

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



FEUP

Gestão integrada de microgeração e armazenamento distribuído em redes de distribuição BT

Pedro Miguel Pinhanços Batista

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

Orientador: Prof. Doutor João Abel Peças Lopes

Julho de 2010

Resumo

Actualmente, existe uma grande aposta nas energias renováveis que se tem traduzido, por exemplo, em incentivos para que o típico consumidor de energia possa também tornar-se produtor, procurando minimizar a dependência energética face aos combustíveis fósseis e o impacto ambiental da produção de energia eléctrica que faz parte, também, do compromisso assumido por diversos países no Protocolo de Quioto. Contudo, as redes eléctricas foram projectadas para um fluxo de potência unidireccional e uma operação passiva, mas com a integração da Microgeração nas redes de distribuição, elas passam a ser operadas em regime bidireccional, o que pode provocar problemas na rede. A elevada penetração de Microgeração nas redes de distribuição pode, por exemplo, conduzir à ocorrência de problemas de sobretensão que se devem ao facto de, em certas horas, a produção local ser muito superior ao consumo e, por isso, existir uma injeção de potência na rede de distribuição.

Uma vez que uma reestruturação da rede eléctrica é um processo muito dispendioso e moroso, têm sido investigadas novas soluções para a resolução dos problemas que resultam do facto de a rede eléctrica não estar preparada para incorporar geração distribuída.

Na presente dissertação propomos uma solução, alternativa às que actualmente se utilizam, que permite garantir que a tensão nos nós da rede não exceda os limites tecnicamente admissíveis e que se baseia na inserção de um sistema de armazenamento na Microrede que permitirá o armazenamento de energia equivalente à potência que é produzida num dado momento e que não é consumida, para um consumo posterior. Para tal, é formulado um problema de optimização e apresentada uma metodologia de resolução do problema que tem como objectivo calcular o valor mínimo que o sistema de armazenamento deverá ter para que a rede possa operar a todo o momento sem que a tensão exceda os valores admissíveis. O local da rede mais indicado para aplicação do sistema de armazenamento é também analisado, na perspectiva de minimização da capacidade de armazenamento necessária.

A solução proposta representa também outras vantagens para além da resolução do problema de sobretensões que já se referiu, na medida em que permite uma melhor exploração da Microgeração, aproveitando toda a energia produzida e todo o potencial das energias intermitentes (energias renováveis que dependem de condições atmosféricas), assim como possibilita a instalação de um maior número de Microgeradores, contornando a necessidade de serem impostas restrições pela rede de distribuição ao número de unidades geradoras instaladas.

Abstract

Nowadays, due to the rise investment on renewable energies and emerging policies that encourage the usual energy consumer to also become a producer, trying to reduce the energetic dependence on fossil fuels and the environmental consequences of electrical energy production that is also a part of the agreement of many countries at the Kyoto Protocol. However, the electrical grids were projected to work at unidirectional energy flows and a passive approach, but the penetration of Microgeneration at the distribution networks raises problems to the grid, as they work as a bidirectional energy flow. The high penetration of Microgeneration at the distribution networks may, for example, drive to overvoltage problems due to the excess of local production (and low consume of energy) at specific hours and, inherently, to the power injection at the distribution network.

Once the electrical grid restructuration is an expensive and a very slow process, new solutions have been explored, considering the problems that arise from the non-adequacy of the electrical grids to integrate distributed generation.

This work proposes another solution that ensures the voltage values at the network nodes stay within the limits technically accepted. The solution proposed is based on the application of an energy storage device at the Microgrid to store the energy, for a future consume, equivalent to the power produced and not consumed at a certain moment. An optimization problem and a method of resolution are presented, aiming to estimate the minimum value necessary of the storage device so the grid can work continuously without voltage values over those technically accepted. The point of the network where the storage device may be applied is also analyzed, aiming to reduce the storage capacity need.

The solution proposed makes the overvoltage control possible and have other advantages too, because a better exploration of Microgeneration becomes possible, using all the energy produced and all of the intermittent energies (renewable energies that depend upon the weather conditions) potential, therefore it is also possible to install a huge number of Microgenerators and the restrictions imposed by the distribution network to the number of Microgenerators installed are no longer necessary.

Agradecimentos

Ao meu orientador, Professor Doutor João Abel Peças Lopes, pela confiança depositada em mim, por toda a disponibilidade que sempre demonstrou, pelas críticas e opiniões dadas sempre no intuito de um melhoramento deste trabalho.

Aos meus Pais e Irmã pelo apoio e confiança que depositaram em mim ao longo de todo este percurso e pelas oportunidades e desafios que sempre me proporcionaram para aprender e chegar mais longe.

À Ana pelo apoio incondicional que me deu em todos os momentos, por acreditar sempre em mim e pela disponibilidade sempre presente em me ajudar no que quer que fosse.

A todos os meus amigos que me apoiaram e apoiam sempre, alguns dos quais partilharam também comigo esta fase final do curso.

Índice

Resumo	i
Abstract.....	iii
Agradecimentos	v
Índice.....	vii
Lista de figuras	ix
Lista de tabelas	xi
Abreviaturas e Símbolos	xiii
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 - Motivação.....	1
1.2 - Estrutura do documento	4
Capítulo 2	5
Estado da Arte.....	5
2.1 - Microrede.....	5
2.1.1 -Conceito e estrutura.....	5
2.1.2 -Modos de controlo.....	7
2.1.3 -Controlo de Tensão/Potência Reactiva e de Frequência/Potência Activa.....	8
2.1.4 -Corte de Produção.....	9
2.1.5 - <i>On load tap changing</i> (OLTC).....	11
2.2 - Problema da elevada penetração de Microgeração	12
2.3 - Sistemas de armazenamento.....	13
2.3.1 -Baterias.....	13
2.3.2 - <i>Flywheel</i>	14
2.3.3 - <i>Ultracapacitors</i> /Ultracondensadores.....	15
2.3.4 -Hidrogénio.....	15
2.3.5 - <i>Compressed Air Energy Storage</i> (CAES).....	16
2.3.6 - <i>Plug in Hybrid Vehicles</i> (PHEV).....	16
2.3.7 -Sistemas de armazenamento mais adequados no problema em questão.....	17
2.4 - Sistema fotovoltaico.....	18
2.4.1 -Conceito e estrutura.....	18
2.4.2 -Influência da temperatura e da radiação solar.....	19

Capítulo 3	21
Formulação do problema e metodologia de resolução.....	21
3.1 - Rede.....	21
3.2 - Formulação do problema de optimização	23
3.3 - Metodologia para resolução do problema	24
Capítulo 4	31
Resultados	31
4.1 - Análise e comparação de resultados	31
4.1.1 -Versão 1.....	31
4.1.2 -Versão 2.....	34
4.1.3 -Versão 3.....	37
4.2 - Conclusão.....	40
Capítulo 5	43
Conclusão	43
Referências	46

Lista de figuras

Figura 1.1 - Evolução da potência total instalada em renováveis e da potência fotovoltaica instalada. Adaptado de [3]	2
Figura 1.2 - Dados estatísticos do registo de unidades de Microprodução em Portugal Continental [4].....	3
Figura 1.3 - Previsões de produção energética e contributo de fontes renováveis nos países da IEA [5]	3
Figura 2.1 - Esquema de uma Microrede com possíveis constituintes	6
Figura 2.2 - Princípio de controlo proporcional de frequência/potência activa [8]	7
Figura 2.3 - Princípios de controlo esquematizados para o controlo de frequência/potência activa e controlo de tensão/potência reactiva respectivamente [8].....	9
Figura 2.4 - Representação da função da potência que é ligada á rede em ordem ao valor da tensão. Adaptado de [12]	10
Figura 2.5 - Exemplo de uma ligação da Microrede ao PT	12
Figura 2.6 - Curvas características I(V) e P(V) de uma célula fotovoltaica	18
Figura 2.7 - Radiação solar típica diária [19]	19
Figura 2.8 - Curvas representantes da variação da corrente de curto-circuito e da tensão em função da variação da radiação solar e da temperatura respectivamente [19]	20
Figura 3.1 - Rede de baixa tensão	22
Figura 4.1 - Curvas da potência gerada, consumida e consumida mais a potência necessária da bateria considerando a potência constante	33
Figura 4.2 - Curvas da potência gerada, consumida e consumida mais a potência necessária da bateria considerando a potência variável.....	34
Figura 4.3 - Curvas da potência gerada, consumida e consumida mais a potência necessária da bateria considerando a potência constante	36
Figura 4.4 - Curvas da potência gerada, consumida e consumida mais a potência necessária da bateria considerando a potência variável.....	37

Figura 4.5 - Curva da tensão em cada nó da rede	37
Figura 4.6 - Curvas da potência gerada, consumida e consumida mais a potência necessária da bateria considerando a potência constante	40
Figura 4.7 - Curvas da potência gerada, consumida e consumida mais a potência necessária da bateria considerando a potência variável	40

Lista de tabelas

Tabela 3.1 – Características das linhas.....	22
Tabela 4.1 – Potência activa horária gerada (MW).....	31
Tabela 4.2 – Potência activa horária consumida (MW)	32
Tabela 4.3 – Potência reactiva horária consumida (MVA _r)	32
Tabela 4.4 – Potências horárias necessárias (MW)	33
Tabela 4.5 – Potência activa horária gerada (MW).....	34
Tabela 4.6 – Potência activa horária consumida (MW)	35
Tabela 4.7 – Potência reactiva horária consumida (MVA _r)	35
Tabela 4.8 – Potências horárias necessárias (MW)	36
Tabela 4.9 – Potência activa horária gerada (MW).....	38
Tabela 4.10 – Potência activa horária consumida (MW)	38
Tabela 4.11 – Potência reactiva horária consumida (MVA _r)	39
Tabela 4.12 – Potências horárias necessárias (MW).....	39

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas

AC	<i>Alternating Current</i> (Corrente Alternada)
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
CAES	<i>Compressed Air Energy Storage</i>
DC	<i>Direct Current</i> (Corrente Contínua)
DMS	<i>Distribution Management System</i>
DVR	<i>Dynamic Voltage Restorer</i>
EPSO	<i>Evolutionary Particle Swarm Optimization</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
LC	<i>Load Controller</i>
MGCC	<i>MicroGrid Central Controller</i>
MC	<i>Microsourcer Controller</i>
MT	Média Tensão
OLTC	<i>On Load Tap Changing</i>
PHEV	<i>Plug in Hybrid Vehicle</i>
P	Potência Activa
PT	Posto de Transformação
Q	Potência Reactiva
STC	<i>Standard Test Conditions</i>
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i>
USI	<i>Voltage Source Inverter</i>
V2G	<i>Vehicle to Grid</i>
V2H	<i>Vehicle to Home</i>

Lista de símbolos

μ	Micro
ω	Frequência angular
CO ₂	Dióxido de Carbono
F	Faraday
Hz	Hertz
k	Kilo
M	Mega
p.u.	Sistema de Medida por Unidade
rpm	Rotações por Minuto
W	Watt

Capítulo 1

Introdução

Ao longo desta Dissertação serão explorados alguns aspectos relativos à Microgeração e ao armazenamento e distribuição em redes de Baixa Tensão, considerando especificamente os problemas devidos à elevada penetração de Microgeração. Neste primeiro capítulo, procederemos à contextualização e apresentação do problema que motivou a presente dissertação e dos principais objectivos que a estruturaram. O capítulo introdutório contemplará, ainda, a apresentação da estrutura do trabalho, com uma descrição sucinta dos capítulos que o compõem.

1.1 - Motivação

O paradigma da geração de energia eléctrica baseou-se, durante um longo período de tempo, exclusivamente na utilização das grandes centrais produtoras de energia eléctrica (nomeadamente as centrais térmicas, hídricas, de biomassa, entre outras) que era depois transmitida através de linhas de Alta Tensão ao longo de grandes distâncias e, posteriormente, distribuída aos consumidores na tensão adequada para consumo. Este paradigma tem, ao longo dos últimos anos, sofrido algumas alterações, integrando um novo conceito de produção descentralizada de energia eléctrica de pequenas potências, utilizando recursos renováveis ou tecnologias de geração eficiente. Nos últimos anos tem-se assistido à extensão deste conceito de produção distribuída de electricidade até às redes de BT, onde unidades geradoras de muito pequena potência designadas por Microgeradores são ligadas às redes eléctricas locais. A energia produzida através de Microgeração, com recurso a geradores eléctricos situados junto ou nas proximidades do(s) consumidor(es), contrapõe-se às formas convencionais de geração centralizada, e passa a designar-se de Produção Distribuída, estando a energia produzida directamente ligada à rede de distribuição.

A Microgeração comporta vantagens tanto a nível económico como ambiental, na medida em que contribui para uma redução da factura energética nacional e da dependência energética internacional, bem como para uma redução das emissões de CO₂ e consequentemente da pegada ecológica da sociedade, aumentando a eficiência energética (consequência da diminuição das perdas nas linhas de Baixa Tensão, devida à maior

2 Introdução

proximidade entre a geração de energia e o consumidor) e permitindo a diminuição de espaços exclusivamente utilizados para a produção de energia. Desta forma, a Microgeração, especificamente quando se reporta à utilização de energias renováveis, contribui também para o cumprimento do compromisso assumido por Portugal no Protocolo de Quioto relativamente à redução das emissões de CO₂ e ao aumento da utilização das fontes energéticas renováveis (tendo sido definida, para Portugal, uma quota de 39% de consumo bruto de electricidade produzida a partir de fontes renováveis até 2010 [1]). Neste contexto, as políticas europeias e nacionais têm integrado medidas de incentivo à produção eléctrica por intermédio de unidades de Microprodução, tornando-se os consumidores domésticos ou empresariais simultaneamente produtores de energia eléctrica que é vendida ao operador da rede eléctrica e distribuída na rede.

Efectivamente, como consequência da evolução tecnológica e das políticas ambientais, tem-se assistido, nos últimos anos, a um aumento crescente do volume da potência instalada recorrendo a sistemas de conversão de energia renovável em electricidade, como é descrito na figura 1.1. Este aumento apresenta-se particularmente significativo no que se refere à potência eólica instalada, mas também relevante na potência fotovoltaica instalada que, apesar de menos notória quando comparada com as restantes, regista uma taxa de crescimento média anual de 83,2%, entre 2002 e 2009 [1]. Uma análise de maior pormenor aos valores de potência fotovoltaica instalada nesse período de tempo permite verificar a existência de um crescimento mais acentuado especificamente entre 2007 e Março de 2010, o que coincide com a entrada em vigor do Decreto-Lei nº 363/2007, de 2 de Novembro, que estabelece o regime jurídico aplicável à produção de electricidade por intermédio de unidades de Microprodução. Confirma-se, aliás, pela análise da figura 1.2 e conforme dados disponibilizados pelo Programa Renováveis na Hora [2], um número muito significativo de registos de unidades de Microprodução efectuados em Portugal, especificamente entre 2008 e 2009.

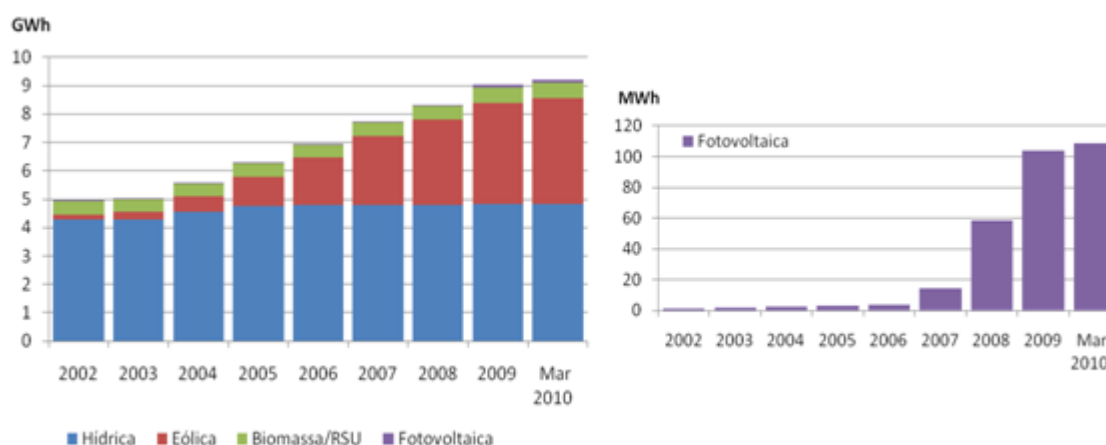


Figura 1.1 - Evolução da potência total instalada em renováveis e da potência fotovoltaica instalada. Adaptado de [3]

Dados estatísticos Microprodução – 2009-07-13					
Fase	Data	Registos Efectuados		Registos Pagos	
		Qtd	Potência (kW)	Qtd	Potência (kW)
1ª	02-04-2008	657	2261	374	1307
2ª	05-05-2008	700	2263	395	1369
3ª	09-06-2008	641	2164	365	1271
4ª	07-07-2008	766	2701	394	1390
5ª	09-09-2008	581	1990	342	1163
6ª	02-10-2008	777	2657	486	1692
7ª	29-10-2008	817	2817	453	1561
8ª	27-11-2008	829	2918	436	1544
9ª	21-01-2009	816	2867	493	1734
10ª	17-02-2009	754	2656	467	1664
11ª	07-04-2009	1093	3885	744	2655
12ª	05-06-2009	980	3488	424	1495
13ª	10-07-2009	916	3256	0	0
Total		10327	35923	5373	18845

Figura 1.2 - Dados estatísticos do registo de unidades de Microprodução em Portugal Continental [4]

Se as tendências verificadas nos últimos anos se mantiverem e se se comprovarem as previsões apresentadas pela IEA e representadas na figura 1.3, assistiremos, nos próximos anos, a um aumento exponencial da utilização de fontes renováveis para a geração de energia, particularmente expressivo no que se refere à geração de energia fotovoltaica, consequência, também, do crescimento da Microgeração.

