

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**Estratégias de Reposição de Serviço em
Micro-Redes**

Márcio Lunardelli Ribeiro

VERSÃO FINAL

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

Orientador: Prof. Doutor Carlos Leal Coelho Moreira
Co-Orientador: Prof. Doutora Fernanda Resende
Junho de 2010

Resumo

O conceito de Micro-Rede consiste numa rede de distribuição de baixa tensão na qual são integradas pequenas unidades de produção de energia eléctrica (denominadas por micro-fontes), juntamente com dispositivos de armazenamento de energia e cargas controláveis, e onde são igualmente implementados sistemas avançados de gestão e controlo suportados por uma infra-estrutura de comunicações.

Tendo em conta as capacidades de geração instaladas numa Micro-Rede, estas podem ser exploradas no sentido de contribuírem para a rápida reposição de serviço numa rede de baixa tensão, no seguimento de um colapso generalizado do sistema eléctrico. No entanto, as redes de distribuição de baixa tensão são redes trifásicas com neutro, o que, em conjugação com a existência de cargas e sistemas de microgeração monofásico, contribuem para agravar os níveis de desequilíbrio de tensão, em especial durante o funcionamento em rede isolada.

Assim sendo, e tendo por base as estratégias de reposição de serviço já identificadas sobre uma Micro-Rede equilibrada, a sua aplicabilidade é agora avaliada numa Micro-Rede com características desequilibradas. O processo de reposição de serviço na Micro-Rede desequilibrada tomou em consideração as especificidades do sistema em termos dos desequilíbrios de tensão e as suas implicações ao nível dos sistemas de sincronização necessários à reposição de serviço numa Micro-Rede. Adicionalmente, foram ainda avaliadas as melhorias introduzidas sobre os perfis de tensão quando se assume na Micro-Rede a existência de um sistema com capacidade de contribuir para o equilíbrio de tensão na rede mediante o controlo das componentes simétricas da sua tensão terminal.

Os resultados obtidos mediante a simulação computacional de uma rede de teste confirmam a aplicabilidade das sequências de reposição de serviço a uma Micro-Rede desequilibrada. Adicionalmente, verifica-se ainda que a unidade de equilíbrio de tensão desempenha um papel fundamental, mediante a sua contribuição para o equilíbrio de tensão na rede e, conseqüente melhoria da qualidade de serviço durante todo o processo.

Abstract

The concept of MicroGrid consists in a low voltage distribution network in which are integrated small units of electricity (called micro-sources), along with energy storage devices and controllable loads, and where advanced management and control systems are also implemented, supported by an infrastructure of communications. Given the generating capacity installed in a MicroGrid, these can be exploited to contribute to the fast restoration of service in a low-voltage grid, following a general blackout of the electrical system. However, distribution networks of low-voltage are three-phase with neutral, which, in conjunction with the existence of loads and micro-sources systems, contribute to worsen the levels of voltage unbalance, especially during the islanding mode.

Therefore, and based on strategies already identified for service restoration on a balanced MicroGrid, its applicability is now evaluated in a MicroGrid with unbalanced characteristics. The process of service restoration in the unbalanced MicroGrid took into account the specifications of the system in terms of voltage imbalances and their implications for synchronization systems needed to service restoration in a MicroGrid. In addition, it was also evaluated the improvements on the voltage profile when it takes on MicroGrid the existence of a system with capacity to contribute to the voltage balance in the network by controlling the symmetrical components of its terminal voltage.

The results obtained by computer simulation of a test network confirm the applicability of the sequences of service restoration to a unbalanced MicroGrid. Additionally, there is still a balancing unit of voltage plays a key role through its contribution to the voltage balance the network, and thereby improving the quality of service throughout the process.

Agradecimentos

Serve o presente momento para homenagear e agradecer a todas as pessoas que contribuíram, directa ou indirectamente, para a elaboração e sucesso desta dissertação, evidenciando as seguintes:

Ao meu orientador, Professor Doutor Carlos Moreira, uma palavra de amizade e de profundo agradecimento pelo seu apoio constante e incansável, críticas e sugestões relevantes que contribuíram de forma benigna para o desenrolar desta dissertação.

Em segundo plano, mas não menos importante, o meu profundo agradecimento à minha co-orientadora, Professora Doutora Fernanda Resende, que intervindo menos intensamente, soube sempre dirigir as palavras correctas no momento oportuno dando assim um importante contributo.

A todos os colegas e amigos, especialmente aqueles que me acompanharam no desenvolvimento desta dissertação, o meu muito obrigado pelo apoio e amizade que sempre senti quando na vossa companhia.

Um agradecimento muito sentido para os meus pais, pelo estímulo infatigável e apoio incondicional prestados desde o primeiro dia. Não basta um muito obrigado para agradecer tudo o que sou, que é devida à educação que sempre se esforçaram em me proporcionar.

À minha namorada Germana, pela sua enorme paciência e compreensão, pelo imenso carinho, ternura, força e coragem transmitida ao longo deste percurso, que só assim tornou possível esta concretização. Por todos estes aspectos e por muitos outros que não têm fim, um autêntico muito obrigado.

Índice

Resumo	i
<i>Abstract</i>	iii
Agradecimentos	v
Índice.....	vii
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xv
Abreviaturas	xvii
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 - Enquadramento da dissertação.....	1
1.2 - Objectivo da dissertação	2
1.3 - Organização do documento	3
Capítulo 2	5
Micro-Redes: Operação em condições de Emergência	5
2.1 - Introdução.....	5
2.2 - Microgeração	6
2.2.1 - Conceito de microgeração	6
2.2.2 - Tecnologias de microgeração	7
2.2.2.1. Pilhas de Combustível	8
2.2.2.2. MicroTurbinas	8
2.2.2.3. Painéis Solares Fotovoltaicos.....	11
2.2.2.4. Micro-geradores Eólicos	12
2.3 - Micro-Redes	14
2.3.1 - Arquitectura Funcional da Micro-Rede	14
2.3.2 - Operação em modo Normal.....	16
2.3.3 - Operação em modo de Emergência	17
2.3.3.1 Classificação das Micro-Fontes segundo a sua necessidade de Controlo em Rede Isolada	19
2.3.3.2 Controlo da Micro-Rede em Rede Isolada	20
2.3.4 - Operação de uma Micro-Rede com cargas e Micro-Fontes monofásicas	22
2.3.4.1 Correção dos Desequilíbrios de Tensão	23

2.3.4.2	Desequilíbrio de Tensões em Micro-Redes	23
2.3.4.3	Medições em sistemas desequilibrados	24
2.4	Reposição de Serviço em Micro-Redes	25
2.4.1	Reposição de Serviço em Sistemas Eléctricos Convencionais.....	26
2.4.1.1	Principais Problemas durante a Reposição de Serviço	27
2.4.1.2	Coordenação das unidades responsáveis pela Reposição de Serviço	27
2.4.1.3	Controlo de Frequência e Potência Activa.....	28
2.4.2	Reposição de Serviço utilizando Micro-Redes	28
2.4.2.1	Acções Principais na Reposição de Serviço em Micro-Redes.....	28
2.4.2.2	Pressupostos Gerais	30
2.4.2.3	Sequência de Acções para a Reposição de Serviço em Micro-Redes	31
2.5	Sumário e Principais Conclusões	32
Capítulo 3		35
Modelização de Micro-Redes		35
3.1	Introdução	35
3.2	Modelização de Inversores Electrónicos de Potência	36
3.2.1	Modelização do Inversor PQ	37
3.2.2	Modelização do Inversor Fonte de Tensão	39
3.2.3	Modelização do Inversor 4-pernas	43
3.3	Modelização de Micro-Fontes	47
3.3.1	Modelização do Painel Fotovoltáico	48
3.3.2	Modelização da MicroTurbina	51
3.3.3	Modelização de Dispositivos de Armazenamento	52
3.4	Modelização das Cargas.....	52
3.5	Modelização das Linhas de Transmissão	53
3.6	Modelização da Rede de Média Tensão	53
3.7	Sumário e Principais Conclusões	54
Capítulo 4		55
Estratégia de Reposição de Serviço em Micro-Redes		55
4.1	Introdução	55
4.2	Sequência de Acções para a Reposição de Serviço	56
4.3	Sincronização das Micro-Fontes com a Micro-Rede	57
4.4	Algoritmo de sincronização para regime trifásico equilibrado	58
4.5	Algoritmo de sincronização para regime trifásico desequilibrado	61
4.6	Controlo de Frequência.....	63
4.7	Sincronização da rede de Baixa tensão com a rede de MT a montante.....	64
4.8	Sumário e Principais Conclusões	64
Capítulo 5		67
Avaliação da Estratégia de Reposição de Serviço em Micro-Redes desequilibradas		67
5.1	Introdução	67
5.2	Rede de Teste	68
5.3	Resultados Numéricos.....	70
5.3.1	Sincronização da Micro-Fonte com a rede de BT em regime equilibrado	70
5.3.2	Sequência de Reposição de Serviço em regime desequilibrado.....	72
5.3.3	Sequência de Reposição de serviço em regime desequilibrado utilizando o sistema de equilíbrio de tensões	85
5.4	Sumário e Principais Conclusões	89
Capítulo 6		91
Conclusões e Futuros Desenvolvimentos.....		91
6.1	Conclusões gerais	91
6.2	Futuros Desenvolvimentos	92

Referências	95
Anexo A.....	99

Lista de Figuras

Figura 2-1 - Esquema de funcionamento de uma microturbina de um veio	10
Figura 2-2 - Configurações possíveis da célula solar FV.....	11
Figura 2-3 - Diagrama de funcionamento de um sistema FV ligado à rede (adaptado de [1]) .	12
Figura 2-4 - Esquema ilustrativo de um micro-gerador eólico	13
Figura 2.5 - Arquitectura da MR [2]	15
Figura 2-6 - Esquema de interacção entre dispositivos de controlo da rede e da MR	15
Figura 2.7 - Fluxo de informação entre os controladores da MR [10]	17
Figura 2.8 - Esquema de controlo da operação <i>Single Master</i> [1].....	20
Figura 2.9 - Esquema de controlo da operação <i>Multi Master</i> [2].....	21
Figura 2.10 - Diagrama de Estados do S.E.E (adaptado de [9])	25
Figura 2-11 - Fluxograma de identificação de situação de colapso de tensão e consequente indicação de reposição de serviço	30
Figura 3-1- Diagrama da interface da MF com o inversor.....	36
Figura 3.2 - Fluxo de potências no link-DC [2]	37
Figura 3-3 - Modelo Dinâmico do Link-DC [1]	38
Figura 3-4: (a) Esquema de controlo do inversor PQ [2] (b) Implementação do inversor PQ em <i>Matlab Simulink</i>	38
Figura 3-5 - Frequência <i>versus</i> Potência activa [1]	40
Figura 3-6 - Tensão <i>versus</i> Potência reactiva (adaptado de [1])	40
Figura 3-7 - Diagrama do esquema de controlo do inversor fonte de tensão [1].....	41
Figura 3-8 - (a) Esquema de controlo do inversor Fonte de Tensão [2] (b) Implementação do inversor Fonte de Tensão em <i>Matlab Simulink</i>	42
Figura 3-9 Topologia do inversor 4-pernas [11].....	43

Figura 3-10 - Controlo de tensão da unidade de equilíbrio [11].....	45
Figura 3-11 - Diagrama fasorial da Transformação de Park [11]	45
Figura 3-12 - Estrutura do bloco de controlo de corrente.....	46
Figura 3-13 - (a) Estrutura de controlo da unidade de equilíbrio [11] (b) Implementação da estrutura de controlo da unidade de equilíbrio em ambiente Matlab/Simulink	47
Figura 3-14 - Circuito equivalente de uma célula FV [1]	48
Figura 3-15 - Características típicas de I-V e P-V de uma célula solar [1].....	49
Figura 3-16 - Influência da temperatura na característica I-V da célula FV [1]	49
Figura 3-17 - Influência da radiação solar na característica I-V da célula FV [2].....	50
Figura 3-18 - Configuração de um Sistema FV [1].....	50
Figura 3-19 - Resposta ao degrau de uma MicroTurbina [1].....	51
(a)	53
(b)	53
Figura 3-20 - Modelos das cargas monofásicas (a) e trifásicas (b) em ambiente Matlab/Simulink	53
Figura 3-21- Modelo das linhas de transmissão em ambiente Matlab/Simulink.	53
Figura 3-22 - Modelo da Rede a montante em ambiente Matlab/Simulink.	54
Figura 4-1 - Representação gráfica das componentes trifásicas da corrente no sistema de coordenadas $a-b-c$ e $d-q-0$	60
Figura 4-2 - Algoritmo de medição e cálculo do desvio de tensão implementado em Matlab/Simulink	62
Figura 4-3 - Esquema de controlo de frequência da MR	63
Figura 5-1 - Rede de teste de Baixa Tensão	69
Figura 5-2 - Frequência da MF e da rede de BT	71
Figura 5-3 - Potência activa da MF e do dispositivo de armazenamento principal.....	71
Figura 5-4 - Potência reactiva da MF e do dispositivo de armazenamento principal	72
Figura 5-5 - Frequência da microturbina e da rede de BT no momento de sincronização.....	73
Figura 5-7- Formas de onda de tensão aos terminais da microturbina (linhas a tracejado) e da rede de BT (linhas a cheio).....	76
Figura 5-9 - (a) Valores por fase da potência activa da microturbina, (b) Valores por fase da potência reactiva por fase da microturbina	77
Figura 5-11 - Frequência da microturbina e da rede de BT	78
Figura 5-13- Frequência da rede de BT durante a acção do controlo secundário.....	79

Figura 5-14 - Potências activa por fase da microturbina (a), Potências activa por fase do dispositivo de armazenamento principal (b)	80
Figura 5-15 - Frequência da rede BT no momento de sincronização com a rede montante....	80
Figura 5-16- Componente (a)directa, (b)inversa e (c)homopolar da tensão da rede de BT e da rede de MT.....	81
Figura 5-17 - Frequência da microturbina e da rede de BT	82
Figura 5-18 - Valores por fase da potência activa da microturbina.....	82
Figura 5-19 - Valores por fase da potência activa no dispositivo de armazenamento principal	82
Figura 5-20 - Valores por fase da potência reactiva da microturbina	83
Figura 5-21 - Valores por fase da potência reactiva no dispositivo de armazenamento principal	83
Figura 5-22-Componente directa(a), inversa(b) e homopolar (c) da tensão da microturbina e da rede de BT.....	84
Figura 5-23 - Frequência da Microturbina e da Rede de BT	85
Figura 5-24 - Frequência da microturbina e da rede de BT	86
Figura 5-25 - Valores por fase da potência activa da microturbina.....	86
Figura 5-26 - Valores por fase da potência activa do dispositivo de armazenamento.....	87
Figura 5-27 - Valores por fase da potência reactiva da microturbina	87
Figura 5-28 - Valores por fase da potência reactiva do dispositivo de armazenamento	87
Figura 5-29 - Componentes directa(a), inversa(b) e homopolar(c) de tensão da microturbina e do dispositivo de armazenamento principal.....	88
Figura A-1 - Topologia da MR utilizada em ambiente de simulação <i>Matlab®/Simulink®</i>	101
Figura A-2 - Topologia do Sistema de Equilíbrio de Tensões em ambiente de simulação <i>Matlab®/Simulink®</i>	102

Lista de Tabelas

Tabela 2-1 - Aspectos comparativos entre as diferentes tecnologias de microturbinas	9
Tabela 5-1 - Valores de potência das cargas fase correspondente.....	69
Tabela A-1 - Parâmetros eléctricos das linhas de BT da MR	99
Tabela A-2 - Parâmetros eléctricos cargas da MR.....	99
Tabela A-3 - Parâmetros eléctricos do inversor fonte de tensão.....	100
Tabela A-4 - Parâmetros eléctricos do Sistema de Equilíbrio de tensão.....	102

Abreviaturas

Lista de abreviaturas (ordenadas por ordem alfabética)

AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
MC	Microsource Controller
MF	Micro-Fonte
MG	MicroGeração
MGCC	MicroGrid Central Controller
MMO-	Multi Master Operation
MPP	Maximum Power Point
MPPT	Maximum Power Point Tracking
MR	Micro-Rede
MT	Média Tensão
OLTC	On load Tap Charger
PD	Produção Dispersa
SEE	Sistema Eléctrico de Energia
SMO	Single Master Operation
SVC	Static Var Compensator

Capítulo 1

Introdução

1.1 - Enquadramento da dissertação

Nas últimas décadas têm-se assistido a uma mudança de paradigma de operação dos Sistemas Eléctricos de Energia (S.E.E). Essa mudança resulta essencialmente de uma filosofia de operação e planeamento dos S.E.E que se baseia na exploração de todos os recursos disponíveis (cargas e sistemas de produção dispersa), por oposição a uma filosofia mais conservadora, baseada na extensão do sistema por reforço contínuo do sistema de geração, transporte e distribuição. Segundo esta filosofia, a gestão integrada de todos os recursos disponíveis trará contribuições de grande relevância para a gestão de todo o sistema. Paralelamente, a esta mudança de paradigma, com origens nos crescentes níveis de integração de Produção Dispersa (PD) nas redes de Média Tensão (MT) e de Alta Tensão (AT), surgiram novas tecnologias de geração modulares de pequena escala, designadas de microgeração (MG), que podem ser encaradas como uma solução para fazer face aos aumentos de consumo, como também na prestação de serviços auxiliares de sistema. De modo a ser possível gerir a integração de volumes crescentes de MG, são necessários sistemas avançados de controlo e nesse sentido, a Micro-Rede (MR), se coaduna com uma possível solução.

