazenamento para períodos de carga elevada e em que não exista produção renovável. Assim, caso a carga nos períodos subsequentes ao período em análise for elevada e a produção renovável reduzida, o sistema de armazenamento deverá absorver energia. Caso o sistema de armazenamento esteja a entregar energia à rede e caso não existam violações dos limites de tensão, ocorre uma penalização através do quadrado do valor da potência que está a ser entregue, multiplicada pelo peso W_{gan} , de valor $10'000$.

Pen_{ent} - o algoritmo dá preferência à entrega de energia em períodos de ponta. Assim, caso ocorra entrega de energia em períodos sem carga muito elevada, ocorre uma penalização, que corresponde ao quadrado da potência entregue à rede multiplicada pelo peso W_{ent} , de valor $10'000$.

Pen_{noite} - durante a noite, após da ponta, a energia que se encontra armazenada nos sistemas de armazenamento deve ser zero ou muito próxima de zero. Assim, caso a energia existente nos sistemas de armazenamento durante a noite for superior a zero, será somada uma penalização ao resultado da avaliação que corresponde ao quadrado do valor da energia que resta no sistema de armazenamento multiplicado pelo peso W_{noite} , de valor $100'000$.

Pen_{lib} - como durante a noite a energia existente nos sistemas de armazenamento deve ser nula ou muito reduzida, deverá ser entregue à rede durante a ponta. Porém, como já foi referido, caso, por limitações da potência máxima do inversor, não seja possível entregar toda a energia à rede nos períodos de ponta, esta deve ser entregue nos períodos antes da ponta da carga. Assim, é avaliada a energia existente no sistema de armazenamento e verificado se esta pode ser libertada na totalidade, à potência máxima do inversor, desde o período em análise até ao fim dos períodos de ponta. Caso não seja possível, ocorre uma penalização, que corresponde ao quadrado da diferença entre a energia existente no sistema de armazenamento e a energia que

pode ser libertada do sistema de armazenamento desde o período atual até ao final do período de ponta. Para aumentar a eficiência desta penalidade, é ainda somado o quadrado da diferença da potência obtida para entregar à rede em relação à potência do inversor ou, caso esteja a absorver, é somado o quadrado da potência obtida. Multiplica-se esta penalização pelo peso W_{lib} , de valor 10'000. Caso esta penalidade ocorra, a penalização sobre a energia entregue em períodos que não sejam de ponta da carga não é realizada.

Pen_{PV} – neste estudo apenas se considera o armazenamento de energia proveniente da produção renovável, não devendo ser armazenada energia proveniente de outras fontes (no caso em estudo, da rede de média tensão a montante). Assim, caso a energia absorvida pelos sistemas de armazenamento seja superior à produção renovável num dado momento, ocorrerá uma penalização de valor igual ao quadrado da diferença entre o armazenamento total dos sistemas de armazenamento e a produção renovável total naquele momento, multiplicado pelo peso W_{PV} , de valor 100'000'000.

Os valores atribuídos aos pesos foram obtidos através de tentativa e erro, analisando os resultados obtidos, verificando qual a causa de ocorrência do maior número de violações e quais as violações que se apresentavam como críticas para a obtenção de um resultado final viável e, consequentemente, aumentando ou diminuindo os valores dos pesos de cada penalidade. Nota-se que os valores obtidos para alguns pesos são bastante elevados. Tal deve-se a ser necessário eliminar essas situações e garantir que estas não ocorram mesmo com valores muito reduzidos para o erro que delas surge. Como se usa o quadrado do erro, o valor do erro a reduzir, por neste estudo ser quase sempre um valor decimal, fica mais reduzido, do que se fosse apenas somado em módulo. Assim, para que o erro continue a possuir um impacto considerável no valor do *fitness*, os pesos possuem, em algumas penalidades, valores elevados. Noutras, que não correspondem propriamente a erros mas sim a penalidades para facilitar a convergência do algoritmo e a obtenção de melhores soluções, o valor do peso é mais reduzido.

Nas penalidades, utilizou-se o quadrado das diferenças dos valores obtidos em relação aos valores viáveis para fornecer à meta-heurística uma noção que se está a aproximar de uma solução e garantir que não resultam valores negativos na penalidade, que reduziriam o valor da penalização e forneceriam à meta-heurística uma avaliação sobre a solução que seria menos prejudicial do que a solução realmente seria.

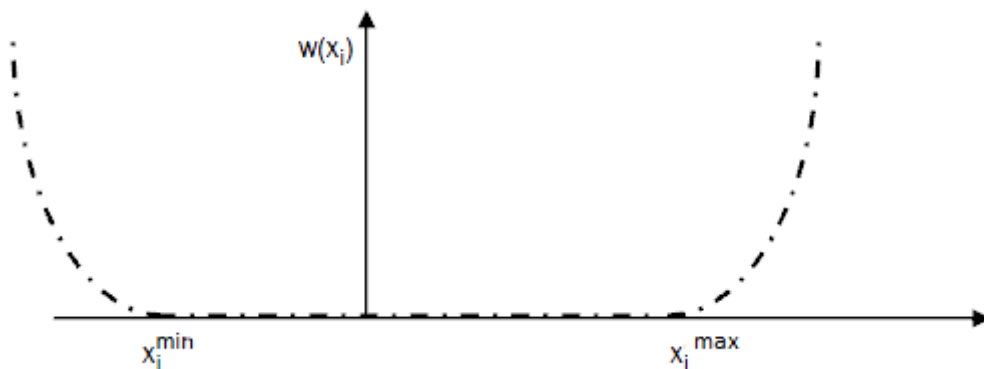


Figura 3.2 - Representação gráfica de uma função de penalização quadrática $w(x_i)$ para um domínio de x_i de x_i^{\min} a x_i^{\max} [23].

3.3 A Rede

De forma a efetuar os testes necessários para o trabalho, foi criada uma rede de baixa tensão, baseada numa rede apresentada em [1]. A rede criada possui 41 barramentos e uma potência instalada de 411 kVA. Possui ainda uma potência instalada de geração fotovoltaica de 100 kW, dispersa por 6 geradores fotovoltaicos de igual potência (16,7 kW). Possui ainda dois dispositivos de armazenamento (baterias) cuja potência de interligação e capacidade será definida neste trabalho. A sua alimentação provém de um transformador de 400 kVA, sendo um valor normalizado para transformadores e que permite o funcionamento correto para a carga e a incorporação da geração renovável a jusante.

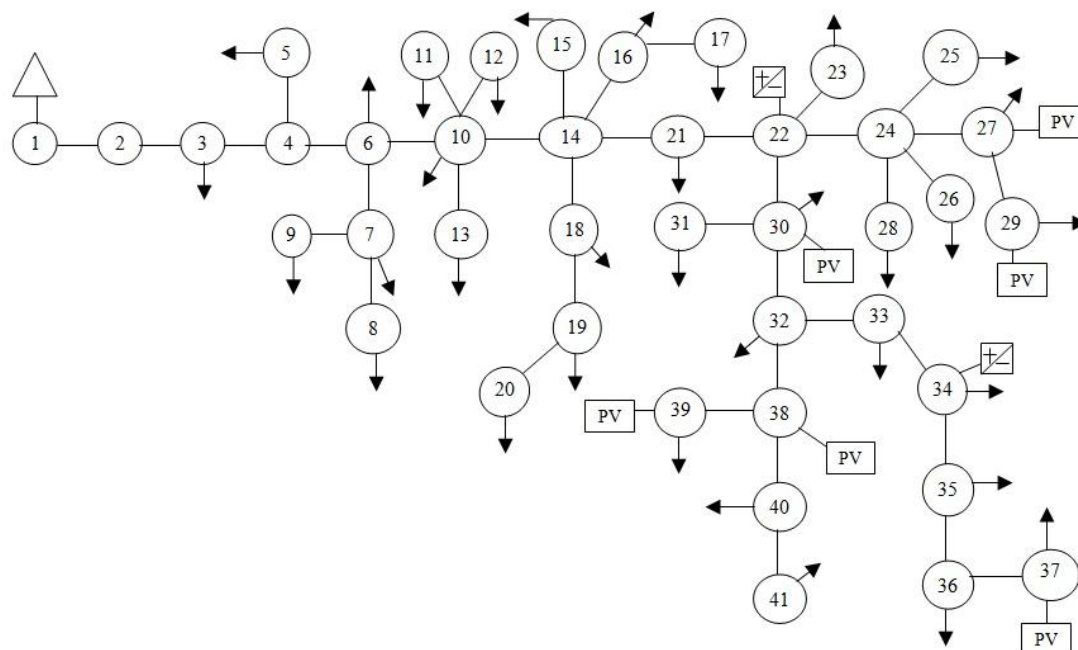


Figura 3.3 - Imagem da rede de baixa tensão.

Para este estudo admitiu-se que a rede de baixa tensão é uma rede trifásica e equilibrada. Porém, uma rede de distribuição de baixa tensão típica, com cargas do tipo doméstico, possui maioritariamente consumidores monofásicos, com distribuição das cargas pelas fases para o maior equilíbrio possível entre estas. Assim, a situação considerada neste estudo é ideal, sendo que numa situação real existiriam cargas monofásicas, possivelmente algumas trifásicas também, e as fases da rede de baixa tensão não estariam equilibradas.

A localização dos geradores fotovoltaicos foi realizada procurando localizá-los de forma a que ocorressem na rede problemas de violação do limite máximo de tensão com a inclusão de produção renovável, especialmente criados no barramento 37 devido ao facto de possuir uma linha com resistência elevada a ligá-lo ao resto da rede. Este problema surgiria devido à alteração que aparece no sentido do fluxo do trânsito de potências com a inclusão de geração a jusante, sendo que a tensão teria que ser mais elevada num barramento a jusante (número 1 na equação (3.37)) para haver um fluxo de potência para montante, como demonstrado atrás pela figura 1.1 e pela seguinte equação:

$$P_{2-1} = \frac{V_2^2}{R} - \frac{V_1 \cdot V_2}{R} \cos(\varphi) \quad (3.37)$$

A colocação dos sistemas de armazenamento visa promover uma redução da tensão através da inclusão de uma carga, além de permitir a transferência de energia elétrica de fontes

30 Utilização de Sistemas de Armazenamento Distribuído para Maximização da Integração da Produção Renovável

renováveis para períodos de ponta em que a fonte de energia renovável não está disponível. A localização das baterias foi escolhida com o intuito de conseguir mitigar o problema da tensão elevada com uma potência menor, embora não fosse um estudo de otimização mas sim de viabilidade do valor obtido para a potência destas. A abordagem para a sua localização foi empírica e não determinística, porém foram tidos em conta diversos fatores como explicado no seguimento do trabalho.

Os dados da rede são apresentados em anexo. No Anexo A estão descritos os dados das linhas que compõe a rede (A.1), as cargas existentes na rede (A.2) e a localização e potência dos gerados fotovoltaicos que existem na rede (A.3).

As baterias foram colocadas nos barramentos 22 e 34. Possuem rendimentos a absorver energia de 95 % e a entregar energia à rede de 90 %. Assim, resulta um rendimento global do sistema à volta de 85%.

Seguidamente, é mostrado o resultado de um trânsito de potência com carga a 50 % da potência instalada e geração renovável a 0 %, sem qualquer dispositivo de armazenamento.

Tabela 3.1 - Trânsito de Potência com carga a 50 % e sem produção renovável.

Barramento n.º	Tensão (p.u.)	Ângulo da Tensão (°)	Geração		Carga	
			P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	1.050	0.000	0.22	0.00	0	-
2	1.047	-0.077	-	-	0	-
3	1.037	-0.191	-	-	0.0034	0.00
4	1.023	-0.325	-	-	0	-
5	1.022	-0.328	-	-	0.0155	0.00
6	1.010	-0.448	-	-	0.0034	0.00
7	1.008	-0.457	-	-	0.0052	0.00
8	1.007	-0.458	-	-	0.0034	0.00
9	0.997	-0.461	-	-	0.0052	0.00
10	0.999	-0.552	-	-	0.0017	0.00
11	0.995	-0.562	-	-	0.0138	0.00
12	0.999	-0.554	-	-	0.0034	0.00
13	0.998	-0.554	-	-	0.0034	0.00
14	0.987	-0.673	-	-	0	-
15	0.987	-0.674	-	-	0.0034	0.00
16	0.985	-0.681	-	-	0.0052	0.00
17	0.985	-0.681	-	-	0.0034	0.00
18	0.987	-0.674	-	-	0.0017	0.00
19	0.987	-0.675	-	-	0.0017	0.00
20	0.986	-0.676	-	-	0.0034	0.00
21	0.980	-0.744	-	-	0.0173	0.00
22	0.975	-0.800	0.00	0.00	0	-
23	0.974	-0.802	-	-	0.0069	0.00
24	0.971	-0.840	-	-	0	-
25	0.970	-0.848	-	-	0.0104	0.00
26	0.970	-0.842	-	-	0.0069	0.00
27	0.966	-0.852	0.00	0.00	0.0034	0.00

28	0.970	-0.845	-	-	0.0069	0.00
29	0.963	-0.860	0.00	0.00	0.0121	0.00
30	0.974	-0.805	0.00	0.00	0.0052	0.00
31	0.974	-0.806	-	-	0.0069	0.00
32	0.973	-0.824	-	-	0.0017	0.00
33	0.970	-0.845	-	-	0.0086	0.00
34	0.961	-0.863	0.00	0.00	0.0052	0.00
35	0.944	-0.896	-	-	0.0104	0.00
36	0.938	-0.909	-	-	0.0017	0.00
37	0.937	-0.910	0.00	0.00	0.0034	0.00
38	0.971	-0.842	0.00	0.00	0	-
39	0.970	-0.846	0.00	0.00	0.0104	0.00
40	0.970	-0.850	-	-	0.0052	0.00
41	0.970	-0.855	-	-	0.0052	0.00

Esta rede foi criada com o objetivo de possuir problemas de violação do limite máximo de tensão com o aparecimento de produção renovável. Em certas situações de exploração, com carga muito elevada, também podem ocorrer violações de mínimo de tensão, embora mais reduzido. Assim, a colocação do sistema de armazenamento surge como uma solução para este problema.

