



Universidade do Porto

Faculdade de Engenharia

**FEUP**

# Definição de Estratégias de Controlo e Avaliação da Estabilidade em Redes de Baixa Tensão com Micro-Geração Funcionando em Rede Isolada

André Guimarães Madureira

Licenciado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores – Ramo de Sistemas de Energia  
pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do programa do curso de Mestrado  
em Engenharia Electrotécnica e de Computadores  
(Área de especialização em Sistemas de Energia)

Dissertação realizada sob a supervisão de  
Doutor João Abel Peças Lopes  
Professor Associado com Agregação  
Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Porto, Outubro de 2005

## **Resumo**

Nesta dissertação é apresentado, e testado por via de simulação computacional, um novo paradigma de exploração dos Sistemas Eléctricos de Energia onde se admite uma elevada integração de Produção Distribuída (utilizando fontes renováveis e máquinas com baixas potências nominais) ao nível das redes de distribuição de Baixa Tensão.

Os estudos de impacte dinâmico resultantes da integração maciça de Produção Distribuída nas redes eléctricas são extremamente importantes. Foi, por isso, desenvolvida uma plataforma de simulação que permite a análise do comportamento dinâmico deste tipo de sistemas (designados por micro-redes). Neste contexto, é explorada a viabilidade técnica de operação de uma micro-rede em modo de funcionamento isolado, de uma forma similar ao que sucede em sistemas de ilhas físicas, visão que contraria os paradigmas clássicos de operação dos sistemas eléctricos. Realça-se a relevância dos novos dispositivos de conversão de energia eléctrica e dos dispositivos de armazenamento de energia para uma correcta operação deste novo tipo de sistemas.

Os resultados obtidos da realização de um extenso número de simulações, em diversas condições de operação, permitem avaliar e validar um conjunto de estratégias de controlo e gestão da micro-rede. Em particular, são avaliadas estratégias para a implementação de um mecanismo de controlo secundário de frequência, como instrumento para a manutenção da estabilidade em micro-redes. Foi também estudada a manutenção da estabilidade destes sistemas face à ocorrência de defeitos nas redes de Média Tensão situadas a montante e de defeitos situados na rede de Baixa Tensão.

Evidencia-se também, ao longo desta dissertação, a necessidade de um sistema de comunicações para uma micro-rede, apresentando-se uma análise exploratória dos requisitos de tal sistema e da utilização de diversos tipos de tecnologia para a sua implementação.

## **Palavras Chave**

Micro-Rede

Micro-Geração

Controlo de Frequência

Estabilidade Dinâmica

## **Abstract**

This thesis presents a new Power System operation paradigm, which assumes a high level of integration of Distributed Generation (using renewable power sources and low nominal power machines) at the Low Voltage side in Distribution Systems. The feasibility and operating features of this paradigm were tested using computational simulation.

Dynamic studies on the integration of large amounts of Distributed Generation in Power Systems are extremely important. Therefore, a simulation platform was developed that allows the analysis of the dynamic behaviour of this type of systems (here dubbed MicroGrids). A technical assessment on the operation of MicroGrids was performed in the islanded mode of operation (a situation similar to that occurring in geographical islands). This contradicts the classic theoretical conception on Power System operation. The relevance of new energy conversion and storage devices is emphasized for the efficient operation of this type of systems.

Several results obtained by means of an extensive number of simulation runs under different operating conditions allowed detailed evaluation and validation of several different strategies for MicroGrid control and management. In particular, strategies for the implementation of a secondary control scheme, as a tool for preserving MicroGrid stability, were evaluated. MicroGrid stability issues concerning fault conditions were also analysed for faults in the upstream Medium Voltage network and in the Low Voltage network.

This thesis also brought forward the need for a MicroGrid communication system and an exploratory analysis of system requirements and different technologies for the implementation of such a system was performed.

## **Keywords**

MicroGrid

MicroGeneration

Frequency Control

Dynamic Stability

## **Agradecimentos**

Ao meu orientador, Professor João Abel Peças Lopes, pela orientação e confiança, pelo inestimável entusiasmo e dedicação que sempre revelou no decorrer deste trabalho, mas também por me ter dado a oportunidade de aprender com a sua experiência e trabalhar nesta área tão aliciante.

À Unidade de Sistemas de Energia do INESC Porto, pelas condições e facilidades concedidas para a realização desta dissertação, mas sobretudo pelo ambiente criado que permitiu o desenvolvimento de um trabalho que me enriqueceu, tanto a nível profissional como pessoal. Assim, queria expressar a minha gratidão para com todos os meus colegas da Unidade pelo apoio prestado e pelas frutuosas discussões proporcionadas, dentro e fora do âmbito desta dissertação..

À minha família: aos meus Pais e Irmã, que sofreram seguramente mais do que eu nestes últimos tempos. Por terem estado sempre presentes, pela revisão cuidadosa que fizeram deste texto, pelos sábios conselhos e pelo apoio verdadeiramente incondicional.

À Sara, por ser a minha inspiração e por ter sempre acreditado em mim.

## Índice

<b>Capítulo 1 – Introdução .....</b>	<b>13</b>
<b>Capítulo 2 – Estado Actual da Investigação .....</b>	<b>17</b>
2.1 Introdução .....	17
2.2 O Conceito de Micro-Rede .....	19
2.3 Micro-Redes – Situação Internacional.....	23
2.4 Modos de Operação e Controlo em Rede Isolada.....	25
2.5 Controlo de Tensão/Potência Reactiva .....	27
2.6 Controlo de Frequência/Potência Activa .....	28
2.7 Operação em <i>Single-master</i> .....	29
2.8 Operação em <i>Multi-master</i> .....	30
2.9 Conclusão.....	32
<b>Capítulo 3 – Modelos de Micro-Fontes e das suas Interfaces .....</b>	<b>33</b>
3.1 Inversor Fonte de Corrente (Inversor PQ) .....	33
3.2 Inversor Fonte de Tensão ( <i>Voltage Source Inverter – VSI</i> ) .....	34
3.3 Pilha de Combustível ( <i>Fuel Cell</i> ) .....	36
3.4 Micro-turbina .....	40
3.4.1 Micro-turbina <i>Single-shaft</i> .....	41
3.4.2 Micro-turbina <i>Split-shaft</i> .....	43
3.5 Gerador Foto-Voltaico.....	43
3.6 Gerador Eólico .....	45
3.7 Cargas .....	46
3.7.1 Carga do Tipo Impedância Constante.....	46
3.7.2 Carga do Tipo Motor.....	47
3.7.3 Carga Dinâmica.....	47
3.8 Dispositivos de Armazenamento de Energia .....	48
3.8.1 Volante de Inércia ( <i>Flywheel</i> ).....	49
3.8.2 Baterias.....	49
3.9 Conclusão.....	50

<b>Capítulo 4 – Estrutura de Comunicações da Micro-Rede .....</b>	<b>51</b>
4.1 Arquitectura de Comunicações .....	51
4.2 Análise dos Requisitos do Sistema .....	53
4.3 Comunicação <i>Wired</i> .....	56
4.3.1 Rede de Cobre / Soluções <i>Telephone-Based</i> .....	56
4.3.1.1 <i>Digital Subscriber Line (DSL)</i> .....	56
4.3.2 <i>Power Line Communication (PLC)</i> .....	57
4.3.2.1 Características da <i>Power Line Communication</i> .....	58
4.3.2.2 A Linha Eléctrica como Canal de Comunicação.....	58
4.3.2.3 Limitações na Largura de Banda.....	59
4.3.2.4 Perspectivas Futuras .....	59
4.4 Comunicação <i>Wireless</i> .....	60
4.4.1 <i>Wireless Fidelity (Wi-Fi)</i> .....	61
4.4.2 Redes Rádio Celulares ( <i>Cellular Radio Networks</i> ).....	62
4.5 Conclusão.....	63
<b>Capítulo 5 – Controlo Secundário.....</b>	<b>65</b>
5.1 Conceito Clássico .....	65
5.2 A Importância do Controlo Proporcional-Integral.....	67
5.3 Controlo Secundário numa Micro-Rede .....	67
5.3.1 Implementação do Controlo Secundário Centralizado .....	69
5.4 Conclusão.....	72
<b>Capítulo 6 – Protecção da Micro-Rede contra Curto-Circuitos.....</b>	<b>73</b>
6.1 Protecção da Micro-Rede.....	74
6.2 Controlo dos Inversores face a Sobrecargas Transitórias e Defeitos.....	75
6.3 Defeitos na Rede de Média Tensão .....	77
6.4 Defeitos na Rede de Baixa Tensão .....	78
6.5 Conclusão.....	79
<b>Capítulo 7 – Plataforma de Simulação.....</b>	<b>81</b>
7.1 Método de Resolução.....	87
7.2 Processo de Simulação.....	89
7.3 Conclusão.....	90

<b>Capítulo 8 – Simulações e Resultados .....</b>	<b>91</b>
8.1 Controlo Secundário .....	91
8.1.1 Controlo Secundário Local .....	92
8.1.1.1 Cenário Importação .....	92
8.1.1.2 Cenário Exportação .....	96
8.1.2 Controlo Secundário Centralizado .....	99
8.1.2.1 Cenário Importação .....	100
8.1.2.2 Cenário Exportação .....	107
8.2 Curto-Circuitos .....	110
8.2.1 Curto-Circuitos na Rede de Média Tensão .....	110
8.2.1.1 Influência da Presença de Máquinas Assíncronas na Micro-Rede.....	113
8.2.1.2 Influência do Deslastre Frequencimétrico de Cargas.....	121
8.2.1.3 Influência da Resistência do Defeito.....	122
8.2.1.4 Influência do Tempo de Eliminação do Defeito .....	124
8.2.2 Curto-Circuitos na Rede de Baixa Tensão .....	127
8.2.2.1 Influência da Resistência do Defeito.....	131
8.2.2.2 Influência do Tempo de Eliminação do Defeito .....	132
8.3 Conclusão.....	133
<b>Capítulo 9 – Conclusões e Perspectivas Futuras .....</b>	<b>135</b>
9.1 Objectivos atingidos .....	135
9.2 Perspectivas e Desenvolvimentos Futuros.....	137
<b>Referências .....</b>	<b>139</b>
<b>Bibliografia .....</b>	<b>143</b>
<b>Anexo A – Caracterização das Redes-Teste.....</b>	<b>144</b>

## Lista de Figuras

Fig. 1 – Exemplo de uma micro-rede.....	20
Fig. 2 – Esquema de uma micro-rede contendo vários micro-geradores, cargas e dispositivos de controlo e gestão de rede.....	21
Fig. 3 – Princípio de controlo proporcional para a tensão/potência reactiva [4].....	27
Fig. 4 – Princípio de controlo proporcional para a frequência/potência activa [4] .....	28
Fig. 5 – Esquema da estrutura de controlo para a operação em <i>single-master</i> com um VSI [11].....	29
Fig. 6 – Esquema da estrutura de controlo para a operação em <i>multi-master</i> [11] .....	32
Fig. 7 – Sistema de controlo do inversor PQ [11].....	34
Fig. 8 – Princípio do controlo proporcional de frequência/potência activa [9].....	35
Fig. 9 – Esquema simplificado da estrutura de um VSI.....	36
Fig. 10 – Modelo dinâmico de uma SOFC [17] .....	39
Fig. 11 – Modelo dinâmico de uma SOFC em ambiente <i>Matlab® Simulink®</i> .....	40
Fig. 12 – Modelo global de uma SOFC (incluindo conversor) em ambiente <i>Matlab® Simulink®</i> .....	40
Fig. 13 – Modelo da turbina GAST [17] .....	42
Fig. 14 – Modelo da micro-turbina <i>single-shaft</i> em <i>Matlab® Simulink®</i> .....	42
Fig. 15 – Modelo dinâmico de um gerador foto-voltaico em ambiente <i>Matlab® Simulink®</i> .....	44
Fig. 16 – Modelo global de um gerador foto-voltaico (incluindo conversor) em ambiente <i>Matlab® Simulink®</i> .....	44
Fig. 17 – Modelo da turbina eólica em ambiente <i>Matlab® Simulink®</i> .....	45
Fig. 18 – Modelo do gerador eólico em <i>Matlab® Simulink®</i> .....	46
Fig. 19 – Característica P-f, em regime permanente, do sistema VSI + <i>flywheel</i> .....	49
Fig. 20 – Característica P-f, em regime permanente, das baterias.....	50
Fig. 21 – Estrutura simplificada de um protocolo de comunicações [21] .....	52
Fig. 22 – Diagrama de troca de informações [22] .....	54
Fig. 23 – Níveis do Controlo Automático de Geração [29].....	66
Fig. 24 – Controlo da potência activa em cada micro-fonte.....	68
Fig. 25 – Esquema do funcionamento do controlo secundário no MGCC .....	70
Fig. 26 – Rede-teste base.....	82
Fig. 27 – Implementação do controlo secundário local em ambiente <i>Matlab® Simulink®</i> .....	83
Fig. 28 – Menu de parâmetros da função de controlo secundário centralizado embebida no MGCC.....	83
Fig. 29 – Implementação do controlo secundário centralizado em ambiente <i>Matlab® Simulink®</i> .....	85
Fig. 30 – Menu de parâmetros da função de curto-circuito e de protecção da micro-rede.....	85
Fig. 31 – Implementação do curto-circuito e do mecanismo de protecção da micro-rede em ambiente <i>Matlab® Simulink®</i> .....	86
Fig. 32 – Plataforma de simulação base em ambiente <i>Matlab® Simulink®</i> .....	87
Fig. 33 – Comportamento da frequência, potência activa e tensão no VSI (Controlo Local, Cenário Importação).....	94

Fig. 34 – Evolução da potência activa na SOFC e na Micro-turbina (Controlo Local, Cenário Importação).....	95
Fig. 35 – Comportamento da tensão na SOFC e na Micro-turbina (Controlo Local, Cenário Importação).....	95
Fig. 36 – Comportamento da frequência, potência activa e tensão no VSI (Controlo Local, Cenário Exportação).....	98
Fig. 37 – Evolução da potência activa na SOFC e na Micro-turbina (Controlo Local, Cenário Exportação).....	98
Fig. 38 – Comportamento da tensão na SOFC e na Micro-turbina (Controlo Local, Cenário Exportação).....	99
Fig. 39 – Comportamento da frequência, potência activa e tensão no VSI (Controlo Centralizado, Cenário Importação).....	101
Fig. 40 – Evolução da potência activa na SOFC e na Micro-turbina (Controlo Centralizado, Cenário Importação).....	102
Fig. 41 – Comportamento da tensão na SOFC e na Micro-turbina (Controlo Centralizado, Cenário Importação).....	102
Fig. 42 – Comportamento da frequência para diversos tempos de envio de sinais de comando (Controlo Centralizado, Cenário Importação).....	104
Fig. 43 – Comportamento da frequência considerando a inclusão ou não de estratégias de deslastre de carga (Controlo Centralizado, Cenário Importação).....	105
Fig. 44 – Potência activa na SOFC e na Micro-turbina considerando estratégias de deslastre de carga (Controlo Centralizado, Cenário Importação).....	106
Fig. 45 – Tensão na SOFC e na Micro-turbina (Controlo Centralizado, Cenário Importação).....	106
Fig. 46 – Comportamento da frequência, potência activa e tensão no VSI (Controlo Centralizado, Cenário Exportação).....	108
Fig. 47 – Evolução da potência activa na SOFC e na Micro-turbina (Controlo Centralizado, Cenário Exportação).....	108
Fig. 48 – Comportamento da tensão na SOFC e na Micro-turbina (Controlo Centralizado, Cenário Exportação).....	109
Fig. 49 – Rede-teste utilizada para simulação de um defeito na rede MT.....	111
Fig. 50 – Comportamento da frequência na micro-rede (c.c. na MT, com geradores assíncronos).....	113
Fig. 51 – Comportamento da tensão e corrente no VSI (c.c. na MT, com geradores assíncronos).....	114
Fig. 52 – Comportamento da tensão e corrente na SOFC (c.c. na MT, com geradores assíncronos).....	114
Fig. 53 – Comportamento da velocidade de rotação e tensão numa carga motor (c.c. na MT, com geradores assíncronos).....	115
Fig. 54 – Comportamento da corrente e velocidade de rotação num gerador assíncrono – micro-turbina <i>split-shaft</i> (c.c. na MT, com geradores assíncronos).....	115
Fig. 55 – Característica binário/velocidade das cargas motor utilizadas.....	117
Fig. 56 – Comportamento da frequência na micro-rede (c.c. na MT, sem geradores assíncronos).....	118
Fig. 57 – Comportamento da tensão e corrente no VSI (c.c. na MT, sem geradores assíncronos).....	119
Fig. 58 – Comportamento da tensão e corrente na SOFC (c.c. na MT, sem geradores assíncronos).....	119
Fig. 59 – Comportamento da velocidade de rotação e tensão numa carga motor (c.c. na MT, sem geradores assíncronos).....	120
Fig. 60 – Comportamento da frequência considerando a inclusão ou não de estratégias de deslastre de carga (c.c. na MT, com Load Shedding).....	121
Fig. 61 – Comportamento da frequência da micro-rede para vários valores de resistência de defeito (c.c. na MT).....	123
Fig. 62 – Comportamento da frequência da micro-rede para vários tempos de eliminação de defeito (c.c. na MT).....	124

Fig. 63 – Comportamento da tensão no <i>link</i> DC e potência activa na SOFC (c.c. na MT) .....	126
Fig. 64 – Comportamento da frequência da micro-rede e potência activa no VSI (c.c. na MT) .....	126
Fig. 65 – Rede-teste utilizada para simulação de um defeito na rede BT.....	127
Fig. 66 – Plataforma de simulação em <i>Matlab® Simulink®</i> para simulação de um defeito na rede BT.....	128
Fig. 67 – Comportamento da frequência na micro-rede (c.c. na BT).....	129
Fig. 68 – Comportamento da tensão e corrente no VSI (c.c. na BT).....	129
Fig. 69 – Comportamento da tensão e corrente na SOFC (c.c. na BT) .....	130
Fig. 70 – Comportamento da velocidade de rotação e tensão numa carga motor (c.c. na BT).....	130
Fig. 71 – Comportamento da frequência da micro-rede para vários valores de resistência de defeito (c.c. na BT)...	132
Fig. 72 – Comportamento da frequência da micro-rede para vários tempos de eliminação de defeito (c.c. na BT) ..	133
Fig. A1 – Rede-teste utilizada para simulação das estratégias de controlo secundário e para simulação de um defeito na MT.....	144
Fig. A2 – Rede-teste utilizada para simulação de um defeito na BT.....	145

## Lista de Tabelas

Tabela 1 – Parâmetros para o deslastre frequencimétrico .....	48
Tabela 2 – Cenário de Importação.....	93
Tabela 3 – Distribuição de carga para o cenário de importação .....	93
Tabela 4 – Distribuição de geração para o cenário de importação .....	93
Tabela 5 – Cenário de Exportação.....	96
Tabela 6 – Distribuição de carga para o cenário de exportação .....	97
Tabela 7 – Distribuição de geração para o cenário de exportação.....	97
Tabela 8 – Parâmetros para micro-geradores (cenário de importação) .....	100
Tabela 9 – Parâmetros para micro-geradores (cenário de exportação).....	107
Tabela 10 – Cenário alternativo de importação.....	111
Tabela 11 – Distribuição de carga para o cenário alternativo de importação .....	112
Tabela 12 – Distribuição de geração para o cenário alternativo de importação .....	112
Tabela A1 – Parâmetros da rede-teste utilizada para simulação das estratégias de controlo secundário e para simulação de um defeito na MT.....	145
Tabela A2 – Parâmetros da rede-teste utilizada para simulação de um defeito na BT .....	146

## Lista de Abreviaturas

- 2G – 2ª Geração  
3G – 3ª Geração  
AC – *Alternated Current* (Corrente Alternada)  
AE – *Algebraic Equations* (Equações Algébricas)  
AGC – *Automatic Generation Control* (Controlo Automático de Geração)  
BT – Baixa Tensão  
c.c. – Curto-circuito  
CHP – *Combined Heat and Power* (Co-Geração)  
DC – *Direct Current* (Corrente Contínua)  
DMS – *Distribution Management System* (Sistema de Gestão da Rede de Distribuição)  
DSL – *Digital Subscriber Line*  
GHG – *Green House Gases* (Gases causadores do efeito de estufa)  
GPRS - *General Packet Radio Service*  
GSM – *Global System for Mobile Communication* (Sistema Global para Comunicações Móveis)  
HTTP – *HyperText Transfer Protocol* (Protocolo de Transferência de Hipertexto)  
I&D – Investigação e Desenvolvimento  
LAN – *Local Area Network* (Rede Local)  
LC – *Load Controller* (Controlador de Carga)  
MC – *Microsource Controller* (Controlador de Micro-Fonte)  
MGCC – *MicroGrid Central Controller* (Controlador Central de Micro-Rede)  
MT – Média Tensão  
ODE – *Ordinary Differential Equations* (Equações Diferenciais Ordinárias)  
PD – Produção Distribuída  
PI – Proporcional-Integral  
PLC – *Power Line Communication*  
PV – *PhotoVoltaic* (Foto-Voltaico)  
ROCOF – *Rate Of Change Of Frequency*  
SEE – Sistema Eléctrico de Energia  
SMS – *Short Message System* (Serviço de Mensagens Curtas)  
SOFC – *Solid Oxide Fuel Cell* (Pilha de Combustível de Óxidos Sólidos)  
TCP/IP – *Transmission Control Protocol/Internet Protocol*  
VSI – *Voltage Source Inverter* (Inversor Fonte Controlada de Tensão)  
Wi-Fi – *Wireless Fidelity*  
WLAN – *Wireless Local Area Network* (Rede Local Sem-Fios)

“That which is static and repetitive is boring.  
That which is dynamic and random is confusing.  
In between lies art.”

**John Locke**

**Filósofo, académico e médico britânico (1632 - 1704)**

## Capítulo 1 – Introdução

Os Sistemas Eléctricos de Energia basearam-se durante muitos anos na utilização de grandes geradores centrais de elevada potência que fornecem energia, através de transformadores, para redes de transmissão de Alta Tensão. Estas redes transportam a energia, muitas vezes ao longo de grandes distâncias, que depois é passada através de transformadores de distribuição para os clientes. No entanto, verificou-se recentemente um interesse crescente na ligação de geração directamente à rede de distribuição, que passou a ser designada por Produção Distribuída. O conceito de Produção Distribuída não se encontra ainda definido de uma forma universal mas apresenta algumas características básicas: ser um tipo de geração não sujeito a planeamento nem a despacho centralizado; ter potências nominais inferiores à centena de MW; estar normalmente ligada à rede de distribuição.

É extremamente complexo quantificar com algum rigor a contribuição real de Produção Distribuída uma vez que, como foi referido, não existe ainda uma definição universal para ela e uma colecção estatística unificada de dados. Ainda assim, segundo dados da *World Alliance for Decentralized Energy* (WADE), estima-se que em 2004 a capacidade instalada mundial de Produção Distribuída ronde os 282 GW, o que corresponde a aproximadamente 7,2 % da capacidade instalada total [1].

A ligação de Produção Distribuída à rede de distribuição principiou ao nível da Média Tensão mas tem vindo a evoluir para o nível da Baixa Tensão, com um desenvolvimento considerável nos últimos anos. A ligação de geradores de baixa potência nominal a redes de distribuição de Baixa Tensão levou ao surgimento de um novo tipo de Sistema Eléctrico de Energia – a Micro-Rede.

Os estudos de impacte dinâmico resultantes da integração maciça de Produção Distribuída nas redes eléctricas são extremamente importantes tendo em conta a evolução futura dos Sistemas Eléctricos de Energia.

Nesta dissertação de mestrado apresentam-se metodologias de análise do comportamento dinâmico e estratégias de controlo e gestão de redes eléctricas de Baixa Tensão com uma elevada penetração de Produção Distribuída, utilizando para o efeito uma plataforma de simulação dinâmica.

Os trabalhos de Investigação e Desenvolvimento (I&D) aqui descritos estão enquadrados num projecto europeu *Large Scale Integration of Micro-Generation to Low Voltage Grids – MicroGrids*. A contribuição desta dissertação para o projecto inclui os seguintes aspectos:

- Análise do comportamento em regime dinâmico e a interacção, em situação de rede isolada (em Baixa Tensão), de unidades de micro-geração e definição de estratégias de controlo a integrar nos controladores de velocidade e de tensão destas unidades, incluindo também a possibilidade de deslastre de cargas não-essenciais; para o controlo de frequência foram analisadas estratégias alternativas de controlo local (tipo proporcional-integral) e estratégias tipo controlo primário mais controlo secundário centralizado (a instalar num controlador central de rede), incluindo o impacte da filosofia de transmissão de informação;
- Análise da estabilidade da micro-rede face a curto-circuitos eliminados de forma bem sucedida na rede de Média Tensão e na rede de Baixa Tensão.

Ao longo desta dissertação adoptaram-se por vezes um conjunto de designações anglo-saxónicas que aparecem, contudo, devidamente identificadas e caracterizadas. Estes termos e designações técnicas foram adoptados por facilidade de linguagem, já que a origem de muitos deles é precisamente anglo-saxónica, carecendo ainda de tradução “oficial”, dado o carácter relativamente inovador de muitos dos conceitos que são aqui apresentados. Neste contexto, optou-se, por exemplo, por utilizar as siglas das designações anglo-saxónicas *Alternating Current* (AC) e *Direct Current* (DC) em vez das portuguesas de forma a evitar as habituais confusões entre Curto-Circuito (c.c.) e Corrente Contínua (CC).

Várias opções de princípio foram adoptadas ao longo da realização do trabalho proposto. As principais opções admitidas são:

- Toda a análise realizada e simulações efectuadas partem do pressuposto de que o sistema de energia em estudo é trifásico e equilibrado, apesar de se reconhecer não ser esta a situação real das redes de Baixa Tensão;
- Em todos os estudos realizados, os fenómenos provenientes da comutação rápida dos dispositivos de conversão de energia eléctrica (nomeadamente inversores) foram desprezados uma vez que se pretendeu fundamentalmente analisar o comportamento dinâmico das micro-redes.

Esta dissertação é constituída por oito capítulos (para além deste) com os seguintes conteúdos:

No Capítulo 2 faz-se uma revisão de conceitos principais no contexto de um elevado nível de penetração de micro-geração nas redes de distribuição de Baixa Tensão atendendo ao panorama dos sistemas eléctricos presentes e futuros. Faz-se também uma referência a vários projectos de investigação ligados a este tema e pormenorizam-se alguns modos de operação e de controlo deste novo tipo de Sistema Eléctrico de Energia. Neste sentido, evidencia-se a necessidade de desenvolver uma plataforma de simulação que permita a avaliação do comportamento dinâmico destes sistemas.

No Capítulo 3 faz-se uma apresentação de modelos matemáticos dos vários constituintes de uma micro-rede, desde micro-geradores a dispositivos de armazenamento de energia, com particular incidência nos dispositivos conversores de energia eléctrica. Faz-se ainda uma descrição da respectiva implementação na plataforma de simulação dinâmica desenvolvida.

No Capítulo 4 apresenta-se uma descrição de algumas soluções que permitem estabelecer uma plataforma de comunicações para apoio ao controlo da micro-rede, necessária para assegurar a interacção entre os vários tipos de controladores de rede. Analisam-se os requisitos do sistema e as implicações da escolha da tecnologia de comunicações a utilizar.

No Capítulo 5 faz-se uma apresentação do conceito de controlo secundário para uma micro-rede, com relevo para a importância e a forma de implementação de um controlo deste tipo. Pormenorizam-se ainda as duas filosofias de abordagem a esta questão – controlo local e controlo centralizado.

No Capítulo 6 realiza-se uma revisão dos conceitos relativos a protecções nos Sistemas Eléctricos de Energia, com ênfase na diferença entre o caso de um sistema eléctrico clássico e o caso de uma micro-rede. Apresentam-se também algumas soluções para um sistema de protecção eficiente para micro-redes, aflorando-se as principais dificuldades inerentes à implementação deste sistema e pormenoriza-se em particular a influência dos dispositivos de conversão de energia e o seu controlo em situações de defeito.

No Capítulo 7 apresenta-se a plataforma de simulação desenvolvida para a realização de estudos dinâmicos, sendo abordados os detalhes e as dificuldades da implementação dos modelos matemáticos apresentados no Capítulo 3 e do processo de simulação. É ainda apresentada a rede-teste utilizada e a sua implementação na plataforma de simulação.

No Capítulo 8 mostram-se e discutem-se alguns dos principais resultados obtidos a partir das simulações dinâmicas realizadas com a plataforma de simulação desenvolvida, divididos em duas secções, correspondentes ao controlo secundário e à simulação de curto-circuitos. É também feita uma validação da eficiência das estratégias de controlo consideradas e dos modelos utilizados.

Finalmente, no Capítulo 9 debatem-se os resultados alcançados ao longo do trabalho realizado e avaliam-se as perspectivas de desenvolvimento futuro destes estudos.

## Capítulo 2 – Estado Actual da Investigação

### 2.1 Introdução

Nos últimos anos tem-se assistido a uma mudança de paradigma na concepção e na forma de exploração dos Sistemas Eléctricos de Energia (SEE), caracterizada pelo abandono da solução de produção centralizada de energia eléctrica e a evolução para uma solução onde coexiste com a produção centralizada uma componente de Produção Dispersa ou Distribuída (PD). Numa primeira fase, admitia-se apenas a ligação de PD em redes de Média Tensão (MT). No entanto, esta visão tem vindo a evoluir e a ligação de unidades de micro-geração a sistemas de Baixa Tensão (BT) começa também a ser alvo de interesse e a motivar investigação aturada. Actualmente, esta nova filosofia de exploração dos recursos tem levado à realização de diversos estudos e à concretização de experiências piloto em laboratório.

Uma análise da problemática da ligação de PD a redes de Alta Tensão (AT) e de MT, bem como a redes de BT, pode encontrar-se em [2].

A utilização eficiente dos recursos da PD tem adquirido uma importância elevada sendo cada vez mais importante desenvolver estratégias que permitam:

- Explorar fontes de energia renovável e, nomeadamente, os recursos locais, de modo a limitar as emissões de gases causadores do efeito de estufa (*Green House Gases* – GHG);
- Aumentar a eficiência energética e, conseqüentemente, reduzir a dependência de combustíveis fósseis importados;
- Reduzir as perdas nas redes e minimizar os requisitos para a transmissão de energia eléctrica, gerando a energia mais próximo dos locais onde é consumida.

Num passado recente, o desenvolvimento da tecnologia permitiu reduzir substancialmente os custos de investimento de algumas fontes de PD (como a geração eólica), de tal forma que pode encarar-se a possibilidade de utilização de alguns recursos de PD face à crescente necessidade de fornecimento de energia eléctrica. Assim, em anos vindouros, é de prever o

desenvolvimento de novos SEE, como é caso de redes de distribuição de BT contendo pequenos geradores, formando um novo tipo de sistema designado por Micro-Rede (*MicroGrid*, na literatura anglo-saxónica). Este cenário foi desenvolvido primeiramente no âmbito do *Consortium for Electrical Reliability Technology Solutions (CERTS)* [3].

As micro-redes podem estar ligadas à rede principal de distribuição ou operar de uma forma autónoma (quando separadas da rede principal) de uma forma semelhante ao que sucede em sistemas isolados em ilhas físicas [2], [4].

Uma micro-rede pode funcionar em modo interligado com a rede de distribuição, importando ou exportando energia para esta, actuando assim de forma coordenada com o sistema a montante. Adicionalmente, a adopção do conceito de micro-rede permite o funcionamento em modo de emergência, com a micro-rede a operar em rede isolada, perante uma falta de alimentação da rede de distribuição a montante (passagem intencional ou planeada a rede isolada) ou perante a ocorrência de problemas técnicos na rede a montante ou na própria micro-rede (como por exemplo, a ocorrência de um defeito, correspondente a uma passagem automática, “forçada”, a rede isolada). Estes modos de funcionamento serão detalhados mais adiante neste capítulo. Assim, e contrariamente ao estabelecido pela actual prática de exploração, onde não é admitida a operação em rede isolada (por razões de segurança), uma nova estratégia está a ser proposta que implica um modo de funcionamento planeado precisamente nestas condições. O processo de passagem a rede isolada (*islanding* na literatura anglo-saxónica) passa, então, a ser admitido e realizado de forma intencional, exigindo uma análise cuidadosa ao nível das condições de operação do sistema no que diz respeito aos níveis de carga, ao nível de penetração de PD, à possibilidade de ocorrência de defeitos externos, etc.

Este novo tipo de redes eléctricas de distribuição pode, potencialmente, trazer um elevado número de benefícios [4], para além dos acima citados:

- As micro-redes podem possibilitar um aumento na fiabilidade dos SEE uma vez que são utilizadas duas fontes independentes: a rede de distribuição de MT e os recursos de geração locais para alimentar as cargas. Adicionalmente, a estabilidade dos sistemas de transmissão pode ser melhorada sob certas condições de exploração através do controlo local de tensão;
- Ao nível dos consumidores, a separação entre a micro-rede e a rede de distribuição em caso de perturbação externa e a possibilidade de funcionamento em rede isolada pode aumentar

a fiabilidade. Além disso, pode conseguir-se um rápido restabelecimento do sistema através de procedimentos locais de reposição de serviço (*black start* na literatura anglo-saxónica) após a ocorrência de um defeito [5];

- Uma micro-rede bem planeada pode trazer benefícios adicionais como uma melhoria da qualidade de serviço e da eficiência através da utilização da co-geração, que garante o aproveitamento da energia térmica gerada.

A implementação deste novo conceito de operação exige o desenvolvimento de estudos aplicados a diversos níveis, de modo a aproveitar na totalidade as capacidades que este tipo de unidades geradoras oferece, e também o desenvolvimento de estratégias eficientes para gestão destas micro-redes. Entre outras questões, interessa desenvolver vários tópicos, como por exemplo: a modelização do comportamento das micro-fontes, a análise do impacto da inserção destes sistemas nas redes de BT, questões relacionadas com qualidade de onda e fiabilidade, coordenação de protecções, comunicação, acções de carácter técnico-económico (funcionamento em ambiente de mercado, por exemplo) e ainda definição de novas normas de ligação às redes.

## 2.2 O Conceito de Micro-Rede

Como já foi visto, neste contexto, é possível definir micro-rede [4] como sendo um sistema de distribuição de BT ao qual se encontram ligadas pequenas unidades modulares de geração (micro-geradores com potência nominal inferior a algumas dezenas de KW), envolvendo a existência de uma infra-estrutura de comunicação que permita a gestão e controlo integrados de micro-geradores e cargas. Implícita neste conceito está uma proximidade física clara entre carga e geração. Uma micro-rede pode abarcar uma pequena área urbana, uma unidade fabril ou até uma zona de um centro comercial.

Em termos de tecnologias actualmente disponíveis, os sistemas de micro-geração podem incluir vários tipos de dispositivos como pilhas de combustível (*fuel cells*), micro-geradores eólicos, sistemas foto-voltaicos (designados frequentemente por PV na literatura anglo-saxónica), bem como micro-turbinas alimentadas a gás natural ou a *fuel*.

Para além da rede de transmissão de BT, das cargas e das unidades de micro-geração, uma micro-rede inclui também dispositivos de armazenamento de energia eléctrica tais como baterias de acumuladores, super-condensadores e volantes de inércia (*flywheels* na literatura anglo-saxónica) que armazenam energia sob a forma de energia cinética bem como sistemas de controlo e de gestão da rede. Os dispositivos de armazenamento vão ter um papel preponderante neste tipo de redes, nomeadamente em situações de seguimento de carga (*load-following* na literatura anglo-saxónica). Na Fig. 1 apresenta-se um exemplo de uma micro-rede.

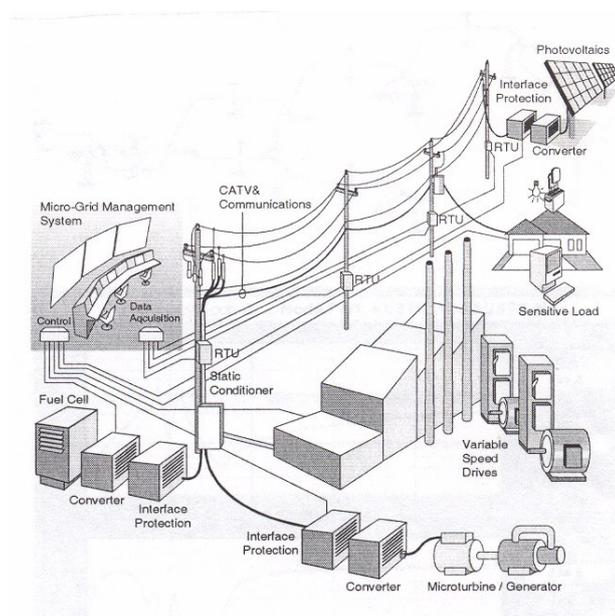
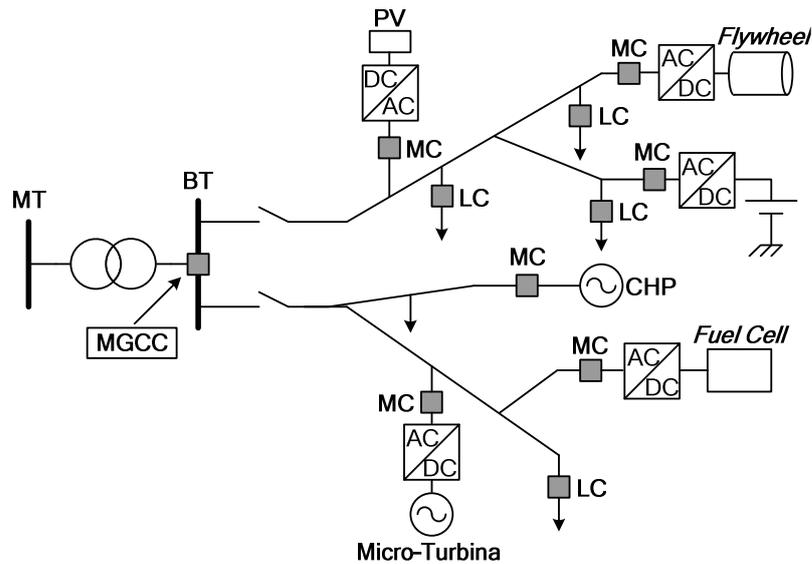


Fig. 1 – Exemplo de uma micro-rede

A Fig. 2 mostra uma rede de distribuição de BT, ligada ao secundário de um transformador MT/BT. Nesta figura podem observar-se vários alimentadores ou *feeders* alimentando cargas eléctricas, vários micro-geradores (como um painel foto-voltaico, uma pilha de combustível, uma micro-turbina), sistemas de armazenamento de energia (como uma *flywheel* e uma bateria de condensadores) e equipamento de controlo e gestão da micro-rede. Este conceito foi proposto no âmbito do projecto europeu *MicroGrids* [6].



**Fig. 2 – Esquema de uma micro-rede contendo vários micro-geradores, cargas e dispositivos de controlo e gestão de rede**

A micro-rede é gerida por um Controlador Central de Micro-Rede (*MicroGrid Central Controller* – MGCC) instalado no lado de BT da subestação MT/BT. O MGCC possui várias funções extremamente importantes (algumas das quais serão detalhadas no âmbito desta dissertação) e funciona como uma espécie de interface entre a micro-rede e o sistema principal de distribuição. Num segundo nível hierárquico de controlo, cada micro-gerador e cada dispositivo de armazenamento de energia é controlado localmente por um Controlador de Micro-Fonte (*Microsource Controller* – MC) e cada carga eléctrica é controlada localmente por um Controlador de Carga (*Load Controller* – LC). Para a correcta operação de um sistema deste tipo é ainda necessário uma estrutura de comunicações funcional e eficiente entre dois conjuntos de dispositivos:

- Os LCs e os MCs, sendo que os primeiros servem de interface para algum controlo das cargas (segundo um conceito de interruptibilidade) e os segundos estabelecem níveis de produção de potência activa e reactiva para os micro-geradores;
- O MGCC, como controlador central que promove uma gestão adequada, tanto a nível técnico como a nível económico, e envia *set-points* para os LCs e MCs.