A gestão eficiente das unidades de MG, proporcionada pela MR, pode trazer benefícios efectivos à operação do sistema, ao nível da redução de perdas e descongestionamento de ramos, como também ao nível de melhorias de qualidade de serviço e deferimento de investimentos no reforço de redes [1]. Para além das vantagens referidas, a MR apresenta-se ao S.E.E convencional como uma célula extremamente flexível, quando dotada de convenientes sistemas de gestão e controlo.

A MR pode operar em dois modos distintos [1]:

- Modo Normal - a MR encontra-se ligada à rede MT a montante;
- Modo de Emergência - em caso de defeitos ao nível da rede de MT, ou em caso de um colapso parcial ou generalizado, a MR pode ser explorada em rede isolada.

Uma das potencialidades a ser explorada nas MR passa pelo suporte que estas podem oferecer ao nível da reposição de serviço numa rede de Baixa Tensão (BT) [1], de onde podem resultar proveitos significativos ao nível da redução da energia não fornecida e do número e duração das interrupções de serviço. Actualmente os procedimentos de reposição são encarados apenas ao nível dos S.E.E convencionais. Tendo por base os modos de controlo possíveis de serem utilizados na ligação de inversores à rede de BT, foram desenvolvidas estratégias de controlo e identificado um procedimento automático que permite a reposição de serviço sem intervenção dos operadores. Esse desenvolvimento assume como pressuposto de base que a rede de BT é perfeitamente equilibrada, o que não se compadece com a realidade.

Assim sendo, o trabalho a desenvolver centra-se na avaliação da possibilidade de utilização dos procedimentos de reposição de serviço já conhecidos num caso em que se considera uma MR alimentando cargas monofásicas e trifásicas, sendo também alimentadas por MG monofásicos e trifásicos.

1.2 - Objectivo da dissertação

O trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação tinha dois principais objectivos:

- ✓ Avaliar o comportamento da estratégia de reposição de serviço já conhecida sobre uma MR desequilibrada e avaliação dos impactos ao nível dos desequilíbrios de tensão;
- ✓ Avaliar a performance dessa mesma estratégia sobre uma MR que integra um dispositivo de equilíbrio de tensão.

Primeiramente, pretende-se então verificar a adequação da estratégia de reposição de serviço proposta em [2] sobre uma MR equilibrada em MR desequilibradas, propondo eventualmente as alterações necessárias à aplicabilidade da estratégia já definida. Terão de ser tidos em consideração as especificidades do sistema no que respeita aos desequilíbrios de tensão e as implicações que daí poderão advir ao nível dos sistemas de sincronização necessários à reposição de serviço numa MR.

Posteriormente, será integrado na MR um dispositivo que permite atenuar os desequilíbrios de tensão e assim, mediante a contribuição desse dispositivo para o equilíbrio de tensão, avaliar-se a performance da estratégia proposta identificando eventuais melhorias da qualidade de serviço durante todo o processo.

1.3 - Organização do documento

Este documento está organizado em 6 capítulos onde se descreve todo o trabalho realizado, cujos conteúdos são descritos, de forma sucinta na presente secção.

O primeiro capítulo é o capítulo introdutório e que se destina a fazer o enquadramento da dissertação, bem como definir quais os objectivos pretendidos com a realização desta dissertação.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica relativamente aos principais aspectos relativos a MG e MR referindo-se à sua operação em modo de emergência, focando essencialmente a sua capacidade de realizar reposição de serviço. Também são apresentados os conceitos associados ao desequilíbrio de tensões bem como o seu tratamento matemático.

No capítulo 3 são apresentados os modelos matemáticos dos componentes utilizados no ambiente de simulação dinâmica.

O capítulo 4 consiste na descrição do trabalho desenvolvido, focando os principais passos intermédios que conduziram à solução final proposta.

No capítulo 5 são apresentados os resultados numéricos obtidos por via de simulações dinâmicas. Com base nos resultados obtidos é feita uma avaliação dos algoritmos propostos para a realização de reposição de serviço em MR desequilibradas.

Por fim, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões da dissertação e sugeridos futuros desenvolvimentos nesta área.

Capítulo 2

Micro-Redes: Operação em condições de Emergência

2.1 - Introdução

Nas últimas décadas, o interesse na produção distribuída tem vindo a aumentar, essencialmente devido a preocupações ambientais e consequentes políticas energéticas assim como também devido a desenvolvimentos tecnológicos em sistemas de geração. A interligação de produção dispersa (PD) tem estado predominantemente confinada à rede de distribuição de Média Tensão (MT) e Alta Tensão (AT). No entanto, o desenvolvimento tecnológico ao nível de sistemas de geração de pequena dimensão, que contribuíram para o abaixamento dos preços dos mesmos, assim como os incentivos remuneratórios a este tipo de produção, motivaram a ligação de PD nas redes de Baixa Tensão (BT), desta feita com geradores de pequenas dimensões denominados de micro-geradores e explorados em regime de microgeração (MG).

No entanto, da integração massiva de PD podem resultar problemas de operação à rede, o que vem obrigar a uma mudança de paradigma de operação do sector. O actual paradigma, de gestão passiva, denominado na literatura anglo-saxónica de “fit and forget”, permite a integração de PD e MG, enquanto unidades de fornecimento de energia, não conferindo a estas qualquer tipo de serviço de sistema. Tal abordagem poderá acarretar problemas técnicos significativos à operação da rede de distribuição, tais como tensões proibitivas nos barramentos e congestionamentos nas linhas [1]. Assim, mantendo-se este nível de integração sem que se pensasse num outro paradigma de operação da rede, levaria a uma limitação de instalação de unidades de MG, ou investimentos massivos no reforço em infra-estruturas de distribuição (linhas, subestações, etc.), sob pena de não se garantir o bom funcionamento (controlado) do sistema. Ao nível da (BT), o mesmo problema poderá surgir na sequência do aumento da MG, com consequências ao nível da limitação da potência instalada

em unidades de MG, no caso de se manter o actual paradigma de gestão passiva das redes de BT. A solução deste problema passa pela mudança de paradigma de operação das redes de distribuição de MT e BT, visando uma gestão integrada da carga e da geração segundo o conceito de redes inteligentes de energia [1]. As MR podem ser a solução para mudança de paradigma requerida. Uma MR pode ser definida por uma rede de BT na qual são integradas pequenas unidades de MG, juntamente com dispositivos de armazenamento de energia e cargas controláveis. Nessa rede de BT, são implementados sistemas avançados de gestão e controlo suportados por uma infra-estrutura de comunicações. Assim, no âmbito das Redes Eléctricas inteligentes, a MR é consistente com o paradigma de gestão activa da rede, pois sendo a MR uma célula com grande flexibilidade de operação, sob o ponto de vista do sistema de energia, possui mecanismos de controlo sobre as cargas e unidades de MG ligadas à rede de BT podendo ainda ser explorada em rede interligada, quando ligada com a rede a montante, ou em rede isolada. A capacidade de controlo da MR permite às unidades de MG, vistas até então como simples unidades de produção de energia, fornecer alguns serviços de sistema à semelhança das unidades de geração convencionais. Podendo operar em modo isolado - Modo de Emergência - a MR além de garantir o abastecimento das cargas a ela ligadas por meio de unidades de MG, pode também contribuir para a reposição de serviço ao nível da rede de BT na sequência do colapso do sistema. Em [2] e posteriormente em [1] foram realizados estudos sobre a reposição de serviço utilizando MR e definida uma sequência de acções para a reposição de serviço numa MR explorando estratégias de controlo adequadas ao funcionamento da MR em rede isolada. Como resultado desses estudos, foram definidas e validadas estratégias para a reposição de serviço utilizando MR.

2.2 - Microgeração

2.2.1 - Conceito de microgeração

Tal com referido previamente, a designação de microgeração surge aplicada a pequenas unidades de geração que são ligados à rede de BT, que podem explorar energias renováveis ou combustíveis fósseis em pequenas aplicações de produção combinada de calor e energia eléctrica (micro-cogeração). Sendo unidades instaladas ao nível da BT, os seus proprietários podem ser consumidores domésticos comuns. Qualquer consumidor doméstico pode assim deixar de ser apenas consumidor de energia para passar a ser também produtor. A actividade de MG em Portugal foi claramente impulsionada pela entrada em vigor do DL 363/2007 de 2 de Novembro, tornando-se numa possibilidade de investimento interessante para o consumidor. Além disso, apesar de se tratar de unidades de produção de pequena escala, a integração de MG nas redes eléctricas em locais próximos dos pontos de consumo,

apresenta vantagens importantes ao nível da exploração do sistema de energia permitindo [1]:

- Reduzir as perdas energéticas ao nível da transmissão, devido à proximidade entre produção e consumo, traduzindo-se assim num aumento da eficiência ao nível da transmissão;
- Reduzir as emissões poluentes para a atmosfera, explorando outros recursos de fonte renovável;
- Aumento da diversificação energética;

2.2.2 - Tecnologias de microgeração

Nas secções anteriores foi já discutido a mudança de paradigma ao nível da produção de energia, resultando na integração de PD ao nível da rede de MT e AT e posteriormente integração de unidades de MG ao nível da BT. Em virtude de avanços tecnológicos ao nível das tecnologias utilizadas na produção de energia, a actual oferta comercial disponibiliza várias tecnologias de microgeração (também designadas por Micro-Fontes (MF), com potências eléctricas usualmente inferiores a 100 kW [1], nomeadamente:

- Pilhas de combustível;
- Microturbinas;
- Microturbinas eólicas;
- Painéis solares fotovoltaicos;

Para além dos sistemas de MG, e como já foi referido anteriormente, o conceito de MR assenta também na utilização de dispositivos de armazenamento de energia de modo a fornecerem algum suporte à operação da MR. No âmbito da reposição de serviço, e como será apresentado na secção 2.4.2.1, os dispositivos de armazenamento são indispensáveis para o sucesso da operação.

Relativamente às tecnologias utilizadas nos dispositivos de armazenamento em MR, estas podem ser [1]:

- Baterias (íões de lítio);
- Supercondensadores;
- Volantes de inércia - *Flywheels*;

2.2.2.1. Pilhas de Combustível

As pilhas de combustível são células electroquímicas que convertem energia química de diversos combustíveis através de reacções (oxidação - redução) em energia eléctrica. A forma física normal deste tipo de células consiste num electrólito que permanece em contacto com o ânodo estando o cátodo no lado oposto. O ânodo fornece uma interface entre o combustível e o electrólito, fornece um caminho por onde os electrões vão conduzir a carga via um circuito externo. O processo global ocorre em dois passos: A oxidação no ânodo e redução no cátodo [1].

Do ponto de vista da eficiência, as pilhas de combustível podem alcançar eficiências eléctricas de operação de aproximadamente 60%, que é aproximadamente o dobro da eficiência verificada em motores típicos de combustão interna [1]. As pilhas de combustível são uma das tecnologias mais “limpas” e eficientes no que se refere à produção de electricidade. Adicionalmente, neste tipo de unidades de MG, o processo de conversão da energia química dos combustíveis em energia eléctrica não envolve combustão, contribuindo assim para a redução de emissões de poluentes em especial NOx. No que respeita à sua operação, e em especial no que se refere à sua capacidade de seguimento de carga (*load-following*), as células de combustível são capazes de acompanhar as variações de cargas sem prejuízo (económico) disso, devido à reduzida variação da sua eficiência com o respectivo nível de carga [1]. No entanto, os processos electroquímicos das células de combustível lidam com uma resposta muito lenta às variações de carga. Por esse facto, as células de combustível não são indicadas para responder a transitórios de carga muito frequentes. Por outro lado, estas apresentam boas performances quando operam em condições de regime estacionário.

A diversidade de combustíveis que pode ser utilizado nas células de combustível, desde gás natural, propano, gasóleo, metanol e hidrogénio, garante que esta tecnologia não se tornará obsoleta por indisponibilidade de combustível.

Como aspectos menos positivos desta tecnologia, destacam-se o seu elevado preço e o seu actual baixo estado de maturação tecnológico, não possuindo assim um historial comercial que dê mais garantias quanto à sua utilização. Apesar disso, a sua capacidade de controlo, bem como capacidade de arranque autónomo permite utiliza-la na reposição de serviço.

2.2.2.2. MicroTurbinas

As microturbinas são pequenas turbinas de combustão cuja potência nominal varia entre 25kW e 400kW, podendo queimar gases ou combustíveis líquidos [1].

A operação das microturbinas é baseada no Ciclo Termodinâmico de *Brayton*. Nas microturbinas o ar que entra é comprimido num compressor e pré aquecido no recuperador usando o calor libertado pelos gases de escape (a existência de recuperador é opcional, sendo

que a eficiência da microturbina duplica para 30% quando existe recuperador). Uma vez aquecido o ar no recuperador, este é misturado com o combustível na câmara de combustão e posteriormente queimado. O gás quente resultante da combustão é então expandido sobre as pás da turbina, produzindo energia mecânica (rotação) que acciona o compressor e que permite a produção de energia eléctrica num gerador.

Existem duas configurações possíveis para as microturbinas: Um Veio (*Single Shaft*) Figura 2-1); Dois Veios (*Split Shaft*) [1]. Na configuração *Single Shaft*, o compressor, a turbina e o gerador partilham um veio em comum que roda a velocidades muito elevadas (entre 50000 rpm a 120000 rpm). A sua característica de funcionamento a velocidades elevadas permite suportar variações de carga, mantendo elevados níveis de eficiência e uma óptima fiabilidade a longo prazo. Funcionando a uma frequência elevada, uma interface de electrónica de potência para ligação à rede é sempre requerida.

No momento do arranque de uma microturbina de *Single Shaft*, o gerador eléctrico actua como motor, até que se atinja uma velocidade suficiente para arrancar e manter o processo de combustão [1]. Assim, se o sistema estiver a operar isolado da rede eléctrica, são necessárias baterias para suportar o processo de arranque. A utilização de baterias confere à microturbina a capacidade de arranque autónomo, o que paralelamente à sua característica totalmente controlável, torna a utilização da microturbina bastante interessante em situações de falha da rede e inclusivamente adequada para acções de reposição de serviço.

Nos modelos *Split Shaft*, existe um veio para a turbina que actua sobre o compressor e outro veio onde uma segunda turbina actua sobre o gerador eléctrico. Os gases de exaustão do compressor são usados para fazer rodar a turbina do gerador. As microturbinas de Dois Veios operam a velocidades mais baixas, podendo utilizar-se um desmutiplicador de velocidades para fazer o acoplamento à rede.

De forma sumária, a tabela seguinte apresenta alguns aspectos comparativos entre ambas as configurações de microturbinas:

Tabela 2-1 - Aspectos comparativos entre as diferentes tecnologias de microturbinas

Tecnologia	Vantagem	Desvantagem
Um Veio	- o Menor número de peças móveis - o Elimina a necessidade de uma caixa de velocidades - o Funcionamento menos ruidoso	o Compromisso entre as necessidades da turbina e de uma carga eléctrica bem definida
Dois Veios	- o Flexibilidade em combinar a turbina e a carga eléctrica exigida - o Menores esforços mecânicos - o Vida útil mais prolongada	- o Maior número de peças móveis - o Necessidade de uma caixa de velocidades - o Geralmente tem um custo superior

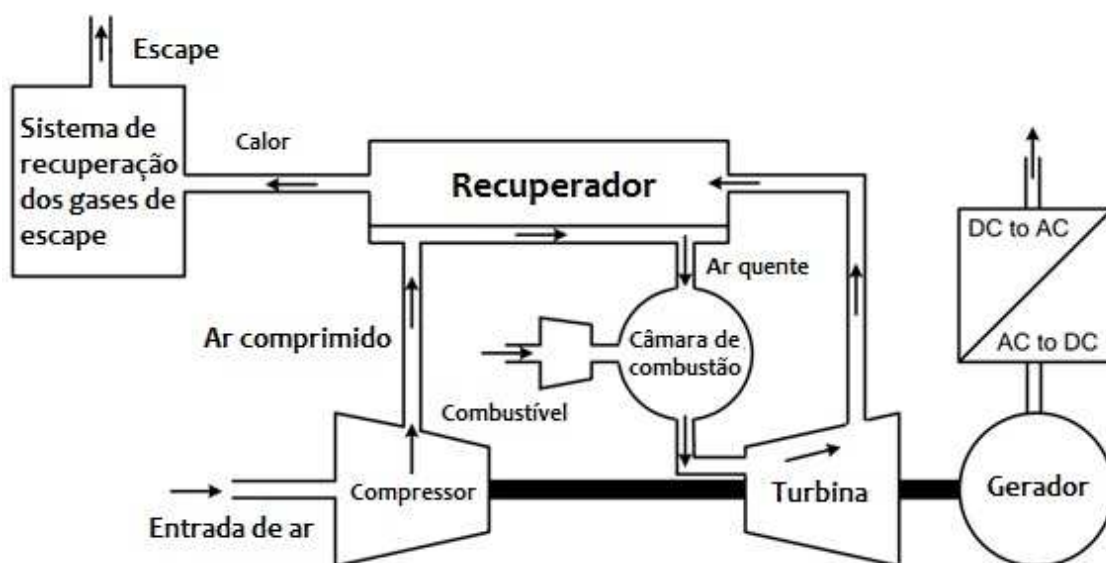


Figura 2-1 - Esquema de funcionamento de uma microturbina de um veio

As microturbinas comercialmente disponíveis pela *Capstone* entre outros fabricantes têm capacidade de operar com vários tipos de combustível: gás natural, gasóleo, *querosene* e gás propano [1]. As inovadoras técnicas utilizadas em combustão, as temperaturas relativamente baixas no interior da turbina e assim com a sua eficiência resultam na diminuição de emissões de NOx e inerentemente diminuição de CO, sobretudo se utilizar gás natural.