A resolução de um problema de trânsito de potências sem sistemas de armazenamento para carga a 30 % da potência instalada e a geração renovável a produzir o máximo permite verificar que em muitos barramentos surgem valores de tensão que violam o limite máximo, sendo necessário corte da geração renovável para o corrigir, ou instalar uma carga maior para promover um abaixamento do valor tensão.

Tabela 3.2 - Trânsito de Potências com carga a 30 % e produção fotovoltaica no máximo.

Barramento n.º	Tensão (p.u.)	Ângulo da Tensão (°)	Geração		Carga	
			P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	1.050	0.000	0.02	0.00	0	-
2	1.050	-0.008	-	-	0	-
3	1.049	-0.021	-	-	0.0021	0.00
4	1.047	-0.035	-	-	0	-
5	1.047	-0.036	-	-	0.0093	0.00
6	1.046	-0.042	-	-	0.0021	0.00
7	1.045	-0.047	-	-	0.0031	0.00
8	1.045	-0.048	-	-	0.0021	0.00
9	1.039	-0.050	-	-	0.0031	0.00
10	1.046	-0.043	-	-	0.0010	0.00
11	1.044	-0.049	-	-	0.0083	0.00
12	1.046	-0.044	-	-	0.0021	0.00
13	1.046	-0.044	-	-	0.0021	0.00
14	1.047	-0.034	-	-	0	-
15	1.047	-0.035	-	-	0.0021	0.00
16	1.046	-0.038	-	-	0.0031	0.00

32 Utilização de Sistemas de Armazenamento Distribuído para Maximização da Integração da Produção Renovável

17	1.046	-0.038	-	-	0.0021	0.00
18	1.047	-0.035	-	-	0.0010	0.00
19	1.047	-0.035	-	-	0.0010	0.00
20	1.047	-0.035	-	-	0.0021	0.00
21	1.048	-0.023	-	-	0.0104	0.00
22	1.050	-0.008	0.00	0.00	0	-
23	1.050	-0.010	-	-	0.0041	0.00
24	1.051	-0.000	-	-	0	-
25	1.050	-0.004	-	-	0.0062	0.00
26	1.050	-0.001	-	-	0.0041	0.00
27	1.057	0.016	0.02	0.00	0.0021	0.00
28	1.050	-0.003	-	-	0.0041	0.00
29	1.059	0.021	0.02	0.00	0.0072	0.00
30	1.050	-0.006	0.02	0.00	0.0031	0.00
31	1.050	-0.007	-	-	0.0041	0.00
32	1.051	-0.000	-	-	0.0010	0.00
33	1.051	-0.001	-	-	0.0052	0.00
34	1.052	0.002	0.00	0.00	0.0031	0.00
35	1.059	0.015	-	-	0.0062	0.00
36	1.074	0.041	-	-	0.0010	0.00
37	1.076	0.044	0.02	0.00	0.0021	0.00
38	1.052	0.016	0.02	0.00	0	-
39	1.053	0.019	0.02	0.00	0.0062	0.00
40	1.052	0.012	-	-	0.0031	0.00
41	1.052	0.009	-	-	0.0031	0.00

Capítulo 4

Resultados

4.1 FASE 1

Nesta fase pretende-se obter o valor para a capacidade das baterias e para a potência de interligação destas com a rede de baixa tensão. Estes valores serão os mínimos necessários para que os limites de tensão não sejam violados, isto é, serão obtidos valores que, caso o valor limite da tensão seja ultrapassado a coloquem dentro dos limites, identificando o menor valor de potência possível. Depois, será realizada uma análise intertemporal do plano de operação e será verificado qual o máximo valor da capacidade de armazenamento para as potências que foram sendo necessárias ao longo do tempo.

Considerando uma situação com produção renovável elevada e carga reduzida, chega-se ao valor de 170 kWh para a capacidade de armazenamento e de 50 kW para a potência de interligação de cada bateria. Os diagramas de carga e produção renovável considerados, assim como o plano de operação (em potências mínimas necessárias) do sistema de armazenamento são apresentados seguidamente.

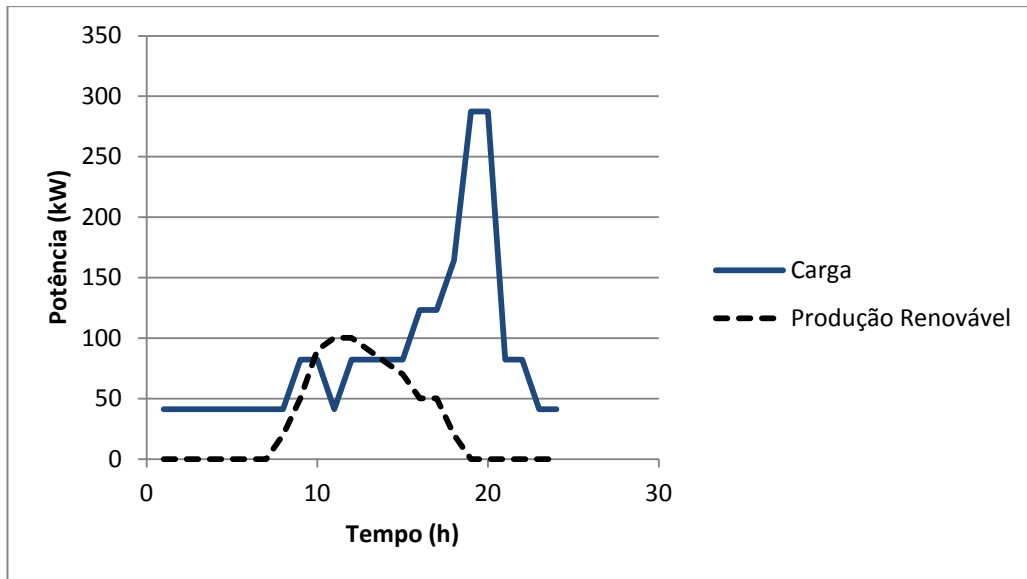


Figura 4.1 - Diagrama de Carga e Produção Renovável para a fase 1 do algoritmo.

A figura 4.1 descreve o diagrama de carga para a rede de baixa tensão e produção renovável para os geradores nela incluídos vistos a partir do posto de transformação. Verifica-se que o diagrama de cargas considerado apresenta um consumo mediano durante o dia com dois períodos de ponta ao início da noite. Durante a noite os consumos são reduzidos. A produção renovável, como é considerada fotovoltaica, surge ao início da manhã (08:00), atinge um pico ao meio dia e reduz-se até deixar de existir ao fim da tarde.

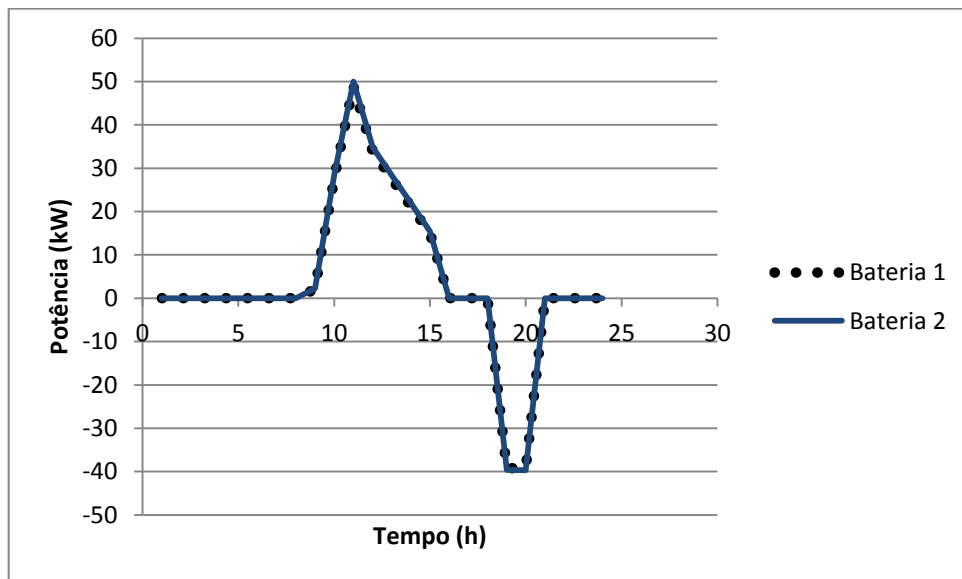


Figura 4.2 - Plano de Operação para as baterias para a fase 1.

É possível verificar que os sistemas de armazenamento absorvem quando há maior produção e entregam energia à rede quando há maior carga e não existe produção. Quando a produção é elevada, por volta do meio-dia, a carga é mediana sendo que surgem problemas de tensão. O aparecimento desta carga adicional resolve esse problema, pois provoca um abaixamento dos níveis de tensão. Nesta situação, a potência absorvida é o mínimo necessário para corrigir as tensões.

Numa situação com menor produção renovável, a capacidade necessária para o sistema de armazenamento será menor. O algoritmo fornece os valores de 28 kWh para a capacidade e de 18 kW para a potência de interligação. Verifica-se que a capacidade do sistema de armazenamento reduz-se para 17 %. Como o sistema de armazenamento é o mesmo ao longo de todo o ano, obviamente terá que se optar pelo primeiro resultado, por ser o mais desfavorável do ponto de vista de minimizar o valor da capacidade do armazenamento, sendo o necessário para o período de maior necessidade. Os diagramas de carga, produção e os planos de operação resultantes são apresentados abaixo.

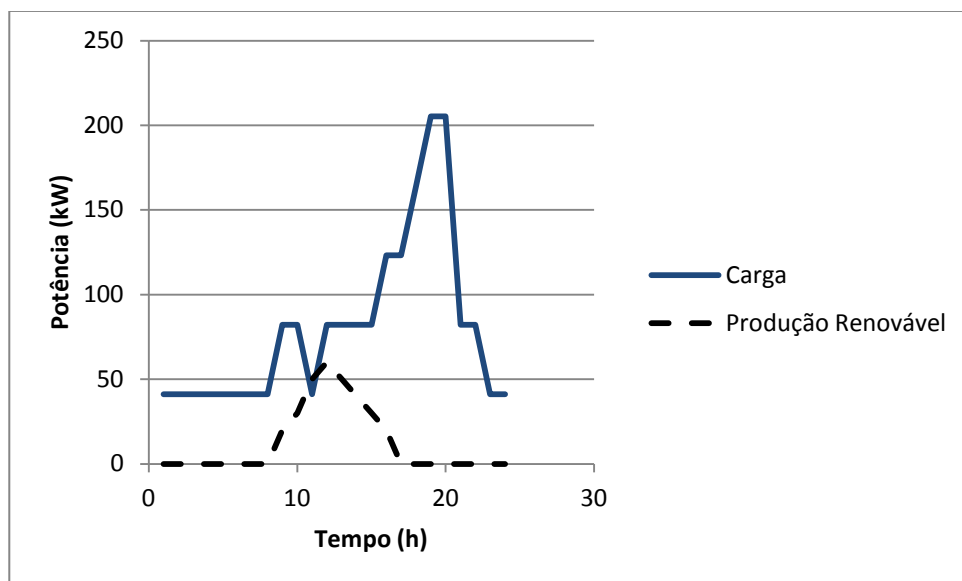


Figura 4.3 - Diagrama de carga e produção renovável para a fase 1 do algoritmo numa situação com menor produção.

Como é possível verificar, neste cenário o diagrama de cargas apresenta um formato similar ao anterior, com períodos de ponta, cheia e vazio, embora com valores mais reduzidos. O diagrama de produção renovável também é similar ao considerado na situação anterior, mas possui também uma menor produção.

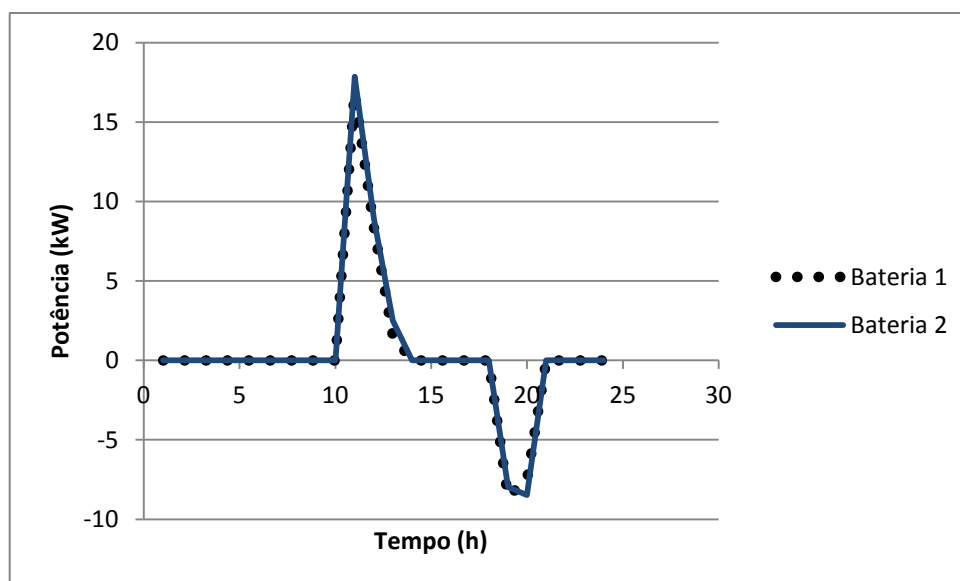


Figura 4.4 - Plano de Operação para as baterias na fase 1 numa situação com menor produção renovável.

Como é verificado, a potência que é necessário absorver para corrigir as tensões é menor que a que se verifica na situação anterior. Tal deve-se a que, nesta situação, há menor produção renovável e, conseqüentemente, os problemas resultantes de violação dos limites de tensão são de menor amplitude, sendo necessário um aparecimento de uma carga de menor valor para os corrigir.