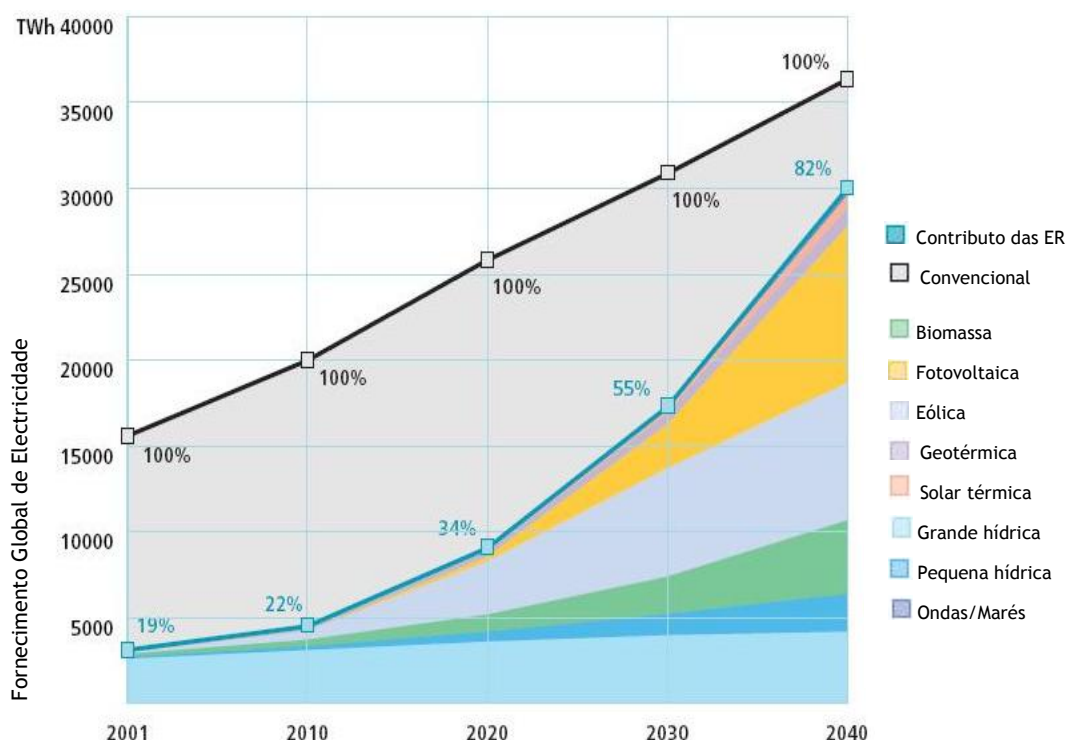


Figura 1.3 - Previsões de produção energética e contributo de fontes renováveis nos países da IEA [5]

A ligação da Microgeração às redes de Baixa Tensão, criando Microredes, desempenhará, portanto, no futuro um papel muito importante nas redes de distribuição. Contudo, uma elevada penetração de Microgeração pode conduzir a problemas técnicos, nomeadamente

sobretensões, semelhantes aos que ocorrem quando se verifica grande penetração de Geração Distribuída em redes de Média Tensão [6].

O presente trabalho partiu da revisão das soluções já propostas para o problema em questão (que serão desenvolvidas no Capítulo 2) e procura propor uma nova solução que garanta que os níveis de tensão em redes de distribuição de BT em que existe uma grande penetração de Microgeração se mantenham entre os limites tecnicamente admissíveis, procurando tirar maior partido das potencialidades associadas à Microgeração e às Microredes.

1.2 - Estrutura do documento

O presente documento irá estruturar-se em cinco capítulos, no primeiro dos quais se realizou uma breve introdução ao trabalho desenvolvido, procurando, essencialmente, esclarecer a motivação que esteve associada à sua elaboração e contextualizando, em linhas gerais, o problema estruturante da mesma.

No segundo capítulo, intitulado de Estado da Arte, procuram-se rever os principais conceitos relevantes para a compreensão do problema em estudo, centrando-nos especificamente na apresentação do conceito, da estrutura e dos modos de funcionamento e de operação das Microredes e referenciando também os principais problemas decorrentes da elevada penetração de Microgeração em redes de Baixa Tensão, bem como as soluções actualmente existentes/utilizadas. Embora existam vários tipos de Microgeradores, desenvolvem-se apenas os conteúdos relativos aos sistemas fotovoltaicos, uma vez que na presente dissertação se considerou unicamente este tipo de Microgeração.

O terceiro capítulo, por sua vez, contempla a formulação do problema e a metodologia de resolução, procedendo-se, portanto, à apresentação da formulação matemática do problema e à explicação do processo que se propôs para a resolução do mesmo, explicando pormenorizadamente cada passo da metodologia adoptada.

No quarto capítulo são apresentados e discutidos os principais resultados obtidos pela aplicação da metodologia de resolução previamente apresentada no terceiro capítulo, considerando três cenários diferentes, cuja apresentação e explicação são realizadas neste capítulo e relativamente aos quais se apresentam as principais conclusões.

No quinto e último capítulo debatem-se, em linhas gerais, os resultados obtidos e as principais conclusões que decorrem de todo o trabalho desenvolvido, contemplando os objectivos que o estruturaram e explorando as potenciais implicações deste trabalho no futuro das Microredes e da Microgeração e na investigação a desenvolver neste contexto.

Capítulo 2

Estado da Arte

Neste capítulo, procederemos à revisão dos principais conceitos relevantes para a compreensão do problema em estudo, centrando-nos especificamente na apresentação do conceito, da estrutura e dos modos de funcionamento e de operação das Microredes (desenvolvendo, especificamente, os modos de controlo e as soluções de controlo mais utilizadas actualmente). Os principais problemas decorrentes da elevada penetração de Microgeração em redes de Baixa Tensão, bem como as soluções actualmente existentes/utilizadas serão também apresentados neste capítulo. Por fim, serão apresentados alguns sistemas de armazenamento existentes e desenvolvidos alguns conteúdos relativos ao conceito e estrutura do sistema fotovoltaico (uma vez que este foi o tipo de Microgeração considerado neste estudo).

2.1 - Microrede

2.1.1 - Conceito e estrutura

O conceito de Microrede [7] e [8] está associado à ligação de unidades de Microgeração (pequenos sistemas de geração modular) a uma rede de distribuição de Baixa Tensão que inclui uma infraestrutura de comunicação e uma estrutura de controlo responsáveis pela gestão e pelo controlo, tanto das pequenas unidades de geração como das cargas. O conceito de Microrede implica, igualmente, a proximidade física entre a carga e a geração, no pressuposto de que os habituais consumidores possam ser, simultaneamente, produtores de energia. Actualmente, existem vários sistemas de Microgeração de alta eficiência que utilizam diferentes tipos de energia, como a energia fóssil (utilizada, por exemplo, nas pilhas de combustível) ou energias renováveis, nomeadamente a energia eólica ou fotovoltaica (utilizando aerogeradores ou painéis fotovoltaicos, respectivamente).

A figura 2.1 que se apresenta em seguida representa uma Microrede onde são visíveis todos os seus componentes, nomeadamente os vários tipos de Microgeradores possíveis, as cargas e os dispositivos de controlo e de gestão de rede. A figura ilustra, também, a ligação desta rede de distribuição de Baixa Tensão a uma rede de Media Tensão, através de um

transformador. O controlo e a gestão da rede são realizados por um controlador central de Microrede (*MicroGrid Central Controller - MGCC*), bem como por controladores de microfonte (*Microsource Controller - MC*) e controladores de carga (*Load Controller - LC*) que, para uma correcta operação do sistema, têm que pertencer a uma estrutura de comunicações que os liga entre si. O controlador central de Microrede é instalado no barramento BT da subestação MT/BT e potencia uma gestão adequada a nível técnico e económico, enviando *set-points* para os controladores LCs e MCs e estabelecendo comunicação para montante com os sistemas DMS (*Distribution Management System*). Por sua vez, os controladores LCs e MCs, posicionados num segundo nível hierárquico de controlo, constituem interfaces para o controlo de algumas cargas numa perspectiva de interruptibilidade (LCs) e para o controlo dos microgeradores nos seus níveis de potência activa e reactiva (MCs).

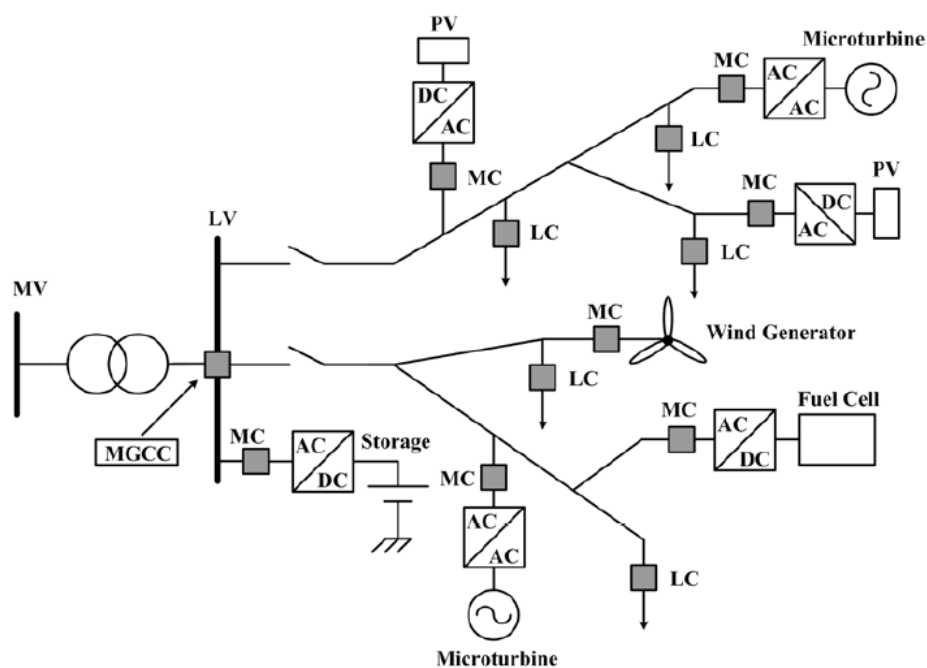


Figura 2.1 - Esquema de uma Microrede com possíveis constituintes

A Microrede pode funcionar em dois modos distintos [7] e [8]: Modo Normal Interligado ou Modo de Emergência. No Modo Normal Interligado, a Microrede está ligada à rede de Média Tensão, sendo alimentada total ou parcialmente por esta ou havendo injeção de potência na própria rede MT quando a potência gerada é superior à consumida na Microrede. Neste modo de funcionamento, o MGCC mantém um interface com os LCs, MCs e DMS de modo a efectuar um conjunto de operações, incluindo: a previsão de consumo e de geração, o despacho económico da Microgeração, as funções de DMS e a avaliação da segurança de exploração. No modo de Emergência, que actua em condições excepcionais de operação da rede, nomeadamente aquando da ocorrência de um defeito na rede MT, a Microrede deverá conseguir funcionar em rede isolada, operando assim de forma autónoma. Entrando este modo em funcionamento, ocorre uma mudança para um estado de ajuste de produção para controlo de frequência em rede isolada passando a verificar-se um controlo primário relativamente aos LCs e MCs e um controlo secundário referente ao MGCC que deve possuir informação relativa às cargas do sistema, com o intuito de, se necessário, interromper

algumas cargas e controlar o uso de baterias e *flywheels* disponíveis, devendo também possibilitar acções de *black start*.

A ligação dos Microgeradores à rede é usualmente feita recorrendo a sistemas de electrónica de potência - os inversores. Os inversores são necessários porque os Microgeradores actualmente existentes não estão capacitados para se ligarem directamente à rede, uma vez que geram energia em corrente contínua (como acontece, por exemplo, com as células de combustível ou os painéis fotovoltaicos) ou em corrente sinusoidal mas a altas frequências (acima da frequência da rede que é 50Hz, como é o caso, por exemplo, da produção de energia nas microturbinas a gás), tornando-se necessária a ligação de um inversor DC/AC ou conversor AC/DC/AC respectivamente, entre os Microgeradores e a rede.

2.1.2 -Modos de controlo

Uma parte muito importante de uma Microrede é o controlo dos Microgeradores, isto é, o controlo de todos os Microgeradores em cada momento e situação, realizado por controladores cujas entradas são a tensão no barramento local e a potência de saída. Uma vez que não existe necessidade de comunicação entre os Microgeradores, torna-se mais fácil a integração de novas unidades de Microgeração, não sendo necessário modificar toda uma estrutura já existente.

O controlo dos Microgeradores [8-10], no que se refere à operação dos inversores, pode ser feito de duas maneiras: controlo PQ ou controlo Fonte Controlada de Tensão. No método controlo PQ, a tensão de saída está permanentemente em sincronismo com a rede e há um controlo de amplitude e fase da corrente de saída, com o intuito de serem cumpridos os *set-points* (para a potência activa e reactiva) em que se baseia este tipo de inversor. Relativamente ao *set-point* para potência reactiva, ele pode, neste tipo de inversor, ser substituído pela opção de trabalhar com factor de potência unitário. Já no método Fonte Controlada de Tensão utiliza-se um inversor Fonte de Tensão (*Voltage Source Inverter - VSI*) que actua com base em valores de tensão e frequência previamente definidos. Na figura seguinte representa-se o princípio de controlo proporcional de frequência/potência activa para uma melhor compreensão deste método:

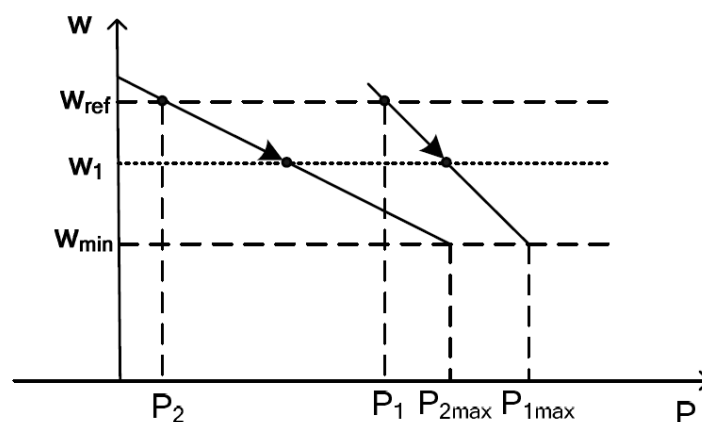


Figura 2.2 - Princípio de controlo proporcional de frequência/potência activa [8]

A figura 2.2 é relativa a dois VSIs a funcionar em paralelo, considerando que os dois Microgeradores, interligados com a rede BT, têm potências diferentes, designadas por P_{1max} e P_{2max} . As potências P_1 e P_2 despachadas para a rede BT estão definidas para uma frequência de base ou de referência W_{ref} . Então, após uma alteração no consumo e considerando que a Microrede passou a funcionar em rede isolada, as suas frequências passam a ser diferentes de acordo com as suas características. Quando isto acontece, as frequências tendem a convergir para um único valor comum às duas (ω_1) e assim atinge-se um novo equilíbrio entre a geração e o consumo. Apesar da potência ser ajustada para um valor estável em fracções de segundos, o mesmo não acontece com a frequência, porque a característica do *droop* da Microrede decresce, sendo, por isso, necessário incluir uma função de restauração da frequência adequada em cada Microgerador ligado à rede [8] e [10].

Se a Microrede estiver a funcionar em Modo Normal Interligado, todos os inversores podem estar a operar com um controlo do tipo PQ, porque a própria rede funciona como uma referência de tensão e frequência. No entanto, se a Microrede estiver a funcionar autonomamente e não existir nela uma máquina síncrona (já que se existisse teríamos as condições necessárias para que os inversores pudessem continuar com um controlo PQ, uma vez que esta constituiria uma referência de frequência e tensão), os inversores não funcionarão da melhor forma, porque perderão a tensão e a frequência de referência. É então necessária uma solução que garanta que o funcionamento da Microrede, ao passar de Modo Normal Interligado a Modo de Emergência, se mantenha estável e sem falhas, mesmo que seja necessário desligar cargas com um grau de prioridade inferior (*load shedding*). Se forem utilizados os dois métodos descritos anteriormente (Controlo PQ e Controlo Fonte Controlada de Tensão) é possível assegurar uma passagem entre o Modo Normal Interligado e o Modo de Emergência, optando por uma de duas estratégias de controlo: a Operação “Gerador Principal” (*Single Master Operation*) ou a Operação “Vários Geradores” (*Multi Master Operation*). No *Single Master Operation* teremos, por assim dizer, um gerador de referência, ou seja, quando a ligação à rede estiver desligada (funcionamento em Modo de Emergência), utilizamos um inversor a funcionar no modo VSI, com o intuito de poder usar a sua tensão como referência, permitindo que todos os outros inversores funcionem em modo de controlo PQ. Na estratégia *Multi Master Operation*, mais do que um inversor ou mesmo todos os inversores podem funcionar no modo VSI. Considerando os dois modos de operação possíveis podemos portanto constatar que, para assegurar um funcionamento seguro, é sempre necessário que no mínimo um inversor esteja a funcionar no modo VSI, para que a Microrede e todos os Microgeradores tenham uma referência, uma vez que, neste modo, o inversor tem capacidade para funcionar apenas com as informações definidas previamente no próprio inversor, mesmo quando existe deslastre de cargas [11].

2.1.3 -Controlo de Tensão/Potência Reactiva e de Frequência/Potência Activa

Tal como é explicado em [8], o controlo de tensão e de frequência é feito com base num *droop* de tensão e num *droop* de frequência, respectivamente. Na figura 2.3 são representados os princípios de controlo em que se baseiam estes dois controlos. O inversor em modo VSI mede a tensão entre fases no local onde está ligado e esse valor é comparado com o valor nominal, sendo o erro resultante dessa comparação aplicado à fórmula do *droop* de tensão, para se saber o valor da potência reactiva a injectar ou absorver na/da rede. Esse

droop de tensão é normalmente expresso em percentagem e calculado pela seguinte equação:

$$R_V = \frac{\Delta u(p.u.)}{\Delta Q(p.u.)} * 100\% , \quad (2.1)$$

onde R_V é o *droop* de tensão que é igual à variação de tensão (Δu) a dividir pela variação de potência reactiva (ΔQ) multiplicado por 100%.

Quando existe um aumento de tensão, o inversor absorve potência reactiva da rede; se a tensão for inferior ao valor de referência, então é injectada potência reactiva na rede. A tensão de referência (u_0) representada na figura 2.3 é igual ao valor de tensão quando o consumo ou injeção de potência reactiva é nulo. Esta filosofia de controlo não é contudo muito eficaz em redes onde a resistência domina largamente sobre o valor da reactância, como a seguir se explica.

Relativamente ao controlo de frequência, este tem um funcionamento semelhante ao controlo de tensão, ou seja, se a frequência aumentar, é absorvida potência activa da rede, enquanto que se por sua vez o valor da frequência diminuir, é injectada potência activa na rede. O *droop* de frequência é dado por:

$$R_f = \frac{\Delta f(p.u.)}{\Delta P(p.u.)} * 100\% , \quad (2.2)$$

onde R_f (*droop* de frequência) é igual à variação da frequência (Δf) em relação ao valor de referência, a dividir pela variação da potência activa (ΔP) e a multiplicar por 100%.

O valor f_0 corresponde ao valor da frequência quando o valor da potência activa injectada ou absorvida é nulo.