Em termos de aplicações, as microturbinas podem oferecer energia eléctrica e calor a um vasto conjunto de aplicações. A sua característica de baixas emissões, reduzida necessidade de manutenção, assim como flexibilidade de instalação fazem da microturbina um recurso bastante interessante.

Do ponto de vista da rede eléctrica, as microturbinas são unidades de produção interessantes por:

- ✓ Permitir a redução de consumo no diagrama de cargas diário, tornando-o mais regular durante o dia;
- ✓ Fornecer energia em locais isolados, sem que para isso se façam investimentos avultados em infra-estruturas de distribuição;
- ✓ Conferir maior capacidade de controlo de produção às MR;

Do ponto de vista do utilizador, este poderá utilizar o calor contido nos gases de exaustão da microturbina em aplicações de co-geração, como por exemplo em:

- Aquecimento de água sanitária;
- Aquecimento central em edifícios;
- Equipamentos de desumificação;
- Fornecimento de energia térmica edifícios (piscinas) ou em processos fabris;

2.2.2.3. Painéis Solares Fotovoltaicos

Os painéis solares fotovoltaicos (FV) são um conjunto de células FV que convertem a energia proveniente da radiação solar em electricidade. A célula FV consiste num elemento semiconductor tipicamente constituído por várias camadas de silício com diferentes propriedades electrónicas. Quando irradiadas pela luz solar, a célula FV é capaz de gerar uma tensão em circuito aberto na ordem de 0,5-1V e uma corrente de curto-circuito de umas dezenas de miliamperes por cm^2 [1]. Esses valores de tensão e corrente não são compatíveis com a maioria das aplicações pelo que, as células são agregadas em séries e paralelos formando um painel FV, de modo a obter-se a tensão e corrente nos níveis normalmente utilizados. Em aplicações mais específicas, em que se pretende uma pré-especificada tensão e corrente, estes painéis podem ainda agregar-se em séries e paralelos formando assim uma matriz de painéis. A Figura 2-2 apresenta as diferentes agregações possíveis de uma célula FV.

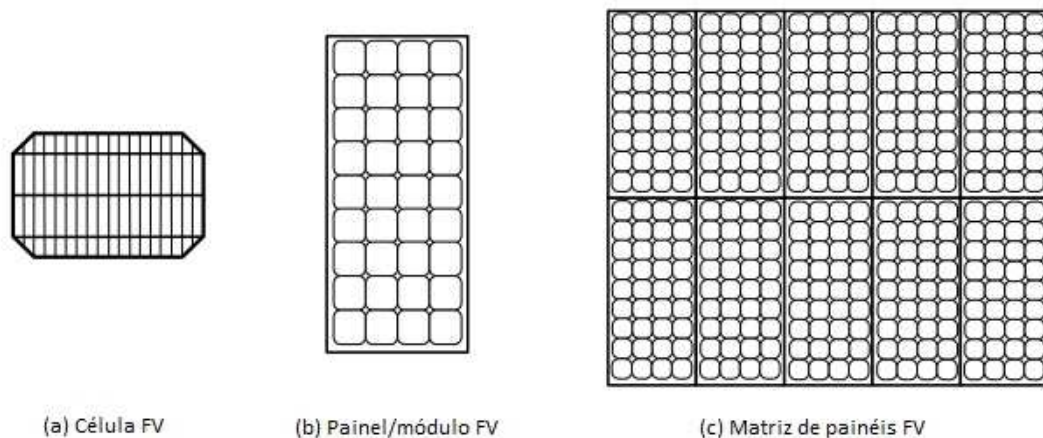


Figura 2-2 - Configurações possíveis da célula solar FV

Existem duas classificações de sistemas FV, que têm por base os requisitos funcionais e operacionais do sistema: Ligado à rede e Sistema isolado. Os sistemas isolados não estão contidos no âmbito desta dissertação, uma vez que se destinam a utilizações em instalações remotas, sem possibilidade de ligação à rede eléctrica.

Os sistemas FV ligados à rede são concebidos para operar de modo bi-direccional com a rede, como ilustrado na Figura 2-3. Isso permite que a energia produzida pelo sistema seja injectada na rede quando esta for superior ao consumo e, absorvida nos momentos em que for insuficiente para suprir os consumos.

A utilização de baterias é opcional uma vez que em situações normais o sistema está permanentemente ligado à rede. Contudo, a sua instalação permite que o sistema continue a operar no caso de haver falha de abastecimento e radiação insuficiente para fornecer energia eléctrica às cargas. Durante o funcionamento normal do sistema FV, parte da energia produzida é destinada à carga das baterias que, deverão estar sempre totalmente carregadas. Sendo a produção de electricidade de qualquer sistema FV feita em corrente contínua, é necessário que haja conversão para corrente alternada à saída do painel ou matriz FV.

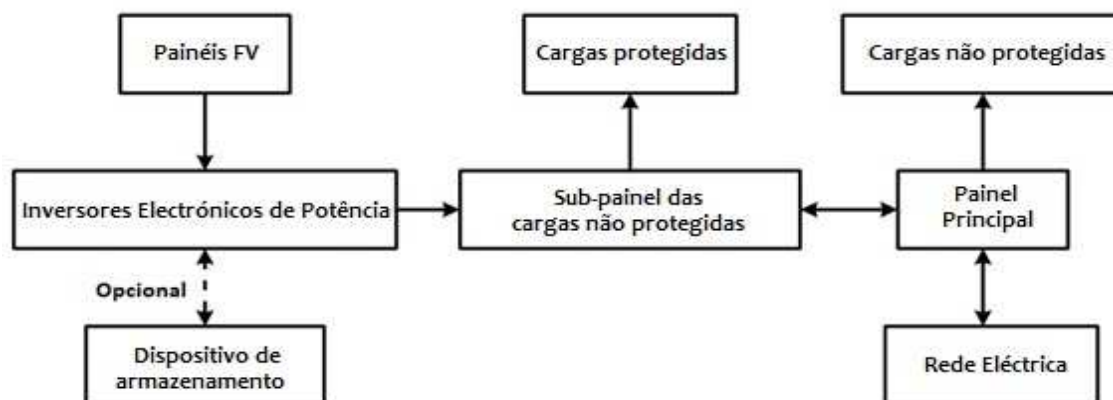


Figura 2-3 - Diagrama de funcionamento de um sistema FV ligado à rede (adaptado de [1])

2.2.2.4. Micro-geradores Eólicos

A energia cinética do vento é uma forma de energia que pode ser transformada em energia mecânica e posteriormente em energia eléctrica. O desenvolvimento da energia eólica tem vindo a ganhar notoriedade devido à sua visibilidade em vastos parques eólicos que emergem no cume de zonas montanhosas, ou em planícies áridas ou mesmo em alto mar (produção *offshore*) não passando assim despercebida a sua presença. Estes geradores eólicos comuns, de grande dimensão, podem variar de algumas centenas de kW a 5MW de potência [1].

Assim como os sistemas solares FV, os micro-geradores eólicos são outra opção para os clientes que pretendam aproveitar um recurso renovável, reduzindo assim a sua dependência de combustíveis fósseis. Existem várias gamas de potência de micro-turbinas eólicas que podem ser escolhidas mediante os requisitos, de 1kW a 5kW e podem ser instaladas em casa ou numa quinta.

Muitos microgeradores são concebidos para ser montados na cobertura da casa, requerendo características muito específicas que satisfaçam em simultâneo o cliente e o projectista [1]. De modo similar ao que se verifica nas turbinas eólica de maior dimensão, estas micro-turbinas deverão também, em função do local da instalação, ter em conta os seguintes aspectos: nível de ruído provocado pela rotação das pás; garantir operação fiável; contribuir para um impacto visual reduzido e cumprimento dos requisitos de segurança.

A integração destes micro-geradores eólicos no topo de edifícios permitiria obter velocidades de vento superiores, uma vez que esta aumenta com a distância ao solo [1]. No entanto, o ambiente urbano introduz bastante turbulência no fluxo do vento, quando comparado com espaços áridos, anulando de certa forma a vantagem de estar localizada mais distante do solo. De acordo com estes princípios gerais, estão a ser avaliados novos designs tecnológicos que poderão ser largamente aceites de acordo com os aspectos referidos.

O *design* mais comum actualmente em micro-turbinas eólicas é o de eixo horizontal, podendo ser de 2 ou 3 pás (Figura 2-4). As pás são normalmente feitas de fibra de vidro com a resistência apropriada. A orientação das pás deverá ser perpendicular à direcção do vento de modo a maximizar a extracção da energia cinética do vento. Existem nas micro-turbinas eólicas mecanismos que permitem o seu posicionamento de forma perpendicular à direcção do vento. Por razões de segurança, as micro-turbinas eólicas possuem também um sistema de travagem das pás para a situação de rajadas de vento muito fortes que põem em perigo a integridade de todo o sistema.

As micro-turbinas eólicas são, normalmente, equipadas com geradores de ímanes permanentes, conhecidos por não utilizarem escovas, à semelhança de alguns geradores síncronos convencionais com sistema de excitação separada [1].

O gerador eléctrico de ímanes permanentes, é conhecido por não utilizar escovas à semelhança de alguns geradores síncronos convencionais com sistema de excitação separada [2]. Dada a variabilidade da velocidade do vento, é impossível garantir-se uma frequência constante e de 50 Hz por parte da micro-turbina eólica, sem que se recorra a uma interface de electrónica de potência para o correcto acondicionamento da potência às cargas e/ou à rede.

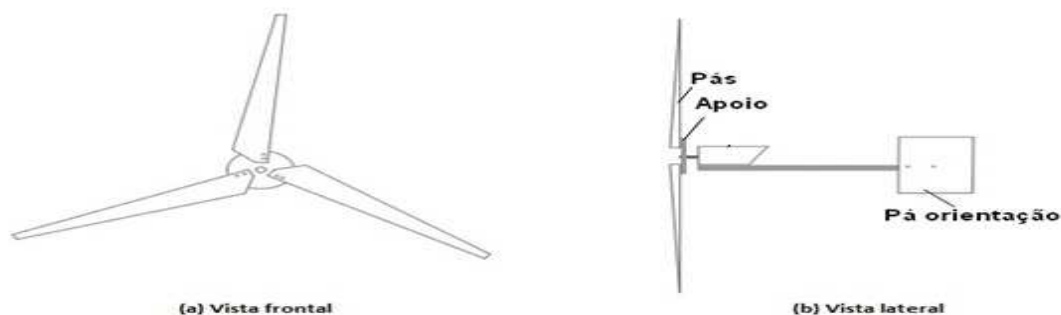


Figura 2-4 - Esquema ilustrativo de um micro-gerador eólico

2.3 - Micro-Redes

O conceito de Micro-Rede consiste numa rede de distribuição de BT (podendo ser por exemplo uma pequena área urbana ou mesmo uma instalação industrial) na qual são integradas pequenas unidades de MG, juntamente com dispositivos de armazenamento de energia e cargas controláveis, e onde são igualmente implementados sistemas avançados de gestão e controlo suportados por uma infra-estrutura de comunicações.

Dadas a sua especificidade, a MR poderá ser uma solução para dar resposta aos problemas técnicos resultantes da integração de MG nas redes, bem como permitir explorar novos conceitos associados à gestão de consumos, mediante a sua participação em serviços de sistema em conjunto com a própria MG.

Uma das particularidades interessantes da MR é a sua capacidade de poder operar interligada com a rede de distribuição de MT, ou de forma isolada, isto é, desconectadas da rede de MT. A operação das MR em rede isolada consiste num modo de operação em emergência e requer a implementação de estratégias de controlo específicas. A descrição detalhada dos modos de operação da MR, assim como as suas estratégias de controlo serão apresentadas na secção 2.3.2 e 2.3.3 respectivamente.

2.3.1 - Arquitectura Funcional da Micro-Rede

Uma possível arquitectura da MR é ilustrada na Figura 2.5. Esta topologia foi proposta primeiramente no âmbito do Projecto Europeu *MicroGrids* [4] sendo seguida posteriormente também em [1] e serve também de base ao trabalho desenvolvido nesta dissertação. Nesse projecto, a MR é definida como uma rede de BT, juntamente com as suas cargas e pequenos sistemas modulares de MG, podendo fornecer energia eléctrica e calor (micro-cogeração) às cargas locais. A MR deverá incluir também dispositivos de armazenamento, por razões justificadas adiante na Secção 2.4. De modo a garantir elevados níveis de flexibilidade na sua operação, deverá existir uma rede de controlo sobre todos os elementos do sistema [5]. Nesse sentido, a MR é controlada por meio de um sistema hierárquico, que no nível hierárquico mais elevado assenta sobre o controlador central - *Micro Grid Central Controller (MGCC)* - que comunica com os demais controladores localizados no nível hierárquico inferior (sistemas de controlo ao nível das micro-fontes e das cargas). No referido nível hierárquico inferior existem os controladores das MF e dos dispositivos de armazenamento - *MicroSource Controller (MC)* - bem como os sistemas de controlo das cargas que são alimentadas pela MR - *Load Controller (LC)*. O MC enquanto entidade de controlo, permite controlar os níveis de produção de potência activa e reactiva nas microfontes (desde que estas tenham essa capacidade). O LC é responsável pelo controlo de cargas, podendo interromper cargas não prioritárias, ou fazer a gestão de acordo com as especificações do

cliente. A operação do sistema de controlo da MR requer a comunicação e interacção entre os diferentes níveis de controlo hierárquico [6].

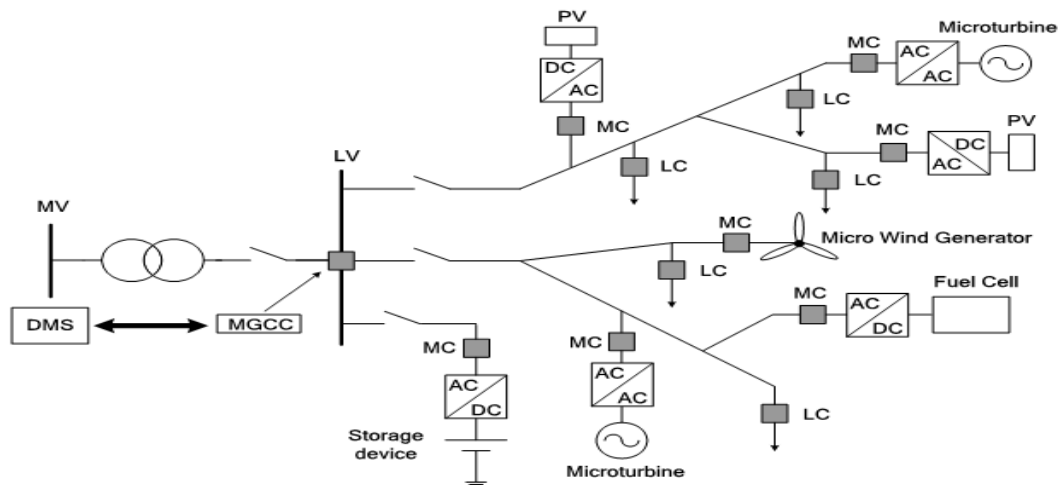


Figura 2.5 - Arquitectura da MR [2]

É também espectável que o MGCC possa comunicar com os *sistemas DMS - Distribution Management System* do lado do operador da rede de distribuição (Figura 2-6). Explorar a MR como um eventual meio para melhorar a operação da rede de distribuição a montante é possível, mediante o estabelecimento de acordos com o operador de rede. Ao operador de rede, a MR poderá “oferecer” serviços de sistema como controlo de tensão, controlo de potência activa e reactiva trocada com a rede de distribuição [7], etc.