4.2 FASE 2

Após a obtenção dos valores de capacidade e potência das baterias na fase 1, procede-se à fase 2 do algoritmo. Com a realização de testes através do algoritmo atrás descrito, chegou-se a planos de operação dos sistemas de armazenamento para maximizar a integração de renovável para 2 dias, que serão seguidamente apresentados, descritos e comentados.

4.2.1 Situação 1 – Verão com carga mediana

Foi experimentada uma situação em que a carga seria mediana e a produção renovável seria elevada, existindo dois períodos em que esta produzia ao máximo. Esta situação pode ser considerada típica de um dia de Verão sem nuvens. A carga possuiria uma variação normal para um dia, com valores medianos durante o dia, elevados nos períodos de ponta (no primeiro dia 70 % da potência instalada e no segundo dia 50 %) e reduzidos durante a noite (10 % da potência instalada).

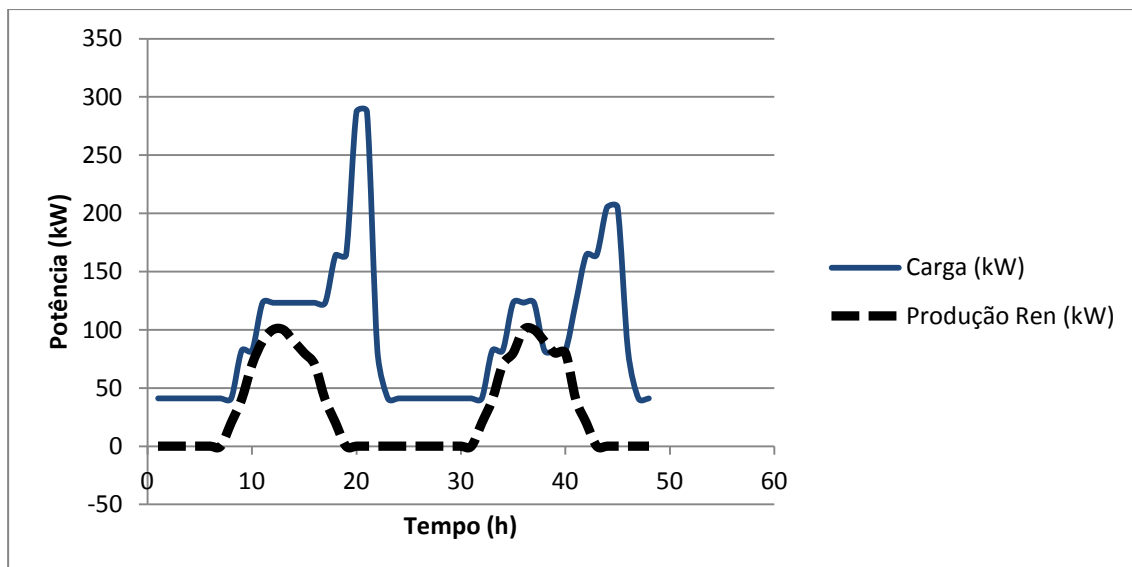


Figura 4.5 - Diagrama de Carga e Produção Renovável para a Situação 1.

Para esta situação, o algoritmo encontrou uma solução com energia desperdiçada zero. Verifica-se que para tal situação, devido à elevada produção renovável, que resulta em problemas de violação do limite de tensão no período 10 (10:00) até 15 (15:00) do primeiro dia e 34 (10:00) até 40 (16:00) do segundo dia, para que a energia desperdiçada seja zero é necessário tomar em atenção quando se começa a armazenar. Armazenar sem necessidade de absorção de energia, apenas para transferência temporal, provocaria que a capacidade do

armazenamento pudesse ser preenchida e quando fosse necessário armazenar para evitar violações dos limites de tensão não haveria capacidade disponível. Verifica-se nesta situação a importância da abordagem de não-armazenamento devido aos períodos subsequentes possuírem muita produção renovável. Assim é possível evitar violação dos limites de tensão com a capacidade de armazenamento previamente dimensionada. O plano de operação é seguidamente apresentado.

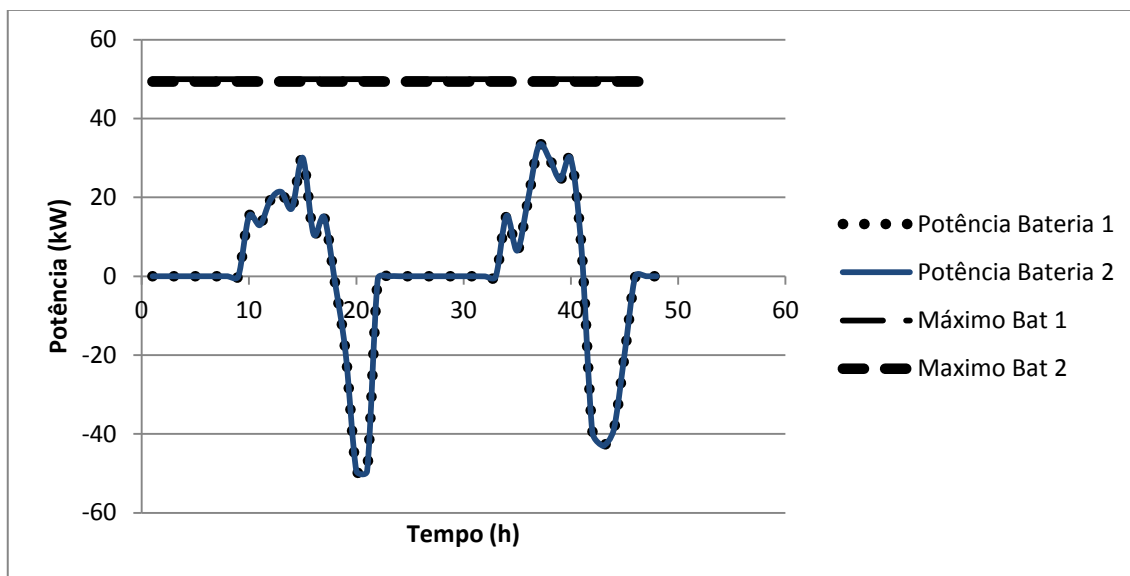


Figura 4.6 - Plano de operação obtido para as baterias na Situação 1.

Como é possível verificar pela análise do gráfico do plano de operação, os sistemas de armazenamento absorvem energia durante as horas em que há produção renovável e libertam durante as horas de ponta. Aí, a potência entregue à rede é bastante elevada, por forma a libertar toda a energia armazenada durante o dia.

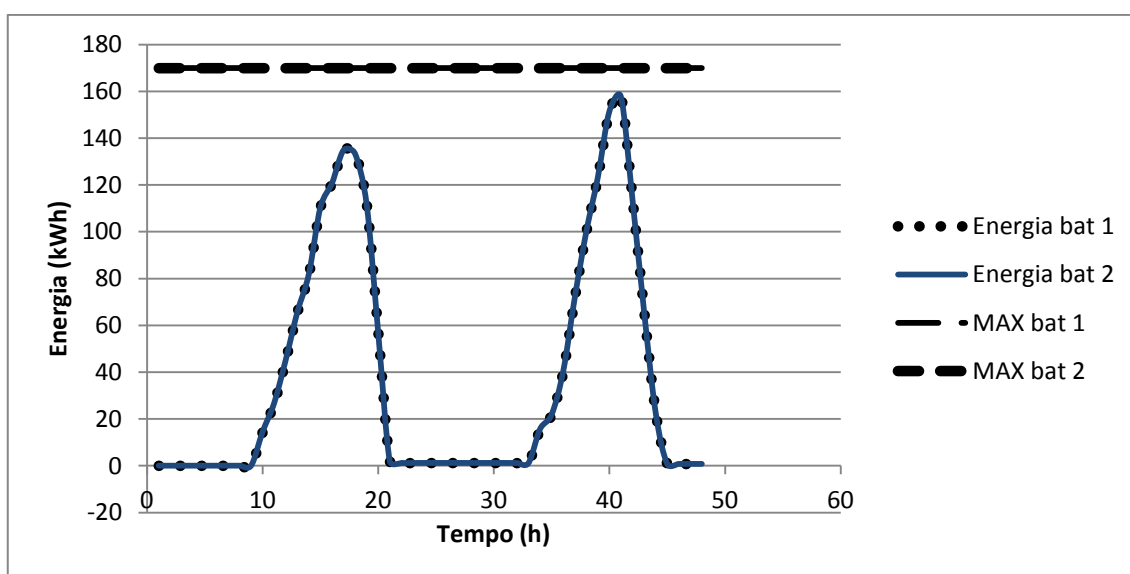


Figura 4.7 - Variação da Energia armazenada ao longo do tempo na Situação 1.

Verifica-se que, devido à existência de menos carga no segundo dia, o sistema de armazenamento armazena mais energia.

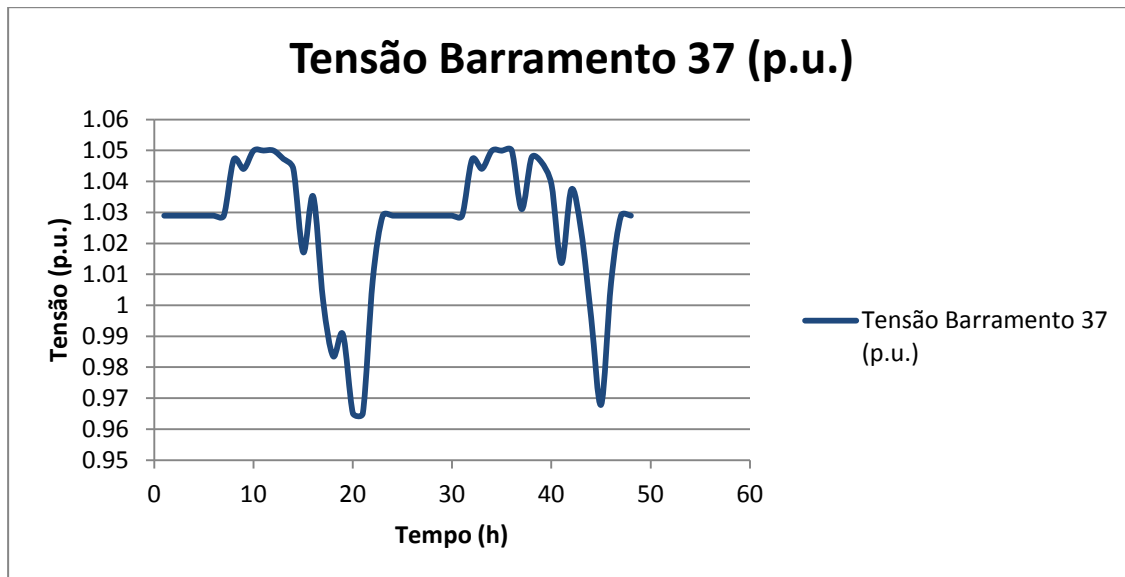


Figura 4.8 - Variação do módulo da tensão no barramento 37 ao longo do tempo na Situação 1.

É possível verificar que as tensões no pior barramento (barramento 37) ficam no limite máximo nos períodos 10 (10:00), 11 (11:00), 12 (12:00) do primeiro dia e 34 (10:00), 35 (11:00) e 36 (12:00) do segundo dia devido ao armazenamento, pois sem ele seriam violadas. Conseguiu evitar-se o desperdício de 347 kWh ao longo do dia, que seriam necessários cortar caso não existisse o armazenamento e se tivesse que proceder ao corte de produção renovável para evitar sobretensões.

4.2.2 Situação 2 – Verão com carga reduzida

Numa outra situação, para uma produção renovável igual à anterior, ou seja, uma situação de um típico dia de Verão, foi realizada a mesma análise mas com uma carga mais reduzida durante o dia (não ultrapassando 20 % da potência instalada, exceto nas horas de ponta). Como é óbvio, será necessária uma maior absorção por parte do sistema de armazenamento para corrigir os problemas de tensão, pois não existindo tanta carga, a tensão da rede irá aumentar, tendo que ser compensada através de outra carga que surja para voltar para valores dentro dos limites.

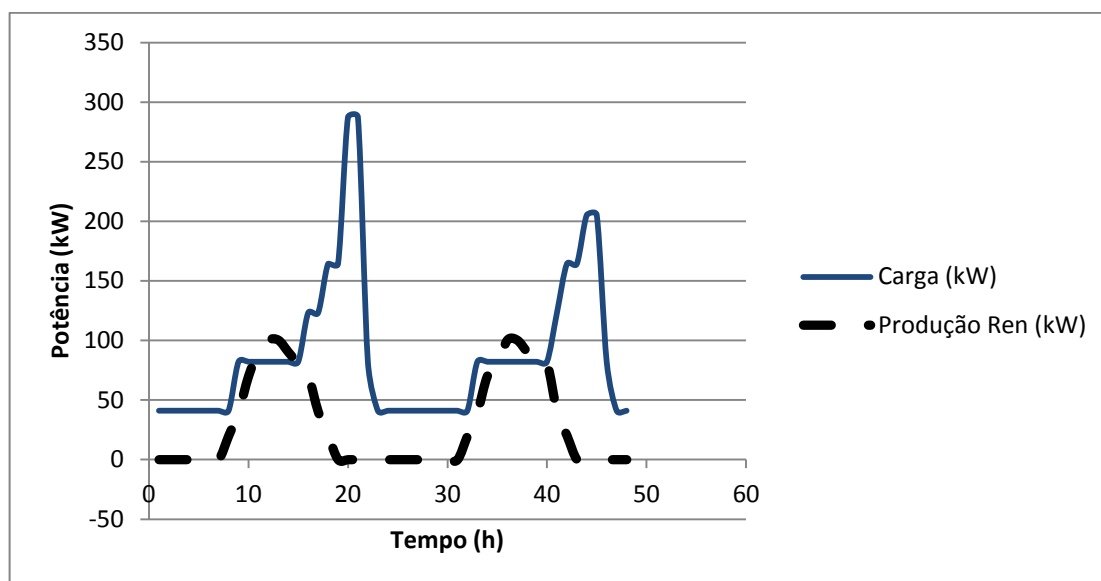


Figura 4.9 - Diagrama de Carga e Produção Renovável para a Situação 2.