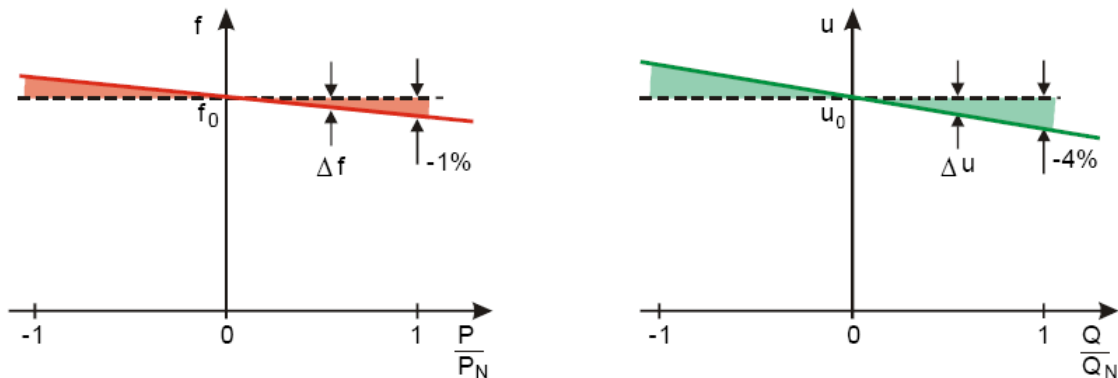


Figura 2.3 - Princípios de controlo esquematizados para o controlo de frequência/potência activa e controlo de tensão/potência reactiva respectivamente [8]

2.1.4 - Corte de Produção

O Corte de Produção, *Power Curtailment* na literatura anglo-saxónica, igualmente designado de *generation shedding*, é também um método de controlo de tensão, geralmente utilizado quando os outros métodos se revelam ineficazes na manutenção da tensão dentro dos limites aceitáveis. Este método permite, então, evitar o aumento da tensão para níveis que se posicionam fora dos limites aceitáveis, limitando a geração de potência activa

entregue à rede, sempre que ocorrem sobretensões consideráveis. Sempre que ocorrem aumentos de tensão que ultrapassam os limites técnicos admissíveis, a potência gerada é gradualmente reduzida, o que resulta também em perdas na produção de energia. Neste tipo de controlo [12], é definido um limite de tensão (que é designado por U_c) a partir do qual o sistema começa a reduzir a potência gerada. Uma vez ultrapassado este limite de tensão, é desejável que a redução de potência gerada não permita que seja atingido um valor de tensão máximo (U_{max}), pois caso esse valor seja ultrapassado, a potência gerada terá um valor igual a zero.

Com base no modelo que foi descrito até ao momento é então possível definir vários intervalos de tensão que correspondem aos possíveis níveis de tensão, para os quais será definida a potência gerada e ligada à rede em cada intervalo. Quando o valor de tensão é superior a $U_{máx}$, a potência gerada é totalmente cortada, sendo assim igual a zero e o mesmo acontece quando a tensão é inferior ao valor mínimo definido (U_{min}). Quando a tensão se encontra entre $U_{máx}$ e o valor U_c , o valor da potência ligada à rede segue uma função que é definida em (2.4). Se a tensão estiver compreendida entre o U_{min} e U_c , a potência entregue à rede é a potência máxima que o aparelho é capaz de gerar naquele momento. Para uma melhor compreensão, os intervalos de tensão e os valores de potência entregues à rede pelas unidades de Microgeração e associados aos primeiros são apresentados nas equações (2.3) a (2.6).

$$U > U_{max} \Rightarrow P = 0 , \quad (2.3)$$

$$U_{máx} > U > U_c \Rightarrow P = \frac{U_{máx}-U}{U_{máx}-U_c} P_{max} , \quad (2.4)$$

$$U_c > U > U_{min} \Rightarrow P = P_{máx} , \quad (2.5)$$

$$U_{min} > U \Rightarrow P = 0 . \quad (2.6)$$

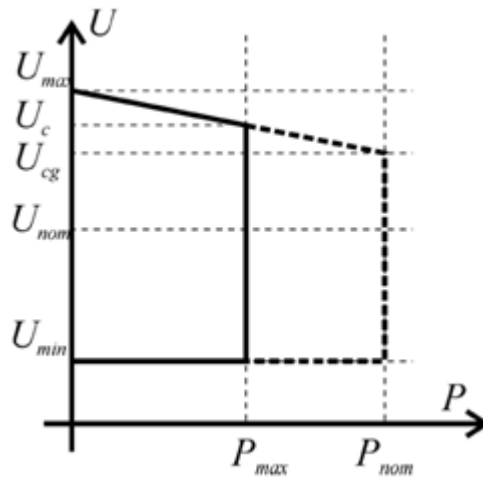


Figura 2.4 - Representação da função da potência que é ligada à rede em ordem ao valor da tensão. Adaptado de [12]

A figura 2.4, que se apresenta na página anterior para uma mais fácil compreensão do processo em questão, representa uma função da potência (P) ligada à rede em ordem ao valor da tensão (U), onde $P_{\text{máx}}$ e P_{nom} são as potências máxima e nominal entregues à rede, P é a potência entregue à rede, U_{nom} é a tensão nominal e U_{cg} é a tensão máxima correspondente a um valor de produção que é igual à potência nominal do conjunto de geração.

Actualmente, existem indicações para que num dado ponto da rede a tensão não possa exceder, no pior dos casos, um determinado valor (tipicamente entre 2% a 5% da tensão) definido em consequência da geração local. Como tal, esta medida implica que a quantidade de microgeração que pode ser instalada e ligada à rede de distribuição seja limitada, o que condiciona, por isso, o aproveitamento de todas as capacidades de microgeração disponíveis numa dada área e limita as possibilidades de instalação de unidades de microgeração. O método de corte de produção que se apresentou anteriormente pode, no entanto, contribuir para a resolução dos problemas identificados, uma vez que aplicando este tipo de controlo, a tensão não irá ser superior ao valor máximo definido, porque quando ocorra um aumento de tensão, a potência gerada entregue à rede irá ser reduzida. Consequentemente, ele possibilitará a instalação de um número muito superior de unidades de microgeração, relativamente àquele que é possível/permitido sem este tipo de controlo, em consequência dos problemas de sobretensão que se associam à elevada penetração de microgeração.

2.1.5 - *On load tap changing* (OLTC)

As estratégias de controlo de tensão tradicionais nas redes de distribuição MT recorrem ao controlo das tomadas dos transformadores com regulação em carga AT/MT (designados de OLTC na literatura anglo-saxónica). O seu funcionamento baseia-se tanto na regulação da tensão num único barramento como na compensação de uma quebra de tensão numa linha particular. Ambas as estratégias assentam em medidas locais e são adequadas para os sistemas de distribuição tradicionais com trânsito de potência unidireccional, o que poderia conduzir a problemas nas redes de distribuição com trânsito de potência bidireccional (redes que incluem geração distribuída) [13]. No entanto, as estratégias de controlo OLTC baseadas em medidas de vários locais da rede procedem à regulação da tensão a partir da medida de tensão do barramento que apresenta o problema de sobretensão mais severo, o que permite aumentar o nível máximo de penetração de geração distribuída [13].

Considerando estas últimas estratégias, o funcionamento do OLTC parte de uma análise das condições de tensão actuais da rede, identificando e medindo o valor de tensão no barramento que apresenta o maior problema de sobretensão. O valor resultante (V_t) é comparado com um valor de tensão de referência (V_{ref}) que normalmente é definido como 1p.u., resultando da diferença entre ambos um valor de erro de tensão (V_{erro}), dado pela equação (2.7).

$$V_{\text{erro}} = V_{\text{ref}} - V_t \quad (2.7)$$

É então verificado se este valor de erro se encontra dentro ou fora do intervalo admissível e esta informação é comparada com o mesmo tipo de informação relativa ao momento anterior, com o intuito de monitorizar as variações de tensão no barramento. A duração do

erro de tensão (quando este se posiciona fora do intervalo admissível) é contabilizada, informação que é apagada quando o V_{erro} flutua acima ou abaixo de um dos limites do intervalo, quando o sinal do V_{erro} muda ou ainda quando o V_{erro} se encontra dentro dos limites. O valor de duração do erro é comparado com um valor de atraso (*time delay*) definido para a rede em questão e a acção de controlo inicia-se apenas se a duração do erro for igual ou superior ao valor de atraso definido. Isto assegura que não ocorra uma activação do controlo, nos casos em que se registam variações de tensão instantâneas. A activação de controlo implica que a tomada do transformador (*tap*) seja alterada para valores superiores ou inferiores, conforme o erro e segundo a equação (2.8)

$$n_i = n_{i-1} + u * \Delta n , \quad (2.8)$$

onde n_i e n_{i-1} são o rácio da tomada do transformador neste momento e no momento anterior, respectivamente; Δn é a variação necessária; e u é o factor que define o se o rácio aumenta ($u=+1$), diminui ($u=-1$) ou se mantém inalterado ($u=0$).

2.2 - Problema da elevada penetração de Microgeração

Como foi referido anteriormente, ao existir uma elevada penetração de Microgeração, a potência produzida pode ser superior à potência consumida na Microrede, o que faz com que a potência excedente seja injectada na rede de MT, conduzindo à ocorrência de sobretensões, como iremos explicar em seguida.

Apresenta-se em seguida uma figura que nos ajudará a compreender o porquê do aparecimento das sobretensões e que representa a ligação da Microrede à linha de MT.

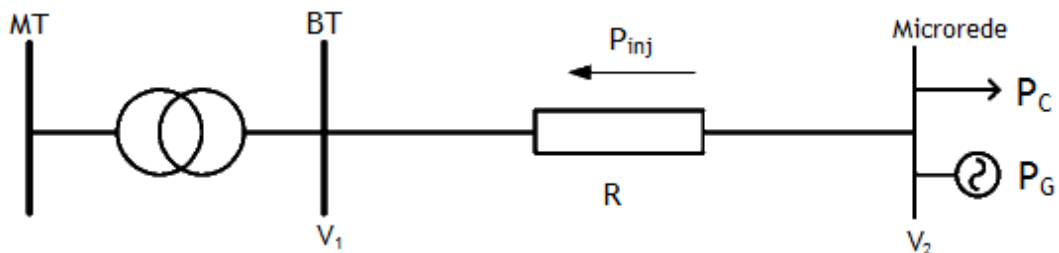


Figura 2.5 - Exemplo de uma ligação da Microrede ao PT

Nas Microredes, o valor da resistência das linhas é muito superior ao valor da reactância da linha ($R \gg X$), pelo que, por simplificação, podemos considerar apenas o valor da

resistência. Então, considerando que existe mais produção do que consumo, vai ser injectada na rede MT potência; esta potência injectada designa-se na figura por P_{inj} , sendo V_1 e V_2 as tensões da rede BT junto ao PT (posto de transformação) e da Microrede, respectivamente; e R a resistência da linha. A equação resultante do trânsito de potências é:

$$P_{inj} = \frac{V_2^2}{R} - \frac{V_2 V_1}{R} \cos(\delta) , \quad (2.9)$$

onde P_{inj} , V_1 , V_2 e R têm o significado referido anteriormente e δ é o ângulo entre V_1 e V_2 .

Analisando esta equação, verificamos que, para que exista uma injeção de potência na rede MT proveniente da Microrede, é necessário que P_{inj} seja positivo e, para isso acontecer, a V_2 tem que ser maior do que V_1 , ou seja, a tensão na Microrede terá que ser maior do que a tensão no barramento de baixa tensão do PT. Então, quando existe uma grande penetração de Microgeração e conseqüentemente uma grande injeção de potência na rede MT devido a um excesso de produção relativamente ao consumo, as tensões na Microrede vão aumentar significativamente, ocorrendo assim sobretensões. Sabe-se que o já referido controlo de tensão/potência reactiva não é suficiente para resolver este problema e por isso têm vindo a ser estudadas soluções alternativas para o resolver [6]. Uma das soluções que tem vindo a ser estudada, em situações em que existe um aumento de tensão por estes motivos, é, conforme já referido anteriormente, desligar-se alguma geração de forma a que as tensões baixem para um valor aceitável. Esta opção, apesar de ser uma solução para o problema, faz com que alguma energia seja desaproveitada e conseqüentemente não se possam explorar ao máximo as potencialidades da Microgeração. Apesar de esta ser, até ao momento, a solução mais viável, tem sido desenvolvida investigação sobre ela, procurando minimizar o valor da energia que é desligada da Microrede, como documenta o artigo [6].

2.3 - Sistemas de armazenamento

2.3.1 -Baterias

A bateria é um sistema que pode armazenar energia eléctrica através de um processo electroquímico. Uma bateria é constituída por uma ou várias células electrolíticas, cada uma das quais é, por sua vez, constituída por dois eléctrodos, um positivo e um negativo, e por um electrólito que pode ser sólido ou líquido. Quando aplicada uma carga a uma bateria carregada, a corrente fluirá no exterior da bateria, enquanto que no interior, os iões, em cada célula, se deslocam de um eléctrodo para outro, e a bateria é descarregada durante este processo. Esta reacção é reversível, permitindo assim recarregar a bateria, sendo para tal necessário aplicar uma tensão aos terminais da mesma.

Existem vários tipos de baterias [14] e [15], nomeadamente baterias de chumbo-ácido e de níquel-cádmio que se encontram já muito desenvolvidas ou baterias de sódio-enxofre e de iões de lítio que estão ainda em desenvolvimento, sendo, apesar disso, as baterias de iões de lítio as mais comumente utilizadas. Elas diferem não só na sua estrutura e estado de desenvolvimento, mas também na sua capacidade de armazenamento de energia, sendo que as baterias de chumbo-ácido conseguem abranger valores de várias dezenas de MW, enquanto que as baterias de níquel-cádmio podem atingir valores nas dezenas de MW, as baterias de

sódio-enxofre na casa dos MW e, por último, as baterias de íons de lítio que conseguem atingir valores na casa das dezenas de kW.

As baterias constituem, efectivamente, o sistema de armazenamento de energia mais antigo e popular e uma das tecnologias de armazenamento considerada mais eficiente.

2.3.2 -Flywheel

As *Flywheel* (volantes de inércia) constituem um outro sistema que armazena energia através da aceleração de um rotor até altas velocidades, mantendo a energia no sistema como energia de inércia que é libertada através da inversão do processo, utilizando um motor como gerador. A energia é, portanto, transferida para o volante, quando a máquina opera como motor, registando-se uma aceleração do volante que se traduz no carregamento do dispositivo de armazenamento de energia. No momento de descarga, o motor funciona como gerador e o volante vai desacelerando até que, quando pára, o equipamento se considera descarregado. A capacidade de armazenamento de energia dos volantes pode ser melhorada, quer através do aumento do valor do momento de inércia do volante, quer pela sua transformação em maiores velocidades de rotação, quer pelo recurso a ambos os métodos.

Há essencialmente duas tecnologias para o desenvolvimento dos volantes de inércia [14] a [17]. As tecnologias de primeira geração correspondem a uma massa de aço com um raio grande e velocidades de rotação que atingem os cerca de 10 000 rpm, recorrendo a um motor estandardizado como interface de conversão de energia. Muitos destes volantes são comercializados como fontes de alimentação ininterrupta (UPS), constituindo sistemas pesados e de grandes dimensões, com maiores limitações na capacidade de armazenamento de energia a longo-prazo. Estas tecnologias têm evoluído para a produção de volantes com um rotor mais leve que atinge maiores velocidades de rotação (até 100 000 rpm) e que resulta em dispositivos de armazenamento de energia mais leves e compactos que podem ser organizados em designs modulares, em alternativa à utilização de *flywheels* de primeira geração. Este tipo de volantes de inércia é operado, normalmente, em vácuo para eliminar a resistência do ar que origina perdas de rotação e descargas, levantando problemas a nível do armazenamento de energia a longo prazo. A utilização de rolamentos magnéticos contribui, também, para a resolução dos problemas de perdas de rotação e a aplicação destes componentes poderá resultar em volantes de inércia com maior eficiência carga/descarga. Um sistema de bateria com uma *flywheel* tem uma capacidade de armazenamento de energia de cerca de 0.5 kWh até 500 kWh e perde menos de 0.1% da energia acumulada por hora, quando se utilizam chumaceiras magnéticas. Em Microredes, os volantes de inércia podem ser utilizados como sistemas UPS, bem como para o nivelamento da tensão e para o reforço da estabilidade.

Consequentemente, embora uma *flywheel* não permita o armazenamento de energia durante longos períodos de tempo, ela possibilita o fornecimento de energia acumulada muito rapidamente, permitindo atingir potências elevadas, o que constitui uma vantagem da aplicação deste sistema, a par com as suas características ambientais. A utilização dos volantes de inércia apresenta, no entanto, algumas desvantagens [14] a [17], relacionadas com: *i)* a necessidade de conceber o contentor do sistema de forma a resistir em caso de desintegração da *flywheel*; *ii)* a resistência do sistema a diferentes forças, considerando por exemplo o efeito giroscópio da *flywheel*, que é necessária para prevenir qualquer choque,

nomeadamente na sua utilização em transportes; e *iii*) o elevado custo face às tecnologias concorrentes.

2.3.3 -*Ultracapacitors*/Ultracondensadores

Os ultracondensadores têm as mesmas características dos condensadores e das baterias electroquímicas, distinguindo-se apenas pelo facto de não registarem reacções químicas, o que aumenta o seu ciclo de vida. Esta tecnologia armazena energia, acumulando cargas positivas e negativas separadas por material dieléctrico. A energia armazenada num ultracondensador é proporcional à sua capacidade e ao quadrado da tensão aplicada através do dispositivo, podendo a capacidade de armazenamento ser potenciada pelo aumento da capacitância, do nível da tensão ou por ambos. Enquanto que os condensadores tradicionais usam capacidades na ordem dos μF , os supercondensadores podem atingir vários kF , embora possam suportar apenas alguns volts. A capacidade de armazenamento é limitada pela tensão de ruptura do dieléctrico, mas pode ser aumentada através do aumento da área dos eléctrodos, do aumento da permissividade ou da diminuição da distância entre os eléctrodos. A energia obtida é superior à dos condensadores (5Wh/kg ou até 15Wh/kg), a custos muito elevados mas com um tempo de descarga constante melhor, devido à lenta deslocação de iões no electrólito. Os ultracondensadores têm, portanto, uma elevada durabilidade e uma eficiência de 95% e registam 5% de auto-descarga por dia, o que implica uma rápida utilização da energia armazenada [16] e [18].

Esta é uma tecnologia muito utilizada em sistema de distribuição [18] e, especificamente, em situações de baixa energia e elevada potência [14] e [18]. Devido à baixa tensão da célula única, os ultracondensadores são muitas vezes ligados em série, para formar um módulo ultracondensador com tensões específicas. Eles podem ser adicionados ao barramento DC de unidades de motor para melhorar a sua capacidade de condução em períodos de afundamento de tensão. Podem também ser adicionados a um DVR (*Dynamic Voltage Restorer*), dispositivo que tem a capacidade de compensar afundamentos de tensão temporários em sistemas de distribuição, ou funcionar em interface com os barramentos DC de um compensador estático de distribuição (*DStatCom - Distribution Static Compensator*). Em Microredes, os ultracondensadores podem ser utilizados, tanto para aumentar a qualidade da potência, como enquanto módulos de ultracondensadores que são descarregados a uma carga de potências constante de 5kW [15].

Apesar de serem uma tecnologia mais cara, os ultracondensadores apresentam muitas vantagens [15] relacionadas com o facto de: *i*) permitirem uma disponibilidade de potência alargada durante afundamentos de tensão ou interrupções momentâneas; *ii*) poderem ser armazenados completamente descarregados; *iii*) serem facilmente instalados; *iv*) terem um tamanho compacto; e *v*) poderem operar eficazmente em diversos ambientes.

