

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Redes de Distribuição Ativas

Vitor Manuel Miguel Preto

VERSÃO PROVISÓRIA

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

Orientador: Prof. Doutor Fernando Maciel Barbosa

Janeiro 2012

Resumo

Nos últimos anos os sistemas de distribuição de energia elétrica têm estado em fase de transição. Os sistemas passivos tradicionais com fluxo de energia unidirecional da alta para a baixa tensão tendem a tornar-se redes ativas com fluxo de energia multi-direcional. Esta mudança tem sido impulsionada pela crescente penetração dos diferentes tipos de tecnologias de produção dispersa, nomeadamente as energias renováveis.

O processo de mudança é complexo e requer o abandono de alguns métodos de controlo bem estabelecidos no planeamento e operação dos sistemas. Para que se consiga essa mudança os intervenientes das redes (produtores, reguladores e utilizadores) necessitam de saber e quantificar a relação custo benefício.

O desenho de estratégias de controlo dos sistemas de distribuição ativa eficazes é importante para aumentar a capacidade das redes existentes com a introdução de unidades de produção dispersa, reduzindo a necessidade de reforço das redes. Este cenário obriga a compreender o impacto das estratégias de controlo e gestão de operações e do planeamento dos investimentos em toda a rede, no sentido de aplicar medidas estratégicas essenciais para uma ótima integração das unidades de produção dispersa.

O objetivo desta dissertação é estudar o impacto nas redes de distribuição de fontes de energia dispersa, nomeadamente em relação ao seu planeamento, condução e fiabilidade.

Palavras-chave: Microredes, Produção Dispersa, Redes de Distribuição, Energias Renováveis, Gestão de Redes, Redes Ativas, Microfontes e Mercados de Energia.

Abstract

In the last years the electrical distribution systems have been changing your concept. The traditional passive systems with unidirectional flow of energy from high to low-voltage tend to become active networks with multi-directional energy flow. This change has been driven by increased penetration of different types of distributed generation technologies, renewable energies in particularly.

The process of change is complex and requires the abandonment of some well-established methods of monitoring, planning and operation of systems. In this network change the stakeholders (producers, users and regulators) need to know and quantify the cost-benefit.

The design of control strategies of active effective distribution systems is important to increase the capacity of existing networks with the introduction of distributed generation units reducing the need's for network reinforcements. This scenario requires understanding the impact of control strategies and operations management and investment planning across the network, to implement key strategic actions for optimal integration of distributed production units.

The objective of this dissertation is to study the impact on distribution networks of distributed energy sources, particularly on planning, conduct and reliability.

Key-Words: Microgrids, Distribution Generation, Distribution Networks, Renewable Energies, Networks Management, Active Networks, Microsources and Energy Markets.

Agradecimentos

A realização desta dissertação exigiu dedicação e algum sacrifício pessoal, devido às adversidades que vão surgindo ao longo do trabalho.

Neste sentido, gostaria de prestar os meus sinceros agradecimentos a algumas pessoas que de alguma forma contribuíram para a realização desta dissertação.

Um agradecimento especial ao meu orientador, Prof. Doutor Fernando Maciel Barbosa, pela sua disponibilidade, apoio, colaboração e valiosos contributos científicos.

À minha namorada, Cátia Macias, um agradecimento por todo o apoio e disponibilidade com que acompanhou este trabalho.

Por fim, mas não menos importante, quero agradecer à minha família pelo carinho e apoio demonstrado.

Índice

Resumo	iii
Abstract	v
Agradecimentos	vii
Índice	ix
Lista de figuras	xii
Lista de tabelas	xiv
Abreviaturas e Símbolos	xv
Capítulo 1	1
Introdução 1	
1.1. Objetivos da Dissertação	2
1.2. Estrutura da Dissertação	2
Capítulo 2	3
Evolução das Redes de Distribuição e Mudança de Paradigma	3
2.1. Desafios da Produção Dispersa e Microredes	5
2.2. Razões para a Produção Dispersa	5
2.3. Conceito de Microrede	6
2.4. Mudança de Paradigma	7
2.5. Tendências e Desafios	10
2.6. Consumidor como Protagonista da Mudança	11
2.7. Experiências e Resultados em Portugal	12
2.8. Conclusão	15
Capítulo 3	17
Fontes de Produção Dispersa	17
3.1. Sistemas de Cogeração Combinados (CHP)	18
3.2. Sistemas Micro-Cogeração (Micro-CHP)	18
3.3. Sistemas de Energia Eólica	19
3.4. Sistemas Fotovoltaicos (PV)	20
3.5. Micro-hídricas	22
3.6. Outras Fontes de Energia Renovável	22
3.7. Sistemas de Armazenamento	23

3.8.	Conclusão.....	23
Capítulo 4		25
Microredes e Gestão de Redes de Distribuição Ativas.....		25
4.1.	Necessidades de Gestão e Controlo para integrar uma Microrede	27
4.1.1.	Controlo da Produção das Microfontes	27
4.1.2.	Controlo de Processos Residenciais.....	28
4.1.3.	Armazenamento de Energia.....	28
4.1.4.	Regulação e Transferência de Carga	29
4.1.5.	Serviços Auxiliares	29
4.2.	Controladores de Microfontes	30
4.2.1.	Controlo de Potência Ativa e Reativa	30
4.2.2.	Controlo da Tensão	31
4.2.3.	Controlo das Necessidades de Armazenamento para o Arranque Súbito de Cargas.....	32
4.2.4.	Controlo da Partilha de Carga através da Relação P-f	32
4.3.	Controlador Central	33
4.3.1.	Módulo de Gestão Energética (EMM)	33
4.3.2.	Módulo de Proteção e Coordenação (PCM)	34
4.3.3.	Informação Necessária ao Funcionamento do CC	35
4.3.4.	Estratégias de Controlo do CC	36
4.4.	Conclusão.....	36
Capítulo 5		39
Impactos de Integração de Produção Dispersa		39
5.1.	Distúrbios na Qualidade da Energia.....	40
5.2.	Consumidores com Cargas Críticas, Tecnologias e Equipamentos para Melhorar a Qualidade de Energia	42
5.3.	Impacto no Planeamento da Rede de Distribuição.....	43
5.4.	Conclusão.....	45
Capítulo 6		47
Análise Económica e Impacto nos Mercados		47
6.1.	Análise Económica das Microredes.....	47
6.1.1.	Principais Questões Económicas das Microredes	48
6.1.2.	Comparação Económica entre microredes e redes tradicionais	48
6.1.3.	Questões emergentes nos aspetos económicos de uma microrede	50
6.1.4.	Questões económicas entre microredes e redes de distribuição	50
6.2.	Participação das Microredes nos Mercados.....	51
6.2.1.	Modelo Regulatório de Reestruturação do Mercado <i>Pool</i>	52
6.2.1.1.	Modelo <i>Pool</i> Simétrico	54
6.2.1.2.	Modelo <i>Pool</i> Assimétrico	56
6.2.1.3.	Mercados Obrigatórios e Voluntários	57
6.2.2.	Modelo Regulatório de Reestruturação do Mercado Bilateral.....	57
6.2.3.	Modelo Regulatório de Reestruturação do Mercado Híbrido	58
6.3.	Conclusão.....	59
Capítulo 7		61
Análise de Casos Práticos.....		61
7.1.	Análise do Funcionamento das Microredes em Sistema Isolado	61
7.1.1.	Configuração dos Sistemas de Estudo	62
7.1.2.	Casos de Estudo	63
7.1.2.1.	Caso de Estudo 1	64
7.1.2.2.	Caso de Estudo 2	64
7.1.2.3.	Caso de Estudo 3	66
7.1.3.	Conclusão.....	69
7.2.	Cenários de Preços de Mercado nas Microredes	69

7.2.1.	Caso de Estudo	70
7.2.1.1.	Caso de Estudo 1	71
7.2.1.2.	Caso de Estudo 2	74
7.2.2.	Conclusão.....	75
Capítulo 8	77
Conclusão e Perspetivas Futuras	77
Referências Bibliográficas	79

Lista de figuras

Figura 2.1 - Sistema Elétrico de Energia Convencional	3
Figura 2.2 - Conexões de Produção Dispersa	4
Figura 2.3 - Conexões de Produção Dispersa	6
Figura 2.4 - Hierarquia tradicional dos Sistemas elétricos	7
Figura 2.5 - Hierarquia futura dos Sistemas elétricos	9
Figura 2.6 - Consumidor como Protagonista da Mudança	11
Figura 2.7 - Número de clientes e peso relativo ao mercado liberalizado.	12
Figura 2.8 - Impacto e resultados do projeto <i>InovCity</i>	14
Figura 2.9 - Mudança de paradigma tecnológico	15
Figura 3.1 - Relação da potência em função da velocidade do vento numa turbina eólica . .	20
Figura 4.1 - Configuração típica de uma microrede	26
Figura 4.2 - Diagrama básico de um controlador de uma microfonte	31
Figura 4.3 - Diagrama de ajuste da V em função da Q dos controladores de tensão	31
Figura 4.4 - Diagrama de relação entre a frequência e a potência ativa para realizar a partilha de carga	32
Figura 5.1 - Distúrbios na qualidade da onda no fornecimento de energia	41
Figura 5.2 - Sistema de distribuição convencional	43
Figura 5.3 - Sistema de distribuição com PD	44
Figura 6.1 - Estrutura e exploração do mercado de energia elétrica baseado no modelo <i>Pool</i>	53
Figura 6.2 - Processo de ordenamento das ofertas do <i>Pool</i> Simétrico	55
Figura 6.3 - Funcionamento de um <i>Pool</i> simétrico ideal	56
Figura 6.4 - Processo de ordenamento das ofertas do <i>Pool</i> Assimétrico	56

Figura 6.5 - Funcionamento de um <i>Pool</i> assimétrico ideal	57
Figura 6.6 - Estrutura e exploração do mercado de energia elétrica baseado no modelo <i>Pool-Bilateral</i> ou <i>Híbrido</i>	59
Figura 7.1 - Sistema 1	62
Figura 7.2 - Sistema 2	62
Figura 7.3 - Sistema 3	63
Figura 7.4 - Análise da tensão e frequência no barramento de 11kV para o gerador GT.	64
Figura 7.5 - Análise da tensão e frequência no barramento de 11kV para o gerador GT#1 <i>Master</i> e GT#2 <i>Slave</i>	65
Figura 7.6 - Análise da tensão e frequência no barramento de 11kV para o gerador GT#1 <i>Master</i> e GT#2 <i>Slave</i> , e o GT#1 desconectado aos 50 segundos	66
Figura 7.7 - Análise da tensão e frequência no barramento de 11kV para o gerador GT#1 <i>Master</i> e GT#2 <i>Slave</i> interligados e o GT#3 <i>Isolado</i>	67
Figura 7.8 - Análise da tensão e frequência no barramento de 11kV para o gerador GT#1 <i>Master</i> e GT#2 e GT#3 <i>Slave</i> todos interligados	67
Figura 7.9 - Análise da tensão e frequência no barramento de 11kV para o gerador GT#1 <i>Master-Slave</i> , GT#2 <i>Slave-Master</i> e GT#3 <i>Slave</i> todos interligados	68
Figura 7.10 - Análise da tensão e frequência no barramento de 11kV para o gerador GT#1 <i>Master-Slave</i> , GT#2 <i>Slave-Master-Slave</i> e GT#3 <i>Slave-Master</i> todos interligados	69
Figura 7.11 - Estrutura do modelo de mercado em estudo	70
Figura 7.12 - Relação Linear entre a curva da oferta e da procura	71
Figura 7.13 - Curvas de fornecimento individual e combinado dos geradores G1, G2 e G3 ..	72
Figura 7.14 - Comparação do MPC com a licitação com os geradores renováveis sujeitos ou não sujeitos a licitação	73
Figura 7.15 - Curva de oferta combinada e procura individual e combinada	74
Figura 7.16 - Comparação do MPC com a licitação com os geradores renováveis sujeitos ou não sujeitos a licitação	74

Lista de tabelas

Tabela 3.1 – Comparação das tecnologias de módulos fotovoltaicos baseado em dados de radiação solar do Reino Unido e com uma inclinação de 30° e orientação a sul dos módulos	22
Tabela 7.1 – Parâmetros de licitação	71
Tabela 7.2 – Licitação para a primeira análise	72
Tabela 7.3 – Licitação para a segunda análise	72
Tabela 7.4 – Licitação para a terceira análise	73
Tabela 7.5 – Licitação das duas análises	75

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas

AC	Corrente Alternada
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
CC	Controlador Central de Microredes
CHP	Sistemas de Cogeração Combinados (Produção calor e eletricidade)
DC	Corrente Contínua
EMM	Módulo de Gestão Energética
ERSE	Entidade Reguladores dos Serviços Energéticos
MC	Controlador de Microfontes e Dispositivos de Armazenamento
MCP	Preço de Mercado
MT	Média Tensão
OM	Operador do Mercado
OS	Operador do Sistema
PCM	Módulo de Proteção e Coordenação
PD	Produção Dispersa
PEI	Interfaces Eletrónicas de Potência
PNAC	Programa Nacional para as Alterações Climáticas
PNAEE	Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética
PPEC	Plano de Promoção da Eficiência no Consumo
PV	Sistemas Fotovoltaicos
RED	Recursos de Energias Distribuídos
TVSS	Proteção Contra Picos de Tensão
UE	União Europeia
UPS	Unidade Ininterrupta de Potência

Capítulo 1

Introdução

Nas últimas décadas o interesse na produção dispersa intensificou-se, devido aos desenvolvimentos técnicos dos sistemas de produção de energia, juntamente com as preocupações ambientais e as novas políticas energéticas. Inicialmente, a ligação de fontes de produção dispersa estava direcionada para os níveis de média (MT) e alta tensão (AT), mas o desenvolvimento das tecnologias de mini e microgeração, a redução dos custos e os incentivos governamentais possibilitaram o crescimento das ligações de fontes de produção dispersa nas redes de baixa tensão (BT).

Em Portugal já existe legislação específica para a integração de pequenas fontes de produção dispersa. Essa legislação pretende incentivar o investimento na mini e microgeração através de tarifas de remuneração subsidiadas. A simples integração deste tipo de fontes na rede de BT e MT pode resultar em problemas técnicos de funcionamento, como tensões elevadas, variações de tensão, sobrecargas e níveis elevados de falhas, quando essa integração é feita em média e grande escala. O conceito de microrede ganhou relevo com o aumento deste tipo de integração nas redes porque possibilitou o controlo e a gestão do funcionamento da rede, prevenindo os problemas técnicos que poderiam surgir e potencializando os benefícios associados à produção dispersa.

Uma microrede é uma rede de distribuição local em BT com um conceito de modularidade, que associa fontes de produção dispersa de pequenas potências, cargas e alguns dispositivos de armazenamento, com um funcionamento coordenado. Pode operar em dois modos distintos, ligada à rede ou isolada da rede. No modo de funcionamento ligada à rede, a microrede está interligada com a rede de distribuição, à qual compra e vende energia e também fornece serviços auxiliares. No modo isolado, a microrede funciona isolada da rede de distribuição e utiliza os recursos locais, regulando a potência e frequência para assegurar o seu funcionamento e, no caso de necessidade, agendando ou deslastrando cargas não prioritárias.

1.1. Objetivos da Dissertação

O objetivo desta dissertação é estudar o impacto nas redes de distribuição de fontes de energia dispersa, nomeadamente em relação ao seu planeamento, condução e fiabilidade.

Esta análise consiste em avaliar os impactos das fontes de produção de energia dispersa, analisar a estrutura e comportamento dos sistemas de controlo e gestão das microrredes e na análise dos comportamentos dos mercados de energia.

1.2. Estrutura da Dissertação

A dissertação está estruturada sob a forma de 8 capítulos. O presente capítulo faz uma introdução ao tema e uma apresentação dos objetivos e estrutura da dissertação.

No capítulo 2 são abordados os aspetos gerais da evolução das redes de distribuição e a mudança de paradigma.

No capítulo 3 é abordado o tema das fontes de produção dispersa, com uma descrição de cada um dos tipos, o seu funcionamento e aplicação.

No capítulo 4 são abordadas as necessidades de gestão e controlo de uma microrrede e são descritos os tipos de controladores e o seu funcionamento e aplicação.

No capítulo 5 é abordado o tema do impacto das fontes de produção dispersa nas microrredes ao nível da qualidade e fiabilidade e também na estrutura da rede.

No capítulo 6 são abordados os temas da análise económica das microrredes e da participação das microrredes nos mercados.

No capítulo 7 são analisados dois casos práticos, um sobre o funcionamento das microrredes em sistema isolado e outro sobre os cenários de preços de mercado nas microrredes.

Por último, no capítulo 8 apresentam-se as principais conclusões e as perspetivas futuras de evolução das microrredes.

Capítulo 2

Evolução das Redes de Distribuição e Mudança de Paradigma

Nos primeiros tempos de produção e fornecimento de eletricidade, cada cidade tinha a sua pequena fonte de produção de energia elétrica para suprir algumas das suas necessidades de cargas locais. A evolução e modernização dos sistemas elétricos de energia, durante os últimos anos, criou um sistema de distribuição baseado em produção de energia centralizada, com grandes centrais a carvão, hidroelétricas, nucleares e a petróleo.

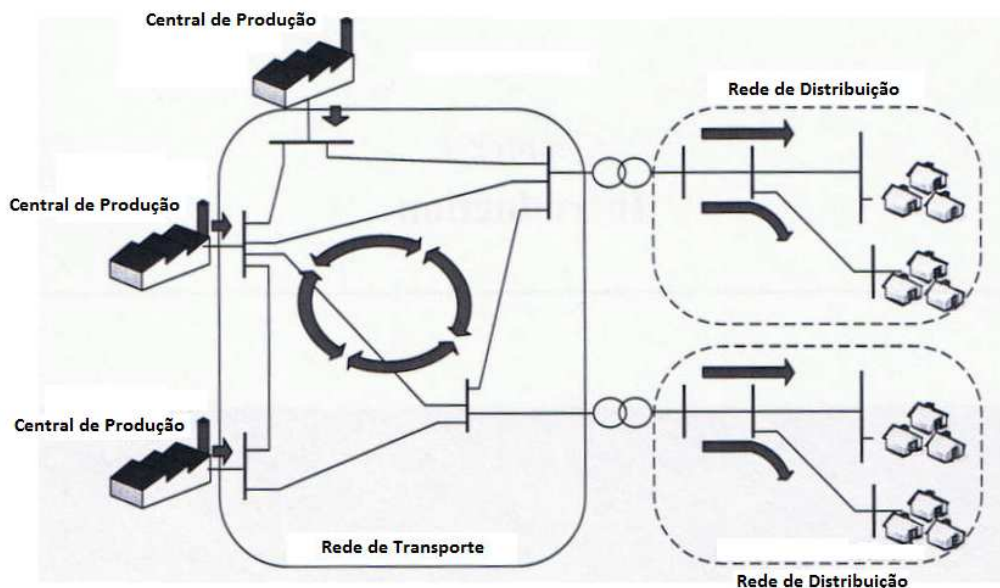


Figura 2.1 - Sistema Elétrico de Energia Convencional (1).

Os geradores destas centrais atingem potências instaladas superiores a 1000 MW e tensões na ordem dos 25kV, que por meio de transformadores de alta tensão elevam a tensão para 400 kV na Europa e 750 kV na América do Norte e China para ser transportada por longas distâncias até aos locais de consumo, sendo entregues aos utilizadores por uma série de

transformações de redução da tensão. Este sistema passivo está limitado a um determinado número de centros de produção para garantir o correto funcionamento.

No início dos anos 90 intensificou-se a integração dos centros de produção em vários locais da rede de distribuição, reforçando, assim, o conceito de Produção Dispersa (PD) e a ideia da utilização dos recursos de energias distribuídos (RED).

A PD pode ser conectada em vários níveis de tensão da rede de distribuição desde 120/230 V até 150 kV. Os geradores mais pequenos são os que podem ser conectados à rede de distribuição de Baixa Tensão (BT), mas também existe a possibilidade de conectar geradores de potências superiores à rede de distribuição, quer em Média Tensão (MT) como em Alta Tensão (AT).

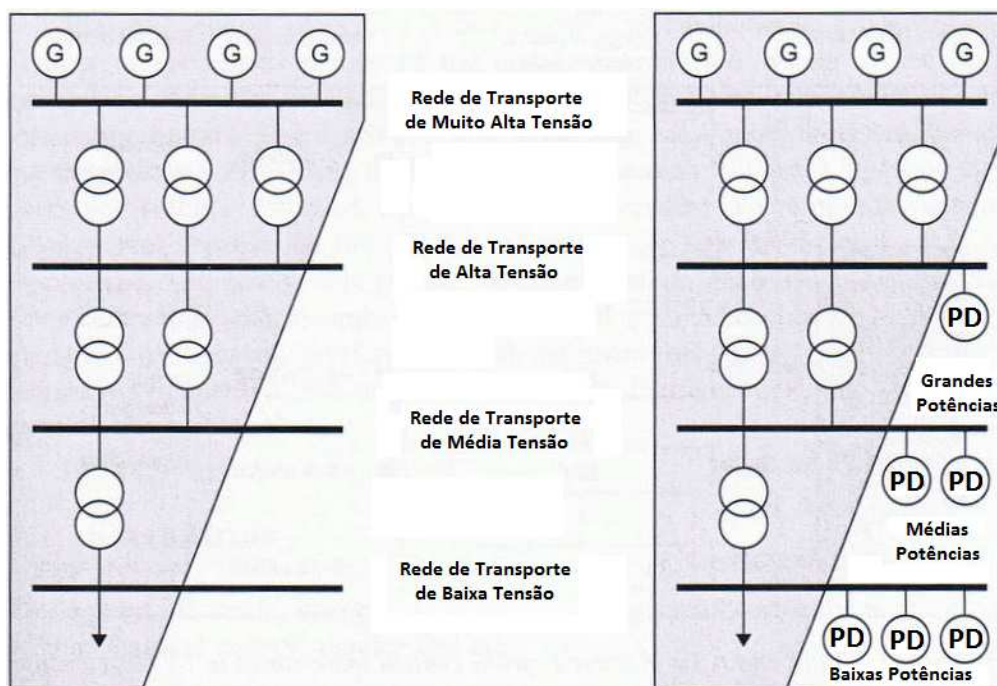


Figura 2.2 - Conexões de Produção Dispersa (1).

A conexão de PD às redes de distribuição leva a uma série de desafios porque as redes de distribuição convencionais foram desenhadas e dimensionadas para alimentar as cargas com um fluxo de energia unidirecional a partir da AT para a BT. As redes de distribuição convencionais são passivas, com poucas análises de medição e com um controlo ativo muito limitado, além de possuírem poucas opções de operação e controlo pelos operadores do sistema.

A geração distribuída implica uma gestão equilibrada do fornecimento elétrico segundo a segundo, tem um fluxo de energia bidirecional, oferece, tal como as redes convencionais, energia elétrica, controlo de tensão, controlo de frequência, reservas e funcionamento em vazio de geradores, o que é essencial para o funcionamento e estabilidade dos sistemas de energia. Proporciona, também, alguns serviços auxiliares e modos de funcionamento para manter o sistema elétrico funcional e com maior garantia de fiabilidade e continuidade de serviço (2).

2.1. Desafios da Produção Dispersa e Microredes

Por todo o mundo os sistemas convencionais de produção de energia revelam um problema gradual devido à acelerada diminuição dos recursos fósseis, da matéria-prima para a produção de energia, do impacto ambiental e do nível de poluição associado.

Estes problemas levaram a uma nova ideologia de produção de energia, a produção dispersa, uma produção local na rede de distribuição em níveis de tensão inferiores, recorrendo a fontes de produção não convencionais (cogeração, resíduos sólidos urbanos, gás natural) e energias renováveis (biogás, energia eólica, fotovoltaica, ondas e marés, *fuel cells*, microturbinas).

A integração de PD implica que a rede de distribuição evolua de uma rede passiva para uma rede ativa. Este tipo de produção é geralmente inferior a 50 MW, não é centralizada e as tensões de conexão variam entre 230 V e 145 kV (3).

2.2. Razões para a Produção Dispersa

As razões para o aparecimento da PD devem-se, para além da acelerada diminuição dos recursos fósseis e da elevada poluição, à operacionalidade estática das redes exigentes, à elevada quantidade de infraestruturas físicas para o transporte de energia em longas distâncias e uma quantidade de benefícios associados à geração distribuída.

Descrevem-se a seguir alguns dos benefícios da PD relativamente aos sistemas convencionais (3):

- Devido ao rápido crescimento das cargas os combustíveis fósseis entraram em esgotamento num horizonte temporal mais curto, o que obriga a encontrar alternativas para não esgotar as reservas. A integração no sistema elétrico de sistemas de produção não convencionais e de energias renováveis pode ser uma alternativa;
- A redução da poluição ambiental e preocupação relativa ao aquecimento global coloca os recursos renováveis em vantagem sobre os recursos fósseis. O protocolo de Quioto da União Europeia (UE), que define a redução das emissões dos gases de efeito de estufa, obriga os países que o assinaram a tomarem medidas que permitam essa redução, pelo que as energias renováveis e a utilização racional de energia são essenciais para atingir essas metas;
- A PD permite um melhor aproveitamento das centrais de cogeração. Além da produção de eletricidade, também permite aproveitar a energia térmica, resultante do processo, para utilizações industriais, dado que as centrais deixam de estar a grandes distâncias dos centros de consumo. Esta situação leva ao incremento da eficiência das centrais de produção, reduzindo as perdas de transporte, os custos, e também a poluição térmica do ambiente;
- A necessidade geográfica de consumo de energia geralmente não é coincidente com os centros produtores. As fontes de produção dispersa vêm alterar este conceito, dado que são instaladas próximas dos consumidores, reduzindo perdas e custos, e gerando emprego local;

- A operação isolada ou interligada da rede deste tipo de fontes de PD irá trazer maior flexibilidade e qualidade no fornecimento de energia.

Na resposta às alterações climáticas muitos governos definiram metas ambiciosas no incremento da utilização de energias renováveis e na redução das emissões de gases de efeito de estufa pela produção de energia. É o caso da UE com uma meta de mais 20% de energias renováveis até 2020 e a Califórnia 33% até ao mesmo ano.

2.3. Conceito de Microrede

As microrredes são pequenas redes de distribuição com um determinado número de cargas locais e com a possibilidade de integração de pequenas fontes de PD. Uma microrede é essencialmente uma rede de distribuição ativa porque integra mutuamente fontes de PD e diferentes cargas no nível de tensão de distribuição. Os geradores ou as microfontes integradas nas microrredes são geralmente energias renováveis e fontes não convencionais integradas em conjunto para gerar energia no nível de tensão de distribuição. A nível operacional estas fontes de produção têm de ser instaladas com Interfaces Eletrónicas de Potência (PEI) e controladores para garantir a flexibilidade necessária para assegurar a sua integração no sistema e manter o nível de qualidade de fornecimento exigido.