Simultaneamente, pretende-se que o MGCC estabeleça uma comunicação activa para montante com os sistemas de gestão da rede de distribuição (*Distribution Management System – DMS*), contribuindo assim para melhorar a gestão e operação global do sistema de distribuição de MT.

No actual estado da investigação, admite-se que a micro-rede pode ser operada em duas situações fundamentais [1], [4]:

- Modo Normal Interligado – a micro-rede está electricamente ligada à rede principal de MT, sendo alimentada total ou parcialmente por esta ou, ocasionalmente, injectando potência para a rede de MT a montante;
- Modo de Emergência – no caso de ocorrência de um defeito na rede de MT, ou em outras condições excepcionais de operação, a micro-rede deve ter a capacidade de operar em modo de rede isolada, ou seja, operar de forma autónoma, de forma similar aos sistemas de energia de ilhas “físicas”.

No que respeita ao MGCC, as suas principais funções são:

- Em Modo Normal Interligado, o MGCC recolhe informação dos micro-geradores e das cargas de forma a realizar automaticamente um conjunto de operações na micro-rede que podem incluir previsão de consumo e geração, despacho económico de micro-geração, avaliação da segurança de exploração, funções de gestão de cargas e interface com o DMS;
- Em Modo de Emergência, torna-se necessário um ajuste no controlo da potência activa dos micro-geradores uma vez que ocorre uma mudança de um estado de produção gerida economicamente para um estado de ajuste de produção para controlo de frequência em rede isolada. Neste último estado, o MGCC deve possuir uma actuação do tipo controlo secundário após uma acção inicial dos MCs locais. É também importante que o MGCC possua informação sobre o tipo de cargas presentes no sistema de modo a poder eventualmente proceder a funções de interrupção de algumas cargas e/ou controlar o uso de baterias e *flywheels* disponíveis. No conjunto, o MGCC deve também possibilitar acções de

*black start* [5], o que se torna extremamente importante no que respeita a um aumento de fiabilidade do sistema e continuidade de serviço.

Os MCs e LCs, que operam como controladores locais, contribuem para o despacho económico, para o controlo local dos dispositivos de armazenamento de energia, para situações de seguimento de carga e para gestão de cargas com possibilidade de interrupção.

## 2.3 Micro-Redes – Situação Internacional

O projecto europeu *MicroGrids* surgiu com uma proposta de investigação a ser levada a cabo por várias instituições de I&D e empresas europeias de forma a procurar soluções para os problemas que se levantam face à integração em larga escala de micro-geração em redes de distribuição de BT. Este projecto intitula-se *Large Scale Integration of Micro-Generation to Low Voltage Grids – MicroGrids* [6], teve início em Janeiro de 2003 e tem uma duração total prevista de 36 meses.

Pretende-se neste projecto desenvolver modelos analíticos adequados à simulação em regime dinâmico e à análise em regime estacionário de diversas tecnologias de micro-geração, integrando-os numa plataforma de simulação que permita avaliar e definir estratégias operacionais e de controlo em micro-redes.

Este projecto tem sido desenvolvido por um consórcio internacional coordenado pela Universidade Técnica de Atenas (NTUA, Grécia) que inclui as seguintes entidades: Electricidade de Portugal (EDP, Portugal), *Electricité de France* (EDF, França), *Public Power Corporation* (Grécia), Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores do Porto (INESC Porto, Portugal), *University of Manchester of Science and Technology* (UMIST, Reino Unido), *Institute fur Solare Energieversorgungstechnik* (ISET, Alemanha), *SMA Regelsysteme GmbH* (Alemanha), *URENCO Power Technologies Ltd.* (Reino Unido), *GERMANOS SA* (Grécia), *Association pour la Recherche et le Developpement des Methods et Processes Industriels* (ARMINES, França), *Fundación LABEIN* (Espanha) e *Electric Power Research Institute* (EPRI, Estados Unidos da América).

Pode obter-se uma lista completa dos objectivos, *work-packages* definidos e participantes envolvidos em [6].

A contribuição do INESC Porto assumiu neste projecto um papel muito relevante na área do desenvolvimento de funções de emergência para uma micro-rede. Foi no âmbito desta tarefa que foi desenvolvido o trabalho que se descreve nesta dissertação. Esta tarefa incluiu o desenvolvimento de estratégias de controlo a adoptar para uma micro-rede operada em modo isolado, envolvendo: análise do comportamento dinâmico de várias micro-fontes, implementação do controlo de frequência, desenvolvimento de funções de *black start* e realização de simulações para avaliação da performance dinâmica da micro-rede e validação dos modelos e estratégias propostos.

Outra contribuição significativa foi dada no campo da análise da estabilidade da micro-rede face à ocorrência de defeitos, assunto que é abordado no âmbito desta dissertação.

O projecto CERTS [3], que inicialmente explorou o conceito de micro-rede, apresenta na sua génese algumas diferenças em relação ao conceito introduzido pelo projecto *MicroGrids*. A principal está relacionada com a dimensão do sistema: a dimensão dos sistemas CERTS é superior à do *MicroGrids*, já que considera micro-fontes com potências nominais até 500 kW. O CERTS enfatiza o facto de se poder considerar a micro-rede como uma “célula” controlável do sistema, ou seja, considerar a micro-rede como uma única unidade que pode ser despachada de forma a ajustar-se às necessidades do sistema de transmissão. Do ponto de vista do consumidor, a micro-rede permite garantir as suas necessidades especiais, aumentando a fiabilidade, reduzindo perdas e aumentando a eficiência através do recurso a processos de co-geração (*Combined Heat and Power – CHP*). Outro aspecto desenvolvido no CERTS está ligado com o conceito de *plug and play*: pretende-se para este tipo de sistemas ligar uma nova micro-fonte à rede já existente, sem que para isso seja necessário proceder a nenhuma alteração no sistema de controlo e de gestão da rede.

Para além dos projectos citados, muitas das questões levantadas pela operação em rede isolada de micro-redes são actualmente abordadas em diversos artigos, em revistas e congressos, dos quais se destacariam os artigos de Katiraei [7] e de Zoka [8].

## 2.4 Modos de Operação e Controlo em Rede Isolada

Os geradores síncronos são normalmente responsáveis pelo controlo de frequência e de tensão nos sistemas convencionais. No entanto, em micro-redes não é muito habitual encontrar este tipo de máquinas.

As novas tecnologias de micro-geração não são adequadas para fornecer energia directamente para a rede porque implicam a produção de energia eléctrica em corrente contínua ou a uma frequência mais elevada, acima dos 50 Hz nominais. Assim, é habitualmente necessário um dispositivo de electrónica de potência que garanta a interface com a rede, como um conversor DC/AC (inversor) ou um conversor AC/DC/AC, associado à respectiva micro-fonte.

No caso de uma micro-rede, os inversores devem também ser responsáveis pelo controlo de frequência quando a micro-rede se encontra a funcionar em modo de emergência. O controlo de tensão deve também ser implementado de modo a evitar flutuações quer de tensão, quer de potência reactiva [9].

Isto sucede uma vez que se pretende a operação de várias micro-fontes em paralelo. Este tipo de controlo não é necessário se existir uma interligação com uma rede de distribuição a montante, garantindo uma referência de frequência e tensão, ou se se considerar apenas uma micro-fonte a operar isoladamente.

Em modo de emergência torna-se necessário um controlo que garanta que pelo menos um inversor seja capaz de regular a tensão num nó de referência e a frequência da rede.

Habitualmente, podem admitir-se dois tipos de estratégias de controlo para operar inversores [10]:

- Controlo PQ: o inversor funciona com base em *set-points* para potência activa e para potência reactiva. Este tipo de funcionamento é implementado utilizando o modelo do sistema de controlo apresentado na Secção 3.1. Neste caso, a tensão de saída do inversor está sempre em sincronismo com a rede e a corrente de saída é controlada tanto em amplitude como em fase de modo a garantir a injeção das potências definidas pelos *set-points* desejados;

- Controlo Fonte Controlada de Tensão (*Voltage Source Inverter – VSI*): o inversor é controlado de forma a alimentar a carga com valores pré-definidos de frequência e de tensão. Dependendo do nível de carga, define-se a potência activa e reactiva produzida. O modelo de controlo utilizado para o inversor é o do VSI apresentado na Secção 3.2.

Se um conjunto de micro-fontes é operado numa micro-rede, funcionando em modo interligado com uma rede de MT, todos os inversores podem ser operados em modo PQ, uma vez que existe disponível uma referência de frequência e de tensão. No entanto, se a rede de MT não estiver disponível e não existir uma máquina síncrona na micro-rede, estando portanto esta a operar em rede isolada, este modo de operação não é viável: nestas condições todos os inversores deixariam de funcionar de forma adequada por perderem a referência de frequência e tensão. Torna-se desejável uma passagem de rede interligada a rede isolada que decorra sem falhas mesmo se forem tomadas medidas de emergência (como é o caso de deslastre de cargas não-essenciais, perante desequilíbrios produção/consumo significativos). Combinando as duas estratégias apresentadas anteriormente, é possível, com um determinado grau de segurança, garantir esta passagem, estabelecendo um de dois modos de operação [11], [12]:

- Operação em “Chefe de Orquestra”, dependente de um “gerador-mestre” (*Single-master*): Um inversor (que opere como VSI na micro-rede) seria usado, no funcionamento em rede isolada, fornecendo a referência de frequência para os restantes inversores (que operariam em modo PQ);
- Operação com vários geradores que participam na regulação de frequência (*Multi-master*): Todos os inversores presentes na micro-rede operariam como VSIs.

É crucial a presença de um VSI para que seja possível dispor de uma referência para a frequência em modo isolado. Um VSI possui a capacidade de poder agir perante uma perturbação no SEE (como por exemplo, situações de *load-following* resultantes da variação de carga ou de flutuações na velocidade do vento que induzem variações de produção na geração eólica) baseando-se apenas em informação disponível localmente no inversor, o que se torna fundamental para equilibrar carga e geração durante regimes transitórios, sem necessidade de um sistema complexo de comunicações [13].

Deste modo, um VSI deverá estar acoplado a um dispositivo de armazenamento de energia com suficiente capacidade de armazenamento. Acções extremas de controlo, como o deslastre de cargas não-essenciais, podem ser usadas para evitar grandes desvios de frequência após a ocorrência de fenómenos transitórios bem como para permitir limitar a potência nominal dos referidos dispositivos de armazenamento. Uma acção de controlo aplicada à fonte primária (como numa pilha de combustível ou micro-turbina) que realize controlo de frequência é responsável por equilibrar carga e geração nos momentos que sucedem a ocorrência de perturbações.

## 2.5 Controlo de Tensão/Potência Reactiva

De forma a manter a tensão dentro de limites admissíveis, o VSI irá ajustar a potência reactiva na rede: irá absorver potência reactiva na rede se a tensão subir acima do limite máximo admissível e irá injectar potência reactiva se a tensão descer abaixo do limite mínimo admissível.

A tensão entre fases é medida no barramento onde o VSI está ligado, sendo este valor comparado com o valor nominal (tipicamente 400 V) e o erro de tensão é depois aplicado a um controlo proporcional (onde se define um *droop* de tensão) de forma a obter a potência reactiva a ser injectada/absorvida na/da rede. O princípio de controlo utilizado está descrito na Fig. 3.

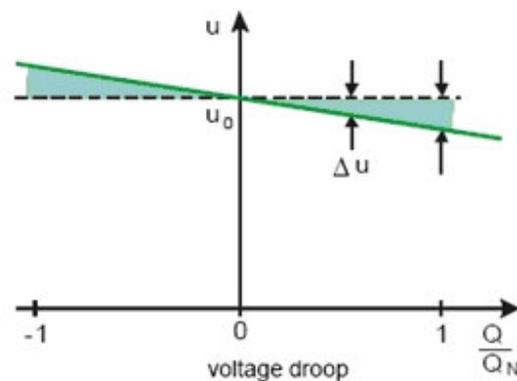


Fig. 3 – Princípio de controlo proporcional para a tensão/potência reactiva [4]

O *droop* de tensão ( $R_v$ ) é dado pelo quociente entre um desvio de tensão ( $\Delta u$ ) que conduz a uma variação ( $\Delta Q$ ) de potência reactiva no dispositivo. Este quociente é normalmente expresso em percentagem como se mostra na seguinte equação:

$$R_v = \frac{\Delta u(p.u.)}{\Delta Q(p.u.)} \times 100\%$$

A tensão de referência ( $u_0$ ) corresponde ao valor de tensão para o qual a potência reactiva de saída do dispositivo é nula.

## 2.6 Controlo de Frequência/Potência Activa

O controlo da frequência adoptado segue a solução utilizada nos grandes sistemas em que existem máquinas síncronas que respondem a um controlo primário de frequência. O controlo de frequência implementado explora o conceito de *droop* de frequência/potência activa associado a um controlo primário. Este *droop* opera de forma similar ao *droop* de tensão/potência reactiva e é explicado mais em pormenor no Capítulo 3. As malhas de controlo correspondentes estão incorporadas no VSI. O princípio de controlo é apresentado na figura seguinte.

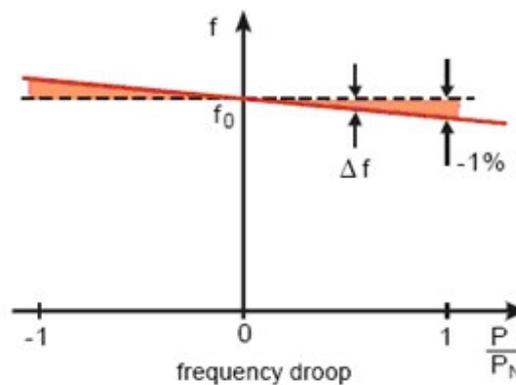


Fig. 4 – Princípio de controlo proporcional para a frequência/potência activa [4]

O valor do *droop* ( $R_f$ ) é dado pelo quociente entre um desvio de frequência ( $\Delta f$ ) que conduz a uma variação ( $\Delta P$ ) de potência activa no dispositivo.

$$R_f = \frac{\Delta f(p.u.)}{\Delta P(p.u.)} \times 100\%$$

A frequência de referência ( $f_0$ ) corresponde ao valor de frequência para o qual a potência activa de saída do VSI é nula.

Tal como nos grandes sistemas eléctricos, conforme já foi referido anteriormente, é possível adoptar duas estratégias para o controlo de frequência:

- Operação em *single-master*, com um gerador a operar como “gerador-mestre”;
- Operação em *multi-master*, com a partilha do controlo de frequência entre vários dispositivos.

Estas duas estratégias de controlo serão detalhadas nas secções seguintes.

## 2.7 Operação em *Single-master*

Nesta modo de operação, as micro-fontes estão ligadas através de inversores com um controlo do tipo PQ. Apenas um VSI (em geral associado a um dispositivo de armazenamento de energia) está ligado à rede.

O VSI fornece a referência de frequência e de tensão para a operação dos inversores PQ quando a micro-rede está a operar em modo isolado.

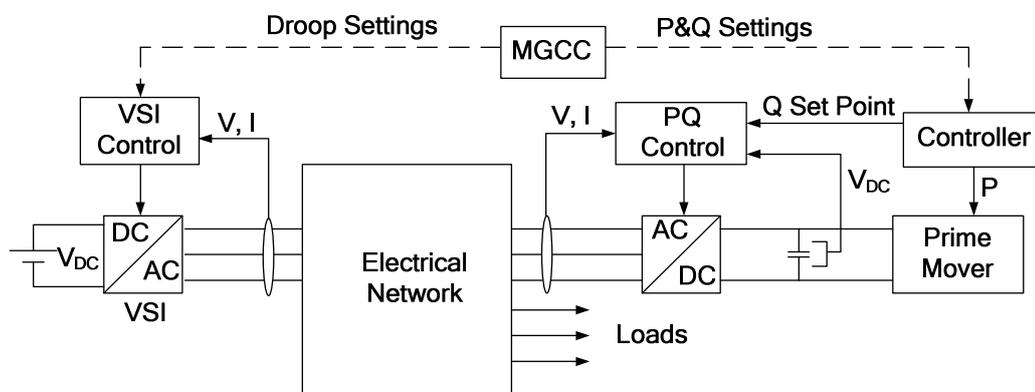


Fig. 5 – Esquema da estrutura de controlo para a operação em *single-master* com um VSI [11]

O MGCC envia *set-points* para cada MC. Cada MC ajusta a potência de saída da correspondente micro-fonte. Variações de potência na fonte primária originam variações de tensão no *link* DC (monitorizadas pela tensão  $V_{DC}$ ). Com o modo de funcionamento em fonte de tensão, o inversor exige uma considerável capacidade de armazenamento de energia eléctrica no *link* DC ou uma fonte primária com uma resposta extremamente rápida de modo a poder manter a tensão no *link* DC constante. Por outras palavras, a potência exigida a um VSI precisa de estar quase instantaneamente disponível no *link* DC. De facto, este tipo de comportamento modeliza a acção pretendida para uma *flywheel*.

O erro na tensão DC, a tensão AC e o *set-point* de potência reactiva são usados para controlar o inversor funcionando em modo PQ. As constantes de tempo associadas à resposta dos micro-geradores são elevadas pelo que se reflectem significativamente no comportamento dinâmico da micro-rede.

O VSI responde a perturbações no sistema de acordo com o valor especificado para os *droops* de frequência e de tensão. Perante um aumento de carga, o inversor alcançará um novo estado estacionário de acordo com os valores dos parâmetros usados para o *droop* de frequência. Usando as capacidades de comunicação da micro-rede, o *set-point* para cada inversor PQ pode ser actualizado de forma a conseguir um cenário óptimo de exploração no que respeita a níveis de tensão, de frequência e de trânsitos de potência reactiva. O VSI (quando acoplado a um dispositivo de armazenamento como uma *flywheel*) permite responder a variações rápidas decorrentes de desequilíbrios de produção/consumo ou de perturbações e é responsável pelo controlo de tensão (unicamente num ponto da micro-rede). Em condições normais de operação (com a frequência estável no seu valor nominal), a potência activa debitada pelo VSI é nula – apenas se injecta potência reactiva na rede para efeitos de controlo de níveis de tensão (de acordo com o parâmetro especificado para o *droop* de tensão).

## 2.8 Operação em *Multi-master*

Neste modo de operação, existem vários inversores funcionando como VSIs, sendo que cada inversor é operado segundo uma característica de frequência/potência activa pré-definida.

A frequência de referência (*idle frequency* na literatura anglo-saxónica) de um VSI pode ser controlada de modo a ajustar-se ao valor pretendido de potência activa fornecida pelo dispositivo, e é definida da seguinte forma:

$$f_{01} = f_{grid} + R_f \times P_{01}$$

Onde  $f_{01}$  é a *idle frequency*,  $f_{grid}$  é a frequência do sistema principal de distribuição,  $R_f$  é o *droop* de frequência/potência activa e  $P_{01}$  é a potência de saída do VSI.

Na Secção 3.2, referente ao modelo do VSI, detalha-se o modo de operação deste tipo de controlo.

Uma vez que as variações de carga serão normalmente pouco elevadas, é possível usar a *idle frequency* para realizar despacho de geração ou controlo secundário de frequência. Esta função pode ser gerida de forma centralizada através do MGCC, fazendo uso da estrutura de comunicações presente na rede. Se, perante uma perturbação, se verifica a necessidade de passar de um modo de funcionamento interligado para um modo de funcionamento em rede isolada, não é necessário mudar a estratégia de controlo para cada micro-gerador, ao invés do que sucede para a situação apresentada no ponto anterior. Quando ocorre o *islanding* da micro-rede, o sistema vai procurar um novo estado estacionário (em termos de frequência e de tensão) correspondente a um novo ponto de operação, de acordo com a carga local. Posteriormente, uma estratégia de controlo secundário deve actuar de forma a repor a frequência no seu valor nominal. Isto pode ser realizado mudando a *idle frequency* de cada micro-gerador. Os parâmetros especificados para os *droops* possibilitam a partilha de potência entre as várias micro-fontes de uma forma pré-definida [9]. As questões de índole económica podem então ser consideradas, bastando para tal que o MGCC corrija os parâmetros dos *droops* para cada VSI. Utilizando esta estratégia de operação, os dispositivos de armazenamento necessários para o equilíbrio de carga e geração estão localizados no barramento DC das várias micro-fontes com utilizando VSIs.

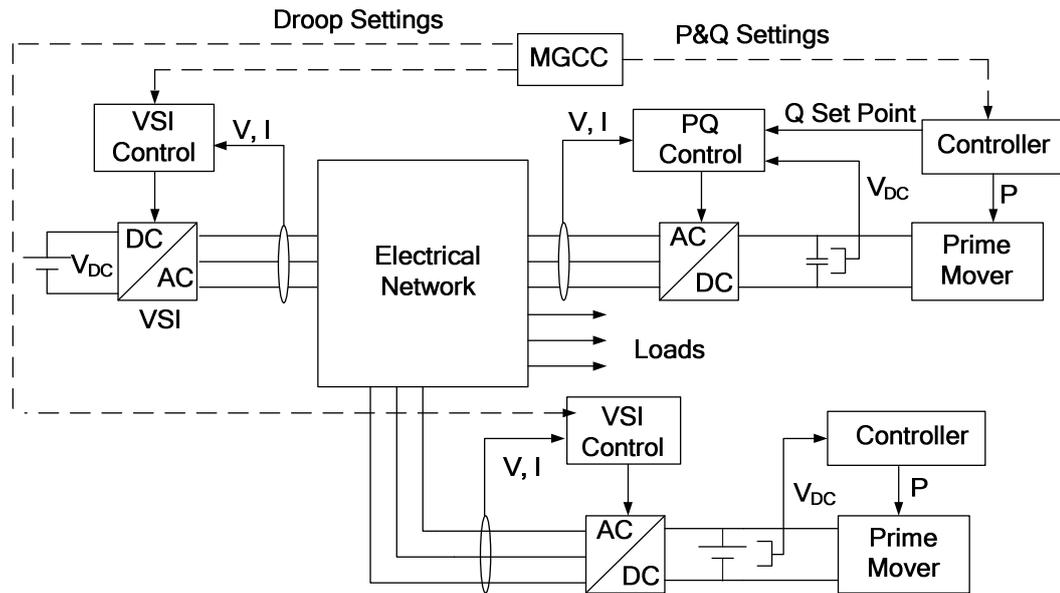


Fig. 6 – Esquema da estrutura de controlo para a operação em *multi-master* [11]

## 2.9 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os principais conceitos relacionados com uma nova forma de SEEs caracterizados por uma elevada penetração de PD, mencionando alguns projectos de I&D (CERTS e *MicroGrids*) que visam aprofundar o conhecimento nestas áreas. Foi ainda apresentado um conjunto de soluções que permite a exploração de sistemas contendo várias micro-fontes a funcionar interligadas com uma rede de BT, modelizando de uma forma adequada o seu comportamento individual bem como a interacção entre diversas tecnologias de micro-geração. Neste sentido, foram propostos dois modos de controlo de inversores que permitem a operação da micro-rede em modo isolado da rede principal de distribuição, assegurando uma gestão eficiente do sistema global. A validação dos princípios de gestão e controlo desenvolvidos será feita no Capítulo 8.

## Capítulo 3 – Modelos de Micro-Fontes e das suas Interfaces

Para proceder a uma avaliação do funcionamento em regime dinâmico de uma micro-rede torna-se necessário identificar modelos para os diversos micro-geradores e desenvolver uma plataforma de simulação capaz de simular de forma satisfatória o comportamento integrado dos diversos componentes da micro-rede (micro-fontes, dispositivos de armazenamento de energia eléctrica, sistemas de conversão de energia eléctrica, etc.).

Deste modo, apresentam-se em seguida, de forma relativamente genérica (uma vez que a modelização de componentes não é o objecto primeiro desta dissertação) as soluções adoptadas para modelizar os diversos micro-geradores e a respectiva implementação na plataforma de simulação desenvolvida em ambiente *Matlab® Simulink®*. Os modelos utilizados foram desenvolvidos, e em parte validados, no âmbito do projecto *MicroGrids* [14].

Alguns dos modelos mais simples utilizados provêm directamente da biblioteca disponível no *Matlab® Simulink® – SimPowerSystems*, e não serão descritos nesta dissertação; neste conjunto incluem-se os modelos das linhas e das máquinas eléctricas convencionais, quer síncronas, quer assíncronas. De referir ainda que alguns dos modelos mais complexos envolvem a combinação de modelos elementares, conforme a seguir se descreve.

### 3.1 Inversor Fonte de Corrente (Inversor PQ)

Um inversor PQ injecta na rede a potência disponível nos seus terminais. Um exemplo da aplicação de um inversor deste tipo é um gerador foto-voltaico, uma vez que neste a potência DC produzida varia no tempo e o inversor deve adaptar-se continuamente de forma a igualar a potência produzida pelo painel foto-voltaico. Uma vez que as respostas dos inversores são tipicamente bastante rápidas (alguns mili-segundos), o comportamento dinâmico da fonte primária terá grande influência no comportamento dinâmico da micro-rede, nomeadamente em casos em que são enviados *set-points* aos controladores locais das micro-fontes controláveis, originários do MGCC. No que respeita ao controlo de potência reactiva, este pode ser realizado através da malha de controlo local ou de *set-points* enviados pelo MGCC.

Este modelo utiliza um inversor operando como fonte de corrente controlada por tensão. A partir de um modelo desenvolvido originalmente por Engler [15], com pequenas adaptações e modificações, foi possível desenvolver um modelo que permite determinar as componentes instantâneas activa ( $i_{act}$ ) e reactiva ( $i_{react}$ ) da corrente no inversor. A componente activa é corrigida através de um controlador Proporcional-Integral (PI) baseado no erro da tensão no *link* DC.

A componente activa é utilizada para controlar a tensão no *link* DC (e, conseqüentemente, também a potência activa de saída do inversor) de forma a equilibrar a potência activa do inversor e a potência activa da respectiva micro-fonte. A componente reactiva controla a potência reactiva de saída do inversor. Variações de potência nas micro-fontes originam uma variação na tensão do *link* DC, que é corrigida através da acção de um controlador PI, ajustando a componente activa da corrente de saída. Este inversor pode ser operado com um factor de potência unitário ou receber um *set-point* (local ou proveniente do controlador central – MGCC) para a potência reactiva de saída.

O esquema de controlo deste inversor pode ser visto na figura seguinte.

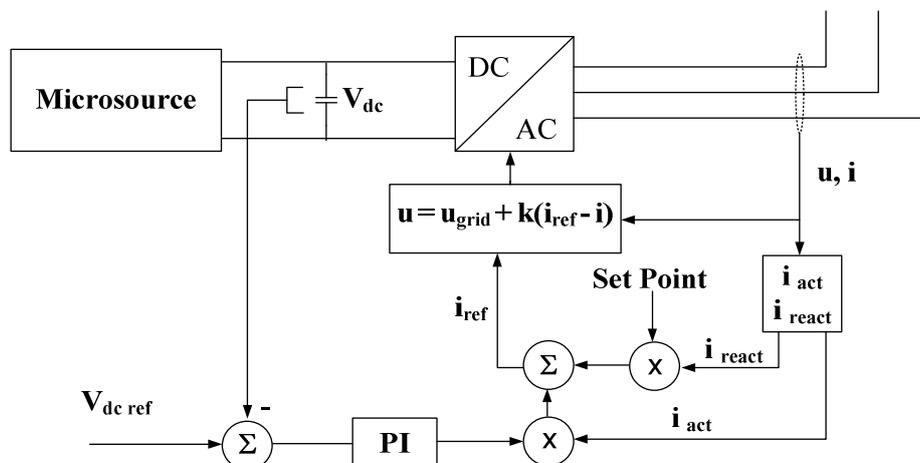
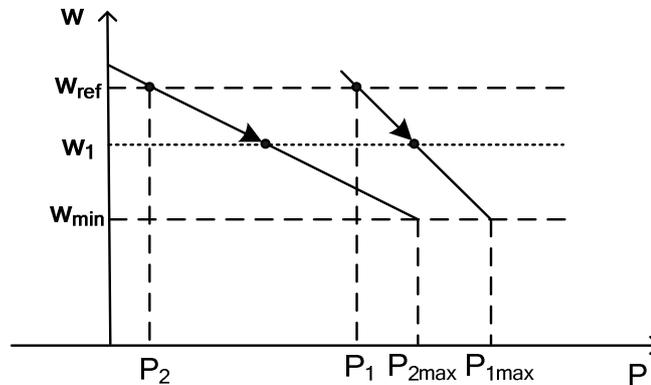


Fig. 7 – Sistema de controlo do inversor PQ [11]

### 3.2 Inversor Fonte de Tensão (*Voltage Source Inverter – VSI*)

Este inversor actua com base em valores pré-definidos de frequência e tensão. O princípio de controlo de um VSI “simula” o comportamento de uma máquina síncrona convencional,

permitindo assim a possibilidade de controlar tensão e frequência no sistema AC através do controlo do inversor.

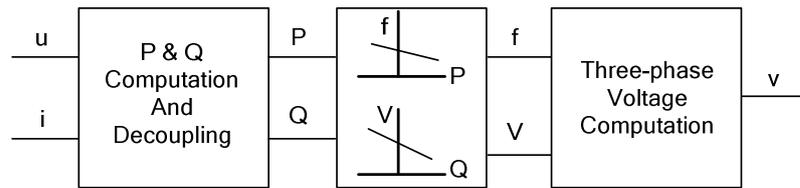


**Fig. 8 – Princípio do controlo proporcional de frequência/potência activa [9]**

Considerando dois VSIs a operar em paralelo, de acordo com a Fig. 8, admita-se que as potências nominais são distintas,  $P_{max1}$  e  $P_{max2}$ , respectivamente. A frequência de referência ( $\omega_{ref}$ ) está definida para  $P_1$  e  $P_2$ , em modo interligado com a rede de distribuição.

Perante uma alteração potência/consumo que se verifique na rede, e supondo que se perde a ligação com a rede a montante, a potência de cada dispositivo é ajustada de acordo com os parâmetros a sua característica do *droop* e a frequência da rede vai evoluir para um novo valor ( $\omega_1$ ), a que corresponde um novo equilíbrio de geração/consumo. Estas funcionalidades naturais de “partilha de potência activa” dos VSIs são realizadas sem o recurso a complexos sistemas de comunicação, operando de forma semelhante ao controlo primário de frequência. Considerações similares podem ser tecidas no que respeita ao *droop* de tensão/potência reactiva [13]. Para que a reposição da frequência no seu valor nominal seja atingida é necessário incluir um tipo de controlo adequado que altere as frequências de referência dos dispositivos, como será visto mais adiante.

Um modelo trifásico de um VSI que implementa o controlo proporcional local, derivado de um modelo de Engler [15], conforme descrito em [11], pode ser observado na Fig. 9.



**Fig. 9 – Esquema simplificado da estrutura de um VSI**

A tensão e a corrente nos terminais do VSI são medidas continuamente de modo a determinar os níveis de potência activa e reactiva, que são atrasados por razões que se prendem com a necessidade de proceder a um desacoplamento. A potência activa determina a frequência através do *droop* de frequência/potência activa. Analogamente, a potência reactiva determina a amplitude da tensão de saída através do *droop* de tensão/potência reactiva. Por razões de estabilidade, foi incluído um controlo de fase *feed-forward* [15]. A malha de controlo é fechada pela rede eléctrica e a corrente e tensão resultantes permitem o cálculo dos novos valores de potência activa e reactiva.

Este modelo foi validado através de uma implementação real, em laboratório, no âmbito do projecto *MicroGrids* [16].

### 3.3 Pilha de Combustível (*Fuel Cell*)

As pilhas de combustível são uma tecnologia de geração de energia eléctrica com um grande desenvolvimento nos últimos anos. Esta tecnologia afigura-se com um elevado potencial de utilização industrial, dado que as pilhas de combustível são capazes de atingir graus de eficiência bastante bons, na gama 35% a 60% [17], originam emissões extremamente baixas ou mesmo nulas e possuem uma elevada fiabilidade devido à ausência quase completa de partes mecânicas.

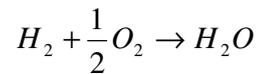
De uma forma muito genérica, uma pilha de combustível é um dispositivo que transforma energia química em energia eléctrica. Esta transformação é realizada através de uma reacção de oxidação-redução: um gás rico em hidrogénio ( $H_2$ ) é introduzido no ânodo e ar ( $O_2$ ) é introduzido no cátodo, utilizando um electrólito que possibilite a troca de iões. A eficiência deste processo está largamente dependente da escolha do electrólito, que permite o intercâmbio dos iões. Neste

sentido, é feita uma classificação das pilhas de combustível pelo tipo de electrólito utilizado. Assim, existem *Polymer Electrolyte Fuel Cell* (PEFC), *Alkaline Fuel Cell* (AFC), *Phosphoric Acid Fuel Cell* (PAFC), *Molten Carbonate Fuel Cell* (MCFC) e *Solid Oxide Fuel Cell* (SOFC).

O modelo dinâmico adoptado neste trabalho corresponde ao de uma SOFC, sendo modelizado de acordo com modelos apresentados por Tomsovic [17] e Padullés [18].

Este modelo é constituído basicamente por três partes: um processador de combustível (*Fuel Processor*) onde o hidrogénio é separado do combustível utilizado, uma pilha de combustível propriamente dita (*Power Section*) onde ocorrem as principais reacções químicas e um inversor (*Power Conditioner*) que converte a corrente DC em corrente AC.

Neste modelo, considerou-se que o ânodo é alimentado apenas com  $H_2$  e o cátodo apenas com  $O_2$ , de forma a que ocorra apenas a seguinte reacção no interior da *fuel cell*:



As reacções químicas levam a uma diferença de potencial ( $V_{fc}^r$ ) entre o ânodo e o cátodo do conjunto das *fuel cells* individuais que pode ser calculada da seguinte forma (aplicando a equação de Nernst e a Lei de Ohm):

$$V_{fc}^r = N_0 \left[ E_0 + \frac{RT}{2F} \ln \frac{p_{H_2} \sqrt{p_{O_2}}}{p_{H_2O}} \right] - r \cdot I_{fc}^r$$

Onde  $E_0$  (V) é a tensão ideal associada à energia livre de Gibbs,  $p_{H_2}$ ,  $p_{O_2}$  e  $p_{H_2O}$  ( $N/m^2$ ) são as pressões parciais dos gases envolvidos,  $N_0$  é o número de células,  $r$  é a resistência eléctrica da *fuel cell* ( $\Omega$ ),  $I_{fc}^r$  é a corrente de saída da *fuel cell* (A),  $R$  (J/(kmol K)) é a constante universal dos gases,  $T$  (K) é a temperatura da *fuel cell* e  $F$  (C/mol) é a constante de Faraday.

Pode definir-se utilização de combustível (*fuel utilization* –  $U_f$ ) como o quociente entre o fluxo de combustível que reage ( $q_{H_2}^r$ ) e o que entra na *fuel cell* ( $q_{H_2}^{in}$ ).

$$U_f = q_{H_2}^r / q_{H_2}^{in}$$

A partir de [18] pode obter-se:

$$q_{H_2}^r = \frac{N_0 I_{fc}^r}{2F} = 2K_r I_{fc}^r$$

Onde  $K_r$  (kmol/(s A)) é uma constante definida para fins de modelização [18].

Admitindo que os valores típicos para  $U_f$  estão dentro da gama de 80% a 90%, para um determinado fluxo de hidrogénio, a corrente de saída da *fuel cell* está, então, restrita à gama:

$$\frac{0.8q_{H_2}^{in}}{2K_r} \leq I_{fc}^{in} \leq \frac{0.9q_{H_2}^{in}}{2K_r}$$

Considerou-se que a utilização óptima de combustível ( $U_{opt}$ ) é de 0.85. Desta forma é possível controlar o fluxo de hidrogénio medindo a corrente real de saída da *fuel cell*:

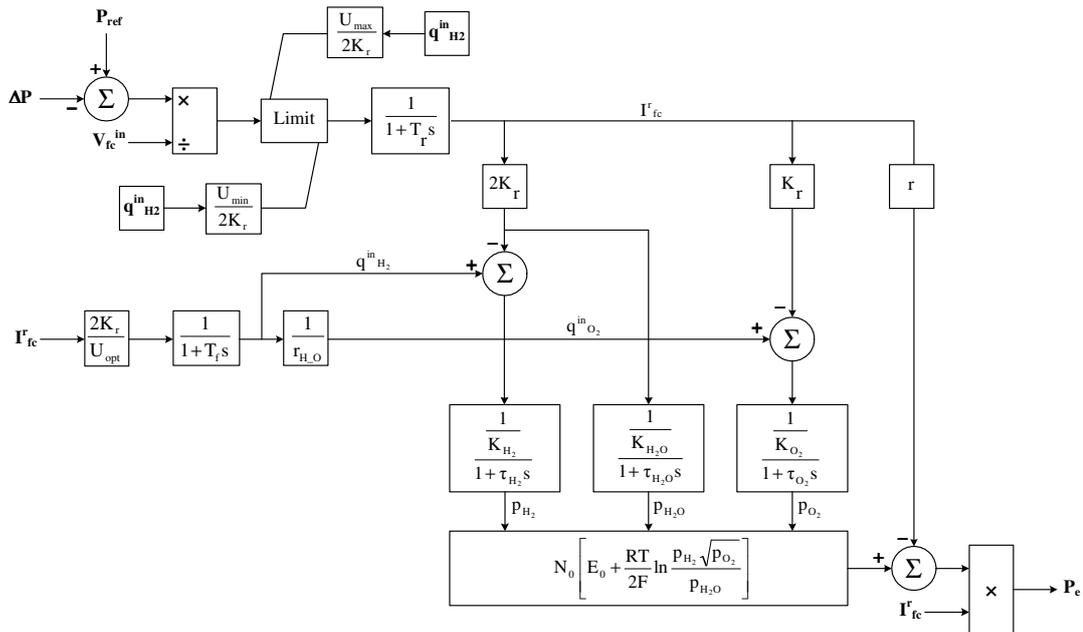
$$q_{H_2}^{in} = \frac{2K_r I_{fc}^r}{0.85}$$

Embora a proporção molecular entre hidrogénio e oxigénio seja de dois para um, permite-se a entrada de um excesso de oxigénio, de modo a maximizar a reacção com o hidrogénio. Em [17] determinou-se que esta proporção ( $r_{H_2O}$ ) deve ser igual a 1.145 de modo a manter a pressão na *fuel cell* menor que 4 kPa em funcionamento normal.

As reacções que ocorrem no interior da *fuel cell* não são instantâneas. Como tal, modelizou-se a resposta temporal do processador de combustível através de uma função de transferência de primeira ordem com uma constante de tempo  $T_f$  (s). A resposta da parte eléctrica da *fuel cell* é já bastante mais rápida e é modelizada também por uma função de transferência idêntica, com uma

constante de tempo  $T_e$  (s). As respostas temporais dos fluxos de hidrogénio, oxigénio e água são modelizadas através de constantes de tempo  $\tau_{H_2}$ ,  $\tau_{O_2}$  e  $\tau_{H_2O}$  (s), respectivamente.

As principais reacções electro-químicas que ocorrem na SOFC são apresentadas no diagrama de blocos da figura seguinte.



**Fig. 10 – Modelo dinâmico de uma SOFC [17]**

Neste modelo, as constantes  $K_{H_2}$ ,  $K_{O_2}$  e  $K_{H_2O}$  (kmol/(s atm)) são, respectivamente, as constantes molares para o hidrogénio, oxigénio e água e as constantes auxiliares  $U_{max}$  e  $U_{min}$  são, respectivamente, a utilização máxima e mínima do combustível.

O modelo da SOFC implementado em ambiente *Matlab® Simulink®* é apresentado na Fig. 11 e o modelo que inclui a integração *fuel cell* na rede é apresentado na Fig. 12.