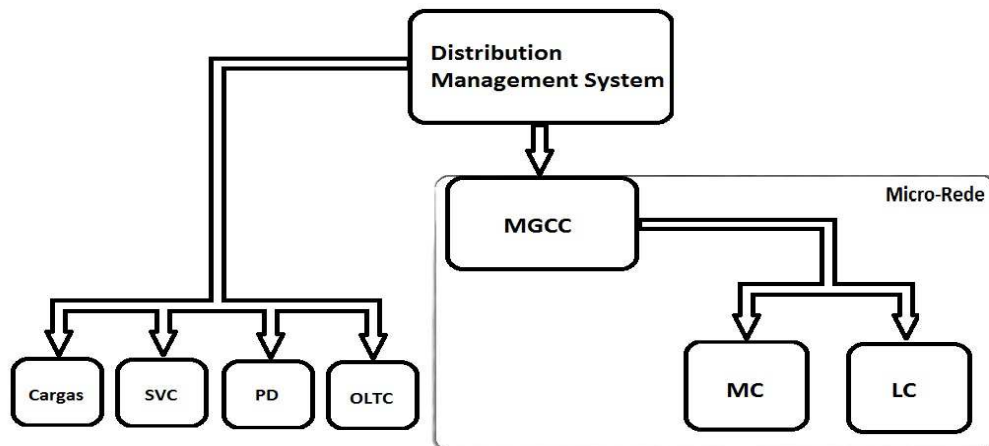


Figura 2-6 - Esquema de interacção entre dispositivos de controlo da rede e da MR

Como foi já referido na anteriormente, a MR tem capacidade de operar em dois modos distintos [2]:

- Modo Normal - a MR encontra-se interligada com a rede a montante, podendo importar energia para alimentar as cargas locais ou, eventualmente, exportar o excedente da produção face à carga.
- Modo de Emergência - no seguimento de alguma perturbação na rede de distribuição a montante, ou em resultado da necessidade de se proceder à realização de operações devidamente planeadas sobre essa rede, a MR pode passar a operar em rede isolada. A capacidade de funcionamento autónomo juntamente com a presença de unidades de MG com capacidade de arranque autónomo pode contribuir para a reposição de serviço na área de influência na sequência do colapso total ou parcial do sistema a montante.

Recordando a arquitectura da MR, apresentada na secção anterior, é ao nível do seu controlador central (MGCC) que é assegurada a gestão de toda a MR. Comunicando e actuando sobre os controladores localizados num nível hierárquico inferior, o MGCC assegura o bom funcionamento da MR nos seus distintos modos de operação.

2.3.2 - Operação em modo Normal

Durante o modo Normal de operação, o MGCC lida com a gestão técnica e económica da MR, actuando como um operador de mercado. Sendo o MGCC o controlador responsável pela operação da MR, é seu objectivo otimizar a sua operação [8,9]. A Figura 2.7 representa esquematicamente a interacção do MGCC com o MC e LC, bem como o fluxo de informação entre estes controladores. Os controladores das MF - MC - têm em consideração as funções de custo das microfontes associadas, bem como os preços de mercado fornecidos pelo MGCC, de modo a fazer as ofertas ao MGCC e fornecer limites de produção.

O controlador central, MGCC, recebe informação referente aos preços de mercado, as propostas de compra por parte das MF, os limites de produção sugeridos, bem como a informação relativa à alta/baixa prioridade das cargas.

Do ponto de vista económico, a MR pode adoptar duas estratégias de controlo distintas [6]:

Good citizen - a MR serve apenas os seus próprios consumidores tendo por objectivo minimizar a importação de energia reactiva da rede a montante.

Ideal citizen - a MR participa no mercado, comprando e vendendo potência activa e reactiva, tentando maximizar o seu valor.

Os modelos matemáticos de optimização de ambas as estratégias bem como a sua completa caracterização estão acessíveis em detalhe em [10,11].

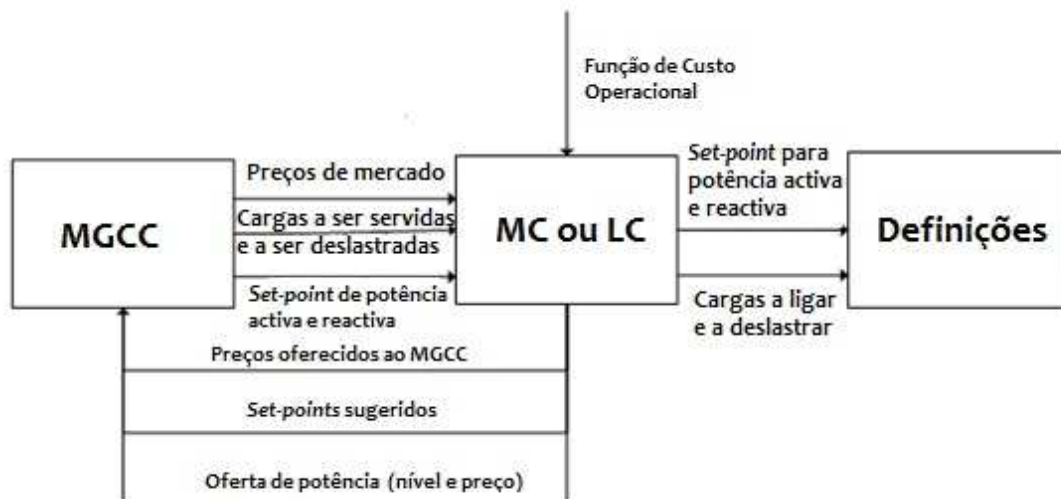


Figura 2.7 - Fluxo de informação entre os controladores da MR [10]

2.3.3 - Operação em modo de Emergência

A operação em modo de Emergência - rede isolada - pode ocorrer de forma planeada, (por exemplo, no caso de se pretender fazer acções específicas de manutenção sobre a MR) ou então de forma forçada, devido a uma falha de abastecimento a montante por ocorrência de um defeito, que origina a abertura do disjuntor no ponto de interligação da MR. Ao funcionar em rede isolada, a MR terá de ser capaz de alimentar as cargas (essencialmente as cargas prioritárias) que lhe estão associadas, ficando estas sem prejuízo do defeito ocorrido a montante. Mediante algumas especificidades da MR (abordadas no Capítulo 4), esta poderá ainda contribuir para a reposição de serviço, para o caso em que ocorra uma falha generalizada na rede de distribuição ou transporte, para a qual o tempo de reposição previsto seja demasiadamente elevado.

O funcionamento em modo de emergência levanta alguns problemas à operação da MR. Actualmente, existem nas redes do S.E.E unidades de PD que, face a inexistência de uma estrutura de controlo eficiente sobre estas unidades, sempre que ocorre um defeito na rede, as unidades de MG devem ser isoladas e só voltar em serviço novamente depois de extinto o defeito. Trata-se de uma medida de segurança que previne as equipas de manutenção de operar numa linha sobre tensão, sendo suposto não estar. Previne também problemas relacionados com a qualidade de serviço devido à impossibilidade de controlar-se a tensão e frequência dessas unidades. Tendo tipicamente as redes de BT uma configuração radial, um defeito a montante e consequente saída de serviço das unidades de PD levaria ao corte do abastecimento das cargas situadas a jusante do defeito.

Segundo a actual filosofia do Operador de Distribuição, a segurança, a qualidade de serviço e a integridade do sistema eléctrico, são pontos-chave para garantir o bom funcionamento do sistema, sendo factores fortemente condicionantes à aceitação da

operação em modo isolado [1]. A principal justificação para tal deve-se ao facto de os actuais sistemas de distribuição possuírem reduzidos sistemas de monitorização e controlo, dificultando portanto a concretização de um modo de operação tão complexo. De facto, a operação em modo isolado apresenta sérios problemas do ponto de vista da segurança das pessoas e dos próprios equipamentos. Tal deve-se à eventualidade dos sistemas isolados não estarem propriamente ligados à terra e os sistemas de protecção poderem estar descoordenados devido às significativas mudanças observadas na potência de curto-circuito. Do ponto de vista da qualidade de serviço, esta poderá vir degradada e afectar a rede e/ou os equipamentos dos consumidores. Já foi referido previamente que as unidades de PD podem contribuir para o aumento da fiabilidade global do sistema, especialmente no caso em que estas operam em modo isolado. No entanto, é necessário ter em consideração que neste modo de operação uma cuidada coordenação dos equipamentos de protecção é requerida, bem como o desenvolvimento de novas funcionalidades de modo a garantir uma efectiva operação em rede isolada [1].

Num cenário de operação em que as unidades de PD estejam coordenadas ao abrigo de uma estrutura de controlo autónoma, com capacidade de comunicação com todas as unidades de PD a ela afectas, tal como se propõe ser um MR, as unidades de PD ligadas a jusante do defeito poderão continuar a operar, abastecendo as cargas vizinhas, podendo até vir a ser utilizadas na resolução do defeito, como seria o caso da reposição de serviço.

Sendo óbvias as vantagens que uma MR oferece em operar em modo isolado, há no entanto a necessidade de atender que este modo requer outro tipo de preocupações, e por isso a estratégia de operação a ser adoptada pelo MGCC será forçosamente diferente daquelas possíveis a adoptar em modo normal, já referidas anteriormente.

Na Secção 2.3.1, foi apresentada a arquitectura da MR, e rapidamente identifica-se um elemento dominante numa MR - Conversores electrónicos de potência. Estes conversores podem ser controlados de modo a emular uma máquina síncrona - inversor fonte de tensão - através do estatismo, como se verá no capítulo seguinte. No entanto, as MF têm um comportamento dinâmico diferente das máquinas síncronas utilizadas nas redes convencionais, dada a sua falta de inércia e capacidade de resposta lenta das microfóntes [1]. Assim, para ser possível à MR fazer o seguimento de carga, controlando a frequência, são necessários dispositivos de armazenamento junto às MF, bem como sistemas de controlo que explorem todos os recursos disponíveis, incluindo o deslastre de cargas. Para a operação das MF na MR existem essencialmente dois tipos de controlo dos inversores: Inversor PQ e Inversor Fonte de Tensão. Estes inversores que estão associados às MF (que por sua vez são suportadas por dispositivos de armazenamento) constituem um aspecto de elevada importância, e será descrito na secção 3.2.2.

2.3.3.1 Classificação das Micro-Fontes segundo a sua necessidade de Controlo em Rede Isolada

No seguimento das especificidades relatadas no que se refere à operação de uma MR em modo isolado, e tendo em consideração os tipos de MF que foram apresentados na secção 2.2.2, é importante estabelecer algumas reflexões sobre a sua integração numa MR. Para além do aspecto da energia primária que as distingue, as MF podem ser classificadas em relação à sua capacidade de controlo. As MF podem ser totalmente controláveis, parcialmente controláveis e incontroláveis, no que diz respeito à potência activa que injectam na rede. Independentemente desta classificação geral, algumas considerações adicionais necessitam de ser feitas relativamente às funções que cada MF desempenha na MR. Nesta perspectiva, as MF podem ser caracterizadas de três formas distintas [1]:

- **Unidades de formação da rede** - as unidades de formação da rede definem a referência de tensão e frequência de modo a assumir uma resposta rápida aos desequilíbrios entre geração e carga. Podem ser constituídas por uma máquina síncrona associada a uma fonte primária com capacidade de controlo (p.ex: motor Diesel) ou em alternativa um dispositivo de armazenamento de energia (p.ex: baterias de acumuladores) acoplado a um inversor de características apropriadas.
- **Unidade de suporte da rede** - nas unidades de suporte à rede a potência activa injectada por estas pode ser controlada, permitindo assim alguma forma despacho sobre estas unidades. No entanto, estas unidades não apresentam a capacidade de autonomamente colocar sob tensão uma rede isolada, tal como acontece com as unidades de formação de rede. Dentro deste grupo, encontram-se as Microturbinas a gás e as Pilhas de Combustível.
- **Unidades de paralelo à rede** - estas unidades correspondem a todas as MF incontroláveis ou parcialmente controláveis, como os Paineis Solares Fotovoltáicos, ou microturbinas eólicas. Geralmente, este tipo de MF opera de modo a injectar a máxima potência que consegue obter a partir da fonte primária.

Além desta classificação das MF, é necessário atender a outras considerações do ponto de vista das interfaces de electrónica de potência que lhes estão associadas e que permitem a sua ligação à rede de BT [1]. O controlo do inversor tipo PQ, descrito na Secção 3.2.1, é utilizado nas MF de suporte à rede e nas de MF de paralelo à rede, quando já existe

uma rede electrificada. O controlo do inversor do tipo fonte de tensão, descrito na Secção 3.2.2, é responsável por colocar sob tensão uma rede, quando esta está isolada. É este que, actuando como uma fonte de tensão fornece as referências de tensão e de frequência. No entanto, para que isso seja possível, é necessário que acoplado a este inversor esteja um dispositivo de armazenamento capaz de suportar as variações de carga e geração em rede isolada, uma vez que nenhuma das MF é capaz de o fazer, dado o “lento” tempo de respostas das MF [1].

2.3.3.2 Controlo da Micro-Rede em Rede Isolada

Depois de identificadas as principais preocupações relativas à operação de uma MR em rede isolada, são agora apresentadas duas estratégias possíveis de serem utilizadas e que têm em consideração as capacidades de controlo das MF anteriormente referenciadas, bem como os tipos de inversores existentes, designadas na literatura anglo-saxónica por *Single-Master Operation (SMO)* e *Multi Master Operation (MMO)* respectivamente [1,12]. Em qualquer um dos casos, se um defeito provocar a transição do modo normal - interligado - para o modo de emergência - isolado - não é necessário mudar a estratégia de controlo de cada MF. Quando a MR transita para o modo isolado, o sistema global transita para outro ponto de operação (em tensão e em frequência), consoante a carga que estiver a ser alimentada.

À operação da MR com vários inversores PQ e um único inversor fonte de tensão é definida como estratégia SMO. Uma representação gráfica dessa estratégia de operação é ilustrada na Figura 2.8. Nesse caso, o inversor fonte de tensão fornece referência de tensão e frequência para a operação dos inversores PQ quando a MR está isolada da rede principal [1].

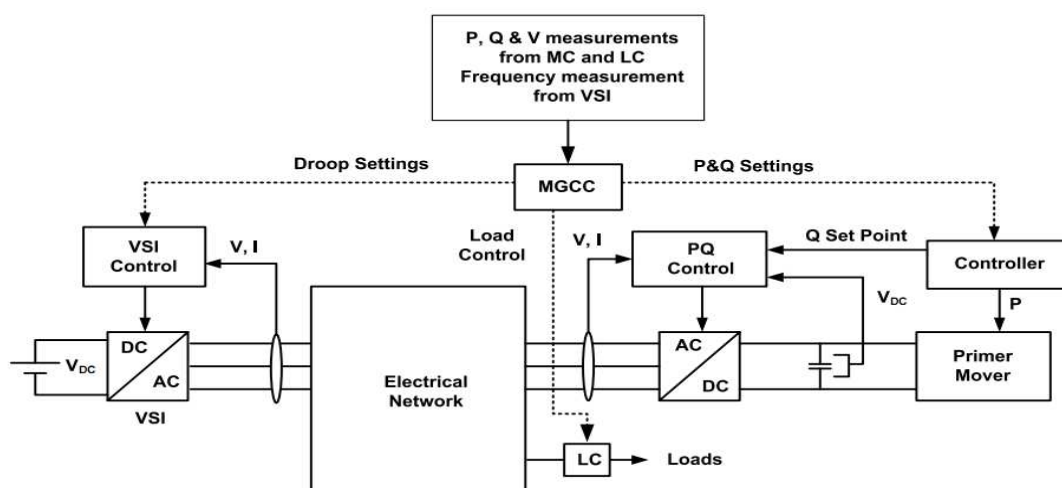


Figura 2.8 - Esquema de controlo da operação *Single Master* [1]

O controlo do inversor fonte de tensão (*VSI control*) é responsável por assegurar o equilíbrio entre carga e produção (desde que acoplado a este estejam dispositivos de

armazenamento, como referido na Secção 2.2.2), assim como também suporta variações transitórias durante a passagem a rede isolada [2]. Usufruidando das capacidades de comunicação da MR, o MGCC recebe informação dos controladores locais e assim actualiza o *set-point* de cada inversor PQ de forma a atingir o cenário óptimo de operação, no que concerne aos níveis de tensão, trânsito de potência reactiva e despacho de potência activa. O MGCC é também responsável pelo controlo das cargas (deslastre e ligação de cargas prioritárias) e pela definição das características do controlo de fonte de tensão.