Uma das características distintivas das microrredes é a capacidade de poderem operar interligadas com a rede de distribuição de média e baixa tensão local e/ou de forma isolada. A operação das microrredes em rede isolada consiste num modo de operação em emergência e requer a implementação de estratégias de controlo específicas.



Figura 2.3 - Conexões de Produção Dispersa (4).

As grandes diferenças entre as microrredes e as redes convencionais são:

- As microfontes são muito mais pequenas e de menor capacidade que os geradores convencionais;
- A produção gerada pelas microfontes em média ou baixa tensão pode ser fornecida diretamente às cargas;
- As microfontes são geralmente instaladas próximas dos consumidores, garantindo uma redução das perdas e um fornecimento mais eficiente, com tensões e frequências adequadas.

As características técnicas de uma microrede tornam possível o fornecimento de energia em áreas remotas, onde o fornecimento de energia a partir da rede de distribuição é difícil, devido à tipologia do terreno ou à frequência de distúrbios climáticos extremos.

Do ponto de vista da rede de distribuição a microrede pode ser gerida e considerada como uma carga, com a possibilidade de funcionar integrada ou isolada, e do ponto de vista dos utilizadores/consumidores a microrede é benéfica para a região porque terá capacidade para satisfazer as suas necessidades com melhor qualidade e fiabilidade, reduzindo perdas e a poluição.

Para se poder implementar as microredes com um funcionamento viável e regulado é necessário assegurar várias questões técnicas e económicas. É também necessário um maior aprofundamento e investigação para se conseguir uma gestão em tempo real e garantir o funcionamento seguro em sistema isolado.

2.4. Mudança de Paradigma

Tradicionalmente, os sistemas elétricos de energia surgiram baseados numa estrutura hierarquizada. Os fluxos de energia são unidirecionais. Sempre de níveis superiores de tensão para níveis inferiores.

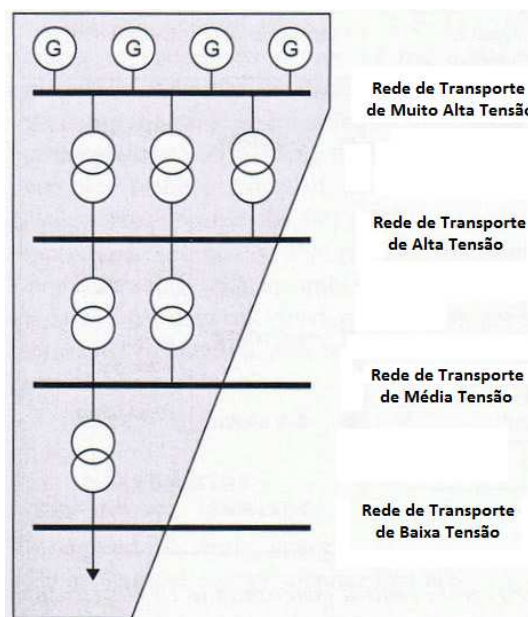


Figura 2.4 - Hierarquia tradicional dos Sistemas elétricos (1).

Atualmente a principal função das redes de distribuição centra-se na alimentação de consumidores finais. O planeamento da rede é baseado em critérios de qualidade de fornecimento a assegurar em situações severas. Esse planeamento é feito exclusivamente em

função da carga. Nesse planeamento não é considerada a integração de produção dispersa e apenas são realizados investimentos no sentido de suportar o crescimento anual de ponta.

A escassez dos produtos petrolíferos e a necessidade de reduzir as emissões de CO₂, para enfrentar a ameaça das alterações climáticas, originaram um aumento substancial na exploração dos recursos renováveis endógenos para produção de eletricidade, nomeadamente nos países da UE, aos quais foram fixadas metas ambiciosas para o horizonte temporal de 2020. Simultaneamente, a indústria ligada ao sector elétrico tem vindo a sofrer alterações consideráveis, resultantes da introdução de conceitos de mercados nos domínios técnicos e comercial da operação do sistema, o que requer uma maior eficiência de exploração (5).

Os principais objetivos governamentais consistem na redução de agentes poluentes (emissões de CO₂ e NO_x), aumento da eficiência energética e na diversificação das fontes de produção de energia com a utilização de energias renováveis. Na UE os objetivos definidos para 2020 consistem na redução dos gases efeito de estufa em 20%, no aumento da eficiência energética em 20% e promover a utilização de energias renováveis de tal forma que o seu peso no conjunto energético global atinja os 20%.

Para atingir esses objetivos será necessária uma exploração em larga escala de recursos energéticos renováveis, envolvendo a construção de grandes parques eólicos e centrais hidroelétricas e a exploração dos recursos energéticos renováveis distribuídos geograficamente pelo território. Esta última abordagem implica a ligação de um grande número de unidade de produção de eletricidade, distribuídas sobre as redes de MT e BT. A ligação das unidades de microgeração sobre as redes de BT, em conjunto com o controlo da procura, dará origem a um novo tipo de agente - a Microrede (5).

Num cenário de massificação de ligação às redes de unidades de produção distribuída será necessário desenvolver conceitos mais ambiciosos de controlo e gestão das redes envolvendo a gestão ativa das redes de distribuição. A integração de dispositivos de armazenamento e unidades de produção distribuída deve ser controlada de uma forma coordenada no sentido de melhorar a eficiência global das redes e para garantir a qualidade da eletricidade fornecida e as condições de operação, tornando assim a rede elétrica numa rede inteligente, usualmente chamada *SmartGrid* (5).

O armazenamento de energia e a gestão ativa de carga são a chave para assegurar o sucesso da implementação deste novo paradigma, onde as energias renováveis terão uma contribuição de relevo para a produção de eletricidade. De facto, o papel do armazenamento é muito importante, dado que irá permitir transferir excessos de energia renovável, eventualmente disponível nas horas de baixo consumo, para horas de ponta. As centrais hidrelétricas com capacidade de bombagem são neste contexto agentes importantes, devido ao grau de maturidade das tecnologias utilizadas e ao grande potencial de armazenamento que proporcionam (5).

O desenvolvimento destes novos conceitos passa também por dar maior poder aos consumidores, que poderão participar na gestão do sistema em ambiente de mercado. Tal significa que os consumidores tornar-se-ão cada vez mais, agentes ativos, respondendo a sinais económicos (como o preço da energia elétrica) e serão capazes de fornecer serviços recorrendo a mecanismos de gestão de procura, podendo ajudar na resolução de situações críticas de exploração. A telecontagem inteligente, *smart metering*, servirá como plataforma para alavancagem destes conceitos (5).

O desenvolvimento dos conceitos de *SmartGrids* implicará que seja seguida uma abordagem estruturada, envolvendo nomeadamente:

Evolução das Redes de Distribuição e Mudança de Paradigma

- A definição de novas arquiteturas de gestão e controlo distribuídas, integrando conceitos como os da Microrede e da Central Virtual;
- A definição de procedimentos de controlo e funcionalidades avançadas de gestão, que integrem de forma coordenada a Produção Distribuída, dispositivos de armazenamento e cargas controláveis ao nível das redes de distribuição;
- O desenvolvimento de procedimentos de gestão capazes de lidar, a um nível centralizado, com a intermitência da produção (por exemplo, ferramentas de previsão eólica);
- O desenvolvimento de novos esquemas regulatórios que promovam a integração dos Recursos Energéticos Distribuídos e a implementação dos conceitos de *SmartGrid*.

De referir que os sistemas elétricos de energia encontram-se à beira de enfrentar um novo grande desafio e uma oportunidade: a futura integração massiva de veículos automóveis híbridos elétricos ou puramente elétricos cujo carregamento deverá ser assegurado pela rede elétrica existente. Os veículos elétricos são, de um ponto de vista elétrico, cargas distribuídas e controláveis e ainda dispositivos de armazenamento. Embora se espere que a massificação dos veículos elétricos só venha a acontecer num horizonte temporal de médio / longo prazo, torna-se necessário desde já identificar e definir medidas preventivas, para que os problemas operacionais que possam advir desta integração não constituam situações críticas (5).

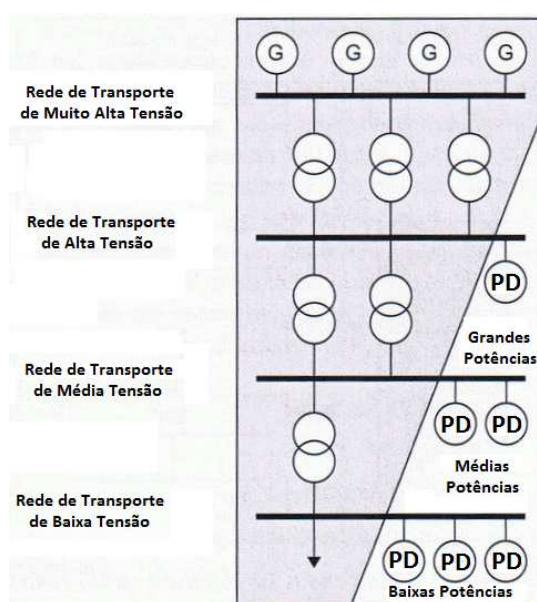


Figura 2.5 - Hierarquia futura dos Sistemas elétricos (1).

A indústria ligada ao ramo de energia elétrica defronta-se assim com um vasto conjunto de oportunidades que só poderão concretizar-se de forma bem-sucedida através da criação de fortes ligações com Universidades e Instituições I&D que assegurem a qualidade e a robustez das soluções desenvolvidas. Tal permitirá a criação de emprego altamente qualificado que irá aumentar o bem-estar social. Em Portugal, as instituições I&D e as Universidades desenvolveram nos últimos anos um conjunto de competências de reconhecida qualidade internacional em nichos tecnológicos ligados à integração de energias renováveis

nas redes elétricas, que tem sido utilizado em parte pela indústria Portuguesa e que pode e deve agora ser explorado mais intensamente para promover um desenvolvimento económico sustentado nestes domínios (5).

2.5. Tendências e Desafios

As políticas energéticas Europeias têm-se baseado na competitividade, sustentabilidade ambiental e social e segurança do abastecimento. Em Portugal surgiu um novo impulso para a construção do mercado interno de eletricidade e gás baseado no seguinte:

- Reforço e harmonização dos poderes das entidades reguladoras através do reforço da independência, cooperar em questões transfronteiriças, aproveitar tarifas de transporte e distribuição, monitorizar o nível de transparência e preços nos mercados, emitir decisões vinculativas sobre empresas reguladas, impor sanções e contribuir para a proteção dos clientes vulneráveis;
- Promoção da concorrência e da transparência dos mercados através da criação de mecanismos eficazes de regulação e supervisão, acesso aos registos de todas as transações dos últimos 5 anos e a separação de imagens entre os operadores da rede de distribuição e os comercializadores do mesmo grupo empresarial;
- Garantia de um elevado grau de proteção aos consumidores através das obrigações de serviço público, conceito de cliente vulnerável, balcão único e mecanismo independente para tratamento de reclamações e resolução de conflitos;
- Criação da agência de cooperação dos reguladores de energia através da definição de orientações relativamente às condições de acesso à rede para o comércio transfronteiriço de eletricidade e a emissão de pareceres e recomendações dirigidas aos operadores de rede de transporte e acompanhar a execução de projetos destinados a aumentar a capacidade de integração.

Para garantir a sustentabilidade, a segurança de abastecimento e a competitividade foram estabelecidos objetivos para 2020 na UE, os quais em Portugal se traduzem em metas ainda mais ambiciosas. Os principais objetivos a atingir em Portugal consistem:

- Reduzir a dependência energética de Portugal (31% da energia final produzida a partir de recursos endógenos), diversificar as fontes de produção energética e reforçar as interligações com as redes europeias;
- Cumprir os compromissos nacionais assumidos no contexto das políticas europeias de combate às alterações climáticas;
- Estimular a concorrência nos mercados de energia através da eliminação gradual e progressiva das tarifas reguladas;
- Reforçar a capacidade instalada na produção de eletricidade a partir de fontes renováveis;
- Promover a eficiência energética;
- Promover o desenvolvimento da rede de carregamento de veículos elétricos de âmbito nacional;
- Promover a disseminação de veículos elétricos;
- Promover e apoiar projetos-piloto de redes inteligentes.

Para cumprir todos estes objetivos será necessário alterar o paradigma com o intuito de aumentar a satisfação das necessidades de energia elétrica da sociedade. Essa atuação deverá ser efetuada do lado da oferta e da procura. No lado da oferta terão de ser efetuados mais investimentos em fontes de produção e nas redes, o que implica custos elevados e tempos de atuação longos. No lado da procura terão de ser feitos investimentos em eficiência no consumo e na gestão da procura (*Demand Side Management*), o que implica custos reduzidos e um tempo de atuação menor (6).

2.6. Consumidor como Protagonista da Mudança

O novo paradigma implica uma atuação reforçada das entidades reguladoras, de modo a assegurar que os consumidores possam beneficiar das novas condições de funcionamento dos mercados de eletricidade e de gás natural. Em Portugal a ERSE decidiu avançar com um conjunto de iniciativas para que os consumidores adquiram as competências necessárias para se posicionarem como protagonistas da mudança, apresentando-se como:

- Veículo de promoção e de dinamização de uma pluralidade de competências pessoais e profissionais junto de agentes e consumidores do sector da energia e organizações da sociedade civil;
- Meio de transmissão de conhecimento útil ao bom funcionamento do sector da energia, ao aumento da eficiência energética e à disseminação de boas práticas e comportamentos da boa utilização da energia.



Figura 2.6 - Consumidor como Protagonista da Mudança (6).

A relação da ERSE com os consumidores e as suas associações representativas passaram a incluir e a desenvolver novas dimensões conceptuais, a saber:

- Contribuição para a coesão e inclusão sócio cultural da sociedade na dimensão energética;

- Atuação descentralizada e de proximidade aos consumidores;
- Desenvolvimento do trabalho colaborativo estruturado em parcerias e redes;
- Estabelecimento de parcerias com entidades do sector energético e organismos da sociedade civil, enquanto instrumentos de cooperação e veículos de informação e formação;
- Estabelecimento de uma cultura de partilha de conhecimento e complementaridade de competências e sensibilidades entre a ERSE e os parceiros;
- Contribuição para o aumento da “capacitação” do consumidor de energia na defesa dos seus direitos e interesses e na promoção da sustentabilidade energética;
- Descodificação da linguagem tecnocrática da regulação, enquanto atitude pedagógica de comunicação (6).

2.7. Experiências e Resultados em Portugal

Algumas das experiências realizadas em Portugal pela ERSE consistiram na escolha do fornecedor de energia por parte do consumidor, informação e formação do consumidor, eficiência energética e investimento inteligente.

Escolha do Fornecedor de Energia - Todos os consumidores de eletricidade e gás natural podem escolher livremente o seu fornecedor, sendo que os procedimentos da mudança de comercializador devem ser aprovados pela ERSE. Esta mudança não implica custos para o consumidor, a troca pode ser efetuada eletronicamente e os tempos médios de resposta à mudança são de, aproximadamente, 5 dias úteis (6).

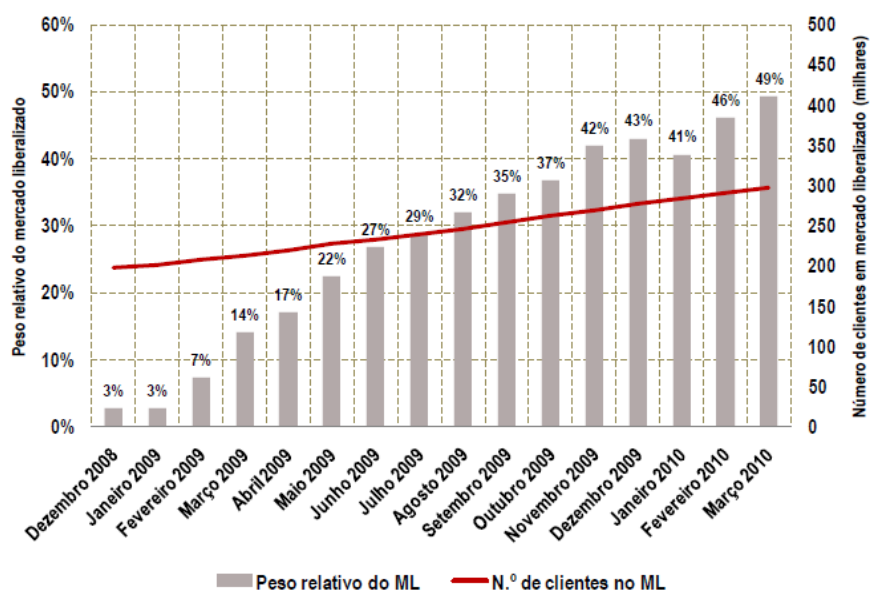


Figura 2.7 - Número de clientes e peso relativo ao mercado liberalizado (6).

Informação e Formação do Consumidor - A ERSE criou um Programa do Consumidor de Energia 2010-2011 com o objetivo de desenvolver ações especificamente vocacionadas para a proteção dos seus direitos e interesses. O programa aposta numa maior proximidade com os consumidores, baseada nos seguintes objetivos:

- Divulgação de informação adequada às suas necessidades reais;
- Promoção de comportamentos mais seguros e sustentáveis;
- Reforço dos mecanismos e dos instrumentos que visam a coesão e a proteção dos consumidores;
- Dinamização de ações que visam uma maior participação dos consumidores nas atividades de regulação.

As áreas de atuação passam pela informação, educação, prevenção e gestão da conflitualidade e promoção da participação (6).

Eficiências Energética - No âmbito da eficiência energética foram criados alguns programas e planos a nível nacional:

- PNAC - Programa Nacional para as Alterações Climáticas, o qual atribuiu à ERSE responsabilidades específicas na definição de mecanismos para a promoção de medidas da eficiência no consumo, sendo o seu principal objetivo a redução do consumo de energia elétrica.
- PPEC - O Plano de Promoção da Eficiência no Consumo, estabelecido pela ERSE no Regulamento Tarifário em 2006, consiste num concurso através do qual promotores elegíveis submetem medidas visando uma melhoria da eficiência no consumo de energia elétrica. Estas medidas são selecionadas através duma avaliação sustentada em critérios técnico-económicos.
- PNAEE - Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética aprovado pela RCM n.º 80/2008, de 20 de Maio, incorpora um amplo leque de programas e medidas consideradas vitais para que Portugal atinja os objetivos estabelecidos pela Diretiva da UE. O PNAEE estabelece uma meta de redução em 10% do consumo de energia até 2015.
- Transposição da diretiva UE relativa à eficiência na utilização final de energia - o Decreto-Lei n.º 319/2009, de 3 de Novembro, transpõe a Diretiva comunitária para a ordem nacional, estabelece metas de poupança de energia de pelo menos 9% para 2016, para as quais é contabilizado o contributo do PPEC.

O PPEC é estabelecido pela ERSE no Regulamento Tarifário do sector elétrico tendo como objetivo a implementação de medidas que visam a adoção de hábitos de consumo e de equipamentos mais eficientes por parte dos consumidores de energia elétrica. Essas medidas de eficiência energética são geralmente propostas e promovidas pelas seguintes entidades:

- Comercializadores de energia elétrica;
- Operadores das redes de transporte e de distribuição de energia elétrica;
- Associações e Entidades que contenham nos seus estatutos a promoção e defesa dos interesses dos consumidores;
- Associações Municipais;
- Associações Empresariais;
- Agências de Energia e Instituições de Ensino Superior e Centros de Investigação.

Os benefícios que se espera obter com o PPEC são a poupança de energia elétrica por parte dos consumidores residenciais e as reduções das emissões de CO₂ (6).

Investimento Previsto - Estão em estudo alguns investimentos para tornar a rede elétrica mais ativa e eficiente. Uma das medidas passa pelos contadores inteligentes, os contadores dos consumidores de média, alta e muito alta tensão que já estão integrados no sistema de telecontagem. O próximo passo será dar seguimento a este objetivo nos consumidores de baixa tensão.

As redes inteligentes também começam a ganhar interesse. O projeto *InovGrid* da EDP Distribuição é um dos primeiros passos e está baseado nos seguintes objetivos:

- Dotar a rede elétrica de informação e equipamentos destinados a automatizar a gestão das redes;
- Melhorar a qualidade de serviço;
- Reduzir os custos de operação;
- Promover a eficiência energética e a sustentabilidade ambiental;
- Potenciar a penetração da produção descentralizada.

Este projeto já começou a ser estudado e aplicado no Município de Évora denominado por *InovCity*. Na figura 2.8 pode constatar-se alguns dos pormenores.



- Impacto em 54.000 habitantes do Município de Évora
- Investimento de 15M€ em 2010:
 - 31.300 Energy Boxes instaladas em casa de cada consumidor
 - 341 DTC instalados em cada um dos transformadores de potência
 - Sistemas de Informação
 - Infraestrutura de comunicações
 - Sistemas de comando e controlo remoto da rede.
- Instalação de 16 postos de carregamento de veículos eléctricos

Figura 2.8 - Impacto e resultados do projeto *InovCity* (6).

Numa análise global a aplicação destas medidas permitirá aumentar substancialmente a capacidade da rede de distribuição para a receção de produção dispersa, sem que seja necessário proceder a investimentos massivos, mediante uma utilização racional das infraestruturas existentes, gerando uma maximização do seu valor.

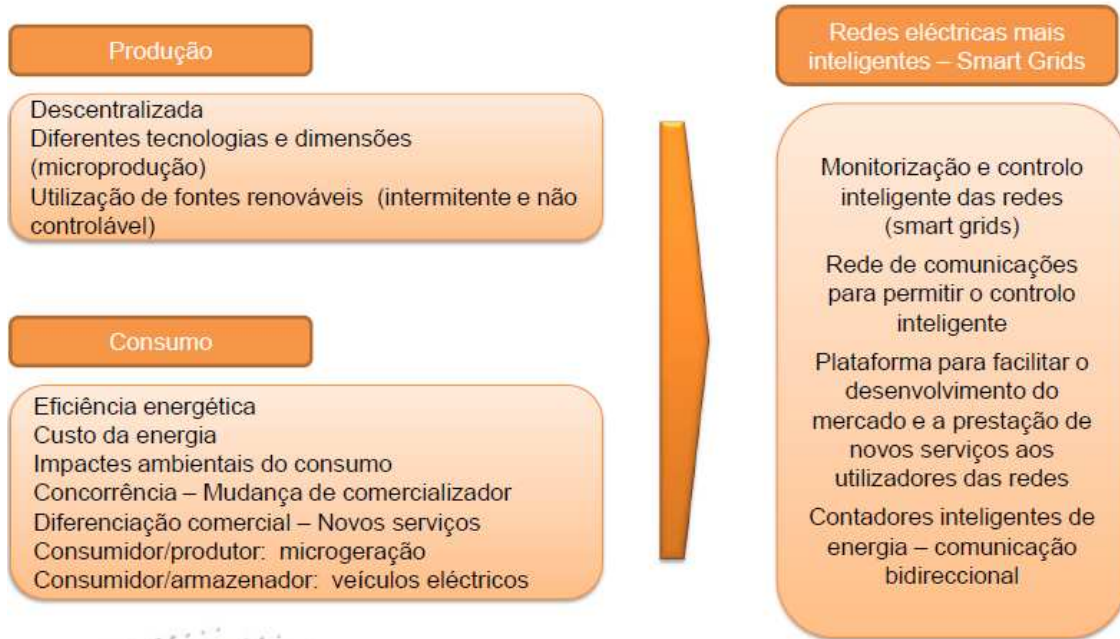


Figura 2.9 - Mudança de paradigma tecnológico (6).

As novas tecnologias e a proteção dos consumidores vão originar mais informação, mais inovação tarifária, novos serviços, melhor qualidade de serviço, o aumento da microgeração e a faturação baseada em leituras reais. Estes aspetos vão permitir que os consumidores estejam mais informados e possam ser mais exigentes. Será gerada uma maior concorrência e participação nos mercados, assegurando assim um mercado energético mais eficiente e garantindo uma melhor resposta aos consumidores.

2.8. Conclusão

As redes de distribuição têm evoluído de forma a acompanhar o crescimento demográfico e consequente evolução dos consumos. A rede de distribuição tem sido reforçada e modernizada, de forma a dar resposta a estas exigências, garantindo sempre os necessários níveis de qualidade e minimizando as perdas nas redes.

Nos últimos anos essa normal evolução tem sofrido algumas mudanças com a integração de produção dispersa, gerando um fluxo bidirecional e passando de uma rede passiva para ativa.

A mudança de paradigma devido à evolução das redes obriga à existência de melhor informação tarifária e faturas baseadas em leituras reais, melhor qualidade de serviço, novos serviços e microgeração. Os consumidores ficam mais informados e consequentemente mais exigentes. Surge uma maior participação nos mercados, o aumento da concorrência e os mercados tornam-se mais eficientes com respostas mais céleres às necessidades dos consumidores.

Capítulo 3

Fontes de Produção Dispersa

Os geradores de fontes renováveis ou de fontes de produção de energia não convencionais utilizados na produção dispersa ou em microredes são conhecidos por fontes de energia distribuída ou microfuentes.

O maior objetivo das microredes é combinar todos os benefícios das fontes de energia não convencionais de pequena potência e as fontes de energia renováveis com baixas emissões de carbono para melhorar a qualidade na produção de energia e aumentar a eficiência. Uma das formas de aumentar a eficiência é combinando a produção de calor com a produção de energia, como é o caso dos sistemas CHP (sistemas de cogeração combinados). Estes sistemas CHP tornam-se rentáveis e com elevada eficiência, devido ao aproveitamento da energia térmica, resultante do processo de produção de energia eléctrica, evitando a poluição ambiental e gerando energia limpa. Além dos sistemas CHP também existem outras fontes de energia distribuída integradas na produção não convencional, como células de combustível (*Fuel Cells*), biomassa e microturbinas.

Como fontes de energias renováveis são geralmente integrados os sistemas solares fotovoltaicos (PV), os sistemas eólicos, as micro-hídricas e os sistemas de aproveitamento da energia das ondas e marés.

A opção pela integração de fontes de produção dispersa está dependente das condições climáticas, das topologias dos terrenos e da fonte primária existente na região. A possibilidade da utilização de biocombustíveis e a integração de sistemas de armazenamento mais evoluídos, como as baterias electrodinâmicas (*Flywheel Batteries*) e as grandes baterias de condensadores (*Ultracapacitores*), começam a ser analisados no terreno com o objectivo de viabilizar a sua utilização numa maior escala nas microredes.

Neste capítulo serão evidenciados os seguintes pontos:

- Sistemas de Cogeração Combinados (CHP);
- Sistemas de Energia Eólica;
- Sistemas Fotovoltaicos (PV)
- Microhídricas;
- Outras Fontes de Energia Renovável;
- Sistemas de Armazenamento.