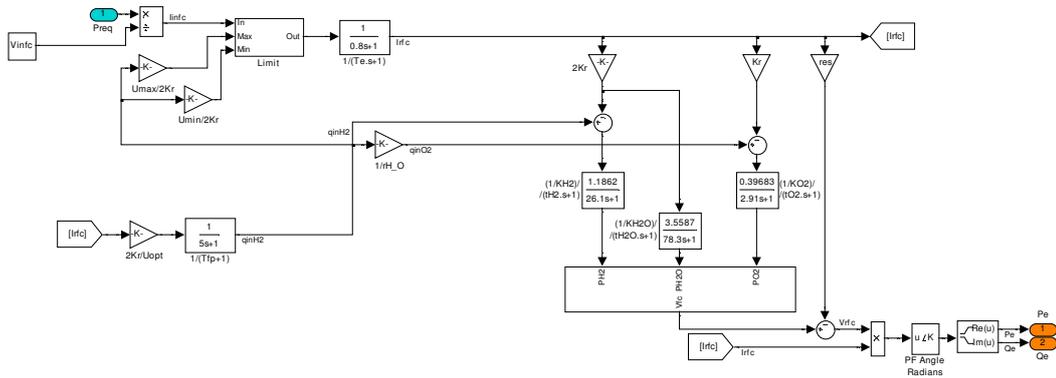


Fig. 11 – Modelo dinâmico de uma SOFC em ambiente *Matlab® Simulink®*

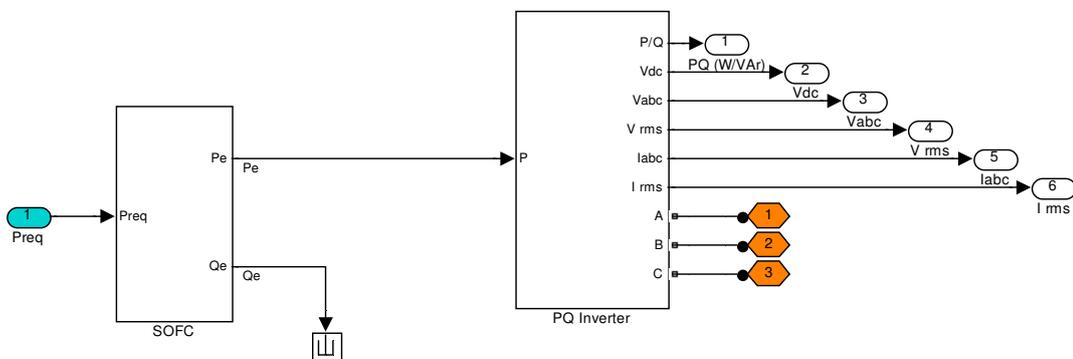


Fig. 12 – Modelo global de uma SOFC (incluindo conversor) em ambiente *Matlab® Simulink®*

### 3.4 Micro-turbina

As micro-turbinas são pequenas turbinas a gás, de ciclo-simples com potências que se situam na gama de 25 a 300 kW. Existem essencialmente dois tipos de micro-turbinas: micro-turbinas de veio único (*single-shaft*) e micro-turbinas de veio duplo (*split-shaft*).

O modelo standard de um sistema de uma micro-turbina é constituído pelas seguintes partes [17]:

- Turbina – A máquina primária é uma pequena turbina a gás que pode ser do tipo *single-shaft* ou do tipo *split-shaft*.

- Alternador – Na versão *single-shaft* utiliza-se um alternador (tipicamente uma máquina de ímãs permanentes). Na versão *split-shaft* utiliza-se um gerador convencional de indução ou mesmo uma máquina síncrona.
- Electrónica de Potência – Na versão *single-shaft*, o alternador gera uma frequência extremamente elevada, que tem de ser rectificadora e depois invertida de volta para os 50 Hz. Na versão *split-shaft* não são necessários interfaces de electrónica de potência.
- Recuperador – O recuperador é um permutador de calor, que transfere o calor do gás libertado para o ar que vai entrar na câmara de combustão. Isto conduz a uma redução do combustível necessário para aumentar a temperatura do ar exigida pela turbina.
- Sistemas de Controlo e de Comunicação – Estes sistemas incluem o controlo completo da turbina, do inversor e dos interfaces electrónicos que comandam os arranques, bem como instrumentação, análise de diagnóstico, etc.

### 3.4.1 Micro-turbina *Single-shaft*

A micro-turbina *single-shaft* utiliza uma turbina que opera a altas velocidades constituída por um compressor e uma turbina montados no mesmo veio que o alternador eléctrico. O alternador utilizado é normalmente uma máquina síncrona de ímãs permanentes. A velocidade de operação da turbina está na gama de 50000 a 120000 rpm. Deste modo, a frequência da tensão de saída é extremamente elevada (podendo ascender aos milhares de Hz), daí que tenha de ser primeiramente rectificadora e só depois ondulada para uma frequência de 50 Hz.

O modelo da parte mecânica encontra-se disponível em [17]. A turbina é modelizada de acordo com o modelo de turbina a gás GAST, um dos mais frequentemente usados para simulação dinâmica, sendo o diagrama de blocos do modelo o apresentado na figura seguinte:



### 3.4.2 Micro-turbina *Split-shaft*

A micro-turbina *split-shaft* utiliza uma turbina que roda a 3000 rpm e um gerador convencional (normalmente uma máquina de indução ligada através de uma caixa redutora). Este modelo de micro-turbina não requer a utilização de inversor.

O modelo da parte mecânica deste micro-turbina é igual ao da micro-turbina *single-shaft* – modelo GAST, apresentado no ponto anterior.

O modelo da máquina assíncrona utilizado foi o disponível na biblioteca *SimPowerSystems* do *Matlab® Simulink®*.

### 3.5 Gerador Foto-Voltaico

Existe toda uma panóplia de modelos para este tipo de dispositivo, variando em termos de precisão e complexidade. Justamente devido ao compromisso que se torna necessário encontrar entre estes dois aspectos, optou-se por incluir um modelo bastante simples, com precisão razoável para este trabalho.

Este modelo do gerador foto-voltaico foi seleccionado de entre os vários modelos disponíveis para ser incluído numa rede AC, exigindo um modelo de inversor equipado com um algoritmo de *Maximum Power Point Tracker* (MPPT). O modelo admite que o gerador estará sempre a funcionar no seu ponto máximo de potência face a um dada temperatura e uma dada irradiação [19].

As entradas do modelo são a temperatura e a irradiação e a saída é a potência máxima produzida.

Este modelo baseia-se essencialmente na variação linear da potência do painel foto-voltaico com a temperatura. Substituindo a temperatura do painel pela temperatura ambiente e pela irradiação, e multiplicando a potência pelo número total de painéis do conjunto obtém-se:

$$P_{Max}^M = \frac{G_a}{1000} \cdot \left[ P_{Max0}^M + \mu_{P_{Max}} \cdot (T_M - T_{M,0}) \right]$$

$$T_M = T_a + G_a \cdot \frac{NOCT - 20}{800}$$

$$\Rightarrow P_{Max} = N \cdot \frac{G_a}{1000} \cdot \left[ P_{Max0}^M + \mu_{P_{Max}} \cdot \left( T_a + G_a \cdot \frac{NOCT - 20}{800} - 25 \right) \right]$$

Onde  $\mu_{P_{Max}}$  (W/°C) é o coeficiente de variação de potência do painel com a temperatura,  $T_M$  é a temperatura do painel (°C),  $N$  é o número total de painéis foto-voltaicos,  $T_{M,0}$  é a temperatura do painel em condições standard (°C),  $P_{Max}^M$  é a potência máxima do painel foto-voltaico, (W),  $T_a$  é a temperatura ambiente (°C),  $G_a$  (W/m<sup>2</sup>) é o nível de irradiação e NOCT é a temperatura normal de operação da célula no painel foto-voltaico (°C).

O modelo do gerador foto-voltaico implementado em ambiente *Matlab® Simulink®* é apresentado na Fig. 15 sendo o modelo incorporado na plataforma de simulação descrito na Fig. 16.

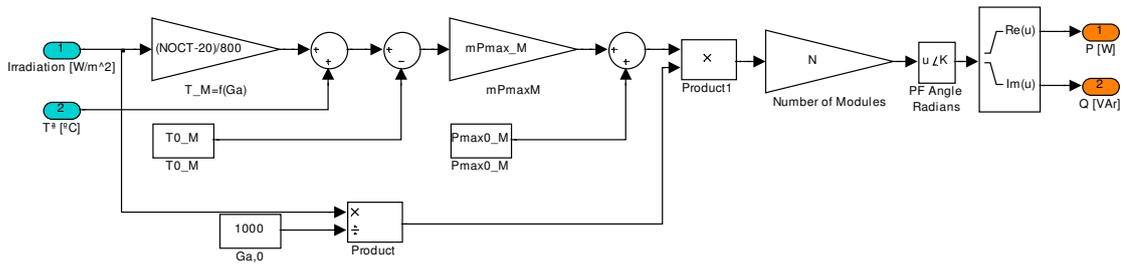


Fig. 15 – Modelo dinâmico de um gerador foto-voltaico em ambiente *Matlab® Simulink®*

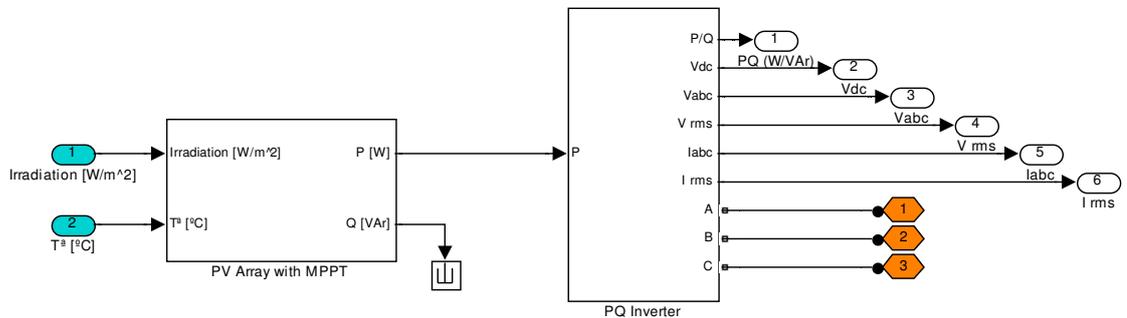


Fig. 16 – Modelo global de um gerador foto-voltaico (incluindo conversor) em ambiente *Matlab® Simulink®*

### 3.6 Gerador Eólico

O modelo do gerador eólico aqui adoptado é um modelo extremamente simples, para modelizar uma máquina com uma potência nominal relativamente baixa (15 kW).

O modelo do gerador eólico utiliza uma máquina de indução em “gaiola de esquilo” directamente ligada à rede. O modelo em *Matlab® Simulink®* utiliza o modelo disponível da máquina de indução incluído no *SimPowerSystems* do *Matlab® Simulink®*.

No que respeita à turbina eólica, a modelização envolve uma tabela de duas entradas *Lookup Table 2D* para calcular o binário mecânico da turbina a partir da velocidade do vento e da velocidade da turbina. O modelo foi utilizado em [20] e pode ser visto na Fig. 17.

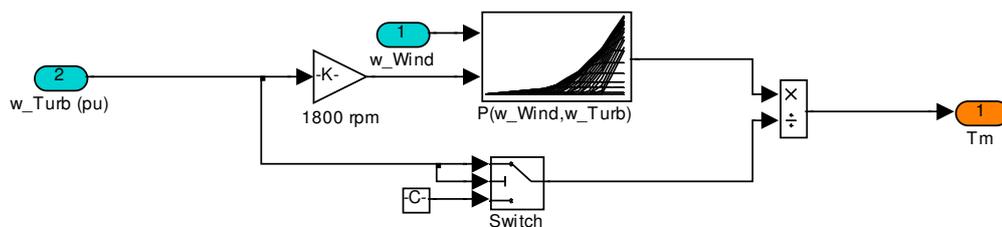


Fig. 17 – Modelo da turbina eólica em ambiente *Matlab® Simulink®*

O modelo completo é apresentado na Fig. 18.

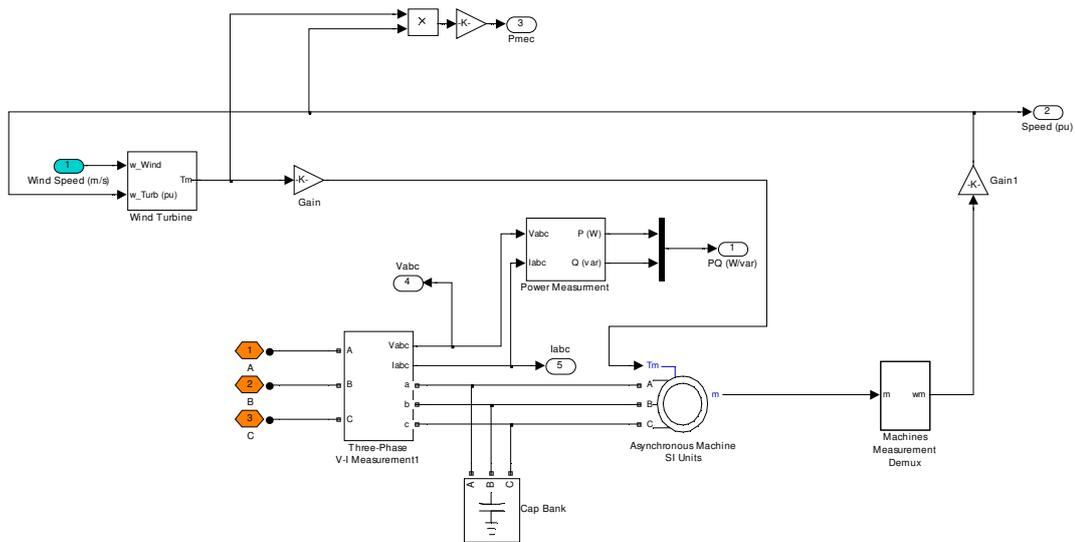


Fig. 18 – Modelo do gerador eólico em *Matlab® Simulink®*

### 3.7 Cargas

Foram considerados e modelizados dois tipos de cargas neste trabalho. A modelização envolveu também o mecanismo de controlo de um dos tipos de carga.

#### 3.7.1 Carga do Tipo Impedância Constante

Foi utilizado um modelo de carga do tipo impedância constante baseado num bloco trifásico R-L-C paralelo. O bloco utilizado encontra-se disponível na biblioteca *SimPowerSystems* do *Matlab® Simulink®* e implementa uma carga linear como uma combinação em paralelo de uma resistência R, de uma indutância L e de uma capacidade C. Para uma frequência especificada, esta carga apresenta-se como uma impedância constante. As potências activa e reactiva absorvidas pela carga são proporcionais ao quadrado da tensão que lhe é aplicada.

### 3.7.2 Carga do Tipo Motor

Foi utilizado um modelo de uma carga do tipo motor que se baseia num motor assíncrono ao qual é aplicado um binário constante. A máquina assíncrona utilizada é uma máquina de indução trifásica em gaiola de esquilo que se encontra disponível na biblioteca *SimPowerSystems* do *Matlab® Simulink®*. Considerou-se que os motores estão sempre à plena carga. Os diversos parâmetros usados nestas máquinas foram os disponíveis por defeito nessa biblioteca.

### 3.7.3 Carga Dinâmica

A implementação de esquemas de deslastre de cargas não-essenciais toma um papel fundamental sob certas condições de operação, nomeadamente as resultantes de desequilíbrios significativos entre produção e carga (obviamente, só nos casos em que a carga excede a geração).

Assim, é possível implementar um esquema de deslastre frequencimétrico de modo a ajudar no restabelecimento da frequência após a passagem a funcionamento em rede isolada. A filosofia adoptada baseia-se na amplitude do desvio de frequência. Isto significa que a percentagem de carga a deslastrar é especificada em função da amplitude do desvio de frequência verificado no sistema. Outra filosofia seria considerar a taxa de variação da frequência (baseada no valor da derivada da frequência). Neste caso, a opção recaiu em penalizar apenas os desvios excessivos de frequência, dadas as características muito particulares de uma micro-rede (como a sua baixa inércia global e a existência de geradores dependentes de fontes intermitentes como é o caso de geradores eólicos ou foto-voltaicos) e uma vez que a preocupação central é a de sustentar de forma eficiente os eventuais desvios na frequência do sistema.

A funcionalidade de controlo do esquema para deslastre frequencimétrico de cargas encontra-se implementada no MGCC. A implementação deste esquema foi realizada do seguinte modo: foram considerados quatro passos de deslastre de carga, cada um correspondendo a um certo valor do desvio de frequência, e dois passos para o relastre de cada um dos passos de deslastre ocorridos. Foi garantido um intervalo de tempo mínimo, pré-especificado, entre a acção de deslastre e a de relastre.

A tabela seguinte apresenta o máximo desvio de frequência que corresponde a uma percentagem específica da carga a deslastrar (como percentagem da carga deslastrável total):

*Tabela 1 – Parâmetros para o deslastre frequencimétrico*

Desvio de Frequência (Hz)	Carga a Deslastrar (%)
$0.25 \leq \Delta f < 0.50$	20
$0.50 \leq \Delta f < 0.75$	40
$0.75 \leq \Delta f < 1.00$	70
$\Delta f > 1.00$	100

Para efectuar o relastre implementou-se o seguinte mecanismo: de forma a evitar desvios de frequência elevados perante a religação de cargas previamente deslastradas, especificou-se um determinado número de passos de religação. Assim, para cada passo de deslastre de carga, a religação dessa mesma quantidade é feita em dois passos.

Deste modo, o modelo para uma carga dinâmica foi concebido para a realização do esquema apresentado para deslastre de carga. O modelo da carga dinâmica utilizado recebe os *set-points* de potência activa e reactiva provenientes do MGCC, por intermédio do LC.

Este esquema de deslastre de cargas foi, nesta fase do trabalho, aplicado às cargas do tipo impedância constante.

### **3.8 Dispositivos de Armazenamento de Energia**

Neste trabalho foram considerados dois tipos de dispositivos de armazenamento de energia cuja descrição se apresenta em seguida. Como já foi referido anteriormente, foram desprezados os fenómenos transitórios rápidos de comutação nos elementos das pontes inversoras dos dispositivos de conversão de energia eléctrica.

Uma vez que algumas micro-fontes utilizadas possuem constantes de tempo elevadas, o que implica tempos de resposta elevados, os dispositivos de armazenamento de energia devem

permitir fornecer, de uma forma expedita, a potência activa necessária de modo a equilibrar o sistema, após a ocorrência de uma perturbação ou variação significativa de carga.

Os dispositivos de armazenamento devem estar disponíveis sempre que possível pelo que, em situações de excesso de produção na micro-rede, deve aproveitar-se para carregar estes dispositivos.

### 3.8.1 Volante de Inércia (*Flywheel*)

A *flywheel* é modelizada como uma fonte de tensão DC, ligada à rede através de conversores de potência adequados. A acção do conjunto *flywheel* + inversor é semelhante à de uma fonte de tensão AC, uma vez que a injeção de potência é extremamente rápida, para possibilitar uma actuação eficaz perante os fenómenos transitórios próprios do funcionamento da micro-rede. A sua capacidade é, no entanto, limitada. A potência activa do conjunto vai ser proporcional ao desvio de frequência na micro-rede. Este comportamento está descrito na Fig. 19.

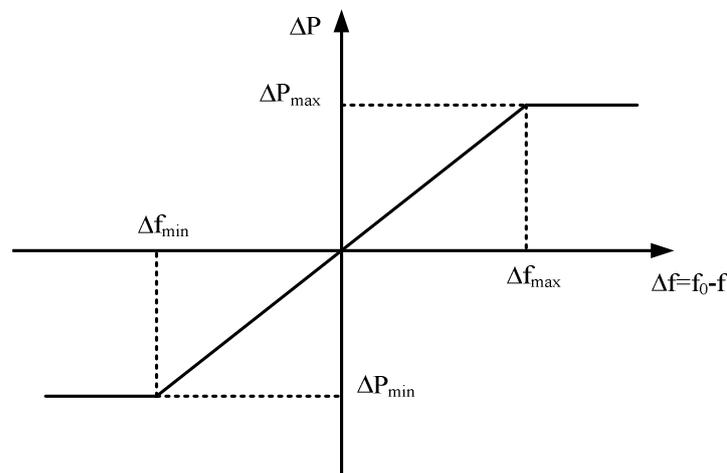


Fig. 19 – Característica P-f, em regime permanente, do sistema VSI + *flywheel*

### 3.8.2 Baterias

A actuação das baterias está modelizada numa resposta proporcional frequência/potência activa, que pode ser observada na Fig. 20. Esta acção está incluída nos modelos dos inversores

utilizados. Dado o tipo e o horizonte temporal dos estudos realizados, foi, nesta primeira fase exploratória das possibilidades de simulação, desprezada a influência dos ciclos de carga e descarga das baterias e da consequente redução eventual da sua vida útil.

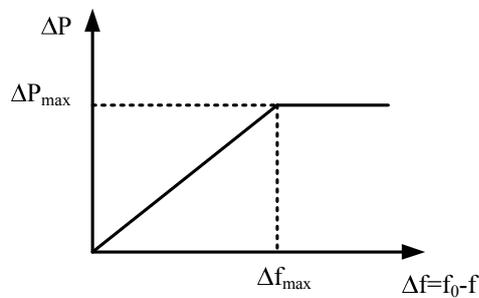


Fig. 20 – Característica P-f, em regime permanente, das baterias

Foi ainda considerada a energia total cedida à rede, segundo a fórmula:

$$\int_{t_1}^{t_2} P dt < W_{\max}$$

Nesta equação,  $P$  é a potência entregue à rede e  $W_{\max}$  é a energia máxima disponível no dispositivo, supondo que esta não depende da velocidade de descarga.

### 3.9 Conclusão

Neste capítulo, descreveram-se, de uma forma sucinta, os conceitos teóricos por detrás dos modelos utilizados, bem como a respectiva implementação em ambiente *Matlab® Simulink®*. Apresentaram-se os modelos utilizados de micro-fontes, de dispositivos de armazenamento de energia e de dispositivos de conversão de energia eléctrica. De realçar que o trabalho de simulação realizado incidiu sobretudo no comportamento dinâmico, nomeadamente em termos de variações de frequência, e não sobre outros fenómenos transitórios rápidos, pelo que foram omitidos alguns detalhes de modelização dos dispositivos de conversão.

## Capítulo 4 – Estrutura de Comunicações da Micro-Rede

Para a correcta implementação do conceito de micro-rede é necessário desenvolver uma plataforma de comunicações para apoio ao controlo que assegure a interacção entre o MGCC e os MC e LC, bem como a comunicação entre o MGCC e o DMS.

A adopção de protocolos standard e tecnologias abertas (*open technologies*) permite conceber e desenvolver soluções modulares usando componentes de *hardware* e *software* de baixo custo, disponíveis no mercado, que garantem flexibilidade tendo em vista expansões e melhorias futuras. Por outro lado, a escolha de um protocolo adequado deve ter em linha de conta a natureza da arquitectura de controlo da micro-rede.

As vantagens de utilizar um protocolo baseado em TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) justificam esta opção; com efeito, este protocolo garante a independência em relação à tecnologia da rede física que pode então ser escolhida de acordo com diferentes factores mais relevantes como disponibilidade, facilidade de utilização e custo. Presentemente, encontra-se disponível um elevado número de soluções de acesso, desde soluções *wired* (*Digital Subscriber Line* e suas variantes...) até soluções *wireless* (*Wireless Fidelity*, rádio...).

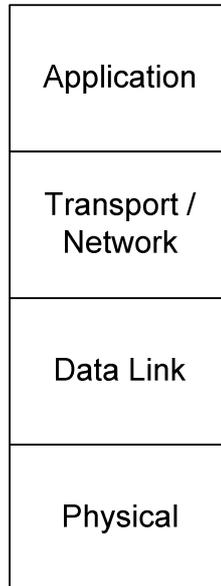
A *Power Line Communication* (PLC) emerge como uma recente tecnologia para acesso à Internet em banda-larga e o seu uso no controlo e comando da micro-rede pode ser considerado no contexto de um serviço comercial.

Neste capítulo faz-se uma apresentação de uma arquitectura de comunicações e uma descrição sucinta das soluções de comunicação a adoptar para o caso de uma micro-rede, tendo em consideração uma série de requisitos que condicionam esta escolha.

### 4.1 Arquitectura de Comunicações

Faz-se em seguida uma apresentação muito geral sobre a estrutura do protocolo de comunicações a utilizar para o caso de uma micro-rede.

O protocolo de comunicações a adoptar pode ser modelizado abstractamente, de uma forma estruturada, em 4 camadas (*layers*) básicas [21]:



**Fig. 21 – Estrutura simplificada de um protocolo de comunicações [21]**

1 – Camada Física (*Physical Layer*) – esta camada está relacionada com o *hardware* da rede, ligações físicas por cabo ou ligações electromagnéticas *wireless*; esta camada é a mais básica já que trata da transferência de informação “crua” (*bits*); as frequências a que é estabelecida a comunicação, e outras funções de baixo nível são implementadas nesta camada; exemplos para uma camada física podem ser *Digital Subscriber Line* (DSL), ondas de rádio, etc.;

2 – Camada de Ligação de Dados (*Data Link Layers*) – esta camada assegura que a informação é transferida correctamente entre nós de rede adjacentes numa *wide area network*; esta camada fornece os meios funcionais e os procedimentos para a transferência de informação na rede e para detectar, e eventualmente corrigir, erros que possam ocorrer na camada física; um exemplo de um protocolo para esta camada é a Ethernet;

3 – Camada de Transporte/Rede (*Transport/Network Layer*) – a camada de rede endereça mensagens e traduz endereços lógicos para endereços físicos; esta camada promove o movimento dos pacotes de informação desde a fonte ao destino, definindo o modo de interacção entre dispositivos de rede; a camada de transporte garante uma transferência transparente de

informação e assegura uma transferência completa de informação; exemplos para estas camadas podem ser os protocolos TCP/IP;

4 – Camada de Aplicação (*Application Layer*) – esta camada garante a transmissão de informações específicas para uma dada aplicação; um exemplo de protocolo para esta camada é o *HyperText Transfer Protocol* (HTTP).

Uma breve análise crítica de soluções no âmbito da camada física é o principal objectivo deste capítulo.

## 4.2 Análise dos Requisitos do Sistema

Como já foi referido anteriormente, um requisito natural consiste no uso de protocolos standard e *open technologies* de forma a reduzir os custos e a facilitar a implementação tanto de *hardware* como de *software*.

A selecção deve ser também feita tendo em conta a natureza da arquitectura de controlo de uma micro-rede. Esta arquitectura pode ser vista, numa primeira fase, como uma relação *master/slave*, sendo o *master* o MGCC e vários *slaves* correspondendo a cada LC ou MC.

É possível obter numerosas vantagens usando redes e protocolos de transferência standard, o que presentemente corresponde a escolher a tecnologia da família TCP/IP. Estas vantagens são as seguintes:

- Independência em relação à tecnologia da rede física;
- Possibilidade de partilhar a rede física com outras aplicações e serviços;
- Integração numa rede IP mais ampla;
- Utilização de serviços novos ou já existentes que correm em TCP.

Assim, usando o protocolo TCP/IP na camada de transporte/rede da arquitectura de comunicação da micro-rede, consegue-se um maior leque de funcionalidades, uma maior flexibilidade nomeadamente no que respeita a evoluções futuras, tais como a exploração de

cenários mais complexos de controlo ou a utilização de uma variedade adicional de serviços de comunicação (dependendo do operador da rede).

A adopção do IP leva a que possa ser escolhida quase qualquer tecnologia para a rede física havendo que considerar, contudo, alguns factores restritivos, incluindo a estrutura da rede (radial ou emalhada), o tipo de rede (tipicamente urbana ou rural) e a dimensão, qualidade e localização da rede.

No caso mais geral, vários outros aspectos podem também influenciar a escolha da infraestrutura física escolhida para a rede, dos quais alguns são enumerados em seguida:

- Custo;
- Infra-estruturas existentes;
- Disponibilidade do serviço;
- Dispersão geográfica;
- Fiabilidade;
- Frequência, volume e tempo de transmissão requeridos;
- Número de controladores envolvidos.

No que respeita à informação transmitida entre os controladores da micro-rede, o diagrama apresentado na Fig. 22 ilustra as principais necessidades de comunicação esperadas [22].

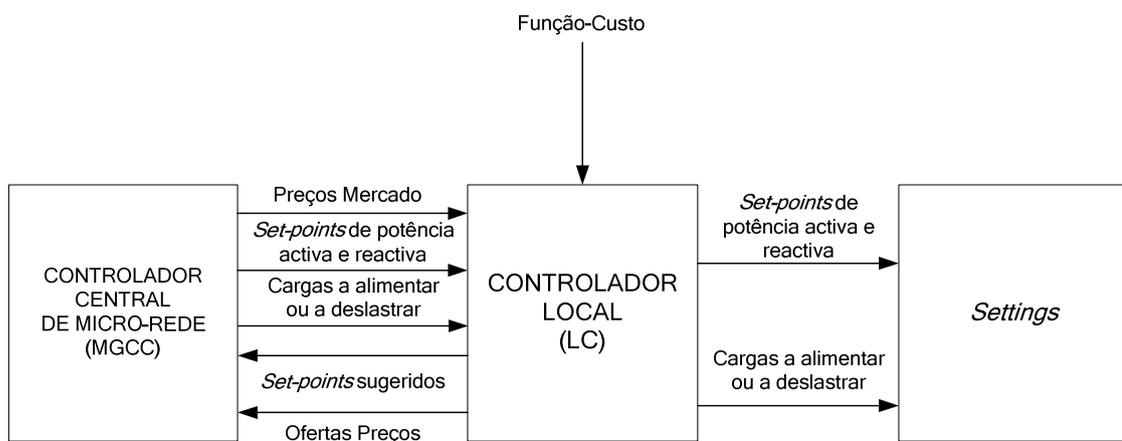


Fig. 22 – Diagrama de troca de informações [22]

Como já foi oportunamente referido, o MGCC possui uma multiplicidade de funções das quais apenas algumas são detalhadas no âmbito desta dissertação. Diversos módulos constituem essa estrutura complexa que é integrada no MGCC, contendo cada um uma ou várias funções de controlo e gestão do funcionamento da micro-rede.

As questões relacionadas com o funcionamento em ambiente de mercado estão fora do âmbito desta dissertação (Preços Mercado e Ofertas Preços, na figura).

Neste sentido, o custo de uma solução de comunicação é, como habitualmente, um dos factores que mais irá pesar na escolha de uma solução técnica eficiente e viável. Para ultrapassar certas questões económicas, pode tornar-se interessante realizar um levantamento prévio das características de infra-estruturas físicas já existentes.

A questão da disponibilidade do canal de comunicação é extremamente importante para a implementação de uma estrutura de comunicações eficientes. De facto, para implementação de funções de controlo torna-se essencial garantir uma disponibilidade contínua do meio de comunicação, sendo que essa garantia poderá acarretar custos mais elevados ao sistema. Este facto pode condicionar algumas das escolhas de tecnologias de rede física, sobretudo no que respeita a garantir a constante disponibilidade de uma determinada largura de banda.

Com respeito à dispersão geográfica do sistema, torna-se necessário verificar não só as distâncias a vencer (que, no caso concreto das micro-redes, se espera que não sejam demasiado grandes, no máximo da ordem de alguns quilómetros) mas também da existência de obstáculos físicos à comunicação entre controladores. Este factor pode condicionar fortemente a opção entre soluções *wired* e *wireless*.

Por outro lado, uma das principais decisões a tomar está relacionada com a escolha de uma solução dedicada ou partilhada. Actualmente, nos sistemas eléctricos convencionais, serviços de sistema como o Controlo Automático de Geração para controlo de frequência são realizados recorrendo a soluções dedicadas. Se essa for a opção, torna-se tecnicamente viável a operação do sistema. No entanto, perante a actual mudança de paradigma regulatório na estrutura dos SEEs é legítimo pensar em utilizar uma rede de comunicações aberta e partilhada com outros serviços. A implementação de um esquema desse tipo deve, no entanto, ser vista com alguma precaução, uma vez que podem surgir no sistema de comunicações atrasos na comunicação e outros problemas. Torna-se, assim, extremamente relevante realizar uma análise da influência destes factores no funcionamento do sistema de operação e controlo de uma rede. Um aprofundamento destas

questões está, contudo, fora do âmbito desta dissertação. Um estudo sobre a arquitectura de comunicações a ser explorada especificamente nos futuros SEEs pode ser encontrado em [23].

No que respeita ao volume de transmissão, espera-se que não seja um aspecto muito crítico na selecção de uma solução de comunicações, já que o volume de dados não será muito elevado. De facto, como pode ver-se na Fig. 22, a informação trocada pelos controladores da micro-rede não deverá ter uma dimensão elevada, sobretudo considerando os módulos em análise nesta dissertação, tais como a função de controlo secundário centralizado e a função de deslastre de cargas não-essencias. Espera-se ainda que a frequência de transmissão seja reduzida, permitindo tempos de transmissão mais elevados. Para o módulo de controlo secundário centralizado, o tempo de transmissão deve ser desprezável face ao tempo entre envio de comandos consecutivos que se estima da ordem da dezena de segundos, conforme se analisará mais adiante.

O módulo mais problemático em termos de frequência de envio de ordens de comando deverá ser o concebido para o funcionamento em ambiente de mercado, sendo que essa análise está já fora do âmbito desta dissertação.

Analizam-se de seguida algumas soluções, consideradas mais interessantes, a explorar para a camada física, com particular incidência na tecnologia PLC.

## **4.3 Comunicação *Wired***

### **4.3.1 Rede de Cobre / Soluções *Telephone-Based***

#### **4.3.1.1 *Digital Subscriber Line (DSL)***

DSL (*Digital Subscriber Line*) é uma família de tecnologias que providencia uma ligação digital utilizando a rede de cobre telefónica convencional. A comunicação pode ser realizada a 512 kb/s ou mais. Este sistema permite a transferência de informação e de voz. O facto de a comunicação de informação ser feita em formato digital, sem necessidade de conversões analógico-digital para a transmissão, leva a um melhor aproveitamento da largura de banda disponível. O sinal digital pode ser separado do sinal analógico (de voz, tipicamente), permitindo o uso dos dois tipos de comunicação em simultâneo. O DSL admite várias variantes que se

distinguem pela velocidade da comunicação. Alguns exemplos são bem conhecidos no acesso à Internet de banda-larga como a ADSL (*Asymmetric DSL*).

Esta solução pode ser bastante interessante nomeadamente se a estrutura telefónica estiver já montada, admitindo uma ligação partilhada. O custo não deverá ser demasiado elevado para soluções dedicadas e prevê-se baixo para soluções partilhadas, contudo poderá haver limitações nos tempos de transmissão para este último tipo de soluções.

#### **4.3.2 Power Line Communication (PLC)**

O fluxo de comunicações no mundo actual é cada vez mais elevado. Neste sentido, torna-se extremamente interessante e atractivo explorar a possibilidade de utilizar um sistema de comunicações que já possua uma infra-estrutura física e uma rede já desenvolvida: a rede eléctrica. Tendo em conta que, actualmente, o serviço de fornecimento de electricidade chega a praticamente qualquer lugar do mundo civilizado, torna-se teoricamente possível implementar um esquema de comunicações que permite ligar todos os clientes da rede eléctrica.

Com a recente adopção de paradigmas de mercado, as companhias eléctricas têm vindo cada vez mais a explorar novas oportunidades de negócio, o que conduziu a um desenvolvimento na investigação da PLC. No passado, os serviços oferecidos pelas companhias eléctricas relacionavam-se apenas com a distribuição de energia eléctrica, como por exemplo controlo de cargas, controlo de tarifas, etc. Agora, novos serviços de valor acrescentado podem abrir horizontes e permitir a expansão para novos mercados por parte das companhias do sector eléctrico. Por outro lado, uma vez que os requisitos para a comunicação não são muito exigentes, torna-se possível obter um sistema de comunicações suficientemente fiável e sem custos proibitivos. Isto porque, em primeiro lugar, a taxa de transmissão (*bit-rate*) necessária para esse tipo de serviços é relativamente baixo e, em segundo lugar, não é necessário uma performance efectiva em tempo real.

Simultaneamente, nos últimos anos tem-se assistido a um aumento quase vertiginoso do uso da Internet. Se for possível providenciar este tipo de serviço usando a linha eléctrica, as companhias eléctricas poderiam também entrar no negócio das comunicações, cujo mercado se encontra actualmente em expansão. No entanto, surge um sério obstáculo a estas pretensões. De

facto, e ao contrário das comunicações convencionais para os sistemas de distribuição de energia eléctrica (como operações de monitorização e tele-contagem), as comunicações para redes necessitam de *bit-rates* bastante elevados, e até, em alguns casos como TV e Vídeo, em tempo real. Largamente por este motivo, muitas têm sido as investigações para o projecto de um sistema de comunicações.

Tipicamente, alguns sistemas já existentes prometem *bit-rates* da ordem de 1 Mb/s, sendo que no entanto, os sistemas comerciais andam na gama de 10 a 100 kb/s [24] e apenas fornecem serviços que requerem um *bit-rate* baixo, tais como operações de tele-contagem ou tele-medição.

Uma vez que as linhas eléctricas nunca tiveram como objectivo algo que não fosse uma distribuição eficiente da energia eléctrica, estas não são particularmente adequadas para sistemas avançados de comunicação.

#### **4.3.2.1 Características da *Power Line Communication***

A PLC explora a possibilidade de enviar sinais eléctricos, contendo informação, que se propagam através das linhas eléctricas. Um canal de comunicação pode definir-se com um caminho físico entre dois nós através do qual a informação é veiculada.

A qualidade de comunicação de um dado canal é fundamentalmente função do nível de ruído no receptor e da atenuação do sinal eléctrico em diversas frequências. Obviamente, quanto maior o ruído ou maior a atenuação, pior é a recepção do sinal.

Na linha eléctrica, o ruído provém fundamentalmente das cargas eléctricas ligadas à rede. Como a carga do sistema varia constantemente, a natureza do ruído também se altera. A atenuação é sobretudo dependente do comprimento do canal de comunicação e da desadaptação das impedâncias na rede. A linha eléctrica é considerada um ambiente hostil uma vez que possui um ruído e uma atenuação largamente variantes com o tempo.

#### **4.3.2.2 A Linha Eléctrica como Canal de Comunicação**

Um circuito de acoplamento é necessário para efectuar a ligação de um canal de comunicação à linha de potência. Este circuito tem de estar presente fundamentalmente por duas

razões: em primeiro lugar porque evita que o sinal de 50 Hz usado para a distribuição de energia eléctrica entre no equipamento, em segundo lugar porque garante que grande parte do sinal transmitido está dentro da gama de frequência usada para comunicações. Isto serve como garantia de que o transmissor não introduz interferências adicionais no canal.

#### 4.3.2.3 Limitações na Largura de Banda

Na Europa, a largura de banda é regulada por norma CENELEC (EN 50065 [25]). Esta norma só permite a utilização de frequências entre os 3 kHz e os 148.5 kHz. Esta é uma pesada restrição à PLC e pode não ser suficiente para aplicações mais exigentes como vídeo em tempo real, uma vez que estas aplicações necessitam de um elevado *bit-rate* (já que o *bit-rate* é proporcional à largura de banda).

#### 4.3.2.4 Perspectivas Futuras

Tanto na Europa como na América do Norte e Ásia, existem dezenas de fabricantes de tecnologias para PLC, sendo a maior parte destes companhias concessionárias das redes eléctricas.

No que respeita ao sucesso das empresas que investem neste tipo de tecnologia, a imagem passada não é muito homogénea: perante alguns fracassos rotundos, contam-se alguns casos de relativo sucesso e expansão [26].