2.3.4 -Hidrogénio

O armazenamento de energia através de Hidrogénio está ainda em desenvolvimento. O hidrogénio pode ser armazenado em gás, em líquido, em hidreto metálico ou numa forma à base de carbono, sendo depois liberado através de uma reacção química, produzindo energia

através de uma célula de combustível. A aplicação de um sistema de armazenamento baseado em hidrogénio inclui um electrolizador que é utilizado para converter a energia eléctrica em hidrogénio, bem como um dispositivo de armazenamento para armazenar o hidrogénio (e assegurar o transporte para um local de utilização final diferente, quando tal se verifique necessário) e uma célula de combustível que, sempre que necessário, assegura a conversão do hidrogénio em electricidade.

As principais vantagens dos sistemas de armazenamento de energia com recurso ao hidrogénio residem [15]: *i*) no seu potencial para implementar sistemas num intervalo alargado de potência (desde um kW até alguns MW); *ii*) na independência das taxas de carga e descarga e na sua capacidade de armazenamento; *iii*) na modularidade; e *iv*) no potencial para fornecer hidrogénio para aplicações de transporte. No entanto, o facto de o seu funcionamento implicar diferentes etapas para a conversão de energia acarreta uma perda de eficiência que constitui a principal desvantagem apontada a este sistema de armazenamento. Em Microredes, os sistemas de armazenamento de hidrogénio podem ser utilizados não só como dispositivos de armazenamento, mas também como um meio que permite o aproveitamento de fontes de energia renováveis intermitentes, ou seja, fontes renováveis que estão dependentes das condições meteorológicas [15].

2.3.5 - *Compressed Air Energy Storage (CAES)*

Os sistemas de ar comprimido para armazenamento de energia fazem uso de um compressor para a pressurização do ar, durante os períodos de baixos consumos de energia eléctrica, armazenando-o em cavernas subterrâneas ou em tanques fabricados. O ar é depois libertado, em horários de maior consumo de energia eléctrica, e usado como combustível para a geração de electricidade a partir de uma turbina de combustão. Tal como sucede com os sistemas de armazenamento baseados em hidrogénio, eles podem ser usados como dispositivos de armazenamento independente ou em conjunto com uma fonte de energia intermitente.

Esta é a única tecnologia comercializada (para além do bombeamento de água) capaz de permitir uma distribuição alargada de energia armazenada em sistemas (acima de 100 MW em tamanhos de unidade) para uso em larga escala [15] e [16]. Efectivamente, as cavernas subterrâneas permitem o armazenamento de grande escala, mas têm a desvantagem óbvia de dependerem de estruturas geológicas. Os tanques fabricados, por outro lado, permitem o armazenamento de energia em níveis mais reduzidos parecendo, no entanto, particularmente adequados para aplicações de Microrede. O armazenamento de energia em pequena escala através de sistemas de ar comprimido, bem como o armazenamento em condições de elevada pressão em cilindros (até 300 bars de estruturas de fibra de carbono) estão ainda em desenvolvimento, parecendo representar uma boa solução para as aplicações de pequena e média escala.

2.3.6 - *Plug in Hybrid Vehicles (PHEV)*

A utilização do PHEV como um dispositivo especial de armazenamento de energia para uma Microrede personalizada tem-se revelado uma ideia promissora, correspondendo também ao conceito de geração de energia *Vehicle to Grid (V2G)*. A carga/descarga temporária do

PHEV de acordo com as necessidades de gestão de energia na Microrede pode facilitar uma resposta adequada da Microrede aos picos de consumo transitórios ou à qualidade da potência da rede. Contudo, o desafio da utilização destes sistemas como tecnologias de armazenamento de energia em Microredes reside na necessidade de ligação destes dispositivos ao sistema, no momento em que são necessários e com flexibilidade de localização, o que implica a incorporação de um sistema de controlo inteligente na Microrede que assegure as cargas e descargas dos PHEV [15]. O controlo “*plug and play*” é um dos exemplos a explorar, principalmente para os PHEVs estacionados que pretendam participar na gestão de energia da Microrede.

2.3.7 -Sistemas de armazenamento mais adequados no problema em questão

Ao longo desta secção foram apresentados diferentes sistemas de armazenamento de energia que podem ser ligados a redes de distribuição, mas é importante referir que nem todos constituem respostas efectivas e adequadas para o problema estruturante deste trabalho. Efectivamente, na solução que se analisa para o problema de ocorrência de sobretensões devidas à elevada penetração de Microgeração nas redes de distribuição, considera-se a instalação de um sistema de armazenamento na Microrede, com o propósito de armazenar a potência excedente em certas horas do dia (em que a produção excede o consumo) e utilizar essa energia mais tarde. Consequentemente, torna-se necessário que o sistema de armazenamento a utilizar tenha capacidade para armazenar a energia durante algumas horas até que esta seja distribuída e que tenha também uma eficiência alta.

Considerando as duas dimensões referidas e as características dos diferentes sistemas de armazenamento analisados, as baterias e os *flywheels* serão os sistemas de armazenamento de energia cuja utilização será mais adequada no contexto em análise. As baterias constituem uma das tecnologias de armazenamento tida como mais eficiente e que permitem o armazenamento de energia por longos períodos de tempo. Os *flywheels*, apesar de não permitirem o armazenamento de energia por períodos de tempo tão longos como aqueles que são alcançados pelas baterias, apresentam tempos de auto-descarga inferiores, por exemplo, aos dos ultracondensadores que representam, também, tecnologias mais caras. No futuro, o *Compressed Air Energy Storage* poderá também constituir uma alternativa viável neste contexto, considerando o facto de permitirem o armazenamento de grandes quantidades de energia durante longos períodos de tempo, mas actualmente esta é ainda uma tecnologia em fase de desenvolvimento.

Considerando as outras tecnologias de armazenamento de energia, o sistema de armazenamento através do hidrogénio não apresenta vantagens para o problema em questão nem para a solução que se pretende implementar, já que apresenta uma baixa eficiência devida às várias etapas de transformação pelas quais se processa o armazenamento de energia neste sistema. A utilização dos *Plug in Hybrid Vehicles* como solução para armazenamento de energia em redes de BT dependerá também dos desenvolvimentos futuros, tanto enquanto tecnologia (já que se encontram em fase de desenvolvimento) como no que se refere à sua implementação (uma vez que estaremos sempre dependentes do número de veículos ligados à rede).

2.4 - Sistema fotovoltaico

2.4.1 - Conceito e estrutura

Um sistema fotovoltaico é capaz de transformar energia solar em energia eléctrica, baseando-se em processos químicos que resultam numa diferença de potencial e que, quando ligados a uma carga, originam uma corrente eléctrica. Este processo de transformação de energia solar em energia eléctrica é realizado através de células fotovoltaicas (cada uma das quais não ultrapassa os 2W de produção de energia) que são ligadas habitualmente em série, podendo também sê-lo em paralelo, encapsuladas e montadas numa estrutura, e que, no conjunto, formam um módulo ou painel fotovoltaico (constituído normalmente por 30 a 36 células em série). A um conjunto de painéis fotovoltaicos ligados em série e/ou paralelo chama-se gerador fotovoltaico ou *array*.

Considerando a equação 2.10, pode-se representar a curva característica da corrente em função da tensão [I(V)] de uma célula tal como se apresenta na figura 2.6. Está também representada nesta imagem a curva da potência, em função da tensão e da corrente, que pode ser calculada por:

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{V}{mV_T}} - 1 \right), \quad (2.10)$$

$$P = VI = \left[I_{cc} - \left(I_0 \left(e^{\frac{V}{mV_T}} - 1 \right) \right) \right]. \quad (2.11)$$

O valor da potência máximo é atingido quando a derivada da potência em ordem à tensão é igual a zero ($dP/dV=0$), sendo também o maior valor do produto da tensão pela corrente.

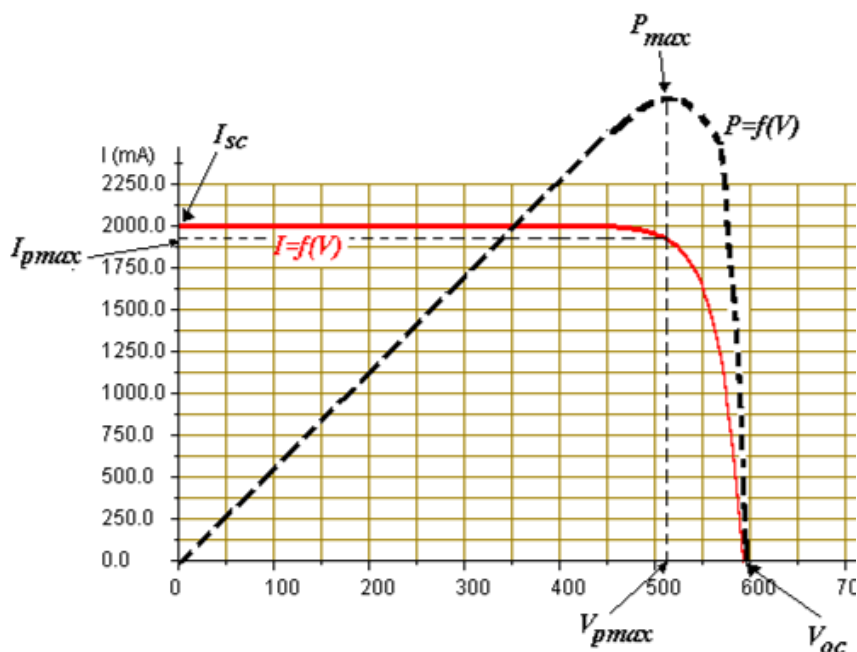


Figura 2.6 - Curvas características I(V) e P(V) de uma célula fotovoltaica

Analisando a figura 2.6, I_{sc} é a corrente da célula quando os seus terminais são curto-circuitados e V_{oc} é a tensão aos terminais da célula em circuito aberto, ou seja, quando não lhe está aplicada nenhuma carga.

2.4.2 -Influência da temperatura e da radiação solar

Uma vez que os valores de radiação solar e de temperatura têm uma influência considerável na produção de energia eléctrica de uma célula fotovoltaica e sabendo que a temperatura e a radiação solar variam ao longo do ano e durante cada dia do ano, é importante saber-se como é que a célula fotovoltaica funciona com estas variações. Por exemplo, a radiação solar varia muito durante um dia inteiro, como é possível comprovar através da figura 2.7 que ilustra a variação típica da radiação solar e que permite constatar que só existe radiação solar aproximadamente entre as 6h30 e as 19h00, sendo entre as 12h00 e as 13h30 o período onde o valor de radiação é maior e, conseqüentemente, onde será produzida mais potência eléctrica. Sabemos também que a temperatura é muito superior durante o dia, quando comparada com a da noite, e que o período do dia em que se registam temperaturas mais elevadas é aproximadamente entre as 12h00 e as 15h00, que coincide com o período de maior radiação. Assim sendo, é interessante e pertinente analisarmos a influência destas variações na corrente, na tensão e conseqüentemente na potência gerada pela célula fotovoltaica que é o que iremos explicar em seguida.

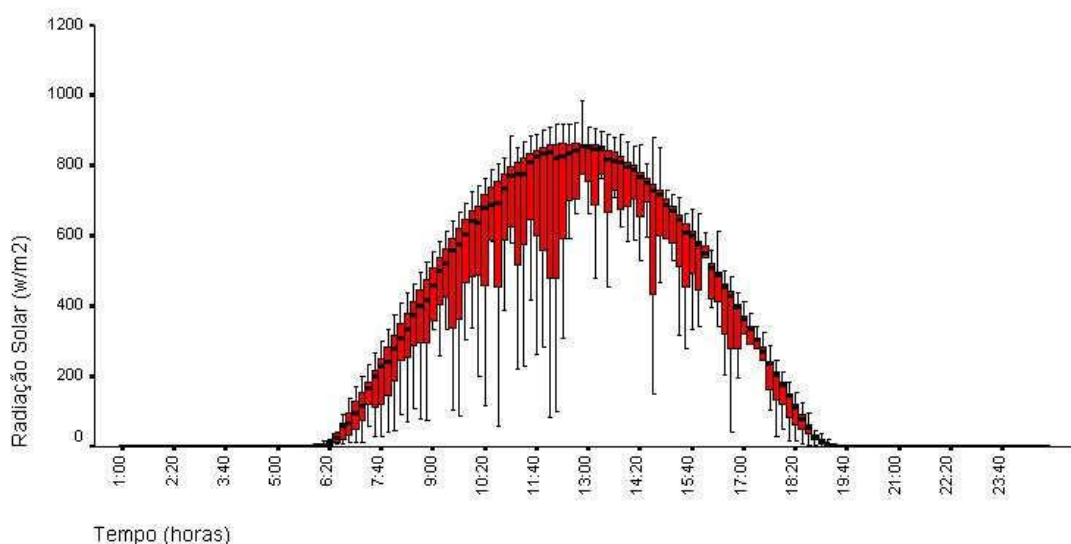


Figura 2.7 - Radiação solar típica diária [19]

Tal como é indicado em [19], a corrente de curto-circuito depende da radiação solar, sendo essa dependência expressa pela seguinte equação:

$$I_{SC} = I_{SC}^r \frac{G}{G^r}, \quad (2.12)$$

onde I_{SC}^r é a corrente de curto-circuito para as condições STC (*Standard Test Conditions* que consideram $T^r=25^\circ\text{C}=298,16\text{K}$ e $G^r=1000\text{W}/\text{m}^2$), G a radiação solar incidente por unidade de superfície e G^r a radiação solar incidente por unidade de superfície nas condições STC e que tem um valor igual a $1000\text{W}/\text{m}^2$. Considerando a equação 2.10, escrevendo-a em ordem à tensão (V) e substituindo V_T pela equação 2.14 temos:

$$V = m \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{I_D}{I_0} + 1 \right), \quad (2.13)$$

$$V_T = \frac{kT}{q}, \quad (2.14)$$

na qual podemos observar que a tensão varia com a temperatura. É então possível traçar várias curvas (representadas na figura 2.8) em função da temperatura e da radiação solar para uma melhor percepção da variação da tensão em circuito aberto e da corrente de curto-circuito, quando os terminais são curto-circuitados, respectivamente.

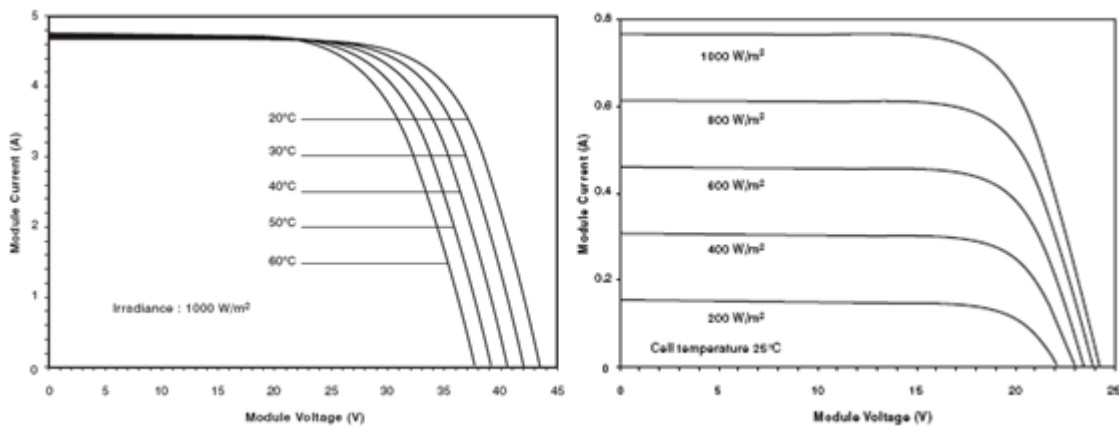


Figura 2.8 - Curvas representantes da variação da corrente de curto-circuito e da tensão em função da variação da radiação solar e da temperatura respectivamente [19]

Com base no gráfico da esquerda da figura 2.8 constata-se que, para uma corrente de curto-circuito aproximadamente constante e uma radiação solar constante, a tensão diminui significativamente quando a temperatura aumenta; uma vez que a tensão diminui e a corrente é constante a potência também vai diminuir. Considerando por outro lado a radiação solar, podemos ver no gráfico da direita da figura 2.8 que, a uma temperatura constante, quando o valor da radiação diminui a corrente de curto-circuito também diminui, mantendo-se a tensão com valores muito próximos para todos os valores de radiação solar apresentados; neste caso, como a tensão apresenta aproximadamente o mesmo valor ao diminuir a corrente, uma vez mais a potência irá sofrer uma redução.

Capítulo 3

Formulação do problema e metodologia de resolução

Conforme se referiu anteriormente (no capítulo 2), a elevada penetração de Microgeração em redes de BT origina problemas de sobretensão, sendo uma das formas mais comumente utilizada para a resolução desse problema o corte de alguma Microgeração, o que conduz a um elevado desperdício de energia produzida com base em recursos renováveis. Neste contexto, o armazenamento do excesso de energia produzida (que é habitualmente cortada) apresenta-se como uma possível solução que garante que as tensões em todos os nós se mantêm abaixo do valor da tensão máximo admissível e, simultaneamente, evita o desperdício da energia que ocorre em situações de corte de produção. Por isso, procura-se no presente trabalho dimensionar a capacidade e potência dos sistemas de armazenamento por forma a garantir a não ocorrência de sobretensões ao longo de um determinado período diário de exploração da Microrede.

Neste capítulo, procederemos a uma apresentação genérica da rede utilizada no presente trabalho para efectuar a análise do problema sob estudo. Esta descrição inclui as características principais da rede, contextualizando algumas opções quanto à sua estrutura. Posteriormente, apresentaremos a formulação do problema de optimização definido neste trabalho, bem como a metodologia adoptada para a sua resolução.

3.1 - Rede

Para este trabalho utilizámos uma rede teste, tendo-se depois procedido à alteração de alguns valores e características para se analisarem vários casos importantes, procurando uma melhor compreensão do funcionamento do sistema. O formato da rede em questão pode ser visto na figura 3.1 e as características das linhas são apresentadas na tabela 3.1 que lhe sucede.