3.1. Sistemas de Cogeração Combinados (CHP)

Os sistemas de cogeração são as fontes de energia distribuída ou dispersa mais promissoras para a aplicação nas microrredes. A sua maior vantagem é a eficiência energética na produção de energia, devido ao aproveitamento do calor produzido. Ao contrário das centrais convencionais de combustíveis fósseis, as centrais CHP capturam e utilizam o calor gerado na produção de eletricidade para aquecer localmente redes domésticas e industriais. O calor produzido a temperaturas moderadas (100-108°C) pode ser utilizado em sistemas de absorção para arrefecimento e refrigeração ambiente. É um sistema muito versátil porque com o mesmo recurso primário é possível obter 3 produtos finais, eletricidade, calor e frio.

Uma central CHP atinge um rendimento de 80% e se o calor for utilizado localmente pode ultrapassar esse valor, muito mais que as centrais convencionais onde o rendimento é de 35%.

A produção de eletricidade das centrais CHP é injetada na rede de transporte, mas o calor gerado é geralmente utilizado localmente em redes de aquecimento de grandes cidades, hospitais, prisões, refinarias e indústria. A utilização das centrais CHP origina uma redução de 35% de energia primária comparativamente com as centrais convencionais, 30% de redução nas emissões comparativamente com as centrais a carvão e 10% de redução das emissões comparativamente com as centrais de gás natural de ciclo combinado (1).

3.2. Sistemas Micro-Cogeração (Micro-CHP)

Estes sistemas são geralmente instalados em pequenas instalações, residências ou pequenos edifícios comerciais. Existem algumas diferenças entre estas centrais Micro-CHP e as CHP, não só no tamanho, mas também na energia produzida. As CHP são centrais que produzem energia elétrica como produto principal e energia térmica como subproduto, enquanto as Micro-CHP produzem geralmente energia térmica como produto principal e energia elétrica como subproduto. Esta energia térmica produzida pelas CHP é basicamente utilizada em instalações domésticas.

As Micro-CHP são microturbinas de eixo único e elevada velocidade (50.000 - 100.000 rpm) constituídas por geradores síncronos de ímanes permanentes com interfaces de controlo eletrónico de potência para a conexão com as cargas. Possuem também um sistema de recuperação de calor para extração de baixa e média temperatura. Estão geralmente disponíveis numa gama de potências entre os 10kW até aos 100kW de capacidade. A energia primária utilizada é o gás natural, gás propano, *diesel* ou biogás.

Um sistema de micro-cogeração é instalado como uma caldeira de aquecimento moderna. Pode ser instalado em cozinhas ou em caves, ocupando um espaço equivalente a um frigorífico, com o mesmo nível de ruído. As exigências de manutenção são bastante baixas, com intervenções a cada 3.500 horas de operação.

Os sistemas de micro-cogeração têm vários modos de funcionamento: controlo-calor, controlo-elétrico ou combinado.

O principal mercado para sistemas de micro-cogeração é o mercado doméstico, como substituição das caldeiras de gás e gasóleo convencionais em residências domésticas, com o sistema de micro-cogeração a operar em modo de funcionamento controlo-calor em paralelo

com a rede elétrica. Na UE há um potencial para mais de 50 milhões de instalações. O centro do mercado está na Alemanha, no Reino Unido, na Holanda, Áustria, Bélgica, Itália e França. Numa análise ao potencial de mercado português resulta num potencial teórico de mais de 3.000 edifícios (7).

3.3. Sistemas de Energia Eólica

A energia eólica provém da radiação solar, porque os ventos são gerados pelo aquecimento não uniforme da superfície terrestre. A energia total disponível dos ventos no planeta é de aproximadamente 2% da energia solar absorvida pela Terra. Esta percentagem corresponde à energia que é convertida em energia cinética dos ventos. Embora essa percentagem seja pequena, representa uma centena de vezes a potência anual instalada nas centrais elétricas do mundo. Os ventos que sopram em escala global e aqueles que se manifestam em pequena escala são influenciados por diferentes aspetos, entre os quais se destacam a altura, a rugosidade, os obstáculos e o relevo (8).

As turbinas eólicas ou aerogeradores são as formas mais comuns de designar os sistemas de conversão de energia eólica em energia elétrica. O princípio de funcionamento é baseado na conversão da energia cinética associada ao deslocamento de massas de ar (vento) em energia mecânica de rotação, pela incidência do vento nas pás do rotor, seguindo-se a conversão da energia mecânica em energia elétrica pelo gerador elétrico.

O desenvolvimento tecnológico das grandes turbinas eólicas convergiu para uma certa uniformização da oferta comercial apresentando turbinas de eixo horizontal com rotores de três pás colocados a montante da torre, complementados por algumas tecnologias que lhe proporcionam melhor rendimento. O sistema de controlo da potência mecânica com regulação do ângulo de passo “*pitch*” e a entrada em perda aerodinâmica “*stall*”, a existência ou não de caixa de velocidades e o sistema de conversão da energia mecânica em energia elétrica, são os principais complementos.

Os sistemas de conversão de energia mecânica em energia elétrica podem utilizar um gerador assíncrono ligado à rede de forma direta ou um gerador síncrono ligado à rede através de um conversor eletrónico de potência (8).

De uma forma geral, um aerogerador é constituído por três partes fundamentais:

- A torre que apresenta uma forma tubular e suporta a cabina, de modo a elevar o rotor da turbina a uma altitude em que o vento apresenta as características adequadas;
- A cabina é onde estão alojados os sistemas de controlo, medição e transmissão mecânica, o gerador elétrico e o mecanismo de orientação direcional;
- O rotor é o responsável pela fixação das pás da turbina ao cubo. É um componente de elevada resistência.

A potência de um aerogerador obtém-se através da expressão 3.1, onde se pode verificar que é influenciada pelo cubo da velocidade do vento.

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho V^3 A \quad 3.1$$

Este fator é determinante na definição dos locais para a instalação dos aerogeradores, no entanto, existem também muitos outros fatores importantes como o afastamento das habitações e a ligação à rede de transporte de eletricidade (8).

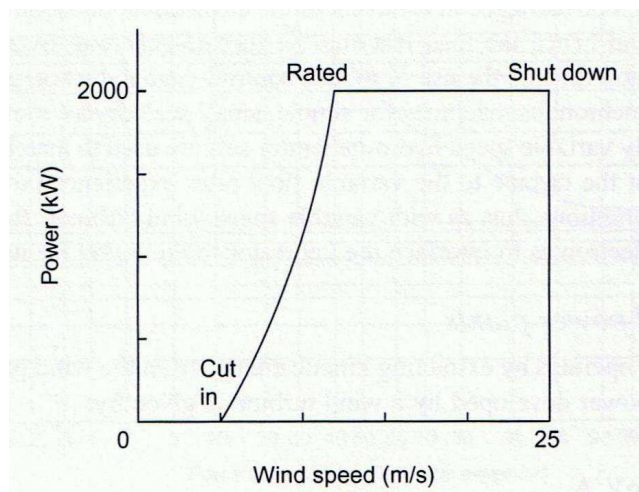


Figura 3.1 - Relação da potência em função da velocidade do vento numa turbina eólica (1).

Atualmente, com o crescimento deste tipo de instalações *onshore* começam a ganhar interesse as instalações *offshore*. As vantagens dos aerogeradores *offshore* consistem na redução do impacto visual, na maior velocidade do vento, na redução da turbulência e a utilização de torres mais pequenas. No entanto, apresenta a desvantagem dos elevados custos na sua infra-estrutura associada e a necessária adaptação dos materiais para o ambiente marítimo (1).

3.4. Sistemas Fotovoltaicos (PV)

Os sistemas de produção fotovoltaica consistem na geração de eletricidade a partir de uma fonte de energia gratuita e inesgotável, a energia solar. A geração fotovoltaica é obtida por um processo de conversão direta nas células de silício. São sistemas constituídos por alguns módulos fotovoltaicos, inversores, reguladores de carga e, no caso de sistemas isolados, baterias.

Estes sistemas apresentam um baixo impacto ambiental, baixo custo de manutenção, têm um funcionamento silencioso e um tempo de vida útil elevado (mais de 30 anos). A fonte primária de energia, energia solar, possui uma sustentabilidade natural e também uma grande contribuição para a redução das faturas energéticas dos consumidores.

Atualmente os Governos e Associações Ambientais e Comerciais consideram que esta tecnologia possui um elevado potencial de crescimento que terá um grande impacto nas necessidades de energia no futuro.

Os sistemas fotovoltaicos podem e devem ser utilizados como RED nas Microredes, mas apresentam a desvantagem do elevado custo e baixa eficiência, no entanto o seu pico de produção é nas horas de menor produção de outras fontes de energias renováveis, como é o

caso da energia eólica, o que permite uma maior uniformidade na produção nas Microredes. A instalação de pequenas centrais fotovoltaicas junto dos consumidores tem uma relação custo-eficiência melhor que a instalação de grandes centrais fotovoltaicas afastadas dos centros de consumo, devido às perdas de transporte e por ser uma fonte de produção menos económica.

As Microredes operam junto dos locais de consumo e em baixos níveis de tensão, o que se enquadra perfeitamente com a natureza da geração fotovoltaica. Também por isso os sistemas fotovoltaicos podem ser potenciais contribuidores para as Microredes.

A energia solar é absorvida pelas células fotovoltaicas através de duas formas, direta e difusa. A direta representa cerca de 85% da energia proveniente da radiação solar e é a que incide diretamente na célula. A difusa representa os restantes 15% e provém das reflexões na atmosfera.

O funcionamento das células fotovoltaicas é baseado no comportamento de um díodo. A energia solar incidente na superfície da célula, na forma de fotões, gera uma movimentação de eletrões na Junção P-N fazendo circular os eletrões, gerando energia elétrica. Como a tensão das células é baixa associam-se em série e paralelo para se obter módulos fotovoltaicos com maior ou menor número de potência. Os módulos para obter o máximo rendimento das células, geralmente integram o MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), maximizando assim a potência de saída, através da modificação do ponto de operação de acordo com a radiação solar (1; 3).

Existem vários tipos de células fotovoltaicas:

- Monocristalinas;
- Policristalinas;
- Amorfo;
- Híbridas.

As células monocristalinas são células de silício puro e dopadas com boro. Têm como principal vantagem o rendimento na ordem dos 16%, mas o custo de produção é elevado, o que se reflete no preço final.

As células policristalinas são células de silício com uma percentagem de pureza inferior, e consequentemente, um rendimento inferior na ordem dos 14%, mas apresentam como vantagem um custo inferior às monocristalinas.

As células de silício amorfo ou película fina são células de camadas finas, fabricadas por um processo mais homogéneo e barato que o das cristalinas. Devido à sua espessura é possível a sua integração em vidro, plástico e materiais similares. Possuem uma absorção mais efetiva da radiação devido à homogeneidade, mas têm um rendimento inferior na ordem dos 8%. Além do silício amorfo também outros materiais são utilizados para a produção de células de película fina como é o caso do telúrio de cádmio (CdTe) e do disseleneto de cobre e índio. São células ainda pouco exploradas que conseguem rendimentos superiores ao amorfo e têm um custo inferior.

As soluções de células híbridas consistem na criação de células que incorporam os dois tipos de silício, amorfo e cristalino. A combinação dos dois tipos permite uma performance excelente e o processo de produção também é simples, porque não são necessárias temperaturas elevadas. O rendimento destas células anda na ordem dos 18% (3).

Tabela 3.1 — Comparação das tecnologias de módulos fotovoltaicos baseado em dados de radiação solar do Reino Unido e com uma inclinação de 30° e orientação a sul dos módulos (3).

Tecnologia PV	Monocristalino	Policristalino	Película Fina	Híbrido
Eficiência das Células (%)	16-17	14-15	8-12	18-19
Eficiência dos Módulos (%)	13-15	12-14	5-7	16-17
Área Necessária por kWp (m ²)	7 (Sharp)	8(Sharp)	16(Unisolar)	6,5 (Sanyo)
Energia Anual Produzida (kWh/kWp)	830	810	800	865
Energia Anual Produzida (m ²)	107	100	50-52	139-150
Redução de Emissões de CO ₂ (kg/kWp)	471	460	454	491
Redução de Emissões de CO ₂ (kg/ m ²)	61	57	28	79-85

3.5. Micro-hídricas

As micro-hídricas são centrais hídricas de pequenas potências, geralmente inferiores a 2MW, instaladas em cursos de água mais instáveis e com menor fluxo. É um tipo de produção de energia dependente da topologia do terreno e da precipitação anual, dado que o caudal utilizável é o caudal instantâneo do rio. São geralmente centrais de fio de água e são instaladas em zonas mais remotas e muito importantes para as microredes.

A potência de uma micro-hídrica obtém-se através da expressão 3.2:

$$P = QH\eta\rho g \quad 3.2$$

onde P é a potência de saída (W), Q o fluxo de água (m³/s), H a queda útil (m), η a eficiência, ρ a densidade da água (1kg/m³) e g a aceleração da gravidade. A potência é incrementada através do aumento da queda útil e do fluxo de água.

Muitas destas centrais não estão instaladas próximas das presas que armazenam a água. Geralmente são criados canais ou condutas para levar a água a um ponto mais distante, onde se consiga obter uma queda útil e um fluxo de água superior e, assim, otimizar o rendimento do gerador.

Os tipos de turbinas mais utilizados neste tipo de centrais são as turbinas de reação *Francis* e *Kaplan* para baixas quedas e as turbinas de impulso *Pelton* e *Turgo* para altas quedas (9).

3.6. Outras Fontes de Energia Renovável

Os gases de aterros, a biomassa, o lixo municipal, entre outros, são geralmente tratados como fontes de energia renovável para a geração de eletricidade. A localização destes geradores é determinada pela viabilidade dos recursos necessários.

O inconveniente deste tipo de recursos é a sua baixa densidade energética, escassez e impossibilidade de armazenamento.

Devido a estes inconvenientes os geradores são normalmente de pequena capacidade e são instalados nas proximidades dos recursos.

São fontes de produção de energia que têm sido incentivadas pelas várias entidades mundiais.

3.7. Sistemas de Armazenamento

Os sistemas de armazenamento de energia são extremamente importantes nas microrredes para garantir o fornecimento ininterrupto de energia. Os meios de armazenamento existentes atualmente são os bancos de baterias, os bancos de condensadores e as baterias electromecânicas (*flywheels*). Estes sistemas de armazenamento devem ser conectados às microrredes num barramento DC e providenciar a energia necessária durante a transição e falhas dos sistemas de produção existentes na microrrede.

3.8. Conclusão

O número de tipos de fontes de produção conectados à rede tem vindo a crescer e a diversificar-se. A produção dispersa oferece benefícios económicos e ambientais consideráveis, no aumento da eficiência e na redução dos gases de efeito de estufa. A localização e o tipo de gerador são determinados pelas cargas térmicas, no caso das fontes que combinam a produção de eletricidade com a produção de calor e pelo recurso renovável disponível. A produção de energia renovável tem em conta a disponibilidade do recurso no local, de forma a obter o máximo rendimento e assim rentabilizar o investimento. Os sistemas CHP têm geralmente em conta a necessidade de calor para aumentar o seu rendimento.

Nas microrredes, além destes tipos de fontes também se instalam pequenas turbinas a gás, geradores *diesel* e sistemas de armazenamento para garantir a continuidade e fiabilidade do sistema. Cada vez mais as fontes de produção dispersa são integradas na rede, o que vai fazer com que a produção de energia não esteja dependente das grandes centrais, normalmente afastadas dos centros de consumo. A produção dispersa irá criar maior flexibilidade e um controlo mais exigente da rede, assegurando melhor qualidade e continuidade no fornecimento das cargas e nas oferta de serviços auxiliares.

Capítulo 4

Microredes e Gestão de Redes de Distribuição Ativas

As microredes requerem um bom sistema de controlo para assegurar a sua segurança e um funcionamento ótimo, com uma redução das transferências de um operador para outro sem problemas de violação das restrições e requisitos regulamentares do sistema.

O controlo das microredes é possível através de um controlador central (CC - *Central Controller*) e de vários controladores, localizados junto das fontes de produção e pontos de armazenamento (MC - *Microsource Controller*).

A configuração de uma microrede consiste em várias cargas elétricas ligadas a uma rede de distribuição de baixa tensão, onde as cargas e as fontes são colocadas umas próximas das outras.

As microfuentes têm que ter características *plug-and-play*, equipadas com componentes eletrónicos para realizar medições instantâneas e efetuar o controlo de funcionamento durante a operação em sistema isolado ou conectado à rede de distribuição. Esta funcionalidade permite à microrede fazer a transição de um tipo de funcionamento para o outro sem inconvenientes (3).

A microrede exemplificada na figura 4.1 apresenta três ramais radiais onde são integrados vários tipos de microfuentes, cargas e dispositivos de armazenamento. As microfuentes e os dispositivos de armazenamento estão nos ramais A e C e são controlados cada um individualmente por um MC. Nestes ramais também estão algumas cargas prioritárias. No ramal C apenas existem cargas não prioritárias.

A microrede é alimentada em média tensão a partir de um transformador ligado à rede de distribuição e é protegida pelo seccionador CB4. O CB4 permite conectar e desconectar a microrede da rede de distribuição de acordo com a necessidade de funcionamento da microrede. Os ramais também estão protegidos com as proteções CB1, CB2 e CB3, os quais permitem desconectar ou conectar os respetivos ramais A, B e C. As microfuentes estão instaladas muito próximas do ramal para evitar perdas, obter uma bom nível de tensão e uma boa otimização da utilização do calor, no caso das cargas térmicas. O controlo de uma microrede deste tipo é bastante complicado, porque não está apenas dependente de um ponto de produção, mas sim de vários conectados ao mesmo ramal. Surge, então, a

necessidade de as microfones serem do tipo *plug-and-play* para se poder gerir o seu funcionamento de acordo com as necessidades.

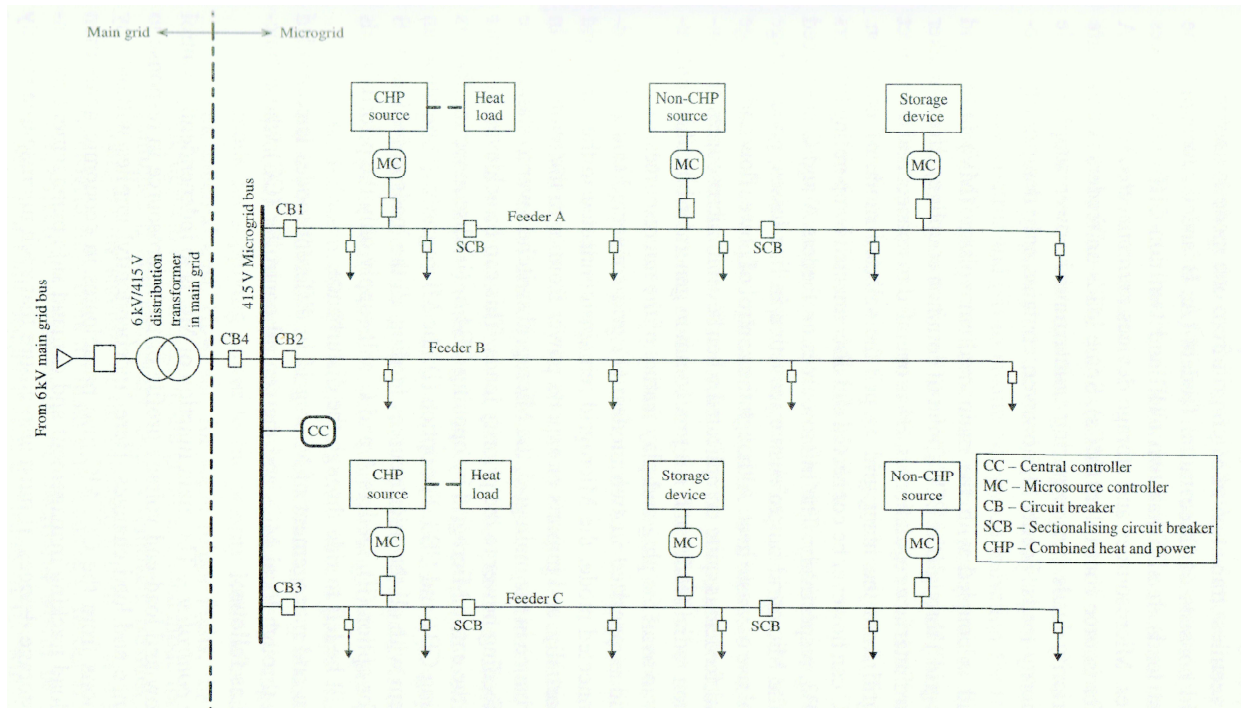


Figura 4.1 - Configuração típica de uma microrede (3).

Esta microrede, como já foi mencionado, pode funcionar em dois modos: isolado ou conectado à rede de distribuição. No modo interligado com a rede, a microrede fica conectada com o CB4 fechado, alimentando parcialmente ou na totalidade os ramos, tendo sempre a possibilidade de importar ou exportar energia conforme as necessidades. No caso de uma avaria na rede de distribuição, a proteção CB4 abre e a microrede fica a funcionar em sistema isolado dando prioridade às cargas prioritárias. Estes procedimentos são controlados pelos MC e pelo CC.

A principal função do MC é controlar independentemente a potência e tensão da microfonte de acordo com os distúrbios da microrede e das cargas. Participa também economicamente no agendamento de produções para cargas temporárias específicas e para carregar os dispositivos de armazenamento em horas de menor consumo com excesso de produção. Também tem que garantir que quando a microrede entra em modo isolado as microfones entram de imediato em funcionamento sem abandonar as cargas, e quando a rede retoma passam a modo *stand-by* sem causar distúrbios e sem qualquer auxílio do CC.

O controlador central (CC) executa o controlo global da microrede na operação e proteção dos MC. O objetivo é manter a tensão e frequência dentro dos limites e garantir às cargas uma boa relação entre potência, tensão e frequência. No modo de funcionamento conectado com a rede as principais funções são: monitorizar o sistema e fazer diagnóstico das microfones e das cargas; efetuar uma estimativa de estado, efetuar uma avaliação de agendamentos económicos de produção; efetuar uma gestão ativa da procura, realizar o controlo da energia ativa e reativa das microfones e assegurar a sincronização com a rede. No modo isolado são praticamente as mesmas funções, mais a gestão das cargas e dos

dispositivos de armazenamento e garantir a continuidade de serviço, quer na falha da rede quer no retorno (3).

4.1. Necessidades de Gestão e Controlo para integrar uma Microrede

A complexidade das redes elétricas devido às suas limitações e ao aparecimento de novas fontes de produção, juntamente com preocupações ambientais, levou ao aparecimento de novos sistemas de gestão e controlo. Nas microredes, a necessidade de controlo e gestão acentuou-se porque, além de um simples controlo de distribuição radial, o fluxo passa a ser bidirecional e também existe a possibilidade de funcionamento em rede isolada e a utilização de sistemas de armazenamento.

Os primeiros sistemas de gestão de microredes a surgir foram os EMM (Módulo de Gestão Energética) e PCM (Módulo de Proteção e Coordenação), geralmente integrados no CC e nos MC (3).

A gestão da rede através do EMM é focada nos seguintes aspetos:

- Controlo da produção das microfones;
- Controlo de processos residenciais;
- Armazenamento de energia;
- Regulação e transferência de carga;
- Serviços Auxiliares.

4.1.1. Controlo da Produção das Microfontes

As microfones utilizam diferentes tipos de produção de energia, usualmente sistemas de produção com baixas emissões de carbono.

Os recursos para as microfones renováveis têm um custo baixo, mas é aleatória a sua existência obrigando as microfones a produzir sempre que o recurso está disponível. Como por exemplo, os aerogeradores devem funcionar sempre que têm vento adequado ao seu funcionamento e esse aproveitamento tem que ser bem otimizado.

No caso do gás natural e do hidrogénio devem funcionar em períodos em que o seu funcionamento se torna mais económico, porque o recurso não é instável.

As centrais de cogeração (CHP), por sua vez, já devem tentar combinar a sua produção de calor com a produção de eletricidade para obter um rendimento superior e otimizar os recursos.

Esta gestão de funcionamento é complicada para garantir um rendimento elevado e uma poupança máxima de energia, porque depende de vários fatores como o custo de cada combustível, o custo do despacho de eletricidade e calor e o impacto das emissões de carbono.

A estrutura do mercado também tem um papel significativo na avaliação do desempenho da microrede e na definição do funcionamento das microfones, porque obriga a microrede a

ser competitiva no mercado e a possuir meios de suprir todas as necessidades dos consumidores. As microfones deixam, assim, de ser apenas responsáveis pelo controlo da sua produção local e passam a explorar as necessidades do mercado (10; 11).

4.1.2. Controlo de Processos Residenciais

O controlo de processos residenciais consiste na monitorização dos sistemas de aquecimento e refrigeração, ventiladores e bombas. Estes equipamentos devem ser alimentados a partir das centrais de CHP da microrede. As CHP por sua vez devem procurar combinar o fornecimento de calor com o fornecimento de eletricidade para otimizar a produção e reduzir os custos e as emissões de carbono. Essa combinação pode ser gerida pelo EMM sem necessidade de controladores dedicados.

Para o processo de gestão ser mais eficaz o EMM tem de estar em constante contacto e interação com os MC para efetuar o agendamento do funcionamento de cada carga, de forma a evitar picos de consumo na reutilização do calor fornecido em recuperadores. Para que o controlo do EMM seja eficaz a programar reutilizações da microfonte, devem-se monitorizar a temperatura da água e a temperatura dos gases de escape.

O agendamento da carga dos sistemas de armazenamento também é importante porque nas horas de menor consumo a energia é mais barata. Geralmente, esses períodos horários, coincidem com períodos de consumo de energia térmica, o que permite rentabilizar a produção da CHP (11).

4.1.3. Armazenamento de Energia

Para assegurar o fornecimento ininterrupto das cargas o EMM necessita de controlar os sistemas de armazenamento de energia, os bancos de baterias, os bancos de condensadores e as baterias eletrodinâmicas ou *flywheels*. Em situação de distúrbios e contingências nas microredes o sucesso das mesmas está dependente dos sistemas de armazenamento.

Estes dispositivos são utilizados para compensar cavas de tensão locais e no arranque de microfones de baixa inércia ou com primeiros escalões de carga baixos. Servem, também, como *backup* durante as falhas de fornecimento. Além dos pontos referidos, os sistemas de armazenamento são extremamente importantes no apoio à microrede em situações de sobrecarga, variações de tenção e, especialmente, no funcionamento em sistema isolado.

A maioria dos dispositivos de armazenamento funciona com tensão DC, o que obriga a uma conversão DC/AC por meio de um inversor para se poderem conectar à microrede. Apenas as baterias eletrodinâmicas funcionam com tensão AC e podem ser ligadas diretamente à microrede.