É possível sintetizar algumas das razões que podem explicar o “fracasso parcial” desta tecnologia:

- Competição extremamente feroz com outros serviços mais baratos de Internet e de telecomunicações;
- *Hardware* de instalação para o cliente de custo relativamente elevado;
- Existência de interferência mútua de vários utilizadores da PLC que usem o mesmo canal;
- Existência de mudanças de topologia na rede pode originar mudanças significativas na qualidade de propagação.

É possível observar que, actualmente, a utilização de PLC de alta velocidade está bastante comprometida em termos de mercados de tecnologia de ponta. No entanto, se se aceitar velocidades de transmissão mais baixas e alguns compromissos técnicos (como por exemplo, recorrer a frequências de transmissão mais baixas de modo a evitar a interferência com outros serviços), a PLC pode ser uma solução interessante.

Por outro lado, pode tornar-se extremamente problemático o recurso a esta solução de comunicação em situações de defeito na micro-rede. De facto, se existir algum curto-circuito, por exemplo, é altamente provável que a transmissão de dados fique inviabilizada, com consequências severas para o mecanismo de controlo da micro-rede. Assim, torna-se necessário ponderar bem a existência de um sistema de comunicação de recurso.

#### **4.4 Comunicação *Wireless***

Existem vários aspectos a considerar e várias características a observar neste tipo de tecnologia de comunicações. De um modo geral, existe uma relação inversa entre fiabilidade, largura de banda e área de cobertura desta tecnologia e os custos relacionados com a implementação prática da mesma.

As comunicações neste sistema são completamente livres e gratuitas embora só curtas distâncias possam ser vencidas, estando ainda sujeitas a fortes atenuações. Por outro lado, a existência de obstáculos à comunicação pode ser também bastante limitadora.

Uma série de pontos devem ser identificados e esclarecidos antes da instalação de uma tecnologia deste tipo.

- Distância de transmissão – Habitualmente, é necessário transmitir informação através de longas distâncias entre produtores e consumidores, por exemplo. Desse modo, são preferidas soluções que permitam uma maior área de cobertura.
- Volume de transmissão – Diversa informação deve circular no canal de comunicação escolhido, especialmente a um nível de BT, entre cargas, geradores, sistemas de

armazenamento, etc. pelo que a taxa de transmissão de informação começa a ter algum relevo.

- Segurança de transmissão – Existem dois aspectos que é necessário ter em consideração neste contexto. O primeiro tem que ver com a segurança perante um acesso não autorizado à informação veiculada. Este é um problema de todas as tecnologias *wireless*, apesar de a informação transmitida não justificar em si mesma necessidades particulares de segurança. Uma situação já bastante mais séria, está relacionada com uma eventual alteração dos sinais e da informação transmitida, quer seja feita de forma intencional quer seja feita de forma accidental. Este problema pode ser parcialmente superado usando protocolos de encriptação da informação a transmitir. O segundo aspecto a considerar é a protecção contra erros de transmissão.
- Interfaces e protocolos de transferência de informação – Antes de optar por qualquer tipo de tecnologia de transmissão, é necessário clarificar se os interfaces nos dois extremos do *link* de transmissão podem ser ligados aos serviços adjacentes e se os protocolos para a comunicação são compatíveis com as estruturas de dados.
- Acesso contínuo ao serviço – Para a eleição do serviço adequado, a definição de disponibilidade do serviço tem uma importância crucial.
- Aspectos legais e outros – Muitos aspectos legais devem ser tomados em consideração, de acordo com as hipóteses encaradas.

#### **4.4.1 *Wireless Fidelity* (Wi-Fi)**

*Wireless Fidelity* (Wi-Fi) consiste num conjunto de normas de compatibilidade de produtos para *Wireless Local Area Networks* (WLANs), baseadas nas especificações da norma IEEE 802.11 [27].

O Wi-Fi foi concebido para ser utilizado para dispositivos móveis e *Local Area Networks* (LANs), mas é agora utilizado para acesso à Internet. Permite a ligação a dispositivos *wireless* que estejam ao alcance de um ponto de acesso. A zona geográfica que se encontra coberta por um ou mais pontos de acesso é designada de *hotspot*.

Esta tecnologia compete actualmente com a tecnologia dos telefones celulares, sendo muito promissora, já que ao contrário dos telefones celulares que utilizam um espectro licenciado, o Wi-Fi é implementado em bandas não licenciadas [28].

As vantagens desta tecnologia assentam em:

- Utilizar espectro não licenciado;
- Permitir LANs sem utilizar cabos em zonas de difícil acesso;
- Usar um conjunto de normas globais, independentemente do país considerado;
- Facilitar a partilha de canal com outros serviços;
- Garantir a separação entre linha eléctrica e estrutura de comunicações;

No entanto, algumas preocupações comuns a soluções *wireless* (nomeadamente relacionadas com a segurança da comunicação) podem ser levantadas, bem como questões de interferência de sinais devido à utilização de espectro não licenciado.

#### **4.4.2 Redes Rádio Celulares (*Cellular Radio Networks*)**

No conjunto da comunicação através de redes rádio celulares, considera-se a tecnologia GSM (*Global System for Mobile Communication*), uma tecnologia móvel e o padrão mais popular para telefones celulares em todo o mundo [28]. O GSM diferencia-se de outras soluções uma vez que o sinal e os canais de voz são digitais, o que significa que o GSM é visto como um sistema de celular de segunda geração (2G).

Do ponto de vista do consumidor, uma grande vantagem do GSM é a existência de serviços novos com baixos custos, como por exemplo a troca de mensagens de texto (SMS – *Short Message Service*), que foi originalmente desenvolvida para o GSM.

Este sistema de SMS, no entanto, não parece ser adequado para comunicação numa micro-rede, não tanto pelo tempo de envio mas mais pela provável necessidade de realizar uma comunicação que implique a troca de várias mensagens consecutivas, originando ciclos do tipo pergunta/resposta.

Nas redes actuais de GSM, os canais de voz digitais oferecem a possibilidade de estabelecer ligações a 9600 b/s. Um problema está relacionado com o tempo necessário para estabelecer uma ligação, que pode ascender à dezena de segundos, dependendo da solução adoptada. Por outro lado, a fiabilidade dos sistemas GSM para transferência de informação diminui de forma acentuada com a distância. Assim, taxas baixas de transmissão devem ser escolhidas, o que perante as necessidades de comunicação não deverá ser um obstáculo.

Uma evolução na tecnologia GSM é o *General Packet Radio Service* (GPRS) que é um serviço móvel disponível aos utilizadores do GSM. É uma tecnologia intermédia entre a 2ª Geração (2G) e 3ª Geração (3G) que garante uma velocidade de transmissão de dados moderada. O GPRS está integrado nas normas definidas para o GSM. O GPRS permite que vários utilizadores partilhem o canal de comunicação só transmitindo quando tiveram informação para enviar, ao contrário de soluções antigas em que a banda era reservada sempre que se estabelecia uma comunicação e durante todo o ciclo da comunicação. Isto significa que a banda total reservada está sempre garantida para aqueles utilizadores que estão de facto a transmitir informação.

## 4.5 Conclusão

Neste capítulo foram apresentadas algumas soluções para o desenvolvimento de um estrutura de comunicações para micro-redes, destacando sobretudo aspectos problemáticos da utilização de cada uma das soluções propostas. Pela análise realizada, admite-se a viabilidade das soluções apresentadas, pelo que a escolha final dependerá de um número de factores que foram enunciados e discutidos. É crível que a estratégia a implementar passe não pela utilização de uma mas sim de várias das soluções apontadas, dependendo das condições disponíveis. Assim, parece adequada a utilização da PLC (ou eventualmente de uma solução utilizando a rede telefónica) para uma micro-rede localizada num ambiente tipicamente rural, pelas distâncias a vencer e pelo

custo de instalação de uma infra-estrutura própria de comunicações. Por outro lado, para uma micro-rede num ambiente mais “urbanizado” poderá optar-se por uma solução baseada na utilização da rede telefónica, combinada com uma solução *wireless* para controladores que estejam concentrados numa área geográfica mais restrita.

## Capítulo 5 – Controlo Secundário

### 5.1 Conceito Clássico

Um SEE é constituído por diversas unidades geradoras e cargas, cargas essas que variam continuamente ao longo do tempo com algum grau de previsibilidade. Para fazer face às mudanças maiores de carga, também mais lentas, torna-se necessário controlar centralmente a geração, decidindo a intervalos regulares, quais as unidades geradoras que vão estar a operar, as que vão estar desligadas e as que vão estar em nível de “reserva quente”. O escalonamento temporal de unidades geradoras é denominado na literatura anglo-saxónica de *unit commitment* devendo ser realizado num ciclo diário de forma a estabelecer o calendário de operação, enquanto que, em intervalos mais curtos, deve ser efectuado o despacho económico para determinar o nível real de geração com que cada grupo deve funcionar. As oscilações menores de carga, mas mais frequentes, são resolvidas pelo controlo primário local e pela mobilização de reserva secundária através do Controlo Automático de Geração (*Automatic Generation Control – AGC*) [29] de forma a:

- Manter a frequência no seu valor especificado (tipicamente os 50 Hz) – controlo de frequência;
- Manter os intercâmbios de potências com áreas de controlo vizinhas nos seus valores especificados – *tie-line control*;
- Manter a distribuição de potência entre as unidades geradoras de acordo com as necessidades de cada área – funções económicas, de segurança e de emergência.

Em alguns SEE, o AGC estará limitado a apenas um ou dois dos objectivos enunciados.

O AGC é um sistema de controlo hierárquico multi-nível com uma estrutura do tipo que pode ser vista na Fig. 23. O sistema de controlo de velocidade é o nível mais baixo de controlo – controlo primário e todos os comandos provenientes dos níveis superiores são executados a este nível. O controlo primário não está centralizado uma vez que está aplicado a unidades que se encontram bastante dispersas geograficamente. O controlo de frequência e o controlo de potência

nas interligações constituem o controlo secundário, que permite eliminar desvios, em regime permanente, de frequência e de potência nas interligações. Em sistemas isolados, o controlo secundário limita-se a controlo de frequência e pode ser implementado localmente sem a necessidade de passar por um controlador central. Em sistemas interligados, o controlo secundário de frequência e de controlo de potência nas interligações são implementados recorrendo a um computador central. O despacho económico pode ser considerado como um terceiro nível de controlo e a principal diferença que o distingue do controlo secundário é o tempo de resposta. No caso do controlo secundário, as referências de potência são dadas a cada poucos segundos enquanto que no caso do despacho económico este realiza-se a cada poucos minutos [29].

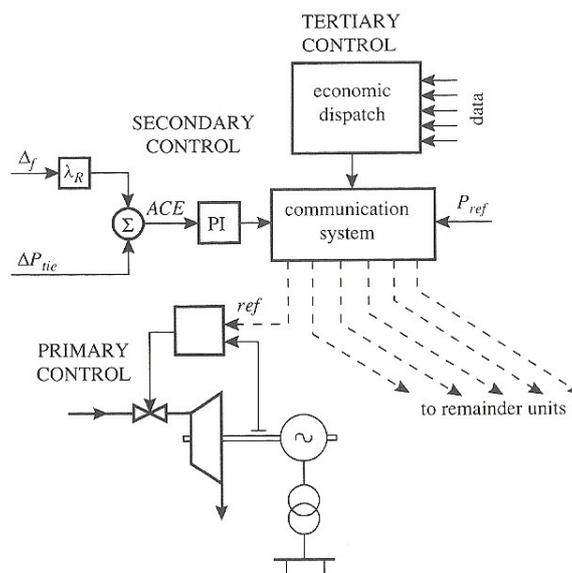


Fig. 23 – Níveis do Controlo Automático de Geração [29]

No que respeita à transmissão dos sinais de controlo do AGC, estes são enviados através de canais dedicados de comunicação, que são da responsabilidade dos operadores do sistema. Deve também estar previsto um mecanismo de *back-up* a esta comunicação. A infra-estrutura de comunicação deve ainda possuir redundância de forma a garantir tolerância a erros no caso de falha de comunicação [30].

A frequência no envio destes sinais de controlo varia de país para país, dependendo das variações de frequência permitidas, sendo típicos ciclos de cerca de 4 s (caso da América do Norte) [30]. No entanto, tempos mais elevados podem também ser admitidos, como sucede nos casos dos países nórdicos.

## 5.2 A Importância do Controlo Proporcional-Integral

A utilização unicamente de um controlo primário do tipo proporcional não garante que a frequência do sistema retorne ao valor nominal de 50 Hz, o que leva à necessidade de uma acção de controlo (do tipo integral) que permita a correcção do erro em regime permanente (*offset*) resultante de um desequilíbrio entre geração e carga.

Durante a operação em rede isolada (ilha), quando ocorre um desequilíbrio entre carga e geração, a frequência da rede desvia-se do seu valor nominal (neste caso, do valor de 50 Hz). Dado o modo de funcionamento dos dispositivos de armazenamento de energia e o seu controlo, estes continuariam a injectar potência na rede enquanto a frequência diferisse do valor nominal.

Um controlador PI (tendo como entrada o valor do desvio da frequência), actuando directamente sobre a máquina primária, permite a repor a frequência no seu valor nominal (negligenciando, nesse momento, as questões relacionadas com a exploração económica da rede...). Depois de a frequência ter sido reposta, os dispositivos de armazenamento voltam ao seu ponto “normal” de operação (isto é, não injectando potência activa).

A acção Proporcional-Integral aplicada directamente sobre as máquinas primárias é, assim, essencial para o funcionamento da micro-rede.

## 5.3 Controlo Secundário numa Micro-Rede

O controlo secundário reveste-se de uma importância extrema nomeadamente no que ao controlo de frequência diz respeito. Isto porque perante a acção unicamente do controlo primário (derivado dos controlos de velocidade implementados em cada micro-fonte), a reposição da frequência dá-se para um valor diferente do valor nominal, em função do desequilíbrio

produção/carga que se verifique num dado instante. Esse *offset* que ocorre deve ser corrigido por actuação do controlo secundário. O controlo secundário pode ser realizado de uma forma local (como sucede com o controlo primário) ou de uma forma centralizada.

Para realizar controlo secundário de uma forma local é necessário incluir uma malha PI no modelo. A malha de controlo encontra-se descrita na Fig. 24:

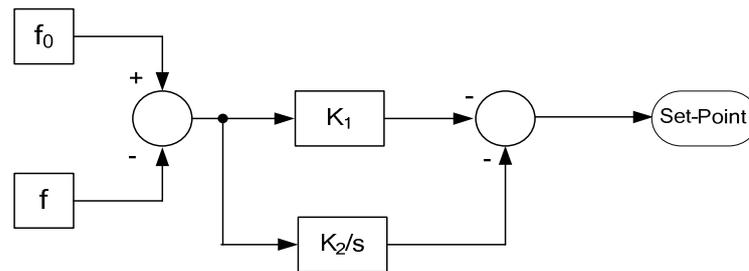


Fig. 24 – Controlo da potência activa em cada micro-fonte

Em que  $f_0$  é a frequência nominal (50 Hz),  $f$  é a frequência na micro-rede,  $K_1$  é o ganho proporcional e  $K_2$  é o ganho integral.

No entanto, considerando as características muito particulares do caso de uma micro-rede, o controlo de operação far-se-á do seguinte modo:

- Quando a micro-rede estiver a funcionar em modo interligado com a rede de MT, o controlo secundário operado pelo MGCC encontra-se desactivado. Neste caso, a rede de MT encarrega-se de compensar e reequilibrar a procura com a oferta;
- Quando a micro-rede estiver a operar em modo autónomo ou isolado, o controlo secundário é realizado de forma centralizada pelo MGCC.

O controlo secundário centralizado é activado após a reacção inicial dos controladores locais das micro-fontes (MCs) ao desequilíbrio geração/carga ocorrido, quer derivado do processo de *islanding* da micro-rede, quer derivado de ligação/desligação de cargas e/ou de micro-geradores. Quer isto dizer que se espera a estabilização da frequência após a acção dos reguladores de velocidade das micro-fontes para se proceder à reposição da frequência no seu valor nominal de 50 Hz por acção do controlo secundário.

Uma vez que na micro-rede existem micro-geradores, como o gerador eólico ou o painel PV, que são alimentados por fontes primárias caracterizadas por uma forte inconstância, é necessário tomar algumas precauções de forma a evitar a acção desnecessária do sistema de controlo de frequência. Isto sucede por acções sucessivas do sistema de controlo face a pequenas variações (desprezáveis) na frequência que dispensam acções de correcção, o que só serviria para “desgastar” as micro-fontes e os seus sistemas de controlo. Pretende-se assim a inserção de um parâmetro de insensibilidade no controlo secundário, de modo que, se o desvio de frequência for superior a um dado valor mínimo, o controlo integral entra em acção, caso contrário, fica inactivo.

### **5.3.1 Implementação do Controlo Secundário Centralizado**

O controlo de geração pode ser feito de uma forma automática e, considerando o caso de operação de uma micro-rede, tem fundamentalmente dois objectivos principais:

1. Manter a frequência no ou muito cerca do seu valor nominal (neste caso, os 50 Hz);
2. Manter cada unidade de geração a operar no seu valor mais económico.

É necessário notar que, para o problema de uma micro-rede, de acordo com os pressupostos que foram feitos, não se pensa em controlo de potência nas interligações, uma vez que é considerada a existência de apenas uma área de controlo principal.

Num conceito mais evoluído de multi micro-redes, poderia então fazer sentido considerar a existência de um módulo de controlo da potência trocada nas interligações das áreas de controlo correspondentes a cada micro-rede.

A função de controlo secundário centralizado estará embebida no MGCC, sendo uma de entre vários módulos de controlo e gestão de rede disponíveis.

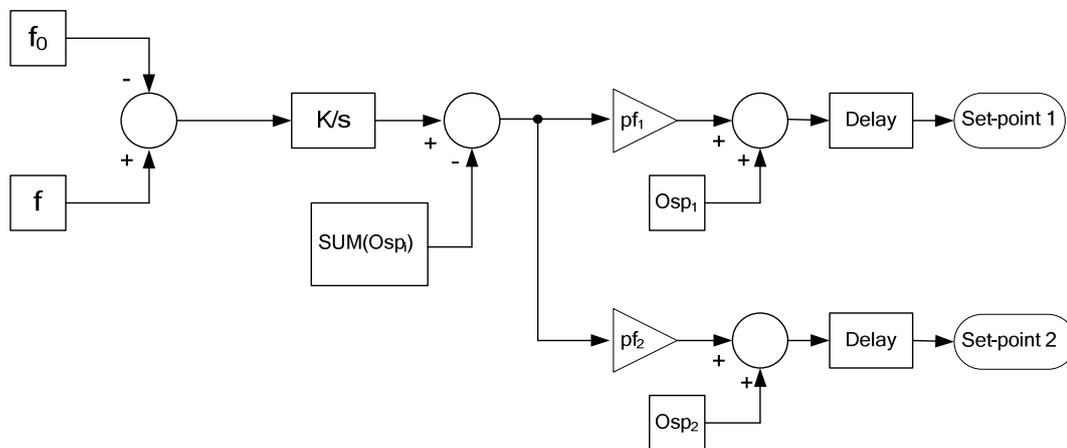
Assim, no que respeita ao módulo de controlo secundário centralizado, o MGCC opera de forma semelhante a um sistema AGC convencional. Como tal, existe uma multiplicidade de módulos que podem, ou não, ser nele incluídos, dependendo do funcionamento pretendido, da simplicidade/complexidade que se queira para o modelo, etc.

De uma forma bastante simplista, o funcionamento deste módulo do MGCC no que respeita ao controlo de geração exige uma localização central onde grande parte da informação do sistema é concentrada recorrendo a tele-medição. Diversas acções de controlo são determinadas num processador central e transmitidas às unidades de geração através dos mesmos canais usados na telemetria. Para ser possível implementar um esquema de controlo deste género é necessário dispor da seguinte informação no centro de controlo:

- Produção em Potência Activa de cada unidade de geração envolvida em tarefas de controlo e respectivos limites técnicos;
- Frequência do sistema.

O resultado da execução do controlo de geração deve ser posteriormente transmitido a cada uma das unidades geradoras.

O esquema da funcionalidade de controlo secundário no MGCC é apresentado na Fig. 25, para duas unidades envolvidas na regulação:



**Fig. 25 – Esquema do funcionamento do controlo secundário no MGCC**

Em que  $f_0$  é a frequência nominal (50 Hz),  $f$  é a frequência verificada na micro-rede,  $K$  é o ganho integral,  $O_{spi}$  é o ponto de funcionamento mais económico da micro-fonte e  $pf_i$  é o factor de participação da micro-fonte  $i$  (definido adiante).

O modelo do módulo de controlo secundário no MGCC inclui um atraso (bloco *Delay* na Fig. 25). Num sistema de comunicações, os atrasos podem ocorrer em dois casos: na transmissão do sinal de controlo do MGCC para os controladores locais e no envio da telemetria dos controladores locais para o controlador central. Uma vez que a análise é idêntica para os dois casos (admitindo que se espera a chegada da informação de telemetria para depois enviar os sinais de controlo aos controladores locais), o modelo agrega estes dois atrasos num único.

Uma vez que existe mais que uma unidade responsável pelo controlo de frequência, torna-se necessário introduzir factores de participação de forma a evitar falta de coordenação entre as unidades geradoras.

Considerando que é possível definir uma função-custo de cada unidade geradora ( $F_i$ ) e que é ainda possível obter a sua primeira e segunda derivadas ( $F'_i$  e  $F''_i$ ), os factores de participação ( $pf$ ) são calculados usando a seguinte expressão [31]:

$$pf = \frac{\left(\frac{1}{F''_i}\right)}{\sum_i \left(\frac{1}{F''_i}\right)}$$

Neste caso, as duas unidades geradoras recebem um *set-point* que determina o aumento ou diminuição dos níveis de geração da respectiva unidade.

Encontram-se descritas em [32] e [33] várias estratégias de controlo alternativas, considerando o funcionamento actual dos SEEs.

A estratégia de controlo implementada é similar à versão de *Pluralistic LFC* (controlo pluralístico de frequência) apresentado em [32]. Este esquema permite maior flexibilidade para efectuar a regulação de várias áreas de controlo (que podem corresponder a várias micro-redes), regulação que seria implementada de forma descentralizada para cada área de controlo.

Uma primeira aproximação à implementação de um esquema de controlo secundário de frequência para micro-redes pode encontrar-se em [34] (trabalho realizado no âmbito desta dissertação e do projecto *MicroGrids*).

## **5.4 Conclusão**

Neste capítulo foram apresentadas as duas estratégias consideradas para funções de controlo secundário: controlo secundário local e controlo secundário centralizado, embebido num módulo do MGCC. Neste sentido, foi explicado o conceito clássico de controlo secundário e feita a transposição deste conceito para o caso de uma micro-rede, detalhando as diferenças necessárias. Foi ainda sublinhada a necessidade de um mecanismo eficiente que promova o controlo secundário.

As simulações dinâmicas que permitem avaliar o desempenho das duas estratégias de controlo secundário para micro-redes são apresentadas no Capítulo 8.

## Capítulo 6 – Protecção da Micro-Rede contra Curto-Circuitos

Uma micro-rede está sujeita aos mesmos requisitos de segurança e estabilidade que qualquer outro SEE. A protecção numa micro-rede deve permitir superar defeitos externos (que ocorram na rede de MT) e internos (que surjam na rede de BT, *i.e.*, dentro da própria micro-rede).

Se ocorrer um defeito na rede principal de MT, a resposta desejável será o isolamento bem sucedido da micro-rede, que passará a funcionar de forma autónoma, o mais rapidamente possível, de modo a não afectar a sua estabilidade.

Se o defeito ocorrer no interior da micro-rede, o sistema de protecção deve isolar apenas a menor zona possível envolvente ao defeito, de forma a eliminá-lo.

Um dos principais problemas na detecção de defeitos em micro-redes tem que ver com as baixas correntes de defeito presentes na micro-rede, por causa da presença maciça de inversores neste tipo de SEE. Em casos extremos, a corrente de defeito poderá ser apenas duas vezes o valor nominal da corrente, ou ainda menor [35], o que leva a que algumas protecções de sobreintensidade nem sequer actuem. Além disso, as protecções de mínimo de tensão e de mínimo de frequência podem também não actuar devidamente devido à resposta do sistema de controlo de tensão e de frequência da micro-rede.

As características muito particulares de uma micro-rede fazem com que seja necessário desenvolver protecções especificamente adaptadas a este tipo de sistema. Uma hipótese poderá ser o desenvolvimento de um mecanismo de localização de defeitos que opere em tempo real, se bem que tal sistema terá necessariamente custos extremamente elevados, de forma a garantir a comunicação entre os vários dispositivos de protecção presentes na rede. Soluções mais básicas e potencialmente mais económicas consistem em utilizar protecções de distância e protecções diferenciais [35]. Além disso, sendo possível garantir junto da *flywheel*, por intermédio do inversor acoplado, uma corrente de defeito de cerca de 3 a 5 vezes a sua corrente nominal, torna-se neste caso viável recorrer a uma protecção de sobreintensidade [35]. Por outro lado, questões relacionadas com a selectividade das protecções podem originar tempos de detecção de defeitos extremamente elevados, pondo em causa a estabilidade da micro-rede aquando da passagem para funcionamento em rede isolada. Neste sentido, torna-se interessante recorrer a uma protecção de actuação rápida, como a protecção de distância, para a rede principal. De recordar que a

protecção de distância se baseia na impedância medida por um relé de distância de forma a detectar defeitos na rede. Basicamente, este relé compara a corrente de defeito com a tensão nos terminais do relé, calculando assim a impedância entre o relé e o ponto de ocorrência do defeito.

## 6.1 Protecção da Micro-Rede

Num SEE tradicional, os sistemas de protecção são concebidos tendo em consideração fluxos de potência unidireccionais e são baseados, na maior parte dos casos, em protecção de sobreintensidades. Para uma qualquer situação de defeito, a PD ligada ao sistema principal é desligada. Por outras palavras, a operação em rede isolada de fontes de PD não é permitida.

Como já foi referido, uma vez que o *islanding* não só não é permitido em SEEs tradicionais como também é uma situação que se tenta evitar a todo o custo, são utilizadas várias protecções que asseguram o *anti-islanding*. Um dos argumentos fundamentais para a utilização deste tipo de dispositivos de protecção está relacionado com a segurança de pessoas, de forma a evitar o contacto com zonas que continuam a ser alimentadas por fontes dispersas de energia. Neste sentido, para evitar re-engates mal sucedidos, de forma automática e dessincronizada, toda a PD é desligada perante a ocorrência de um defeito, sendo o processo de religação feito em segurança, tomando as precauções necessárias. Estas protecções *anti-islanding* podem ser protecções indirectas baseadas na tensão (mínimo de tensão, máximo de tensão homopolar) ou baseadas na frequência (mínimo de frequência, com base na taxa de variação de frequência (*Rate Of Change Of Frequency* – ROCOF)).

Uma micro-rede é um sistema concebido para operar quer em modo interligado com a rede principal, quer em modo autónomo de funcionamento. A existência destes dois modos de funcionamento traz grandes desafios ao funcionamento da micro-rede, em termos de protecção da mesma. Como já foi referido atrás, principalmente quando em modo isolado não é normal nem fácil obter correntes de defeito na micro-rede suficientemente elevadas para garantir a acção de dispositivos de protecção por sobreintensidade. Neste sentido, torna-se crucial o desenvolvimento de sistemas de protecção alternativos aos convencionais, e adequados ao caso das micro-redes.

A protecção de uma micro-rede deve obedecer aos seguintes critérios chave, como sucede numa rede convencional:

- Fiabilidade;
- Selectividade;
- Velocidade de actuação da protecção;
- Custo.

Obviamente, torna-se impossível, na prática, satisfazer todos estes requisitos em simultâneo. Torna-se, então, necessário estabelecer um compromisso para obter um desempenho óptimo da protecção de micro-redes.

Assim, um sistema de protecção ideal para uma micro-rede deve ser portador das seguintes características:

- O sistema de protecção deve actuar para defeitos na rede principal de distribuição e para defeitos internos, na própria micro-rede;
- Perante um defeito na rede principal, deve ser possível isolar a micro-rede de forma mais rápida possível;
- Perante um defeito no interior da própria micro-rede, deve ser isolada a menor porção possível da rede, de forma a eliminar o defeito, no menor intervalo de tempo possível.

## **6.2 Controlo dos Inversores face a Sobrecargas Transitórias e Defeitos**

Podem verificar-se sobreintensidades nos inversores devido a duas causas distintas: decorrentes de sobrecargas transitórias (resultantes de uma ligação de uma quantidade significativa de carga quando a micro-rede opera em rede isolada) ou decorrentes da ocorrência de curto-circuitos.

No primeiro caso, na transição para funcionamento em rede isolada ou quando uma grande porção de carga é ligada à micro-rede em operação em rede isolada, verifica-se um desequilíbrio inicial elevado entre geração e consumo que pode levar a grandes desvios na frequência do sistema e à sobrecarga dos VSIs presentes na rede, uma vez que estas unidades têm uma actuação

extremamente rápida face a este tipo de situações. De forma a evitar os problemas decorrentes destas situações, foram adoptadas para a micro-rede as seguintes medidas:

- Garantir um sobredimensionamento do VSI e permitir sobrecargas durante um curto intervalo de tempo (mais elevado que o tempo de actuação dos relés de deslastre frequencimétrico, pelo menos).
- Permitir uma desligação temporária de cargas não-essenciais (deslastre de carga activado por relés frequencimétricos);

Por outro lado, os SEE convencionais que incluem máquinas síncronas directamente ligadas à rede são capazes de originar correntes de defeito elevadas, o que possibilita a detecção e posterior eliminação do defeito. No entanto, como já foi visto, numa micro-rede a interface dos geradores à rede é feita através de dispositivos de electrónica de potência, pelo que é difícil obter correntes de defeito de uma magnitude elevada devido às características destes dispositivos. No entanto, o sistema pode passar com alguma segurança por situações de defeito se se verificar um sobredimensionamento adequado dos dispositivos de conversão de energia. Deste modo, e como já foi referido, torna-se necessário sobredimensionar o VSI de modo a garantir uma contribuição significativa da corrente de curto-circuito (que pode ir de 3 a 5 vezes a corrente nominal) para correcta actuação das protecções de sobreintensidade. No que respeita aos inversores do tipo PQ, estes somente garantem uma corrente de curto-circuito da ordem de 1.5 vezes a corrente nominal.

O inversor PQ possui um esquema de controlo que possibilita controlar a corrente de saída do inversor durante a ocorrência do curto-circuito. Durante o curto-circuito, a tensão nos terminais do inversor cai e origina uma redução na potência fornecida pelo inversor. Consequentemente, a tensão no *link* DC aumenta e o controlo proporcional-integral presente no inversor vai forçar o aumento da potência fornecida. Desta forma, limitando o ganho deste controlador PI torna-se possível limitar a corrente de curto-circuito. A adopção desta filosofia de controlo pretende reduzir o impacte de fenómenos transitórios de variação de potência activa na fonte primária.

No que respeita ao VSI, a corrente de saída deste tende a ser extremamente elevada, uma vez que opera como uma fonte de tensão, de um modo similar ao que se verifica para uma máquina síncrona convencional. Para que se torne possível limitar a corrente, utiliza-se um

mecanismo de controlo semelhante ao apresentado para o inversor PQ na Secção 3.1. A principal diferença reside no facto de a corrente de referência ter um pico máximo dependente das características do próprio inversor e da frequência ser determinada com base num *droop* de frequência/potência activa. Assim, a corrente de saída é continuamente monitorizada e sempre que o seu valor exceder o valor limite a estratégia de controlo passa a modo de fonte de corrente. Após a ocorrência do curto-circuito, o VSI regressa ao modo de operação como fonte de tensão controlada.

A aplicação prática deste conceito é embebida no sistema de controlo do inversor e realizada como se descreve em seguida:

- Se a corrente no inversor ultrapassar um valor pré-definido (tipicamente 375 A), é realizado o controlo da tensão de modo a limitar a corrente (modo fonte controlada de corrente);
- Após a eliminação do defeito, a tensão regressa para perto do seu valor nominal e ao passar acima de um valor pré-definido (tipicamente 300 V) o inversor volta ao seu modo natural (modo fonte controlada de tensão).

O comportamento dinâmico das cargas do tipo motor e dos geradores assíncronos durante e após a ocorrência do defeito depende bastante do impacte causado pela magnitude das correntes elevadas no VSI e do intervalo de tempo durante o qual essas correntes são admitidas. A existência de um VSI acoplado a um dispositivo de armazenamento de energia (como uma *flywheel*) é requisito fundamental para um adequado funcionamento em rede isolada. Deste modo, torna-se extremamente importante um correcto dimensionamento destes dispositivos.

### **6.3 Defeitos na Rede de Média Tensão**

Face à ocorrência de um defeito do tipo de um curto-circuito trifásico simétrico na rede de MT a montante que se encontra electricamente ligada à micro-rede, a micro-rede deve passar para uma situação de funcionamento em rede isolada. Esta passagem é realizada assim que o defeito é detectado e as respectivas protecções actuem de forma bem sucedida, sendo que esse isolamento deve ser realizado o mais rápido possível de modo a não comprometer o bom funcionamento da

micro-rede. Este curto-circuito, apesar de a sua ocorrência ser extremamente rara, é o que traz consequências mais severas ao sistema.

Nesta situação, devem ser instaladas protecções de sobreintensidade junto ao Posto de Transformação que serve de interface entre a rede de MT e a micro-rede, possibilitando o isolamento desta última. Para possibilitar a manutenção da estabilidade da micro-rede, poderá recorrer-se à utilização de protecções diferenciais na rede de MT garantindo uma actuação rápida e selectividade de actuação. Este tipo de protecções implica a existência de um sistema de comunicações entre os dois terminais do sistema de protecção, com o consequente aumento no custo global.

O tempo estimado para uma eliminação efectiva deste tipo de defeito (originando o *islanding* da micro-rede) deve ser extremamente reduzido.

De facto, no corrente estado da investigação, verificou-se ser possível obter um tempo de eliminação de defeito da ordem de 7 milésimos de segundo [36].

Pelas simulações realizadas é possível observar que, perante um tempo de isolamento da micro-rede tão baixo, esta não chega a sentir verdadeiramente os efeitos de um curto-circuito na rede de MT, caso exista um quase-equilíbrio entre geração e consumo. A estabilidade da micro-rede não é, então, afectada pela existência de curto-circuitos na rede de MT a montante, considerando este tempo de eliminação do defeito. A estabilidade da micro-rede só é verdadeiramente afectada pelo *islanding* forçado caso seja elevado o desnível que se verifique entre geração e consumo.

No entanto, importa analisar de forma exaustiva a resposta dinâmica da micro-rede, avaliando o comportamento dinâmico da rede para diversos valores do tempo de eliminação do defeito, de forma a permitir a identificação do tempo máximo admissível para eliminação deste defeito sem pôr em causa a estabilidade da micro-rede.

## **6.4 Defeitos na Rede de Baixa Tensão**

A ocorrência de um defeito do tipo de um curto-circuito trifásico simétrico na própria micro-rede necessita também de ser analisada.

No caso de um curto-circuito no interior da micro-rede, torna-se necessário uma detecção extremamente expedita da sua ocorrência, garantindo o isolamento da menor porção de rede possível, de forma a isolar rapidamente o defeito.

Este defeito pode surgir em duas situações distintas:

- Quando a micro-rede se encontra electricamente ligada à rede a montante de MT;
- Quando a micro-rede se encontra em funcionamento em rede isolada.

Em qualquer dos casos, o isolamento do curto-circuito pode ser conseguido através do uso de protecções de sobreintensidade ou protecções baseadas na corrente residual, de modo a não alimentar o defeito. O inversor a alimentar a *flywheel* deverá ser configurado de modo a fornecer uma corrente de defeito elevada (cerca de 3 vezes a sua corrente nominal, ou mais) se a micro-rede estiver a ser operada em rede isolada já que, normalmente, as correntes de defeito não serão muito elevadas. Após a ocorrência do curto-circuito, o sistema de protecção deve assegurar que sejam desligados simultaneamente o alimentador onde ocorreu o defeito, bem como todas as micro-fontes ligadas a esse alimentador.

Obviamente, no último caso referido, as consequências prevêm-se gravosas uma vez que a micro-rede a funcionar em modo isolado é extremamente sensível a variações de carga e geração, pelo que a ocorrência de um defeito do tipo curto-circuito interno poderá implicar a perda da estabilidade da micro-rede.

## 6.5 Conclusão

Neste capítulo foi realçado que a segurança de operação e a fiabilidade de uma micro-rede são questões extremamente importantes, perante um crescente penetração de PD em redes de distribuição. A natureza muito particular de uma micro-rede requer que o sistema de protecção utilizado seja eficiente não só em condições de modo interligado com a rede de distribuição de MT como, em particular, em modo de emergência, funcionando em sistema isolado. Neste contexto, o comportamento dos conversores electrónicos presentes em muitas micro-fontes neste

tipo de redes levanta algumas dificuldades ao sistema de protecção e o seu impacte deve ser cuidadosamente avaliado.

Mostrou-se que, para fazer face a um curto-circuito ocorrida na rede de distribuição a montante, se devem utilizar relés de sobreintensidade que permitam o isolamento da micro-rede do sistema principal. Esta acção deve ser complementada com a utilização de protecção de actuação rápida do tipo diferencial, de forma a ajudar na manutenção da estabilidade da micro-rede. Foi ainda visto que em caso de ocorrência de um curto-circuito no interior da própria micro-rede, podem ser usadas protecções de sobreintensidade e deve ser garantido que a *flywheel* forneça uma corrente de defeito suficientemente elevada (por exemplo de três vezes a sua corrente nominal). O sistema de protecção instalado deve também possibilitar a interrupção de todas as micro-fontes da micro-rede. Podem ser incluídos atrasos entre a actuação de diversas protecções de forma a garantir a selectividade.

As simulações dinâmicas que permitem avaliar o desempenho da micro-rede em condições de defeito e a actuação do sistema de protecção da micro-rede são apresentadas no Capítulo 8.

## Capítulo 7 – Plataforma de Simulação

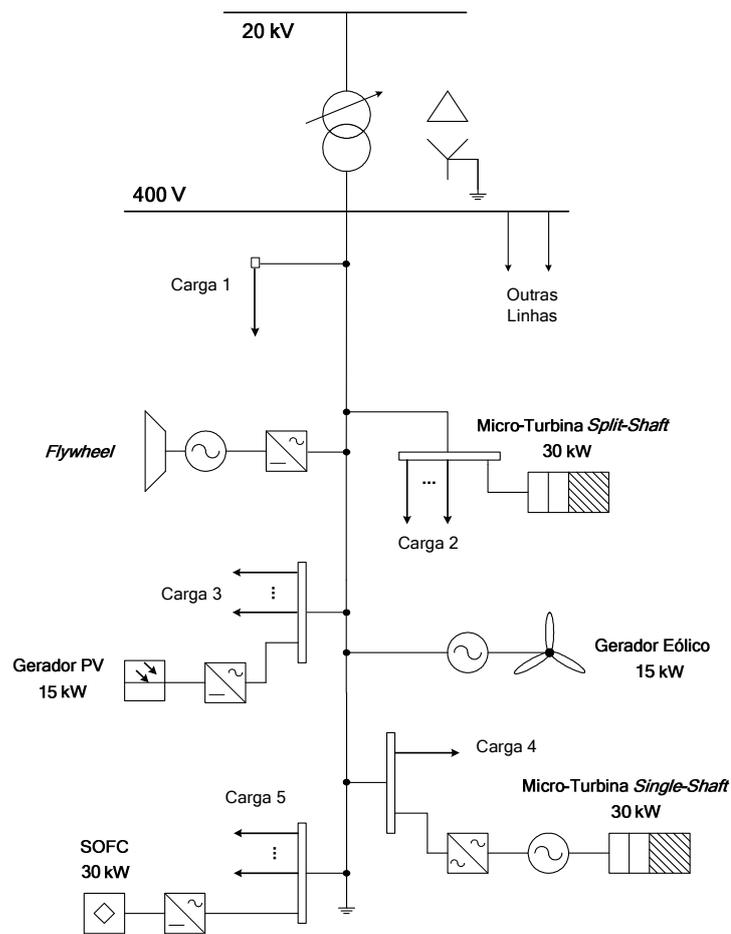
As consequências de uma integração progressiva de micro-geração em redes de BT devem ser cuidadosamente estudadas uma vez que o comportamento dos equipamentos electrónicos para conversão de energia é ainda hoje uma questão extremamente delicada.