A operação da MR em rede isolada com diversos inversores fonte de tensão é designada como estratégia MMO (Figura 2.6). Esta estratégia apresenta um paralelismo imediato com os sistemas convencionais com geradores síncronos, que controlam a potência activa/frequência e energia reactiva/tensão, desta feita partindo das características (descritas no capítulo seguinte) do estatismo dos inversores de fonte de tensão.

Esta estratégia de controlo permite maior robustez à MR, na medida em que nesta situação existem mais do que uma unidade de PD controlável a assegurar o funcionamento da MR, confiando assim à MR maior fiabilidade. Apesar de esta estratégia ser uma alternativa à apresentada previamente, podendo por isso ser adoptada ou não, é importante revelar que para realização de funcionalidades ambiciosas como seja a reposição de serviço, a adopção desta estratégia de controlo por parte do MGCC é absolutamente fundamental.

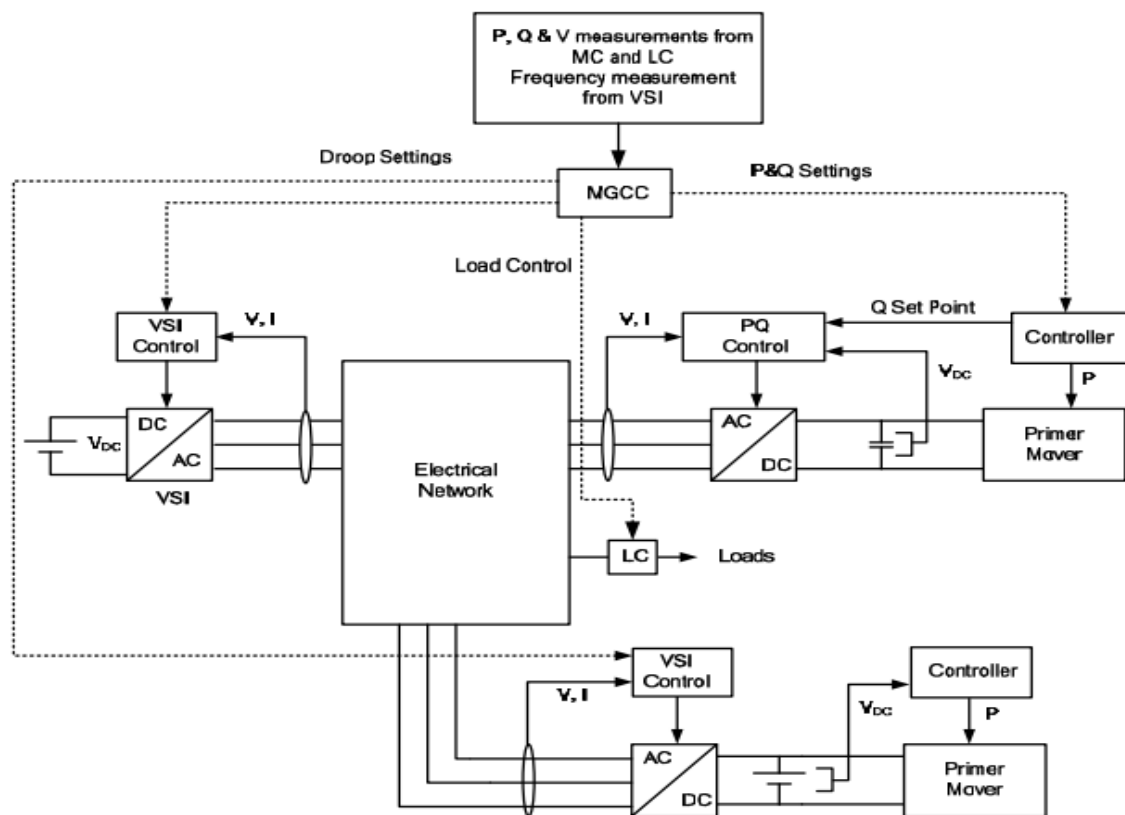


Figura 2.9 - Esquema de controlo da operação *Multi Master* [2]

2.3.4 - Operação de uma Micro-Rede com cargas e Micro-Fontes monofásicas

Vários têm sido os estudos realizados sobre os aspectos de operação e controlo da MR, que focam essencialmente sistemas trifásicos equilibrados. No caso particular da MR, essa situação não corresponde à realidade devido ao desequilíbrio de cargas monofásicas, bem como devido à existência de sistemas de MG monofásicos que constituem uma forte implicação sobre os desequilíbrios de tensões, bem como a qualidade de serviço.

O desequilíbrio de tensões pode ser definido, de acordo com [10] como a situação em que:

- A amplitude de tensões trifásicas diferem entre si à frequência fundamental do sistema;
- Existem desfasamentos desiguais entre as fases;
- Existem diferentes níveis de distorção harmónica entre as fases;

Nos S.E.E. convencionais, a produção de energia é feita em regime trifásico equilibrado, sendo as características naturais do sistema responsáveis pelos eventuais desequilíbrios. O desequilíbrio de tensões na BT deve-se sobretudo à distribuição não uniforme das cargas monofásicas. Actualmente, a ligação de sistemas de MG monofásicos sobre a rede de BT contribui igualmente para o aumento dos desequilíbrios.

As tensões trifásicas podem ser decompostas na sua componente directa, inversa e homopolar. Quando existe equilíbrio de tensões existe apenas a componente directa. Havendo desequilíbrio, existem sempre componente directa e inversa, podendo existir ou não a componente homopolar, dependendo do tipo de desequilíbrio [19].

As tensões trifásicas são então obtidas a partir das suas componentes directa, inversa e homopolar, da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V^0 \\ V^- \\ V^+ \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

onde $a = e^{j120^\circ}$, V^0, V^+, V^- são as componentes homopolar, positiva e inversa respectivamente.

O desequilíbrio de tensão pode causar problemas aos equipamentos da rede, como por exemplo nas máquinas eléctricas. Em [10] são apresentados alguns efeitos adversos causados pelo desequilíbrio de tensões em motores de indução. Sendo os motores de indução tipicamente ligados em triângulo ou em estrela sem neutro acessível, não existe passagem pelo neutro para a componente homopolar. Assim, as tensões no motor terão duas

componentes (directa e inversa) em oposição de fase. A componente directa, é responsável por produzir a força electromotriz desejada, enquanto que a componente inversa gera uma força electromotriz indesejada. A consequência directa da presença das duas componentes simétricas traduz-se numa redução do binário motor aumentando o ruído do circuito electromagnético. O funcionamento do motor de indução em condições desequilibradas provoca um aquecimento adicional, contribuindo assim para a diminuição da sua eficiência, bem como do seu tempo de vida.

A avaliação do desequilíbrio de tensões é feita através do indicador FDT - Factor de Desequilíbrio de Tensões [20]. Usando o método da decomposição em componentes simétricas, o factor de desequilíbrio de tensões é obtido pelo rácio entre as componentes inversa e directa, expresso em percentagem:

$$\%FDT = \frac{V_-}{V_+} \times 100\% \quad (2.2)$$

2.3.4.1 Correção dos Desequilíbrios de Tensão

Tal como nos foi referido anteriormente, a principal causa dos desequilíbrios nas tensões é a distribuição não uniforme das cargas ao longo das três fases. Nas redes de distribuição é possível melhorar o equilíbrio das tensões mudando a configuração do sistema por via manual ou automática, por meio de operações de comutação onde é transferida a carga entre as fases. No entanto, sendo realizada de uma forma discreta, não é possível equilibrar o sistema dinamicamente [11].

Várias outras estratégias podem ser adoptadas para reduzir o desequilíbrio de tensões. Nas redes de distribuição são normalmente utilizados filtros passivos, que aumentam ou diminuem a impedância de uma determinada linha em desequilíbrio com o objectivo de equilibrar as tensões nas três fases [13,14]. Existem ainda soluções mais recentes para a correção de desequilíbrios de tensão utilizando electrónica de potência. Uma solução possível é apresentada em [15].

2.3.4.2 Desequilíbrio de Tensões em Micro-Redes

Tal como nos S.E.E. convencionais, também nas MR é inevitável a situação de desequilíbrios de tensão. Em resultado da ligação de cargas monofásicas bem como em resultado da ligação de MF monofásicas, estas poderão ainda agravar a situação de desequilíbrio. Assim, em termos relativos, numa MR existe sempre maior incapacidade de manter as tensões equilibradas, face aos S.E.E convencionais, sobretudo se esta estiver a operar em modo de Emergência.

Quando a MR opera em paralelo com a rede a montante, esta, dada a sua elevada potência de curto-circuito garante um razoável nível de equilíbrio na MR. Em modo de

emergência, a reduzida potência de curto-circuito pode levar a situações críticas em termos de desequilíbrios de tensão.

Nos Projectos Europeus “MicroGrids” e “More MicroGrids”, assim como no CERTS - *Consortium for Electric Reliability Technology Solution* (consórcio Americano criado em 1990 com o objectivo de investigar e desenvolver ferramentas e tecnologias para o melhoramento do Sistema Eléctrico dos Estados Unidos da América) a problemática do desequilíbrio de tensão é tratada admitindo a operação das MF até um dado valor de desequilíbrio, saindo de serviço selectivamente sempre que o valor exceder o valor limite estabelecido.

Em [11] foi proposto um esquema de controlo do inversor - Sistema de Equilíbrio de Tensão - que condiciona a onda de tensão de forma a equilibrar as tensões. O sistema proposto consiste num dispositivo de compensação que actua sobre os inversores das MF de modo a eliminar a componente homopolar e inversa da corrente.

Na estratégia de reposição de serviço utilizada nesta dissertação, são apresentados resultados comparativos para o caso em que foi utilizado este sistema de equilíbrio de tensões e o caso em que este sistema não está presente. Estes resultados, serão apresentados adiante no Capítulo 5. A descrição do modelo completo desta unidade de equilíbrio será apresentada no capítulo seguinte.

2.3.4.3 Medições em sistemas desequilibrados

As estratégias de controlo da MR, apresentadas anteriormente, assim como as dos conversores, apresentadas no capítulo seguinte, pressupõem uma correcta medição de potência à saída de cada inversor. Mesmo em condições de desequilíbrios de tensão, as MF e toda a MR deverão operar correctamente, e disso dependerá a precisão das medições das potências activa e reactiva.

As tensões e correntes instantâneas são expressas em forma de vectores espaciais:

$$\vec{v} = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}, \quad \vec{i} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

onde v_a , v_b e v_c são as respectivas tensões são fase-neutro e i_a , i_b e i_c a corrente nas respectivas fases.

Com base nos vectores espaciais de tensão e corrente, a potência activa e reactiva instantâneas podem ser obtidas pelo produto interno e externo do vector das tensões e correntes nas três fases respectivamente [16]:

$$p = \vec{v}^T \cdot \vec{i} \quad (2.4)$$

$$q = \|\vec{v} \times \vec{i}\| \quad (2.5)$$

2.4 - Reposição de Serviço em Micro-Redes

Apesar do elevado desenvolvimento na indústria dos S.E.E. no sentido de aumentar a segurança de abastecimento e mitigar o risco de falhas, a exploração do S.E.E feita nos seus limites pode conduzir a colapsos generalizados, sendo assim necessária identificação de estratégias para a rápida reposição de serviço no seguimento de falhas. A reposição de serviço tem como objectivo repor o máximo das cargas perdidas no menor tempo possível. Na Figura 2.7 está representado o Diagrama de Estados do S.E.E. É no estado “IN EXTREMIS” que as acções de reposição de serviço devem ser levadas a cabo, numa primeira instância a partir de acções de controlo de emergência para posteriormente regressar ao estado “Normal” por meio de acções de controlo de restabelecimento.

Tradicionalmente a reposição de serviço é realizada pelo(s) operador(es) de rede. Este(s), mediante uma estratégia previamente definida, executa(m) operações passo-a-passo para que progressivamente o serviço seja reposto. A complexidade desta operação é tanto maior quanto maior for a dimensão do sistema, estando também relacionada com a topologia da própria rede, podendo este processo levar horas ou mesmo dias até ser concluído.

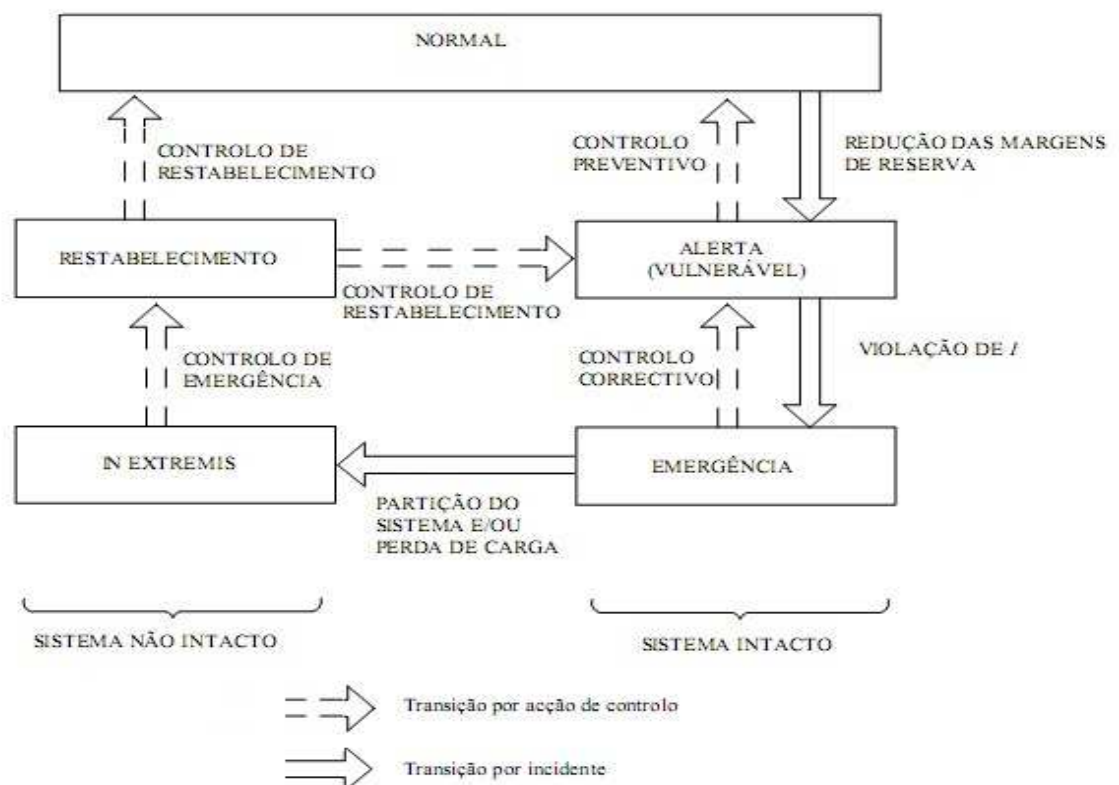


Figura 2.10 - Diagrama de Estados do S.E.E (adaptado de [9])

2.4.1 - Reposição de Serviço em Sistemas Eléctricos Convencionais

Tal como foi referido anteriormente, a reposição de serviço em sistemas convencionais é levada a cabo com intervenção humana, concretamente pelo operador de rede. Uma das contrariedades que surgem ao operador de rede aquando de uma situação de reposição de serviço, prende-se com a limitação de informação quando permanece em estado de colapso do sistema, quer seja por indisponibilidade dos canais de comunicação, como também indisponibilidade de dados durante o modo normal de operação [1]. Acresce ainda o facto de o operador de rede não se deparar com esta situação frequentemente, sendo esta uma situação anormal, uma vez que o S.E.E é concebido de modo a prevenir esta situação de colapso através da coordenação das protecções isolando a perturbação e reduzindo assim o efeito de propagação. Além disso, a pressão que existe sobre o operador de rede para concluir a reposição de serviço no menor tempo possível, juntamente com a indisponibilidade de vários recursos dificultam ainda mais esta tarefa.

Os procedimentos para a reposição de serviço em sistemas convencionais são normalmente desenvolvidos *à priori*, com recurso a metodologias heurísticas que reflectem a experiência humana para lidar com o problema. A dimensão, diversidade e consequente complexidade dos S.E.E impossibilita a definição de uma metodologia universal. No entanto, a execução da reposição de serviço terá de ser sempre definida por procedimentos passo-a-passo, baseados em condições previamente definidas, podendo recorrer a ferramentas de apoio à decisão que são extremamente úteis na tomada de decisão dos operadores de redes [1].