A utilização de sistemas de armazenamento deve ser analisada de acordo com as necessidades da microrede. No caso de uma descarga elevada durante um curto período de tempo deve optar-se pelas baterias de condensadores porque são mais adequadas para este tipo de funcionamento, mas se a situação for de baixas descargas, prolongadas, é aconselhável utilizar as baterias eletrodinâmicas (11).

4.1.4. Regulação e Transferência de Carga

As microredes têm vários picos, devido à natureza doméstica das cargas, originadas por cargas como: água quente, aquecimento e bombas, que surgem sempre ao mesmo tempo. No caso de estas microredes integrarem cargas comerciais, como restaurantes e hotéis, o problema intensifica-se. Também podem existir outros consumidores como pequenas indústrias e edifícios de escritórios, em que as horas de consumo não coincidem com as referidas.

Estes picos na rede de distribuição são mais fáceis de gerir do que nas microredes, devido à sua dimensão e capacidade. Para a microrede ainda se torna mais complicada a situação quando funciona em sistema isolado. Para se conseguir gerir esta situação a microrede tem que incorporar sistemas de armazenamento que têm que estar bem dimensionados para suportar este comportamento da microrede. O controlo dos mesmos por parte do EMM é muito importante para coordenar o apoio ao arranque de microfóntes, as transferências de cargas da rede de distribuição para a microrede em sistema isolado e na redução dos picos, colocando os sistemas de armazenamento a ser alimentados em horas de menor consumo, geralmente com tarifas da eletricidade mais baixas.

Uma microrede é, geralmente, de pequena dimensão, o que obriga a efetuar todas as operações em tempos muito curtos. Para ser possível a sua operação é necessário um sistema de controlo que monitoriza todos os intervenientes da microrede segundo a segundo com muito mais frequência do que a rede de distribuição que é de minuto a minuto, devido à dimensão e inércia dos seus geradores.

No funcionamento em sistema isolado o EMM tem que analisar a capacidade de produção das microfóntes e a autonomia dos dispositivos de armazenamento para garantir o fornecimento das cargas, principalmente as prioritárias, se necessário, em detrimento das não-prioritárias para evitar o colapso da microrede (11).

4.1.5. Serviços Auxiliares

A microrede é vista como uma rede que gere o seu fluxo e potência, mas possui mais capacidades para além disso. Existe também a possibilidade de a microrede interagir com o mercado na venda e aquisição de energia para maximizar o seu rendimento. Nas horas de pico a microrede fornece energia à rede de distribuição mediante um determinado pagamento e, em horas de vazio, compra energia à rede de distribuição se o custo da sua energia interna for superior. É mais simples para a rede de distribuição ter a microrede como uma unidade de controlo de produção local, mas mesmo assim as potencialidades da microrede podem ser bastante benéficas para a rede de distribuição.

Os serviços auxiliares, bem como a manutenção da qualidade de energia nos consumidores próximos da microrede, particularmente, nas horas de pico, reduz custos de transporte a partir dos grandes geradores e congestionamento das linhas, assim como o controlo da tensão e do fator de potência. O balanço em tempo real entre as microfóntes e as cargas é bastante benéfico para a rede de distribuição e o custo do mesmo é compensado praticamente em perdas de transporte e congestionamento das linhas.

Neste sentido a oferta de serviços auxiliares torna-se num grande desafio, originando uma revolução nos mercados de energia, com benefícios para os utilizadores e produtores das grandes centrais. Os utilizadores terão uma garantia de melhor qualidade de fornecimento e as grandes centrais produtoras deixarão de se preocupar com estes pequenos inconvenientes de difícil gestão (11).

4.2. Controladores de Microfontes

As microfontes e os dispositivos de armazenamento de uma microrede possuem controladores de microfontes (MC), os quais regulam e gerem o funcionamento dos dispositivos de acordo com as necessidades da rede e dos consumidores. Os MC podem operar com ou sem intervenção do CC, porque apenas dependem de interfaces eletrónicas internos das microfontes e dos sistemas de armazenamento.

Os MC devem assegurar que as microfontes entram em funcionamento rapidamente e partilham a carga quando a microrede se desconecta e volta a conectar à rede de distribuição (3; 12).

As principais funções de controlo das microfontes são:

- Controlo de potência ativa e reativa;
- Controlo da tensão;
- Controlo das necessidades de armazenamento para o arranque súbito de cargas;
- Controlo da partilha de carga através da relação P-f (Potência - Frequência).

4.2.1. Controlo de Potência Ativa e Reativa

As microfontes e sistemas de armazenamento podem ser de corrente contínua (DC), como é o caso dos sistemas fotovoltaicos, pilhas de combustível e bancos de baterias ou de corrente alternada (CA), como é o caso das microtrubinas, CHP, turbinas eólicas e baterias eletrodinâmicas.

A conexão das microfontes e sistemas de armazenamento DC implica uma conversão de DC para AC, mas em algumas microfontes AC, como é o caso das turbinas eólicas também é necessária uma dupla conversão AC/DC/AC, porque possuem frequências variáveis. Ambas as conversões servem para garantir uma tensão estável e regularizada e uma frequência constante de 50Hz. Para garantir esta conversão são necessários conversores eletrónicos de potência associados às microfontes e dispositivos de armazenamento. Estes conversores efetuam o controlo da magnitude e do ângulo da tensão. A potência ativa é controlada pelo ajuste do ângulo da tensão e a potência reativa é controlada pelo ajuste da tensão. Estes ajustes são baseados na análise da potência ativa na saída da microfonte e da magnitude do barramento da microrede (3).

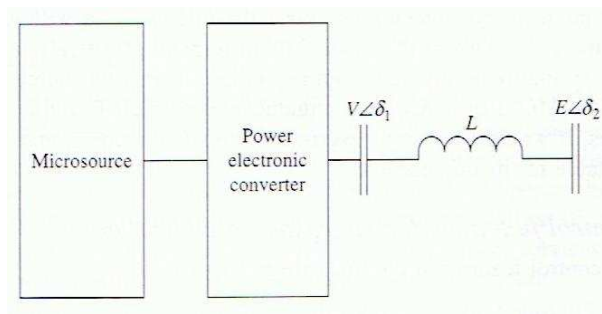


Figura 4.2 - Diagrama básico de um controlador de uma microfonte (3).

4.2.2. Controlo da Tensão

O controlo da tensão no barramento das microredes é necessário para garantir a fiabilidade e estabilidade da microrede.

Uma microrede com um grande número de microfontes pode sofrer oscilações de potência reativa se a tensão não for controlada. Nas redes de distribuição com grandes geradores síncronos essa circulação de corrente é absorvida pela grande impedância desses geradores, mas nas microredes não existe essa capacidade porque as impedâncias dos seus geradores são bastante mais baixas.

Mesmo com pequenas diferenças de tensão, a circulação dessas correntes pode facilmente exceder os limites admissíveis pelas microfontes.

Para efetuar o controlo destas correntes é necessário atuar no comportamento da tensão relativamente à potência reativa (3).

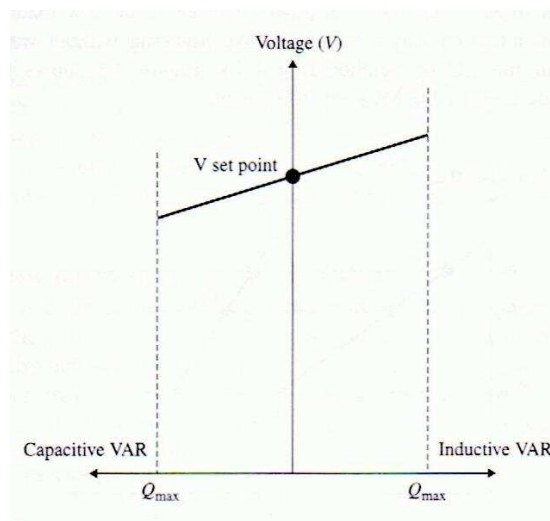


Figura 4.3 - Diagrama de ajuste da V em função da Q dos controladores de tensão (3).

A função do controlador de tensão é incrementar o valor nominal da tensão local, quando a tensão da microfonte se torna indutiva e decrescer o valor nominal da tensão local, quando a tensão da microfonte se torna capacitiva.

4.2.3. Controlo das Necessidades de Armazenamento para o Arranque Súbito de Cargas

Nas microredes conectadas à rede o balanço inicial de potência durante a conexão de novas cargas é suprido pela inércia dos grandes geradores da rede. Quando a rede funciona em sistema isolado necessita de assegurar o balanço inicial com o apoio dos dispositivos de armazenamento, para garantir à microrede a inércia necessária.

Os sistemas de armazenamento DC ou AC devem ser dimensionados e controlados para que a microrede possa suprir as suas necessidades nessas situações (12).

4.2.4. Controlo da Partilha de Carga através da Relação P-f

Os controladores da microrede asseguram a transferência automática do sistema conectado à rede para isolado e vice-versa. Durante a transição do sistema isolado para conectado à rede, o MC de cada microfrente exerce o controlo local da potência e frequência, alterando o ponto de funcionamento para alcançar o balanço de potência da nova carga.

O controlo efetua o processo automaticamente após ser solicitada a transferência de carga e sem necessidade de uma ordem ou comando do CC ou de outros MC próximos na microrede (3).

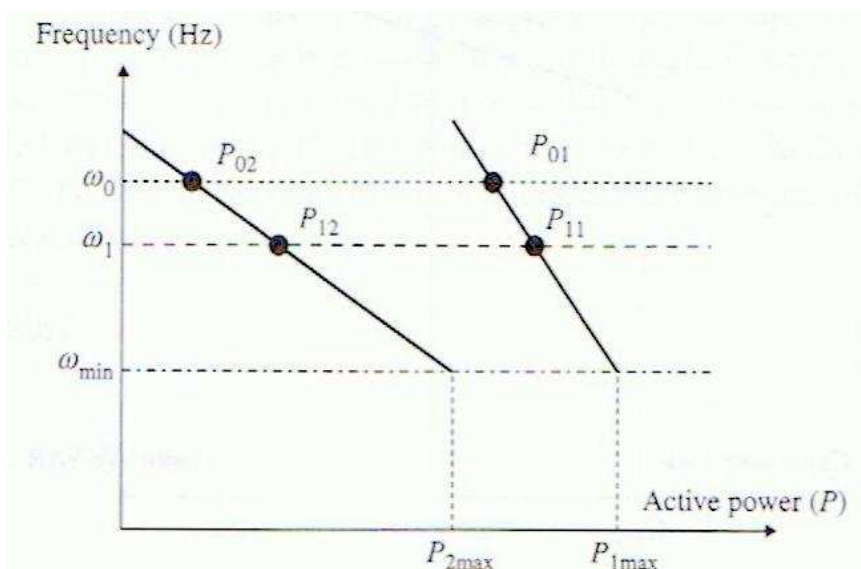


Figura 4.4 - Diagrama de relação entre a frequência e a potência ativa para realizar a partilha de carga (3).

Durante o funcionamento conectado à rede as cargas são alimentadas pela rede e por algumas microfrentes dependendo das necessidades. Quando surge uma interrupção do fornecimento de rede a microrede passa para modo isolado e surge automaticamente uma

descida da frequência e um arranque das microfones, com apoio dos dispositivos de armazenamento para repor o funcionamento normal das cargas. O arranque das microfones é instantâneo, não sendo necessária qualquer ordem do CC. Por exemplo, assumindo que as microfones arrancam com um valor de frequência mínimo e um valor de potência máximo, depois vão estabilizando para valores nominais.

Na situação inversa, do retorno da rede, a frequência das microfones mantêm-se e varia a potência fornecida.

4.3. Controlador Central

O controlador central é constituído por dois módulos básico, o EMM e o PCM.

4.3.1. Módulo de Gestão Energética (EMM)

O EMM incorpora várias funções de controlo para a gestão da energia de uma microrede. Como funções de controlo básicas para as microfones, bem como o controlo de tensão, onde o EMM define o ponto de funcionamento dos MC, possui também o controlo do fator de potência, o controlo da velocidade de rotação de algumas microfones e a regulação da frequência.

O funcionamento do EMM numa microrede típica baseia-se em dois modelos, ligado à rede e isolado da rede. No funcionamento ligado à rede, as funções do EMM estão limitadas ao controlo da potência ativa e ao controlo das tensões locais de referência das microfones. Este controlo faz com que a microrede pareça para a rede de distribuição uma carga constante e controlada, a funcionar com um fator de potência próximo do valor unitário. No funcionamento em sistema isolado a principal função do EMM é providenciar os valores de referência da potência ativa e tensão aos MC. A frequência e o fluxo de potência são controlados pelos MC automaticamente, mas é o EMM que faz a monitorização contínua da microrede. No caso de surgir alguma anomalia, o EMM comunica imediatamente com os MC. A microrede isolada não é tão estável como quando conectada à rede de distribuição, daí a necessidade de um acompanhamento e controlo contínuo para se conseguir responder rapidamente às anomalias (13).

O controlo das cargas térmicas é a prioridade das microfones do tipo CHP. O EMM incorpora parâmetros para gerir este tipo de produção de forma a rentabilizar o rendimento da microfonte. No caso de ser necessário alimentar uma carga térmica, o EMM procura coordenar o funcionamento da CHP para que alimente também cargas elétricas e, assim, otimizar o seu funcionamento. Para efetuar esse procedimento necessita de reduzir a produção noutras microfones ou conectar mais cargas, como por exemplo, carregar os bancos de baterias.

A optimização de energia para obter uma eficiência máxima é outro especto importante do EMM. O EMM possui uma função de comunicação com outros EMM que possam existir em microredes vizinhas e tem a capacidade de analisar as necessidades das cargas, capacidades

de produção das microfones e os custos de produção de cada uma das microredes. Estes elementos permitem-lhe fazer uma análise e gerir a produção, de forma a otimizar o conjunto das microredes, garantindo a otimização de energia para se obter uma eficiência máxima.

O EMM tem, também, a capacidade de controlar as cargas prioritárias e não-prioritárias, definindo quando as não-prioritárias podem ser desconectadas para salvaguardar o funcionamento da microrede em função da capacidade dos dispositivos de armazenamento(13).

4.3.2. Módulo de Proteção e Coordenação (PCM)

O PCM é o elemento que supervisiona as proteções da microrede. Estas proteções têm determinadas particularidades relativamente às proteções convencionais, devido, essencialmente, à direccionalidade da microrede e outros fatores como os que serão descritos a seguir:

- As microredes têm geradores e cargas interligadas a um barramento comum e não têm uma disposição radial a partir da fonte de produção até ao consumidor, logo resulta num fluxo bidirecional de potência, o que não acontece nas redes tradicionais;
- Com a presença de microfones a microrede passa de uma rede passiva para uma rede ativa;
- A capacidade de proteção das microredes contra curto-circuitos tem que ser feita com relés com sensor de corrente bidirecional e saber interpretar o funcionamento em sistema conectado à rede ou isolado da rede.

Uma das principais funções do PCM é distinguir entre os dois tipos de funcionamento da microrede, conectado ou isolado da rede de distribuição, para poder atuar corretamente quando ocorrerem contingências (13).

Em modo conectado à rede o comportamento do PCM em condição normal é permanecer conectado à rede de distribuição com as proteções fechadas, sendo as cargas alimentadas pela rede e por algumas microfones de acordo com as necessidades.

No caso de existir uma falha de alimentação por defeito numa área específica da microrede é necessário que os relés bidirecionais detetem de que lado provem o defeito para o poderem isolar e se no barramento intermédio estiver conectada alguma microfone o MC deve proceder de imediato à sua desconexão até ser eliminado o defeito. Neste caso, têm que atuar no mínimo dois relés para ser possível isolar a área afetada. As cargas afetadas serão apenas as que estão nessa área, porque a montante continuarão a ser alimentadas pela rede de distribuição e a jusante pelas microfones e pelos dispositivos de armazenamento, o que não aconteceria num sistema convencional, porque perante um defeito todas as cargas a jusante deixariam de ser alimentadas. Caso a microfone conectada na zona do defeito se tenha cargas no seu próprio barramento, pode continuar a alimenta-las, tendo em conta que apenas é desconectada do barramento da microrede. Com estes procedimentos é possível isolar o defeito e minimizar as perdas para os consumidores.

Numa situação de falha de alimentação da rede de distribuição o PCM abre a proteção e a microrede desconecta-se da rede de distribuição e entra em modo de funcionamento isolado. Nesta situação o PCM, o EMM e os MC coordenam-se para que todas as cargas continuem a ser alimentadas, principalmente para garantir o funcionamento das prioritárias (13).

Quando a rede de distribuição fica disponível, o PCM é o responsável pelo fecho da proteção para fazer a reconexão da microrede à rede de distribuição, depois de todos os parâmetros estarem sincronizados. O PCM aguarda a informação do EMM com a indicação que todas as microfones estão sincronizadas para fechar a proteção (13).

No funcionamento em modo isolado os níveis de defeito da microrede são inferiores aos valores quando conectada à rede, porque as microfones apenas podem fornecer 200% da corrente de carga em caso de defeito. Nesse sentido os relés habituais podem não conseguir atuar, o que obriga a utilizar equipamentos de proteção de maior sensibilidade.

O funcionamento do PCM em sistema isolado consiste em manter aberta a proteção de conexão à rede de distribuição e manter fechadas as proteções internas da microrede. No caso de existir uma falha de alimentação, por defeito numa área específica da microrede, o comportamento é idêntico à situação de conectado à rede. A única diferença está na sensibilidade dos relés para detetar falhas de corrente mais baixas (13).

O PCM para efetuar uma proteção eficaz deve ter em consideração a complexidade da microrede, a quantidade de microfones e o tipo de geradores de cada microfonte, a quantidade de cargas prioritárias e as características dos dispositivos de proteção, minimizando as perdas e evitando interrupções de fornecimento (13).

4.3.3. Informação Necessária ao Funcionamento do CC

O funcionamento de uma microrede depende de uma série de informações que facilitam e melhoram o seu controlo.

A minimização do custo total de energia no funcionamento de uma microrede deve comparar os custos do trânsito de potências e os custos de produção das microfones, para o CC poder definir a melhor estratégia de funcionamento. A comparação dos custos de eletricidade proveniente da rede por diferentes formas, gás natural, gás propano, *diesel*, carvão, hidroelétrica e biocombustíveis também é importante. Além dos preços, as tarifas também são importantes porque para diferentes períodos horários existem tarifas distintas. O CC com estas informações pode gerir a microrede de forma a otimizar os custos. A regulamentação é outro ponto que ainda está pouco desenvolvido para as microredes, mas que deverá ter alguns desenvolvimentos num futuro próximo para facilitar a integração das microredes e a sua participação nos mercados (13).

A monitorização das microfones é extremamente importante para o CC. Cada microfonte tem uma gama específica de funcionamento e um nível de performance para cada escalão. A performance além do escalão pode variar também com as condições climatéricas, a idade da microfonte e a qualidade da manutenção. As características das microfones são extremamente importantes para o controlo da microrede, porque permite ao CC saber qual a margem de funcionamento de cada microfonte dando-lhe poder para fazer ajustes na produção de forma a otimizar o rendimento global da microrede (13).

As condições climatéricas e as variações sazonais afetam significativamente a performance das microfones renováveis e, como consequência, a produção de energia das mesmas. Além da produção, os consumos também variam, devido à necessidade de calor no inverno ser maior do que no verão. A microrede deve monitorizar constantemente as condições climatéricas e analisar históricos existentes para prever comportamentos futuros e garantir um melhor serviço de fornecimento (13).

O EMM tem de fazer, também, uma previsão de cargas, identificando os tipos de cargas e os seus requisitos para controlar a produção de energia das microfones. Também deve ser criado um histórico do comportamento das cargas, quer térmicas ou elétricas, para futuramente proporcionar aos consumidores uma melhor qualidade de serviço (13).

O CC da microrede deve ser concebido para garantir um serviço fiável com uma combinação heterogénea das cargas e com diferentes fatores de prioridade. Geralmente, as cargas são classificadas como cargas prioritárias ou críticas e não-prioritárias. As cargas prioritárias devem ser alimentadas sem qualquer interrupção, independentemente do custo da energia e, se necessário, recorrendo a uma UPS (Unidade Ininterrupta de Potência). As não-prioritárias podem ser desconectadas no caso de necessidade para manter alimentadas as prioritárias (13).

4.3.4. Estratégias de Controlo do CC

O CC necessita de uma estratégia de controlo para gerir a microrede. A escolha dessa estratégia depende da eficiência pretendida e dos respetivos custos de implementação.

A maioria das estratégias, utilizadas nas microredes, tem incorporado um sistema de gestão e otimização em tempo real. Esta estratégia é a melhor para o EMM porque logo que surge uma anomalia, automaticamente um conjunto de algoritmos efetua a avaliação da situação e propõe a melhor solução. Além das estratégias de tempo real existem estratégias baseadas em sistemas inteligentes de sistemas de controlo descentralizado e hierárquico. Os sistemas inteligentes efetuem a análise de alguns pontos de funcionamento, o estado da microrede, a categoria da corrente de falha predefinida, o acompanhamento do despacho e, simplesmente, tomam decisões de acordo com algumas regras já pré-definidas.

As estratégias de controlo hierárquico e descentralizado efetuem uma análise da informação dos despachos das várias microfones e reportam um despacho para um consumidor. A solução da estratégia em tempo real é a mais complexa e dispendiosa, mas a única capaz de tirar partido das potencialidades da microrede (13; 14).

4.4. Conclusão

Existem algumas questões chave que requerem uma extensa pesquisa para melhorar a estrutura do sistema de gestão das microredes para torná-lo mais eficaz e inteligente. Questões tão importantes como, as reformas dos mercados, que será discutido no capítulo 6, a redução das emissões, o impacto no sistema de distribuição, que será discutido no capítulo 5 ou a necessidade de infraestruturas de comunicação e o fornecimento de serviços auxiliares.

Todos estes detalhes são extremamente importantes e requerem medidas por parte dos controladores do sistema para garantir o seu correto funcionamento, a sua eficácia e a sua automatização.

Capítulo 5

Impactos de Integração de Produção Dispersa

Os sistemas de produção centralizada estão condicionados pela escassez, a médio prazo, dos combustíveis fósseis e pela obrigação na redução das emissões de carbono. Desde então, a produção dispersa (PD) tem ganhado ênfase, principalmente com a integração de sistemas de energias renováveis. Com o crescimento desta penetração de energias renováveis conectadas à rede foram surgindo alguns impactos na estrutura da rede existente e na qualidade e fiabilidade da rede. Estes sistemas de distribuição elétrica modernos têm uma grande variedade de componentes e de fontes de produção, o que faz com que a sua agregação seja complexa. Além desta complexidade, as variações das cargas dos consumidores e as respostas rápidas a essas variações, obrigam a que a rede tenha uma estrutura organizada, versátil e bem controlada para responder às anomalias que possam surgir sem comprometer o fornecimento de energia aos consumidores.

A introdução de uma grande variedade de sistemas eletrónicos sensíveis, devido à evolução dos sectores comercial e industrial levou a que a qualidade e fiabilidade da energia ganhasse uma importância considerável nos últimos anos. Para salvaguardar os sistemas mais sensíveis dos efeitos da inferior qualidade de energia e da possibilidade de baixa fiabilidade no fornecimento, muitos consumidores com cargas críticas têm investido e instalado equipamentos suplementares, como é o caso das UPS's (Unidades Ininterruptas de Potência). Estas situações levaram a uma evolução do mercado eléctrico, ao incremento da PD e aparecimento do conceito de microrede. A PD e as microrredes têm uma variedade de serviços para oferecer, no sentido de garantir energia de qualidade e fiabilidade no fornecimento.

Como principais serviços a oferecer, destacam-se os seguintes (15):

- A combinação na produção de calor e eletricidade pelas CHP ajuda a melhorar a eficiência energética do sistema eléctrico. Pode também tornar-se uma fonte de energia muito económica para o consumidor, se pretender os dois tipos de energia em lugar de apenas um;
- A geração local de energia com fontes renováveis ou não convencionais torna-se mais vantajosa para os consumidores, no sentido em que ficam mais próximos das fontes de produção e com uma garantia de melhor qualidade de serviço;

- Os geradores da PD podem ser utilizados para reduzir os picos nas cargas locais, funcionando apenas nesses períodos. Este tipo de utilização beneficia os consumidores na redução dos custos de energia, pois vão reduzir o pico de produção das grandes centrais, podendo ficar disponíveis para alimentar outros utilizadores;
- Os geradores da PD têm capacidade para funcionar em regime conectado à rede ou isolado da rede, o que permite a alimentação das cargas prioritárias durante períodos alargados quando falhar a rede de distribuição. A transição de sistema conectado à rede para isolado e vice-versa é controlada por controladores inteligentes para garantir o mínimo de distúrbios nessa operação;
- Os geradores da PD têm, também, a capacidade para fornecer energia de elevada qualidade, tensão e frequência, com o auxílio dos interfaces eletrónicos que possuem, o que torna estes geradores habilitados ao fornecimento de cargas críticas, podendo mesmo, em alguns casos, dispensar a necessidade de unidades ininterruptas de potência (UPS).

5.1. Distúrbios na Qualidade da Energia

Os geradores normalmente geram corrente e tensão AC com uma magnitude e frequência específicas. Os equipamentos dos consumidores estão preparados para funcionar dentro dessa gama de valores especificados, para manterem o seu rendimento e performance, para o qual foram criados. Entre os problemas de qualidade de energia, a interrupção do fornecimento é, incontestavelmente a mais grave, uma vez que afeta todos os equipamentos ligados à rede elétrica. Os distúrbios na qualidade de energia provocados por desvios de magnitude e frequência na forma de onda também criam problemas nos equipamentos dos consumidores, reduzindo a sua capacidade de funcionamento ou mesmo danificando-os. A seguir são descritos alguns desses tipos de distúrbios (16):

- *Transitórios ou Transientes*- Ocorrem como resultado de fenómenos transitórios, tais como a comutação de bancos de condensadores ou descargas atmosféricas. Em ambos os casos existe uma variação repentina de corrente durante um curto período de tempo;
- *Subtensão Momentânea* - Também conhecido por “cava de tensão” é uma queda do valor nominal da tensão. A tensão existe, mas o seu valor é muito menor que o esperado. É um problema causado geralmente por um mau equilíbrio das cargas por parte da distribuição da energia elétrica;
- *Sobretensão Momentânea* - É o inverso da subtensão e pode ser provocada, entre outros casos, por situações de defeito ou operações de comutação de equipamentos ligados à rede elétrica;
- *Interrupção Momentânea* - Ocorre quando o sistema elétrico dispõe de disjuntores com religador, que abrem na ocorrência de um curto-circuito, fechando-se automaticamente após alguns milissegundos e mantendo-se ligados caso o curto-circuito já se tenha extinguido;
- *Flutuação da Tensão* - Acontece devido a variações intermitentes de certas cargas, causando flutuações nas tensões de alimentação, que se traduz, por exemplo, em oscilações na intensidade da iluminação elétrica;

- *Micro-cortes de Tensão* - Resultam de curto-circuitos momentâneos, que ocorrem durante intervalos de comutação dos semicondutores de potência dos retificadores;
- *Ruído* - Corresponde ao ruído eletromagnético de alta-frequência, que pode ser produzido pelas comutações rápidas dos conversores eletrônicos de potência.
- *Inter-harmônicos* - Surgem quando há componentes de corrente que não estão relacionadas com a componente fundamental (50 Hz); essas componentes de corrente podem ser produzidas por fornos de arco ou por cicloconversores, equipamentos que alimentados a 50 Hz, permitem sintetizar tensões e correntes de saída com uma frequência inferior.
- *Distorção Harmônica* - Considerado poluição do ambiente eletromagnético, fenômeno provocado por todo o tipo de equipamentos eletrônicos, tais como computadores, televisores, balastros eletrônicos, controladores eletrônicos de cargas industriais, entre outros. Harmônicas são ondas de amplitude menor do que a fundamental e frequências múltiplas da fundamental, que aparecem quando a fundamental não é sinusoidal pura.