Aqui torna-se mais evidente a necessidade de não armazenar em períodos em que não seja necessário. Embora noutras situações possa ser indiferente, nesta situação é absolutamente necessário que não seja armazenada energia fora de períodos em que o armazenamento seja necessário para corrigir problemas de tensão. Caso haja armazenamento noutros períodos, a capacidade do armazenamento será insuficiente para a energia que é necessária armazenar para corrigir os limites de tensão, havendo necessidade de corte de produção renovável para corrigir os valores de tensão, logo desperdício de energia renovável. É previsível que com uma diminuição da carga em horas de produção renovável crítica para os valores de tensão possa ocorrer a necessidade de corte de produção renovável, resultando em desperdício. É necessário o correto dimensionamento dos sistemas de armazenamento em capacidade e potência para evitar que isto aconteça, como neste caso. Daí que seja necessário um estudo dos diagramas de carga e produção da rede em que serão implementados, para evitar o desperdício da energia produzida.

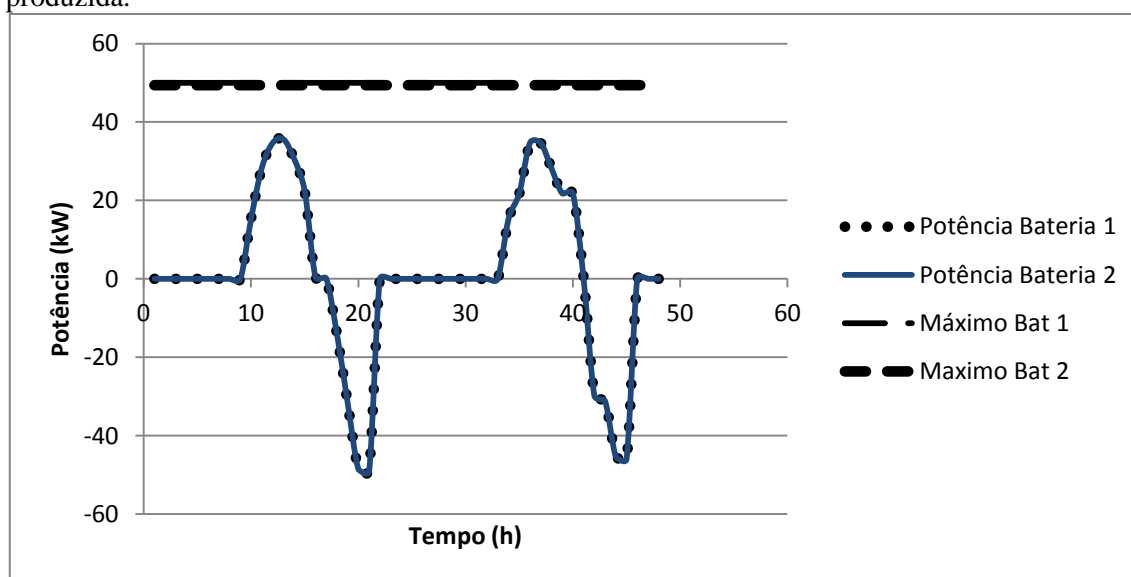


Figura 4.10 - Plano de operação obtido para as baterias na Situação 2.

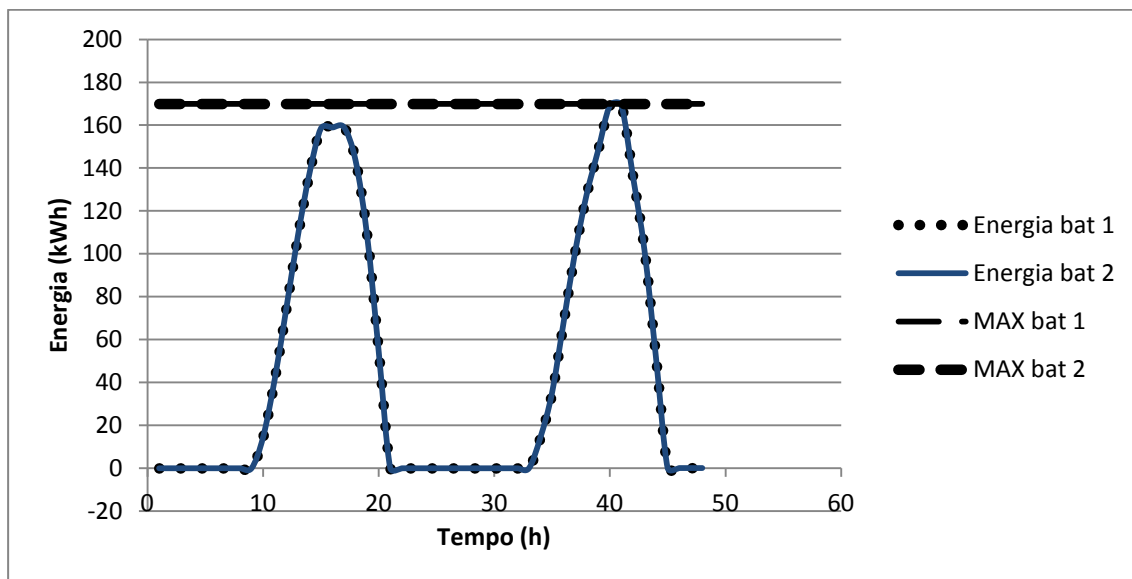


Figura 4.11 - Variação da Energia armazenada ao longo do tempo na Situação 2.

É possível verificar que a energia armazenada nas baterias atinge o máximo da sua capacidade nos períodos 40 e 41, que correspondem às 16:00 e 17:00 horas do segundo dia. A partir desses períodos, já não há necessidade de armazenar energia para corrigir os limites de tensão, pois a carga mantém-se e a produção de energia renovável voltou para um valor que não provoca sobretensões na rede. A partir desse período, o interesse passa por libertar o máximo de energia possível nas horas de máximo e libertar toda a energia armazenada (caso o dia seguinte seja igual a este ao nível dos diagramas de carga e produção, é crucial que toda a capacidade de armazenamento esteja disponível). Para tal, é necessário avaliar se a potência dos inversores é suficiente para libertar toda a energia nas horas de ponta. Caso não seja, é necessário libertar alguma energia nos períodos anteriores à ponta. Tal deve-se a que a necessidade de energia à noite é normalmente menor que durante o dia. Durante a ponta, deverá ser libertado o máximo de energia possível, para maximizar o lucro e garantir disponibilidade de capacidade do armazenamento para o dia seguinte.

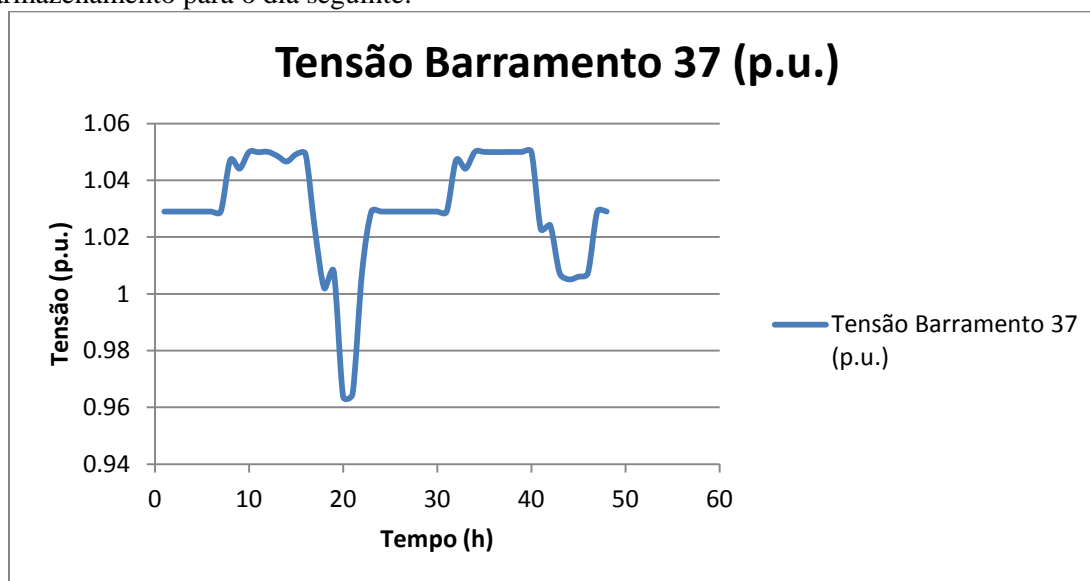


Figura 4.12 - Variação do módulo da tensão no barramento 37 ao longo do tempo na Situação 2.

Como é possível verificar, nos períodos 10 (10:00), 11 (11:00), 12 (12:00), 15 (15:00), 16 (16:00), 34 (10:00), 35 (11:00), 36 (12:00), 37 (13:00), 38 (14:00), 39 (15:00) e 40 (16:00), a tensão atinge o valor máximo. Este seria violado se não existisse o sistema de armazenamento, levando a corte de geração renovável. O sistema de armazenamento levou a que não se perdessem 507 kWh através do corte de produção renovável para controlo de tensão.

4.2.3 Situação 3 – Verão com produção renovável variável

Numa outra situação, criou-se um plano de operação para um diagrama de cargas mediano, mas com produção renovável variável, isto é, tendo em conta os diagramas de produção já apresentados, em certos períodos produzisse ao máximo e noutros produzisse menos. Seria uma situação de um dia de Verão com nuvens ou períodos de nebulosidade passageiros, que levassem a que, durante o dia, em certos períodos a produção renovável criasse a necessidade de armazenamento e noutros não.

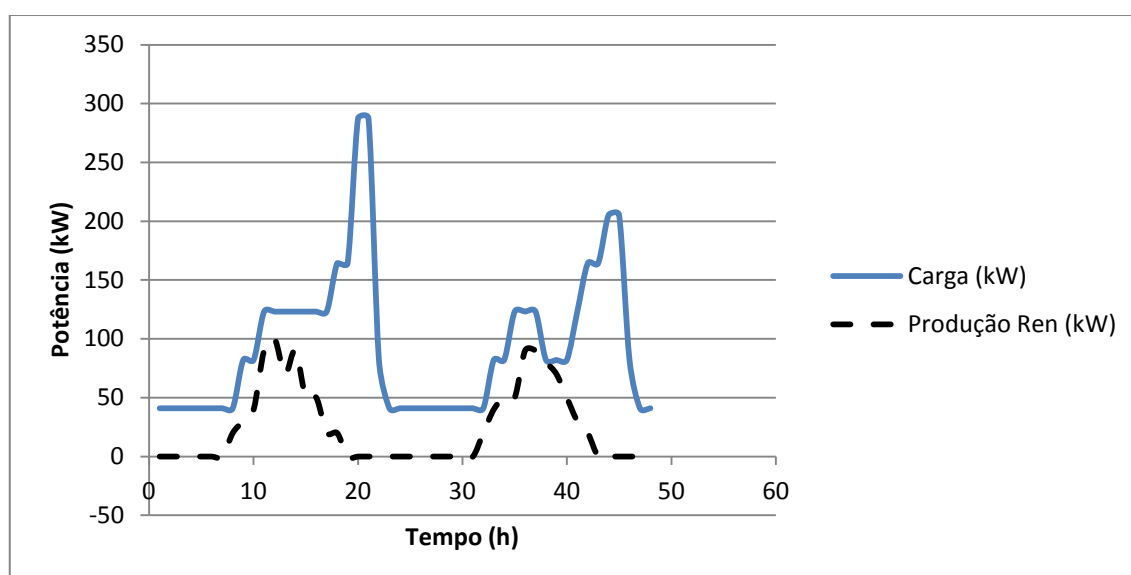


Figura 4.13 - Diagrama de Carga e Produção Renovável para a Situação 3.

Nesta situação a capacidade das baterias não é totalmente preenchida, sendo no máximo apenas preenchida a 64 %. Deste modo, continua-se a armazenar quando é necessário para manter os níveis de tensão, mas em períodos em que tal não é necessário surge algum armazenamento. Tal deve-se a estar a transferir energia para as horas de ponta, nas quais os limites mínimos de tensão podem ser violados. Além de permitir corrigir este problema, permite ainda maximizar o lucro da exploração do sistema, armazenando em horas em que há produção renovável e a energia é barata e vendendo energia em horas de ponta, em que a carga é máxima e a produção renovável nula. Continua a verificar-se que a energia é totalmente libertada nas horas de ponta, ficando nenhuma ou uma quantidade desprezável de energia armazenada. Assim, no dia seguinte, o sistema de armazenamento pode armazenar toda a sua capacidade, caso seja necessário.

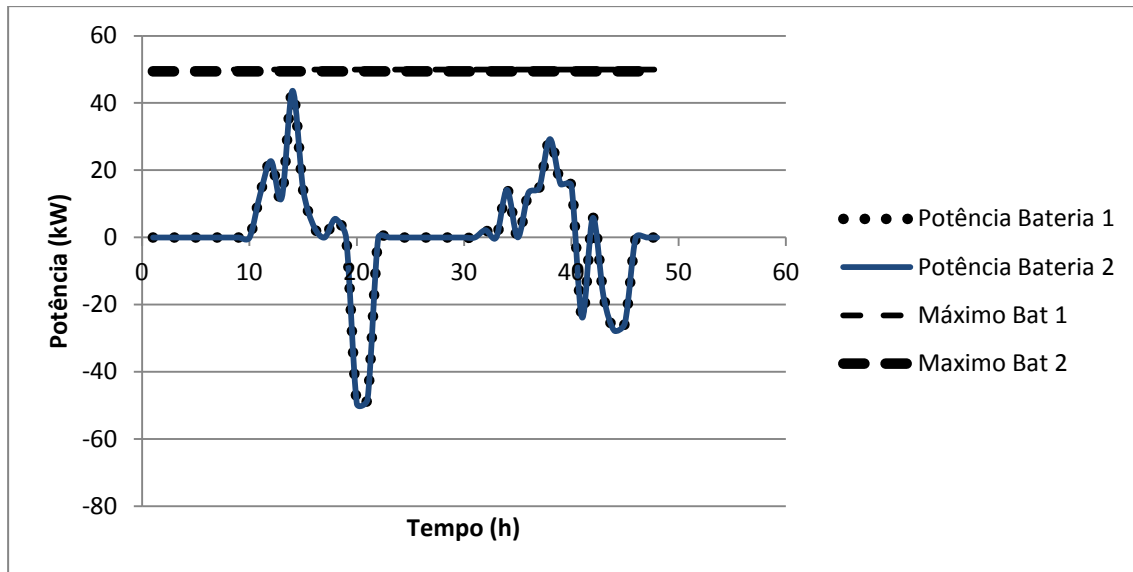


Figura 4.14 - Plano de operação obtido para as baterias na Situação 3.