As estratégias que servem de base à reposição de serviço para qualquer operador de rede podem ser definidas do seguinte modo [1,18,19]:

- *Build-down* - Baseado numa reposição sequencial, o processo consiste em electrificar a rede de AT numa primeira fase e fornecer alimentação aos serviços auxiliares das centrais térmicas. Segue-se a reposição passo-a-passo das cargas e restantes unidades de geração. Esta estratégia é geralmente aplicada em sistemas onde a geração e o consumo situam-se em centros geográficos remotos.
- *Build-up* - Consiste em seccionar o sistema em dois ou mais subsistemas (ilhas eléctricas), repondo o serviço em cada ilha de modo independente e uma vez concluída a reposição com sucesso, segue-se a respectiva sincronização, permitindo assim a reconstituição sucessiva da rede. Nesta estratégia é requerido que cada ilha eléctrica tenha pelo menos uma central com capacidade de arranque autónomo. Esta

estratégia é normalmente utilizada em sistemas de pequena/média dimensão, onde os centros de geração e consumo apresentam localizações relativamente próximas.

Ambas as estratégias têm em comum a particularidade de terem pré-definidas quais as unidades responsáveis pela reposição de serviço, sendo tipicamente centrais hidro-eléctricas ou centrais a gás com capacidade de arrancar rapidamente e fazer o paralelo com a rede. Após colocação em funcionamento das unidades com capacidade de reposição de serviço, a preocupação deverá agora ser sincronizar tantas unidades quanto possível de forma a aumentar a capacidade de regulação de tensão e frequência do sistema a ser restaurado e tornar possível aumentar a ligação das cargas.

2.4.1.1 Principais Problemas durante a Reposição de Serviço

Tal como já foi referido anteriormente, em qualquer estratégia de reposição de serviço o objectivo é sempre repor o fornecimento de energia aos consumidores, no menor espaço de tempo possível. Para isso, as unidades responsáveis pela reposição de serviço devem ser colocadas em funcionamento de modo a criar uma rede suficientemente “forte” e assim garantir a operação segura e estável bem como qualidade de serviço aceitável ao consumidor. Para isso, é comum que os operadores de rede sigam um conjunto de procedimentos semelhantes, independentemente as características de cada S.E.E. Todavia, planos específicos e detalhados devem ser desenvolvidos atendendo às especificidades de cada S.E.E [1].

2.4.1.2 Coordenação das unidades responsáveis pela Reposição de Serviço

Uma das acções iniciais e mais importantes da reposição de serviço é seguramente o arranque das unidades com essa capacidade, pois são estas que irão fornecer potência para alimentar os serviços auxiliares das restantes unidades de produção sem capacidade de arranque autónomo, e assim recuperar o sistema. Tal como referido anteriormente, as unidades com capacidade de arranque autónomo podem ser turbinas a gás ou centrais hidroeléctricas, uma vez que o seu arranque “a frio” não excede os 15 minutos [1]. Eventualmente, alguma carga deverá ser ligada nos momentos iniciais de modo a manter o equilíbrio de potência activa/frequência, em consequência da operação das máquinas térmicas terem necessidade de respeitar um mínimo técnico de produção.

Atendendo ao procedimento de determinar a sequência de arranque, são criados diagramas que mostram a potência activa e reactiva disponíveis em função do tempo, dependentes da resposta da máquina primária às ligações da carga [1,20].

2.4.1.3 Controlo de Frequência e Potência Activa

Para que seja assegurada uma frequência aproximadamente constante em torno dos 50Hz, deverá haver equilíbrio entre a produção e o consumo. Nos momentos iniciais da reposição, onde ainda não foram sincronizados todos os geradores, a rede ainda está “fraca” devido à baixa inércia do sistema. Assim, a ligação das cargas deverá ser feita em pequenos incrementos de forma a serem acomodadas pela inércia dos geradores já em serviço, sob pena de resultarem em desvios de frequência irrecuperáveis [2].

A dimensão da carga a ser ligada é limitada pela resposta das máquinas primárias. As cargas de menor dimensão e radiais são usualmente as primeiras a serem ligadas, seguindo-se as de maior dimensão e localizadas em pontos de rede localizados sobre malhas. Os ramais equipados com relés de mínimo de frequência são ligados posteriormente, quando a frequência do sistema estiver mais estável [1,21].

De modo a avaliar a resposta de vários tipos de máquinas primárias durante a reposição de serviço, é apresentado em [22] um estudo sobre a dimensão da carga a ser reposta em segurança.

Posteriormente à fase inicial, onde o esqueleto da rede de transmissão está já reintegrado e algumas cargas estão já ligadas de modo a estabilizar a sistema, as máquinas térmicas deixam de operar nos seus limites técnicos e passam a fornecer mais potência. Grande parte da carga do sistema será ligada apenas nesta segunda fase [1]. O problema de determinar a sequência adequada de ligação das cargas é um problema de Optimização Combinatória, com múltiplas restrições. De modo a resolver esse problema, utilizam-se meta-heurísticas como algoritmos Genéticos ou Programação Evolucionária. Em [23] são apresentadas algumas soluções utilizando algoritmos genéticos.

2.4.2 - Reposição de Serviço utilizando Micro-Redes

Ao longo deste capítulo foi apresentado o conceito de MR, juntamente com a arquitectura funcional que permite explorá-la como uma célula activa do sistema eléctrico. Também foram apresentadas algumas funcionalidades que a MR poderia realizar, das quais a reposição de serviço revela-se, por toda a sua complexidade, a mais ambiciosa das funcionalidades da MR. Na secção seguinte serão apresentadas a sequência de passos a realizar aquando da reposição de serviço, assim como algumas considerações gerais que servem de base à realização da mesma.

2.4.2.1 Acções Principais na Reposição de Serviço em Micro-Redes

Tirando partido das potencialidades das MR, no que se refere à capacidade de comunicação e autonomia de operações, a reposição de serviço com recurso a micro-redes foi proposta na perspectiva da sua completa automatização, tendo em vista a dispensa da

intervenção humana. Tal como na reposição de serviço em sistemas convencionais, o procedimento de reposição de serviço em MR baseia-se na pré-definição de um conjunto de regras/acções de controlo que deverão ser coordenadas pelo MGCC. Os principais passos a serem considerados são [2]:

- I. Construção da rede de BT (Colocar a MR em tensão);
- II. Ligação das MF;
- III. Controlo de tensão e de frequência;
- IV. Ligação das cargas;
- V. Sincronização da MR com a rede de MT assim que esteja disponível;

Fazendo o paralelismo com a reposição de serviço em sistemas convencionais, a MR explora uma estratégia do tipo *Build-up*. Posteriormente, se for possível fazer reposição de serviço quer ao nível do sistema convencional quer ao nível das MR, é possível conjugar-se as duas e tem-se um *mix* de *Build-up* e *Build-down*.

Para ser possível à MR dar início à reposição de serviço, é necessário que o MGCC detecte a situação de colapso generalizado do sistema junto ao operador de rede - DMS (*Distribution Management System*). A Figura 2.11 ilustra o fluxograma interpretado pelo MGCC de modo detectar o colapso do sistema. Existe o especial cuidado de atender à possibilidade do corte de abastecimento a montante se dever a um defeito fugitivo e por isso não ser confundível com um colapso de tensão.

O esquema de protecções da MR é também uma preocupação durante a reposição de serviço [1]. Os S.E.E convencionais são constituídos por geradores síncronos que fornecem elevadas correntes de curto-circuito que são importantes para a eficaz e eficiente protecção do defeito. Em MR, a geração é ligada à rede por intermédio de inversores que apenas fornecem correntes de defeito suficientes para ser detectado pelos sistemas de protecção no caso de os inversores estarem sobre-dimensionados. Por razões económicas, o sobre-dimensionamento não é a melhor solução e durante a operação em modo isolado, o rácio entre corrente de defeito e corrente na carga é muito pequeno, quando comparado aos S.E.E convencionais. Assim, deverá ser desenvolvido um novo esquema de protecções para MR na BT. Acresce o facto de, na reposição de serviço, que envolve um processo passo-a-passo da ligação das MF à MR, a potência de curto-circuito no ponto onde estão instaladas as protecções vai variando à medida que as MF vão sendo sincronizadas com a MR. Então, o MGCC deverá ser responsável por alterar os parâmetros dos esquemas de protecção, à medida que a reposição de serviço evolui, para que um defeito seja eficientemente detectado e isolado.

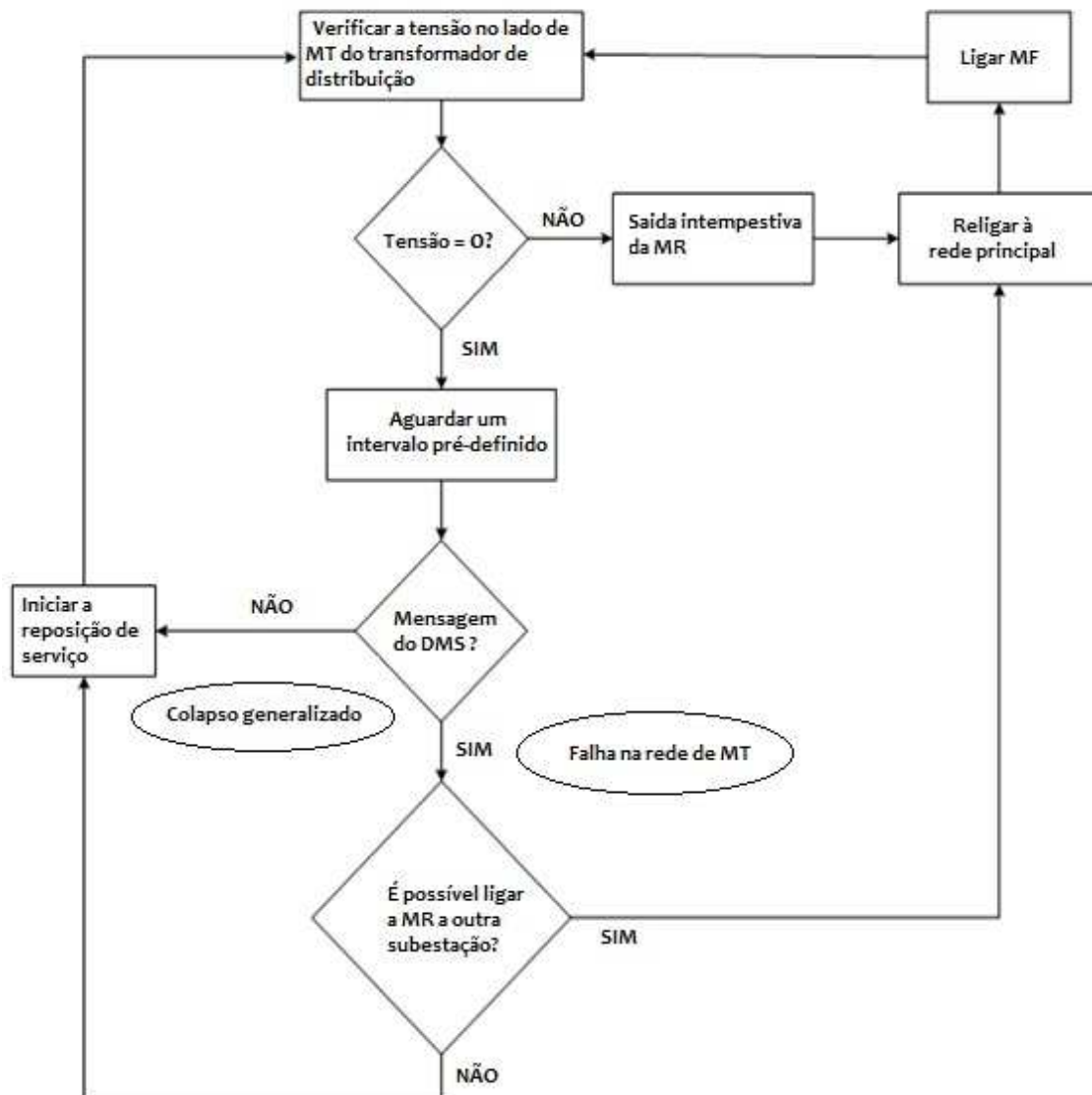


Figura 2-11 - Fluxograma de identificação de situação de colapso de tensão e consequente indicação de reposição de serviço

2.4.2.2 Pressupostos Gerais

Tem vindo a ser referido ao longo deste capítulo que o funcionamento da MR requer uma estrutura de comunicação entre os respectivos controladores. Os meios de comunicação utilizados, bem como toda a sua estrutura, não estão tratados nesta dissertação. No entanto, são elementos importantíssimos ao sucesso de todas as operações, fundamentalmente no caso da reposição de serviço. Então, para que seja possível fazer-se a reposição de serviço, deverão existir pequenas unidades responsáveis pelo fornecimento de serviços auxiliares a toda a rede de comunicação presente em todos os controladores [1].

Para além destas condições essenciais, a reposição de serviço requer também a disponibilização de informação actualizada, relativamente ao estado de carga/geração antes do colapso assim como a disponibilidade das MF para arrancar com a reposição de serviço. Durante o modo Normal, o MGCC recebe periodicamente informação do MC e LC sobre os níveis de produção e consumo, armazenando essa informação numa base de dados. Também são armazenadas nessa base de dados informações sobre as características técnicas das diferentes MF em operação, tais como os limites de produção de potência activa e reactiva [2]. Toda essa informação será utilizada para repor as cargas críticas no cenário anterior à ocorrência de defeito.

Tal como referido na secção 2.3.3.2, para que seja possível realizar a reposição de serviço em segurança, é absolutamente necessário que a estratégia de controlo de emergência seja a *Multi-Master*, podendo ser posteriormente alterada para a *Single-Master* finda a operação de reposição.

2.4.2.3 Sequência de Acções para a Reposição de Serviço em Micro-Redes

No seguimento de um colapso generalizado da rede, o MGCC procederá à reposição de serviço, baseando-se na informação armazenada na base de dados sobre o estado da MR antes da ocorrência do defeito, como descrito na secção anterior. A sequência de acções seguidas pelo MGCC, são as seguintes [1,24]:

1. Seccionalizar a MR em torno de cada MF com capacidade de arranque autónomo de forma a permiti-la alimentar as suas cargas próprias. Essa acção consiste em criar pequenas ilhas que serão posteriormente sincronizadas, permitindo repor o funcionamento de toda a MR.
2. Criar a rede de BT. O dispositivo de armazenamento principal é utilizado para colocar sob tensão uma parte da rede de BT.
3. Sincronização das pequenas ilhas criadas em 1. Uma vez estabilizadas, as MF deverão sincronizar-se com a MR. Para tal, é necessário que as condições de sincronismo (abordadas no Capítulo 4) sejam verificadas pelo controlador local MC, após indicação do MGCC, de modo a evitar elevadas correntes transitórias que poderão comprometer a operação dos inversores.
4. Ligação das cargas controláveis à MR na medida em que as MF em operação sejam capaz de alimentar essas cargas e as suas cargas próprias. A quantidade de carga

a ser alimentada deverá ter em conta a capacidade de armazenamento de modo a evitar-se grandes desvios de tensão e frequência durante a ligação das cargas. A ligação de cargas indutivas, como são o caso dos motores, são um problema crítico devido à elevada corrente absorvida nos momentos iniciais.

5. Ligação de MF não controláveis ou MF sem capacidade de arranque autónomo, tais como microgeradores eólicos e Paineis Solares FV. Nesta fase, as MF estão já estabilizadas a alimentar as cargas e por isso são capazes de suavizar as variações de tensão e frequência devidas às flutuações de produção das MF não controláveis, daí elas poderem ser ligadas nesta fase.
6. Aumento da carga. De forma a alimentar o máximo de cargas possível, dependendo da capacidade de geração, outras cargas são então ligadas.
7. Mudança de estratégia de controlo dos inversores das MF, passando de uma operação em *Multi Master* para uma operação em *Single Master*, já apresentada anteriormente. Apenas o dispositivo de armazenamento central terá o inversor controlado como fonte de tensão, fornecendo assim as referências de tensão e frequência a toda a MR. Os restantes inversores, passarão a ser controlados como inversores PQ.
8. Sincronização da MR com a rede de MT a montante, assim que for possível. Tal como em 3, aqui também têm de verificar-se as mesmas condições de sincronismo, após ser dada a instrução por parte do MGCC. O transformador de MT deverá ser colocado em tensão no lado de MT, sendo a sincronização realizada por meio de disjuntores do lado da BT.

Durante as diferentes fases da reposição de serviço, é dada uma especial atenção ao controlo de tensão e frequência, pois é através desse controlo que se consegue uma operação estável da MR.

2.5 - Sumário e Principais Conclusões

No início deste capítulo foi apresentado o conceito de MG e a resultante mudança de paradigma em consequência da sua integração das redes. Nesse sentido, foram referidas as razões que motivaram o interesse no desenvolvimento das MR.

Uma vez apresentado o conceito de MR, a sua arquitectura funcional, bem como os requisitos necessários ao seu funcionamento, foram identificados os distintos modos de

operação da MR, dando especial enfoque ao modo de operação em Emergência, identificando sobretudo as especificidades e requisitos desta para a condução da acção de reposição de serviço.