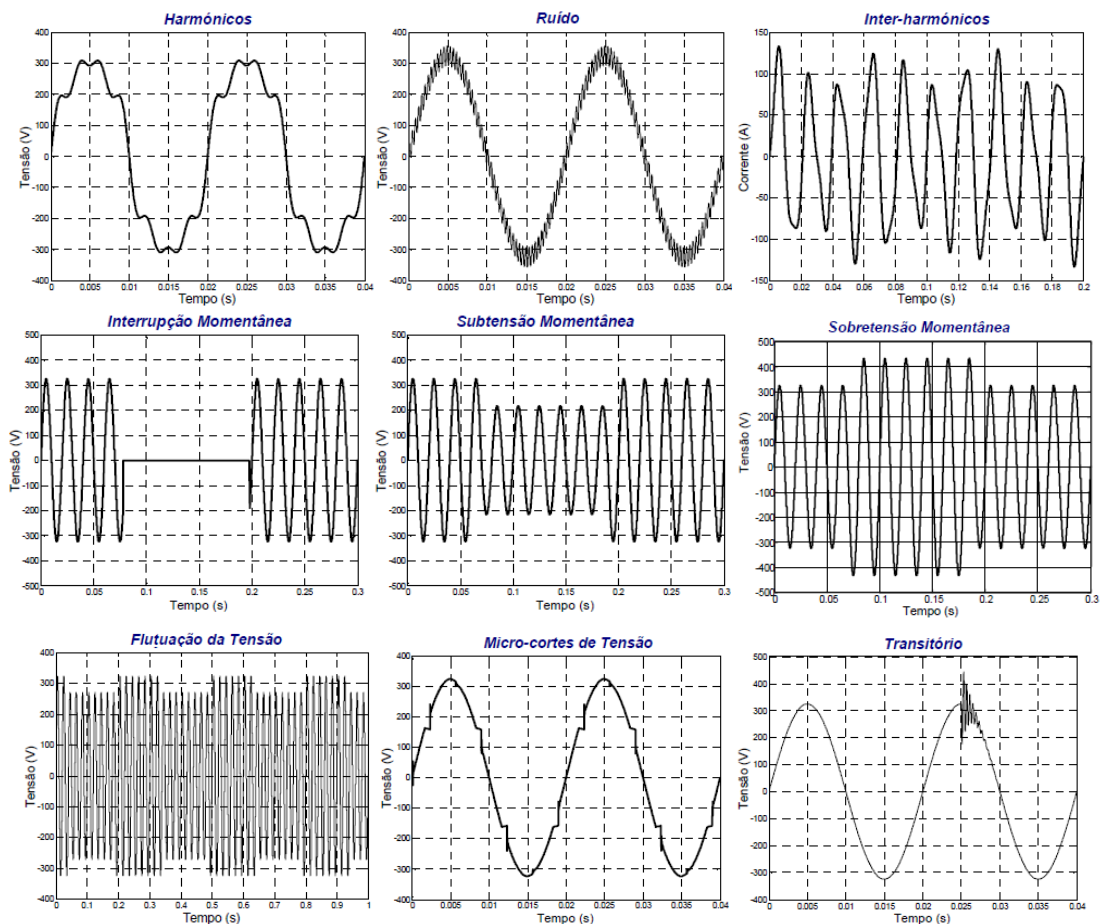


Figura 5.1 - Distúrbios na qualidade da onda no fornecimento de energia (16).

5.2. Consumidores com Cargas Críticas, Tecnologias e Equipamentos para Melhorar a Qualidade de Energia

A evolução dos equipamentos utilizados pelos consumidores incrementou o nível de exigência de qualidade de energia. Atualmente, praticamente todos os consumidores possuem equipamentos com componentes eletrônicos que necessitam de energia dentro de uma gama de parâmetros exigente para poderem funcionar corretamente. O não funcionamento desses equipamentos, por vezes, pode causar grandes perdas de produtividade e rentabilidade desses consumidores.

Para salvaguardar este tipo de equipamentos, sensíveis aos distúrbios da qualidade e fiabilidade da energia, alguns consumidores optaram por equipamentos suplementares que lhes garantem essa qualidade de energia necessária.

As UPS's, os bancos de baterias, as baterias eletrodinâmicas (*flywheels*) e os geradores *diesel* começaram por ser as primeiras soluções. A possibilidade da utilização da produção dispersa e das microrredes começou a ganhar relevo e a ser explorada.

Os principais consumidores interessados neste tipo de soluções são os consumidores de cargas prioritárias, porque qualquer anomalia no fornecimento de energia representa prejuízos avultados. Descrevem-se a seguir algumas das áreas e consumidores com estas necessidades (17):

- Sistemas Informáticos de Serviços Críticos - Instituições bancárias, financeiras e depositárias, companhias de seguros, centros de dados de governamentais particulares, companhias de caminhos-de-ferro, aviação e marítimas, segurança nacional;
- Sistemas de Telecomunicações - Estações de televisão, rádio, redes fixas e móveis, satélites e servidores de internet;
- Sistemas de Saúde - Hospitais, clínicas, centros de reabilitação, centros de apoio, maternidades e laboratórios clínicos;
- Indústria, Comércio e Serviços - Fábricas de papel, vidro e químicos, centros comerciais e estações de serviço e escritórios, entre outros.

A solução atual para os problemas de qualidade de energia elétrica tradicionais, excluindo as interrupções de serviço prolongadas, passa pela utilização de alguns dos seguintes equipamentos e tecnologias pelos consumidores (16):

- Os varístores (TVSS - *Transient Voltage Surge Suppressors*) garantem proteção contra picos de tensão nas linhas.
- Os filtros de interferência eletromagnética ajudam a prevenir o problema dos micro-cortes de tensão e garantem que o equipamento poluidor não conduz ruído de alta-frequência para a rede elétrica.
- Os transformadores de isolamento com blindagens electroestáticas garantem não só isolamento galvânico, como também evitam picos de tensão de modo comum ou entre linhas.
- Os transformadores ferro-ressonantes asseguram a regulação de tensão, bem como a filtragem de picos de tensão entre linhas.

- A regulação de tensão pode também ser garantida por meio de transformadores com várias saídas associadas a um esquema eletrônico de comutação por meio de triacs ou tirístores montados em anti-paralelo.
- As interrupções prolongadas de fornecimento de energia elétrica obrigam à utilização de fontes de alimentação ininterrupta (UPS's) ou a qualquer outra forma alternativa de geração de energia, como os geradores de emergência.
- A solução para alguns problemas de qualidade de energia elétrica obriga à utilização de conversores comutados (ou ressonantes).

5.3. Impacto no Planeamento da Rede de Distribuição

Os sistemas de distribuição foram concebidos para transportar energia dos pontos de produção através de uma rede de transporte até aos consumidores, com um fluxo de potência ativa e reativa do nível de tensão superior para um nível inferior. Mesmo com a presença de interconexões de barras na rede o conceito tradicional da rede era mantido e os procedimentos de operação e evolução da rede seguiam sempre no mesmo sentido (1).

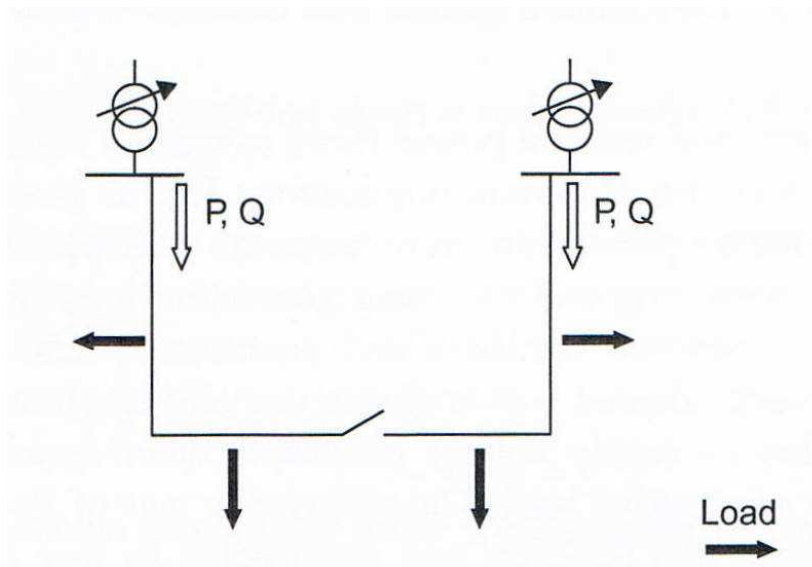


Figura 5. 2 - Sistema de distribuição convencional (1).

Com o aparecimento da produção dispersa o fluxo de potência torna-se reversível e a rede de distribuição deixa de ser um circuito de fornecimento de cargas passivo para passar a ser um sistema ativo com um fluxo de potências e tensões bidirecionais, determinado pela produção e pelas cargas.

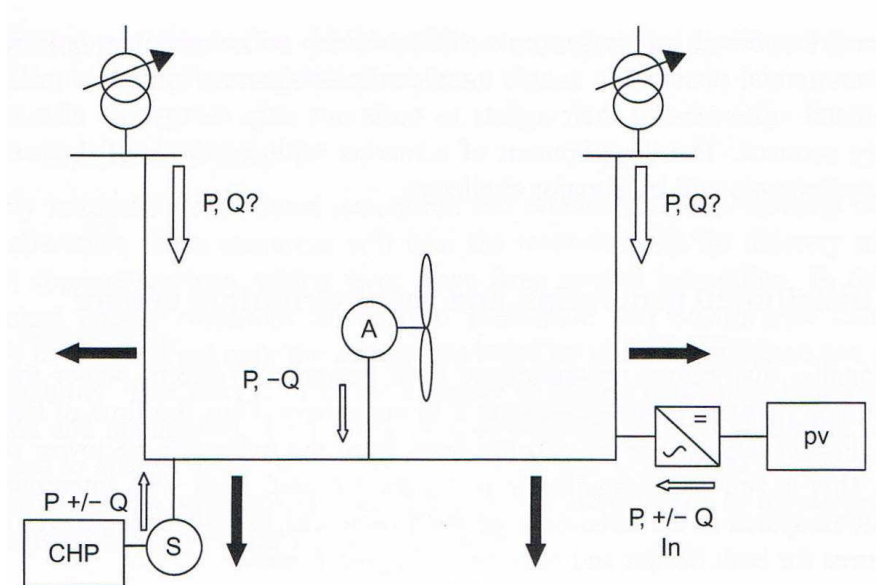


Figura 5.3 - Sistema de distribuição com PD (1).

O planeamento da rede de distribuição incide sobre alguns aspetos de relevo a ter em conta para os consumidores locais, para a rede de distribuição local com ou sem PD e também a fontes de produção, no que respeita às suas características e atributos.

Para os consumidores locais é necessário ter em conta o valor da energia utilizada, se é renovável ou convencional, o valor da fiabilidade e da qualidade de serviço exigida.

Para a rede de distribuição local é necessário ter em conta o preço da energia adquirida aos produtores, a margem de fiabilidade da rede e os custos de reforço da rede.

Quanto às fontes de produção dispersa existentes é muito importante ter em conta o tipo de fonte e as suas características, como a intermitência do seu recurso, as suas restrições de capacidade e funcionamento, a sua capacidade de resposta no fornecimento de energia de qualidade e o seu custo de produção.

Todos estes fatores influenciam diretamente o planeamento das redes de distribuição, quer na diferenciação geográfica dos custos marginais, quer na integração de PD nos locais onde se obtém a sua maior rentabilidade, definindo sempre essa análise no planeamento por hora do dia e por dia do ano (18).

São, também, importantes os custos e benefícios de todas as partes envolvidas, os benefícios sociais e ambientais e os fatores de difícil quantificação como políticas, incertezas e previsões de produção.

Os procedimentos a tomar para a execução de um bom planeamento de uma rede de distribuição ativa passam pela definição de planos base de trabalho que utilizem referências de comparação familiares aos agentes de planeamento, como a identificação de várias alternativas de PD, tendo em conta a localização, potência e tipo, os cenários de consumo, a previsão de produção, as horas de ponta e as formas dos diagramas de carga (18).

Nem sempre estes procedimentos evitam a necessidade de reforço e expansão da rede, obrigando neste caso a identificar alternativas com a utilização de métodos de otimização para se escolher os melhores traçados geográficos, as melhores localizações dos equipamentos e a escolha desses mesmos equipamentos. Tudo isto, analisando sempre os custos marginais segundo as diferentes perspetivas dos vários participantes: produtores, consumidores, distribuição e comunidade (19).

Além de todos estes aspetos, a integração de PD obriga a uma adaptação dos métodos de gestão da rede por parte dos operadores, obrigando-os a estar preparados para uma gestão em tempo real, apoiados por infraestruturas de informação, entre os vários intervenientes da rede (19).

5.4. Conclusão

Nos futuros sistemas de distribuição com controladores de resposta rápida será possível garantir o controlo da tensão e frequência dentro dos limites exigidos e providenciar o despacho de energia e serviços auxiliares. A rede de distribuição deve retirar partido dos serviços auxiliares das microredes.

A microrede funciona de forma a garantir o fornecimento de energia às suas cargas com elevados níveis de qualidade e fiabilidade e, também, para o fornecimento de serviços auxiliares ao mercado.

A maximização da eficiência das microredes é conseguida através de um bom controlo e gestão da produção para garantir o fornecimento das suas cargas, oferecer serviços auxiliares e vender o excedente de produção à rede de distribuição.

As redes de distribuição convencionais são desenhadas e protegidas para elevados níveis de falha, mas para um fluxo unidirecional de energia das fontes para as cargas.

Nas microredes, as falhas são de níveis inferiores, devido à pequena capacidade das microfuentes e à bidirecionalidade do fluxo de potência. As microredes possuem flexibilidade para superar mudanças rápidas do tipo de funcionamento conectado à rede para o modo isolado, arranque e paragem de geradores e fornecimento de cargas críticas.

A garantia do bom funcionamento das microredes está dependente de uma gestão e controlo em tempo real e de proteções adequadas.

Capítulo 6

Análise Económica e Impacto nos Mercados

6.1. Análise Económica das Microredes

A aceitação das microredes e a sua viabilidade no mercado estão significativamente relacionadas com várias questões económicas.

Na política energética atual, na qual se destacam as cargas de equipamentos em *standby*, os contadores inteligentes, o grau de utilidade pública das microredes, assim como as questões de regulamentação sobre a capacidade das pequenas fontes de produção dispersa para alimentar os consumidores vizinhos, são incentivos à implementação da geração distribuída. Esses incentivos, no entanto, não são suficientes para tornar as microredes uma realidade comum a curto prazo.

A regulamentação associada às questões económicas necessita de ser concebida cuidadosamente, de modo a estabelecer uma participação eficiente das microredes nos mercados de eletricidade, assim como no fornecimento dos vários serviços auxiliares. Existem, ainda, muitas barreiras regulamentares que necessitam de ser revistas para viabilizar as microredes.

A sustentabilidade da produção de energia centralizada tem sido questionada devido ao aparecimento de pequenas produções próximas dos locais de consumo, porque a construção e expansão de novas centrais tradicionais obriga à reestruturação da rede distribuição. Esses investimentos tornam-se economicamente inviáveis nesta fase, pelas preocupações ambientais, pela dificuldade de encontrar locais com viabilidade para a sua construção, assim como também pela utilização de recursos fósseis. As microredes apesar de não conseguirem competir em capacidade de produção com as centrais convencionais existentes são competitivas com o crescimento do sistema elétrico e tornam os mercados de eletricidade mais voláteis e com preços mais acessíveis, evitando o crescimento das infra-estruturas e de grandes investimentos (3).

6.1.1. Principais Questões Económicas das Microredes

As principais questões económicas das microredes podem ser categorizadas da seguinte forma (3):

Otimização do Investimento Tecnológico - Os aspetos económicos básicos do ótimo investimento e da viabilidade tecnológica necessitam de ser aplicados no funcionamento das microredes. A experiência acumulada no funcionamento dos sistemas de energia atuais e nas suas redes de distribuição deve ser otimizada e aplicada nas microredes. A operação das microredes deve ser assegurada por ferramentas que garantam a estabilidade e fiabilidade do sistema.

Utilização de aspetos únicos - Alguns aspetos únicos das microredes devem ser utilizados apropriadamente. Ao contrário da distribuição convencional, a microrede pode oferecer níveis de fiabilidade heterogéneos aos consumidores finais, de acordo com a necessidade de cada consumidor. Os constrangimentos económicos do funcionamento dos sistemas centralizados são diferentes dos constrangimentos nas microredes. É o caso do ruído que é insignificante nas grandes centrais que se encontram, geralmente, mais afastadas dos consumidores, ao contrário da produção dispersa.

Relacionamento dos sistemas de distribuição - A relação de uma microrede com o sistema de distribuição é um aspeto importante da economia de uma microrede. A microrede necessita de uma gestão em tempo real para garantir um interface de sucesso entre os consumidores e utilizadores, porque ajuda a otimizar a utilização dos recursos, quer pela microrede, quer pela rede de distribuição. Esta situação torna-se mais evidente quando a microrede tem a capacidade de participar nos mercados, disponibilizando serviços auxiliares á rede, como redução de perdas e controlo de tensão, assim como outros serviços para os consumidores finais.

6.1.2. Comparação Económica entre microredes e redes tradicionais

As microredes são normalmente desenhadas e construídas para funcionar com um grupo de consumidores que se preocupam com a minimização dos impactos ambientais. O principal objetivo é, no entanto, reduzir a fatura energética de calor e eletricidade dos consumidores participantes da microrede.

Uma microrede com cogeração pode reduzir custos de operação ao fornecer energia elétrica juntamente com o fornecimento de calor, porque não possui custos de transmissão, não apresenta perdas de distribuição, não tem congestionamentos e outros custos associados aos sistemas tradicionais.

O aparecimento da produção dispersa e a sua interligação vieram ajudar a uma diminuição dos preços do custo da energia e na produção de energia limpa. Estes aspetos combinados com a potencialidade dos serviços auxiliares criam um novo desafio económico para as centrais de produção de energia. Os sistemas convencionais oferecem baixos riscos e custos de transação para os utilizadores finais. O principal obstáculo na economia das microredes está associado aos custos de instalação e colocação em funcionamento. Para incentivar este tipo de instalações, os governos têm atribuído subsídios, principalmente às fontes de energia renovável e sistemas de armazenamento eficientes para o funcionamento em modo isolado (3).

Os custos de instalação devem, no entanto, ser analisados e ter em consideração a evolução económica das microredes e os benefícios para os consumidores, bem como a capacidade de funcionamento em sistema isolado, assim como custos adicionais de manutenção da rede para garantir fiabilidade.

Os aspetos económicos das microredes têm várias semelhanças, como os aspetos das redes de distribuição nas regras económicas de despacho, na minimização de custos através da combinação dos recursos e características das fontes de produção, na poupança e racionalização de energia, com utilização em diferentes horários e na adequação e combinação de tecnologias de geração baseada na necessidade de cargas com o menor custo possível (3).

Relativamente às redes de distribuição, as microredes apresentam mais vantagens, que consistem na otimização económica da produção de energia combinada com a produção de calor e com a otimização da gestão de procura e produção.

A otimização através da produção de calor e eletricidade combinados conseguem obter-se com a integração de sistemas CHP. Na maioria dos países, os sistemas CHP, são apenas utilizados para a produção de eletricidade. Quando estes sistemas estão integrados em microredes torna-se mais simples o aproveitamento do calor desperdiçado na produção de eletricidade, porque as centrais ficam perto dos pontos de consumo. Este aproveitamento faz com que o rendimento da central atinja os 80% e reduza consideravelmente os gases de efeito de estufa (3).

Os sistemas CHP podem ser considerados o principal elemento dos aspetos económicos das microredes. Para os consumidores residenciais, comerciais ou industriais que necessitem dos dois tipos de energia, também possuem vantagem em adquirir energia proveniente dos sistemas CHP, porque o custo de produção é inferior á aquisição separada dos produtos. Quanto á gestão da procura e gestão do fornecimento é considerada a segunda prioridade dos aspetos económicos de uma microrede.

Nas redes estes aspetos estão associados ao controlo das cargas e à análise e planeamento através da gestão ativa da procura, com o agendamento de cargas, tarifas e contratos. Nas microredes o mais importante é o custo marginal da geração própria em qualquer instante. Para se obter este controlo a microrede faz uma gestão em tempo real, implementado um novo paradigma de controlo de cargas e fontes de produção (3).

6.1.3. Questões emergentes nos aspetos económicos de uma microrede

Existem alguns aspetos económicos exclusivos das microredes relativamente às redes tradicionais. As microredes podem fornecer níveis heterogéneos de fiabilidade a vários consumidores.

O desenho e o funcionamento das redes tradicionais são normalmente concebidos para alimentar os consumidores com uma qualidade, fiabilidade e potência uniformes, independentemente das diferentes necessidades dos consumidores.

No caso das microredes, é controlada a fiabilidade e qualidade dos pontos de funcionamento dos consumidores, o que resulta num serviço de alimentação dos consumidores de acordo com as suas necessidades, indo ao encontro da sua satisfação através da disponibilidade de vários níveis heterogéneos de fiabilidade. Assim, os consumidores com necessidades de qualidade e fiabilidade de energia inferiores podem adquirir energia de níveis heterogéneos inferiores, reduzindo as suas faturas. Do mesmo modo, os consumidores mais exigentes podem garantir o seu serviço dentro das suas exigências, optando por níveis superiores tendo, também, um custo superior. Apesar do custo superior, deixa de ser necessário o investimento em equipamentos extra como UPS's, geradores Diesel, entre outros, para garantir um fornecimento de elevada qualidade e fiabilidade às cargas mais críticas.

Os consumidores dos níveis superiores têm prioridade sobre os consumidores de níveis inferiores no caso de surgir alguma falha de fornecimento de algum gerador.

A existência de sistemas de armazenamento nas microredes permite a continuidade de fornecimento dentro dos níveis estabelecidos em situações de falha de algum gerador, o que garante aos consumidores de cargas críticas uma maior fiabilidade e qualidade de fornecimento de energia (3).

6.1.4. Questões económicas entre microredes e redes de distribuição

Existem algumas questões económicas no relacionamento das microredes com a rede de distribuição. O paradigma da microrede tem que coexistir com o paradigma da rede de distribuição, assim como tem que respeitar as suas regras. Na perspetiva da rede de distribuição, a microrede é vista como uma extensão de um grupo de consumidores, geradores ou ambos.

Para acompanhar o crescimento das cargas é necessária a adaptação e reformulação das redes de distribuição, o que não é tão simples nas microredes, uma vez que os geradores são interligados a um ponto da rede radial da distribuição, dificultando a definição de preços para o consumidor final. Os preços podem ser definidos para os novos consumidores no sentido de incentivar o consumo nas horas de congestionamento, encorajando, assim, o desenvolvimento da microrede com integração de novas fontes de geração, bem como o

controlo de cargas nas horas de congestionamento. No entanto, esta implementação é difícil, devido às dependências e configuração das redes vizinhas existentes.

Numa área com elevada densidade populacional cada consumidor possui várias possibilidades de ser alimentado da rede vizinha, optando pela posição económica mais vantajosa. Estas situações causam congestionamentos, sendo necessária a variação dos custos nas redes vizinhas para gerir o fluxo de energia e favorecer a rede local. Assim, é necessário que as microredes tenham uma participação no mercado, no fornecimento de energia e na prestação de serviços, apesar de apenas poder fornecer e prestar serviços em baixos níveis de tensão.

As microredes com um controlo e protecções adequadas garantem um fornecimento de energia com elevada fiabilidade e continuidade de serviço às cargas mais sensíveis. Esta contribuição é extremamente vantajosa para os mercados e para a estrutura da rede, porque quanto maior é a oferta no mercado mais rápidas serão as respostas dos sistemas às alterações das cargas (3).

6.2. Participação das Microredes nos Mercados

A reforma dos mercados de eletricidade trouxe alterações na estrutura vertical dos monopólios existentes. Os três principais níveis dessa estrutura são a produção, transporte e distribuição. Ambos os níveis se mantêm no processo de reestruturação, mas com a alteração gradual das acessibilidades à rede, garantindo a não discriminação de todos os participantes, incluindo fornecedores e consumidores. Anteriormente, a estrutura vertical monopolizada controlava a produção, transporte e distribuição sem nenhum tipo de competição e com um serviço pobre e pouco eficiente. Não permitia também a troca de fornecedor por escolha do consumidor (3).

A reestruturação assegura a competição, oferecendo melhores serviços e a possibilidade de os consumidores adquirirem serviços auxiliares e energia elétrica de outros fornecedores, garantindo a melhor relação custo-qualidade. Encoraja, também a participação de pequenos produtores e o interesse dos consumidores em celebrar contratos de fornecimento com esses produtores a preços inferiores (3).

Este novo conceito reduz significativamente o custo da energia para os consumidores através da abertura do mercado à competição, permitindo a escolha do nível de qualidade e do tipo de serviço por parte do consumidor. A competição dos mercados obriga também a uma maior eficiência económica pela expansão das zonas operacionais através das interconexões de fontes de produção dispersa e novas interconexões. Esta situação proporciona a criação de novas oportunidades de negócio com a aplicação de novas tecnologias de produção, medição e telecomunicações (3).

As microredes que eram vistas apenas como cargas controladas pelas suas fontes de produção passam a ter um papel ativo e mais participativo com a compra e venda de energia e serviços auxiliares, com a reestruturação dos mercados, o que garante uma maior fiabilidade, qualidade e eficiência ao sistema elétrico e com custos inferiores (3).

No sentido de reestruturar o monopólio dos mercados de eletricidade, têm sido desenvolvidos alguns modelos no sentido de garantir um melhor serviço para os consumidores. Destacam-se os seguintes modelos:

- Modelo *Pool*;
- Modelo Bilateral;
- Modelo Híbrido.