22 Formulação do problema e metodologia de resolução

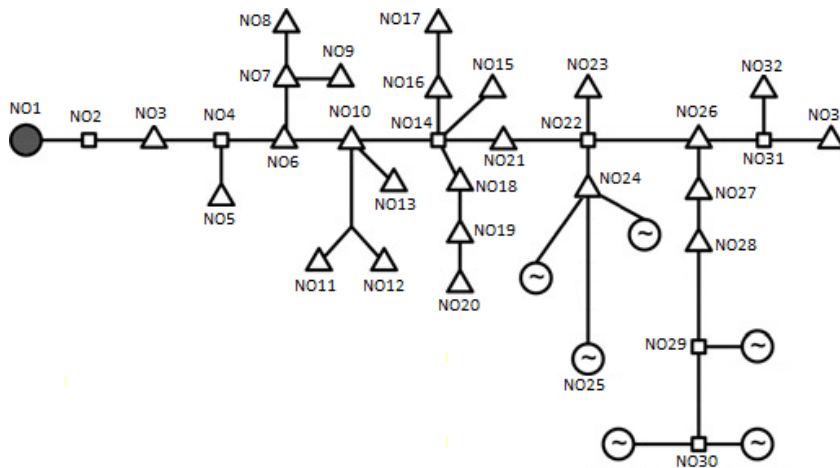


Figura 3.1 - Rede de baixa tensão

Tabela 3.1 – Características das linhas

From bus	To bus	Length, m	R, ohm/km	L, mH/km	R (pu)	X (pu)
NO1	NO2	20	0,164	0,22	0,713043	0,086957
NO2	NO3	23	0,32	0,23	1,391304	0,100000
NO3	NO4	25	0,443	0,25	1,926087	0,108696
NO4	NO5	3	3,08	0,44	13,391304	0,013043
NO4	NO6	24	0,443	0,25	1,926087	0,104348
NO6	NO7	22	1,2	0,27	5,217391	0,095652
NO7	NO8	5	3,08	0,44	13,391304	0,021739
NO7	NO9	25	12,6	0,32	54,782609	0,108696
NO6	NO10	22	0,443	0,25	1,926087	0,095652
NO10	NO11	15	3,08	0,44	13,391304	0,065217
NO10	NO12	12	3,08	0,44	13,391304	0,052174
NO10	NO13	13	3,08	0,44	13,391304	0,056522
NO10	NO14	29	0,443	0,25	1,926087	0,126087
NO14	NO15	9	3,08	0,32	13,391304	0,039130
NO14	NO16	27	1,2	0,27	5,217391	0,117391
NO16	NO17	3	3,08	0,44	13,391304	0,013043
NO14	NO18	2	3,08	0,44	13,391304	0,008696
NO18	NO19	3	3,08	0,44	13,391304	0,013043
NO19	NO20	4	3,08	0,44	13,391304	0,017391
NO14	NO21	19	0,443	0,25	1,926087	0,082609
NO21	NO22	17	0,443	0,25	1,926087	0,073913
NO22	NO23	12	0,868	0,24	3,773913	0,052174
NO22	NO24	34	0,443	0,25	1,926087	0,147826
NO24	NO25	26	0,868	0,24	3,773913	0,113043
NO22	NO26	3	0,443	0,25	1,926087	0,013043
NO26	NO27	2	3,08	0,44	13,391304	0,008696
NO27	NO28	12	0,443	0,25	1,926087	0,052174
NO28	NO29	24	0,443	0,25	1,926087	0,104348
NO29	NO30	22	3,08	0,32	13,391304	0,095652
NO26	NO31	54	3,08	0,32	13,391304	0,234783
NO31	NO32	61	3,08	0,32	13,391304	0,265217
NO31	NO33	7	3,08	0,32	13,391304	0,030435

Optámos por apresentar esta tabela neste ponto, porque estes valores não se alteram em nenhum caso; já os valores de geração e de cargas podem ser distintos em cada caso, pelo que serão apresentados nos respectivos subcapítulos. Note-se que as unidades de Microgeração presentes na rede em causa (figura 3.1) são unicamente unidades de sistemas fotovoltaicos, opção que decorreu do facto de este ser o tipo de Microgeração mais utilizado em Portugal e o que continua a ter melhores perspectivas de adesão no futuro.

3.2 - Formulação do problema de optimização

Com o objectivo de dimensionar as características do sistema de armazenamento de energia (baterias) que será instalado com o intuito de aproveitar a geração em excesso e manter as tensões nos limites pretendidos formalizámos um problema de optimização. Este problema minimiza a capacidade máxima de uma bateria a instalar num *feeder* de uma rede de BT com Microgeração e segue a equação 3.1 e as restrições que estão definidas entre as equações 3.2 e 3.5 inclusive, considerando ainda a equação 3.6.

$$\text{Min } C_{m\acute{a}x} \quad , \quad (3.1)$$

sujeito a:

$$C_{m\acute{a}x} = \sum C_k \quad , \quad (3.2)$$

$$C_k = P_k * \Delta t \quad , \quad (3.3)$$

$$0 \leq C_k \leq C_{m\acute{a}x} \quad , \quad (3.4)$$

$$U_{i_k} \leq U_{m\acute{a}x} \quad \text{com } i = 1,2,3, \dots, n \text{ e } k = 1,2, \dots, 24 \quad , \quad (3.5)$$

considerando ainda

$$P_{m\acute{a}x} = m\acute{a}x(P_k) \quad , \quad (3.6)$$

onde a variável $C_{m\acute{a}x}$ representa a capacidade máxima em energia que a bateria terá; C_k a energia armazenada durante o intervalo k de duração Δt que no nosso caso será uma hora; P_k a potência do inversor necessária para que no instante k não ocorram sobretensões na rede; k é o intervalo de tempo ($k=1,2,\dots,24$); $P_{m\acute{a}x}$ representa a potência máxima que a bateria terá e que é igual ao maior valor das potências necessárias em cada instante; U_{i_k} significa a tensão em cada nó i no intervalo de tempo k resultante do cálculo do trânsito de potências na rede; a variável $U_{m\acute{a}x}$ representa o valor limite imposto para a tensão em cada nó; e, por último, n é o número total de nós da rede de baixa tensão. Mais à frente iremos apresentar uma alternativa que considera a potência constante e em que a equação 3.2 deve ser substituída por:

$$C_{m\acute{a}x_k} = a * m\acute{a}x(P_k(t)) \quad , \quad (3.7)$$

onde a é igual ao número de horas em que é necessária a utilização da bateria.

Como já foi explicado anteriormente (Secção 2.2), quando o valor da potência injectada na rede de média tensão é muito elevado, ocorrem sobretensões na rede, sendo que neste trabalho propomos uma solução para o referido problema que consiste em evitar algum desse trânsito de potência para a rede MT, através da sua absorção por uma bateria com uma capacidade de energia máxima igual a $C_{\text{máx}}$. Assim, as tensões baixarão para valores inferiores ao da tensão máxima definida ($U_{\text{máx}}$), mas por razões económicas o valor da capacidade de energia da bateria deverá ser o mais baixo possível, pelo que é necessário calcular o valor de potência que a bateria deve “consumir” (armazenar) num dado intervalo (k que tem uma duração Δt de uma hora), multiplicando este valor por Δt , para obtemos a capacidade (em energia) que a bateria deverá armazenar naquele intervalo. Após o cálculo da capacidade de energia que deverá ser armazenada para cada intervalo, é efectuado o somatório de todos estes valores, obtendo assim o valor da capacidade de energia que a bateria que terá que ter. Pretende-se que este valor seja minimizado tendo em conta todos os factores referidos. A potência máxima desta bateria e do seu inversor (quando utilizado em carregamento) será igual ao maior valor de potência que é necessário consumir em cada intervalo (k). Este cálculo é efectuado sobre um *feeder*, sendo assim necessário efectuar o mesmo cálculo tantas vezes quantos *feeders* tiver a rede de distribuição.

3.3 - Metodologia para resolução do problema

No cálculo da capacidade óptima da bateria utilizámos o ambiente de cálculo *Matlab*, utilizando o *Matpower* para calcular os trânsitos de potência e recorreremos, também, à programação evolucionária, utilizando um algoritmo de optimização baseado no Enxame Evolucionário de Partículas (EPSO- *Evolutionary Particle Swarm Optimization*) [20] e [21], para abordar este problema de minimização.

As variáveis no Enxame Evolucionário de Partículas podem ser representadas por parâmetros objecto (as variáveis do problema) e parâmetros estratégicos (os pesos que definem a estratégia reprodutiva de cada partícula), tendo o algoritmo em atenção um conjunto de soluções ou alternativas que são designadas por partículas e sendo os pesos responsáveis pela melhor progressão do processo para um nível óptimo, de forma a conferir a melhor eficiência possível. Cada partícula é formada por um conjunto de parâmetros objecto e um conjunto de parâmetros estratégicos $[X,W]$. O esquema geral do EPSO é representado por vários conceitos definidos em seguida:

- Replicação - cada partícula é replicada $r-1$ vezes;
- Mutação - os parâmetros estratégicos (W) de cada partícula sofrem uma mutação;
- Reprodução - cada partícula cria/gera um descendente de acordo com a equação do movimento;
- Avaliação - cada descendente tem a sua adaptação avaliada;
- Selecção - por torneio estocástico as melhores partículas de cada grupo de descendentes são seleccionadas para formar uma nova geração.

De cada grupo de descendentes gerado por uma partícula só sobrevive o melhor e este processo ocorre para todas as partículas.

Cada partícula X_i gera uma nova partícula $X_i^{\text{nov}}o$ com base na regra do movimento apresentada em seguida [21] e [22]:

$$X_i^{novo} = X_i + V_i^{novo} , \quad (3.8)$$

$$V_i^{novo} = W_{i0}^* V_i + W_{i1}^* (b_i - X_i) + W_{i2}^* (b_g^* - X_i) , \quad (3.9)$$

onde X_i é a posição da partícula i , V_i é a velocidade da mesma, W_{ik}^* é o peso associado à partícula i na iteração k , b_i é a melhor solução da partícula e b_g é a melhor solução encontrada até ao momento. Tal como tinha sido referido anteriormente, os parâmetros estratégicos de cada partícula sofrem uma mutação que é dada pela equação 3.10. Durante o processo e enquanto o valor óptimo não for encontrado, é interessante orientar o movimento das partículas para uma região vizinha do melhor valor encontrado até ao momento (b_g). Este processo é definido mutando o valor b_g , através da aplicação da equação 3.11.

$$W_{ik}^* = W_{ik} + \tau N(0,1) , \quad (3.10)$$

$$b_g^* = b_g + \tau' N(0,1) , \quad (3.11)$$

onde τ e τ' são parâmetros de aprendizagem definidos externamente e que controlam a amplitude das mutações e $N(0,1)$ é uma variável aleatória derivada da distribuição Gaussiana de média 0 e variância igual a 1.

No nosso problema, o parâmetro objecto de cada partícula é o valor da potência que terá de ser consumida (pela bateria, uma vez que a bateria quando está a carregar se comporta como uma carga) numa dada hora para que as tensões em todos os nós se mantenham dentro dos limites tecnicamente admissíveis.

Para cada partícula, o valor do parâmetro objecto (X_i) é inserido como uma carga (simulando a presença de uma bateria com capacidade X_i) num barramento definido e em seguida é calculado o trânsito de potências e analisada a tensão no nó onde a sobretensão é mais severa (V_S), verificando-se se a tensão é superior ou inferior ao valor da tensão máximo admissível ($V_{m\acute{a}x}$) que é o nosso processo de avaliação. Após essa análise, é atribuído um valor ao peso (W_{ik}^*) associado a esta partícula, com base na seguinte condição:

$$W_{ik}^* = \begin{cases} \log(X_i) & \text{se } V_S \leq V_{m\acute{a}x} \\ 100 & \text{se } V_S > V_{m\acute{a}x} \end{cases} . \quad (3.12)$$

Quanto menor o valor do peso, mais próximo o valor da partícula se encontrará de um bom valor que garanta a solução do problema. Para atribuir o valor do peso a essa partícula, utiliza-se a função logaritmica em função do próprio valor da partícula, porque esta função permite atribuir valores baixos ao peso das partículas que também têm um valor baixo e atribuir valores muito superiores a valores que se afastem ligeiramente de um mínimo, seguindo assim uma curva logaritmica. Esta função é apenas aplicada a pesos cujas partículas devolvem um valor de tensão igual ou inferior ao valor da tensão máxima admissível, porque as partículas que estão associadas a tensões superiores à tensão máxima admissível têm valores inferiores aos das partículas que são consideradas como uma possível solução do problema e, conseqüentemente, os seus pesos também seriam inferiores. Ou seja, nos casos em que as tensões são superiores à tensão máxima admissível e, portanto, o valor da potência consumida não seria suficiente para manter as tensões abaixo da $V_{m\acute{a}x}$, a função logaritmica não é aplicada, pois o resultado seria um valor do peso inferior aos pesos referentes às partículas que solucionam o problema. Como, dessa forma, essa partícula representaria um falso valor óptimo (uma vez que era um mínimo mas não garantia a solução

do problema), atribui-se um valor muito elevado (tendo sido escolhido 100, embora outros valor fossem também possíveis) aos pesos referentes às partículas associadas a tensões superiores a $V_{m\acute{a}x}$, garantido, assim, que a partícula não será escolhida para a geração seguinte.

Este processo é aplicado em cada iteração e para cada partícula, com o intuito de escolher a melhor partícula que, na geração seguinte, será alvo do mesmo processo de avaliação e atribuição de pesos.

Deste processo resulta então o valor da capacidade mínima que a bateria terá que ter para que os valores de tensão se encontrem dentro dos limites, considerando uma determinada hora e sendo necessário repetir o processo para as restantes. No estudo de uma rede de baixa tensão, o processo referido anteriormente é aplicado apenas às horas em que a tensão ultrapassa o valor limite, obtendo-se o valor da capacidade da bateria necessário para garantir uma tensão dentro dos limites em cada hora. Conhecendo os valores da bateria para todas as horas em que ela é necessária pode-se optar por seleccionar o valor de potência mais elevado e considerar que a potência é igual em todas as horas ou considerar todos os valores obtidos, sendo a potência variável em cada hora.

No primeiro caso teremos uma solução menos dispendiosa em termos de equipamento, mas em certas horas a bateria irá funcionar como uma carga para a rede e não para armazenar energia excedente da Microgeração, ou seja, em certas horas a potência da bateria será superior ao valor necessário; como consequência, a potência excedente poderá ter que ser disponibilizada pela rede, o que trará custos em termos de energia. Para esta solução será também necessária uma bateria de capacidade superior, o que implicará um preço mais alto da bateria.

No segundo caso, o inversor irá ajustar a sua potência conforme a hora de funcionamento, processo que poderá ser realizado através de um inversor variável. Isto fará com que o investimento inicial em equipamento seja um pouco maior, mas por outro lado a bateria terá um valor inferior à primeira solução e não haverá custos que podem ocorrer de carregamento da bateria com energia da rede para situações em que a potência da bateria excessiva relativamente às necessidades de controlo de tensão.

Para facilitar a compreensão do funcionamento do programa e do procedimento de resolução apresentaremos, em seguida, um exemplo de utilização do mesmo. Para este exemplo, optámos por tomar como referência um cenário (cenário 1 que será posteriormente apresentado no Capítulo 4, referente aos resultados) onde se verifica uma violação das tensões e escolhemos o período referente à hora 13, por ser considerada uma das horas mais críticas, uma vez que coincide geralmente com um consumo de energia muito inferior aos níveis de produção da mesma. Para começar a utilizar o programa, é necessário introduzir os valores da rede no case do *Matpower* e executar o programa. O programa é faseado por iterações, em cada uma das quais é calculado o trânsito de potências, o que nos permite ter acesso aos dados apresentados na figura 3.2.

Bus Data						
Bus #	Voltage		Generation		Load	
	Mag (pu)	Ang (deg)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	1.000	0.000	-	-	0.09*	-0.04*
2	1.002	0.090	-	-	-	-
3	1.005	0.244	-	-	0.00	0.00
4	1.011	0.455	-	-	-	-
5	1.011	0.467	-	-	0.01	0.00
6	1.018	0.646	-	-	0.00	0.00
7	1.016	0.674	-	-	0.00	0.00
8	1.016	0.678	-	-	0.00	0.00
9	1.009	0.822	-	-	0.00	0.00
10	1.024	0.811	-	-	0.00	0.00
11	1.022	0.863	-	-	0.01	0.00
12	1.024	0.822	-	-	0.00	0.00
13	1.024	0.822	-	-	0.00	0.00
14	1.034	1.011	-	-	-	-
15	1.034	1.019	-	-	0.00	0.00
16	1.033	1.032	-	-	0.00	0.00
17	1.033	1.034	-	-	0.00	0.00
18	1.034	1.015	-	-	0.00	0.00
19	1.034	1.018	-	-	0.00	0.00
20	1.034	1.022	-	-	0.00	0.00
21	1.042	1.132	-	-	0.01	0.00
22	1.049	1.233	-	-	-	-
23	1.048	1.238	-	-	0.00	0.00
24	1.054	1.293	0.05	-0.00	0.01	0.00
25	1.055	1.301	0.01	-0.00	-	-
26	1.050	1.245	-	-	0.00	0.00
27	1.054	1.262	-	-	0.00	0.00
28	1.058	1.304	-	-	0.00	0.00
29	1.066	1.383	0.03	-0.00	-	-
30	1.105	1.451	0.10	-0.00	-	-
31	1.043	1.381	-	-	-	-
32	1.041	1.408	-	-	0.00	0.00
33	1.042	1.396	-	-	0.01	0.00
Total:			0.20	-0.00	0.18	-0.00

Figura 3.1 - Valores resultantes do trânsito de potência calculado através do *Matpower* antes da aplicação da bateria.

Pela análise da tabela anterior, podemos observar que a tensão no nó 30 é igual a 1,105p.u., superior ao limite que definimos neste trabalho que é de 1,06p.u., pelo que é necessário executar o programa. O programa cria, então, uma matriz com 20 valores (partículas) aleatórios, iniciando-se um processo que se repetirá para todas as partículas e que consiste na substituição do primeiro valor na matriz das cargas no nó onde pretendemos que a bateria seja instalada. Neste caso, simula-se a instalação da bateria no nó 22. De seguida, o programa volta a fazer o trânsito de potências: se o valor mais elevado da tensão for superior a 1,06p.u. é atribuído ao primeiro valor um peso com valor 100 (foi escolhido este valor apenas por ser um valor grande), enquanto que se for inferior é-lhe atribuído um peso de valor igual ao logaritmo do próprio valor aleatório. Fá-lo, em seguida, para a segunda

partícula, repetindo todo o processo anterior e assim sucessivamente até concluir as 20 partículas.

No final desta etapa é comparada a população desta iteração com a melhor população desde o início do processo e são escolhidas as melhores partículas da forma que explicámos anteriormente. Retomando o nosso exemplo, uma vez que nos posicionámos na primeira iteração, a melhor população até este momento é a própria população dessa iteração.

Por fim, o programa cria uma nova população através da mutação da anterior e com base nos vectores que já tínhamos referido e o processo passa para a iteração seguinte, onde todos estes passos se repetirão. Este processo repete-se até obtermos um valor suficientemente bom e que satisfaça a resolução do problema.

No exemplo em análise, o valor resultante, para a potência de carga da bateria que garante que as tensões em todos os nós da rede são inferiores ou iguais a $U_{máx}$, foi 0,1131MW. Para comprovar que, utilizando esse valor as tensões são iguais ou inferiores ao limite imposto pelo utilizador, podemos substituir aquele valor no barramento 22, simulando a bateria, e voltar a fazer o trânsito de potência. Podemos então observar a figura 3.2 que representa os valores das tensões resultantes do trânsito de potência da rede com a bateria em funcionamento.