Como não há necessidade de armazenar em todos os períodos do dia, por vezes o algoritmo apresentou resultados com alguma aleatoriedade no que toca a armazenamento ou injeção, mesmo sendo como critério de convergência a preferência por libertar energia em horas de máximo de carga.

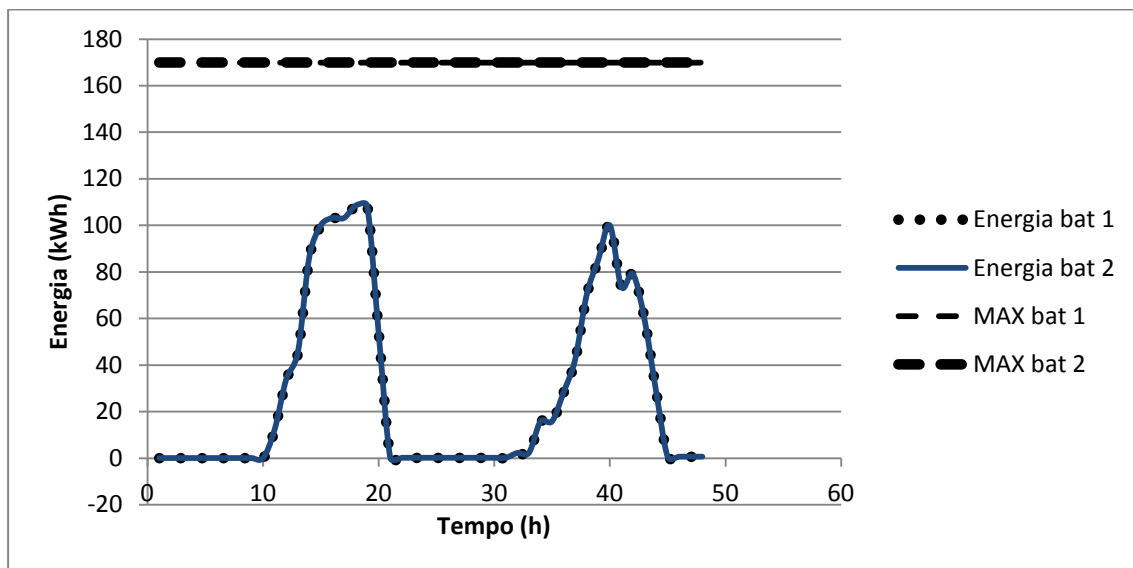


Figura 4.15 - Variação da Energia armazenada ao longo do tempo na Situação 3.

A energia armazenada possui uma variação similar à de um dia normal, porém com uma amplitude mais reduzida. A variabilidade da produção provoca uma menor necessidade de armazenamento, daí haver menor absorção de energia e consequentemente o sistema de armazenamento não é utilizado na sua capacidade máxima. No entanto, ainda existiu necessidade de armazenar a meio do dia, devido a aí ainda existirem períodos de elevada produção, mas também devido à carga não ser muito elevada nesses períodos, provocando também uma maior suscetibilidade à ocorrência de problemas de tensão.

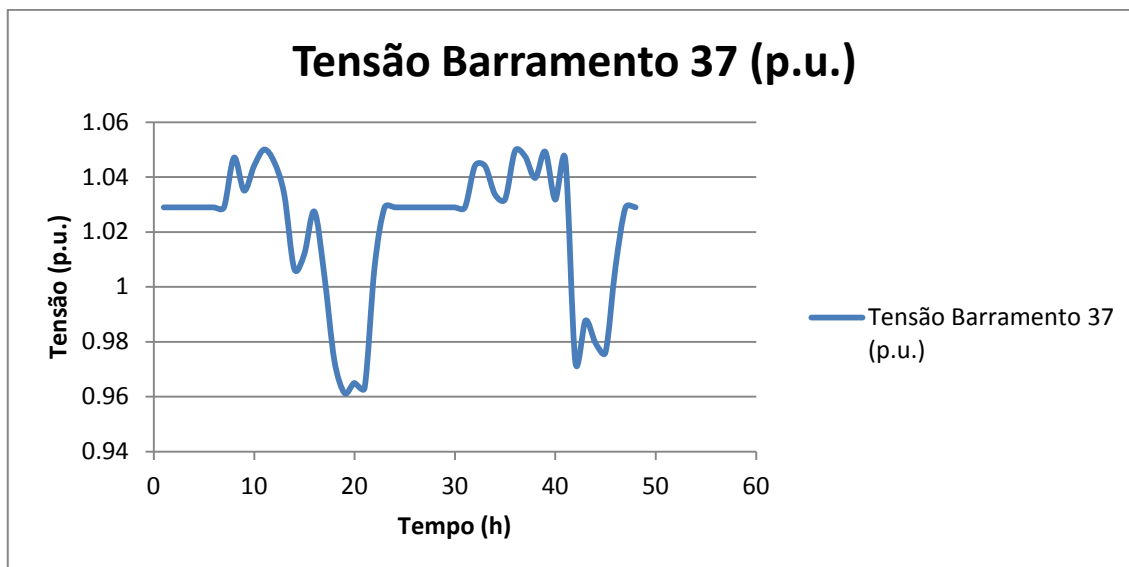


Figura 4.16 - Variação do módulo da tensão no barramento 37 ao longo do tempo na Situação 3.

Os problemas com as tensões são mais reduzidos nesta situação, pois há menor quantidade de energia resultante de produção renovável. Ainda assim, a energia que não se perde através do corte de produção renovável é de 196 kWh.

4.2.4 Situação 4 – Inverno

A seguir procede-se à análise de uma situação mais típica de um dia de Inverno. A carga possui um valor mediano mas a produção renovável é reduzida, não ultrapassando 50 % da potência instalada.

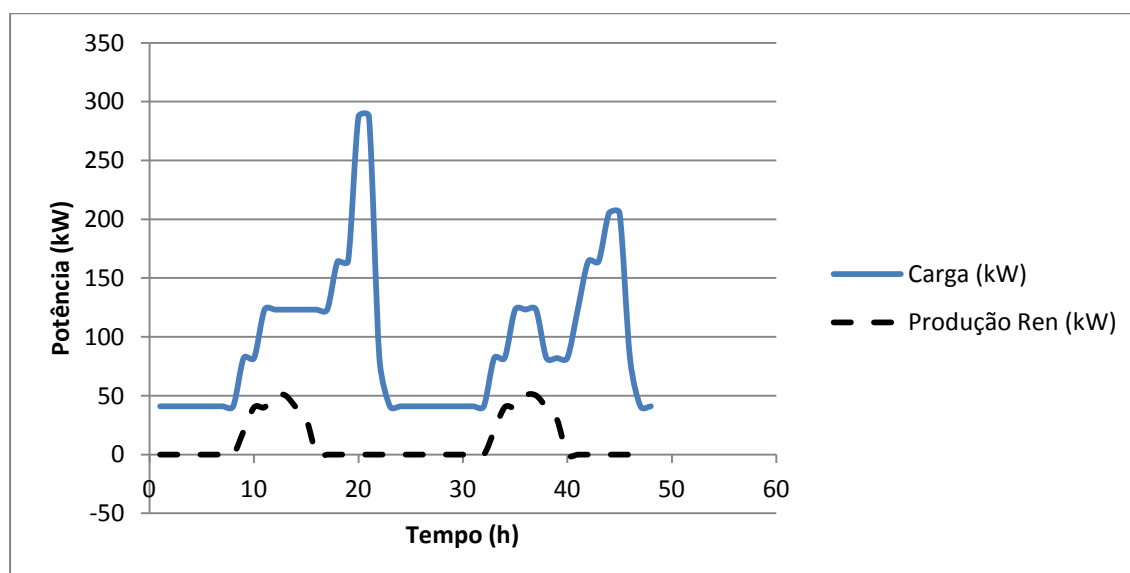


Figura 4.17 - Diagrama de Carga e Produção Renovável para a Situação 4.

Verifica-se neste caso que nos períodos em que ocorre absorção de energia por parte do armazenamento as tensões não ficam perto do limite máximo, pois a potência entregue pela produção renovável é reduzida. No entanto, esta absorção, embora não obrigatória, traz consigo o benefício de se poder libertar energia nas horas de ponta, o que traz algum benefício económico e mesmo do ponto de vista de operação da rede, pois nas horas de ponta há uma maior necessidade de energia que nos outros, sendo que a energia proveniente de fontes renováveis é mais interessante utilizar nesses períodos do que naqueles em que é gerada. Verifica-se que no primeiro dia, devido a que na ponta o consumo é muito elevado, há necessidade de alguma injeção de potência para impedir que os limites mínimos não sejam cumpridos.

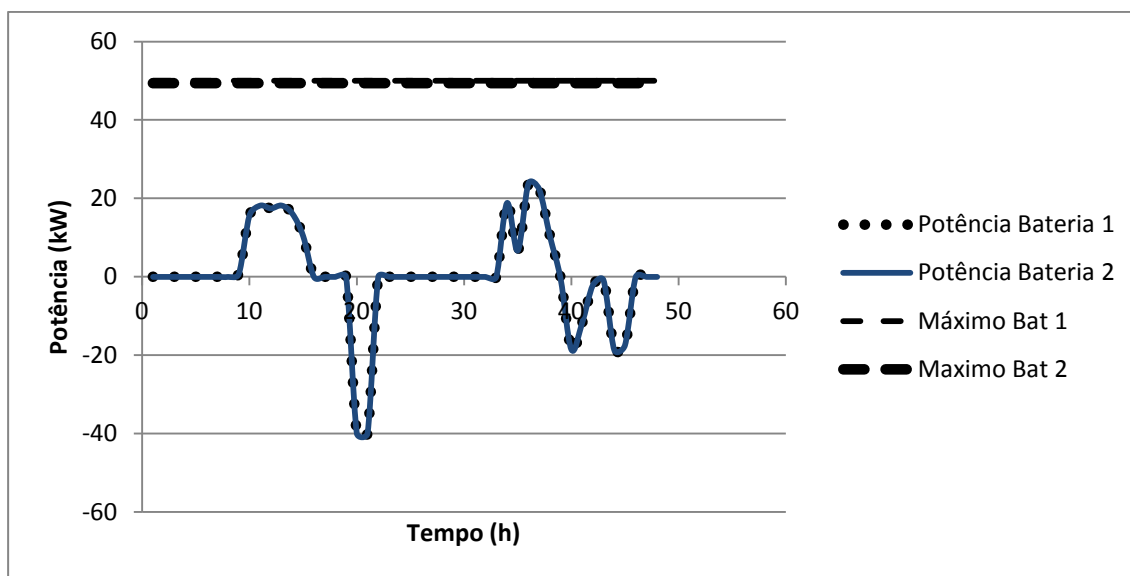


Figura 4.18 - Plano de operação obtido para as baterias na Situação 4.

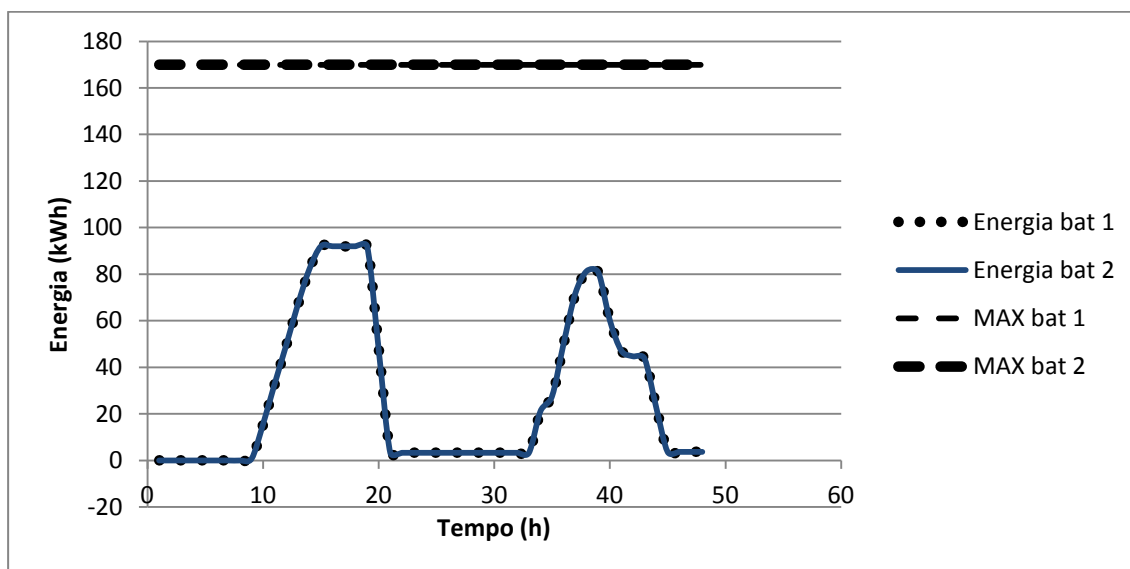


Figura 4.19 - Variação da Energia armazenada ao longo do tempo na Situação 4.

Como a produção renovável é reduzida, a capacidade do armazenamento utilizada não se aproxima do máximo. A capacidade máxima utilizada corresponde a 54 % da capacidade total da bateria. Ainda assim, toda a energia é libertada na ponta, não sobrando nenhuma para o dia seguinte.