Nesse sentido, é necessário desenvolver plataformas de simulação versáteis que permitam uma análise das características do comportamento dinâmico evidenciado por esse tipo de redes.

Foram desenvolvidos modelos das diferentes micro-fontes e dispositivos de armazenamento de energia, com particular atenção dispensada aos conversores electrónicos (apresentados no Capítulo 3) representados por fontes de corrente e de tensão trifásicas, e foi feita a respectiva transposição para o ambiente de simulação em ambiente *Matlab® Simulink®*.

A plataforma de simulação foi inicialmente desenvolvida por Nuno Gil [20]. Esta plataforma foi adaptada nesta dissertação, adicionando novos modelos, alterando métodos de controlo e incluindo um novo rol de funcionalidades. Uma das principais diferenças tem que ver com o tipo de modelo global adoptado. A plataforma de simulação original era baseada num modelo de barramento único. Uma vez que este modelo não permitia explorar na totalidade o comportamento de uma micro-rede, alterou-se o modelo global de forma a incorporar as características de uma rede-teste.

A rede-teste utilizada foi desenvolvida pela Universidade Técnica de Atenas – NTUA e pode ser vista na Fig. 26. Os dados da rede-teste são apresentados em anexo e estão disponíveis em [37]. Esta micro-rede contém as seguintes micro-fontes: uma pilha de combustível de óxidos sólidos (SOFC) de 30 kW de potência nominal, uma micro-turbina *split-shaft* de 30 kW de potência nominal, uma micro-turbina *single-shaft* também de 30 kW de potência nominal, um pequeno gerador eólico de 15 kW de potência nominal e um gerador foto-voltaico (PV) de 13 kW de potência nominal; contém ainda uma *flywheel* de 30 kW de potência nominal e cargas do tipo de impedância constante e do tipo motor. Esta rede-teste foi transposta para a plataforma de simulação em ambiente *Matlab® Simulink®*.



**Fig. 26 – Rede-teste base**

Os conceitos de controlo secundário local e de controlo secundário centralizado apresentados no Capítulo 5 foram também transpostos para a plataforma de simulação dinâmica. Na figura seguinte apresenta-se a implementação do mecanismo de controlo secundário local.

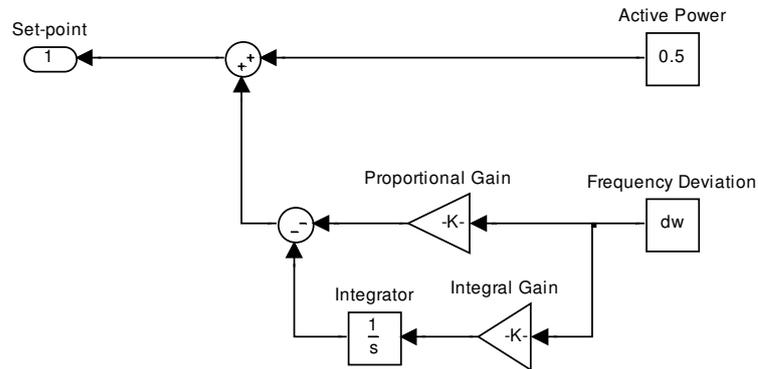


Fig. 27 – Implementação do controlo secundário local em ambiente *Matlab® Simulink®*

Apresenta-se na Fig. 28 o menu desenvolvido para alteração dos parâmetros da função de controlo secundário centralizado do MGCC.

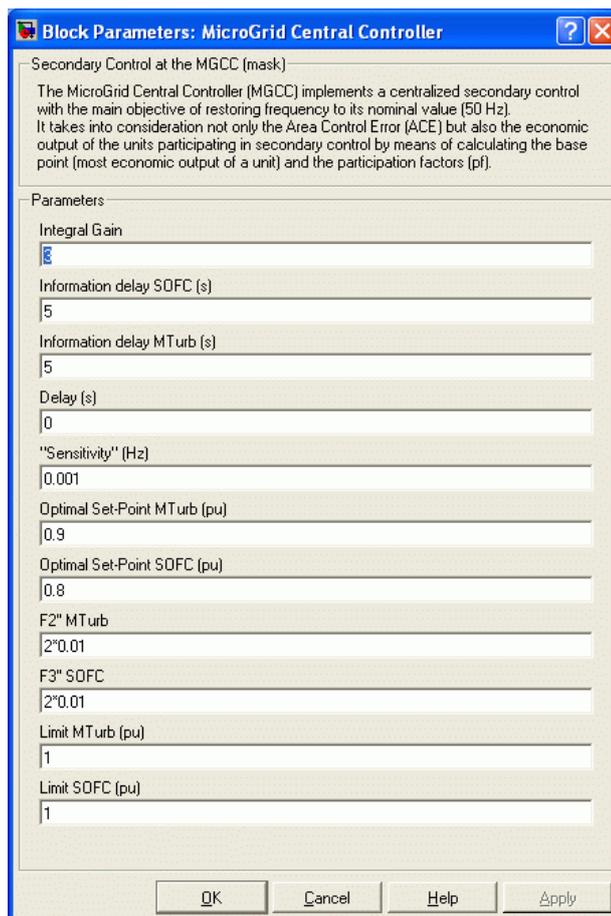


Fig. 28 – Menu de parâmetros da função de controlo secundário centralizado embebida no MGCC

Os parâmetros disponíveis para edição são:

Integral Gain – Ganho Integral;

Information Delay SOFC (s) – Atraso no envio de informação para a SOFC;

Information Delay MTurb (s) – Atraso no envio de informação para a micro-turbina *single-shaft*;

Delay (s) – Inibe a acção do controlo secundário centralizado durante um determinado intervalo de tempo;

Sensitivity (Hz) – Valor mínimo de desvio de frequência que inibe a acção do controlo secundário centralizado;

Optimal Set-Point MTurb (p.u.) – *Set-point* óptimo para a micro-turbina *single-shaft*;

Optimal Set-Point SOFC (p.u.) – *Set-point* óptimo para a SOFC;

F2'' MTurb – Segunda derivada da função-custo da micro-turbina *single-shaft*;

F3'' SOFC – Segunda derivada da função-custo da SOFC;

Limit MTurb (p.u.) – Potência activa máxima permitida pela micro-turbina *single-shaft*;

Limit SOFC (p.u.) – Potência activa máxima permitida pela SOFC.

Na Fig. 29 apresenta-se a implementação do mecanismo de controlo secundário centralizado.

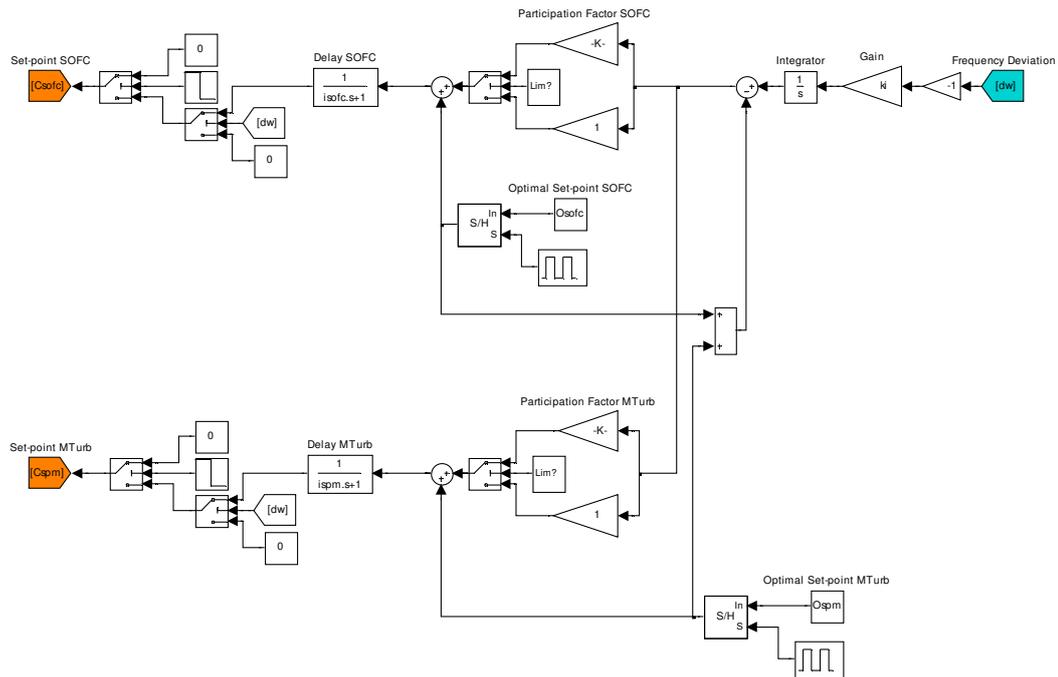


Fig. 29 – Implementação do controlo secundário centralizado em ambiente *Matlab® Simulink®*

A filosofia de protecção implementada na plataforma de simulação utilizada é baseada na utilização de interruptores trifásicos para simular o funcionamento dos sistemas de protecção. Na Fig. 30 pode ver-se o menu com os parâmetros do curto-circuito e da actuação da protecção e na Fig. 31 mostra-se a implementação deste mecanismo.

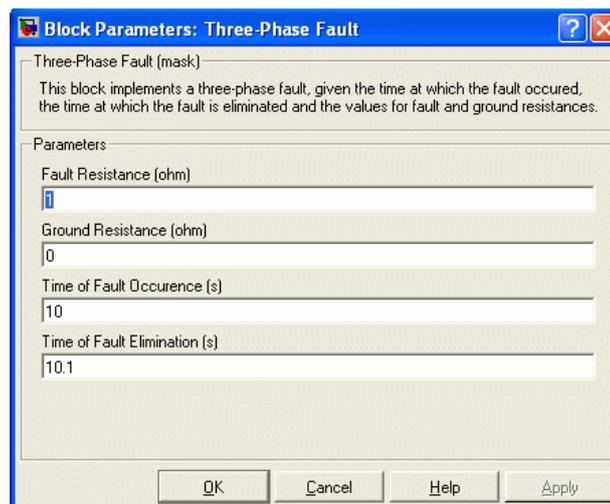


Fig. 30 – Menu de parâmetros da função de curto-circuito e de protecção da micro-rede

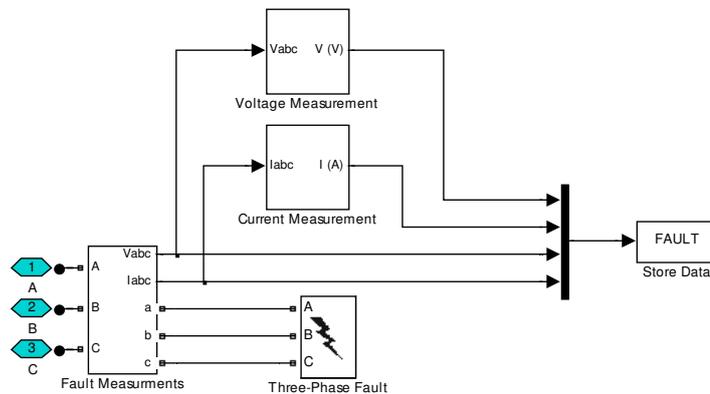
Os parâmetros disponíveis para edição são:

Fault Resistance (ohm) – Resistência do defeito;

Ground Resistance (ohm) – Resistência da terra;

Time of Fault Occurrence (s) – Tempo a que ocorre o defeito;

Time of Fault Elimination (s) – Tempo a que o defeito é eliminado.



**Fig. 31 – Implementação do curto-circuito e do mecanismo de protecção da micro-rede em ambiente *Matlab*® *Simulink*®**

A rede-teste, os modelos de micro-fontes, dispositivos de armazenamento de energia e conversores foram incluídos na plataforma de simulação desenvolvida em ambiente *Matlab*® *Simulink*®. Na Fig. 32 apresenta-se a plataforma de simulação global em *Matlab*® *Simulink*®.

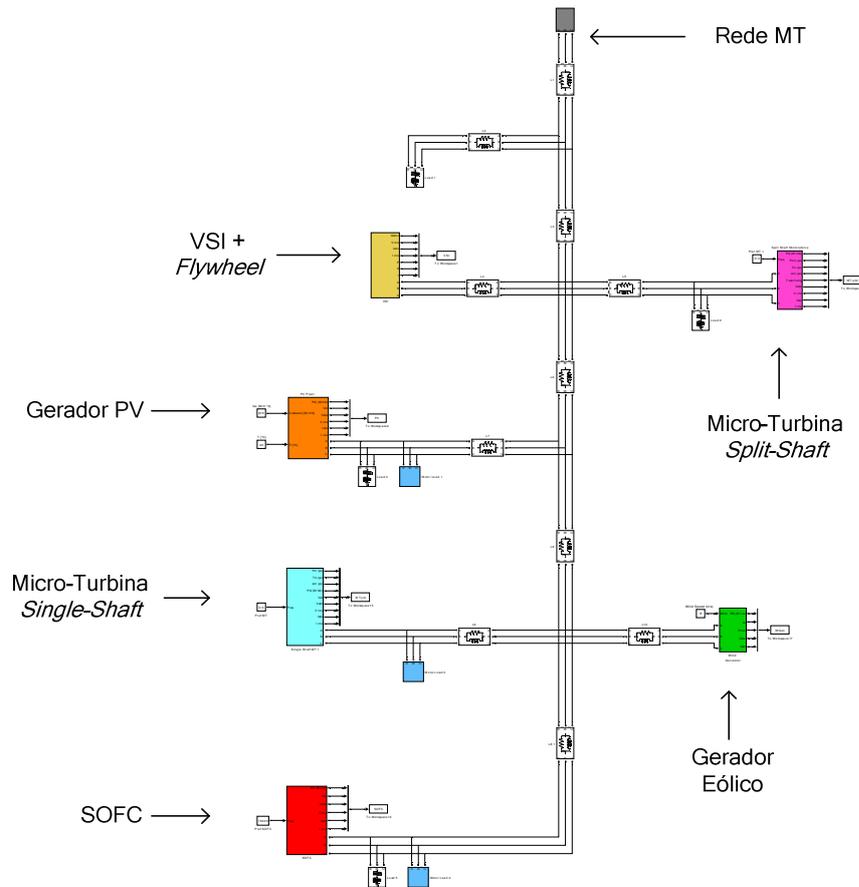


Fig. 32 – Plataforma de simulação base em ambiente *Matlab® Simulink®*

## 7.1 Método de Resolução

Matematicamente, o problema a resolver é descrito por um sistema misto de equações diferenciais ordinárias (*Ordinary Differential Equations – ODE*) e de equações algébricas (*Algebraic Equations – AE*) do tipo:

$$\begin{cases} f_k(y_1', \dots, y_n', y_1, \dots, y_n, t) = 0 \\ g_h(y_1, \dots, y_n, t) = 0 \end{cases}$$

Com  $k=1, \dots, n_d$  e  $h=1, \dots, n_a$  e  $n_d + n_a = n$ , em que  $n$  é o número de incógnitas (e de equações) do sistema.

A resolução do sistema algébrico-diferencial é, portanto, o problema central da simulação.

Dada a não linearidade de  $f_k$  e de  $g_h$  torna-se necessário obter uma solução por via numérica, em vez de por via analítica. A parte fulcral da resolução deste problema reside, naturalmente, na parte diferencial do sistema,  $f_k(y_1', \dots, y_n', y_1, \dots, y_n, t) = 0$ , uma vez que a parte algébrica,  $g_h(y_1, \dots, y_n, t) = 0$ , pode ser resolvida rapidamente, usando pequenos passos temporais, mediante um algoritmo iterativo do tipo Newton-Raphson, por exemplo.

Assim, o problema prático da resolução das equações diferenciais ordinárias começa na escolha de um dos vários algoritmos numéricos disponíveis no *Matlab*®, que seja adequado ao problema concreto. Neste sentido, existe a necessidade de possuir alguma informação prévia sobre a natureza matemática e física do problema em análise.

Neste caso, o sistema apresenta um grau relativamente elevado de rigidez (*stiffness*). Esta designação refere-se a um tipo particular de dificuldade (em termos de precisão e rapidez de cálculo) na resolução de sistemas diferenciais cujas equações que descrevem o comportamento dos vários constituintes do sistema têm características distintas, como tempos de resposta muito diferentes, isto é, com modos próprios com frequências de oscilação significativamente diferentes.

Assim, torna-se necessário optar por um método de integração numérico do tipo “passo variável”, dada a diferença de resposta dos diferentes componentes. Isto conduz a que a resposta do sistema tenha diferentes dinâmicas (ou seja, velocidades de variação das variáveis de estado) ao longo do tempo, face a perturbações ou alterações de parâmetros. Neste sentido, um método baseado em passo variável permite reduzir o tamanho do passo sempre que os estados do sistema se alterem rapidamente, de forma a manter a precisão, e aumentar o tamanho do passo sempre que os estados do sistema estejam a variar de uma forma mais lenta.

Em segundo lugar, há que considerar que, mesmo dentro dos métodos de passo variável, existem diversos tipos, mais ou menos adaptados à rigidez particular de cada sistema, que procuram minimizar o tempo de cálculo.

A utilização de métodos implícitos permite, em princípio, ultrapassar algumas das dificuldades criadas por este tipo de sistemas. O *Matlab*® Versão 7.0 inclui um conjunto de *solvers* de ODEs deste tipo [38], desde soluções mais clássicas baseadas no método de Runge-Kutta a integradores mais sofisticados e complexos.

É interessante mencionar o facto de, antes da tomada de uma decisão final, terem sido testados outros métodos de integração numérica, nomeadamente o ODE15s, que é um método baseado nas fórmulas de derivação numérica multipasso e que é indicado para obter precisão elevada em sistemas rígidos. No entanto, o ODE23tb foi aquele que se mostrou mais eficiente, sobretudo nos instantes iniciais de procura do estado estacionário do modelo. Este método é uma implementação específica em *Matlab*® de um método de Runge-Kutta com um primeiro passo dado pelo método de Simpson (“regra dos trapézios”) e um segundo por uma fórmula de derivação regressiva de segunda ordem (TR-BDF2 – *Trapezoidal Rule - Backward Differentiation Formula, Order 2*) [38].

Perante todo o conjunto de comportamentos observados, foi considerado que a utilização de um método baseado em passo variável seria o mais indicado. Assim, acabou por ser escolhido o método designado por ODE23tb. É ainda importante salientar que esta não deve ser tomada como uma opção definitiva, visto que, a escolha de um método depende da informação disponível sobre as propriedades do sistema a estudar, sendo esta muitas vezes proveniente da própria prática de simulação.

## 7.2 Processo de Simulação

No que respeita ao tempo e processo de simulação, descrevem-se em seguida algumas das principais dificuldades encontradas ao longo do trabalho nesta dissertação.

A simulação utilizando esta ferramenta de simulação apresenta várias dificuldades nomeadamente em termos de implementação. O primeiro problema encontrado está relacionado com o facto de não ser possível estabelecer condições iniciais para os modelos dinâmicos dos vários componentes modelizados. Assim, torna-se necessário correr a simulação a partir de um “arranque directo”, isto é, com todas as máquinas paradas e todos os dispositivos desligados, esperando alcançar um estado estacionário. É a partir desse estado estacionário (que é extremamente sensível a variações mesmo que minúsculas dos parâmetros do sistema, pelo que não é possível usar-se um mesmo estado de partida para simulações diferentes, isto é, para cada uma é necessário proceder a um “arranque directo”) que são desenvolvidas as simulações apresentadas.

Por essa razão, as simulações corridas tomam sempre mais tempo já que o tempo de geração do estado estacionário depende fortemente dos parâmetros utilizados.

No que respeita ao tempo real de simulação, este é considerável. De facto, em média, o tempo real de simulação é de mais de um minuto por segundo simulado (baseado num PC com um processador AMD Athlon a 2.08 GHz, com 1 GB de memória RAM e sistema operativo *Windows XP*). Isto deve-se não só à complexidade dos modelos dinâmicos desenvolvidos, mas também à quantidade desses modelos utilizados na plataforma de simulação desenvolvida. Deste modo, quando a complexidade atinge já um patamar bastante elevado, as exigências de realismo dos modelos terão necessariamente de ser menores de forma a poder elevar a dimensão das redes a simular. Por outro lado, a precisão pretendida para os resultados condiciona também o tempo de simulação requerido.

Ainda no que respeita ao tempo de simulação, é de acrescentar que este tempo varia de forma fortemente não-linear. Esta não-linearidade advém do facto de o *software* de simulação não permitir o esvaziamento da memória utilizada durante a simulação (apesar de ser possível gravar resultados intermédios no decorrer da simulação), pelo que a simulação é sempre significativamente mais lenta à medida que o tempo de simulação avança. Também por esta razão torna-se complicado correr simulações que compreendam tempos simulados elevados.

### 7.3 Conclusão

Neste capítulo foi apresentada a plataforma desenvolvida para a realização de simulações dinâmicas em ambiente *Matlab® Simulink®* baseada na rede-teste apresentada. Os resultados obtidos baseados nesta plataforma devem permitir validar os pressupostos simplificativos iniciais recorrendo a ferramentas de simulação mais complexas como é o caso do *software EMTP-RV®* [39] (situação que se encontra fora do âmbito desta dissertação).

Foi também feita uma breve apresentação do método de resolução adoptado, justificando a sua adequação face às características do modelo em análise. Foram ainda detalhadas algumas das dificuldades de implementação do modelo completo da micro-rede.

No próximo capítulo serão apresentados os principais resultados obtidos com a plataforma de simulação dinâmica desenvolvida.

## Capítulo 8 – Simulações e Resultados

Este capítulo apresenta alguns dos resultados mais interessantes obtidos a partir de um extenso rol de simulações efectuadas. As principais variáveis sob análise são apresentadas sendo feita uma revisão crítica dos resultados alcançados.

Tanto os modelos utilizados como as estratégias de controlo adoptadas foram já testados de forma extensa, considerando várias redes-teste e várias condições de operação [40] e [41].

A primeira secção deste capítulo foca o desempenho das duas estratégias de controlo secundário em micro-redes, fazendo uma análise comparativa dos resultados obtidos a partir das simulações realizadas. A segunda secção diz respeito à análise, através dos resultados de simulação, da estabilidade da micro-rede face à ocorrência de defeitos do tipo curto-circuito.

Admitindo todas as condicionantes apresentadas, os resultados escolhidos para apresentar aqui foram apenas aqueles considerados mais elucidativos e representativos do que se pretende mostrar, não obstante ter sido feito o desenvolvimento de um extenso rol de simulações, considerando não só outras condições de operação, como outras estratégias de controlo e respectivos parâmetros e redes-teste.

### 8.1 Controlo Secundário

De forma a avaliar a qualidade das estratégias de controlo secundário consideradas procedeu-se à análise do comportamento dinâmico da rede-teste, comparando o desempenho da micro-rede para cada uma das estratégias estudadas. Recordar-se que estas estratégias são o controlo secundário local e o controlo secundário centralizado.

Uma das principais preocupações que surgem na implementação de um controlo secundário, quer local quer centralizado, tem que ver com as características dos micro-geradores existentes. Um primeiro aspecto está relacionado com o facto de as micro-fontes, para poderem participar na regulação de frequência, terem em primeiro lugar que ser controláveis e, em segundo lugar, que estar ligadas à micro-rede por intermédio de um inversor. Por outro lado, as

características intrínsecas de muitos geradores não são, frequentemente, adequadas para este tipo de controlo [42]. Uma das razões para isto é o facto de o tempo de resposta destes dispositivos ser, de uma forma geral, bastante elevado. Outra das razões tem que ver com a baixa inércia da grande maioria dos dispositivos presentes numa micro-rede.

Neste sentido, as unidades que apresentam características adequadas para este tipo de funções serão as micro-turbinas em primeiro lugar e as pilhas de combustível em segundo lugar, uma vez que são as únicas fontes controladas presentes na micro-rede.

Apesar da aparente falta de adequação destas unidades à função de controlo secundário de frequência, é objectivo deste trabalho estudar a possibilidade de implementação de um esquema de controlo centralizado em redes de BT que não possuam máquinas síncronas (tipicamente, com máquinas *diesel*), as mais aptas para esse fim. Neste caso, toma especial relevância a presença de dispositivos de armazenamento de energia, capazes de ajudar na regulação de frequência [42].

A estratégia de controlo utilizada para a operação da micro-rede foi a operação em *single-master* (Secção 2.7).

### **8.1.1 Controlo Secundário Local**

De forma a avaliar o desempenho da estratégia de controlo secundário local, definem-se para a rede-teste considerada vários cenários de operação.

#### **8.1.1.1 Cenário Importação**

Foi definido um cenário de simulação, baseado na rede apresentada na Fig. 26, numa situação em que a micro-rede está a importar cerca de 20 kW e 2.5 kvar da rede de MT. O cenário é apresentado na tabela seguinte.

Tabela 2 – Cenário de Importação

Carga Total		Geração Total na Micro-rede	
P (kW)	Q (kvar)	P (kW)	Q (kvar)
71	24.5	52	22

A este cenário corresponde a distribuição de carga e de geração que se apresenta nas Tabelas 3 e 4, respectivamente.

Tabela 3 – Distribuição de carga para o cenário de importação

	Carga	
	P (kW)	Q (kvar)
Carga 1	4	1
Carga 2	20	5
Carga 3	23	8,1
Carga 4	4	3,2
Carga 5	20	7,2
Total	71	24,5

Tabela 4 – Distribuição de geração para o cenário de importação

	Geração	
	P (kW)	Q (kvar)
VSI + <i>Flywheel</i>	0	9
Gerador PV	4	2
Micro-Turbina <i>Single-shaft</i>	15	6
SOFC	15	5
Gerador Eólico	4	0
Micro-Turbina <i>Split-shaft</i>	14	0
Rede MT	20	2,5
Total	72	24,5

Nota: Considerou-se que existem cerca de 70% de cargas do tipo impedância e cerca de 30% de cargas do tipo motor. As cargas do tipo motor estão localizadas em Carga 3 (motor com 7.5 kW de potência nominal), Carga 4 (motor com 4 kW de potência nominal) e Carga 5 (motor com 4 kW de potência nominal).

Foi simulado um *islanding* intencional da micro-rede aos 10 s. As evoluções temporais das grandezas relevantes são apresentadas em seguida.

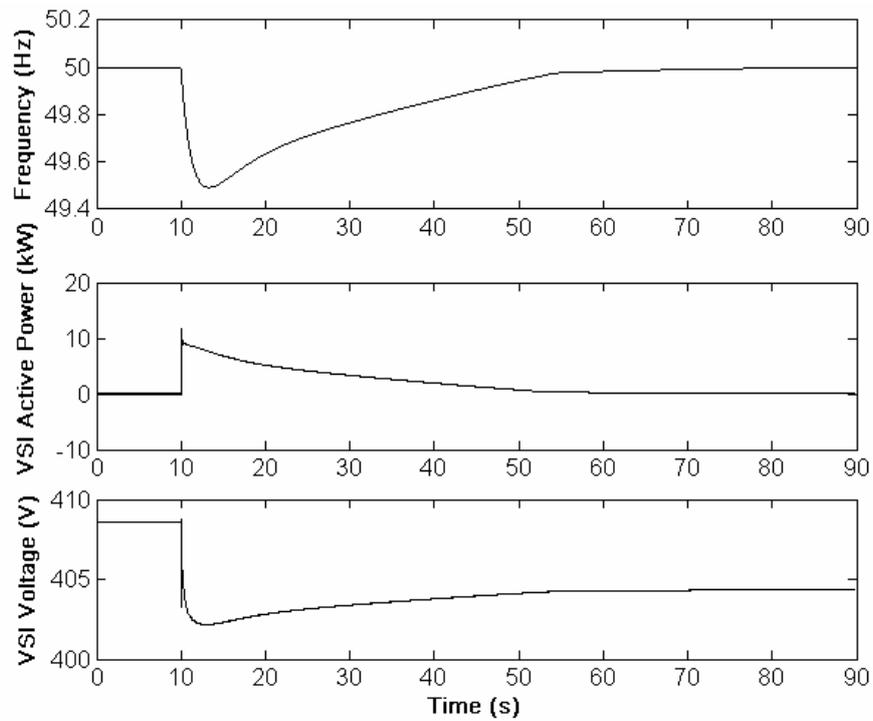


Fig. 33 – Comportamento da frequência, potência activa e tensão no VSI (Controlo Local, Cenário Importação)

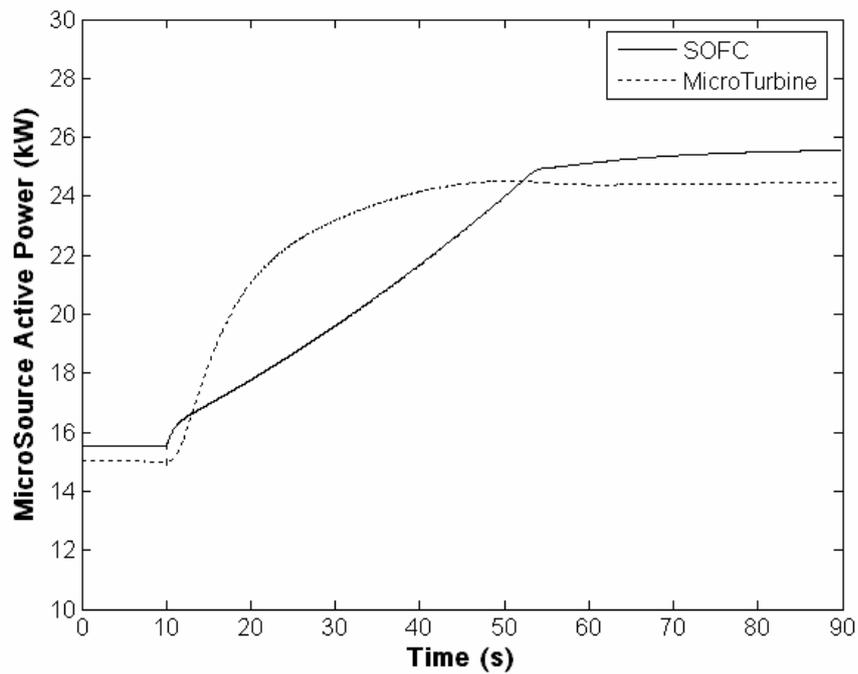


Fig. 34 – Evolução da potência activa na SOFC e na Micro-turbina (Controlo Local, Cenário Importação)

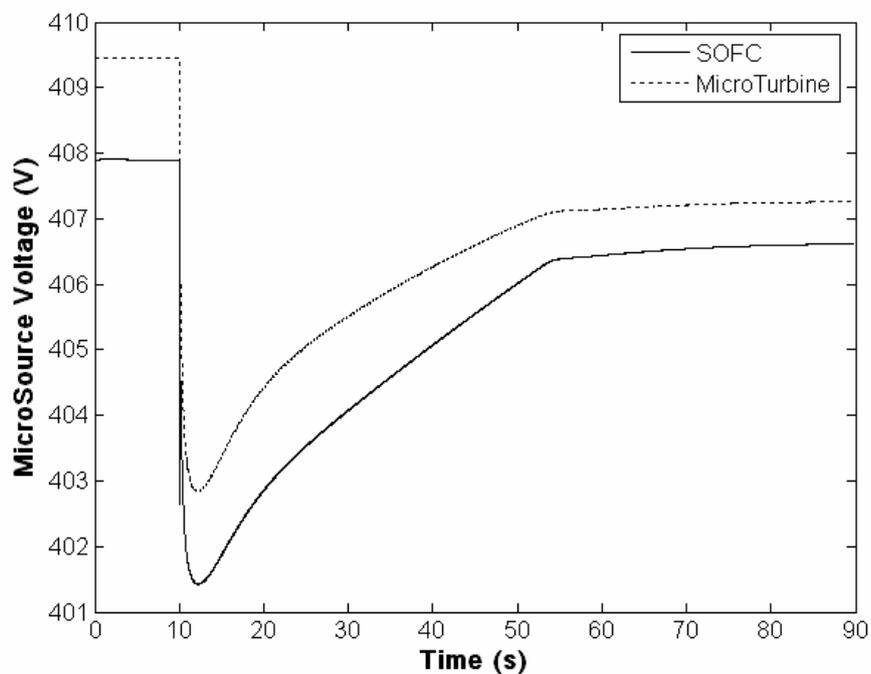


Fig. 35 – Comportamento da tensão na SOFC e na Micro-turbina (Controlo Local, Cenário Importação)

Para este caso, pode ver-se na Fig. 33 que a frequência regressa ao valor nominal de 50 Hz mas tarda cerca de 60 s a atingir esse valor.

Na Fig. 34 mostra-se a resposta em termos de potência activa produzida pela SOFC e pela micro-turbina. Pode ver-se que a SOFC em particular tem uma resposta bastante lenta face a um pedido “em degrau” de potência. Este facto deve-se às constantes de tempo elevadas associadas aos processos químicos da SOFC. Devido ao esquema de controlo secundário local, as duas micro-fontes escolhidas para regulação vão partilhar a carga entre si de forma mais ou menos equitativa, face ao desequilíbrio entre geração e carga causado pelo *islanding* da micro-rede. As tensões nas micro-fontes (Fig. 35) baixam ligeiramente devido ao *deficit* de potência reactiva proveniente da rede de MT que deixa de estar disponível.

#### 8.1.1.2 Cenário Exportação

Foi definido um cenário de simulação, baseado na rede apresentada na Fig. 26, numa situação em que a micro-rede está a exportar cerca de 10 kW para a rede de MT e a importar 5 kvar da rede de MT. O cenário é apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Cenário de Exportação

Carga Total		Geração Total na Micro-rede	
P (kW)	Q (kvar)	P (kW)	Q (kvar)
71	24.5	82.5	20

A este cenário corresponde a distribuição de carga e de geração que se apresenta nas Tabelas 6 e 7, respectivamente.

Tabela 6 – Distribuição de carga para o cenário de exportação

	Carga	
	P (kW)	Q (kvar)
Carga 1	4	1
Carga 2	20	5
Carga 3	23	8,1
Carga 4	4	3,2
Carga 5	20	7,2
Total	71	24,5

Tabela 7 – Distribuição de geração para o cenário de exportação

	Geração	
	P (kW)	Q (kvar)
VSI + <i>Flywheel</i>	0	7
Gerador PV	9,5	2
Micro-Turbina <i>Single-shaft</i>	21	6
SOFC	21	5
Gerador Eólico	10	0
Micro-Turbina <i>Split-shaft</i>	21	0
Rede MT	-10	5
Total	72,5	25

Nota: Considerou-se que existem cerca de 70% de cargas do tipo impedância e cerca de 30% de cargas do tipo motor. As cargas do tipo motor estão localizadas em Carga 3 (motor com 7.5 kW de potência nominal), Carga 4 (motor com 4 kW de potência nominal) e Carga 5 (motor com 4 kW de potência nominal).

Foi simulado um *islanding* intencional da micro-rede aos 10 s. Os principais resultados obtidos são apresentados em seguida.

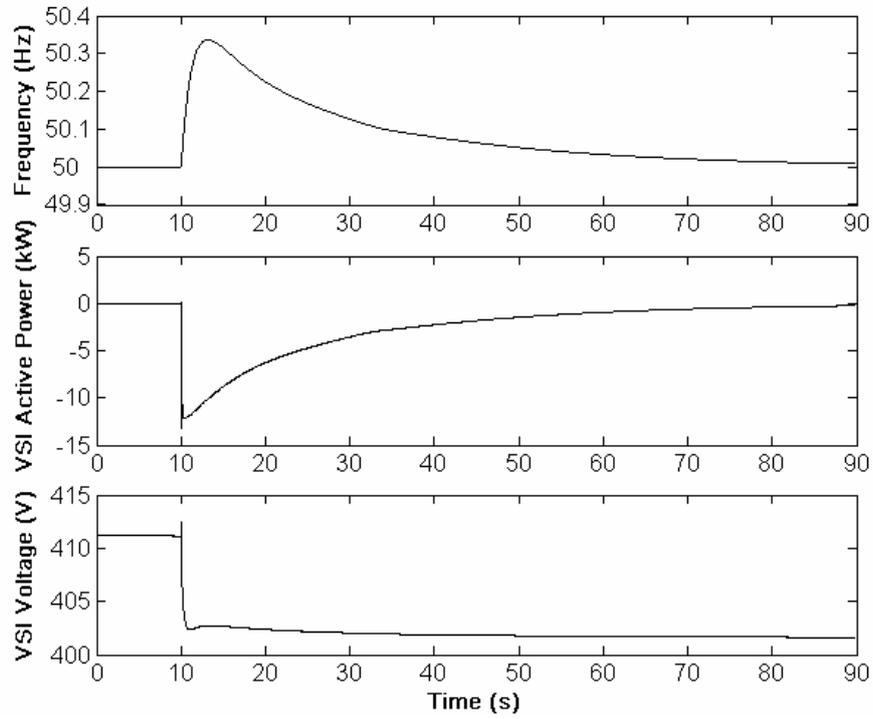


Fig. 36 – Comportamento da frequência, potência activa e tensão no VSI (Controlo Local, Cenário Exportação)

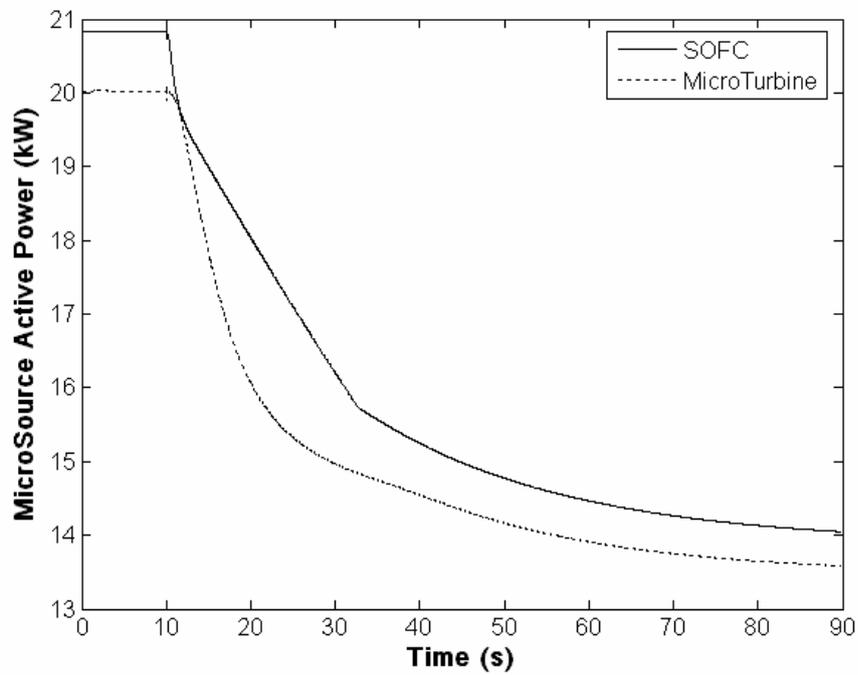


Fig. 37 – Evolução da potência activa na SOFC e na Micro-turbina (Controlo Local, Cenário Exportação)

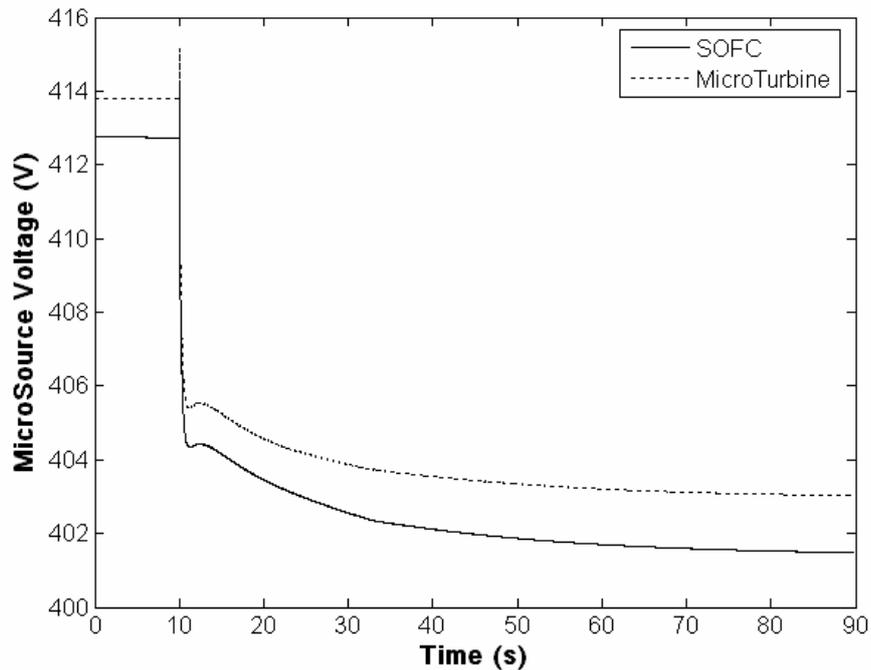


Fig. 38 – Comportamento da tensão na SOFC e na Micro-turbina (Controlo Local, Cenário Exportação)

Pode ver-se na Fig. 36 que a frequência da micro-rede estabiliza em cerca de 60 s na frequência nominal. De realçar ainda que, na mesma figura, é possível observar que a *flywheel* está a absorver potência activa “em excesso”, depois de ter ocorrido o *islanding* da micro-rede. Na Fig. 37 pode ver-se que a potência activa produzida é reduzida progressivamente, de uma forma algo lenta, particularmente no caso da SOFC. As tensões em ambas as micro-fontes baixam também, de forma ligeira (Fig. 38).