Concluiu-se assim que para a operação da MR, independentemente do seu modo de funcionamento, são necessários avançados sistemas de controlo entre todos os elementos, segundo uma estrutura hierárquica. A interacção entre os vários controladores localizados na MR pressupõe um rápido e fiável canal de comunicação entre todos os controladores situados na MR, assim como com o controlador situado a montante desta.

A necessidade de unidades de MG totalmente controláveis, assim como a necessidade de dispositivos de armazenamento, revelaram-se também requisitos fundamentais para a condução da reposição de serviço em particular, e para a operação em modo de emergência, em modo geral.

No capítulo seguinte serão descritos os modelos matemáticos dos componentes da MR utilizados na simulação dinâmica computacional.

Capítulo 3

Modelização de Micro-Redes

3.1 - Introdução

No capítulo anterior foram apresentados e discutidos os principais factores que impulsionam uma integração em larga escala de produção dispersa no Sistema Eléctrico de Energia (S.E.E). O desenvolvimento tecnológico de unidades de microgeração (MG) tem vindo a evoluir, sendo possível actualmente produzir electricidade ao nível doméstico, por aproveitamento de recursos de fonte renovável. Assim, a MG tem vindo a ganhar expressão nas redes eléctricas de Baixa Tensão (BT).

Diante este cenário, de modo a continuar a explorar o sistema de forma eficiente, existe a necessidade de controlar estas unidades de MG. A Micro-Rede (MR), como tem vindo a ser referido, propõem-se ser uma possível solução para este propósito. De modo a implementar os mecanismos de controlo da MR em ambiente de simulação, é necessária a modelização matemática de todos os seus componentes.

As unidades de MG utilizadas foram as unidades de solar fotovoltaico e as micro-turbinas a gás, utilizadas em aplicações de micro-cogeração. Outras tecnologias, descritas na secção 2.2.2, como micro-turbinas eólicas e pilhas de combustível também poderiam ser utilizadas, juntamente com as escolhidas. No entanto, o peso computacional que daí resultaria não justificava a sua utilização, uma vez que para efeitos de ilustração do conceito a demonstrar, as MF escolhidas são adequadas. Como foi já referido anteriormente, para dotar a MR de capacidade de reposição de serviço é necessária pelo menos uma unidade de MG com capacidade arranque autónomo e com capacidade de controlo, bem como de dispositivos de armazenamento, pelas razões já apresentadas anteriormente. A opção pela microturbina a gás em detrimento das Pilhas de Combustível deveu-se essencialmente ao seu mais avançado estado de maturação tecnológica, quando comparadas com as Pilhas de Combustível.

De modo a validar a estratégia de reposição de serviço utilizando MR, considerando que estas operam num regime de carga desequilibrado (cenário real), recorreu-se ao software de simulação dinâmica *Matlab-Simulink*®. Para tal, é fundamental dispor de modelos de simulação adequados que representavam o funcionamento dinâmico do sistema em diversas condições.

A configuração básica da interacção entre os diversos elementos a serem modelizados é apresentada na Figura 3-1. Os blocos representados na figura são:

- A micro-fonte (MF);
- Um condensador que estabelece ligação entre a MF e o inversor;
- Um filtro passa-baixo LC que absorve os harmónicos de alta frequência;
- Uma indutância de acoplamento.

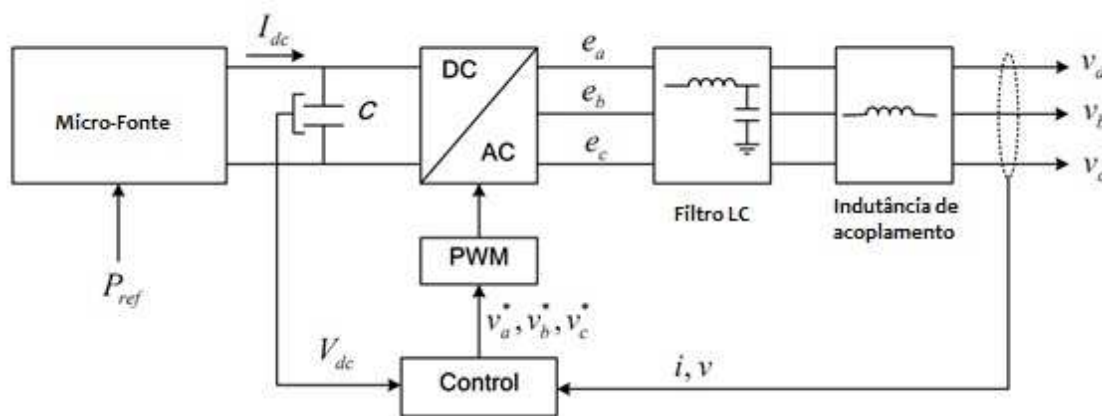


Figura 3-1- Diagrama da interface da MF com o inversor

3.2 - Modelização de Inversores Electrónicos de Potência

Tal como foi referido anteriormente, a característica da energia produzida nas diversas MF, qualquer que seja a tecnologia associada, requer a utilização de electrónica de potência de modo a garantir a entrega de potência à rede em corrente alternada, à frequência de 50 Hz, e com a amplitude desejada. É importante relembrar que sendo os inversores um elemento dominante numa MR, a compreensão do seu funcionamento e mecanismos de controlo são vitais para assegurar a estabilidade de operação da MR, quando esta sofre variações arbitrárias como são as variações de carga e de produção ao longo do dia.

Foi já referido que, essencialmente existem dois tipos de controlo dos inversores [2]:

- ✓ Inversor PQ
- ✓ Inversor Fonte de Tensão;

Nas secções seguintes serão apresentados os modelos de controlo destes inversores.

3.2.1 - Modelização do Inversor PQ

Este tipo de controlo condiciona os inversores a injectar toda a potência disponibilizada pela fonte de energia primária numa rede já em tensão. A quantidade de potência reactiva injectada pode ser definida localmente pelo controlador local (MC) ou centralmente pelo controlador central (MGCC). Quando controlado segundo esta estratégia, o inversor comporta-se como uma fonte de corrente controlada (por tensão). Além de controlar o fluxo de potência activa e reactiva, este inversor é também responsável pelo controlo da tensão do *link-DC* [1]. Assim, a tensão interna do inversor é controlada de modo a manter a tensão do *link-DC* constante a uma dada referência e para uma potência reactiva especificada.

Desprezando eventuais perdas, a potência no *link-DC* (P_C) é obtida pela diferença entre a potência fornecida pela MF (P_{MF}) e a potência injectada no inversor (P_{Inv}), como ilustra a Figura 3-2.

$$P_C = P_{MF} - P_{inv} \quad (3.1)$$

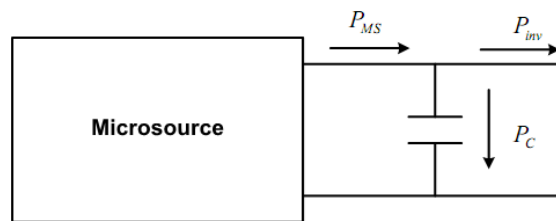


Figura 3.2 - Fluxo de potências no link-DC [2]

O fluxo de potência num condensador pode ser escrito como:

$$P_C = V_{DC} \times I_{DC} \quad [W] \quad (3.2)$$

onde a V_{DC} e I_{DC} são respectivamente a tensão e corrente no condensador. A tensão no *link-DC* pode também ser definida como:

$$V_{DC} = \frac{1}{C} \int I_{DC} dt \quad [V] \quad (3.3)$$

Uma descrição mais detalhada deste tipo de controlo é feita em [1,25,26]. Encontram-se na literatura outros modelos de controlo mais avançados para este inversor, no entanto, a escolha recaiu sobre este modelo devido à sua simplicidade de implementação.

3.2.2 - Modelização do Inversor Fonte de Tensão

Nos S.E.E. convencionais, os geradores síncronos partilham as variações de carga de acordo com as suas características de controlo, designadas por estatismo. Este princípio básico de funcionamento dos sistemas convencionais foi exportado para o controlo do inversor fonte de tensão, de forma a permitir o seu funcionamento sobre uma rede isolada e permitir ainda obter uma característica de funcionamento que possibilite variar a frequência de operação em função da potência disponibilizada às cargas, à semelhança do que acontece nas máquinas síncronas convencionais. Esta particularidade de controlo do inversor, que permite a este emular o comportamento de uma máquina síncrona, constitui a controlo primário de frequência. Assim, emulando o comportamento das máquinas síncronas nos S.E.E. convencionais, o inversor fonte de tensão controla a tensão e a frequência da MR. Nos sistemas convencionais, os geradores síncronos partilham qualquer aumento de carga (estatismo que relaciona a frequência sempre de operação com a potência activa injectada), de acordo com a equação (3.3) [2]. Também a potência reactiva é partilhada de forma semelhante, pelo estatismo associado à potência reactiva/módulo de tensão terminal.

As equações que permitem controlar este inversor como uma fonte de tensão controlada (de acordo com estatismos pré-definidos), são as seguintes:

$$\omega = \omega_0 - k_p \times P \quad (3.3)$$

$$V = V_0 - k_Q \times Q \quad (3.4)$$

onde P e Q são as potências activa e reactiva à saída do inversor, k_p e k_Q são os estatismos (valores positivos) e ω_0 e V_0 são respectivamente os valores da frequência angular e tensão que o inversor deve apresentar em situação de vazio.

Quando um inversor fonte de tensão é ligado a uma rede externa caracterizado por uma dada frequência angular ω_{grid} e tensão V_{grid} , a sua tensão e frequência de operação passam a ser impostas externamente [2]. Nesse caso, determinados valores de potências de saída desejadas, P_1 e Q_1 podem ser obtidas à saída do inversor, por ajuste dos valores de referência de frequência e de tensão, como ilustra a Figura 3-5 e Figura 3-6:

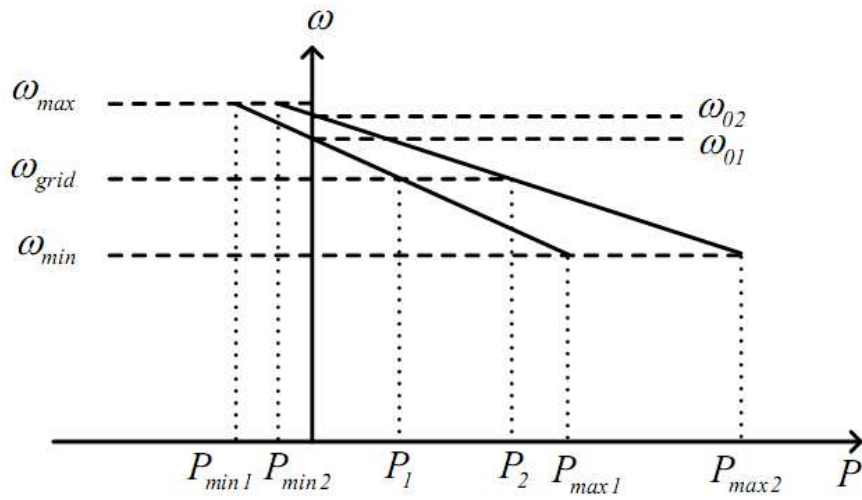


Figura 3-5 - Frequência *versus* Potência activa [1]

$$P_1 = \frac{\omega_{grid} + \omega_{01}}{k_P^1} \quad (3.5)$$

$$P_2 = \frac{\omega_{grid} + \omega_{01}}{k_P^2} \quad (3.6)$$

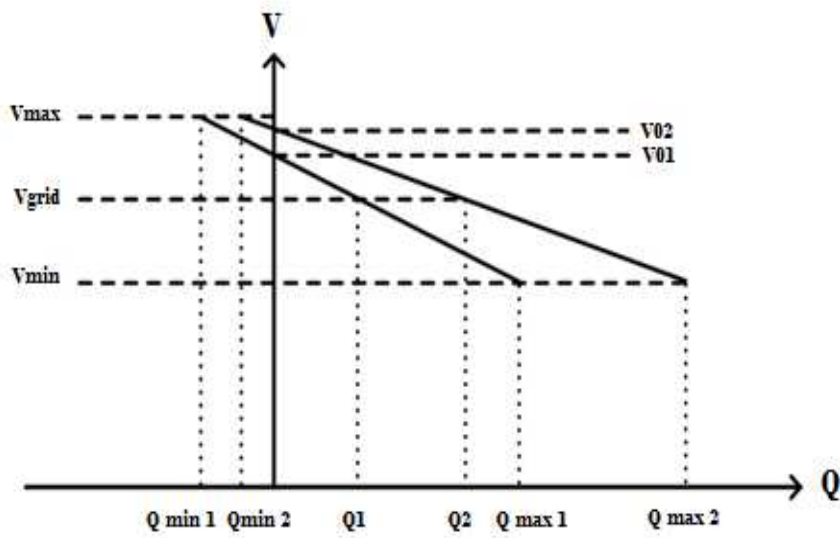


Figura 3-6 - Tensão *versus* Potência reactiva (adaptado de [1])

$$Q_1 = \frac{V_{grid} + V_{01}}{k_Q^1} \quad (3.5)$$

$$Q_2 = \frac{v_{grid} + v_{02}}{k_Q^2} \quad (3.6)$$

Se um cluster de inversores fonte de tensão operar em modo isolado, as variações de carga serão compensadas por variações de potência de todos os inversores:

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n \Delta P_i \quad (3.6)$$

sendo ΔP a variação total de potência e ΔP_i a variação no i –ésimo inversor.

A variação de frequência pode então ser calculada da seguinte forma [1]:

$$\Delta \omega = \omega_{0i} - k_{pi} \times P_i - [\omega_{0i} - k_{pi} \times (P_i + \Delta P_i)] = k_{pi} \times \Delta P_i \quad (3.7)$$

Por analogia, o mesmo poderia ser feito para o controlo de tensão/potência reactiva do inversor, com base no estatismo. No entanto, devido às características locais da rede - impedância dos ramos - não é possível uma partilha precisa de potência reactiva entre os inversores, tal como acontece no caso da potência reactiva.

A Figura 3-7 ilustra um diagrama com o esquema de controlo do inversor fonte de tensão e na Figura 3-8 é apresentado o seu modelo de controlo. O ganho k_{ff} é introduzido no modelo por questões de estabilidade [1].

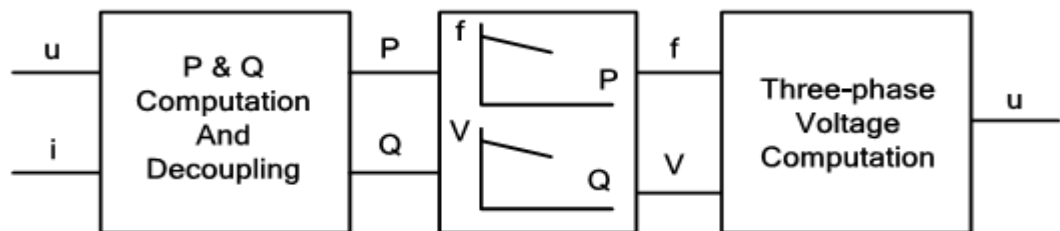


Figura 3-7 - Diagrama do esquema de controlo do inversor fonte de tensão [1]