Bus Data						
Bus #	Voltage		Generation		Load	
	Mag (pu)	Ang (deg)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	1.000	0.000	-	-	-0.02*	-0.04*
2	0.999	0.035	-	-	-	-
3	0.998	0.124	-	-	0.00	0.00
4	0.997	0.259	-	-	-	-
5	0.996	0.271	-	-	0.01	0.00
6	0.996	0.381	-	-	0.00	0.00
7	0.994	0.409	-	-	0.00	0.00
8	0.994	0.414	-	-	0.00	0.00
9	0.987	0.564	-	-	0.00	0.00
10	0.996	0.483	-	-	0.00	0.00
11	0.993	0.537	-	-	0.01	0.00
12	0.995	0.494	-	-	0.00	0.00
13	0.995	0.495	-	-	0.00	0.00
14	0.997	0.603	-	-	-	-
15	0.997	0.611	-	-	0.00	0.00
16	0.996	0.625	-	-	0.00	0.00
17	0.996	0.628	-	-	0.00	0.00
18	0.997	0.607	-	-	0.00	0.00
19	0.997	0.611	-	-	0.00	0.00
20	0.997	0.614	-	-	0.00	0.00
21	0.999	0.673	-	-	0.01	0.00
22	1.001	0.729	-	-	0.11	0.00
23	1.001	0.734	-	-	0.00	0.00
24	1.006	0.795	0.05	-0.00	0.01	0.00
25	1.008	0.804	0.01	-0.00	-	-
26	1.002	0.742	-	-	0.00	0.00
27	1.007	0.761	-	-	0.00	0.00
28	1.011	0.806	-	-	0.00	0.00
29	1.019	0.893	0.03	-0.00	-	-
30	1.060	0.967	0.10	-0.00	-	-
31	0.995	0.892	-	-	-	-
32	0.993	0.921	-	-	0.00	0.00
33	0.994	0.908	-	-	0.01	0.00
Total:			0.20	-0.00	0.19	-0.00

Figura 3.2 - Valores resultantes do trânsito de potência calculado através do *Matpower* depois da aplicação da bateria

Pela análise da figura anterior podemos observar agora que o valor mais elevado de tensão ocorre no nó 30 e é de valor igual ao nosso limite, o que nos permite concluir que o valor devolvido pelo nosso programa é o valor mínimo para que as tensões se encontrem dentro dos limites. Qualquer valor inferior ao obtido fará com que as tensões ultrapassem os limites. Podemos ainda observar na coluna das cargas (*load*) a presença de uma carga no nó 22, carga que simula a presença de uma bateria.

Em todo este processo, existe uma questão muito importante que ainda não foi considerada e que se prende com o local na rede onde será ligada a bateria. Para a definição deste local serão analisadas no capítulo seguinte várias hipóteses, onde iremos concluir que para

30 Formulação do problema e metodologia de resolução

diferentes locais de ligação da bateria à rede, o valor da capacidade máxima em energia que a bateria terá que ter (para que as tensões em todos os nós da rede não violem os limites estipulados) varia. Uma vez que se pretende que este valor seja o mínimo possível, iremos analisar vários cenários, nos quais simularemos a instalação da bateria em diferentes locais, com o intuito de apresentarmos o melhor local possível.

Capítulo 4

Resultados

Neste capítulo, considerando a rede descrita anteriormente, analisaremos os vários casos estudados e seus resultados. Em cada caso serão apresentados valores de carga e geração e analisados os valores das tensões nos nós, potência e capacidade das baterias, bem como as possíveis soluções para cada caso. As características das linhas não serão apresentadas, uma vez que estes valores são iguais em todos os casos e já foram apresentados anteriormente. A tensão limite considerada neste estudo foi 1,06p.u..

4.1 - Análise e comparação de resultados

4.1.1 - Versão 1

A versão 1 considera a rede inicial com um valor de geração total igual a 200,1KW e um somatório de cargas de 259,89KW. Considerámos que, neste caso, a bateria seria instalada no barramento 22 porque este nó se encontra num ponto aproximadamente à mesma distância da maioria dos pontos de geração, mas também porque neste nó não se encontra nenhuma carga.

Os valores das potências geradas e consumidas na rede, tendo em conta a evolução horária da geração de electricidade dos sistemas de produção instalados e das cargas em cada nó, são apresentados em seguida.

Tabela 4.1 – Potência activa horária gerada (MW)

	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h
NO24	0,004830	0,006900	0,012075	0,024150	0,031740	0,033810	0,031740	0,024150	0,013110	0,006900	0,004140	0,002760	0,001725
NO24	0,001932	0,002760	0,004830	0,009660	0,012696	0,013524	0,012696	0,009660	0,005244	0,002760	0,001656	0,001104	0,000690
NO25	0,001932	0,002760	0,004830	0,009660	0,012696	0,013524	0,012696	0,009660	0,005244	0,002760	0,001656	0,001104	0,000690
NO29	0,004830	0,006900	0,012075	0,024150	0,031740	0,033810	0,031740	0,024150	0,013110	0,006900	0,004140	0,002760	0,001725
NO30	0,004830	0,006900	0,012075	0,024150	0,031740	0,033810	0,031740	0,024150	0,013110	0,006900	0,004140	0,002760	0,001725
NO30	0,009660	0,013800	0,024150	0,048300	0,063480	0,067620	0,063480	0,048300	0,026220	0,013800	0,008280	0,005520	0,003450
Soma	0,028014	0,040020	0,070035	0,140070	0,184092	0,196098	0,184092	0,140070	0,076038	0,040020	0,024012	0,016008	0,010005

Tabela 4.4 – Potências horárias necessárias (MW)

	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h
Geração (MW)	0,028014	0,040020	0,070035	0,140070	0,184092	0,196098	0,184092	0,140070	0,076038	0,040020	0,024012	0,016008	0,010005
Consumo (MW)	0,119549	0,116950	0,109153	0,103955	0,098758	0,093560	0,093560	0,093560	0,103955	0,116950	0,129944	0,155933	0,181922
Potência necessária (MW)	0	0	0	0,012500	0,089300	0,113100	0,093500	0,020900	0	0	0	0	0
Consumo + Pot. necessária (MW)	0,119549	0,116950	0,109153	0,116455	0,188058	0,206660	0,187060	0,114460	0,103955	0,116950	0,129944	0,155933	0,181922

Com os resultados obtidos poderíamos optar por duas soluções tal como foi descrito anteriormente: a potência constante ou a potência variável.

Considerando a potência constante, seleccionámos o valor máximo que neste caso será 113,1KW correspondente às 13h e consideramo-lo constante em todas as horas que necessitam de uma bateria (5 horas). Assim, o valor da capacidade da bateria será $\sum P * \Delta t = (113,1 * 5) * 1h = 565,5KWh$.

Considerando agora a segunda hipótese - potência variável com a hora - procedemos à selecção de todos os valores resultantes para cada hora e temos assim uma capacidade igual a $\sum P * \Delta t = (12,5 + 89,3 + 113,1 + 93,5 + 20,9) * 1h = 329,3KWh$.

Podemos observar as curvas referentes ao consumo, à geração e ao consumo mais a potência necessária que será o consumo depois de aplicada a bateria dimensionada em função das horas para as duas situações consideradas anteriormente, com a potência constante e variável, respectivamente.

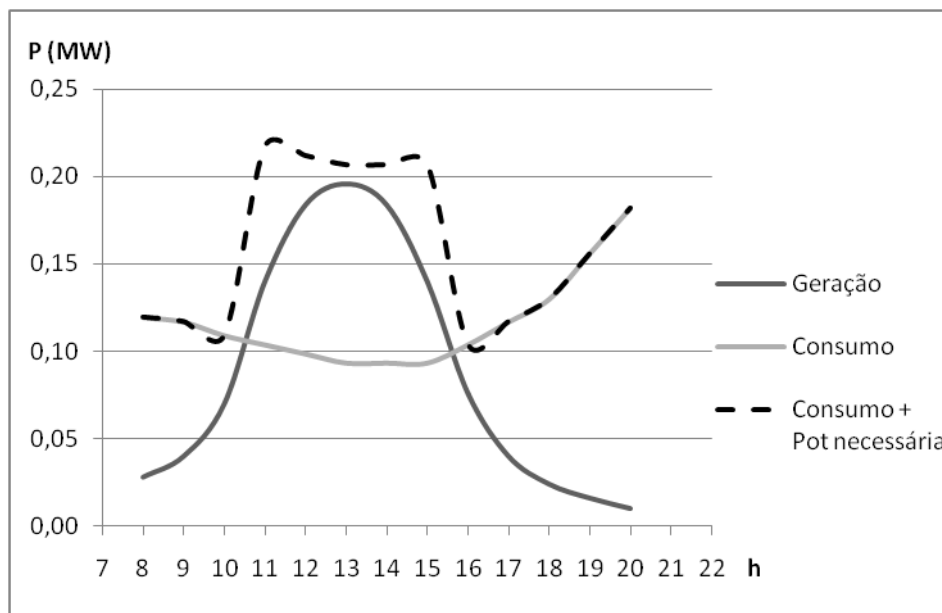


Figura 4.1 - Curvas da potência gerada, consumida e consumida mais a potência necessária da bateria considerando a potência constante

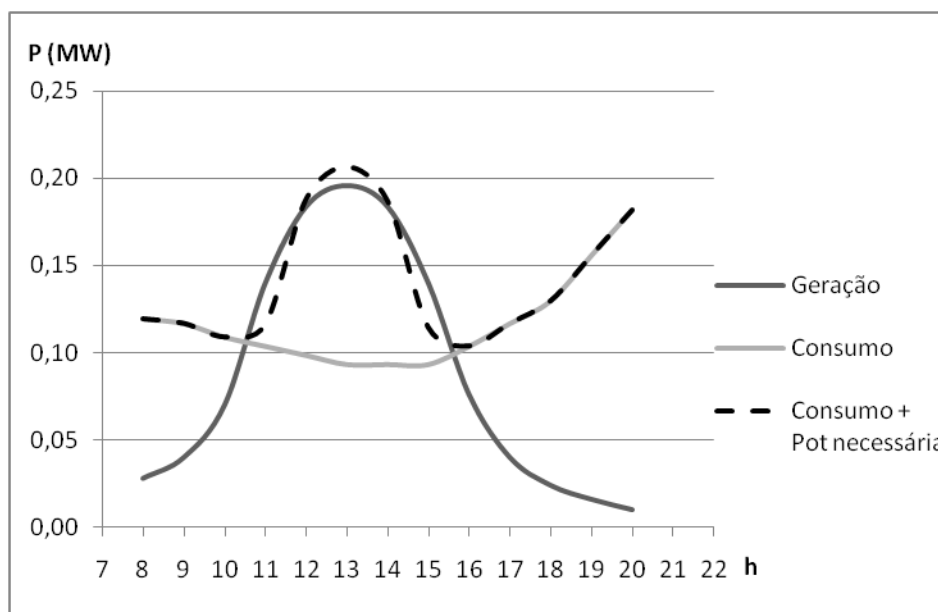


Figura 4.2 - Curvas da potência gerada, consumida e consumida mais a potência necessária da bateria considerando a potência variável

4.1.2 - Versão 2

Nesta versão, a rede estudada é parecida com a inicial, tendo como única diferença o facto de que esta rede tem uma carga no nó 30. Este pode ser um exemplo em que a geração, ao contrário do que acontece na rede inicial, está mais próxima das cargas, não havendo assim uma distância tão grande entre produção e consumo, ou seja, não há como que dois grupos distintos, um de consumo e outro maioritariamente de produção.

Em seguida são apresentados os valores das potências geradas e consumidas na rede para esta versão. É importante referir que os valores de consumo não se alteram, enquanto que nas cargas há uma variação.

Tabela 4.5 – Potência activa horária gerada (MW)

	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h
NO24	0,004830	0,006900	0,012075	0,024150	0,031740	0,033810	0,031740	0,024150	0,013110	0,006900	0,004140	0,002760	0,001725
NO24	0,001932	0,002760	0,004830	0,009660	0,012696	0,013524	0,012696	0,009660	0,005244	0,002760	0,001656	0,001104	0,000690
NO25	0,001932	0,002760	0,004830	0,009660	0,012696	0,013524	0,012696	0,009660	0,005244	0,002760	0,001656	0,001104	0,000690
NO29	0,004830	0,006900	0,012075	0,024150	0,031740	0,033810	0,031740	0,024150	0,013110	0,006900	0,004140	0,002760	0,001725
NO30	0,004830	0,006900	0,012075	0,024150	0,031740	0,033810	0,031740	0,024150	0,013110	0,006900	0,004140	0,002760	0,001725
NO30	0,009660	0,013800	0,024150	0,048300	0,063480	0,067620	0,063480	0,048300	0,026220	0,013800	0,008280	0,005520	0,003450
Soma	0,028014	0,040020	0,070035	0,140070	0,184092	0,196098	0,184092	0,140070	0,076038	0,040020	0,024012	0,016008	0,010005

Tabela 4.6 – Potência activa horária consumida (MW)

	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h
NO3	0,002952	0,002888	0,002695	0,002567	0,002438	0,002310	0,002310	0,002310	0,002567	0,002888	0,003209	0,003850	0,004492
NO5	0,013283	0,012994	0,012128	0,011551	0,010973	0,010396	0,010396	0,010396	0,011551	0,012994	0,014438	0,017326	0,020214
NO6	0,002952	0,002888	0,002695	0,002567	0,002438	0,002310	0,002310	0,002310	0,002567	0,002888	0,003209	0,003850	0,004492
NO7	0,004428	0,004331	0,004043	0,003850	0,003658	0,003465	0,003465	0,003465	0,003850	0,004331	0,004813	0,005775	0,006738
NO8	0,002952	0,002888	0,002695	0,002567	0,002438	0,002310	0,002310	0,002310	0,002567	0,002888	0,003209	0,003850	0,004492
NO9	0,004428	0,004331	0,004043	0,003850	0,003658	0,003465	0,003465	0,003465	0,003850	0,004331	0,004813	0,005775	0,006738
NO10	0,001476	0,001444	0,001348	0,001283	0,001219	0,001155	0,001155	0,001155	0,001283	0,001444	0,001604	0,001925	0,002246
NO11	0,011807	0,011551	0,010781	0,010267	0,009754	0,009240	0,009240	0,009240	0,010267	0,011551	0,012834	0,015401	0,017968
NO12	0,002952	0,002888	0,002695	0,002567	0,002438	0,002310	0,002310	0,002310	0,002567	0,002888	0,003209	0,003850	0,004492
NO13	0,002952	0,002888	0,002695	0,002567	0,002438	0,002310	0,002310	0,002310	0,002567	0,002888	0,003209	0,003850	0,004492
NO15	0,002952	0,002888	0,002695	0,002567	0,002438	0,002310	0,002310	0,002310	0,002567	0,002888	0,003209	0,003850	0,004492
NO16	0,004428	0,004331	0,004043	0,003850	0,003658	0,003465	0,003465	0,003465	0,003850	0,004331	0,004813	0,005775	0,006738
NO17	0,002952	0,002888	0,002695	0,002567	0,002438	0,002310	0,002310	0,002310	0,002567	0,002888	0,003209	0,003850	0,004492
NO18	0,001476	0,001444	0,001348	0,001283	0,001219	0,001155	0,001155	0,001155	0,001283	0,001444	0,001604	0,001925	0,002246
NO19	0,001476	0,001444	0,001348	0,001283	0,001219	0,001155	0,001155	0,001155	0,001283	0,001444	0,001604	0,001925	0,002246
NO20	0,002952	0,002888	0,002695	0,002567	0,002438	0,002310	0,002310	0,002310	0,002567	0,002888	0,003209	0,003850	0,004492
NO21	0,014759	0,014438	0,013476	0,012834	0,012192	0,011551	0,011551	0,011551	0,012834	0,014438	0,016043	0,019251	0,022460
NO23	0,005904	0,005775	0,005390	0,005134	0,004877	0,004620	0,004620	0,004620	0,005134	0,005775	0,006417	0,007700	0,008984
NO24	0,008855	0,008663	0,008085	0,007700	0,007315	0,006930	0,006930	0,006930	0,007700	0,008663	0,009626	0,011551	0,013476
NO26	0,005904	0,005775	0,005390	0,005134	0,004877	0,004620	0,004620	0,004620	0,005134	0,005775	0,006417	0,007700	0,008984
NO27	0,002952	0,002888	0,002695	0,002567	0,002438	0,002310	0,002310	0,002310	0,002567	0,002888	0,003209	0,003850	0,004492
NO28	0,005904	0,005775	0,005390	0,005134	0,004877	0,004620	0,004620	0,004620	0,005134	0,005775	0,006417	0,007700	0,008984
NO30	0,011500	0,011250	0,010500	0,010000	0,009500	0,009000	0,009000	0,009000	0,010000	0,011250	0,012500	0,015000	0,017500
NO32	0,001476	0,001444	0,001348	0,001283	0,001219	0,001155	0,001155	0,001155	0,001283	0,001444	0,001604	0,001925	0,002246
NO33	0,007380	0,007219	0,006738	0,006417	0,006096	0,005775	0,005775	0,005775	0,006417	0,007219	0,008021	0,009626	0,011230
Soma	0,131049	0,128200	0,119653	0,113955	0,108258	0,102560	0,102560	0,102560	0,113955	0,128200	0,142444	0,170933	0,199422

Tabela 4.7 – Potência reactiva horária consumida (MVAr)