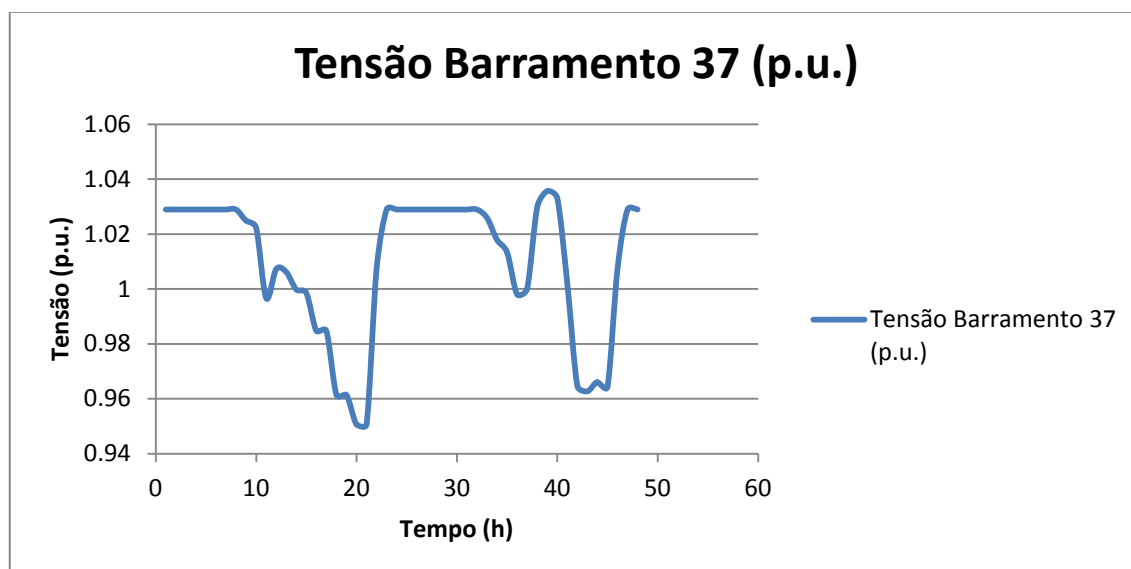


Figura 4.20 - Variação do módulo da tensão no barramento 37 ao longo do tempo na Situação 4.

Durante o dia, quando há produção renovável, as tensões cumprem os seus limites sem qualquer perigo de sobretensão. Durante a ponta, a tensão fica bastante mais reduzida devido ao elevado consumo, sendo que a energia armazenada durante o dia consegue corrigir qualquer problema nestas horas.

4.2.5 Situação 5 – Meia-Estação

Seguidamente, realiza-se a análise de uma situação de meia-estação, isto é, a carga durante o dia é relativamente mais reduzida, mesmo durante a ponta, pois aqui não há tanta necessidade de os consumidores usarem aquecimento ou ar condicionado, havendo menor consumo. Porém, a produção renovável é também mais reduzida, embora não tanto como numa situação de Inverno. Assim, o máximo que esta atingirá será de 70 % da potência instalada.

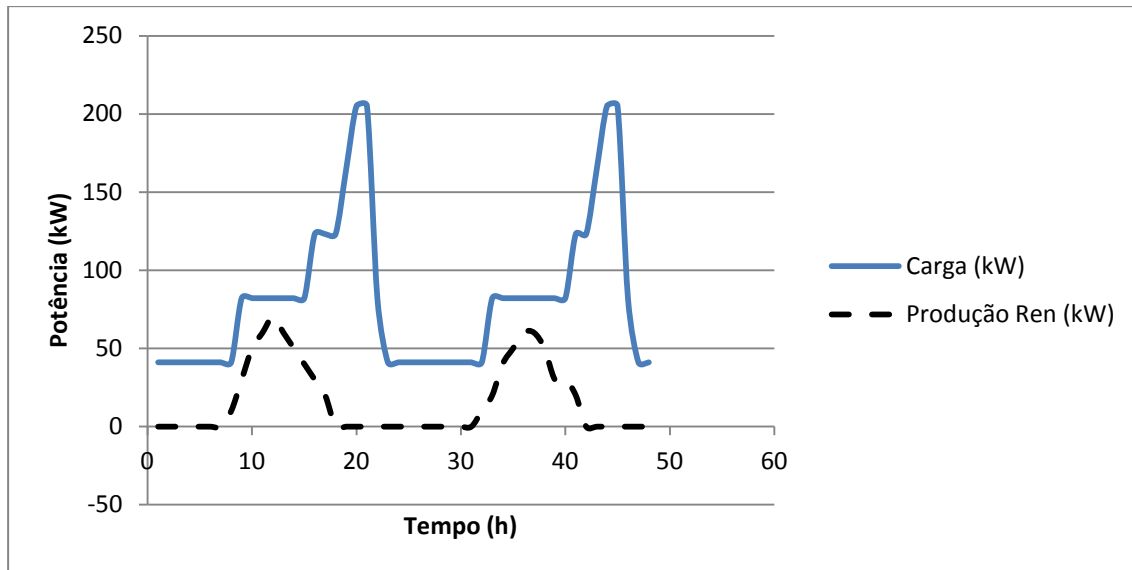


Figura 4.21 - Diagrama de Carga e Produção Renovável para a Situação 5.

Embora aqui já exista um maior risco de sobretensão, tal como na situação de “Inverno” o armazenamento não é utilizado na sua capacidade total. A potência de interligação também não atinge o seu máximo. Os períodos em que a energia é armazenada devem-se a situações de correção das tensões, mas também para permitir a transferência temporal da energia de períodos com pouca carga para períodos com maior interesse na sua utilização. Assim, verifica-se que esta é transferida para a ponta, quando é mais necessária pois a carga é mais elevada do que durante o dia.

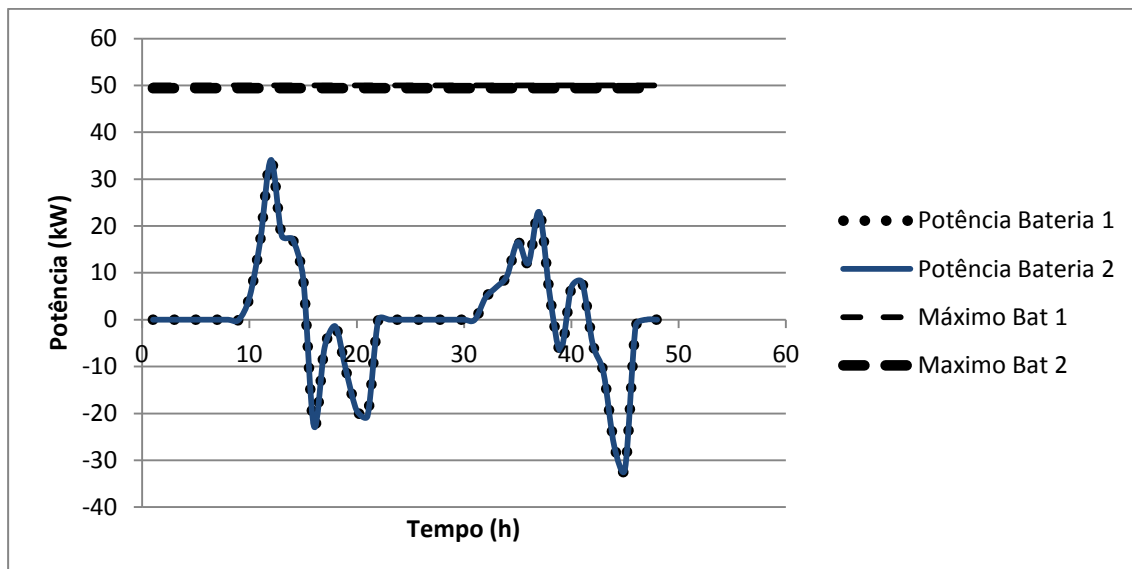


Figura 4.22 - Plano de operação obtido para as baterias na Situação 5.

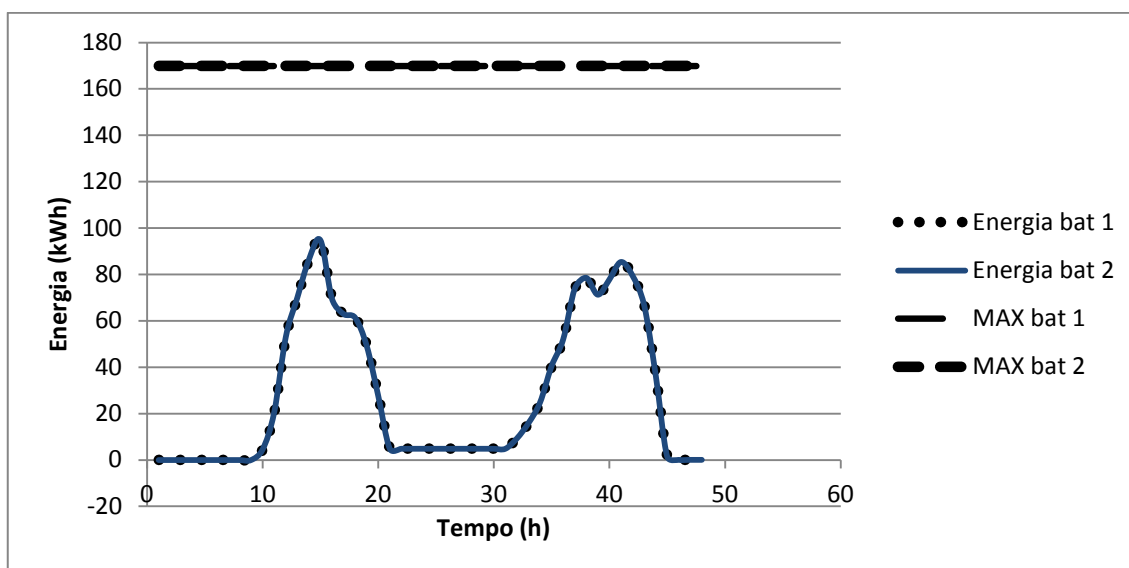


Figura 4.23 - Variação da Energia armazenada ao longo do tempo na Situação 5.

Como é possível verificar, a energia total armazenada não atinge o máximo da capacidade de armazenamento, ficando no máximo a 56 % desta.

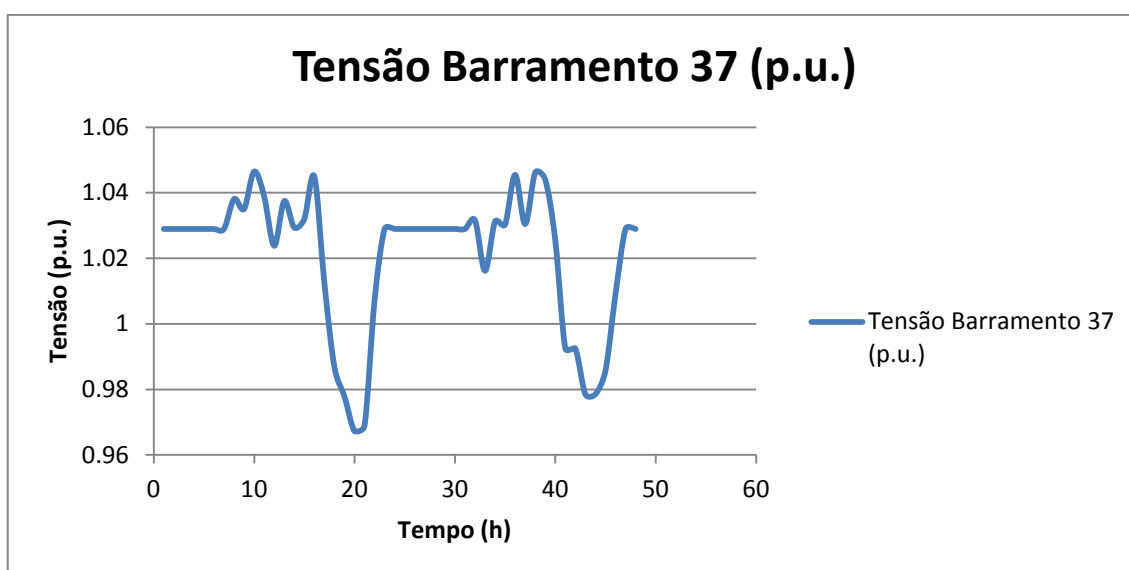


Figura 4.24 - Variação do módulo da tensão no barramento 37 ao longo do tempo na Situação 5.

Embora os problemas com tensão sejam menores e de menor amplitude, surgem ainda problemas nas horas em que a produção renovável atinge o máximo (70 % da potência instalada). O armazenamento consegue corrigir estes problemas com potências de carga reduzidas, levando na maioria dos casos a valores de tensão inferiores a 1,05 p.u., ou seja, a potência de armazenamento é maior que a necessária para corrigir as tensões. No entanto, esta absorção é benéfica pois, como foi dito, permite transferir energia para as horas de ponta, nas quais as tensões encontram-se baixas, pois não há geração renovável mas há carga.

Esta situação é similar à de Inverno, porém possui menores consumos e maior produção renovável. Com o sistema de armazenamento, evita-se a perda de 98 kWh de energia proveniente de fontes renováveis.

4.3 Localização do sistema de armazenamento

Embora neste trabalho não fosse realizada uma localização ótima para os sistemas de armazenamento, procurou-se que estes ficassem localizados em locais da rede que tornassem a sua utilização mais eficaz, procurando uma correção dos limites de tensão com valores de potência absorvida razoáveis. Assim, a bateria no barramento 22 localiza-se aí pois encontra-se na proximidade de diversos sistemas de produção renovável. A bateria no barramento 34 localiza-se aí para permitir uma eficaz correção do valor de tensão que surge elevado devido ao sistema de produção renovável existente no barramento 37. Como a ligação a este barramento possui resistência elevada e este se localiza num extremo de um ramo, quando há produção renovável elevada podem surgir aí problemas com o valor de tensão. Deste modo, uma bateria próxima ajuda a corrigir estes problemas, surgindo como carga quando necessário. No entanto é necessário ter em consideração que esta bateria irá armazenar e baixar a tensão quando esta é elevada mas também irá elevá-la quando estiver a entregar energia à rede, podendo originar problemas de violação do máximo de tensão da mesma forma que seriam originados pelo gerador. Assim, a sua localização é mais a montante que o gerador, para que permita que surjam menores problemas com o máximo de tensão.