6.2.1. Modelo Regulatório de Reestruturação do Mercado *Pool*

A reestruturação do sector elétrico teve início com um processo de reformulação das entidades envolvidas, os produtores, os distribuidores e os consumidores. Uma das formas de relacionamento adotadas entre os produtores, distribuidores e consumidores elegíveis foi a adoção de mercados centralizados, também designados por mercados em *Pool*. Os mercados, cujo processo de reestruturação é baseado no modelo *Pool*, administram mecanismos de curto prazo com o objetivo de manter em equilíbrio a produção e o consumo através de ofertas de venda comunicadas pelos produtores e das ofertas de compra comunicadas pelos distribuidores e consumidores. A *Pool* funciona normalmente no dia anterior àquele a que corresponde a entrega física da energia contida nas ofertas de venda e de compra (20).

Os mercados de energia elétrica são um caso especial dos mercados de *commodities* pela impossibilidade de armazenar a energia elétrica em quantidades consideráveis para entrega no futuro. A necessidade de manter o sistema em constante equilíbrio, onde a produção satisfaz a procura em cada instante, é tão importante como a necessidade de respeitar as restrições técnicas do sistema. Estas especificidades, próprias dos mercados de energia elétrica, condicionam a sua gestão e o funcionamento. Nos mercados, onde o organismo de comercialização é a *Pool*, a energia elétrica é transacionada no dia anterior ao período da entrega física da energia, com um período definido entre 24 a 48 intervalos, de 60 a 30 minutos, respetivamente. Em cada intervalo os agentes que atuam no mercado deverão submeter ofertas de compra e venda. Os elementos comuns às ofertas simples e complexas baseiam-se no preço que se dispõem a vender ou a pagar e a quantidade de energia que pretendem vender ou comprar. As ofertas complexas englobam os requisitos das ofertas simples e mais algumas condições, como o gradiente de carga, que devem ser levadas em consideração no despacho. No final do período de comercialização são obtidos despachos provisórios, onde as restrições técnicas do sistema não são consideradas. Os produtores procuram maximizar os seus resultados operacionais, oferecendo a quantidade de energia correspondente ao custo marginal de produção que iguale o preço do mercado, porque não têm permissão nem possibilidade de alterar o preço de mercado (20).

A gestão financeira do sistema para o dia seguinte é essencial, mas além disso também é necessário efetuar a sua gestão técnica, de forma a assegurar o funcionamento eficiente do sistema elétrico. A figura 6.1 esquematiza as várias atividades correspondentes à operação e à gestão do sistema elétrico para um mercado cujo funcionamento é baseado no modelo *Pool*. A exploração do sistema e o funcionamento do mercado é assegurado por duas entidades independentes: o Operador do Mercado (OM) e o Operador do Sistema (OS). O operador de mercado administra o mercado para o dia seguinte, recebe as ofertas de venda e

compra dos agentes autorizados a participar no mercado: produtores, distribuidores e consumidores (20).

No modelo *Pool* existem duas variantes: o *Pool Simétrico* e o *Pool Assimétrico*. Na variante *Pool Simétrico*, o OM recebe as ofertas de venda e de compra para cada período horário do dia seguinte. O preço a que os geradores vão ser remunerados e que os consumidores irão pagar será determinado em função das ofertas de venda nas situações em que ocorram congestionamentos. Na variante *Pool Assimétrico*, de acordo com a carga prevista e as ofertas de venda de energia, o OM determina o despacho provisório sem levar em consideração as restrições técnicas do sistema. O preço a que os geradores irão ser remunerados é determinado em função das ofertas mais económicas para satisfazer a carga prevista, estando também sujeito a alterações no caso de ocorrerem congestionamentos (20).

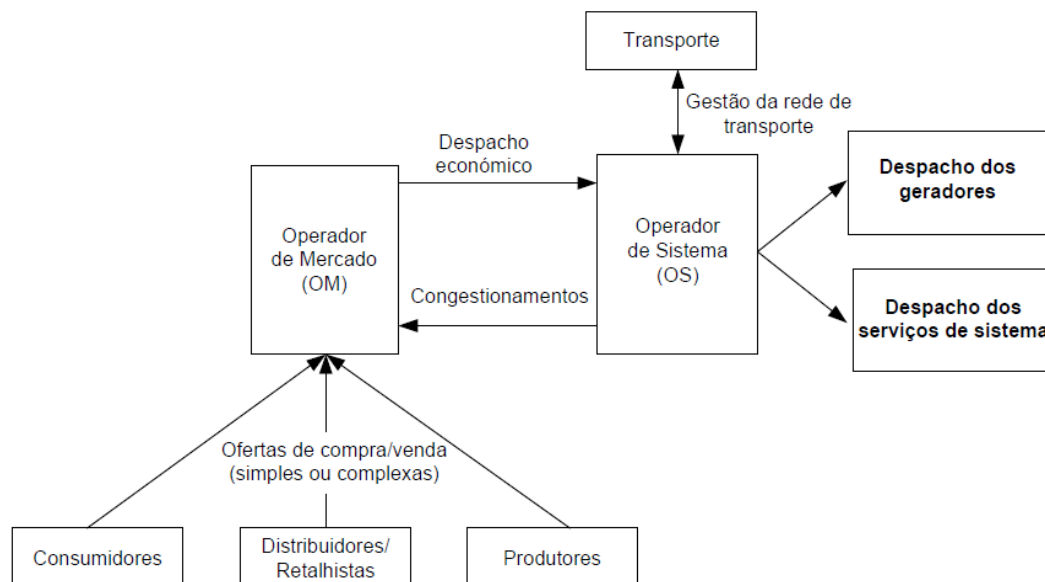


Figura 6.1 - Estrutura e exploração do mercado de energia elétrica baseado no modelo *Pool* (20).

O Operador de Sistema (OS) transmite a informação relativa ao despacho provisório ao Operador de Mercado (OM). O OS efetua um conjunto de estudos com o objetivo de efetuar a validação técnica desse despacho, baseando-se na informação disponibilizada pelo OM. Se o OS verificar que não ocorrem situações de congestionamento, tais como violação dos limites técnicos da rede, comunica os valores aos produtores, contrata os serviços de sistema necessários ao funcionamento do sistema e transmite a informação relativa aos trânsitos de potência obtidos para cada intervalo de comercialização ao gestor da rede de transporte. Se verificarem situações de congestionamento do sistema, o operador de sistema e o operador de mercado interagem de forma a corrigir tais congestionamentos. A elevada dinâmica de funcionamento dos sistemas elétricos obriga a uma constante necessidade de manter o sistema em equilíbrio e os intervalos de comercialização com duração de 60 ou 30 minutos (20).

A solução destes problemas decorrentes da gestão dos sistemas elétricos passa pela aplicação de dois mecanismos:

- **Mercados intradiários ou mercados de ajustes** - Quando o operador de sistema identifica alguma restrição que impeça que o programa inicial se cumpra com os critérios mínimos de qualidade, segurança e fiabilidade, o operador de mercado recorre ao mercado intradiário para resolver as restrições com ajustes de eficiência económica nas ofertas. Podem, também, recorrer ao mercado os produtores e consumidores que tenham participado na sessão do mercado diário correspondente. Uma vez resolvidas todas as restrições técnicas do sistema e, tendo como base o mercado intradiário, é elaborado o programa final que incorporará os seguintes elementos: preço marginal para cada período de programação e a energia correspondente em função da unidade de produção ou de consumo, cujas ofertas de venda ou de compra sejam aceites e/ou modificadas (20).

- **Ajustes em tempo real** - O operador de sistema necessita sempre de recorrer a diversos mecanismos em tempo real. O redespacho, a alterações de topologia da rede e os serviços do sistema, com o objetivo de satisfazer os critérios de qualidade e de segurança, são alguns desses mecanismos (20).

A fixação do preço de mercado no mecanismo central de comercialização da energia *Pool*, pode ser de dois tipos:

- **Ex-ante** - No *Pool* simétrico é a fixação do preço de mercado com base no encontro das curvas agregadas das ofertas de venda e de compra. No *Pool* assimétrico, é com base no encontro da curva agregada das ofertas de venda com a carga prevista. Os preços finais de compra e de venda são depois determinados com base no preço determinado em bolsa. Ao preço de mercado é adicionado posteriormente o custo dos serviços de sistema, das perdas e os custos resultantes de medidas de conservação de energia ou de apoio às energias renováveis. O mercado elétrico Espanhol e Escandinavo são dois exemplos com fixação de preços *ex-ante* (20).

- **Ex-post** - Consiste na fixação de preços a partir da produção e da procura efetivamente verificada. Os mercados de energia elétrica Australiano e da Nova Zelândia são exemplos de mercados com fixação de preços *ex-post*. (20).

6.2.1.1. Modelo *Pool* Simétrico

O modelo *Pool* Simétrico é a variante mais frequente nos mercados de energia elétrica, o qual é gerido por mecanismos simétricos, onde os produtores, distribuidores e consumidores, realizam ofertas de compra e de venda. Todos os agentes, a quem seja permitido participar

no mercado, deverão realizar as suas ofertas ao operador de mercado baseando-se nos seguintes elementos:

- As ofertas de venda simples são ofertas apresentadas pelos produtores em cada período horário e na unidade de produção que contenha informação relativa ao ponto de absorção da energia nas suas ofertas de venda e respetivo preço de venda. As ofertas de venda complexas baseiam-se nos requisitos das ofertas simples, acrescentando algumas condições técnicas ou económicas como, a potência mínima e máxima, o gradiente de carga, o tempo mínimo de funcionamento e as paragens programadas (20).
- As ofertas de compra que os distribuidores e consumidores deverão efetuar no mercado deverão conter informações relativas ao ponto de absorção da energia contida nas ofertas e o preço que pretendem pagar. O ponto de intersecção das duas curvas corresponde ao Preço de Mercado (*Market Clearing Price*) e a energia correspondente a esse preço é a Quantidade Negociada (*Market Clearing Quantity*) (20).

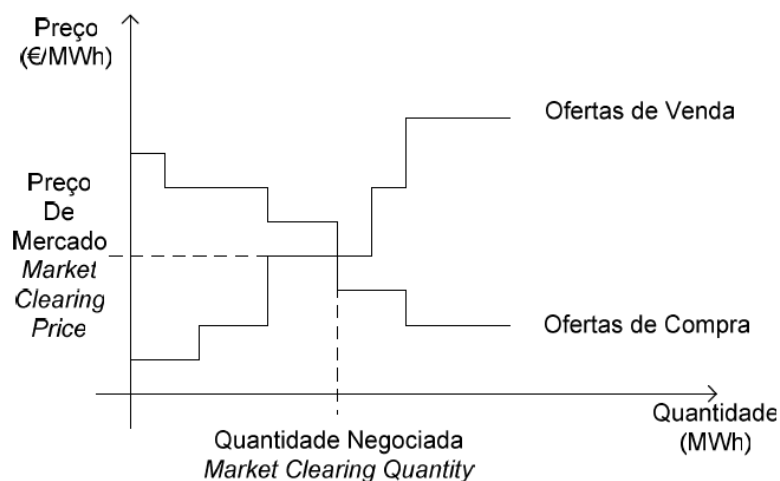


Figura 6.2 - Processo de ordenamento das ofertas do *Pool* Simétrico (20).

A eficiência deste tipo de mercados está diretamente dependente do número de agentes que participam no mercado e da inexistência de atuações em cartel. Se o número de agentes do mercado e se a carga ou a capacidade de produção estiver repartida pelos mesmos, as curvas da oferta e da procura apresentarão descontinuidades menos evidentes, aproximando-se de uma curva contínua, à medida que o número de agentes aumenta. A figura 6.3 ilustra as curvas de oferta e de procura para um *Pool* simétrico ideal.

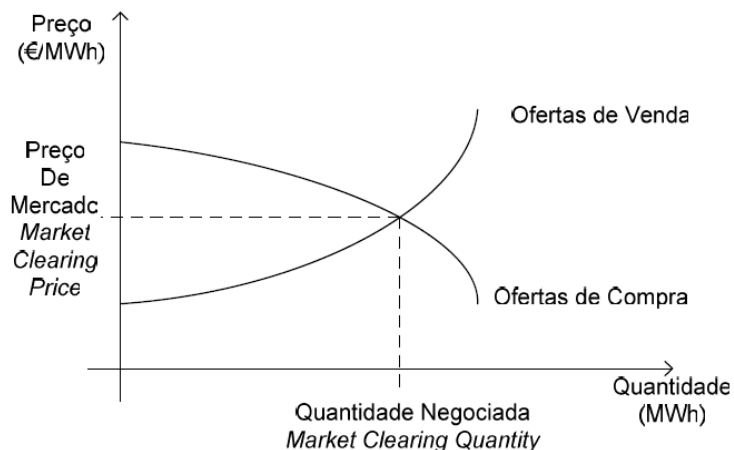


Figura 6.3 - Funcionamento de um *Pool* simétrico ideal (20).

Um mercado perfeito seria um mercado com um elevado número de participantes, onde a distribuição da carga implica uma capacidade de produção superior à carga. No caso de a capacidade de produção ser igual à carga, o último gerador a ser despachado tem sempre a garantia de um grande poder de mercado, realizando ofertas de venda com preços superiores ao seu custo marginal de produção (20).

6.2.1.2. Modelo *Pool* Assimétrico

O modelo *Pool* Assimétrico baseia-se em ofertas de venda de energia elétrica. As ofertas de venda são ordenadas por ordem crescente do preço, onde o preço de mercado é o ponto de intersecção da curva das ofertas de venda com a previsão de carga para o período em questão. O modelo assimétrico considera a carga inelástica, obrigando o consumidor a pagar qualquer preço que resulte do funcionamento do mercado. A figura 6.4 ilustra o funcionamento deste tipo de mercados para um determinado período. Neste tipo de mercados, os preços de mercado são fortemente influenciados pelas ofertas de venda e pelo nível da procura (20).

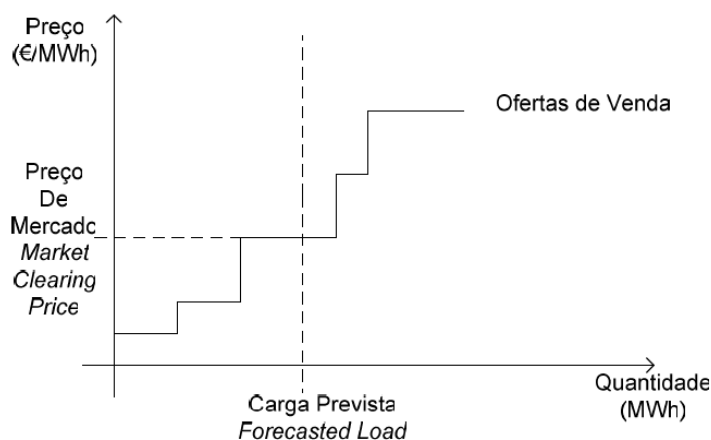


Figura 6.4 - Processo de ordenamento das ofertas do *Pool* Assimétrico (20).

No *Pool* assimétrico como no *Pool* simétrico, se o número de produtores for elevado e se a capacidade de produção for repartida entre eles, a curva associada às ofertas de venda não apresentará descontinuidades acentuadas, o que permite manter as ofertas e reduzir a volatilidade do preço de mercado. A figura 6.5 pretende ilustrar o funcionamento de um *Pool* assimétrico ideal (20).

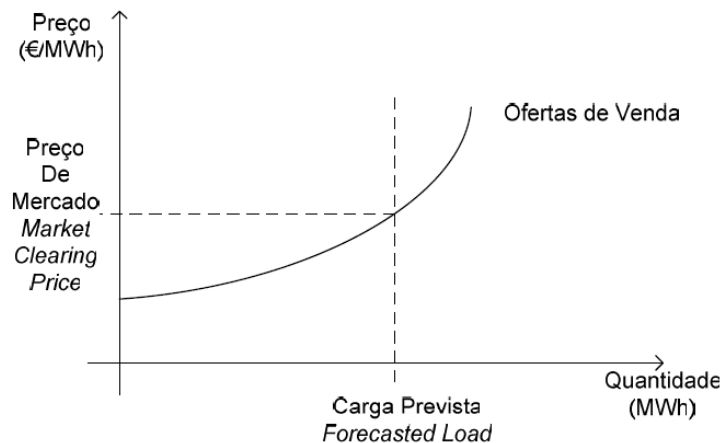


Figura 6.5 - Funcionamento de um *Pool* assimétrico ideal (20).

6.2.1.3. Mercados Obrigatórios e Voluntários

Os mercados de energia elétrica que utilizam o modelo *Pool* na comercialização podem classificar-se simétrico ou assimétrico quanto ao tratamento concedido à produção e à carga, mas também se podem classificar quanto à obrigatoriedade de participação. Os mercados de energia elétrica com a *Pool*, como organismo central de comercialização, classificam-se como mercados obrigatórios ou voluntários. Nos mercados obrigatórios, os produtores, os distribuidores e os consumidores elegíveis são obrigados a apresentar propostas de venda e de compra à *Pool* e nos voluntários essa obrigatoriedade deixa de existir. Em alguns mercados obrigatórios apenas é permitido aos produtores realizar ofertas de venda, funcionando a *Pool* como o único agente que tem a prerrogativa de comprar a energia elétrica aos vários produtores (20).

6.2.2. Modelo Regulatório de Reestruturação do Mercado Bilateral

O modelo bilateral baseia-se no princípio da livre concorrência, mas com as regras do mercado. No mercado, tanto os produtores como os consumidores, tentam maximizar os seus lucros. Este modelo poderá ser menos transparente que o modelo *Pool* se os contratos bilaterais forem realizados entre duas partes, sendo apenas conhecidos os aspetos técnicos que têm de ser comunicados ao operador de sistema. Em certos mercados, alguns contratos

bilaterais são estabelecidos através de intermediários, mas estando sempre sujeitos ao risco de a outra parte não cumprir com as suas obrigações contratuais (20).

Nos mercados de energia elétrica existem alguns mercados organizados onde são transacionados contratos normalizados sob a supervisão do operador de mercado. A transação de contratos em mercados organizados proporciona uma maior segurança, pois verifica-se a superintendência das operações por organismos isentos e alheios às partes. Os mercados organizados proporcionam uma melhor informação e uma diminuição do risco, uma vez que a bolsa garante o cumprimento dos mesmos. O preço num mercado organizado depende das expectativas dos investidores o que o torna mais justo, mas com o inconveniente na dificuldade de anulação do respetivo contrato (20).

No modelo bilateral verifica-se uma separação total entre a parte económica e a parte técnica, exceto quando os contratos provocam violações de quaisquer restrições da rede. Neste caso, após a submissão dos contratos para avaliação por parte do operador do sistema, quando se verificarem violações das restrições da rede, esses contratos terão que ser retificados, de forma a ultrapassar esses problemas e satisfazer os interesses das partes envolvidas (20).

6.2.3. Modelo Regulatório de Reestruturação do Mercado Híbrido

A reestruturação dos mercados do sector elétrico não está limitada ao modelo *Pool*, pode sempre optar por estruturas mistas. A generalidade dos países que procederam à reestruturação do sector elétrico, utilizaram estruturas mistas nas quais funciona em simultâneo um mercado centralizado de transação de energia elétrica, tipo *Pool*, e é permitido o estabelecimento de contratos bilaterais. Nestes mercados a participação na *Pool* é voluntária. Na figura 6.6 pretende esquematizar-se as várias atividades do planeamento e da gestão do sistema elétrico para um mercado com um funcionamento baseado no modelo *Pool* - Bilateral ou Híbrido (20).

No mercado híbrido existe uma bolsa, como objetivo de permitir aos vários agentes do mercado a transação da energia elétrica, com a definição de um preço mais transparente, dado que o mesmo é resultante da interação dos vários agentes. O mercado não é imune à possibilidade de um agente exercer poder de mercado, sendo esse poder usado para elevar artificialmente o preço. Um menor número de participantes implica uma maior probabilidade da ocorrência de um aumento artificial do preço. O preço no mercado *spot* apresenta uma elevada volatilidade, que resulta do facto da energia elétrica ser uma *commodity* com características muito específicas, resultantes da impossibilidade de a armazenar em grandes quantidades para entrega numa data futura (20).

Os contratos bilaterais acabam por introduzir uma função estabilizadora do preço de mercado e permitem aos seus agentes protegerem-se da volatilidade do preço no mercado. As implicações na gestão técnica da rede para viabilizar os contratos bilaterais, têm que ser avaliadas pelo operador do sistema, de forma a evitar congestionamentos na rede. Os mercados de energia elétrica, com uma estrutura mista, são complementados com instrumentos financeiros que permitem o aumento da liquidez do mercado e em simultâneo maior volatilidade do preço de mercado (20).

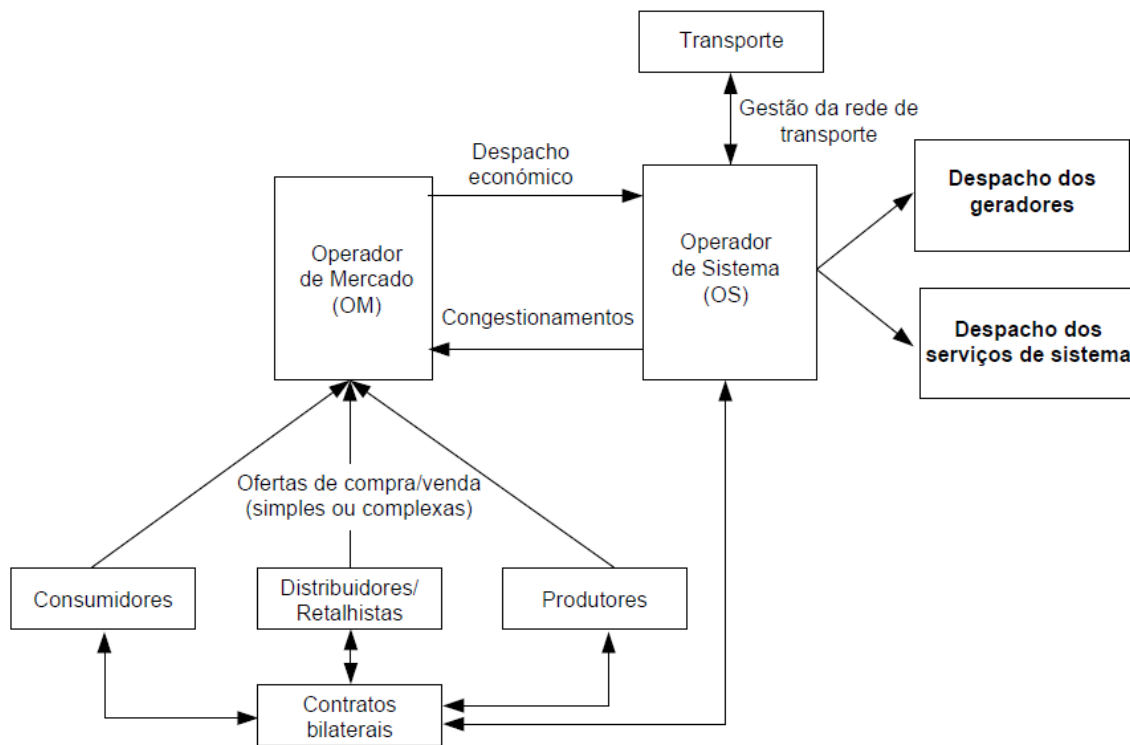


Figura 6.6 - Estrutura e exploração do mercado de energia elétrica baseado no modelo *Pool-Bilateral* ou *Híbrido* (20).

O operador do sistema é o responsável pela informação técnica relativa ao despacho provisório resultante das ofertas de venda e de compra realizadas pelo operador de mercado e pela informação técnica relativa aos contratos que contemplam a entrega física da energia. O ponto de entrega ou de injeção na rede, a quantidade de energia negociada e a data de entrega, são algumas das informações fundamentais. O operador de sistema com essas informações avalia a existência de congestionamentos na rede, tendo em conta as restrições técnicas do sistema elétrico. Na presença de congestionamentos, a sua gestão efetua a alteração da topologia da rede ou dos despachos sem alterar o programa de trocas. Se essas medidas não forem suficientes o operador do sistema recorre ao mercado intradiário para incrementar ou reduzir a potência até os congestionamentos serem resolvidos (20).

6.3. Conclusão

As perspetivas da indústria elétrica e das entidades de regulação governamentais indicam que as microrredes podem integrar pequenos geradores nas proximidades dos consumidores com inúmeras vantagens. Estas, podem coexistir com a rede de distribuição desde que a potência necessária na rede local seja suficiente para o seu funcionamento, quer importando ou exportando energia.

A microrede pode exercer o controlo integral da rede local para efetuar o balanço da potência e frequência e no controlo da tensão, garantindo elevados níveis de qualidade e fiabilidade.

O seu funcionamento terá que respeitar as especificações técnicas e regulamentares de cada país, onde estão implementadas e integrar uma diversidade de fontes de produção apropriada á sua gestão, garantindo o seu funcionamento em sistema isolado quando necessário.

A análise económica das microredes evidencia um elevado potencial para ambas as partes, quer na produção, quer no consumo, com bastantes benefícios económicos. Os benefícios a curto prazo das microredes são aplicáveis a perspetivas futuras, mas com um maior número de possibilidades e soluções.

As microredes podem influenciar diretamente na implementação de outras medidas de poupança e redução de consumo domésticos e de escritório para atingir as metas do protocolo de Kioto na redução dos gases de efeito de estufa, devido às alterações que obriga nos mercados de eletricidade e na estrutura regulamentar. Este será um meio para o início de uma mudança com grandes benefícios para a sociedade (3).

Capítulo 7

Análise de Casos Práticos

7.1. Análise do Funcionamento das Microredes em Sistema Isolado

O crescimento dos consumos e das preocupações ambientais causadas pelas centrais convencionais fez com que a produção dispersa ganhasse maior relevância comercial e técnica por todo o mundo. A produção dispersa integra-se em todas as conexões da rede de distribuição de baixa tensão com geradores de pequena potência. Esses geradores são essencialmente fontes de energia como o fotovoltaico, turbinas eólicas, *fuel Cells*, mini e micro hídricas, geradores de aproveitamento da energia das ondas e marés e microturbinas. Estas tecnologias começam a ser preferidas pela sua elevada eficiência (microturbinas e *fuel cells* baseadas em sistemas CHP), pelo baixo impacto ambiental (fotovoltaico, eólicas, micro hídricas) e pela sua aplicabilidade no fornecimento de energia de qualidade a cargas sensíveis.

Os mercados de eletricidade com as reformas e avanços tecnológicos nos ramos da eletrónica e telecomunicações ficam habilitados para garantir um controlo e supervisão eficiente das fontes de produção dispersa.

Nos subcapítulos seguintes serão analisados alguns modos de funcionamento de microredes com integração de produção dispersa em modo isolado (3).