### 8.1.2 Controlo Secundário Centralizado

De forma a avaliar o desempenho da estratégia de controlo secundário centralizado, definem-se dois cenários de operação para a rede-teste considerada.

### 8.1.2.1 Cenário Importação

O cenário de simulação utilizado nesta secção é igual ao que foi apresentado na Secção 8.1.1.1.

Adicionalmente, foram considerados os seguintes parâmetros económicos (necessários ao cálculo dos factores de participação) e técnicos (limites técnicos) para as micro-fontes, mostrados na tabela seguinte.

Tabela 8 – Parâmetros para micro-geradores (cenário de importação)

Micro-gerador	Capacidade Mínima (kW)	Capacidade Máxima (kW)	A (EURct/kW.h <sup>2</sup> )	B (EURct/kW.h)	C (EURct/h)	Set-point Económico (kW)
Micro-turbina	2	30	0,01	5,16	46,1	27
Pilha Combustível	1	30	0,01	3,04	130	24

Nota: Os valores nas funções-custo estão em cêntimos de Euro (EURct).

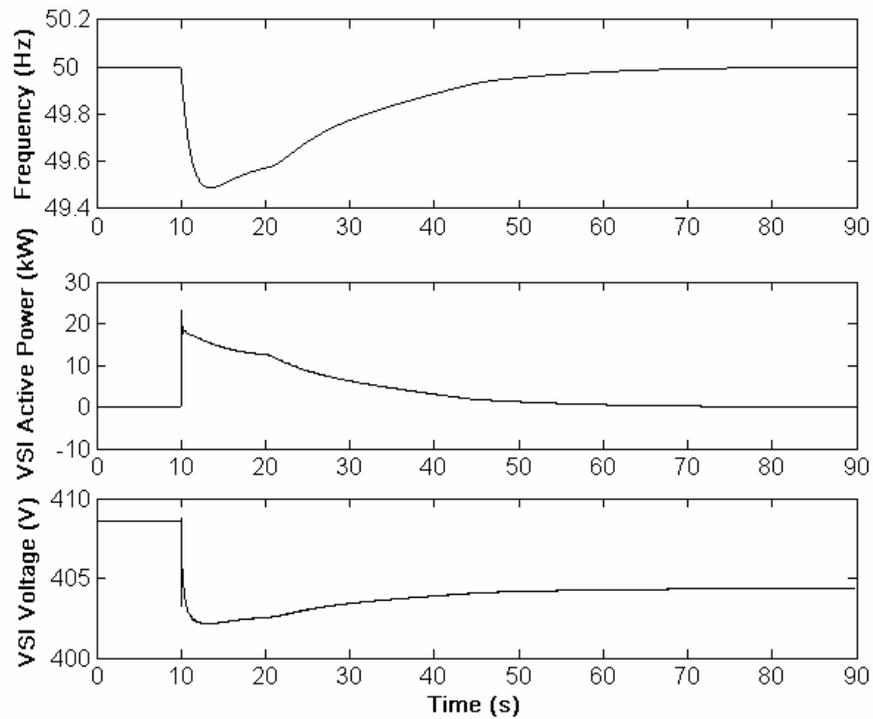
Funções custo da forma  $-A.x^2 + B.x + C$  em que  $x$  é a potência activa entregue por cada micro-fonte. Não se considerou, neste momento, um custo pela energia reactiva produzida. Os valores apresentados para as funções-custo foram utilizados no âmbito do projecto *MicroGrids* [22], tendo em consideração a performance das unidades e um valor de 10 EURct/m<sup>3</sup> para o Gás Natural.

Foi considerado neste caso, numa primeira análise, um atraso na estrutura de controlo secundário centralizado de 5 s. Este atraso foi implementado na plataforma de simulação através de uma função de transferência simples do tipo  $1/(1+T.s)$ , onde  $T$  é o atraso considerado na comunicação.

Os sinais de controlo enviados são *set-points* de potência activa para cada unidade geradora encarregue de regulação secundária. O controlo secundário centralizado foi activado aos 20 s (10

s após o *islanding* da micro-rede), após uma primeira acção dos controladores primários que tentam estabilizar inicialmente a frequência.

Foi simulado um *islanding* intencional da micro-rede aos 10 s. Os principais resultados obtidos são apresentados em seguida.



**Fig. 39 – Comportamento da frequência, potência activa e tensão no VSI (Controlo Centralizado, Cenário Importação)**

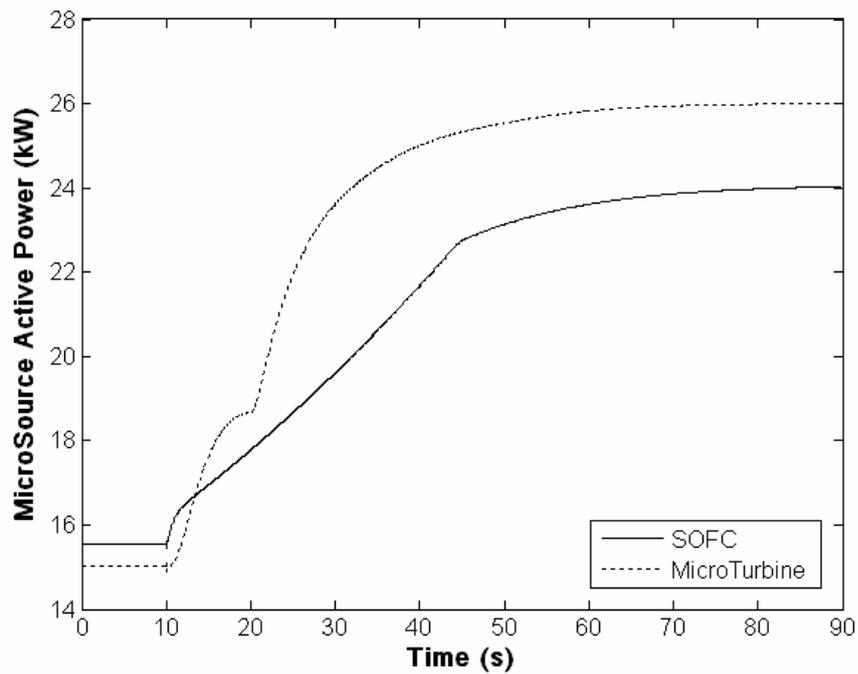


Fig. 40 – Evolução da potência activa na SOFC e na Micro-turbina (Controlo Centralizado, Cenário Importação)

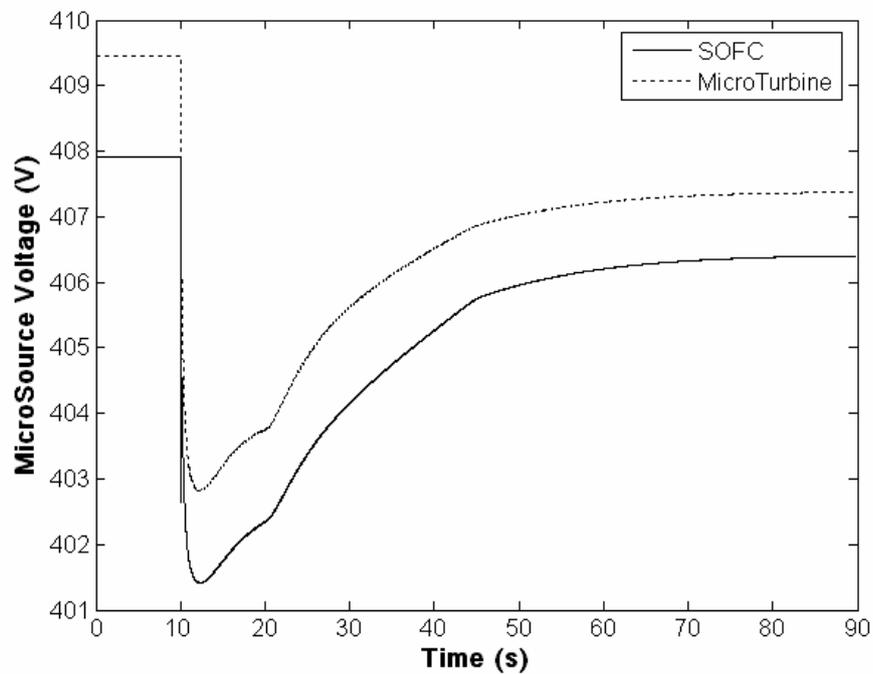


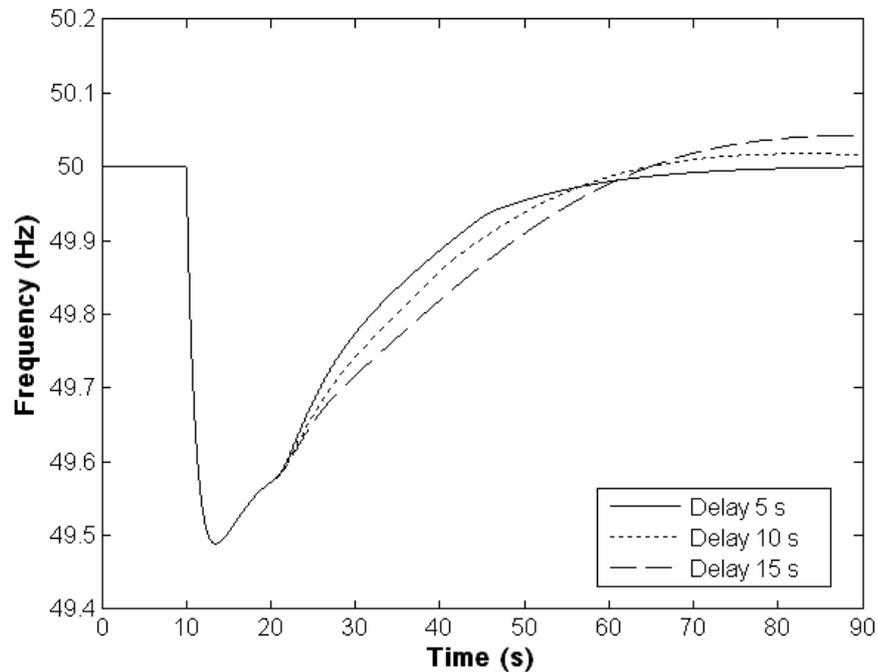
Fig. 41 – Comportamento da tensão na SOFC e na Micro-turbina (Controlo Centralizado, Cenário Importação)

Como pode ser observado na Fig. 39, a frequência da micro-rede volta ao valor nominal após cerca de 70 s após a ocorrência do *islanding*. A frequência da micro-rede é restabelecida de forma ligeiramente mais lenta pelo controlo central face à opção por controlo local (ver Fig. 36). No entanto, o controlo centralizado inclui uma malha de *generation allocation* estabelecida de acordo com critérios de índole económica, pelo que se torna uma solução bem mais interessante, tendo em vista o funcionamento isolado da micro-rede, pelo menos em situações de exploração prolongadas nestas condições.

Na Fig. 40, é possível observar a potência activa produzida pelas duas micro-fontes responsáveis pelo controlo secundário. É possível observar que os valores de geração para estas duas unidades se aproximam do valor económico óptimo pretendido.

Estes resultados ilustram a importância da presença de várias micro-fontes envolvidas em tarefas de controlo secundário. Caso as micro-fontes encarregues do controlo não tenham capacidade de resposta adequada, face ao desvio de frequência verificado, por estarem a operar demasiado perto do seu limite técnico, seria necessário recorrer a deslastre de cargas. Acresce que é necessário garantir a presença do VSI, uma vez que uma eficiente utilização da capacidade de armazenamento disponível é absolutamente imprescindível para o funcionamento da micro-rede em modo de rede isolada.

De modo a explorar a resposta do sistema, considerando atrasos maiores no envio de sinais de controlo, foi ainda analisado o comportamento da micro-rede para mais duas situações. Os resultados obtidos são apresentados em seguida.



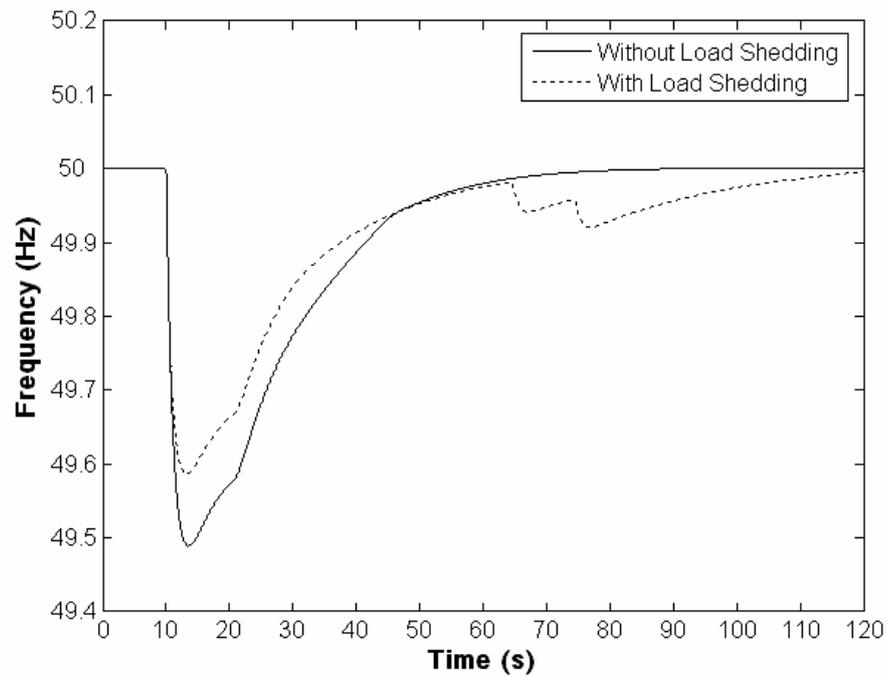
**Fig. 42 – Comportamento da frequência para diversos tempos de envio de sinais de comando (Controlo Centralizado, Cenário Importação)**

Pode observar-se na Fig. 42 que a resposta em regime dinâmico da micro-rede não é significativamente afectada por tempos de envio de sinais de comando até 15 s. No entanto, é possível verificar que a resposta do sistema vai mostrando mais oscilações à medida que se aumenta o atraso no envio dos comandos, tornando esta resposta progressivamente mais lenta. Por outro lado, torna-se necessário estabelecer um compromisso entre eficácia de acção dos controladores e frequência de envio de informação, de modo a não causar demasiado desgaste nas micro-fontes e respectivos sistemas de controlo e a não criar um volume de fluxos de informação desnecessário.

Foi ainda analisado o impacte do deslastre de cargas não-essenciais no comportamento dinâmico da micro-rede, considerando uma estratégia de controlo secundário centralizado. Os principais resultados obtidos são apresentados em seguida.

O MGCC é responsável pelo envio dos *set-points* às cargas deslastráveis, por intermédio dos LCs. Na implementação do modelo, considerou-se que os *set-points* são enviados de forma

praticamente instantânea, perante um determinado desvio na frequência da micro-rede, conforme foi explicado na Secção 3.7.3.



**Fig. 43 – Comportamento da frequência considerando a inclusão ou não de estratégias de deslaste de carga (Controlo Centralizado, Cenário Importação)**

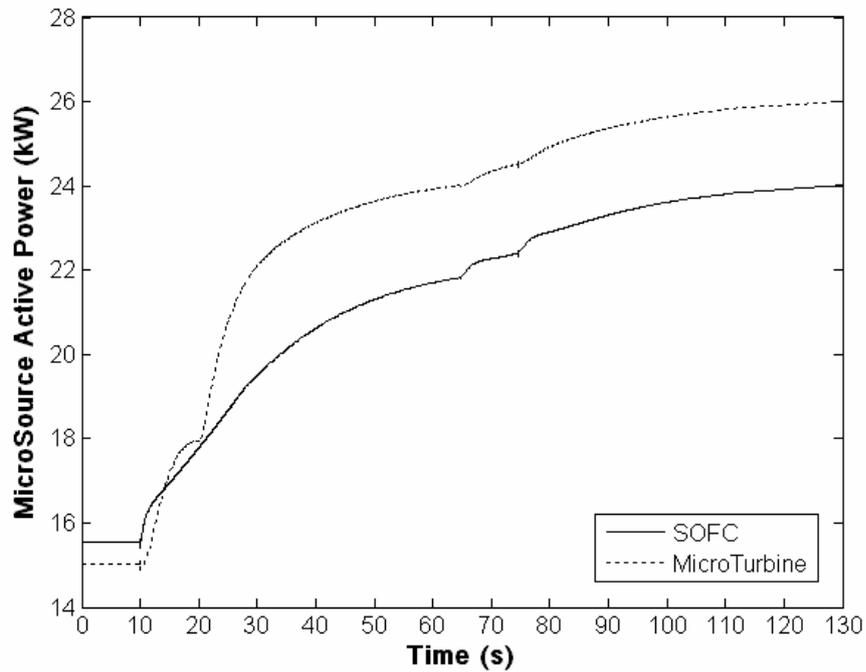


Fig. 44 – Potência activa na SOFC e na Micro-turbina considerando estratégias de deslaste de carga (Controlo Centralizado, Cenário Importação)

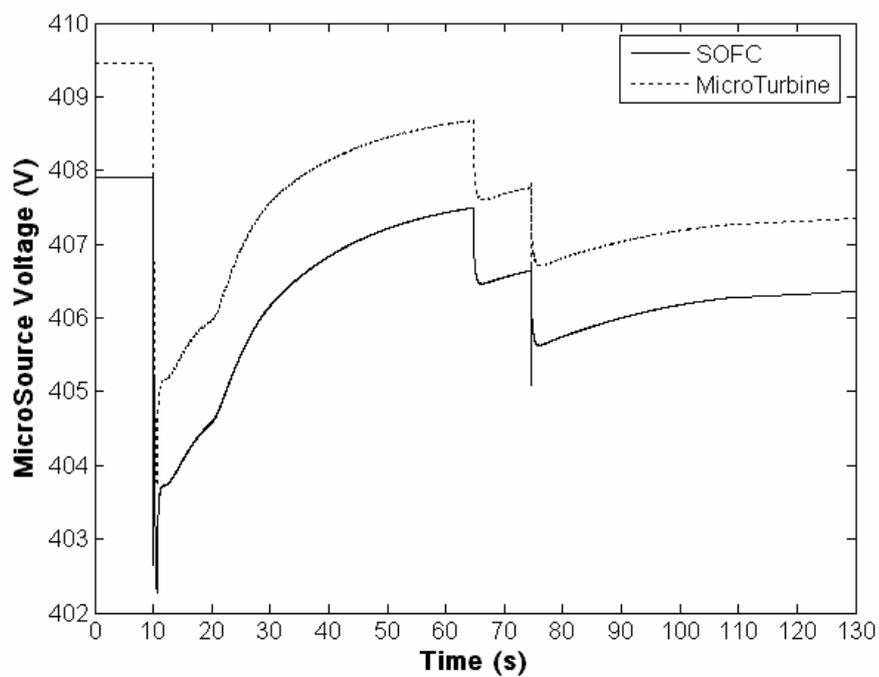


Fig. 45 – Tensão na SOFC e na Micro-turbina (Controlo Centralizado, Cenário Importação)

Da observação destas figuras pode concluir-se que o desvio de frequência que se verifica após o *islanding* da micro-rede considerando a inclusão de estratégias de deslastre de cargas é menor do que no caso em que não se aplica esse algoritmo de controlo. A diferença verificada é de 0.1 Hz, aproximadamente (Fig. 43). Na situação em que se verifica o deslastre de uma carga não-essencial, o MGCC envia uma instrução ao LC responsável pela carga a deslastrar para que este desligue um patamar de carga de 4 kW (de um total de 20 kW) perante um desvio de 0.25 Hz (Secção 3.7.3). A acção de deslastre é realizada de forma praticamente instantânea. O MGCC vai depois enviar uma ordem para religar o patamar de carga deslastrada após 60 s de ter ocorrido o deslastre, em dois passos de religação de 2 kW cada um. Esta acção só tem lugar quando se verifica que a frequência da micro-rede está a aproximar-se bastante do seu valor nominal.

Na Fig. 44 e Fig. 45 é possível observar a potência activa gerada e a tensão nas duas micro-fontes que participam na regulação secundária de frequência considerando a inclusão de estratégias de deslastre frequencimétrico de cargas não-essenciais.

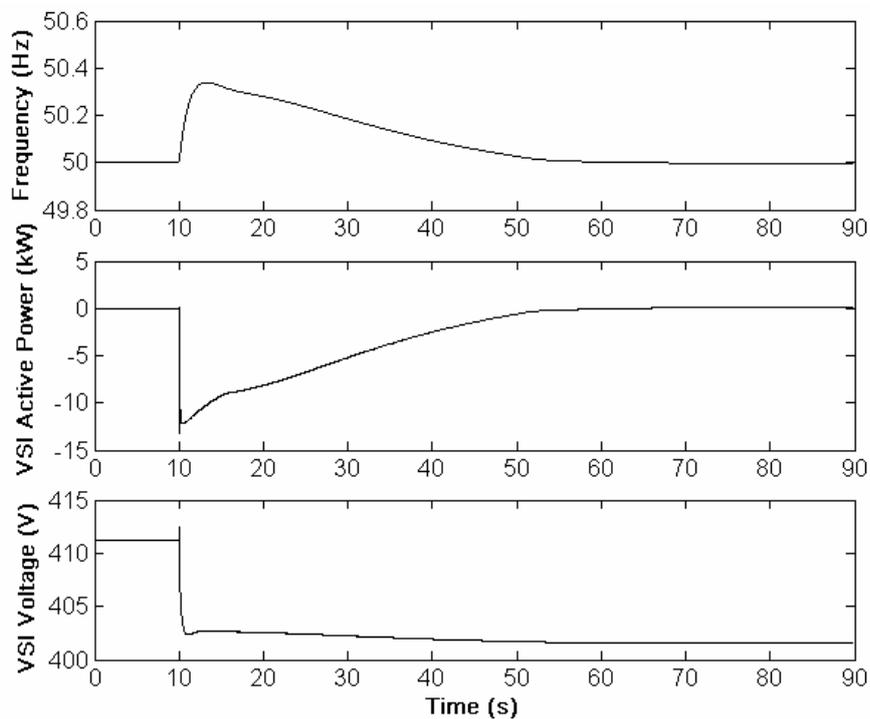
### 8.1.2.2 Cenário Exportação

O cenário de simulação utilizado foi o mesmo da Secção 8.1.1.2. Os parâmetros económicos e técnicos utilizados para as micro-fontes são apresentados na Tabela 9.

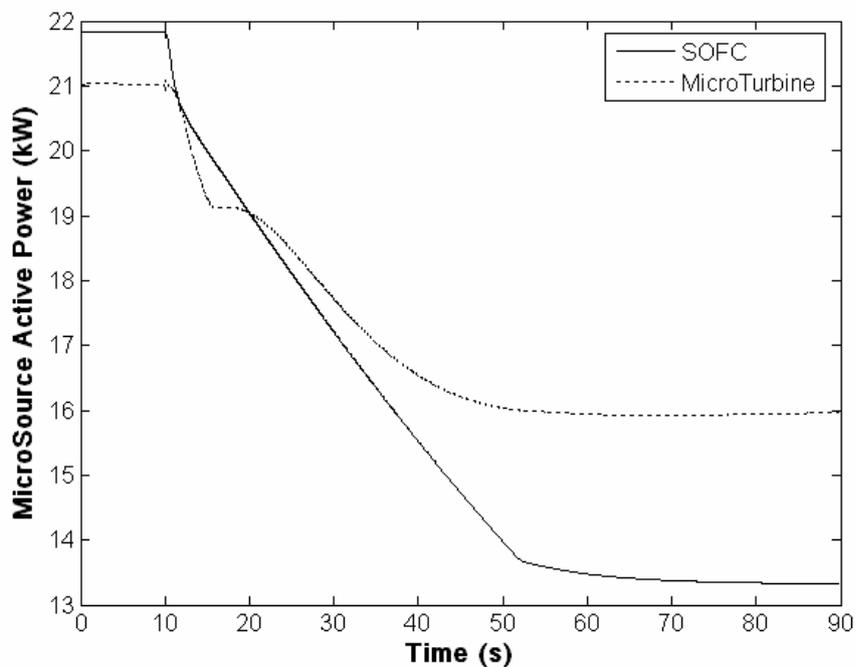
Tabela 9 – Parâmetros para micro-geradores (cenário de exportação)

Micro-gerador	Capacidade Mínima (kW)	Capacidade Máxima (kW)	A (EURct/kW.h <sup>2</sup> )	B (EURct/kW.h)	C (EURct/h)	Set-point Económico (kW)
Micro-turbina	2	30	0,01	5,16	46,1	21
Pilha Combustível	1	30	0,01	3,04	130	18

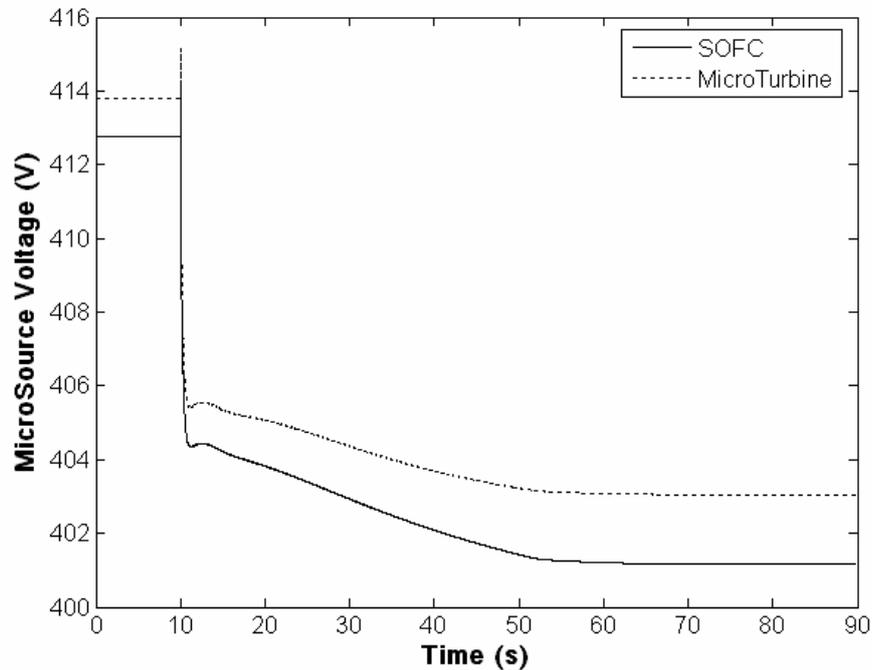
Foi simulado um *islanding* intencional da micro-rede aos 10 s. Os principais resultados obtidos são apresentados em seguida.



**Fig. 46 – Comportamento da frequência, potência activa e tensão no VSI (Controlo Centralizado, Cenário Exportação)**



**Fig. 47 – Evolução da potência activa na SOFC e na Micro-turbina (Controlo Centralizado, Cenário Exportação)**



**Fig. 48 – Comportamento da tensão na SOFC e na Micro-turbina (Controlo Centralizado, Cenário Exportação)**

Após uma análise dos resultados anteriores, pode verificar-se que o controlo secundário centralizado opera de forma adequada também em situações de exportação de potência activa da micro-rede para a rede principal de MT, com a frequência a retornar ao seu valor nominal (Fig. 46).

É possível observar que os pontos de funcionamento óptimos (em termos económicos) das duas micro-fontes não podem ser atingidos face à carga da micro-rede na situação após o *islanding*, pelo que vão estabilizar num valor distinto, inferior, mas mantendo a diferença relativa entre os valores de geração (Fig. 47).

Verifica-se que a tensão nas duas micro-fontes baixa ligeiramente, cerca de 3% do valor nominal (Fig. 48), devido à ausência de potência reactiva proveniente da rede de MT.

Apesar de se terem realizado várias simulações também para o cenário de exportação, optou-se por não apresentar aqui uma análise tão exaustiva, como na Secção 8.1.2.1, uma vez que não acrescentaria nada de significativo ao anteriormente apresentado.

## 8.2 Curto-Circuitos

Neste capítulo, avaliou-se o comportamento dinâmico da micro-rede, perante diversas situações de defeito. As diversas situações estudadas são aqui apresentadas e os principais resultados obtidos discutidos.

Para efeitos de simulação, consideraram-se dois cenários de operação diferentes: com a micro-rede ligada à rede principal de MT antes do defeito e com a micro-rede a operar em modo de emergência (isolada) antes do defeito. Foram consideradas duas localizações de defeito: defeito na rede de MT e defeito na rede de BT (defeito no interior da própria micro-rede).

Em todas as situações mencionadas foi considerado um defeito do tipo curto-circuito, trifásico, simétrico, eliminado de forma bem sucedida.

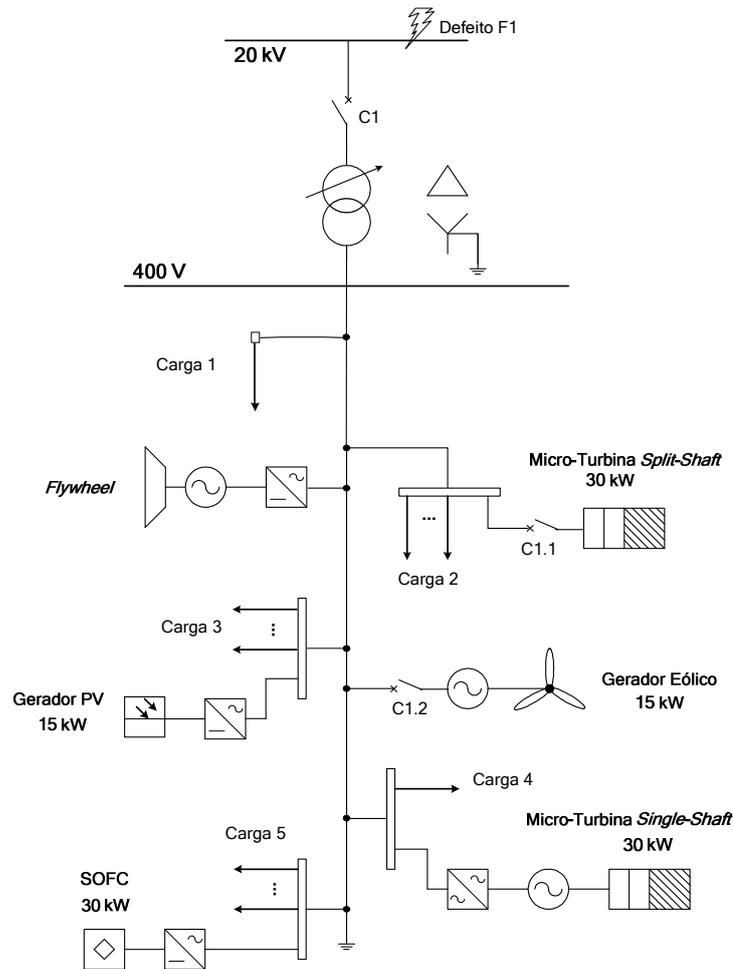
Muito embora tenha sido executado um número elevado de simulações, apenas os resultados das simulações consideradas mais relevantes e interessantes são apresentadas nesta secção.

A estratégia de controlo utilizada para a operação da micro-rede consistiu na operação em *single-master* (Secção 2.7).

Como foi atrás referido, um dos principais pontos de interesse neste estudo prende-se com o comportamento dos dispositivos electrónicos conversores de energia (inversores), que se encontram em grandes quantidades neste tipo de redes eléctricas, face à ocorrência de defeitos.

### 8.2.1 Curto-Circuitos na Rede de Média Tensão

A rede-teste utilizada para os estudos do comportamento do sistema perante curto-circuitos na rede de MT é apresentada na figura seguinte.



**Fig. 49 – Rede-teste utilizada para simulação de um defeito na rede MT**

Esta rede-teste foi transposta para a plataforma de simulação descrita anteriormente.

Foi ainda definido um cenário de simulação, baseado na rede da Fig. 49, numa situação em que a micro-rede está a importar cerca de 7 kW da rede de MT e a importar 1 kvar da rede de MT.

O cenário de operação considerado é apresentado na Tabela 10.

*Tabela 10 – Cenário alternativo de importação*

Carga Total		Geração Total na Micro-rede	
P (kW)	Q (kvar)	P (kW)	Q (kvar)
58	21	52	20

A este cenário corresponde a distribuição de carga e de geração que se apresenta nas Tabelas 3 e 4, respectivamente.

Tabela 11 – Distribuição de carga para o cenário alternativo de importação

	Carga	
	P (kW)	Q (kvar)
Carga 1	4	1
Carga 2	10	2,5
Carga 3	19,5	6,9
Carga 4	4	3,2
Carga 5	20	7,2
Total	57,5	20,8

Tabela 12 – Distribuição de geração para o cenário alternativo de importação

	Geração	
	P (kW)	Q (kvar)
VSI + <i>Flywheel</i>	0	7
Gerador PV	4	2
Micro-Turbina <i>Single-shaft</i>	15	6
SOFC	15	5
Gerador Eólico	4	0
Micro-Turbina <i>Split-shaft</i>	14	0
Rede MT	7	1
Total	59	21

Nota: Este cenário é constituído por cerca de 75% de cargas do tipo impedância e 25% de cargas do tipo motor, aproximadamente. As cargas do tipo motor estão localizadas em Carga 3, Carga 4 e Carga 5 (todas com motores com 4 kW de potência nominal).

Nos resultados apresentados em seguida, foi considerado um valor de referência para o tempo de eliminação de um defeito na rede de MT de 100 ms e um valor para a resistência de defeito de 1  $\Omega$  na MT (portanto um defeito extremamente severo, praticamente franco), valores que foram utilizados nas simulações realizadas.

### 8.2.1.1 Influência da Presença de Máquinas Assíncronas na Micro-Rede

Nesta secção pretende observar-se o impacte da inclusão de geradores de indução directamente ligados à rede na estabilidade da micro-rede, bem como avaliar o impacte da presença de várias cargas do tipo motor assíncrono com baixas constantes de inércia no caso de um curto-circuito (c.c.).

Considerou-se um defeito na rede de MT e a micro-rede a operar ligada com a rede de MT antes da ocorrência do defeito. Considerou-se a ocorrência de um defeito (F1) aos 10 s e um tempo de eliminação do defeito de 100 ms, por acção da protecção C1.

Os principais resultados obtidos são apresentados em seguida.