	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h
NO3	0,001167	0,001141	0,001065	0,001014	0,000964	0,000913	0,000913	0,000913	0,001014	0,001141	0,001268	0,001522	0,001775
NO5	0,005250	0,005136	0,004793	0,004565	0,004337	0,004109	0,004109	0,004109	0,004565	0,005136	0,005706	0,006848	0,007989
NO6	0,001167	0,001141	0,001065	0,001014	0,000964	0,000913	0,000913	0,000913	0,001014	0,001141	0,001268	0,001522	0,001775
NO7	0,001750	0,001712	0,001598	0,001522	0,001446	0,001370	0,001370	0,001370	0,001522	0,001712	0,001902	0,002283	0,002663
NO8	0,001167	0,001141	0,001065	0,001014	0,000964	0,000913	0,000913	0,000913	0,001014	0,001141	0,001268	0,001522	0,001775
NO9	0,001750	0,001712	0,001598	0,001522	0,001446	0,001370	0,001370	0,001370	0,001522	0,001712	0,001902	0,002283	0,002663
NO10	0,000583	0,000571	0,000533	0,000507	0,000482	0,000457	0,000457	0,000457	0,000507	0,000571	0,000634	0,000761	0,000888
NO11	0,004667	0,004565	0,004261	0,004058	0,003855	0,003652	0,003652	0,003652	0,004058	0,004565	0,005072	0,006087	0,007101
NO12	0,001167	0,001141	0,001065	0,001014	0,000964	0,000913	0,000913	0,000913	0,001014	0,001141	0,001268	0,001522	0,001775
NO13	0,001167	0,001141	0,001065	0,001014	0,000964	0,000913	0,000913	0,000913	0,001014	0,001141	0,001268	0,001522	0,001775
NO15	0,001167	0,001141	0,001065	0,001014	0,000964	0,000913	0,000913	0,000913	0,001014	0,001141	0,001268	0,001522	0,001775
NO16	0,001750	0,001712	0,001598	0,001522	0,001446	0,001370	0,001370	0,001370	0,001522	0,001712	0,001902	0,002283	0,002663
NO17	0,001167	0,001141	0,001065	0,001014	0,000964	0,000913	0,000913	0,000913	0,001014	0,001141	0,001268	0,001522	0,001775
NO18	0,000583	0,000571	0,000533	0,000507	0,000482	0,000457	0,000457	0,000457	0,000507	0,000571	0,000634	0,000761	0,000888
NO19	0,000583	0,000571	0,000533	0,000507	0,000482	0,000457	0,000457	0,000457	0,000507	0,000571	0,000634	0,000761	0,000888
NO20	0,001167	0,001141	0,001065	0,001014	0,000964	0,000913	0,000913	0,000913	0,001014	0,001141	0,001268	0,001522	0,001775
NO21	0,005833	0,005706	0,005326	0,005072	0,004819	0,004565	0,004565	0,004565	0,005072	0,005706	0,006340	0,007608	0,008877
NO23	0,002333	0,002283	0,002130	0,002029	0,001927	0,001826	0,001826	0,001826	0,002029	0,002283	0,002536	0,003043	0,003551
NO24	0,003500	0,003424	0,003196	0,003043	0,002891	0,002739	0,002739	0,002739	0,003043	0,003424	0,003804	0,004565	0,005326
NO26	0,002333	0,002283	0,002130	0,002029	0,001927	0,001826	0,001826	0,001826	0,002029	0,002283	0,002536	0,003043	0,003551
NO27	0,001167	0,001141	0,001065	0,001014	0,000964	0,000913	0,000913	0,000913	0,001014	0,001141	0,001268	0,001522	0,001775
NO28	0,002333	0,002283	0,002130	0,002029	0,001927	0,001826	0,001826	0,001826	0,002029	0,002283	0,002536	0,003043	0,003551
NO30	0,004545	0,004446	0,004150	0,003952	0,003755	0,003557	0,003557	0,003557	0,003952	0,004446	0,004940	0,005928	0,006916
NO32	0,000583	0,000571	0,000533	0,000507	0,000482	0,000457	0,000457	0,000457	0,000507	0,000571	0,000634	0,000761	0,000888
NO33	0,002917	0,002853	0,002663	0,002536	0,002409	0,002283	0,002283	0,002283	0,002536	0,002853	0,003170	0,003804	0,004438
Soma	0,051794	0,050668	0,047290	0,045038	0,042786	0,040534	0,040534	0,040534	0,045038	0,050668	0,056298	0,067557	0,078817

Os valores das potências geradas e consumidas, apresentados nas tabelas anteriores, foram introduzidos no programa desenvolvido e obtivemos os seguintes resultados:

Tabela 4.8 – Potências horárias necessárias (MW)

	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h
Geração (MW)	0,028014	0,040020	0,070035	0,140070	0,184092	0,196098	0,184092	0,140070	0,076038	0,040020	0,024012	0,016008	0,010005
Consumo (MW)	0,131049	0,128200	0,119653	0,113955	0,108258	0,102560	0,102560	0,102560	0,113955	0,128200	0,142444	0,170933	0,199422
Potência necessária (MW)	0	0	0	0	0,067900	0,092900	0,073200	0,000073	0	0	0	0	0
Consumo + Pot. necessária (MW)	0,131049	0,128200	0,119653	0,113955	0,176158	0,195460	0,175760	0,102632	0,113955	0,128200	0,142444	0,170933	0,199422

Uma vez mais, com base nestes valores podemos optar pelas duas alternativas anteriormente apresentadas, sendo que, se considerarmos que a potência é constante ao longo das horas, o valor da capacidade da bateria será dado por $\sum P * \Delta t = (92,9 * 4) * 1h = 371,6KWh$. Se, por outro lado, admitirmos que a potência tem uma variação horária, a capacidade da bateria será $\sum P * \Delta t = (67,9 + 92,9 + 73,2 + 7,26E - 2) * 1h = 234,1KWh$.

Podemos observar os resultados das duas alternativas nas imagens seguintes. Repare-se que na figura 4.3, no ponto referente às 15 horas, a linha de consumo se afasta muito da geração. Isto acontece porque a essa mesma hora era necessário um valor muito inferior ao valor máximo, mas como nesta hipótese optámos por considerar a potência constante, nessa hora existirá um consumo indesejável de energia proveniente da rede.

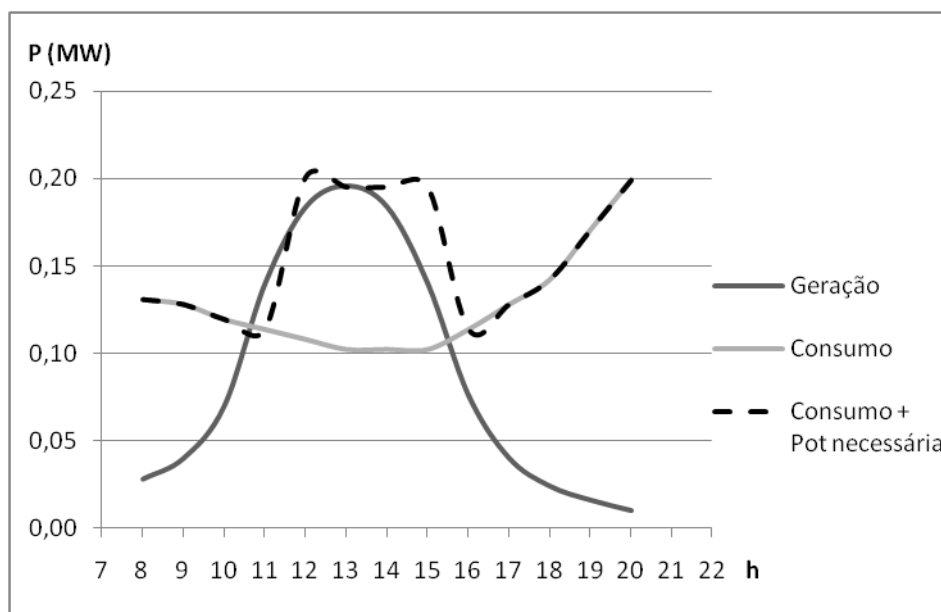


Figura 4.3 - Curvas da potência gerada, consumida e consumida mais a potência necessária da bateria considerando a potência constante

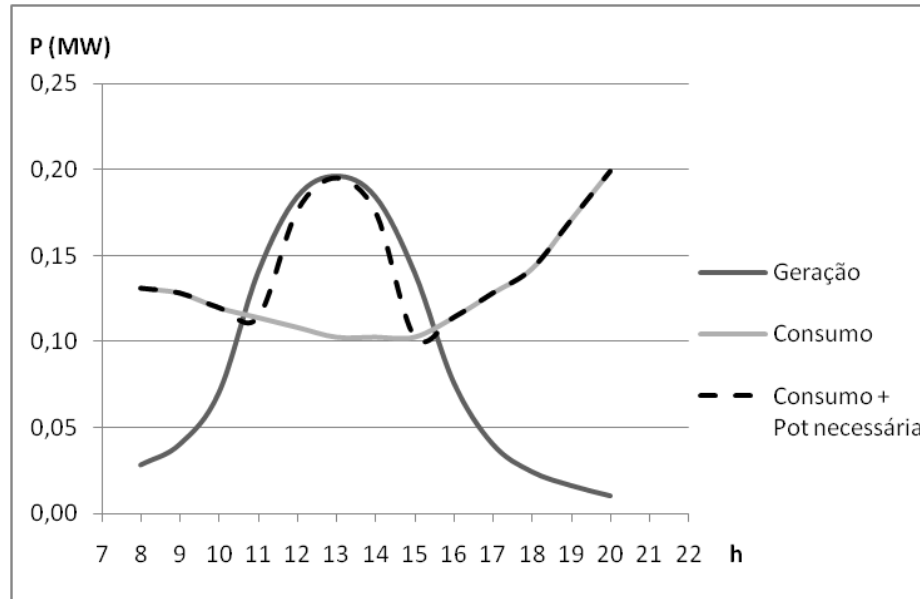


Figura 4.4 - Curvas da potência gerada, consumida e consumida mais a potência necessária da bateria considerando a potência variável

4.1.3 -Versão 3

Nesta versão procurámos estudar a rede inicial, mas ao contrário do que acontecia na primeira versão, a localização da bateria não foi definida com base numa posição geográfica, mas sim com base numa análise prévia do valor das tensões em cada nó da rede, resolvendo o trânsito de potências inicial usando o *Matpower*. Consequentemente, analisou-se a tensão em todos os barramentos para a hora 13, visto ser nesta hora que a tensão atinge os valores mais elevados, tal como já referimos anteriormente. Podemos ver estes dados no gráfico seguinte.

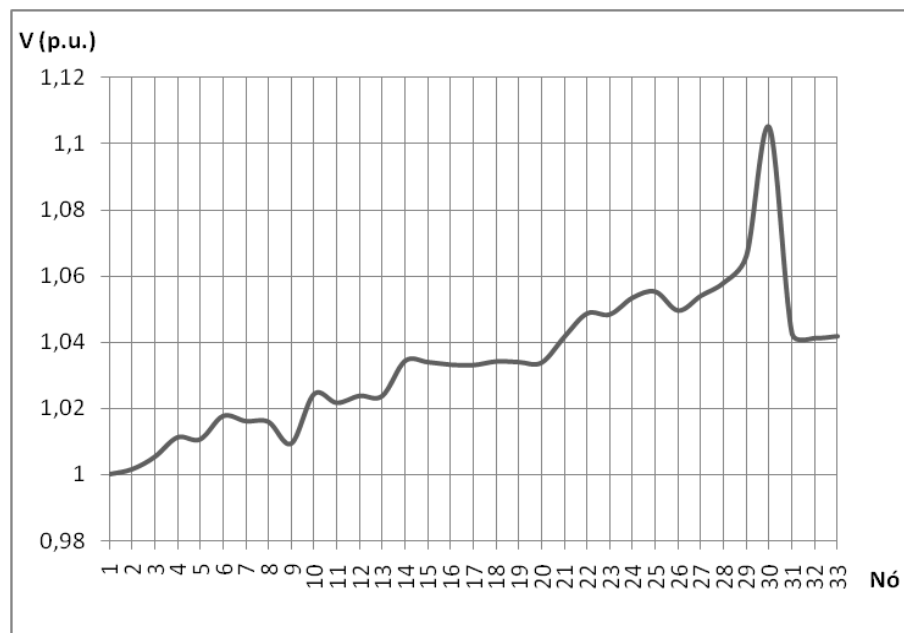


Figura 4.5 - Curva da tensão em cada nó da rede

38 Resultados

Após esta análise e pela visualização do gráfico anterior podemos verificar que a tensão atinge valores muito mais elevados em pontos perto da geração e longe da rede, sendo atingido o valor máximo no nó 30 que decidimos, por isso, ser o local mais indicado para a instalação da bateria.

Iremos agora verificar o valor necessário de bateria para que as tensões se mantenham nos limites, apresentando-se em seguida os valores característicos da rede em estudo. Relembramos que esta rede é igual à rede inicial, estando a única diferença na localização da bateria.

Tabela 4.9 – Potência activa horária gerada (MW)

	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h
NO24	0,004830	0,006900	0,012075	0,024150	0,031740	0,033810	0,031740	0,024150	0,013110	0,006900	0,004140	0,002760	0,001725
NO24	0,001932	0,002760	0,004830	0,009660	0,012696	0,013524	0,012696	0,009660	0,005244	0,002760	0,001656	0,001104	0,000690
NO25	0,001932	0,002760	0,004830	0,009660	0,012696	0,013524	0,012696	0,009660	0,005244	0,002760	0,001656	0,001104	0,000690
NO29	0,004830	0,006900	0,012075	0,024150	0,031740	0,033810	0,031740	0,024150	0,013110	0,006900	0,004140	0,002760	0,001725
NO30	0,004830	0,006900	0,012075	0,024150	0,031740	0,033810	0,031740	0,024150	0,013110	0,006900	0,004140	0,002760	0,001725
NO30	0,009660	0,013800	0,024150	0,048300	0,063480	0,067620	0,063480	0,048300	0,026220	0,013800	0,008280	0,005520	0,003450
Soma	0,028014	0,040020	0,070035	0,140070	0,184092	0,196098	0,184092	0,140070	0,076038	0,040020	0,024012	0,016008	0,010005

Tabela 4.10 – Potência activa horária consumida (MW)

	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h
NO3	0,002952	0,002888	0,002695	0,002567	0,002438	0,002310	0,002310	0,002310	0,002567	0,002888	0,003209	0,003850	0,004492
NO5	0,013283	0,012994	0,012128	0,011551	0,010973	0,010396	0,010396	0,010396	0,011551	0,012994	0,014438	0,017326	0,020214
NO6	0,002952	0,002888	0,002695	0,002567	0,002438	0,002310	0,002310	0,002310	0,002567	0,002888	0,003209	0,003850	0,004492
NO7	0,004428	0,004331	0,004043	0,003850	0,003658	0,003465	0,003465	0,003465	0,003850	0,004331	0,004813	0,005775	0,006738
NO8	0,002952	0,002888	0,002695	0,002567	0,002438	0,002310	0,002310	0,002310	0,002567	0,002888	0,003209	0,003850	0,004492
NO9	0,004428	0,004331	0,004043	0,003850	0,003658	0,003465	0,003465	0,003465	0,003850	0,004331	0,004813	0,005775	0,006738
NO10	0,001476	0,001444	0,001348	0,001283	0,001219	0,001155	0,001155	0,001155	0,001283	0,001444	0,001604	0,001925	0,002246
NO11	0,011807	0,011551	0,010781	0,010267	0,009754	0,009240	0,009240	0,009240	0,010267	0,011551	0,012834	0,015401	0,017968
NO12	0,002952	0,002888	0,002695	0,002567	0,002438	0,002310	0,002310	0,002310	0,002567	0,002888	0,003209	0,003850	0,004492
NO13	0,002952	0,002888	0,002695	0,002567	0,002438	0,002310	0,002310	0,002310	0,002567	0,002888	0,003209	0,003850	0,004492
NO15	0,002952	0,002888	0,002695	0,002567	0,002438	0,002310	0,002310	0,002310	0,002567	0,002888	0,003209	0,003850	0,004492
NO16	0,004428	0,004331	0,004043	0,003850	0,003658	0,003465	0,003465	0,003465	0,003850	0,004331	0,004813	0,005775	0,006738
NO17	0,002952	0,002888	0,002695	0,002567	0,002438	0,002310	0,002310	0,002310	0,002567	0,002888	0,003209	0,003850	0,004492
NO18	0,001476	0,001444	0,001348	0,001283	0,001219	0,001155	0,001155	0,001155	0,001283	0,001444	0,001604	0,001925	0,002246
NO19	0,001476	0,001444	0,001348	0,001283	0,001219	0,001155	0,001155	0,001155	0,001283	0,001444	0,001604	0,001925	0,002246
NO20	0,002952	0,002888	0,002695	0,002567	0,002438	0,002310	0,002310	0,002310	0,002567	0,002888	0,003209	0,003850	0,004492
NO21	0,014759	0,014438	0,013476	0,012834	0,012192	0,011551	0,011551	0,011551	0,012834	0,014438	0,016043	0,019251	0,022460
NO23	0,005904	0,005775	0,005390	0,005134	0,004877	0,004620	0,004620	0,004620	0,005134	0,005775	0,006417	0,007700	0,008984
NO24	0,008855	0,008663	0,008085	0,007700	0,007315	0,006930	0,006930	0,006930	0,007700	0,008663	0,009626	0,011551	0,013476
NO26	0,005904	0,005775	0,005390	0,005134	0,004877	0,004620	0,004620	0,004620	0,005134	0,005775	0,006417	0,007700	0,008984
NO27	0,002952	0,002888	0,002695	0,002567	0,002438	0,002310	0,002310	0,002310	0,002567	0,002888	0,003209	0,003850	0,004492
NO28	0,005904	0,005775	0,005390	0,005134	0,004877	0,004620	0,004620	0,004620	0,005134	0,005775	0,006417	0,007700	0,008984
NO32	0,001476	0,001444	0,001348	0,001283	0,001219	0,001155	0,001155	0,001155	0,001283	0,001444	0,001604	0,001925	0,002246
NO33	0,007380	0,007219	0,006738	0,006417	0,006096	0,005775	0,005775	0,005775	0,006417	0,007219	0,008021	0,009626	0,011230
Soma	0,119549	0,116950	0,109153	0,103955	0,098758	0,093560	0,093560	0,093560	0,103955	0,116950	0,129944	0,155933	0,181922

Tabela 4.11 – Potência reactiva horária consumida (MVar)