Embora este estudo não fosse realizado como uma otimização, foi verificado que, no que toca à escolha da localização dos sistemas de armazenamento, é necessário ter em conta como reduzir o problema de violação do limite máximo de tensão, o qual é melhor resolvido quanto mais próximo do barramento com maior valor de tensão estiver o sistema de armazenamento, permitindo surgir como carga e mitigar o problema mais eficazmente, isto é, com menor valor de potência absorvida. No entanto, é necessário ter em conta que quando for a libertar a energia previamente armazenada, o mesmo problema não pode ocorrer. Embora a injeção de energia se dê, preferencialmente, em horas de ponta, com carga elevada e com maior probabilidade de problemas com o mínimo de tensão ao invés de com o máximo, em certos barramentos mais extremos ou com ligações mais resistivas o problema pode surgir.

4.4 Análise Económica do sistema de armazenamento

As baterias vão realizar uma transferência de energia entre períodos temporais, permitindo que energia armazenada numa dada hora seja entregue à rede mais tarde. Assim, durante certas horas serão cargas e durante outros períodos serão geradores. Embora o objetivo do trabalho não seja maximizar o lucro, é interessante a analisar a mais-valia económica do sistema nas situações consideradas acima. Não serão considerados custos de manutenção e exploração do sistema nem quanto lucro existe por parte da injeção direta dos geradores renováveis, apenas custo e proveito da troca de energia com a rede por parte das baterias.

Considerando um tarifário tri-horário, haverá uma distinção dos custos entre hora de ponta, cheia e vazio. Em certos períodos de ponta e cheia o armazenamento terá que funcionar como carga (meio do dia, pelas 12:00), devido à necessidade de corrigir as tensões da rede. Porém, como toda a energia absorvida será libertada no próprio dia, pretende-se verificar se é possível obter um proveito suficiente para cobrir os gastos de armazenamento.

São seguidamente apresentados os diferentes períodos tarifários, para um dia de Verão e um de Inverno.

Ciclo diário para BTE e BTN em Portugal Continental			
Período de hora legal de Inverno		Período de hora legal de Verão	
Ponta:	09.00/10.30 h 18.00/20.30 h	Ponta:	10.30/13.00 h 19.30/21.00 h
Cheias:	08.00/09.00 h 10.30/18.00 h 20.30/22.00 h	Cheias:	08.00/10.30 h 13.00/19.30 h 21.00/22.00 h
Vazio normal:	06.00/08.00 h 22.00/02.00 h	Vazio normal:	06.00/08.00 h 22.00/02.00 h
Super vazio:	02.00/06.00 h	Super vazio:	02.00/06.00 h

Figura 4.25 - Horas de Ponta, Cheia e Vazio [24].

Nestes períodos existe a seguinte taxa da energia consumida, em €/kWh.

Tabela 4.1 - Custo da eletricidade nos diferentes períodos [25].

	Ponta	Cheia	Vazio
Custo da energia consumida (€/kWh)	0,2749	0,1357	0,0746

Como se considera que a energia entregue à rede pelas baterias é de fonte renovável solar fotovoltaica, será vendida a 0,24 €/kWh [26].

Deste modo, são seguidamente apresentados o custo, o proveito e o lucro para os ciclos de dois dias testados nas diferentes situações consideradas atrás. Entende-se como custo o valor que se tem que pagar por consumir energia, isto é, por o sistema de armazenamento funcionar como uma carga. O proveito é quanto o sistema de armazenamento recebe por funcionar como gerador. O lucro é a diferença entre proveito e custo.

Tabela 4.2 - Proveito, Custo e Lucro obtidos com os sistemas de armazenamento e os planos de operação acima definidos.

	Custo (€)	Proveito (€)	Lucro (€)
Situação 1	108,43	125,56	17,14
Situação 2	135,88	141,75	5,87
Situação 3	78,99	92,12	13,13
Situação 4	49,13	71,84	22,71
Situação 5	78,43	78,81	0,37

Como é possível verificar, em todas as situações há lucro, embora em algumas seja reduzido, porém estão considerados apenas 2 dias em cada situação. Verifica-se que na situação de Inverno há um maior lucro que noutras situações. Tal deve-se a que nas outras situações ocorrem consumos mais elevados em hora de ponta, sendo que o custo é maior que no Inverno. No entanto, o valor obtido pela venda de energia é maior quanto maior for o volume de energia

armazenada, sendo o proveito maior verificado nas situações em que há maior volume de produção renovável.

O algoritmo não pretendia maximizar o lucro, sendo que existia sempre alguma energia sobrando nas baterias, ainda que reduzida. Deste modo, aliado às perdas que se verificam, mesmo com valores de venda mais elevados que os de compra de energia, o lucro introduzido pelas baterias pode ser reduzido. No entanto, aqui não é considerado o efeito de não vender a energia renovável produzida por causa do corte dos geradores, que traria perdas económicas, ou seja, com as baterias há um valor acrescentado que se introduz pelo facto de não ser necessário cortar produção renovável, sendo que toda a que existe é aproveitada, seja no momento de produção, seja mais tarde. Considerando estes fatores, pode-se dizer que os sistemas de armazenamento aliados à produção renovável trazem uma mais-valia económica, para além da mais-valia de operação do sistema já estudada neste trabalho.

Capítulo 5

Conclusões

Após a realização do trabalho foi possível adquirir uma melhor compreensão relativamente aos efeitos da existência de produção renovável na rede de distribuição em baixa tensão, bem como formas de evitar os eventuais problemas que podem surgir devido à sua presença.

Assim, da análise inicial das diferentes formas de armazenamento estudadas, é possível verificar que para utilizar em sistemas de armazenamento distribuído, integradas em rede de baixa tensão, soluções como baterias, volantes de inércia ou super-condensadores apresentam melhores características que soluções como bombagem ou ar comprimido, pois as primeiras têm bons rendimentos, são possíveis de dimensionar em tamanhos mais reduzidos e para capacidades de armazenamento menores sem grandes perdas e podem localizar-se facilmente em redes de baixa tensão, pois não estão condicionadas a estruturas geológicas. As baterias, devido à versatilidade de tecnologias existentes, existem numa vasta gama de potências e capacidades, para além de possuírem características como reduzidas taxas de auto-descarga e bons ciclos carga-descarga, sendo uma tecnologia de armazenamento a considerar na implementação de sistemas distribuídos.

Durante o estudo, verificou-se a importância da localização dos sistemas de armazenamento na rede em questão. Para minimizar as sobretensões, deverão ser colocados o mais próximo possível dos barramentos que registem tensões mais elevadas em situações críticas. Porém, convém verificar se, mesmo com cargas mais elevadas, quando a energia armazenada for entregue à rede não surgem sobretensões. Além disso, quanto melhor localizado estiver o sistema de armazenamento (mais próximo dos problemas de tensão), menores serão as capacidades dos sistemas de armazenamento e menores serão as potências necessárias de implementar para corrigir as tensões. Verificou-se ainda que, quando o problema a resolver é de sobretensão, o rendimento do retificador ser mais reduzido conduz a menores capacidades necessárias para o sistema de armazenamento, embora a potência continue a ser a mesma. Tal deve-se ao facto que, com o rendimento menor, é como se, para além do armazenamento existisse uma carga dissipativa adicional. Assim, menos energia é armazenada, embora para a mesma potência consumida. No entanto, esta situação é desfavorável de um ponto de vista económico, pois existe energia perdida, que não é aproveitada devido a esse menor rendimento,

no processo de correção do valor de tensão, podendo não ser compensatória a redução que se verificaria na capacidade máximo necessária para o sistema de armazenamento.

Após a escolha da capacidade e potência dos sistemas de armazenamento, analisou-se a escolha de planos de operação que minimizassem a energia desperdiçada. Partindo do pressuposto que seria perdida energia sempre que não se pudesse armazenar, o primeiro processo a verificar é um bom dimensionamento dos sistemas de armazenamento. Tal deve ser feito com um estudo correto da rede, incluindo uma avaliação de diagramas de carga e de produção local desfavoráveis, para o sistema ser dimensionado de modo a evitar cortes de produção e perda de energia. No entanto, estes estudos não devem ser demasiado desfavoráveis, pois nem em todo o ano o sistema será utilizado à capacidade máxima. Além disso, o custo de uma unidade de maior capacidade e maior potência será maior, logo haverá maior despesa, e há que ter em conta o elevado número de ciclos carga-descarga que se irão verificar quando se realizar uma análise económica do investimento, que deverá garantir lucro.

Para a criação de planos de operação que minimizem o desperdício é necessário ter em conta, primeiro, que é importante garantir que os níveis de tensão são cumpridos com a capacidade disponível. Caso não sejam, haverá corte de produção, e se houver corte de produção haverá energia desperdiçada. Para tal, é necessário gerir bem a capacidade disponível, não utilizá-la em demasia quando não é necessário. Assenta aqui com grande importância a qualidade da previsão, pois para prever o plano de operação é necessário saber quanta energia se terá que gerir ao longo de cada dia. Assim, poder-se-á gerir da melhor maneira o sistema de armazenamento, garantindo que a sua capacidade não é esgotada em períodos iniciais e depois, quando é necessário, a capacidade disponível já não é suficiente. Para além de considerar o diagrama de produção, é necessário libertar toda a energia armazenada durante o dia. Caso o armazenamento guarde energia de um dia para outro, caso o dia seguinte possua muita produção renovável, o armazenamento poderá ser insuficiente para as necessidades, o que conduzirá a energia perdida. A libertação de energia é uma parte importante do plano de operação dos sistemas de armazenamento. Primeiro, há um interesse em utilizar a energia armazenada quando esta traz mais vantagens em ser utilizada, isto é, em horas de ponta. Nas horas de ponta de fim de tarde ou noite, das 19:00 às 21:00, há uma grande quantidade de carga. A energia armazenada durante o dia poderá ser utilizada aqui com grande vantagem para a operação do sistema. Primeiro, se a produção renovável for fotovoltaica, esta não existirá nestes períodos. Depois, a ponta verifica-se em todo o sistema elétrico, não apenas na rede em análise. Deste modo, é menor a carga a alimentar por centrais mais a montante, libertando as grandes centrais existentes, muitas que utilizam combustíveis fósseis, da produção de tanta energia para garantir que a carga é alimentada. Além disso, como a carga é elevada, poderão surgir tensões reduzidas, que poderiam levar a problemas de operação da rede. Durante o dia a carga é normalmente mais reduzida que nestes períodos, porém é durante o dia que se encontra localizada a produção de energia elétrica por solar fotovoltaico. Assim, com os sistemas de armazenamento, surge a possibilidade de transferência temporal de energia renovável que, de outro modo, não seria transferível. Colocando os sistemas de armazenamento em redes de baixa tensão, próximos da carga, reduz-se a parte da rede que é utilizada para transporte de energia. Assim, há menos perdas, pois a eletricidade é gerada, armazenada e consumida em locais próximos uns dos outros.

Analisando economicamente esta solução, verifica-se que o investimento inicial será maior. Para além do sistema de produção propriamente dito, é ainda necessário o sistema de armazenamento e o sistema que o interliga com a rede (a maior parte dos sistemas de

armazenamento funcionam em corrente contínua, logo precisam de interface próprio (retificador para armazenar e inversor para entregar à rede)). Porém este sistema permite aumentar a capacidade de produção instalada. Com armazenamento, pode-se instalar mais porque mesmo que se produza mais que o consumo, é possível guardar a energia e utilizá-la noutras horas. Assim, há um maior aproveitamento da fonte renovável, que não seria possível sem o sistema de armazenamento, pois a operação correta do sistema elétrico não seria possível, a não ser que se cortassem geradores, mas assim haveriam perdas e o investimento seria, muito provavelmente, exagerado e de difícil retorno. Com o armazenamento, há uma melhor capacidade para gerir o sistema produtor, podendo guardar a energia e vendê-la mais tarde, em horas de preço mais competitivo. Porém, a grande vantagem é poder comercializar toda a energia produzida, porque desaparece a necessidade de corte de produção para garantir a estabilidade do sistema, sendo esta garantida pelo armazenamento que aparece como carga quando necessária. Deste modo, torna-se mais provável de garantir que 100 % (menos as perdas) da energia produzida é comercializada, o que aumenta a probabilidade de ocorrer retorno do investimento realizado. No entanto, o correto dimensionamento do sistema para as necessidades da rede é indispensável. Haverá sempre um limite máximo que não pode ser ultrapassado. Além disso, devido ao aparecimento de produção a jusante, um dimensionamento telescópico das canalizações da rede elétrica não deverá ser realizado, visto que a corrente poderá circular em dois sentidos caso a jusante de um dado troço da linha exista produção e carga. Do ponto de vista de conceção da rede ficará mais caro, pois não deverá existir redução da secção dos condutores no sentido de montante para jusante.

Verifica-se que em meses com pouca produção poderá haver maior lucro da parte da exploração do sistema de armazenamento (sem contabilizar a produção renovável, apenas a energia que circula pelo armazenamento). Tal deve-se a que, ao nível de tarifário, há um período de ponta por volta do meio-dia. Deste modo, havendo aí consumo por parte do sistema de armazenamento (e, atendendo ao uso de produção fotovoltaica, é muito provável que este consumo seja obrigatório, como explicado acima), este consumo será cobrado à tarifa mais elevada. Assim, poderá levar a que no Verão, em certos dias, haja um lucro menor que no Inverno, em que a absorção nas horas de meio-dia poderá não ser obrigatória devido à produção por solar fotovoltaico ser menor. No entanto, como verificado neste trabalho, a energia armazenada será maior no Verão, pelo que o dinheiro obtido apenas pela venda de eletricidade armazenada será maior que num dia normal de Inverno.