7.1.1. Configuração dos Sistemas de Estudo

O sistema 1 representado na figura 7.1 contempla um gerador de produção dispersa de 28,1MVA e 11kV, designado por GT conectado à rede de distribuição por um transformador de 33/11kV (3).

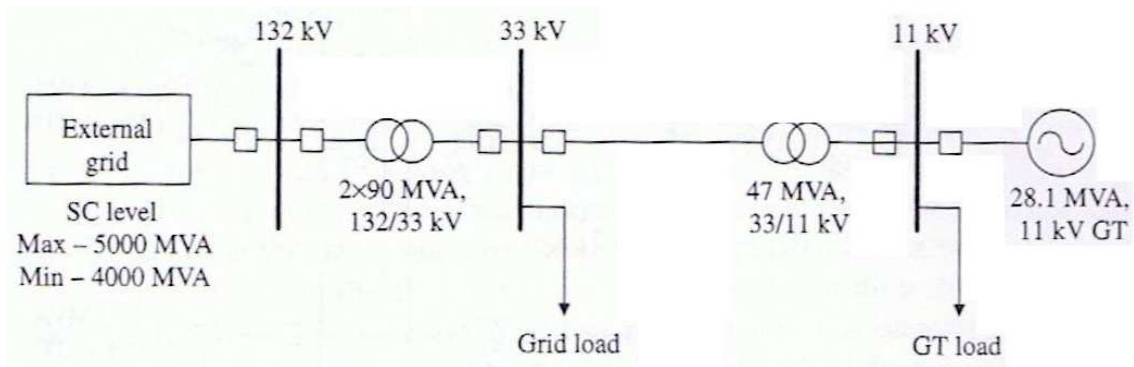


Figura 7.1 - Sistema 1 (3).

O sistema 2 representado na figura 7.2 contempla dois geradores de produção dispersa de 28,1MVA e 11kV, designados por GT#1 e GT#2 conectados à rede de distribuição por transformadores de 33/11kV (3).

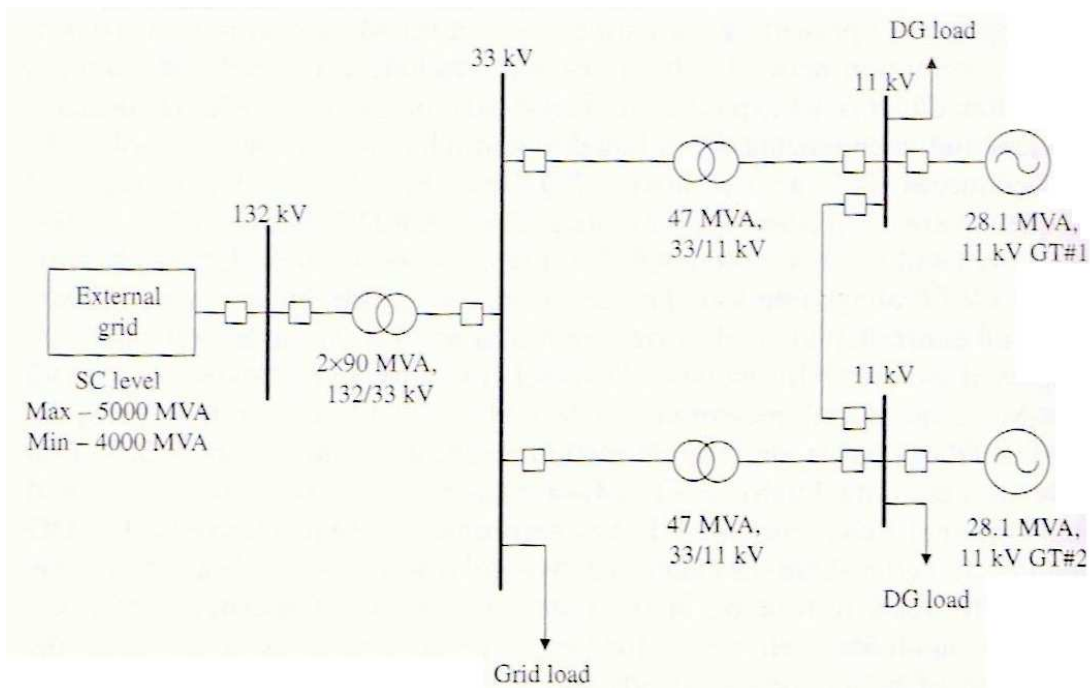


Figura 7.2 - Sistema 2 (3).

O sistema 3 representado na figura 7.3 contempla três geradores de produção dispersa de 28,1MVA e 11kV, designados por GT#1, GT#2 e GT#3 conectados à rede de distribuição por transformadores de 33/11kV (3).

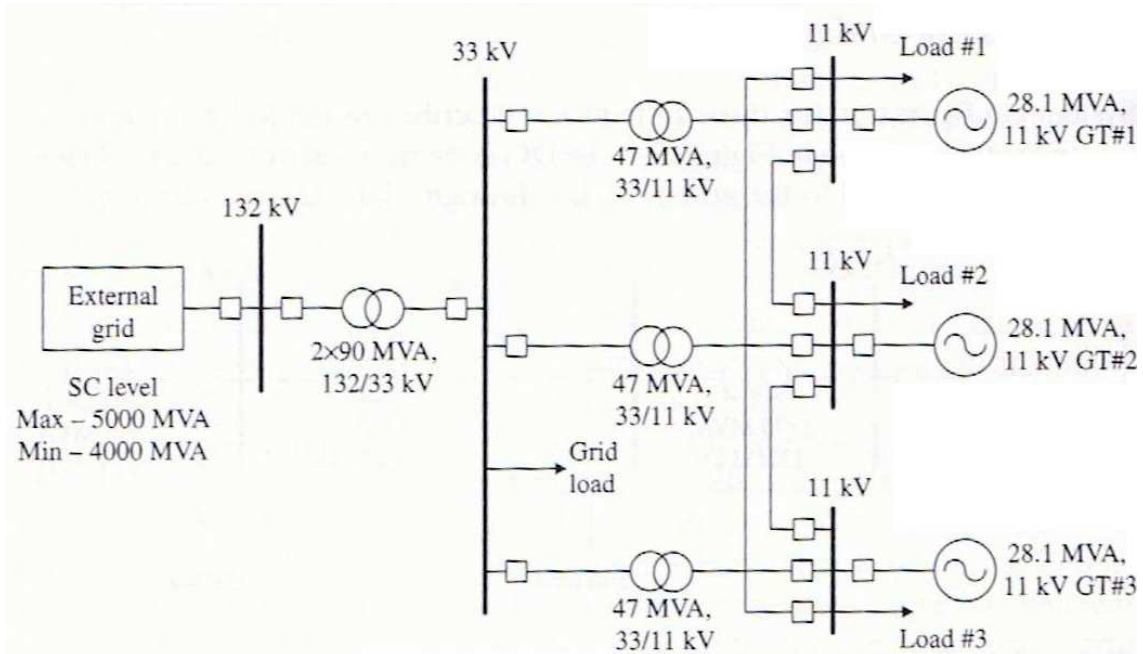


Figura 7.3 - Sistema 3 (3).

Todos os sistemas de produção dispersa, quando interligados com o barramento de 11kV e este com a rede, têm que funcionar com as condições de qualidade da rede, com tensão e frequência reguladas pela rede. Em modo isolado essa regulação passa a ser feita pelas fontes de produção dispersa. A rede de 132kV possui uma capacidade de inércia extremamente elevada comparativamente com as fontes de produção dispersa.

Nestes estudos considerou-se um nível máximo e mínimo de curto-circuito de 5000 e 4000MVA respetivamente. A rede de 33kV tem uma carga de 100kW quando o sistema funciona em modo isolado. O controlo da tensão e frequência estão modelados de acordo com as normas IEEE padrão (3).

7.1.2. Casos de Estudo

Neste subcapítulo será analisado o sucesso do funcionamento da PD em modo isolado para os três sistemas referidos no subcapítulo 7.1.1. Para todos os estudos, as tensões e frequências serão analisadas nos barramentos de 11kV para cada uma das fontes de PD interligada (3).

7.1.2.1. Caso de Estudo 1

Este estudo contemplou o sistema 1. O teste consiste na análise da passagem do modo de funcionamento ligado à rede para modo isolado. Atribuiu-se uma temporização de 25 segundos para o corte da rede de distribuição e verificar o comportamento do sistema relativamente à frequência e tensão. Pode-se verificar na figura 7.4 que, no barramento de 11kV, a tensão demora cerca de 7 segundos a estabilizar e a frequência cerca de 6 segundos. Neste caso, os controladores conseguem manter a tensão e frequência dentro dos limites permitidos (3).

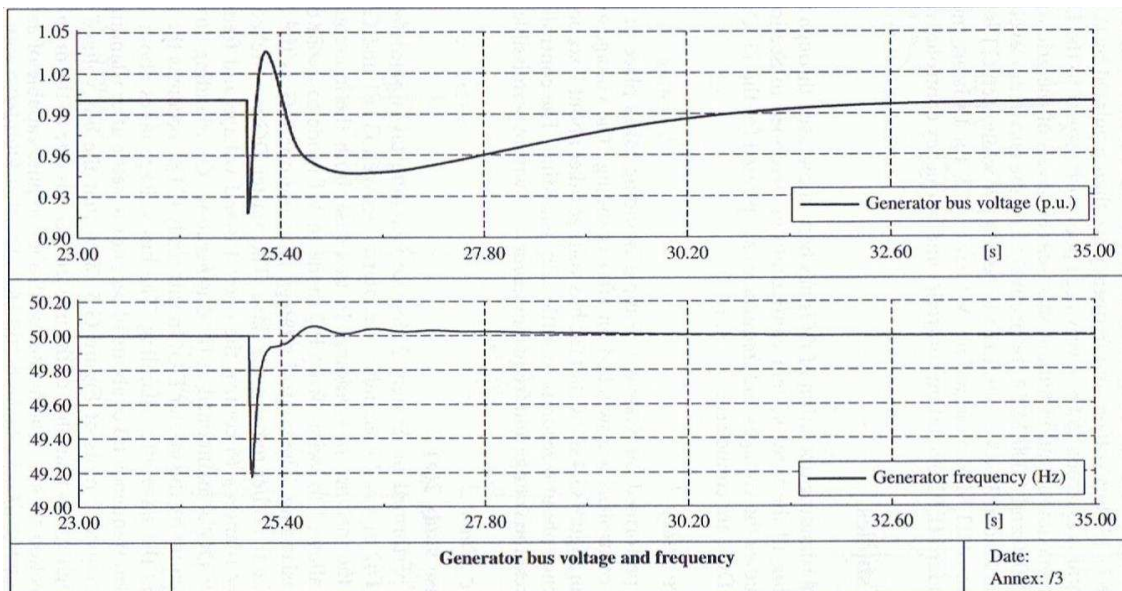


Figura 7.4 - Análise da tensão e frequência no barramento de 11kV para o gerador GT. (3).

7.1.2.2. Caso de Estudo 2

Este estudo contemplou o sistema 2. O teste consiste na análise da passagem do modo de funcionamento ligado à rede para modo isolado. Atribuiu-se uma temporização de 25 segundos para o corte da rede de distribuição e verificou-se o comportamento do sistema relativamente à frequência e tensão nos dois geradores. O gerador GT#1 assume-se como *Master* e o Gerador GT#2 assume-se como *Slave*. Qualquer um dos geradores pode assumir a função de *Master*. Pode-se verificar na figura 7.5, que no barramento de 11kV a tensão demora cerca de 11 segundos a estabilizar e a frequência cerca de 10 segundos. Neste caso, os controladores conseguem manter a tensão e frequência dentro dos limites permitidos no

gerador *Master*, apesar do gerador *Slave* na curva de tensão descer um pouco mais que o *Master* (3).

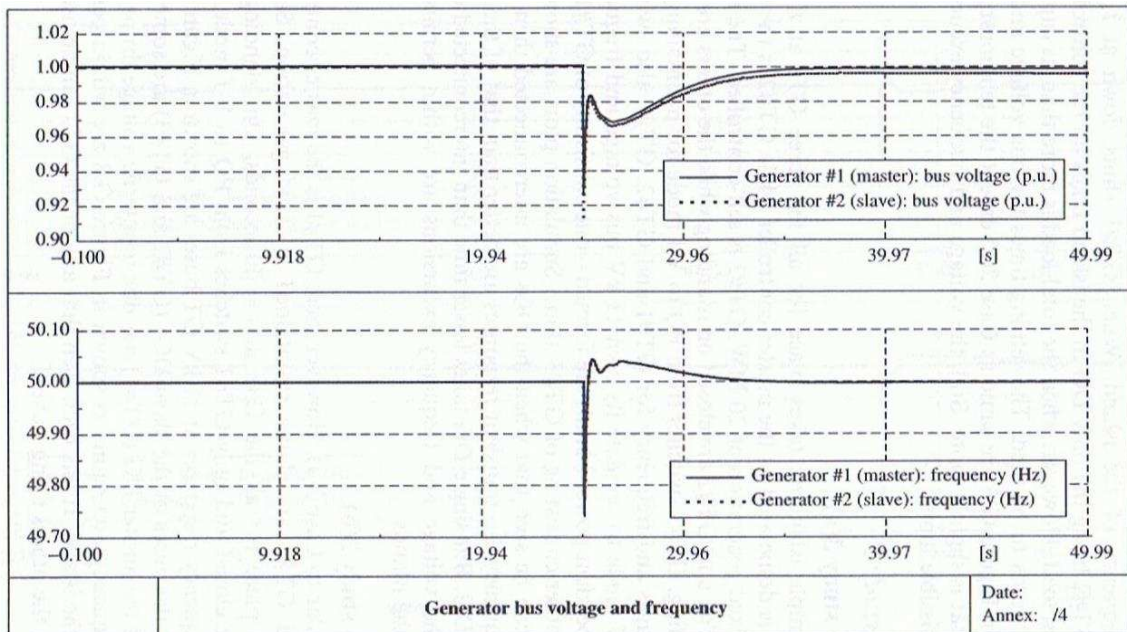


Figura 7.5 - Análise da tensão e frequência no barramento de 11kV para o gerador GT#1 *Master* e GT#2 *Slave*. (3).

Numa segunda análise considerou-se que o gerador GT#1 se assume como *Master* e o Gerador GT#2 como *Slave*. Neste caso o gerador *Master* apenas fica em funcionamento até aos 50 segundos e a partir desse ponto apenas o gerador *Slave* assume toda a carga.

Pode-se verificar na figura 7.6 que o GT#2 assume toda a carga. Caso o gerador não tenha capacidade para assumir toda a carga, as cargas não prioritárias terão de ser deslastradas. Neste caso os controladores conseguem manter a tensão e frequência dentro dos limites permitidos no gerador, apesar do gerador *Slave* na curva de frequência descer para valores inferiores aos da figura 7.5 (3).

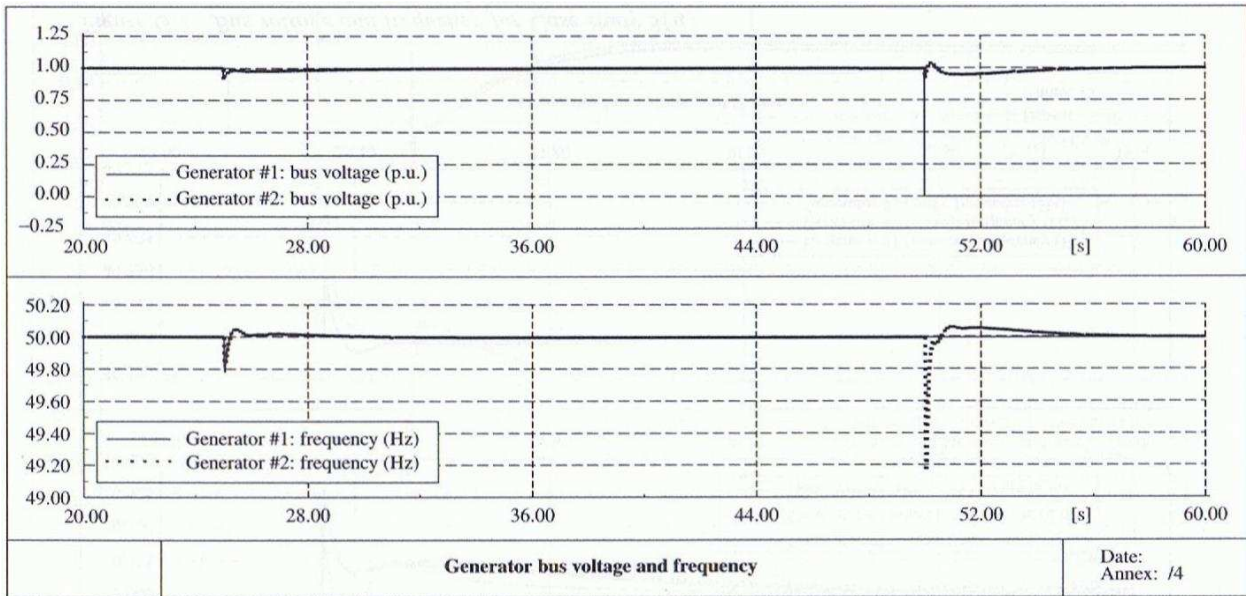


Figura 7.6 - Análise da tensão e frequência no barramento de 11kV para o gerador GT#1 Master e GT#2 Slave, e o GT#1 desconnectado aos 50 segundos (3).

7.1.2.3. Caso de Estudo 3

Este estudo contemplou o sistema 3. O teste consiste na análise da passagem do modo de funcionamento ligado à rede para modo isolado. Atribuiu-se uma temporização de 25 segundos para o corte da rede de distribuição e verificou-se o comportamento do sistema relativamente à frequência e tensão nos três geradores. O gerador GT#1 assume-se como *Master* e o Gerador GT#2 assume-se como *Slave* e o GT#3 é autocontrolado. As interligações entre o GT#1 e GT#2 estão fechadas e as outras todas abertas. O GT#1 e o GT#2 funcionam em modo isolado ou interligados e o GT#3 funciona isolado. Pode-se verificar na figura 7.7 que quando os dois geradores estão interligados, os transitórios são inferiores quando funcionam em modo isolado. Mas os geradores em sistema isolado demoram menos tempo a responder e apesar disso, os controladores conseguem manter a tensão e frequência dentro dos limites permitidos (3).

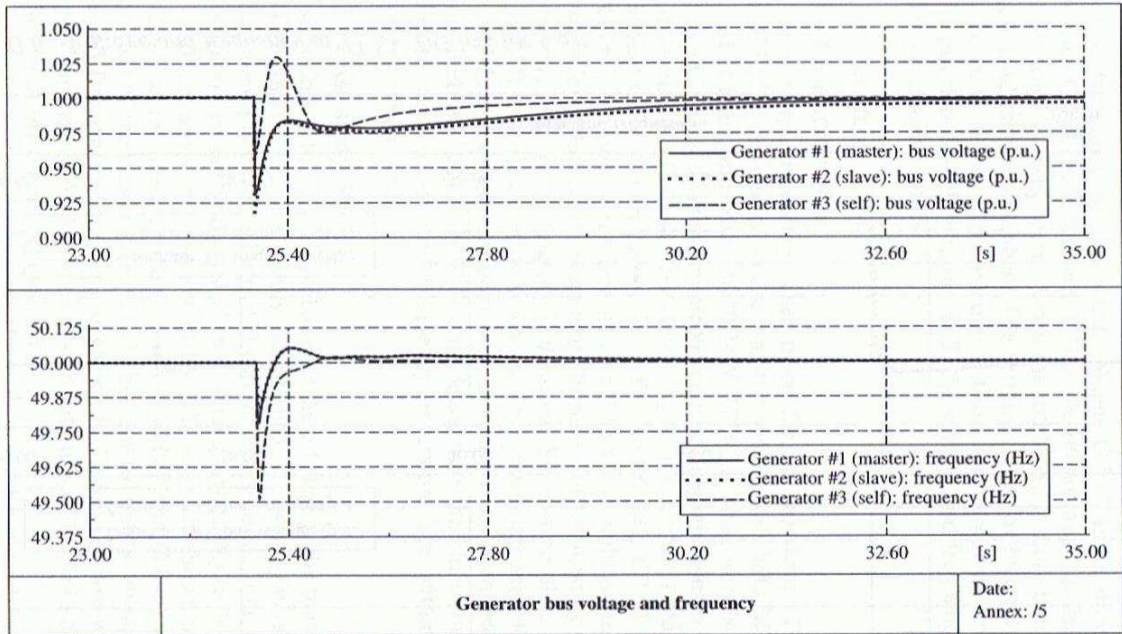


Figura 7.7 - Análise da tensão e frequência no barramento de 11kV para o gerador GT#1 *Master* e GT#2 *Slave* interligados e o GT#3 *Isolado* (3).

Numa segunda análise considerou-se a passagem do modo de funcionamento ligado à rede para modo isolado com uma temporização de 20 segundos. O gerador GT#1 assume-se como *Master* e o gerador GT#2 e GT#3 assumem-se como *Slave*. As interligações entre todos os geradores estão fechadas. Pode-se verificar na figura 7.8 que o transiente de tensão do gerador GT#1 é superior aos transientes dos outros dois geradores. Apesar disso os controladores conseguem manter a tensão e frequência dentro dos limites permitidos. Estes resultados verificam-se mesmo que qualquer outro gerador se assuma como *Master* (3).

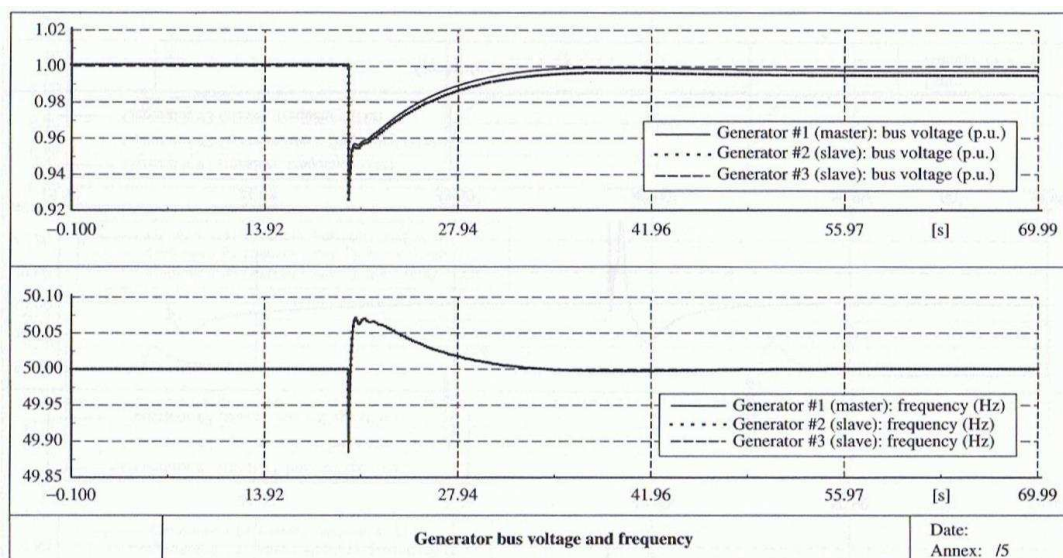


Figura 7.8 - Análise da tensão e frequência no barramento de 11kV para o gerador GT#1 *Master* e GT#2 e GT#3 *Slave* todos interligados (3).

Numa terceira análise considerou-se a passagem do modo de funcionamento ligado à rede para modo isolado com uma temporização de 20 segundos. O gerador GT#1 assume-se como *Master* e o gerador GT#2 e GT#3 assumem-se como *Slave*. Aos 40 segundos o GT#2 passa a *Master* e o GT#1 a *Slave*. As interligações entre todos os geradores estão fechadas. Pode verificar-se na figura 7.9 que, o transiente de tensão do gerador *Master* é superior aos transientes dos outros geradores *Slave*. Apesar disso, os controladores conseguem manter a tensão e frequência dentro dos limites permitidos. Estes resultados verificam-se mesmo que qualquer outro gerador se assuma como *Master* (3).

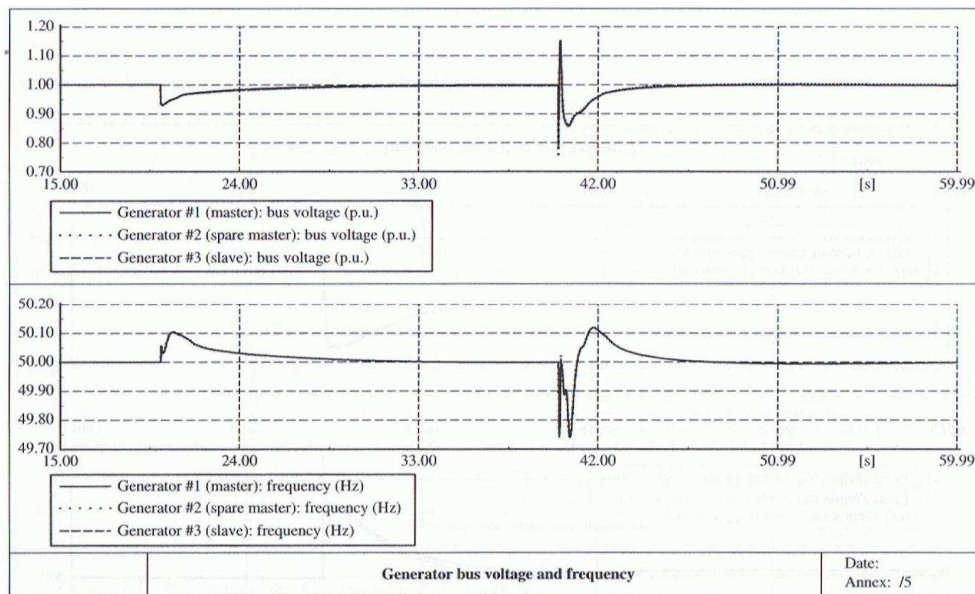


Figura 7.9 - Análise da tensão e frequência no barramento de 11kV para o gerador GT#1 *Master-Slave*, GT#2 *Slave-Master* e GT#3 *Slave* todos interligados (3).

Numa quarta análise considerou-se a passagem do modo de funcionamento ligado à rede para modo isolado com uma temporização de 20 segundos. O gerador GT#1 assume-se como *Master* e o gerador GT#2 e GT#3 assumem-se como *Slave*. Aos 40 segundos o GT#2 passa a *Master* e o GT#1 e GT#3 a *Slave*. Aos 60 segundos o GT#3 passa a *Master* e o GT#1 e GT#2 a *Slave*. As interligações entre todos os geradores estão fechadas. Pode verificar-se na figura 7.10, que o transiente de tensão do gerador *Master* é superior aos transientes dos outros geradores *Slave*. Apesar disso, os controladores conseguem manter a tensão e frequência dentro dos limites permitidos. Estes resultados verificam-se mesmo que qualquer outro gerador se assuma como *Master* (3).