	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h
NO3	0,001167	0,001141	0,001065	0,001014	0,000964	0,000913	0,000913	0,000913	0,001014	0,001141	0,001268	0,001522	0,001775
NO5	0,005250	0,005136	0,004793	0,004565	0,004337	0,004109	0,004109	0,004109	0,004565	0,005136	0,005706	0,006848	0,007989
NO6	0,001167	0,001141	0,001065	0,001014	0,000964	0,000913	0,000913	0,000913	0,001014	0,001141	0,001268	0,001522	0,001775
NO7	0,001750	0,001712	0,001598	0,001522	0,001446	0,001370	0,001370	0,001370	0,001522	0,001712	0,001902	0,002283	0,002663
NO8	0,001167	0,001141	0,001065	0,001014	0,000964	0,000913	0,000913	0,000913	0,001014	0,001141	0,001268	0,001522	0,001775
NO9	0,001750	0,001712	0,001598	0,001522	0,001446	0,001370	0,001370	0,001370	0,001522	0,001712	0,001902	0,002283	0,002663
NO10	0,000583	0,000571	0,000533	0,000507	0,000482	0,000457	0,000457	0,000457	0,000507	0,000571	0,000634	0,000761	0,000888
NO11	0,004667	0,004565	0,004261	0,004058	0,003855	0,003652	0,003652	0,003652	0,004058	0,004565	0,005072	0,006087	0,007101
NO12	0,001167	0,001141	0,001065	0,001014	0,000964	0,000913	0,000913	0,000913	0,001014	0,001141	0,001268	0,001522	0,001775
NO13	0,001167	0,001141	0,001065	0,001014	0,000964	0,000913	0,000913	0,000913	0,001014	0,001141	0,001268	0,001522	0,001775
NO15	0,001167	0,001141	0,001065	0,001014	0,000964	0,000913	0,000913	0,000913	0,001014	0,001141	0,001268	0,001522	0,001775
NO16	0,001750	0,001712	0,001598	0,001522	0,001446	0,001370	0,001370	0,001370	0,001522	0,001712	0,001902	0,002283	0,002663
NO17	0,001167	0,001141	0,001065	0,001014	0,000964	0,000913	0,000913	0,000913	0,001014	0,001141	0,001268	0,001522	0,001775
NO18	0,000583	0,000571	0,000533	0,000507	0,000482	0,000457	0,000457	0,000457	0,000507	0,000571	0,000634	0,000761	0,000888
NO19	0,000583	0,000571	0,000533	0,000507	0,000482	0,000457	0,000457	0,000457	0,000507	0,000571	0,000634	0,000761	0,000888
NO20	0,001167	0,001141	0,001065	0,001014	0,000964	0,000913	0,000913	0,000913	0,001014	0,001141	0,001268	0,001522	0,001775
NO21	0,005833	0,005706	0,005326	0,005072	0,004819	0,004565	0,004565	0,004565	0,005072	0,005706	0,006340	0,007608	0,008877
NO23	0,002333	0,002283	0,002130	0,002029	0,001927	0,001826	0,001826	0,001826	0,002029	0,002283	0,002536	0,003043	0,003551
NO24	0,003500	0,003424	0,003196	0,003043	0,002891	0,002739	0,002739	0,002739	0,003043	0,003424	0,003804	0,004565	0,005326
NO26	0,002333	0,002283	0,002130	0,002029	0,001927	0,001826	0,001826	0,001826	0,002029	0,002283	0,002536	0,003043	0,003551
NO27	0,001167	0,001141	0,001065	0,001014	0,000964	0,000913	0,000913	0,000913	0,001014	0,001141	0,001268	0,001522	0,001775
NO28	0,002333	0,002283	0,002130	0,002029	0,001927	0,001826	0,001826	0,001826	0,002029	0,002283	0,002536	0,003043	0,003551
NO32	0,000583	0,000571	0,000533	0,000507	0,000482	0,000457	0,000457	0,000457	0,000507	0,000571	0,000634	0,000761	0,000888
NO33	0,002917	0,002853	0,002663	0,002536	0,002409	0,002283	0,002283	0,002283	0,002536	0,002853	0,003170	0,003804	0,004438
Soma	0,047249	0,046222	0,043140	0,041086	0,039032	0,036977	0,036977	0,036977	0,041086	0,046222	0,051357	0,061629	0,071900

Depois de introduzidos os valores anteriores o programa apresentou os seguintes resultados:

Tabela 4.12 – Potências horárias necessárias (MW)

	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h
Geração (MW)	0,028014	0,040020	0,070035	0,140070	0,184092	0,196098	0,184092	0,140070	0,076038	0,040020	0,024012	0,016008	0,010005
Consumo (MW)	0,119549	0,116950	0,109153	0,103955	0,098758	0,093560	0,093560	0,093560	0,103955	0,116950	0,129944	0,155933	0,181922
Potência necessária (MW)	0	0	0	0,005700	0,041000	0,052400	0,042900	0,009500	0	0	0	0	0
Consumo + Pot. necessária (MW)	0,119549	0,116950	0,109153	0,109655	0,139758	0,145960	0,136460	0,103060	0,103955	0,116950	0,129944	0,155933	0,181922

Considerámos, então novamente, as duas possibilidades referidas nas versões anteriores. Na primeira, em que é considerado o valor da potência constante necessitamos de uma bateria de $\sum P * \Delta t = (52,4 * 5) * 1h = 262KWh$. Considerando que a potência da bateria pode variar ao longo do tempo, o valor da bateria seria inferior e igual a $\sum P * \Delta t = (5,7 + 41 + 52,4 + 42,9 + 9,5) * 1h = 151,5KWh$.

Podemos observar os resultados das duas alternativas nas imagens seguintes que contêm várias curvas referentes à geração, ao consumo e ao consumo depois de instalada a bateria. Pode-se observar que na alternativa que considera a potência constante existe um intervalo entre as 10h e 11h (e também entre as 15h e 16h, sendo este menos evidente) em que a bateria tem um valor superior ao necessário, existindo assim um desperdício.

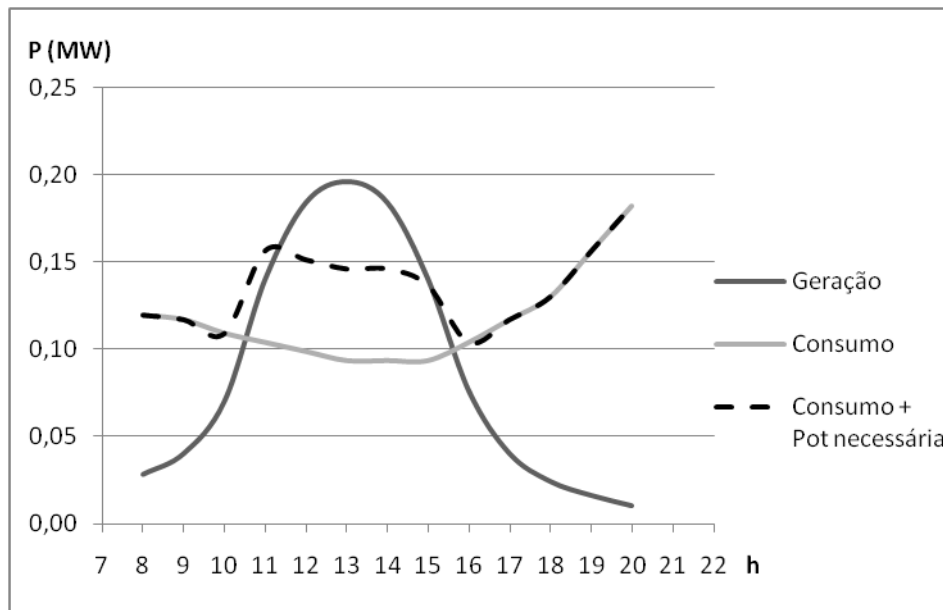


Figura 4.6 - Curvas da potência gerada, consumida e consumida mais a potência necessária da bateria considerando a potência constante

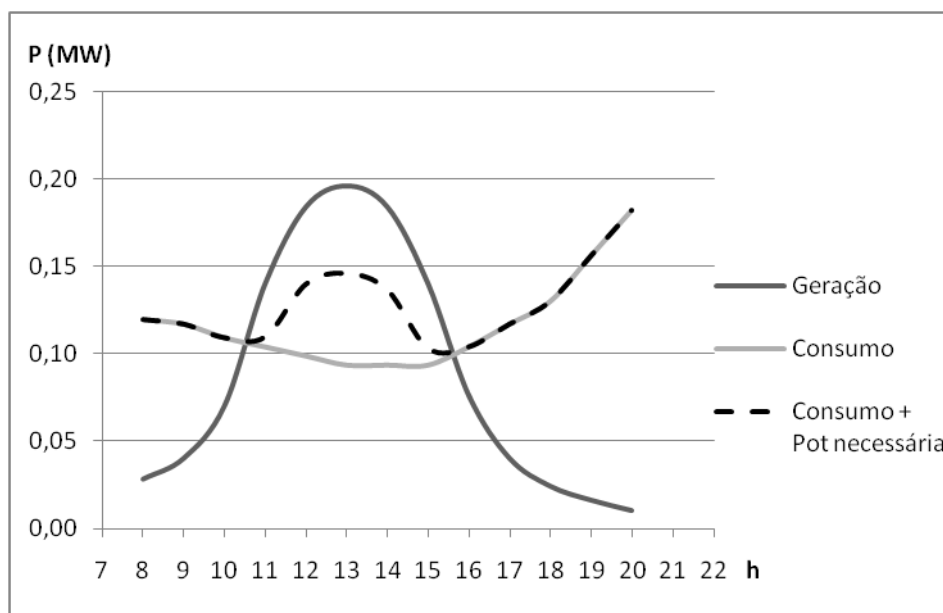


Figura 4.7 - Curvas da potência gerada, consumida e consumida mais a potência necessária da bateria considerando a potência variável

4.2 - Conclusão

O programa desenvolvido permite calcular o valor ótimo de uma bateria a ser aplicada numa rede com sobretensões devidas ao excesso de geração distribuída com o intuito de fazer as tensões voltarem a um limite imposto pelo utilizador.

Após a análise das várias situações apresentadas, utilizando o referido programa, podemos agora afirmar que a aplicação de uma bateria com um valor adequado diminui as

tensões para o interior do intervalo limite, para além de permitir aproveitar a energia que seria desperdiçada, tanto por não ser consumida em certas horas, como pelo facto do trânsito desta energia para a rede provocar sobretensões.

As análises realizadas permitem-nos também afirmar que essa bateria deve ser instalada o mais próximo possível do barramento onde ocorrem valores de sobretensão mais elevados; esta escolha faz com que o valor necessário da bateria que se deve instalar seja mais baixo.

Capítulo 5

Conclusão

Neste capítulo apresentam-se as principais conclusões relativas ao trabalho desenvolvido, tendo em conta os objectivos que o enformaram e os principais contributos que ele poderá dar, procurando identificar, também, algumas perspectivas de desenvolvimento e possibilidades de trabalho futuro.

5.1 - Objectivos alcançados / Principais contributos

O principal objectivo deste trabalho consistiu, tendo em conta o facto de as redes de BT poderem ser redes activas com Microgeração, na identificação de soluções distribuídas de armazenamento de energia que foram dimensionadas com o intuito de evitar a ocorrência de problemas de sobretensão nas redes de BT, geralmente consequência da introdução de um grande volume de Microgeração (que provoca uma produção local muito superior ao consumo) na rede de distribuição. A aplicação de soluções distribuídas de armazenamento de energia em redes de BT, minimizando a ocorrência das situações de sobretensão, permitirá melhorar a exploração da Microgeração (nomeadamente com base em fontes renováveis de produção de energia) e o aproveitamento das suas potencialidades, nomeadamente aumentando as possibilidades de integração da Microgeração nas redes de distribuição (uma vez que actualmente há limites técnicos estipulados para a potência instalada em Microgeração).

Considerando estas linhas orientadoras, o presente trabalho centrou-se na análise de uma Microrede genérica que se encontra interligada à rede de distribuição e que regista um excesso de Microgeração, o que provoca em certas horas um excesso de geração local relativamente ao consumo, excesso que, por sua vez, é transmitido à rede de BT, provocando, em certas situações, a ocorrência de sobretensões.

Tomando por referência as soluções já existentes para o controlo de tensão (revistas no Capítulo 2) e a análise específica da Microrede genérica que se tomou como objecto de estudo, analisou-se e apresentou-se, neste trabalho, uma solução que assegura a manutenção dos valores de tensão nos nós da rede dentro dos limites tecnicamente admissíveis e que consiste na introdução de um sistema de armazenamento otimizado, num dado ponto da rede, que armazenará a energia equivalente à potência excedente (relativamente ao

consumo) da Microgeração em determinadas horas, para uma posterior utilização. Procedeu-se também à análise da rede quanto ao local mais indicado para a instalação do sistema de armazenamento, testando a sua ligação em diversos locais da rede e analisando as diferenças que daí decorrem a nível da capacidade necessária no sistema de armazenamento. Concluiu-se, desta forma, que o sistema de armazenamento proposto deve ser instalado, na Microrede, o mais próximo possível do nó onde a sobretensão ocorre de forma mais severa, minimizando assim o valor da energia que será necessário armazenar, uma vez que uma maior distância entre o ponto onde está instalado o sistema de armazenamento e o nó que regista problemas de sobretensão mais significativos implicará um sistema de armazenamento com capacidade superior.

Em suma, considerando a formulação do problema de optimização e a metodologia de resolução proposta, bem como as várias análises realizadas relativamente ao comportamento da rede nos cenários considerados, podemos afirmar que a solução proposta pode constituir uma resposta efectiva para o problema de ocorrência de sobretensões devidas ao excesso de penetração de Microgeração na rede de distribuição, permitindo, assim, que toda a energia produzida e que não é consumida no imediato possa ser aproveitada mais tarde. Esta solução para a minimização dos problemas de sobretensão e de desperdício de energia produzida abre, então, novas possibilidades ao aumento da Microgeração e da sua expressividade no contexto da produção de energia, possibilitando a instalação de um maior número de Microgeradores (que actualmente tem de se posicionar dentro dos limites máximos permitidos) e, conseqüentemente, uma maior penetração da Microgeração nas redes de distribuição, podendo tirar-se maior partido das fontes renováveis para produção de energia, especificamente quando estas são tomadas como base para a Microgeração.

5.2 - Perspectiva de trabalhos futuros

Apesar de a solução de armazenamento de energia aqui proposta por forma a garantir a manutenção dos valores de tensão nos nós da rede dentro dos limites tecnicamente admissíveis poder constituir uma resposta efectiva para a ocorrência de problemas de sobretensão, conforme foi sistematizado anteriormente, novos desenvolvimentos a nível da investigação serão necessários e pertinentes, nomeadamente:

- i) Proceder ao estudo económico comparativo do funcionamento da Microrede, aplicando ou não a solução de armazenamento de energia proposta neste trabalho e comparando com outras soluções para o controlo de tensão onde se recorre ao corte de produção, bem como considerando os diversos sistemas de armazenamento disponíveis (numa perspectiva de análise das soluções mais económicas/eficientes);
- ii) Analisar a solução de dimensionamento de sistemas de armazenamento proposta neste trabalho, testando e comparando a aplicação de diferentes sistemas de armazenamento, no que se refere à viabilidade de cada um quanto ao tempo de armazenamento de energia (ou seja, às possíveis diferenças no período de tempo pelo qual a energia pode ser armazenada até que seja, posteriormente, distribuída na Microrede), mas também quanto aos custos associados, procedendo ao estudo económico comparativo da aplicação de diferentes sistemas de armazenamento;
- iii) Analisar a viabilidade de utilização de outros sistemas de armazenamento para além dos referidos no presente trabalho, considerando os conceitos de *Vehicle to Home*

(V2H) e *Vehicle to Grid* (V2G) que vêm a assumir uma posição de destaque na investigação actualmente desenvolvida, podendo fazer sentido estudar e compreender até que ponto cada um deles poderá ser vantajoso na minimização da ocorrência de problemas de sobretensão, ainda que, por exemplo no V2H, seja importante considerar que, nas horas críticas em que geralmente ocorrem problemas de sobretensão, não é também habitual que este tipo de armazenamento esteja ligado à rede nas zonas residenciais (que são os locais onde existe o maior número de Microgeração);

- iv) Proceder ao estudo de soluções de ajuste da potência absorvida pelo sistema de armazenamento nas horas de menor radiação solar, uma vez que no presente estudo o sistema de armazenamento foi apenas dimensionado em potência e capacidade para situações extremas de produção.

Referências

- [1] “Relatório de Progresso Demonstrável de Portugal ao abrigo do Artigo 3(2) do Protocolo de Quioto”, Instituto do Ambiente com a colaboração de Ecoprogresso - Consultores em Ambiente e Desenvolvimento, SA., Junho de 2006.
- [2] Renováveis na Hora. Disponível em <http://www.renovaveisnagora.pt>. Acesso em 1/Junho/2010.
- [3] “Estatísticas Rápidas, Março de 2010”, Direcção Geral de Energia e Geologia. Disponível em <http://www.dgeg.pt>. Acesso em 10/Junho/2010.
- [4] F. S. Teixeira, “Sistema de incentivo à microprodução aguarda revisão”, *Vida Económica*, Nº 1307, pp. 4, 24/Julho/2009.
- [5] “Renewable Energy Scenario to 2040”, European Renewable Energy Council, May 2004. Disponível em <http://www.erec.org>. Acesso em 10/Junho/2010.
- [6] A.G. Madureira & J.A. Peças Lopes, “Coordinated voltage support in distribution networks with distributed generation and microgrids”, *IET Renewable Power Generation*, Vol. 3, Iss. 4, pp. 439-454, 2009.
- [7] J.A. Peças Lopes, C. Moreira & M. Voumvoulakis, “MicroGrids On-Line Security Assessment”, *More Microgrids*, 30/Novembro/2007.
- [8] A.G. Madureira, “Definição de Estratégias de Controlo e Avaliação da Estabilidade em Redes de Baixa Tensão com Microgeração funcionando em Rede Isolada”, *Dissertação de Mestrado, FEUP*, Outubro 2005.
- [9] N. Hatzargyriou, “Microgrids - Large Scale Integration of Micro-Generation to Low Voltage Grids”, *Technical Annex*, May 2002.
- [10] R.H. Lasseter, “MicroGrids”, *Power Engineering Society Winter Meeting*, Agosto de 2002, in *IEEE*, Vol. 1, pp. 305-308.
- [11] J.A. Peças Lopes, C.L. Moreira & A.G. Madureira, “Defining Control Strategies for Analysing MicroGrids Islanded Operation”, *Proceedings on St. Petersburg Power Tech*, Russia, June 2005, in *IEEE*, pp. 27-30.
- [12] K. De Brabandere, A. Woyte, R. Belmans & J. Nijs, “Prevention of inverter voltage tripping in high density PV grids”, *19th EU-PVSEC*, Paris, France, June 2004.
- [13] D.T. Le, K.M. Muttaqi, M. Negnevitsky & G. Ledwich, “Response coordination of distributed generation and tap changers for voltage support”, *Australasian Universities Power Engineering Conference*, 2007.

- [14] P.F. Ribeiro, B.K.Johson, M.L. Crow, A. Ayrsoy & Y. Liu, “Energy storage systems for advanced power applications”, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 89, No. 12, pp. 1744-1756, December 2001.
- [15] S. Suryanarayanan, F. Mancilla-David, J. Mitra & Y. Li, “Achieving the smart grid through customer-driven microgrids supported by energy storage”, *International Conference on Industrial Technlogy*, Chile, in IEEE, pp. 884-890.
- [16] A. Mohd, E. Ortjohann, A. Schmelter, N. Hamsic & D. Morton, “Challenges in integrating distributed energy storage systems into future smart grid”, *International Symposium on Industrial Electronics*, Cambridge, in IEEE, pp. 1627-1632.
- [17] X. Liu & B. Sun, “Microgrids - an integration of renewable energy technologies”, *China International Conference on Electricity Distribution*, in CIGRE 2008, pp. 1-7
- [18] Z. Guoju, T. Xisheng & Q. Zhiping, “Research on battery supercapacitor hybrid storage and its application in Microgrids”, *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, 2010
- [19] C. J. D. Santos, “Aplicação de Conversores Matriciais em Sistemas Fotovoltaicos”, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico de Lisboa, Setembro de 2007.
- [20] V. Miranda & N. Fonseca, “EPSO - best-of-two-worlds meta-heuristic applied to power system problems”, *Proceedings of WCCI'2002 - CEC - World Congress on Computational Intelligence - Conference on Evolutionary Computing*, May/2002.
- [21] V. Miranda, “Computação Evolucionária: uma introdução; versão 2.0”,
- [22] A.G. Madureira & J.A. Peças Lopes, “Coordinated voltage support in distribution networks with distributed generation and microgrids”, *IET Renewable Power Generation*, Vol. 3, Iss. 4, pp.439-454, 2009