Como conclusão final, é possível dizer que a utilização de sistemas de armazenamento distribuído maximiza a integração de produção renovável. Melhora o aproveitamento desta, permite uma melhor exploração, capaz até de ser economicamente mais rentável e de elevar os valores de potência instalada, e permite um melhor controlo do sistema elétrico em que estiverem instalados.

5.1 Perspetivas de Desenvolvimento/Outras análises possíveis

Neste trabalho o interesse económico da solução foi pouco analisado, tendo-se analisado com maior detalhe os aspetos técnicos e os benefícios que surgem da exploração da rede de um modo mais controlado, como é permitido pelos sistemas de armazenamento. Poderá ser uma situação de estudo interessante, prever planos de operação não apenas para minimizar o desperdício de energia renovável mas também com maximização de lucro. No entanto, já existem estudos a considerar isto, especialmente considerando um sistema que combine eólica

com hídrica (bombagem), como descrito no Estado de Arte. Dentro deste estudo económico, seria interessante verificar o interesse em armazenar também da rede e não apenas energia produzida por fontes renováveis, verificando o impacto económico que poderia existir.

No caso em estudo foram consideradas baterias estacionárias para sistema de armazenamento. Porém, na atualidade, começam a surgir e a ter cada vez maior impacto os veículos elétricos. De um ponto de vista de veículo elétrico, em que a principal função será deslocar-se, considera-se uma carga. No entanto, poderá ser interessante considerar o uso destes como sistemas de armazenamento distribuído, capazes de armazenar energia e devolvê-la à rede em caso de necessidade (projeto “*Vehicle To Grid*”).

Não foi estudado neste trabalho, mas havendo produção suficiente e energia armazenada suficiente, poderia ser interessante considerar a rede estudada a funcionar independentemente da rede elétrica de média tensão. Se o objetivo fosse esse, o dimensionamento do armazenamento deveria ser realizado com o objetivo de garantir que haveria sempre energia suficiente para a carga, sendo os critérios de minimização diferentes. Além disso, ao nível das tensões da rede, a sua configuração seria bastante diferente, pois desaparecendo a ligação pelo posto de transformação, a distribuição das tensões ao longo da rede poderia variar consideravelmente ao longo do dia, dependendo de onde se localizariam os geradores fotovoltaicos, os sistemas de armazenamento e os maiores aglomerados de carga. Além disso, devido à sazonalidade da produção fotovoltaica, a integração de outro tipo de produção por fonte renovável seria interessante, nomeadamente a eólica.

Uma das considerações admitidas quando se realizou este estudo foi que a rede de distribuição de baixa tensão considerada era trifásica e equilibrada. Porém, a maioria das redes de baixa tensão que abastecem consumidores domésticos são trifásicas mas com cargas monofásicas. Seria interessante alargar este estudo a uma situação em que a rede trifásica fosse desequilibrada, analisando as consequências que isso traria (seria de esperar que certas fases possuísem, eventualmente, maiores problemas com os limites de tensão que outras, e verificar como seriam definidas estratégias de exploração que permitissem atenuar quer problemas de tensão quer desequilíbrios entre fases). Também seria interessante estender estas metodologias de dimensionamento e identificação de estratégias de exploração a redes de distribuição de baixa tensão monofásicas.

Referências

- [1] A. G. Madureira e J. A. Peças Lopes, “Coordinated voltage support in distribution networks with distributed generation and microgrids”, *IET Renewable Power Generation*, 2009
- [2] Edgardo D. Castronuovo e João A. Peças Lopes, “Optimal operation and hydro storage sizing of a wind-hydro power plant”, *Electrical Power and Energy Systems*, pp. 771-778, 2004
- [3] Edgardo D. Castronuovo e J. A. Peças Lopes, “On the Optimization of the Daily Operation of a Wind-Hydro Power Plant”, *IEEE*, Agosto 2004
- [4] Edgardo D. Castronuovo e J. A. Peças Lopes, “Bounding Active Power Generation of a Wind-Hydro Power Plant”, *IEEE*, Setembro 2004
- [5] Paulo D. Brown, J. A. Peças Lopes e Manuel A. Matos, “Optimization of Pumped Storage Capacity in a Isolated Power Systeem With Large Renewable Penetration”, *IEEE*, Maio 2008
- [6] Miguel Aires Tavares da Silva Oliveira Martins, “Estudo de Redes Isoladas com Elevada Penetração de Energia Eólica utilizando Volantes de Inércia”, *Dissertação de Mestrado*, Junho 2010
- [7] Paul David Brown, “Evaluation of Integration of Pumped Storage Units in an Isolated Network”, *Dissertação de Mestrado*, Maio 2006
- [8] Bruno Filipe Gomes da Silva, “Estudo de Soluções Alternativas de Armazenamento de Energia para Diferentes Horizontes Temporais”, *Dissertação de Mestrado*, Março 2008
- [9] Magnus Korpas, Ragne Hildrum e Arne T. Holen, “Operation and Sizing of Energy Storage for Wind Power Plants en A Market System”, *14th PSCC, Sevilla*, pp. 24-28, Junho 2002
- [10] J. A. Peças Lopes, “Integration of Dispersed Generation on Distribution Networks – Impact Studies”, *IEEE*, 2002
- [11] H. Ibrahim, A. Ilinca e J. Perron, “Energy storage systems—Characteristics and comparisons”, *ELSEVIER*, Janeiro 2007
- [12] Bhim Singh, Brij N. Singh, Ambrish Chandra, Kamal Al-Haddad, Ashish Pandey e Dwarka P. Kothari, “A Review of Three-Phase Improved Power Quality AC–DC Converters”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Junho 2004
- [13] A. Oudalov, D. Chartouni, C. Ohler e G. Linhofer, “Value Analysis of Battery Energy Storage Applications in Power Systems”, *IEEE*, 2006
- [14] Y. Tachibana, “A new Power Supply System using NaS Battery”, *Proceedings of 17th WEC Congress*, 1998
- [15] Françoise Nemry, Guillaume Leduc e Almudena Muñoz, “Plug-in Hybrid and Battery-Electric Vehicles: State of the research and development and comparative analysis of energy and cost efficiency”, *JRC Technical Notes*, 2009
- [16] Disponível em: <http://www.mpoweruk.com/chemistries.htm>

56 Referências

- [17] Multon B, Ruer J. Stocker, “L’électricité: Oui, c’est indispensable, et c’est possible! Pourquoi, où, comment?”, *Publicação ECRIN*; Abril 2003
- [18] Robyns B., “Contribution du stockage de l’énergie électrique à la participation au services système des éoliennes”, *Seminário SRBE-SEE-L2EP “Éolien et réseaux: enjeux”*, Março 2005
- [19] Disponível em: www.electricitystorage.org
- [20] *Apontamentos da Unidade Curricular “Energia Eólica e Solar”, lecionada na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*
- [21] Disponível em: http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/countries/europe/g13y_es.png
- [22] Vladimiro Miranda, “Computação Evolucionária: Uma Introdução”, *Apontamentos da Unidade Curricular “Decisão, Optimização e Inteligência Computacional”*, lecionada na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Março 2005
- [23] Vladimiro Miranda, “Algumas notas sobre Programação Não-Linear”, *Apontamentos da Unidade Curricular “Decisão, Optimização e Inteligência Computacional”*, lecionada na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Fevereiro 2008
- [24] Disponível em:
<http://www.erse.pt/pt/electricidade/tarifaseprecos/periodoshorarios/Paginas/Ciclodiariorfor necBTEBTNpt.aspx>
- [25] Disponível em:
http://www.erse.pt/pt/Simuladores/Documents/Pre%C3%A7osRef_BTN_22Mai.2012.pdf
- [26] Disponível em: <http://www.saldopositivo.cgd.pt/produza-a-sua-energia/>
- [27] Shaobo.Lin., Minxiao.Han., Ruixiang.Fan. e Xiaodong.Hu., “Configuration of Energy Storage System for Distribution Network with High Penetration of PV”, *IEEE*, Setembro 2011
- [28] Rui Huang, Steven H. Low, Ufuk Topcu e K. Mani Chandy, “Optimal Design of Hybrid Energy System with PV/ WindTurbine/ Storage: A Case Study”, *IEEE*, Outubro 2011
- [29] Andrew F. Burke, “Batteries and Ultracapacitors for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles”, *IEEE*, Abril 2007
- [30] B.H. Chowdhury e Saifur Rahman, “Analysis of Interrelationships Between Photovoltaic Power and Battery Storage for Electric Utility Load Management”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Agosto 1988
- [31] Pedro Miguel Pinhanços Batista, “Gestão Integrada de microgeração e armazenamento distribuído em redes de distribuição BT”, *Dissertação de Mestrado*, Julho 2010
- [32] Disponível em: <http://www.mpoweruk.com/specifications/comparisons.pdf>

Anexo A

Dados da Rede

Neste apêndice são apresentados os dados da rede de baixa tensão utilizada neste estudo. A imagem desta rede é apresentada no Capítulo 2, na seção 2.3 “A Rede”.

A.1. Linhas

Tabela A.1 - Dados das linhas que compõe a rede

De barr.	Para barr.	Comp (m)	Comp (km)	R (ohm/km)	L (mH/km)	R (ohm)	L (mH)
1	2	16	0,016	0,164	0,22	0,00262	0,00352
2	3	23	0,023	0,32	0,23	0,00736	0,00529
3	4	25	0,025	0,443	0,25	0,01108	0,00625
4	5	3	0,003	3,08	0,44	0,00924	0,00132
4	6	24	0,024	0,443	0,25	0,01063	0,006
6	7	22	0,022	1,2	0,27	0,0264	0,00594
7	8	5	0,005	3,08	0,44	0,0154	0,0022
7	9	25	0,025	12,6	0,32	0,315	0,008
6	10	22	0,022	0,443	0,25	0,00975	0,0055
10	11	15	0,015	3,08	0,44	0,0462	0,0066
10	12	12	0,012	3,08	0,44	0,03696	0,00528
10	13	13	0,013	3,08	0,44	0,04004	0,00572
10	14	29	0,029	0,443	0,25	0,01285	0,00725
14	15	9	0,009	3,08	0,32	0,02772	0,00288
14	16	27	0,027	1,2	0,27	0,0324	0,00729
16	17	3	0,003	3,08	0,44	0,00924	0,00132
14	18	2	0,002	3,08	0,44	0,00616	0,00088
18	19	3	0,003	3,08	0,44	0,00924	0,00132
19	20	4	0,004	3,08	0,44	0,01232	0,00176
14	21	19	0,019	0,443	0,25	0,00842	0,00475
21	22	17	0,017	0,443	0,25	0,00753	0,00425

22	23	12	0,012	0,868	0,24	0,01042	0,00288
22	24	34	0,034	0,443	0,25	0,01506	0,0085
24	25	26	0,026	0,868	0,24	0,02257	0,00624
24	26	6	0,006	3,08	0,44	0,01848	0,00264
24	27	15	0,015	3,08	0,44	0,0462	0,0066
24	28	24	0,024	1,2	0,27	0,0288	0,00648
27	29	13	0,013	3,08	0,44	0,04004	0,00572
22	30	3	0,003	0,443	0,25	0,00133	0,00075
30	31	2	0,002	3,08	0,44	0,00616	0,00088
30	32	12	0,012	0,443	0,25	0,00532	0,003
32	33	24	0,024	0,443	0,25	0,01063	0,006
33	34	22	0,022	3,08	0,32	0,06776	0,00704
34	35	54	0,054	3,08	0,32	0,16632	0,01728
35	36	61	0,061	3,08	0,32	0,18788	0,01952
36	37	7	0,007	3,08	0,32	0,02156	0,00224
32	38	30	0,030	0,443	0,25	0,01329	0,0075
38	39	12	0,012	1,2	0,27	0,0144	0,00324
38	40	23	0,023	0,443	0,25	0,01019	0,00575
40	41	33	0,033	0,443	0,25	0,01462	0,00825

A.2. Cargas

As cargas foram consideradas com um fator de potência de 1 pois são maioritariamente do tipo habitações domésticas, sem grandes motores de indução ou cargas fortemente reativas.

Tabela A.2 - Cargas da rede

Barramento	Sc (kVA)	cos (φ)	Pc (kW)	Qc (kW)
1	0	1	0	0
2	0	1	0	0
3	6,9	1	6,9	0
4	0	1	0	0
5	31,05	1	31,05	0
6	6,9	1	6,9	0
7	10,35	1	10,35	0
8	6,9	1	6,9	0
9	10,35	1	10,35	0
10	3,45	1	3,45	0
11	27,6	1	27,6	0
12	6,9	1	6,9	0
13	6,9	1	6,9	0
14	0	1	0	0
15	6,9	1	6,9	0
16	10,35	1	10,35	0
17	6,9	1	6,9	0

18	3,45	1	3,45	0
19	3,45	1	3,45	0
20	6,9	1	6,9	0
21	34,5	1	3,45	0
22	0	1	0	0
23	13,8	1	13,8	0
24	0	1	0	0
25	20,7	1	20,7	0
26	13,8	1	13,8	0
27	6,9	1	6,9	0
28	13,8	1	13,8	0
29	24,15	1	24,15	0
30	10,35	1	10,35	0
31	13,8	1	13,8	0
32	3,45	1	3,45	0
33	17,25	1	17,25	0
34	10,35	1	10,35	0
35	20,7	1	20,7	0
36	3,45	1	3,45	0
37	6,9	1	6,9	0
38	0	1	0	0
39	20,7	1	20,7	0
40	10,35	1	10,35	0
41	10,35	1	10,35	0

A.3. Geradores Fotovoltaicos

Existem 6 geradores fotovoltaicos, de igual potência, não necessariamente incorporados em habitações. A potência instalada total é de 100 kW.

Tabela A.3 - Localização e potência dos geradores fotovoltaicos existentes na rede

N.º	Pg (kW)
27	16,7
29	16,7
30	16,7
37	16,7
38	16,7
39	16,7