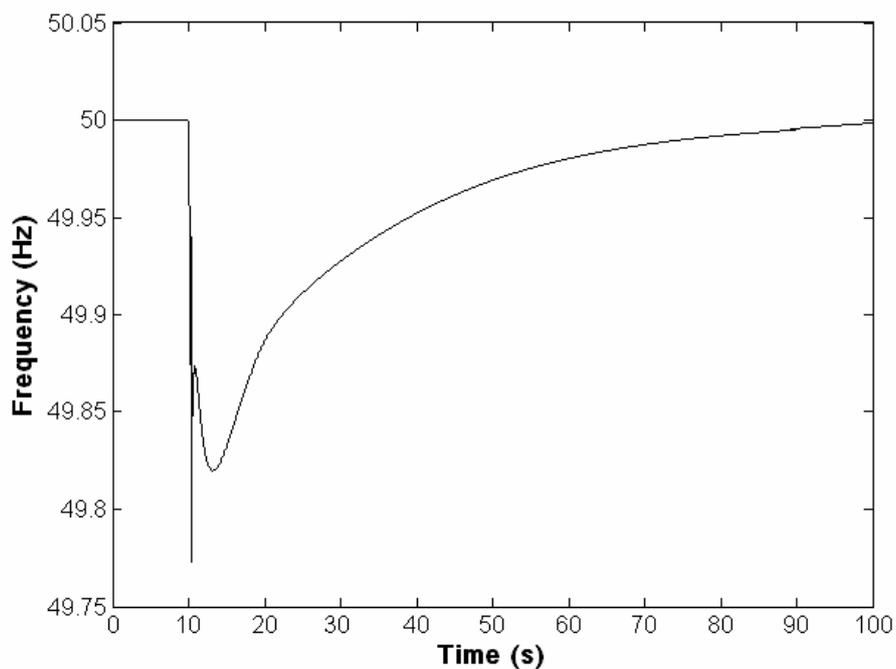
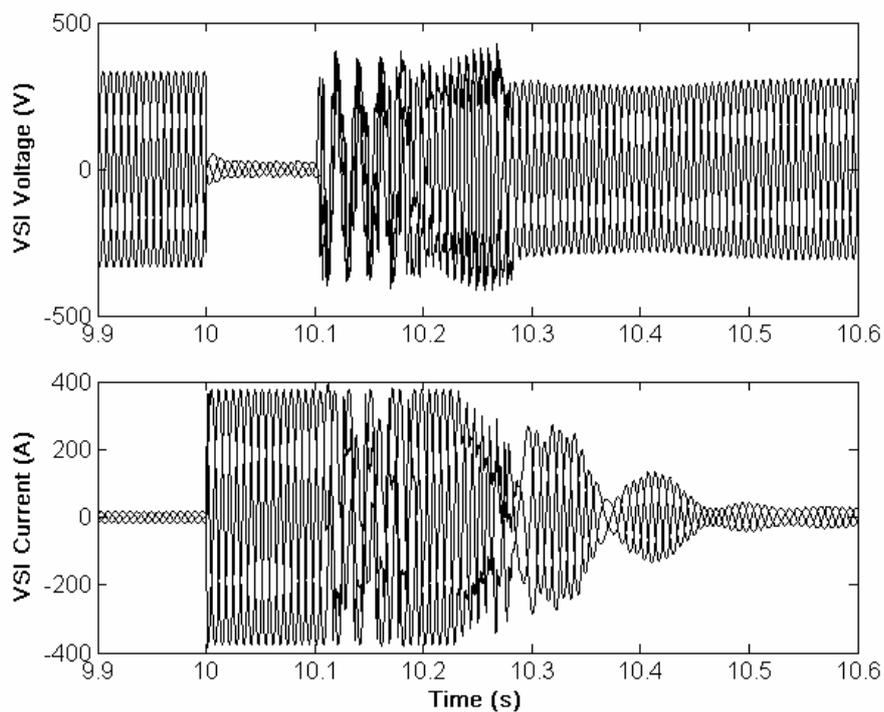
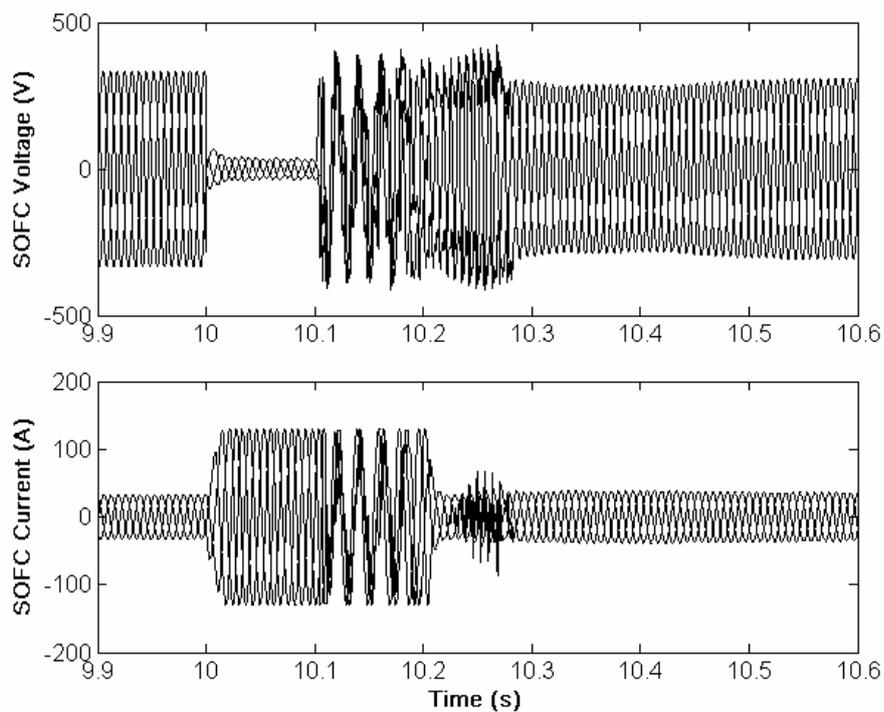


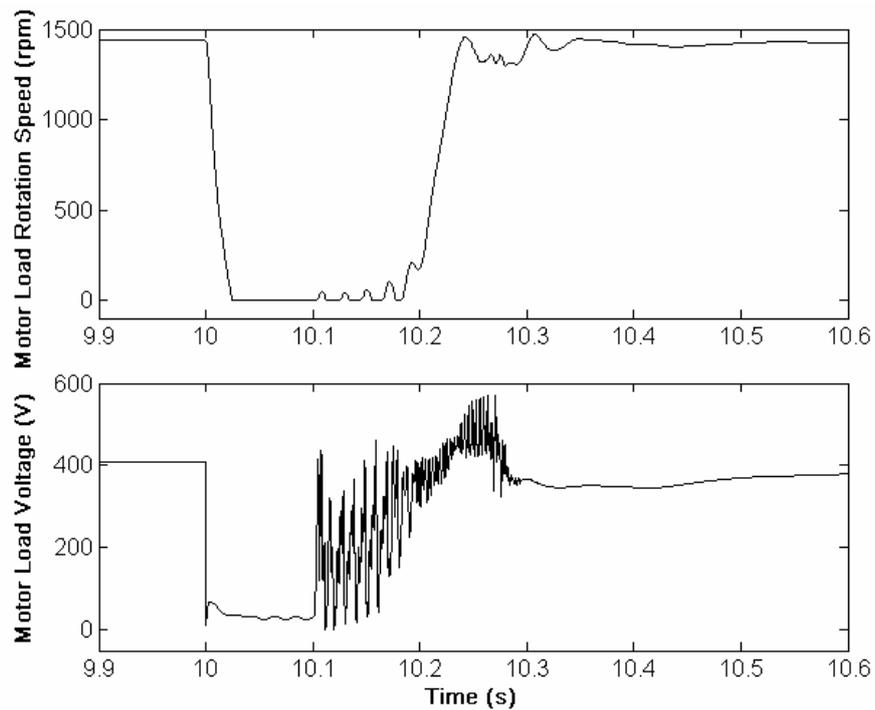
Fig. 50 – Comportamento da frequência na micro-rede (c.c. na MT, com geradores assíncronos)



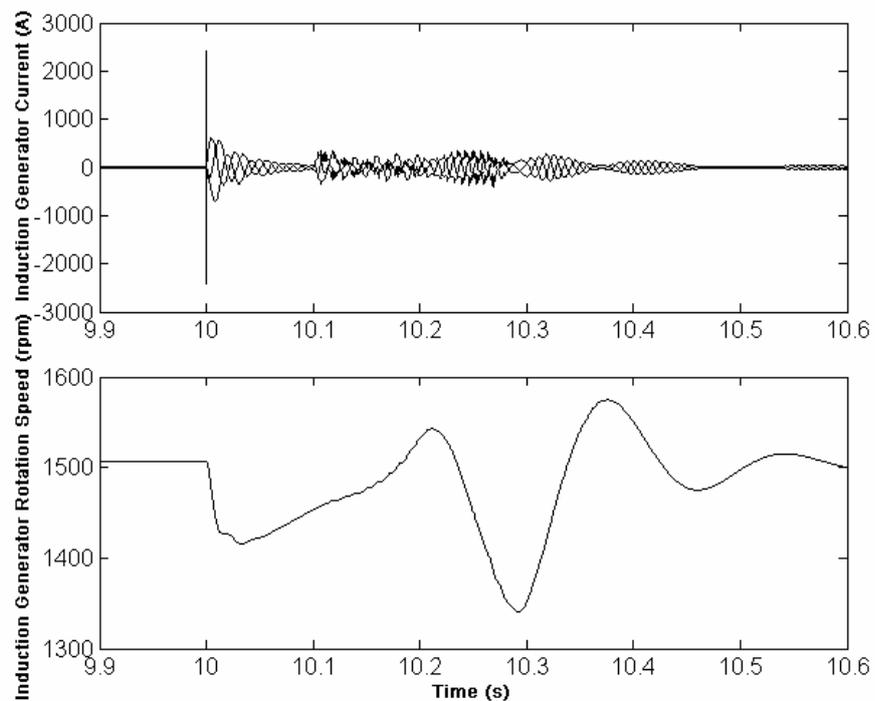
**Fig. 51 – Comportamento da tensão e corrente no VSI (c.c. na MT, com geradores assíncronos)**



**Fig. 52 – Comportamento da tensão e corrente na SOFC (c.c. na MT, com geradores assíncronos)**



**Fig. 53 – Comportamento da velocidade de rotação e tensão numa carga motor (c.c. na MT, com geradores assíncronos)**



**Fig. 54 – Comportamento da corrente e velocidade de rotação num gerador assíncrono – micro-turbina *split-shaft* (c.c. na MT, com geradores assíncronos)**

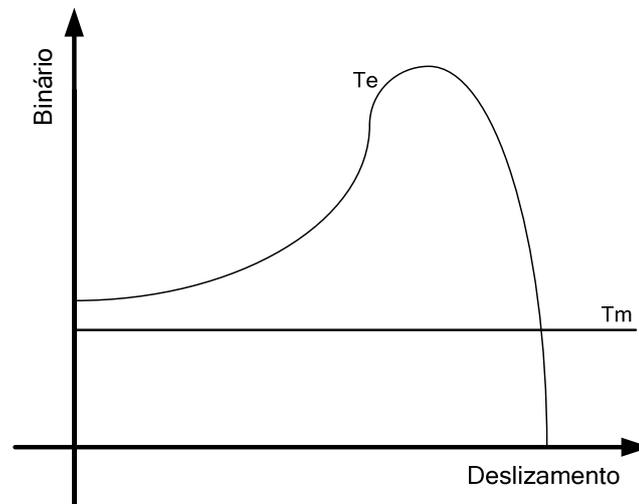
Após efectuadas estas simulações, foi necessário proceder a uma análise cuidadosa de forma a interpretar os fenómenos ocorridos. O comportamento dinâmico da micro-rede mostrava-se nos limites da estabilidade ou em plena instabilidade, em diversos cenários de operação, considerando a ocorrência de defeitos do tipo curto-circuito.

Dos resultados obtidos foi possível verificar que a frequência da micro-rede apresenta uma variação extremamente rápida aquando da ocorrência e eliminação do defeito (Fig. 50), devido à inexistência de inércias significativas no sistema.

A tensão no VSI cai abaixo dos 20% do seu valor nominal e a corrente é elevada, sendo limitada a 375 A, por razões de segurança de operação (Fig. 51). Também no caso do inversor PQ, utilizado na SOFC, a tensão e a corrente apresentam comportamentos similares ao verificado para o VSI (Fig. 52).

Devido à ocorrência do defeito, a tensão aos terminais das diversas cargas motor presentes na micro-rede cai consideravelmente, levando a que ocorra uma redução significativa do binário eléctrico e, como consequência, à paragem (*stalling*) do motor, como pode ser observado na Fig. 53. O processo de re-arranque dos motores conduz a uma subida relativamente lenta da tensão após a eliminação do defeito.

As características das cargas motor utilizadas neste trabalho são as fornecidas pela biblioteca *SimPowerSystems* do *Matlab® Simulink®*. É possível verificar que a curva característica binário/velocidade destas máquinas apresenta um binário eléctrico ( $T_e$ ) sempre superior ao binário mecânico (ou da carga,  $T_m$ ), pelo que o re-arranque da máquina foi neste caso possível após a eliminação do defeito (Fig. 55). A única limitação está na potência reactiva disponível na micro-rede, uma vez que se esta não for suficiente, não será então possível o arranque dos motores.



**Fig. 55 – Característica binário/velocidade das cargas motor utilizadas**

Também se verificou que os geradores assíncronos tinham grande influência no comportamento dinâmico do sistema face à ocorrência de um defeito.

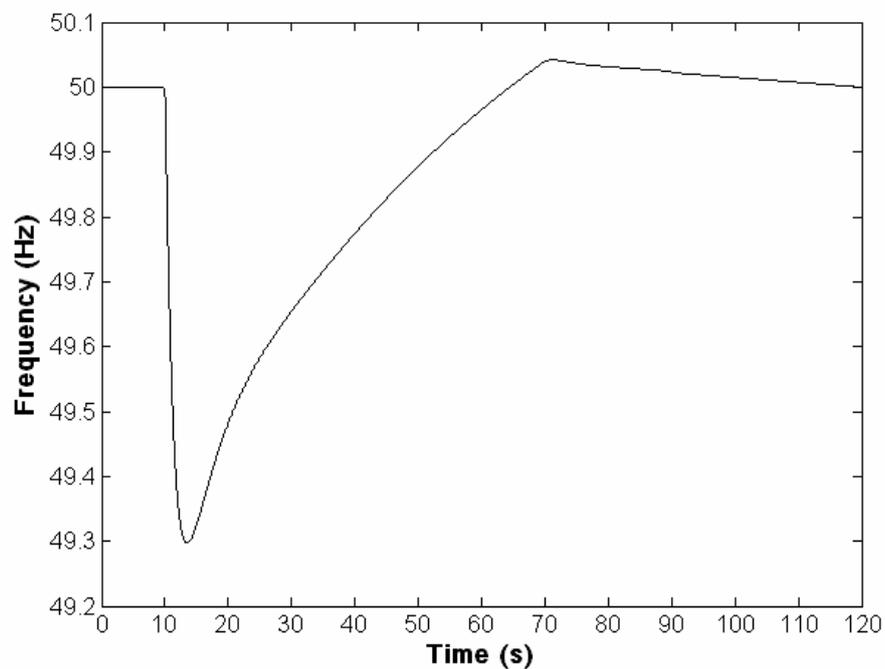
Após uma análise mais cuidada dos resultados, foi possível verificar que o mecanismo utilizado para o controlo da corrente no VSI não actuava de forma eficiente devido à presença de geradores assíncronos na micro-rede, visto que estes (bem como as cargas motor) absorvem correntes extremamente elevadas após a eliminação do defeito (Fig. 54), pelo que a função de limitação da corrente no VSI era activada (limitando a corrente no inversor a 375 A). Este comportamento (de comutação de modo fonte de corrente para modo fonte de tensão e vice-versa) ocorria de forma sucessiva durante uns largos décimos de segundo.

Por esta razão, verificaram-se várias distorções nas formas de onda da corrente e da tensão, quer no VSI, quer no inversor PQ (na SOFC) que podem ser vistas na Fig. 51 e na Fig. 52, respectivamente. É este comportamento que afecta de forma decisiva a estabilidade da micro-rede.

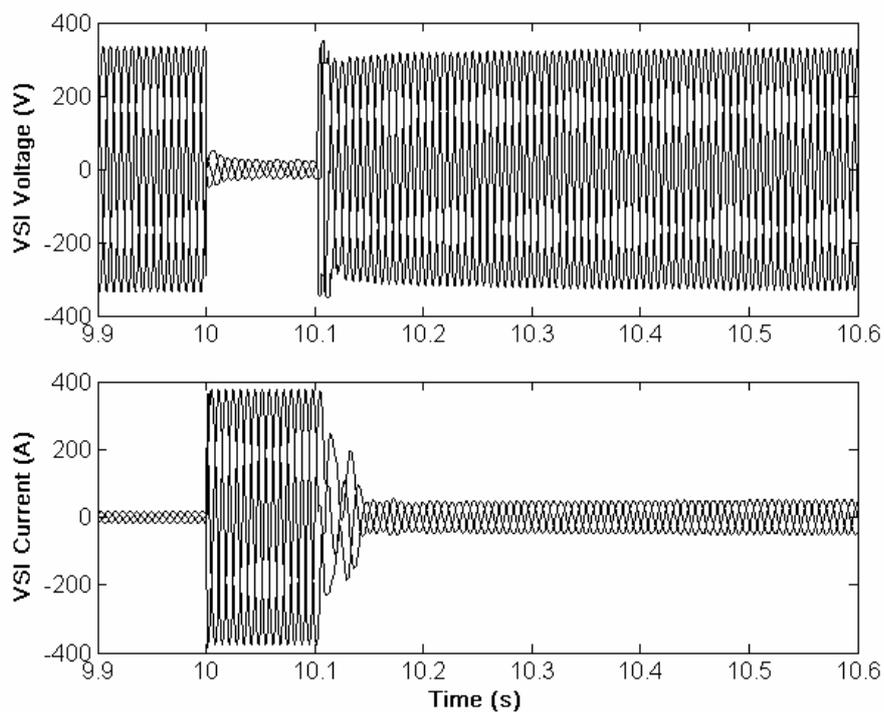
Numa segunda fase, foram tentadas diversas alterações ao modelo de funcionamento do VSI em condições de defeito, uma vez que grande parte das dificuldades resultavam da adequação do modelo utilizado. Não tendo sido possível desenvolver um modelo mais adequado para o controlo do VSI nestes casos, tornou-se necessário encontrar uma nova solução que permitisse a manutenção da estabilidade da micro-rede de uma forma mais eficiente.

Face à influência negativa dos geradores assíncronos no comportamento dinâmico da micro-rede nestas situações, verificou-se ser necessário retirar de serviço os geradores assíncronos directamente ligados à rede.

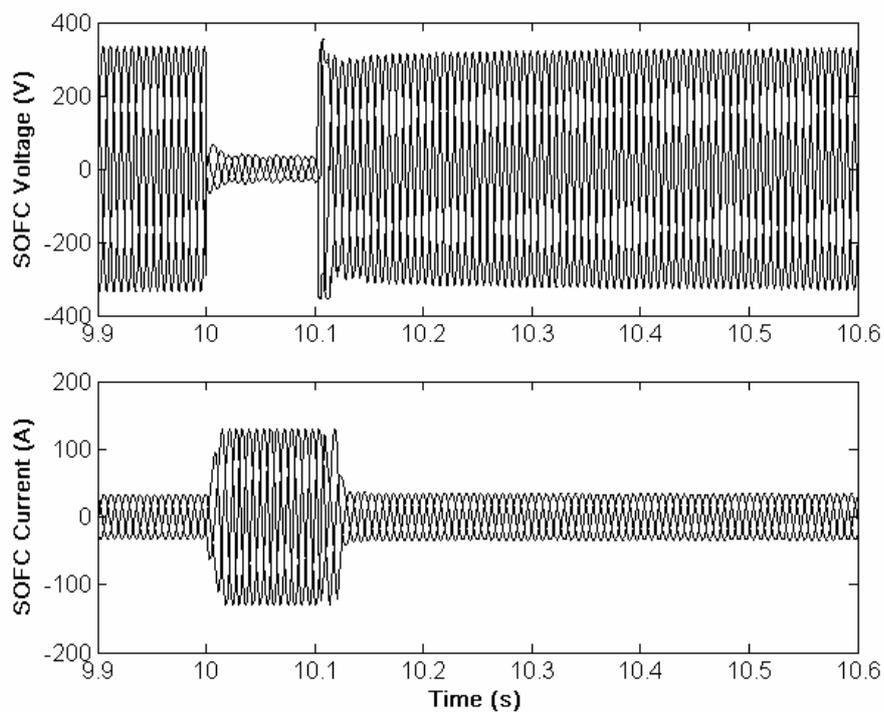
O comportamento da micro-rede foi então novamente analisado, considerando que os geradores assíncronos presentes foram retirados de serviço em simultâneo com a eliminação do defeito (correspondente à acção das protecções C1, C1.1 e C1.2). Os resultados obtidos são apresentados em seguida.



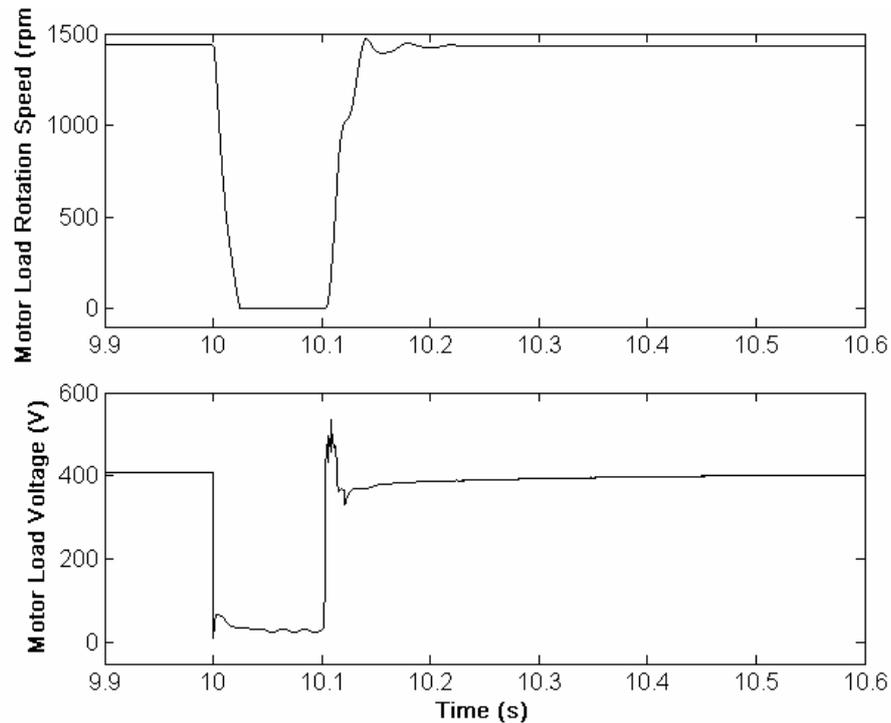
**Fig. 56 – Comportamento da frequência na micro-rede (c.c. na MT, sem geradores assíncronos)**



**Fig. 57 – Comportamento da tensão e corrente no VSI (c.c. na MT, sem geradores assíncronos)**



**Fig. 58 – Comportamento da tensão e corrente na SOFC (c.c. na MT, sem geradores assíncronos)**



**Fig. 59 – Comportamento da velocidade de rotação e tensão numa carga motor (c.c. na MT, sem geradores assíncronos)**

Pode ser agora observado que o comportamento da frequência da micro-rede (Fig. 56) é, nesta situação, mais suave que no caso anterior. De realçar que o desvio de frequência verificado é neste caso mais elevado uma vez que se perdeu alguma capacidade de geração com a saída de serviço dos geradores de indução, o que causou um desequilíbrio inicial maior após o *islanding* da micro-rede.

É ainda possível verificar que praticamente não existem distorções nas formas de onda da tensão e da corrente (Fig. 57 e Fig. 58).

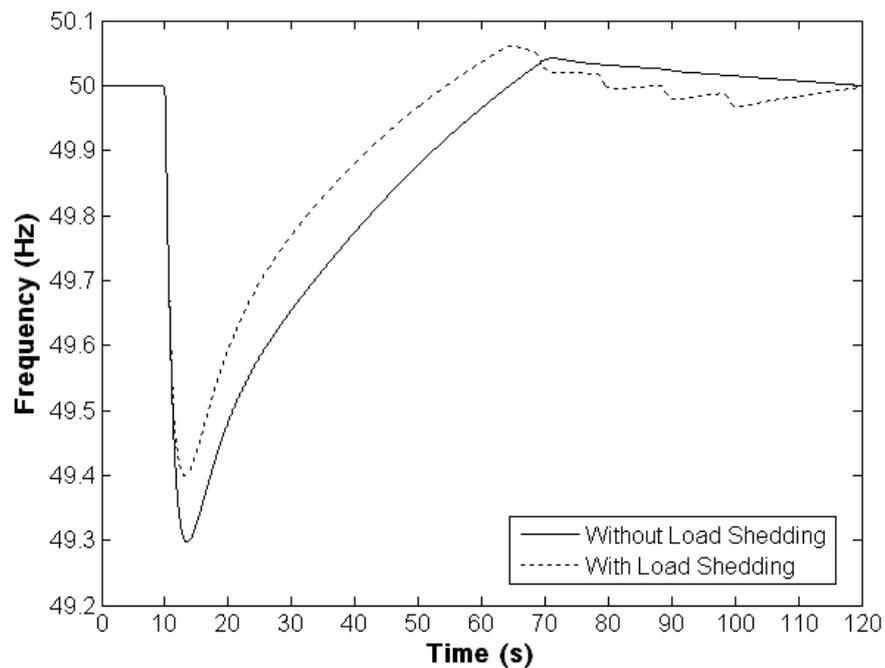
No que respeita às cargas motor presentes, a tensão volta rapidamente ao seu valor nominal (Fig. 59), após a eliminação do defeito, não se verificando oscilações significativas de tensão.

É possível, então, observar que a estabilidade da micro-rede pode ser mantida com uma razoável dose de segurança para tempos de eliminação de defeito desta ordem.

### 8.2.1.2 Influência do Deslastre Frequencimétrico de Cargas

A adopção de estratégias de deslastre de cargas não-essenciais é um recurso extremamente importante para lidar com situações extremas de defeito e de desequilíbrio entre produção e consumo.

Mais uma vez, considerou-se uma situação com a micro-rede a operar interligada com a rede de MT antes da ocorrência do defeito e o caso de um curto-circuito (F1) na rede de MT aos 10 s, com um tempo de eliminação do defeito de 100 ms, por acção da protecção C1. Em virtude dos resultados mostrados na secção anterior, considera-se que os geradores assíncronos são desligados em simultâneo com a eliminação do defeito, por acção das protecções C1.1 e C1.2. Pretende-se observar o impacto da estratégia de deslastre na estabilidade da micro-rede em situações de defeito.



**Fig. 60 – Comportamento da frequência considerando a inclusão ou não de estratégias de deslastre de carga (c.c. na MT, com Load Shedding)**

O deslastre foi realizado numa carga de 10 kW e 2.5 Kvar, segundo o esquema definido na Secção 3.7.3.

Pode ser observado na Fig. 60 que, recorrendo a estratégias de deslastre de cargas, o desvio de frequência verificado é menor, como de resto já era de esperar. O deslastre ocorreu para dois patamares de carga (perante o desvio de frequência de mais de 0.5 Hz), sendo que a carga foi posteriormente religada em quatro passos de carga, após 60 s.

### **8.2.1.3 Influência da Resistência do Defeito**

Um factor que condiciona fortemente o comportamento dinâmico da micro-rede é a resistência do defeito.

Assim, torna-se interessante observar a influência da resistência do defeito no comportamento dinâmico da micro-rede. Foi considerada uma situação com a micro-rede a operar interligada com a rede de MT antes da ocorrência do defeito e o caso de um curto-circuito (F1) na rede de MT, considerando um tempo de eliminação de defeito de 100 ms (acção da protecção C1), para diversos valores de resistência de defeito (1  $\Omega$ , 10  $\Omega$  e 100  $\Omega$ , na rede de MT). Pretendeu-se avaliar o comportamento da micro-rede para situações bastante desfavoráveis (um defeito quase franco) e para situações em teoria menos desfavoráveis (caso de um defeito fortemente resistivo). Foi aqui incluído o mecanismo de deslastre frequencimétrico. Os geradores assíncronos foram desligados em simultâneo com a eliminação do defeito, por acção das protecções C1.1 e C1.2.

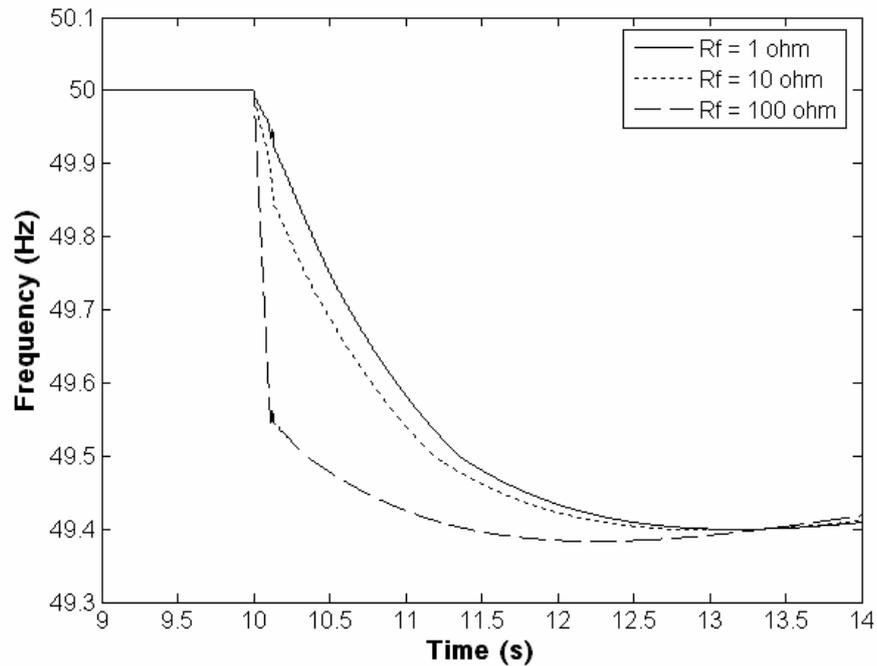


Fig. 61 – Comportamento da frequência da micro-rede para vários valores de resistência de defeito (c.c. na MT)

Pode ser observado na Fig. 61 que o aumento da resistência do defeito origina uma queda mais acentuada na frequência da micro-rede. Este comportamento está relacionado com o funcionamento do VSI. Isto deve-se ao facto de, em todos os casos considerados, a corrente exceder o valor limite considerado para o VSI (foi considerado o valor de 375 A), de modo que foi accionado o mecanismo de limitação de corrente no VSI, através de uma mudança no modo de operação do inversor (como se explica na Secção 3.2). Assim, como a corrente no inversor é praticamente idêntica para os três valores de defeito, mas as perdas são maiores para o caso de uma maior resistência de defeito, neste último caso o inversor fornece uma maior quantidade de potência activa durante o defeito. Uma vez que o VSI opera de forma análoga a uma máquina síncrona convencional, um aumento na potência activa entregue conduz a uma queda mais acentuada na frequência.

#### 8.2.1.4 Influência do Tempo de Eliminação do Defeito

O comportamento dinâmico da micro-rede é também afectado de forma dramática pelo tempo de eliminação de um defeito.

Neste sentido, pretendeu observar-se a influência do tempo de eliminação de um defeito na estabilidade da micro-rede. Foi considerada uma situação com a micro-rede a operar interligada com a rede de MT antes da ocorrência do defeito e o caso de um curto-circuito (F1) na rede de MT aos 10 s, para diversos tempos de eliminação de defeito (por acção da protecção C1) de forma a avaliar o impacte deste factor no comportamento dinâmico da micro-rede. Foi ainda utilizado o mecanismo de deslastre frequencimétrico de carga. Considerou-se que os geradores assíncronos foram desligados sempre 100 ms após a ocorrência do defeito, por acção das protecções C1.1 e C1.2.

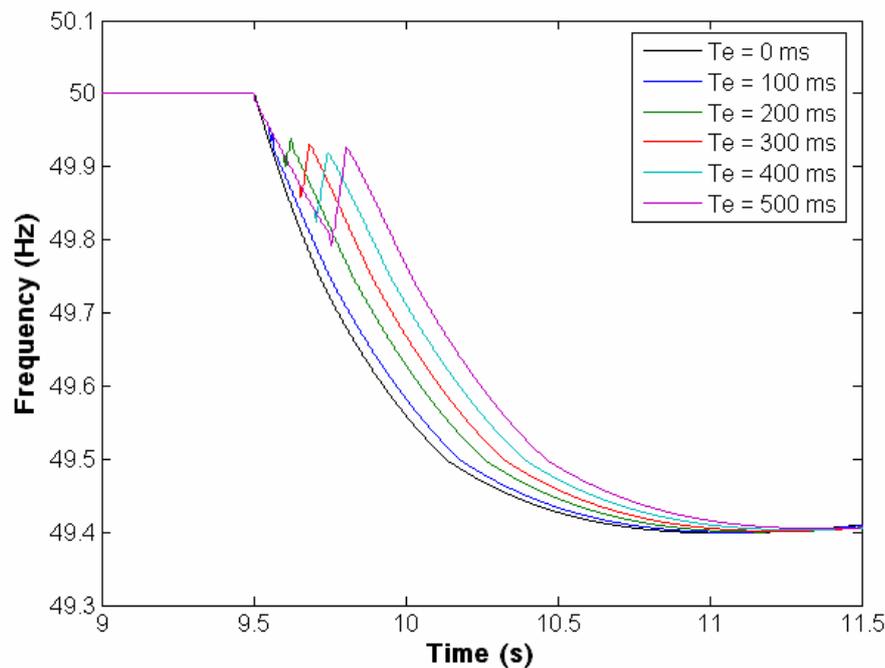


Fig. 62 – Comportamento da frequência da micro-rede para vários tempos de eliminação de defeito (c.c. na MT)

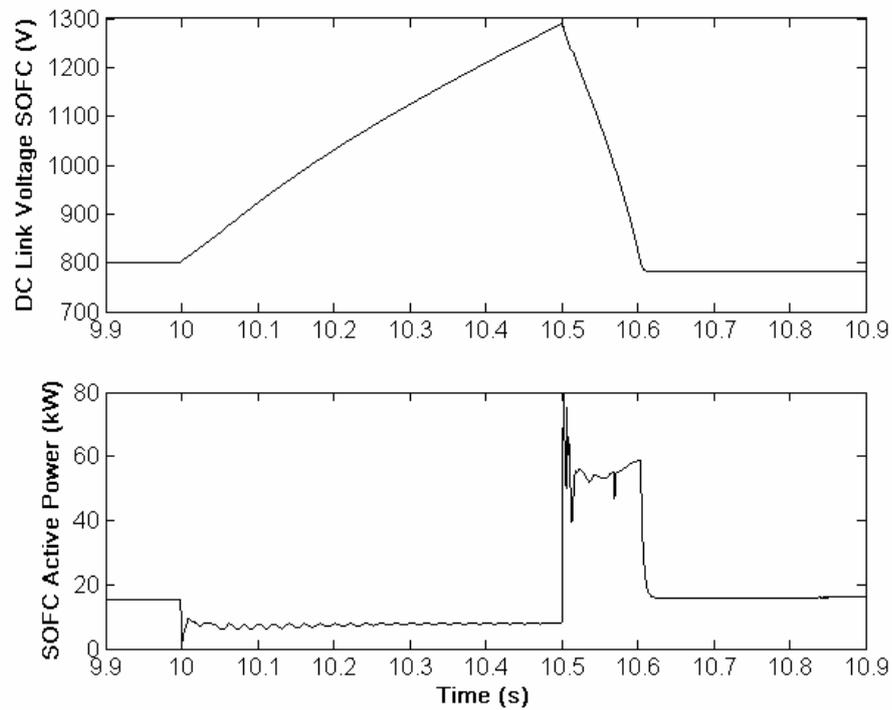
Nota: A curva correspondente a uma eliminação instantânea do defeito ( $T_e = 0$  ms na Fig. 62) é mostrada apenas para servir de referência às restantes curvas.

Atentando no comportamento dinâmico da micro-rede (Fig. 62), verifica-se uma subida transitória na frequência após a eliminação do defeito e uma posterior redução para os 49.4 Hz, independentemente do tempo de eliminação de defeito, mas mais notória para tempos de eliminação mais longos.

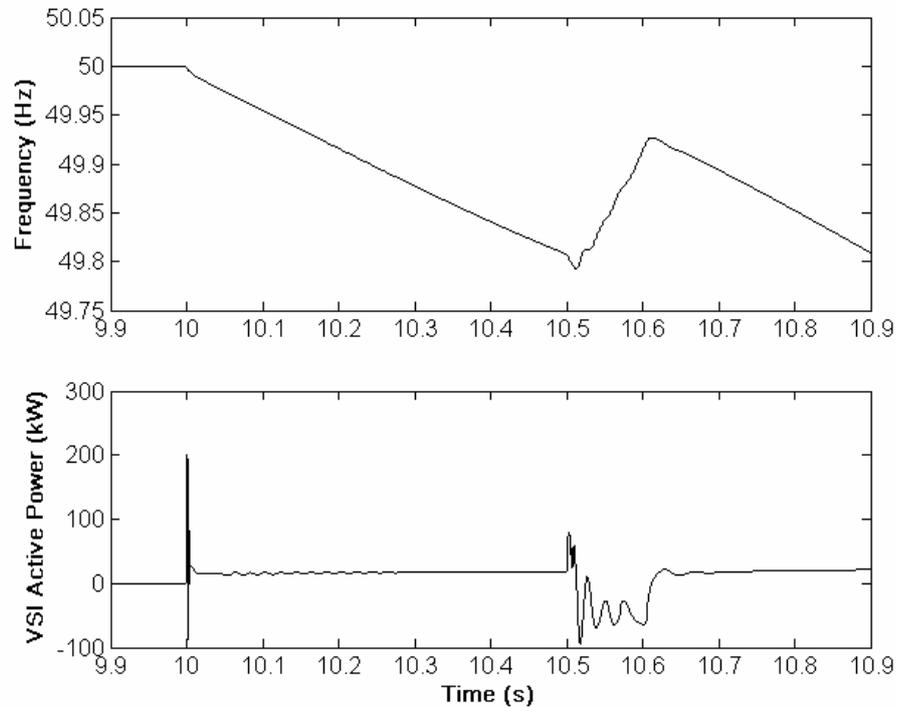
Este comportamento exigiu alguma reflexão, uma vez que a eliminação do defeito origina um desequilíbrio geração/carga (com a carga superior à geração), somado ao facto de terem sido desligados os dois geradores assíncronos directamente ligados à rede.

Foi, então, possível observar que este comportamento estava ligado ao comportamento dos inversores fonte de corrente presentes. De facto, estes inversores acumulam muita energia no *link* DC durante o defeito, com a tensão DC a subir para valores extremamente elevados (Fig. 63, para um defeito eliminado em 500 ms). Após a eliminação do defeito a energia acumulada vai ser injectada na micro-rede (Fig. 63). Vai haver então um desequilíbrio “transitório” fortíssimo de geração/carga, com um excesso de geração pela energia proveniente dos três inversores fonte de corrente presentes. Este excesso de geração vai ser absorvido pelo conjunto VSI + *flywheel*, uma vez que as cargas não pedem toda essa energia. Notar que a frequência exibida na Fig. 64 corresponde a um *zoom* da mostrada na Fig. 62, para um defeito eliminado em 500 ms. Este comportamento, apesar de ser aparentemente contraditório, é explicado pelo facto de o VSI operar de forma a manter a sua tensão constante, mas ao ver a sua corrente imposta pela rede à qual está ligado, poder absorver ou injectar potência em função das condições na micro-rede. Esgotada a energia proveniente dos inversores fonte de corrente, o desequilíbrio geração/carga leva a que a frequência volte a cair, pelo facto de haver agora um excesso de carga face à geração, decorrente do processo de *islanding* da micro-rede.

Olhando agora para o comportamento global da micro-rede na Fig. 62, uma vez que o desvio de frequência verificado é da ordem dos 0.6 Hz não existe o risco de ultrapassar o mínimo de frequência na maioria das protecções, até porque o limite admissível para desvio de máximo de frequência em redes isoladas é de 1 Hz, segundo a norma NP EN 50160 [43]. Consequentemente, é possível verificar que a estabilidade da micro-rede não está comprometida, respeitados os valores-limite definidos na norma.



**Fig. 63 – Comportamento da tensão no *link* DC e potência activa na SOFC (c.c. na MT)**



**Fig. 64 – Comportamento da frequência da micro-rede e potência activa no VSI (c.c. na MT)**

## 8.2.2 Curto-Circuitos na Rede de Baixa Tensão

Nesta secção foi considerada uma rede-teste distinta da utilizada anteriormente. Os parâmetros desta rede-teste são também apresentados em anexo.

A rede-teste utilizada é apresentada na Fig. 65 e a respectiva plataforma de simulação é apresentada na Fig. 66.