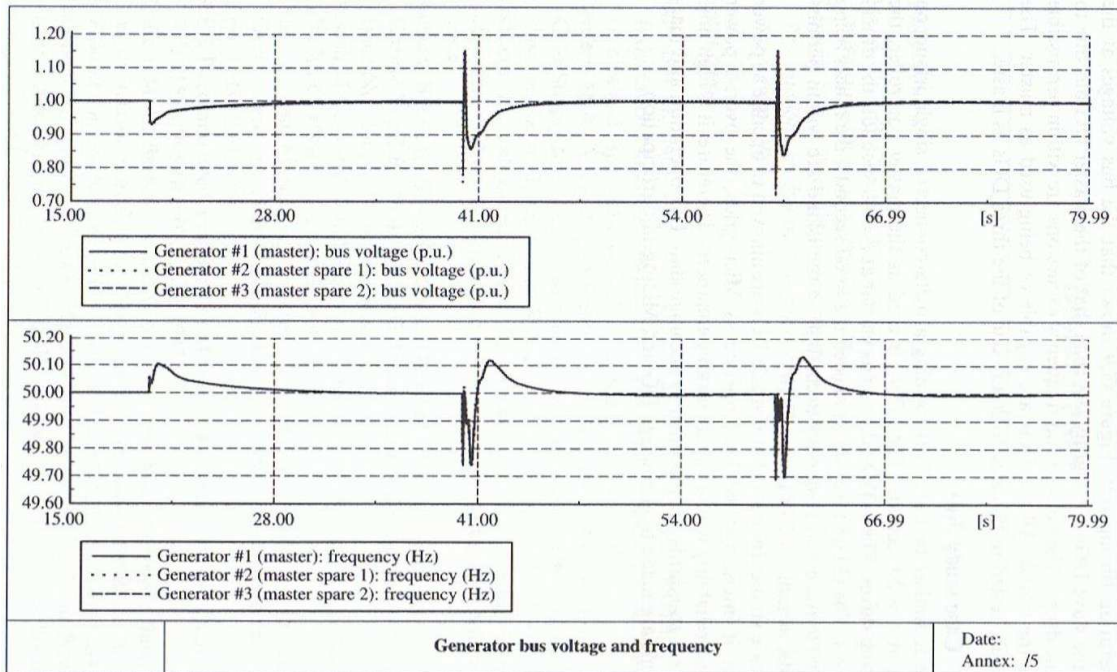


Figura 7.10 - Análise da tensão e frequência no barramento de 11kV para o gerador GT#1 *Master-Slave*, GT#2 *Slave-Master-Slave* e GT#3 *Slave-Master* todos interligados (3).

7.1.3. Conclusão

Os casos de estudo indicam que se uma microrede funcionar em modo isolado com uma ou várias fontes de produção dispersa interligados, o fornecimento de energia elétrica de qualidade é garantido, apesar de serem necessárias algumas modificações e precauções para as microredes poderem ter uma participação nos mercados.

7.2. Cenários de Preços de Mercado nas Microredes

Neste subcapítulo pretende-se analisar mecanismos de gestão de preços de mercado das microredes e a sua influência na participação nos mercados. Serão consideradas duas técnicas importantes da estratégia do mercado, intradiário e tempo-real. O objetivo é definir o preço de mercado (MCP) para definir o despacho das fontes de PD. Os consumidores estão definidos como cargas não-prioritárias e prioritárias.

O comportamento do mercado de eletricidade afeta o preço de compra e venda de energia e uma redução no preço torna-o mais competitivo e permite-lhe a participação noutros mercados.

As micredes operam em mercados locais e fornecem usualmente consumidores residenciais e pequenas ou médias estruturas comerciais e industriais. Na maioria dos casos, estes consumidores não têm padrões de exigência muito elevados e a sua participação no mercado é diminuta, apenas necessitam que as suas cargas sejam alimentadas em qualquer condição.

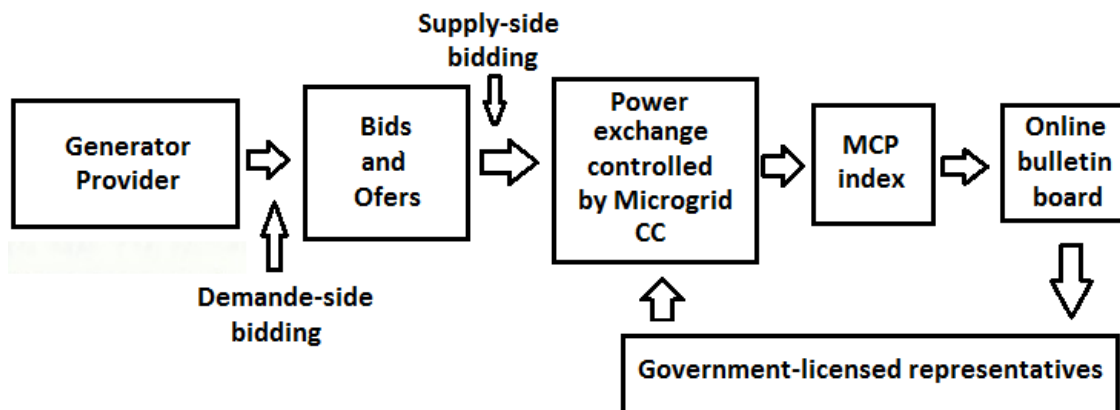


Figura 7.11 - Estrutura do modelo de mercado em estudo (3).

7.2.1. Caso de Estudo

A micrede considerada contempla os seguintes geradores:

- G1 - Microturbina;
- G2 - Fuel Cell;
- G3 - Gerador Diesel;
- G4 - Turbina Eólica;
- G5 - Sistema Fotovoltaico.

A obtenção do MPC consiste na obtenção do preço mais baixo no ponto de intersecção entre as curvas da oferta e da procura.

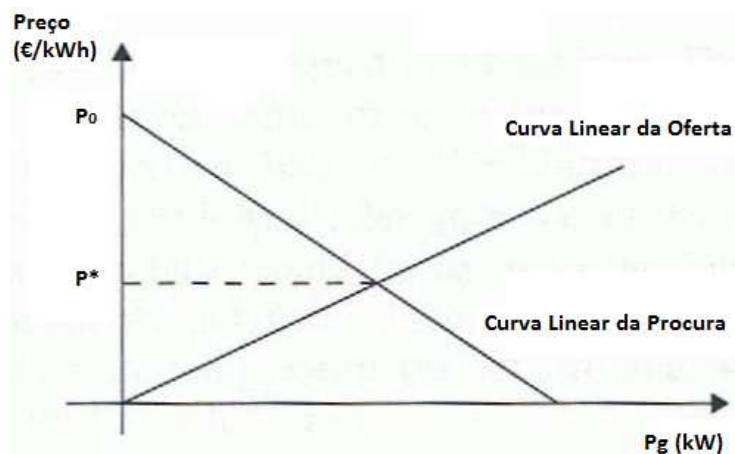


Figura 7.12 - Relação Linear entre a curva da oferta e da procura (3).

7.2.1.1. Caso de Estudo 1

O caso consiste numa licitação unidirecional de fornecimento linear de uma carga de 80kW.

Numa primeira análise os geradores G4 e G5 não estão disponíveis, o fornecimento será efetuado pelos geradores CHP e pelo gerador *diesel*.

Tabela 7.1 — Parâmetros de licitação (3).

Geradores	Preço (€/kWh)	P_{gmax} (kW)	P_{gmin} (kW)	Produção (kJ/kWh)
G1	0,1056	30	Mínimo para a garantir a carga Térmica	12,186
G2	0,1386	50	Mínimo para a garantir a carga Térmica	
G3	0,063	60	0	9,480
G4	0,2700	10	0	
G5	0,4756	20	0	

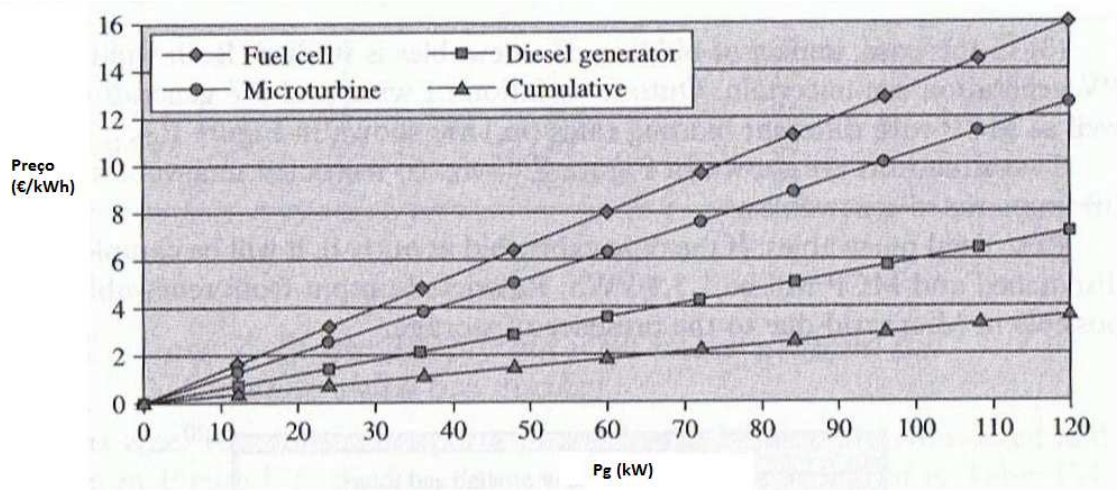


Figura 7.13 - Curvas de fornecimento individual e combinado dos geradores G1, G2 e G3 (3).

Na figura 7.13 consegue-se visualizar o valor MCP com a intersecção da curva combinada com a potência de consumo de 80kW, o que neste caso é aproximadamente 2,5€/kWh.

Tabela 7.2 — Licitação para a primeira análise (3).

Geradores	Psaída (kW)	Preço (€)
G1	24	60
G2	18	45
G3	48	120
Total	80	225

Numa segunda análise, incluindo os geradores G4 e G5, com um valor de geração combinada de 30kW e que não está sujeita a licitação, reduz o valor da licitação dos outros 3 geradores dos 80kW para os 50kW. Assim o MCP para este caso é 1,5€/kWh, de acordo com a figura 7.13 e 7.14. Neste caso as licitações são inferiores a 1 como na primeira análise.

Tabela 7.3 — Licitação para a segunda análise (3).

Geradores	Psaída (kW)	Preço (€)
G1	14	21
G2	12	18
G3	24	36
G4 e G5	30	45
Total	80	120

Numa terceira análise incluindo os geradores G4 e G5, com um valor de geração combinada de 30kW, mas sujeito a licitação, o comportamento do MCP será de acordo com a figura 7.14. Neste caso as licitações variam entre 1 e 10 e o MPC é calculado baseado nas licitações de todos os cinco geradores.

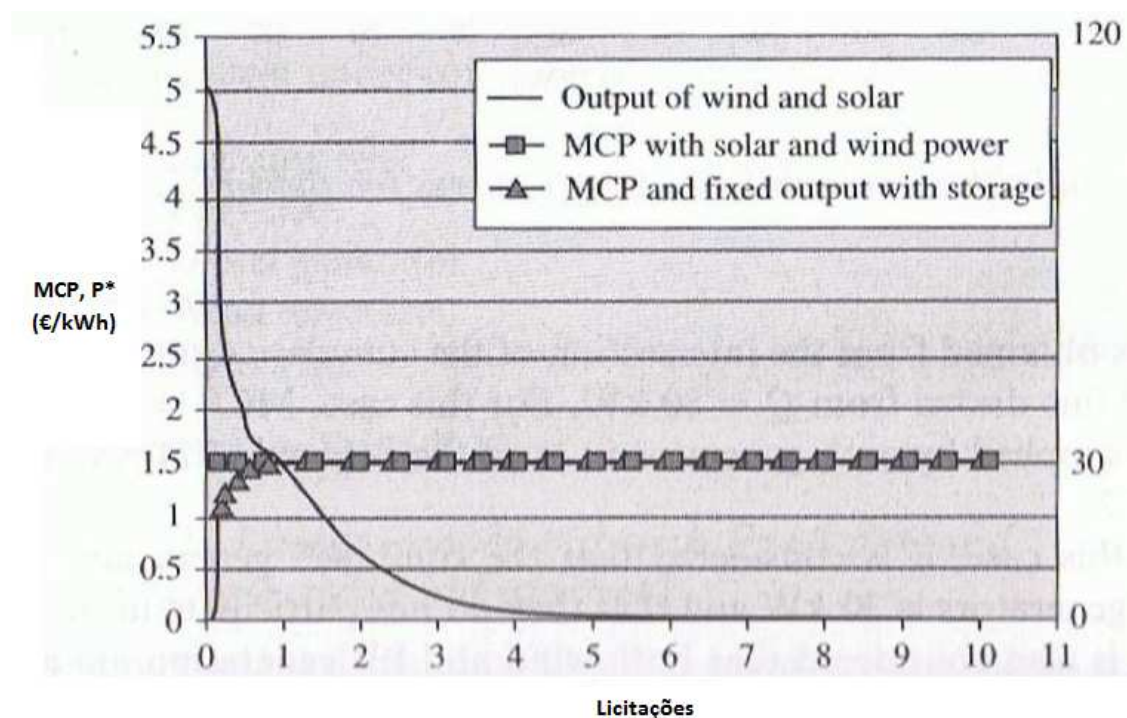


Figura 7.14 - Comparação do MPC com a licitação com os geradores renováveis sujeitos ou não sujeitos a licitação (3).

Tabela 7.4 – Licitação para a terceira análise (3).

Geradores	Psaída (kW)	Preço (€)
G1	14	33,6
G2	12	28,8
G3	24	57,6
G4 e G5	30	72
Total	80	192

7.2.1.2. Caso de Estudo 2

O caso consiste numa licitação bidirecional de fornecimento linear de uma carga de 64kW do licitador 1 e de 46kW do licitador 2. O valor MCP com a intersecção da curva combinada com a potência de consumo de 110kW é de, aproximadamente, 3,4€/kWh, de acordo com a figura 7.15, não considerando os geradores G4 e G5.

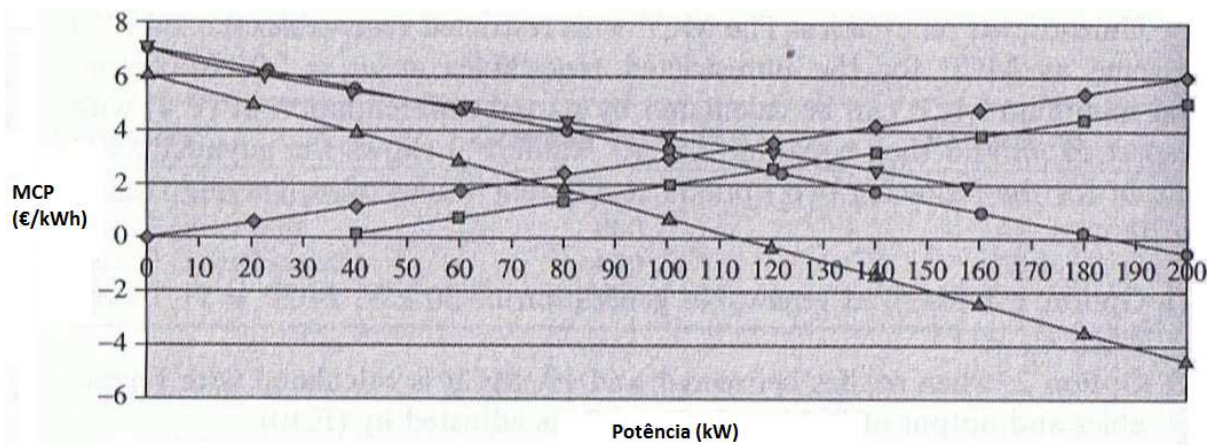


Figura 7.15 - Curva de oferta combinada e procura individual e combinada (3).

Numa segunda análise, considerando os geradores G4 e G5 disponíveis, e o licitador 1 com 72kW e o licitador 2 com 52kW, o valor do MCP passa a ser de 3€/kWh. Na figura 7.16 e na tabela 7.5 são exemplificados esses valores.

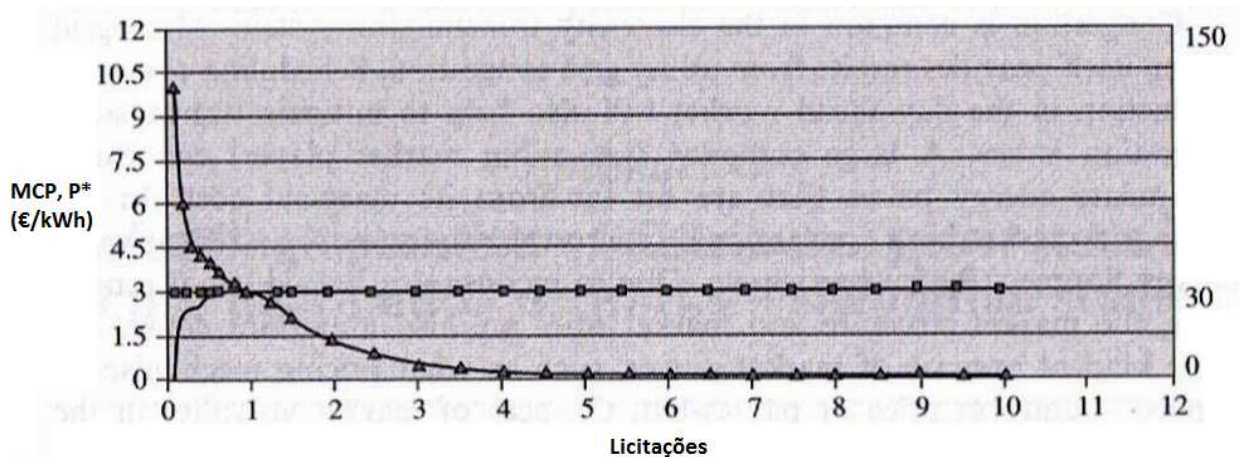


Figura 7.16 - Comparação do MPC com a licitação com os geradores renováveis sujeitos ou não sujeitos a licitação (3).

Tabela 7.5 — Licitação das duas análises (3).

Geradores	Sem G4 e G5		Com G4 e G5	
	Psaída (kW)	Preço (€)	Psaída (kW)	Preço (€)
Lado da Oferta				
G1	33	112,2	23	69
G1	26	88,4	29	87
G2	51	173,4	49	147
G4 e G5	0	-	30	90
Total	110	374	131	393
Lado da Procura				
Licitador 1	64	217,6	76	228
Licitador 2	46	156,4	55	165
Total	110	374	131	393

7.2.2. Conclusão

As estratégias de licitação são importantes para os mercados dado que é necessário assegurar o normal funcionamento da microrede, evitando congestionamentos, controlando os participantes nos mercados e a estrutura do mercado. Atualmente já é possível uma perfeita combinação entre a oferta e a procura, embora com a presença de sistemas de armazenamento para garantir a qualidade necessária ao fornecimento.

Capítulo 8

Conclusão e Perspetivas Futuras

Nesta dissertação analisou-se o impacto das fontes de produção dispersa nas redes de distribuição. Constatou-se que as redes de distribuição têm evoluído por forma a acompanhar o crescimento demográfico e, conseqüentemente, a evolução dos consumos. A rede de distribuição tem sido reforçada e modernizada, de forma a dar resposta a estas exigências, garantindo sempre os necessários níveis de qualidade e minimizando as perdas nas redes. Nos últimos anos, essa normal evolução tem sofrido algumas mudanças com a integração de produção dispersa, gerando um fluxo bidirecional e passando de uma rede passiva para ativa. Essa mudança de paradigma, devido à evolução das redes, obriga nomeadamente, à existência de melhor informação tarifária e faturas baseadas em leituras reais, melhor qualidade de serviço, novos serviços e microgeração.

As redes ativas de energia permitem uma elevada disponibilização de funcionalidades na rede, geradoras de novos serviços e uma gestão e controlo otimizados da rede, com a participação do próprio consumidor. A sua implementação produz benefícios em vários níveis, desde o operador da rede de distribuição até aos consumidores, assim como para a entidade de regulação e para a economia nacional. Os operadores terão uma redução dos custos operacionais e manutenção da rede, redução das perdas, gestão e controlo otimizados e maior fiabilidade e qualidade no fornecimento de energia. Os consumidores poderão produzir energia através da microprodução, terão uma redução dos custos de energia, novos serviços e planos de tarifação e a facilitação de mudança de comercializador. O regulador terá uma maior eficiência no mercado, incremento da fiabilidade e qualidade de energia, aumento da concorrência e acesso a mais e melhor informação sobre o funcionamento da rede. A economia nacional será beneficiada com ganhos de eficiência energética, melhor aproveitamento das energias endógenas, redução da dependência de recursos fósseis e emissões de CO₂ e o aparecimento de projetos industriais e centros de competência, geradores de emprego e de exportações.

As redes ativas de energia constituem uma evolução significativa na capacidade de gestão da rede com soluções de telegestão. Na sua plataforma surgirão serviços de valor acrescentado para o consumidor com serviços *on-line*, novos planos tarifários, integração de automação e tecnologias emergentes.

As redes de energia elétrica vão sofrer uma evolução profunda com as redes ativas de energia ou microrredes, pressionadas por fatores de sustentabilidade ambiental e de eficiência energética. Esta evolução intensifica-se cada vez mais e a maioria das entidades do sector elétrico e governamentais, a nível europeu e mundial vão criando medidas para a sua implementação.

O futuro consumidor/produtor terá um papel muito mais ativo na gestão energética e será um dos principais beneficiados. Estas redes constituirão uma plataforma sobre a qual será possível desenvolver e disponibilizar um conjunto muito relevante de serviços, que vão para além da venda de energia elétrica (21) .

Referências Bibliográficas

- [1] N. Jenkins, J.B. Ekanayake, G. Strbac (Eds.), Distributed Generation, Renewable Energy Series 1, IET - The Institution of Engineering and Technology, London, 2010.
- [2] N.H. Phuong, Multi-Agent System based Active Distribution Networks, Technische Universiteit Eindhoven, 2010, <http://alexandria.tue.nl/extra2/693215.pdf>, consultado em 22-09-2011.
- [3] S. Chowdhury, S.P. Chowdhury, P. Crossley (Eds.), Microgrids and Active Distribution Networks, Renewable Energy Series 6, IET - The Institution of Engineering and Technology, London, 2009.
- [4] C. Ricketts, How microgrids will change the way we get energy from A to B, Green Beat, 2010, <http://venturebeat.com/2010/07/06/microgrids-energy-transmission>, consultado em 22-09-2011.
- [5] J.P. Lopes, Redes Eléctricas Inteligentes e a Mudança de Paradigma dos Sistemas Eléctricas, Energia 2020, http://energia2020.fc.ul.pt/energia2020/docs/SumarioSmartGrids_Energia%202020_JaoPecasLopes.pdf, consultado em 22-09-2011.
- [6] M. Aguiar, O consumidor e a mudança de paradigma, ERSE, 2010, http://www.ariae.org/download/reuniones/xiv_reunion_ariae/28abril_tarde/01_ERS_E_Portugal.pdf, consultado em 22-09-2011.
- [7] EDV Energia, Micro-Cogeração, EDV Energia, 2010, <http://www.edvenergia.pt/Microgeracao.pdf>, consultado em 22-09-2011.
- [8] J. Torres, 4ª Conferência ELECPOR-UNESA, EDP, 2010, http://www.elecpor.pt/document/8_JTorres011110.pdf, consultado em 22-09-2011.
- [9] M.C. Gil, C.S. Naranjo (Eds.), Energia Hidráulica, Progensa, 2004.
- [10] M.Z. Kamh, Unbalanced Model and Power-Flow Analysis of Microgrid and Active Distribution Systems, IEEE, 2010, http://www.mohamedkamh.com/web_documents/microgrid.pdf, consultado em 22-09-2011.
- [11] F. Pilo, Advanced DMS to Manage Active Distribution Networks, IEEE, 2009, ieeexplore.ieee.org/Xplore/F05281947.pdf, consultado em 22-09-2011.
- [12] D. Macfarlane, D. Hawkins, Recent Active Distribution Management System Developments, CIRED, 2007, <http://site.ge>

energy.com/prod_serv/plants_td/en/downloads/cnee_2007_hawkins_anm.pdf,
consultado em 03-10-2011.

- [13] J. See, W. Carr, S.E. Collier, Real Time Distribution Analises for Electric Utilities, IEEE, 2008, <http://milsoft.com/downloads/presentations/Real%20Time%20Distribution%20Analysi%20Paper%2001102008.pdf>, consultado em 03-10-2011.
- [14] F. Pilo, G. Pisano, G.G. Soma, Digital model of a distribution Management System the optimal Operation of Active Distribution Systems, CIRED, 2008, http://www.cired.be/CIRED09/pdfs/CIRED2009_0035_Paper.pdf, consultado em 03-10-2011.
- [15] S.K. Khadem, M. Basu, M.F. Conlon, Power Quality in Grid connected Renewable Energy Systems: Role of Custom Power Devices, EA4EPQ, 2010, <http://arrow.dit.ie/cgi>, consultado em 03-10-2011.
- [16] P. Doerlitz, V. Preto, A importância das Unidades Ininterruptas de Potência na Qualidade e Continuidade do fornecimento de Energia, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 2010.
- [17] F. Task, Effects of Harmonics on Equipments, IEEE, 2010, ieeexplore.ieee.org/iel3/61/5679/00216874.pdf, consultado em 03-10-2011.
- [18] C.E.T. Foote, P. Espie, G.W. Ault, G.M. Burt, J.R. McDonald, F. Silvestro, Distributed Generation Information Management: Requirements and Methods, IEEE, 2010, http://www.iset.uni-kassel.de/dispower_static/documents/pub010.pdf, consultado em 03-10-2011.
- [19] S. Repo, H. Laaksonen, P. Jarventausta, Statistical Short-Term Network Planning of Distribution System and Distributed Generation, PSCC, 2005, <http://www.montefiore.ulg.ac.be/services/stochastic/pssc05/papers/fp129.pdf>, consultado em 03-10-2011.
- [20] F.M.T.d. Azevedo, Gestão do Risco em Mercados Competitivos de Electricidade: Previsão de Preços e Optimização do Portfolio de Contratos, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 2007, <http://www.gecad.isep.ipp.pt/ies/Entrada/Teses/Dout/filipe.pdf>, consultado em 03-10-2011.
- [21] A.A. Messias, Redes Inteligentes de Energia - Smart Grids, 9.º Encontro Nacional do Colégio de Engenharia Electrotécnica, Lisboa, 2009, http://www.ordemengenheiros.pt/fotos/editor2/eventos/aires_messias.pdf, consultado em 03-10-2011.
- [22] L.H. Robert, P.A. Paolo, Microgrid: A Conceptual Solution, 2004, <http://certs.lbl.gov/pdf/mg-pesc04.pdf>, consultado em 22-09-2011.