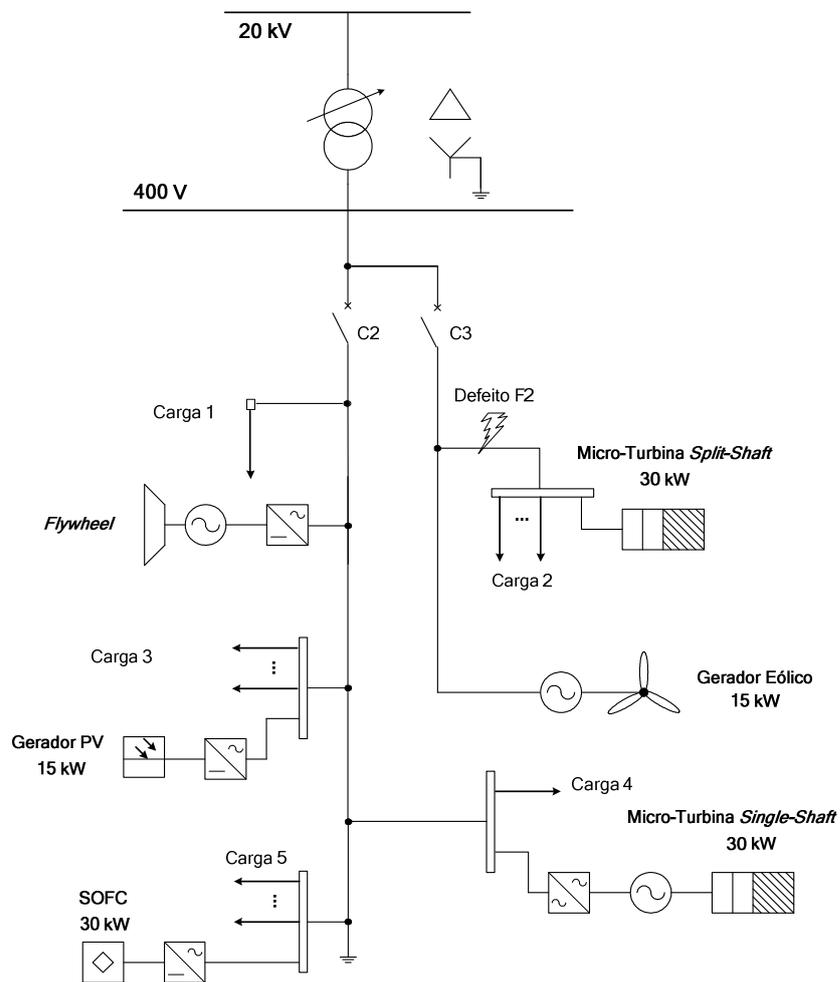


Fig. 65 – Rede-teste utilizada para simulação de um defeito na rede BT

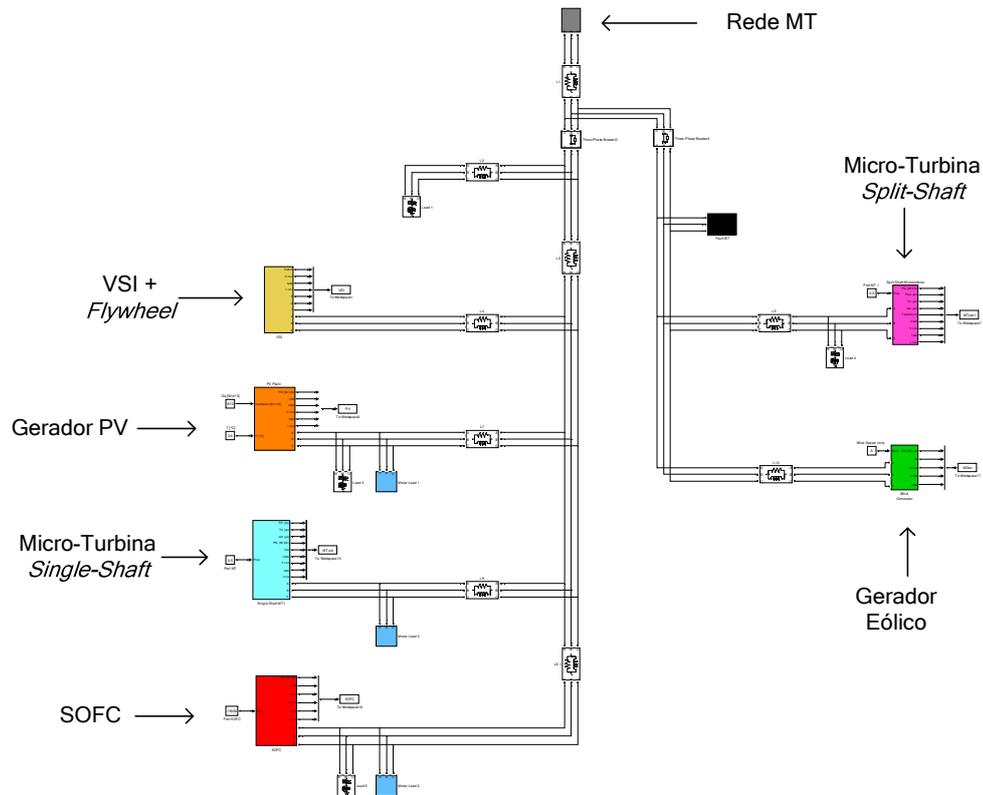


Fig. 66 – Plataforma de simulação em *Matlab® Simulink®* para simulação de um defeito na rede BT

O cenário de operação considerado foi o mesmo da Secção 8.2.1, sendo que as mudanças verificadas foram apenas ao nível da topologia da micro-rede.

Para simulação de um defeito na rede de BT, foi considerado que a micro-rede já operava em rede isolada antes do defeito, uma vez que este foi o caso mais interessante do ponto de vista da manutenção da estabilidade da micro-rede. Desta forma, foi possível avaliar o impacto da baixa inércia global deste tipo de SEE.

Considerou-se um curto-circuito (F2) ocorrido na BT aos 10 s, eliminado em 100 ms devido ao isolamento da linha onde se verificou o defeito, por acção da protecção C3. O isolamento do defeito provocou a saída de serviço da micro-turbina *split-shaft*, do gerador eólico e de uma carga.

Os principais resultados obtidos são apresentados em seguida.

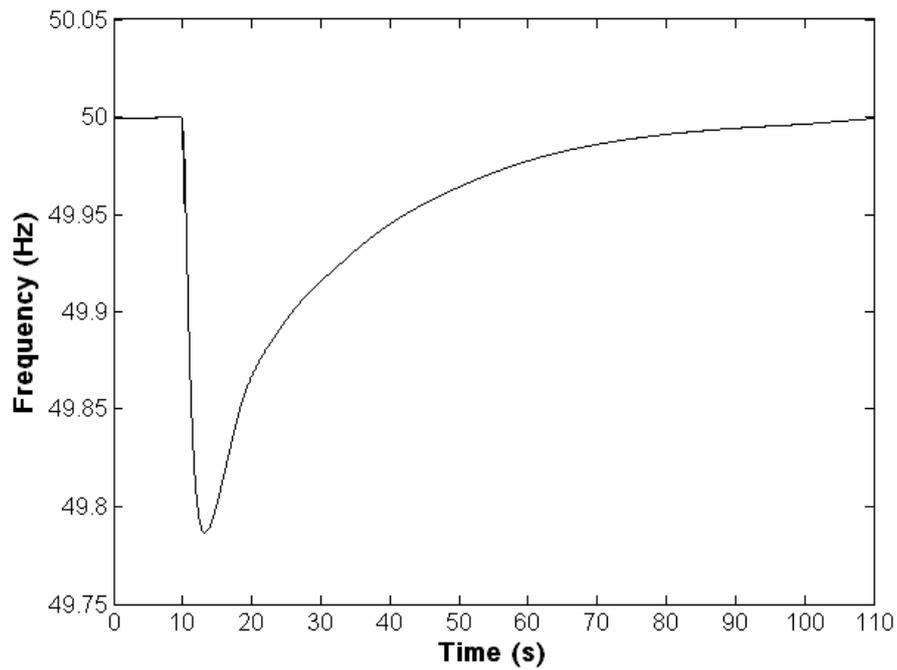


Fig. 67 – Comportamento da frequência na micro-rede (c.c. na BT)

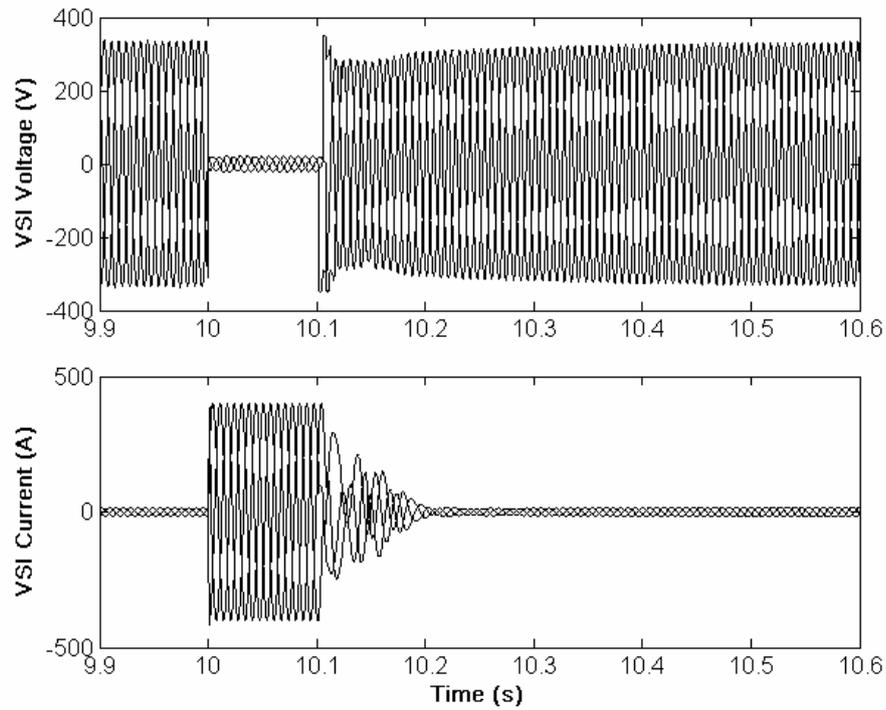
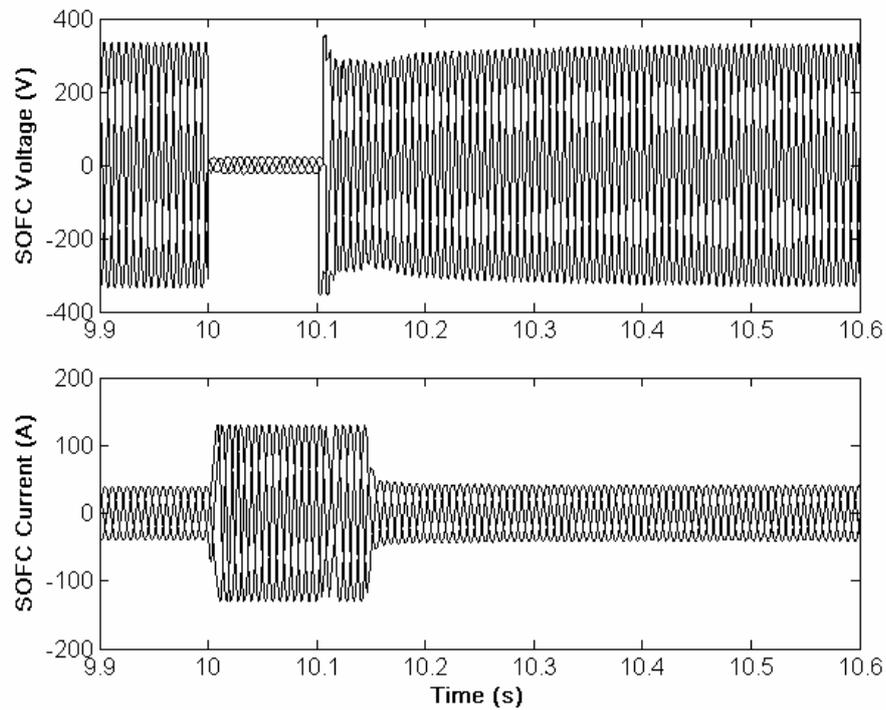
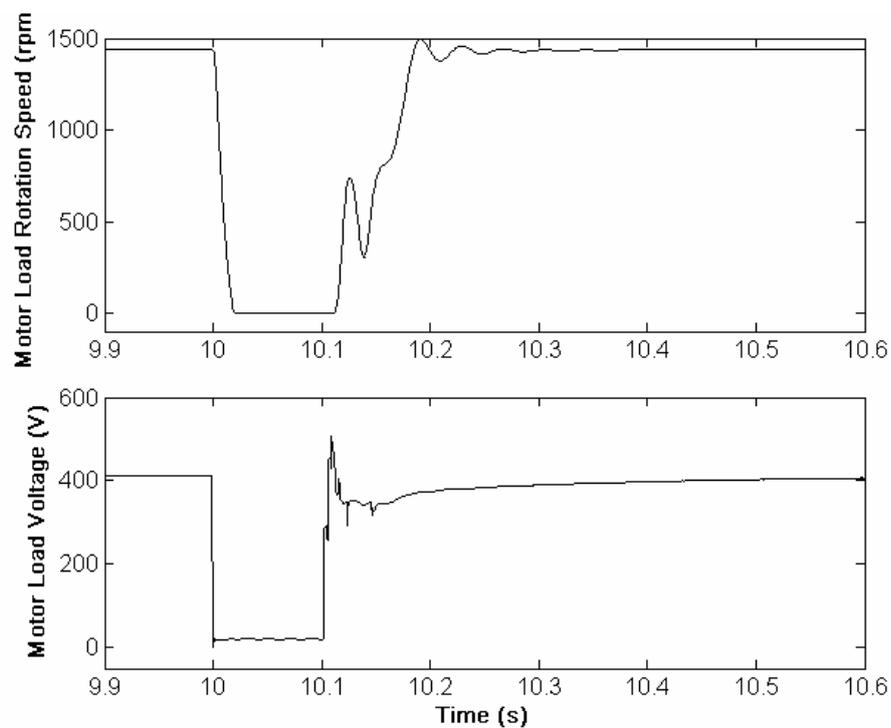


Fig. 68 – Comportamento da tensão e corrente no VSI (c.c. na BT)



**Fig. 69 – Comportamento da tensão e corrente na SOFC (c.c. na BT)**



**Fig. 70 – Comportamento da velocidade de rotação e tensão numa carga motor (c.c. na BT)**

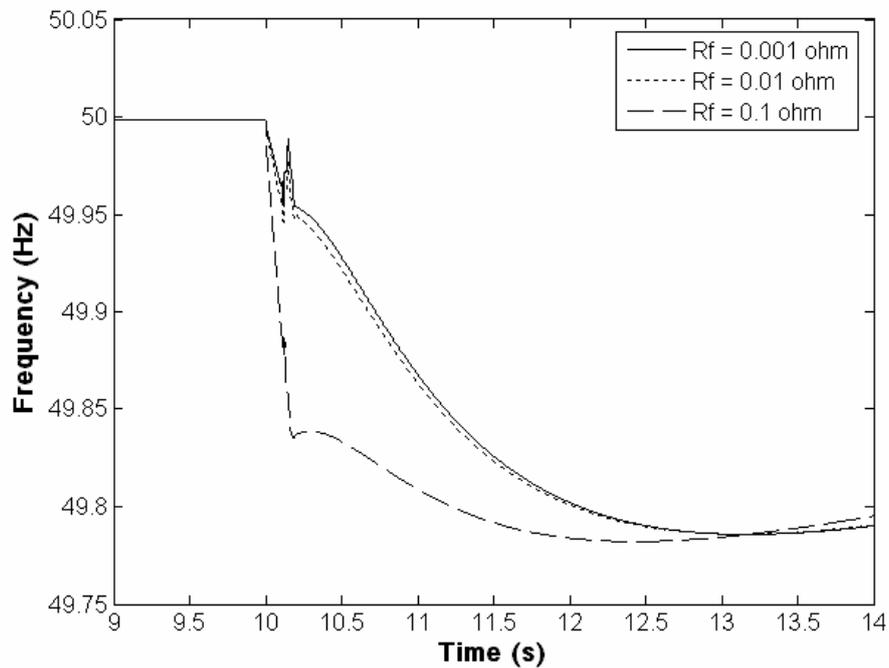
É possível observar que o defeito foi eliminado sem consequências para a estabilidade da micro-rede. O desvio de frequência observado é relativamente baixo (Fig. 67), sobretudo se se tiver em consideração que a micro-rede estava a operar em modo isolado.

A corrente de defeito foi, ainda assim, elevada, pelo que foi accionada uma vez mais a função de limitação de corrente no VSI (Fig. 68).

É de realçar ainda que a resposta do sistema foi pronta uma vez que não se perdeu nenhuma das unidades encarregues da regulação secundária de frequência, pelo que se tornou possível o regresso à frequência nominal do sistema.

### **8.2.2.1 Influência da Resistência do Defeito**

Em seguida, pretendeu analisar-se a influência da resistência do defeito no comportamento dinâmico da micro-rede, funcionando em rede isolada. Foi considerada uma situação com a micro-rede a operar em modo isolado e o caso de um curto-circuito na micro-rede, eliminado em 100 ms, admitindo três valores de resistência de defeito (1 m $\Omega$ , 10 m $\Omega$  e 100 m $\Omega$  na base de MT, correspondentes a 0.4 m $\Omega$ , 4 m $\Omega$  e 40 m $\Omega$  na base de BT). Os desvios de frequência verificados são apresentados na figura seguinte.



**Fig. 71 – Comportamento da frequência da micro-rede para vários valores de resistência de defeito (c.c. na BT)**

Como pode ser observado na Fig. 71, a queda da frequência verificada foi tanto mais acentuada quanto maior foi o valor da resistência de defeito, tal como sucedia no caso de um curto-circuito na MT. Assim, as considerações tecidas na Secção 8.2.1.3 são também válidas para este caso.

### 8.2.2.2 Influência do Tempo de Eliminação do Defeito

Vários tempos de eliminação de defeito foram considerados, de forma a analisar a resposta dinâmica da micro-rede em funcionamento isolado.

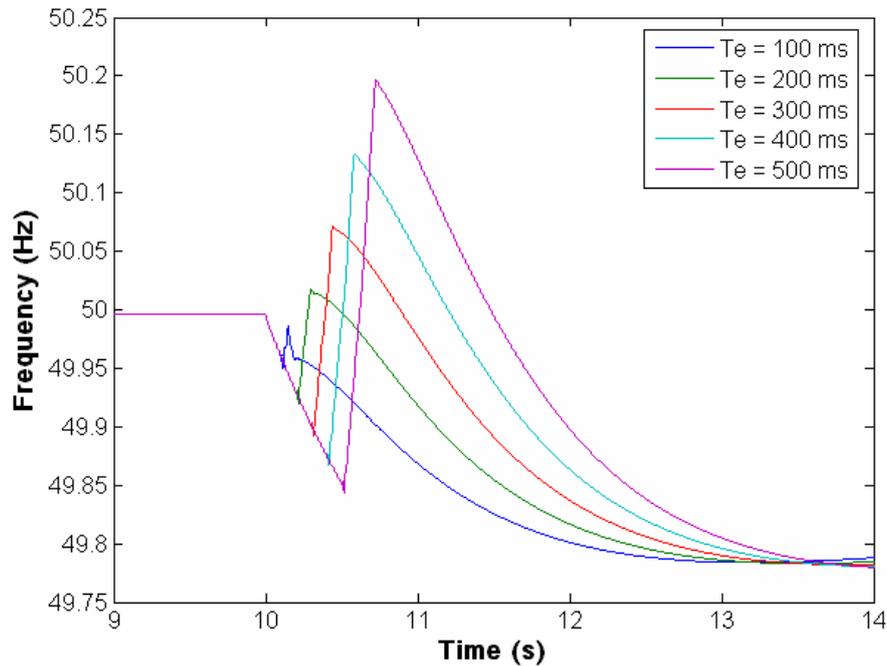


Fig. 72 – Comportamento da frequência da micro-rede para vários tempos de eliminação de defeito (c.c. na BT)

Os resultados obtidos, observados na Fig. 72, podem ser explicados de forma análoga ao sucedido para o caso de um defeito na rede de MT. Assim, é possível ver que a estabilidade da micro-rede não é perdida para tempos de eliminação de defeito até 500 ms, já que o desvio de frequência está ainda bastante distante do valor de referência de 1 Hz.

### 8.3 Conclusão

Neste capítulo avaliou-se o desempenho das estratégias de controlo secundário admitidas: controlo secundário local e controlo secundário centralizado. Verificou-se que ambas as estratégias apresentam uma performance dinâmica satisfatória, permitindo um controlo eficiente do funcionamento da micro-rede. Acresce que a utilização de uma estratégia de controlo secundário centralizado traz benefícios adicionais ao sistema por permitir uma gestão simultaneamente técnica e económica do sistema, face à gestão puramente técnica baseada num controlo secundário local.

Neste capítulo foi ainda avaliada a performance dinâmica da micro-rede face à ocorrência de defeitos do tipo curto-circuito que ocorram na rede de distribuição a montante ou no interior da própria micro-rede. Foi observado que a presença de geradores assíncronos directamente ligados à rede tem uma influência decisiva na manutenção da estabilidade da micro-rede e que as baixas inércias verificadas no sistema (em particular das cargas do tipo motor) levam à necessidade de uma rápida eliminação dos defeitos. Os defeitos ocorridos na rede de distribuição a montante são potencialmente mais perigosos para a estabilidade da micro-rede, decorrente principalmente do desequilíbrio entre geração e carga que se verifique no momento do isolamento da micro-rede. Estratégias de deslastre de cargas não-essenciais combinadas com a utilização de dispositivos de armazenamento de energia provaram ser soluções interessantes para minimizar o impacto da ocorrência de curto-circuitos.

## Capítulo 9 – Conclusões e Perspectivas Futuras

Neste capítulo final são apresentadas as principais conclusões sobre o trabalho desenvolvido e são referidas as perspectivas de desenvolvimento e possibilidades de trabalho futuro.

### 9.1 Objectivos atingidos

A essência deste trabalho reside na apresentação de um novo paradigma de exploração dos SEEs, resultante de uma progressiva integração de PD ao nível das redes de BT. Neste novo cenário, admitiu-se um novo conceito de operação deste tipo de sistemas, permitindo o funcionamento das redes de BT em rede isolada sob certas condições, contrariamente ao estabelecido actualmente pela visão tradicional.

Neste sentido, pretendeu-se com este trabalho, contribuir para uma avaliação das condições técnicas de operação de uma micro-rede em funcionamento interligado com a rede principal de distribuição mas sobretudo em modo de funcionamento isolado. Para este efeito foi desenvolvida uma plataforma de simulação que permite a análise do comportamento dinâmico de uma micro-rede. Os resultados obtidos a partir da realização de um extenso número de simulações, em diversas condições de operação, indicam que é possível uma passagem segura a rede isolada, quer em casos de *islanding* forçado, quer em casos de *islanding* planeado.

As estratégias de controlo desenvolvidas evidenciam que é possível garantir um funcionamento robusto e seguro da micro-rede. O modo de controlo implementado mostra que é viável um mecanismo de regulação de frequência eficiente em redes de BT que não possuam máquinas síncronas, sendo a função destas realizada pelos dispositivos conversores de energia eléctrica. Observou-se ainda que a existência de dispositivos de armazenamento de energia, adequadamente dimensionados e controlados, aliada à utilização de estratégias de deslastre de cargas não-essenciais (especialmente perante desequilíbrios elevados geração/consumo), se mostrou extremamente importante para assegurar uma operação estável da micro-rede em modo isolado.

De realçar, no entanto, que a estrutura de controlo da micro-rede é especialmente sensível a um determinado número de parâmetros. A optimização dos parâmetros de controlo toma especial relevância uma vez que se observou que a estabilidade da micro-rede é acima de tudo garantida por uma escolha acertada destes parâmetros.

Analisaram-se ainda os requisitos para o estabelecimento de uma estrutura de comunicações para o caso de uma micro-rede. Foi observado que existem soluções que asseguram a viabilidade de um sistema deste tipo, sendo que a escolha final deverá passar pela conjugação de várias soluções, condicionada por factores técnicos mas sobretudo económicos.

No que respeita à implementação de uma função de controlo secundário, observou-se que esta função, quando centralizada, evidencia uma performance mais interessante que o controlo secundário local, visto permitir a gestão da micro-rede baseada não só em critérios técnicos mas também económicos.

O controlo secundário centralizado apresenta várias potencialidades, especialmente se enquadrado como um módulo num sistema mais complexo de gestão da micro-rede, assegurando uma optimização da operação do sistema. Um sistema deste tipo toma especial importância na medida em que se torna necessário assegurar um equilíbrio entre geração controlável e geração não-controlável, de forma a garantir uma eficiente regulação de frequência.

No que respeita à análise de estabilidade da micro-rede face à ocorrência de defeitos do tipo curto-circuito, os estudos efectuados indicam que estes devem ser eliminados o mais rapidamente possível, e os geradores assíncronos presentes desligados, de forma a não comprometer de forma irreversível a estabilidade da micro-rede. Com efeito, observou-se que o comportamento dos geradores assíncronos em situações de defeito causa sérias dificuldades a um eficiente funcionamento da estrutura de controlo montada para operar a micro-rede, em particular em modo de rede isolada.

Também a inércia dos motores presentes na micro-rede tem um impacto significativo no comportamento dinâmico da micro-rede, pelo que a micro-rede deve poder manter a estabilidade mesmo em situações desfavoráveis, com a existência de várias cargas do tipo motor com baixas constantes de inércia (especialmente em casos em que a característica binário/velocidade dos motores não seja tão favorável, como nos casos ensaiados).

Verificou-se que os defeitos na rede de MT foram mais comprometedores para a estabilidade da micro-rede, devido ao desequilíbrio entre geração e consumo causado pelo *islanding* da micro-rede no processo de eliminação do defeito.

De referir que a plataforma de simulação desenvolvida mostrou ser uma ferramenta adequada para uma análise dinâmica, revelando flexibilidade e robustez. Esta plataforma de simulação permitiu conjugar vários tipos de tecnologia de micro-geração e observar o comportamento dinâmico do conjunto.

## 9.2 Perspectivas e Desenvolvimentos Futuros

Ao longo do trabalho realizado verificou-se existirem vários assuntos que, por razões de orientação do trabalho ou por razões de tempo, não foram abordados no âmbito desta dissertação. Por isso, alguns destes assuntos poderão ser alvo de desenvolvimentos futuros e são mencionados em seguida.

No contexto da análise do comportamento dinâmico de uma micro-rede, utilizando a plataforma de simulação desenvolvida, face à dimensão e complexidade dos modelos utilizados e ao conseqüente peso computacional exigido, torna-se importante a simplificação e agregação de alguns modelos de modo a permitir simular sistemas de maior dimensão. De facto, a evolução do conceito de micro-rede para um conceito multi micro-rede permitirá explorar o desempenho de um sistema de dimensão mais elevada, de forma a avaliar o controlo e a gestão global deste sistema. Neste sentido, será necessário desenvolver um conceito diferente para o módulo de controlo secundário centralizado que se adequa a esta situação.

No que respeita à estrutura de comunicações da micro-rede, verifica-se ser importante uma análise quantitativa (e não tão somente qualitativa, como sucedeu neste trabalho) dos requisitos do sistema, tomando em consideração a globalidade das funções de controlo da micro-rede. Uma análise mais aprofundada deste tema deverá permitir o estabelecimento de condições mínimas para cada tecnologia e permitir escolher, de uma forma segura, soluções concretas a aplicar em cada caso.

Adicionalmente, julga-se interessante investigar futuramente a possibilidade de implementação de um controlo centralizado de potência reactiva, de uma forma análoga ao que

sucedo no controlo de potência activa, para permitir uma gestão eficiente das necessidades de potência reactiva da micro-rede.

No que respeita a situações de ocorrência de curto-circuitos e a medidas de mitigação dos seus efeitos, considera-se relevante a análise da possibilidade do recurso a deslastre de cargas do tipo motor monitorizando o abaixamento de tensão na rede. Uma vez que foi visto que este tipo de cargas tem grande influência na manutenção da estabilidade da micro-rede, esta possibilidade poderá permitir uma maior segurança de operação do sistema após a ocorrência de defeitos.

Julga-se também ser útil uma alteração ao modelo do inversor VSI, mais particularmente na função de limitação de corrente do inversor, que possibilite a manutenção dos geradores assíncronos em funcionamento após a ocorrência de um curto-circuito. De referir que essa alteração foi tentada no decorrer deste trabalho sem, no entanto, ter sido possível alcançar uma solução satisfatória.

Também em situações de defeito, uma mudança de estratégia de controlo da micro-rede pode ajudar a minimizar as consequências de um curto-circuito ocorrido no interior da micro-rede. Ao mudar o modo de controlo dos inversores de *single-master* para *multi-master* deverá ser possível reduzir a porção da micro-rede a isolar, uma vez que se torna ainda viável o controlo da micro-rede, garantindo a existência de um inversor que opere como um VSI e forneça uma referência de frequência e de tensão.

## Referências

- [1] World Alliance for Decentralized Energy (WADE), Survey of Decentralized Energy, 2005. Available online: <http://www.localpower.org/resources/publications.asp>
- [2] J. A. Peças Lopes, *et al.*, “Islanding de Redes AT/MT e BT com Produção Distribuída”, IST Fórum Energia – Inovação na Produção e Transporte de Energia Eléctrica, Novembro 2004.
- [3] Consortium for Electric Reliability Technology Solutions (CERTS): <http://certs.lbl.gov/>
- [4] J. A. Peças Lopes, J. Tomé Saraiva, N. Hatziaargyriou, N. Jenkins, “Management of MicroGrids”, JIEEC2003 Bilbao, 2003. Available online: [http://microgrids.power.ece.ntua.gr/documents/Microgrids\\_management\\_jieec2003.pdf](http://microgrids.power.ece.ntua.gr/documents/Microgrids_management_jieec2003.pdf)
- [5] J. A. Peças Lopes, C. Moreira, F. Resende, “MicroGrids Black Start and Islanding Operation”, Proceedings of 15<sup>th</sup> Power Systems Computation Conference, August 2005.
- [6] MicroGrids – Home Page: <http://microgrids.power.ece.ntua.gr/index.htm>
- [7] F. Katiraei, M. R. Iravani and P. W. Lehn, “Micro-grid autonomous operation during and subsequent to islanding process”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, No. 1, pp. 248-257, January 2005.
- [8] Y. Zoka, *et al.*, “An Interaction Problem of Distributed Generators Installed in a MicroGrid”, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies, vol. 2, pp. 795-799, April 2004.
- [9] R. H. Lasseter, “MicroGrids”, in Proceedings of IEEE/PES Winter Meeting, IEEE vol. 1, pp. 305 – 308, 2002.
- [10] S. Barsali, M. Ceraolo, P. Pelacchi, D. Poli, “Control techniques of Dispersed Generators to improve the continuity of electricity supply”, Proceedings of IEEE/PES Winter Meeting, pp. 789-794, 2002.
- [11] J. A. Peças Lopes, C. L. Moreira, A. G. Madureira, “Defining Control Strategies for Analysing MicroGrids Islanded Operation”, Proceedings of St. Petersburg PowerTech 2005, June 2005.
- [12] Alfred Engler, *et al.*, “Local Micro Source Controller Strategies and Algorithms”, MicroGrids Project Deliverable DB1, February 2004.

- [13] M. C. Chandorkar, D. M. Divan, R. Adapa, “Control of Parallel Connected Inverters in Standalone ac Supply Systems”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 29, No. 1, pp. 136-143, February 1993.
- [14] George Kariniotakis, *et al.*, “Digital Models for Micro Sources”, MicroGrids Project Deliverable DA1, June 2003.
- [15] A. Engler, “Applicability of Droops in Low Voltage Grids”, International Journal of Distributed Energy Resources, vol. 1, No 1, pp. 3-15, 2004.
- [16] Oleg Osika, *et al.*, “Description of the laboratory micro grids”, MicroGrids Project Deliverable DH1, February 2004.
- [17] Y. Zhu, K. Tomsovic, “Development of models for analyzing the load-following performance of microturbines and fuel cells”, Electric Power Systems Research, No. 62, pp. 1-11, 2002.
- [18] J. Padullés, G.W. Ault, J. R. McDonald, “An integrated SOFC plant dynamic model for power systems simulation”, Journal of Power Sources, No. 86, pp. 495-500, 2000.
- [19] N. Hatziargyriou *et al.*, “Modelling of Micro-Sources for Security Studies”, in CIGRE Session, 2004.
- [20] Nuno Gil, “Elaboração de Procedimentos e Critérios para Definição de Limites de Elegibilidade de Aceitação de Produção Renovável em Redes Isoladas”, dissertação de Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Setembro 2004.
- [21] José Ruela, “Progress Report for WPF”, MicroGrids Project Progress Report, March 2005.
- [22] Nikos Hatziargyriou, *et al.*, “MicroGrid Central Controller Strategies and Algorithms”, MicroGrids Project Deliverable DC1, June 2004.
- [23] K. Tomsovic, D. Bakken, V. Venkatasubramanian, and A. Bose, “Designing the Next Generation of Real-Time Control, Communication and Computations for Large Power Systems”, submitted to IEEE Proceedings – Special Issue on Energy Infrastructure Systems, 2004.
- [24] Lars Selander, “Power-Line Communications. Channel Properties and Communication Strategies”, Ph.D. Thesis, 1999. Available online: <http://www.enersearch.se/knowledgebase/publications/theseses/pow-line.html>
- [25] EN 50065, “In signaling on low-voltage electrical installations in the frequency range 3 kHz to 148.5 kHz”, 2002.
- [26] T. Erge, *et al.*, “Role of Communication Technologies for the Development of DG Networks”, DISPOWER Project Deliverable D3.1, 2003.

- [27] IEEE Standard 802.11, “IEEE standard for wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications”, 2003.
- [28] Wikipedia, The Free Encyclopaedia: [http://en.wikipedia.org/wiki/Main\\_Page](http://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page)
- [29] Jan Machowski, Janusz W. Bialek, James R. Bumby, “Power System Dynamics and Stability”, John Wiley & Sons, New York, 1998.
- [30] S. Bhowmik, K. Tomsovic, A. Bose, “Communication Models for Third Party Load Frequency Control”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, No 1, February 2004.
- [31] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg, “Power Generation, Operation and Control”, John Wiley & Sons, New York, 2<sup>nd</sup> Edition, 1996.
- [32] B. Delfino, F. Fornari, S. Massuco, A. Morini, “Load-Frequency Control: new perspectives in the open access environment”, Proceedings of IEEE/PES Summer Meeting, pp. 1866-1871, July 2000.
- [33] B. Delfino, F. Fornari, S. Massuco, “Load-frequency control and inadvertent interchange evaluation in restructured power systems”, IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., vol. 149, No 5, pp. 607-614, September 2002.
- [34] A. Madureira, C. Moreira, J. Peças Lopes, “Secondary Load-Frequency Control for MicroGrids in Islanded Operation”, in Proc. International Conference on Renewable Energy and Power Quality ICREPQ’05, April 2005.
- [35] Nick Jenkins, *et al.*, “Protection Guidelines for a MicroGrid”, MicroGrids Project Deliverable DE2, June 2005.
- [36] *Institute fur Solare Energieversorgungstechnik (ISET, Alemanha) and SMA Regelsysteme GmbH (Alemanha)*, comunicação pessoal a terceiros.
- [37] S. Papathanassiou, “Study-case LV Network”. Available online: <http://microgrids.power.ece.ntua.gr/documents/Study-Case%20LV-Network.pdf>
- [38] The MathWorks – MATLAB and Simulink for Technical Computing: <http://www.mathworks.com>
- [39] Electromagnetic Transients Program: <http://www.emtp.com>
- [40] J. A. Peças Lopes, *et al.*, “Emergency Strategies and Algorithms”, MicroGrids Project Deliverable DD1, October 2004.
- [41] J. A. Peças Lopes, Carlos Moreira, André Madureira, Fernanda Resende, “Evaluation of the Emergency Strategies during Islanding and Black Start”, MicroGrids Project Deliverable DD2, June 2005.

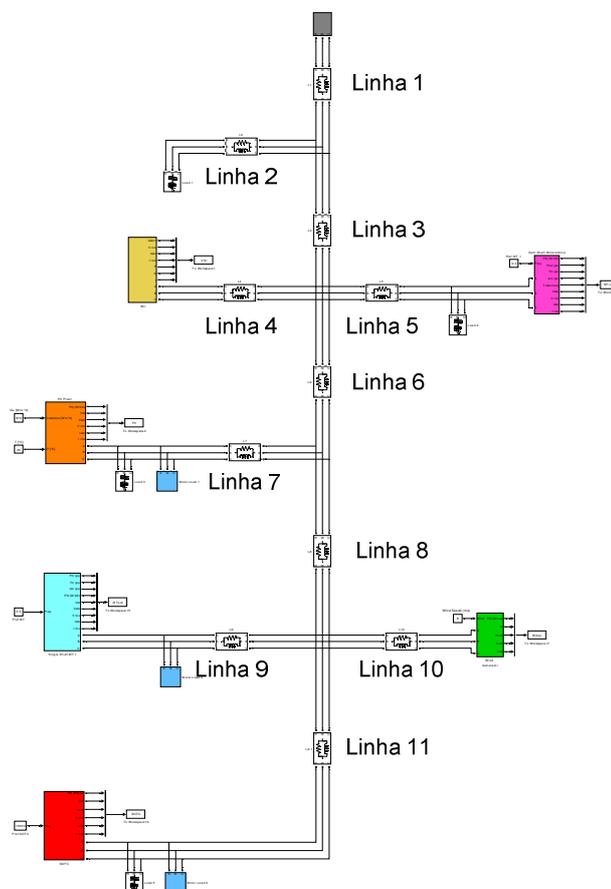
- [42] S. Li, K. Tomsovic, T. Hiyama, “Load Following Functions Using Distributed Energy Resources”, Proceedings of IEEE/PES Summer Meeting, pp. 1756-1761, July 2000.
- [43] NP EN 50160, “Características da tensão fornecida pelas redes de distribuição pública de energia eléctrica”, 1995.

## **Bibliografia**

- Prabha Kundur, “Power System Stability and Control”, EPRI Power System Engineering Series, McGraw-Hill Inc., 1994.
- N. Jenkins, R. Allan, P. Crossley, D. Kirschen and G. Strbac, “Embedded Generation”, IEE Power and Energy Books, 2000.

## Anexo A – Caracterização das Redes-Teste

Para efeitos de reprodutibilidade dos resultados, apresentam-se em seguida os dados das linhas das duas redes-teste utilizadas nesta dissertação.



**Fig. A1 – Rede-teste utilizada para simulação das estratégias de controlo secundário e para simulação de um defeito na MT**

Tabela A1 – Parâmetros da rede-teste utilizada para simulação das estratégias de controlo secundário e para simulação de um defeito na MT

	R ( $\Omega$ )	L (H)
Linha 1	0,0108	0,000118
Linha 2	0,0683	0,007881
Linha 3	0,0216	0,000235
Linha 4	0,0127	0,000233
Linha 5	0,0685	0,001100
Linha 6	0,0108	0,000118
Linha 7	0,0176	0,000586
Linha 8	0,0216	0,000235
Linha 9	0,0263	0,000879
Linha 10	0,1040	0,001655
Linha 11	0,0624	0,001456

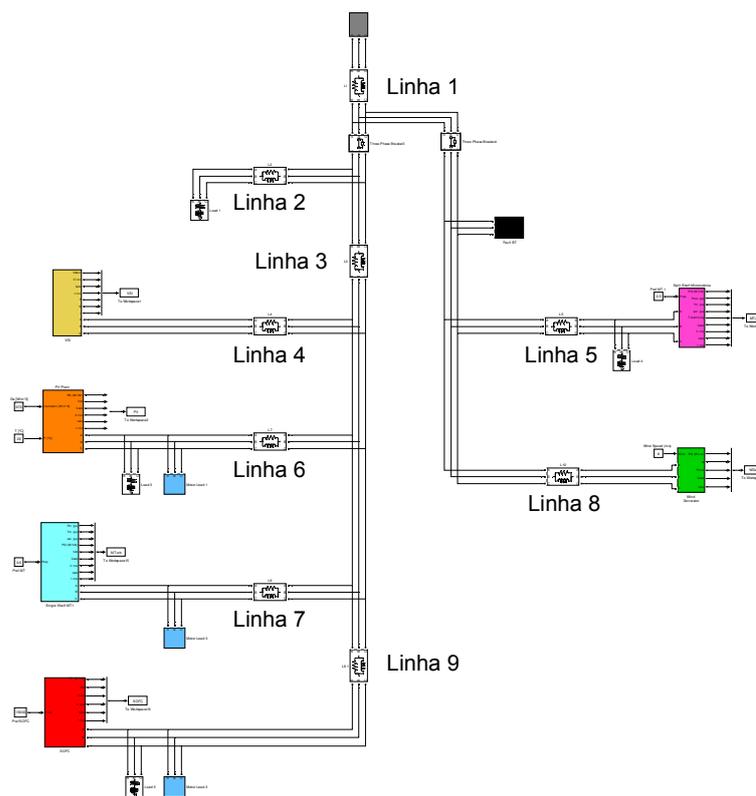


Fig. A2 – Rede-teste utilizada para simulação de um defeito na BT

*Tabela A2 – Parâmetros da rede-teste utilizada para simulação de um defeito na BT*

	R ( $\Omega$ )	L (H)
Linha 1	0,0108	0,000118
Linha 2	0,0683	0,007881
Linha 3	0,0216	0,000235
Linha 4	0,0127	0,000233
Linha 5	0,0685	0,001100
Linha 6	0,0176	0,000586
Linha 7	0,0263	0,000879
Linha 8	0,1040	0,001655
Linha 9	0,0624	0,001456

Nota: Os valores apresentados nas tabelas dizem respeito a modelos de linhas R-L paralelo, disponíveis na biblioteca *SimPowerSystems* do *Matlab® Simulink®*.