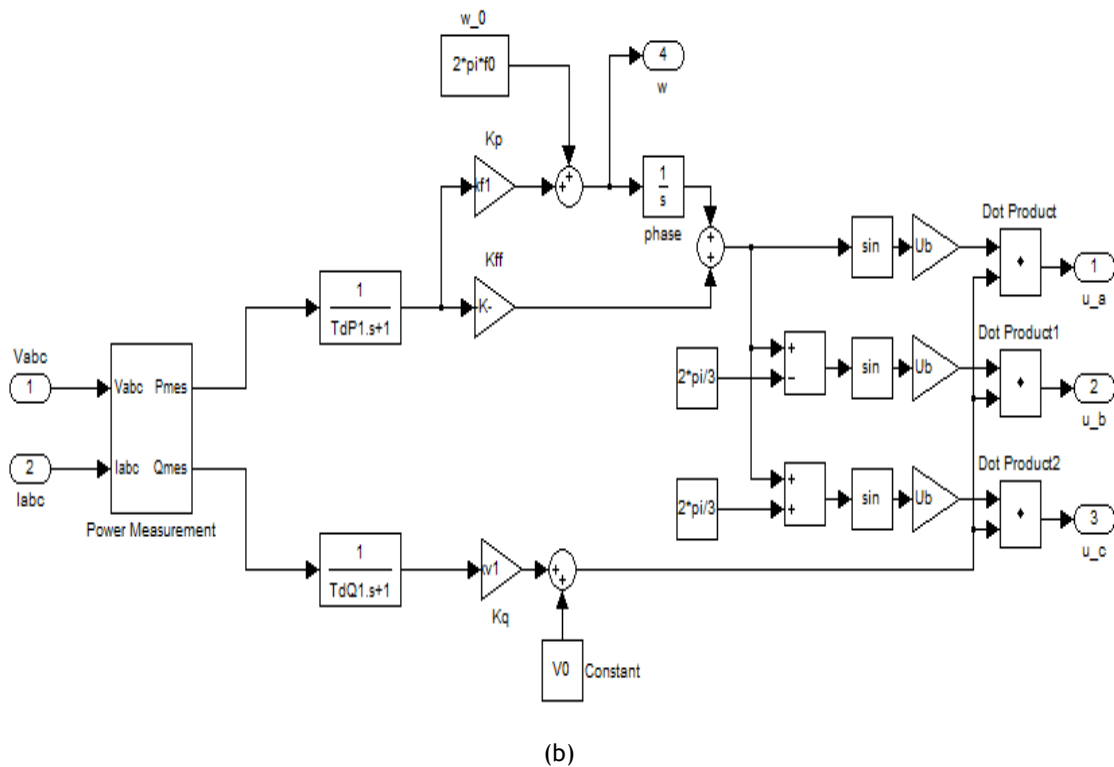
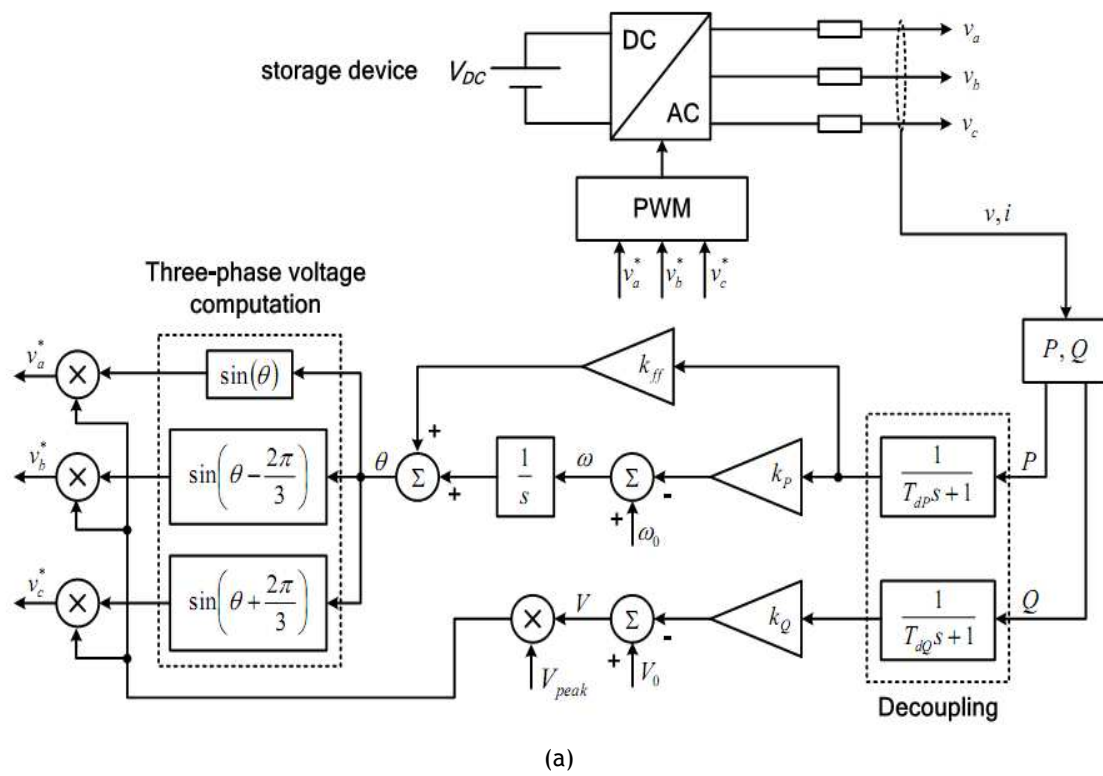


Figura 3-8 - (a) Esquema de controlo do inversor Fonte de Tensão [2] (b) Implementação do inversor Fonte de Tensão em *Matlab Simulink*

3.2.3 - Modelização do Inversor 4-pernas

Para fazer face aos desequilíbrios de tensão, várias metodologias são possíveis ser utilizadas, como foi já referido na secção 2.3.4.1. Tendo em vista a necessidade de corrigir desequilíbrios na rede, desenvolveram-se os inversores 4-pernas, designados na literatura anglo-saxónica de inversores *4-leg*.

Um inversor fonte de tensão baseado na bem conhecida topologia comum 3-pernas, pode apenas produzir duas saídas independentes de tensão. Por exemplo, se V_{ab} e V_{bc} forem ambos conhecidos, então V_{ca} está implicitamente definido [11].

Para fornecer potência a sistemas trifásicos desequilibrados e com cargas trifásicas não-lineares, foi necessário desenvolverem-se inversores 4 pernas. A topologia deste inversor permite produzir 3 tensões independentes, consoante a carga que esteja a ser alimentada. Na Figura 3-9 está representado a topologia do inversor 4-pernas.

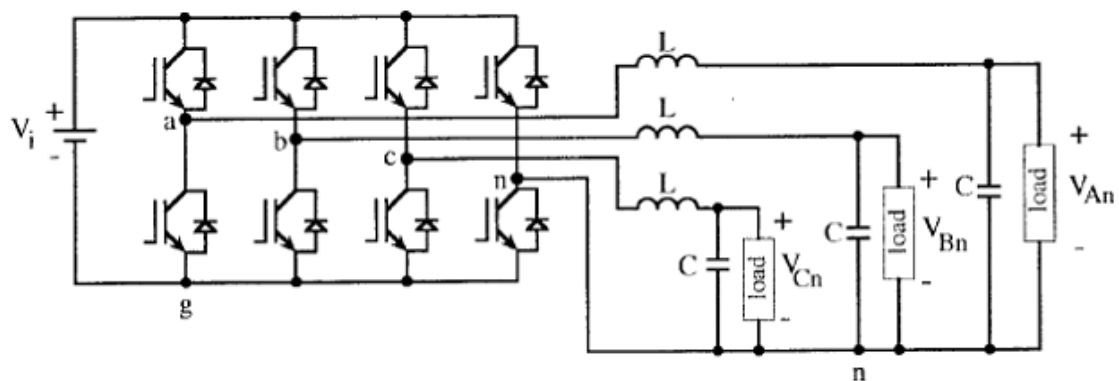


Figura 3-9 Topologia do inversor 4-pernas [11]

Foi já previamente referido que em [11] foi desenvolvido e modelizado um sistema de equilíbrio de tensões, com base num inversor deste tipo. Esse sistema de equilíbrio de tensões foi utilizado numa MR num estudo onde se verificava a capacidade da MR fazer seguimento de carga em condições onde existem desequilíbrios de tensão.

O sistema de controlo do inversor é formado por um bloco de regulação de tensão-corrente e um bloco de controlo externo - estatismo. A modelização desses blocos foi realizada da seguinte forma [11]:

- **Bloco de controlo do estatismo:** modelizado de modo a operar de forma idêntica ao inversor fonte de tensão, apresentado na secção 3.2.2. Este bloco na unidade de equilíbrio é responsável por fornecer a referência tensão na sua saída, dependendo esses valores da potência activa e reactiva solicitada ao inversor;

- **Bloco de controlo de tensão:** o controlo de tensão foi realizado tendo como base numa modelização proposta por [25] (Figura 3-10). No entanto, foi desenvolvido em [11] um esquema alternativo, mais eficiente, que consiste na transformação do sistema de coordenadas dos controladores PI em coordenadas $\alpha - \beta - 0$. Na Figura 3-11 está representado o diagrama fasorial da transformação de Park. O vector espacial $\underline{u}$ é multiplicado por $e^{-j\omega_N t}$ de modo a obter o vector complexo espacial no sistema de coordenadas $d - q - 0$. No referencial com sentido de rotação positivo, a função de transferência do controlador PI é dado por (3.8)

$$\dot{i}_{ref}^r = \frac{k_p s + k_i}{s} \underline{e}^r \quad (3.8)$$

Multiplicando a equação 3.8 por $e^{j\omega_N t}$ obtém-se a projecção no sistema de coordenadas estacionárias $\alpha - \beta - 0$. A multiplicação por $e^{j\omega_N t}$ no domínio dos tempos corresponde à substituição de s por $(s - j\omega_N)$ no domínio das frequências, como indicado em (3.9).

$$f(t)e^{j\omega_N t} \longrightarrow F(s - j\omega_N) \quad (3.9)$$

Assim, a transformação da equação (3.8) no sistema de coordenadas $\alpha - \beta - 0$ pode ser escrita como em (3.10).

$$\dot{i}_{ref}^s = \frac{k_p(s - j\omega_N) + k_i}{s - j\omega_N} \underline{e}^s \quad (3.10)$$

De modo equivalente, a mesma abordagem pode ser feita para o referencial com sentido de rotação negativo, sendo dado como indicado em (3.11):

$$\dot{i}_{ref}^s = \frac{k_p(s + j\omega_N) + k_i}{s + j\omega_N} \underline{e}^s \quad (3.11)$$

Da combinação das equações (3.10) e (3.11) resulta a estrutura de controlo no sistema de coordenadas estacionárias $\alpha - \beta - 0$:

$$\begin{bmatrix} I_{ref_\alpha} \\ I_{ref_\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2k_p \frac{2k_i s}{s^2 + \omega_N^2} & 0 \\ 0 & 2k_p \frac{2k_i s}{s^2 + \omega_N^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

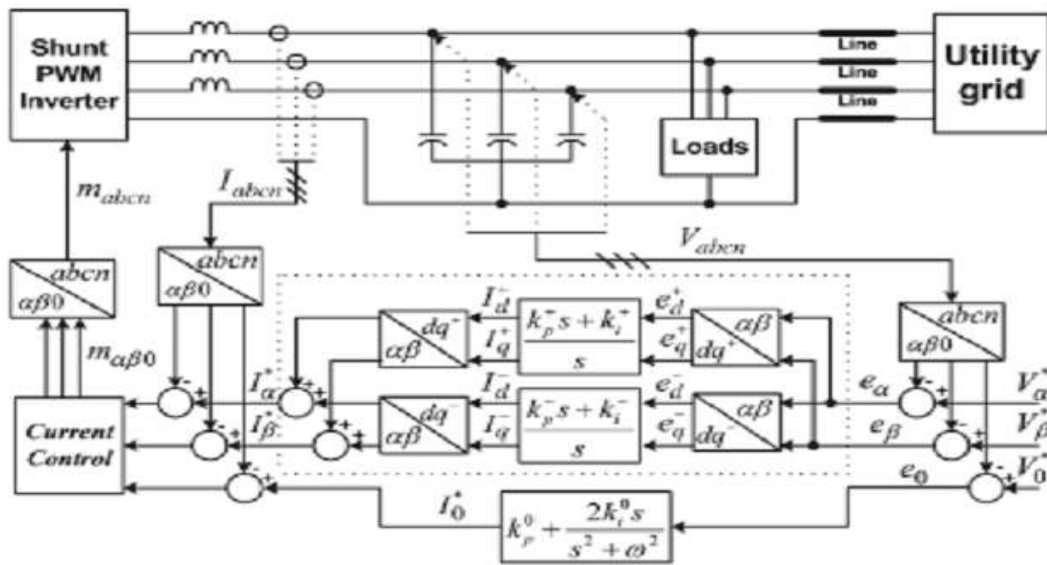


Figura 3-10 - Controlo de tensão da unidade de equilíbrio [11]

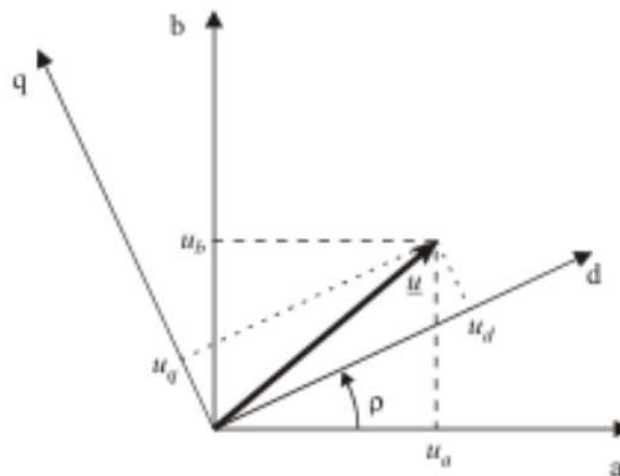


Figura 3-11 - Diagrama fasorial da Transformação de Park [11]

- **Bloco de controlo de corrente:** o controlo de corrente é implementado utilizando apenas controladores Proporcionais. Na Figura 3-12 está representado a estrutura do bloco de controlo de corrente implementado em ambiente *Matlab/Simulink*

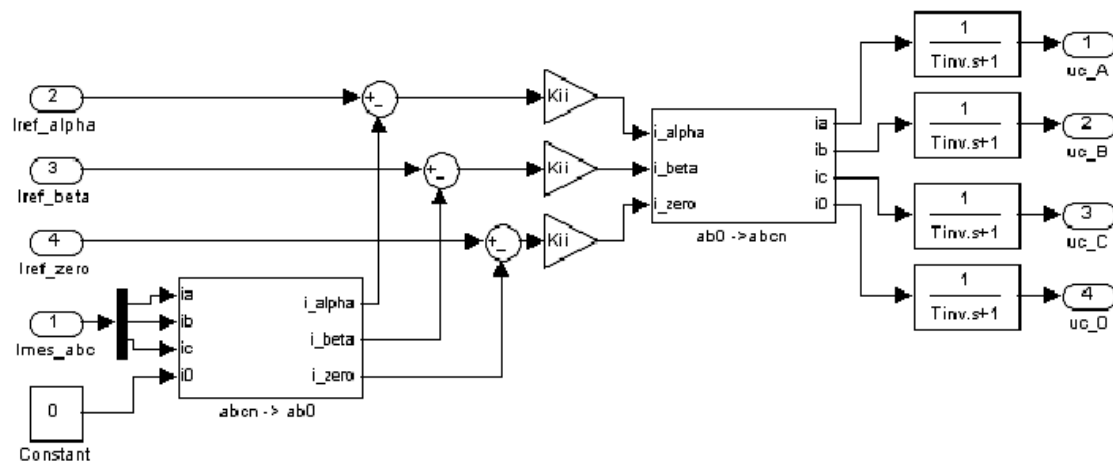
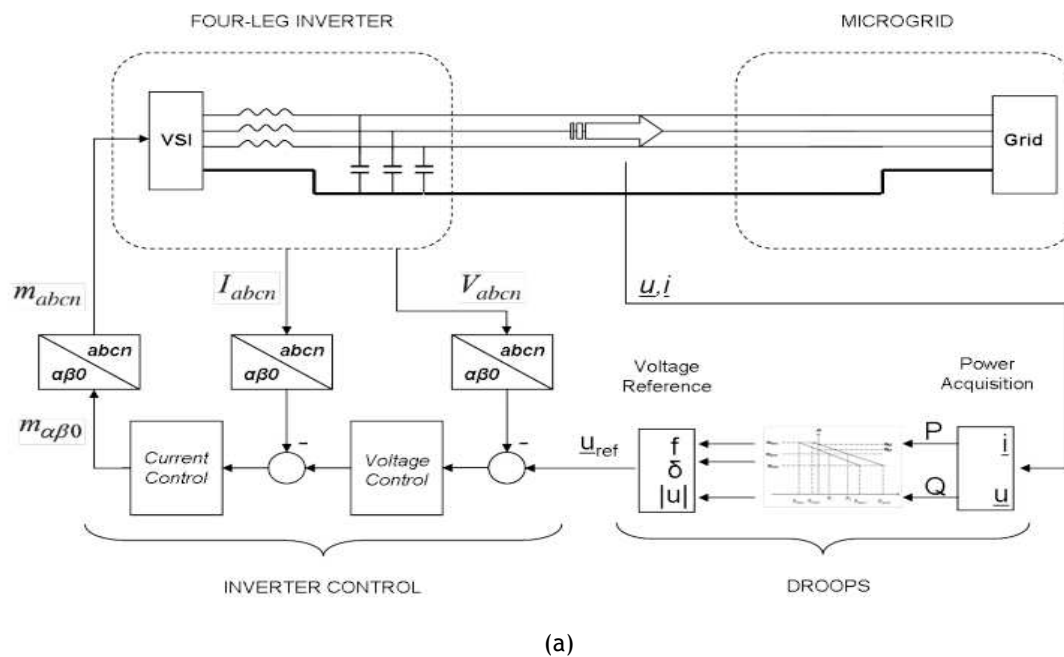


Figura 3-12 - Estrutura do bloco de controlo de corrente

O ganho proporcional k_{ii} é escolhido preferencialmente com valor elevado de forma a atingir-se um bom comportamento dinâmico. O sinal de saída do bloco de controlo de corrente é transformado novamente, do sistema de coordenadas $\alpha - \beta - 0$ para o sistema de coordenadas original, $a - b - c - n$. Esse sinal sinusoidal - m_{abcn} - controlará o inversor fonte de tensão, sobretudo através do terminal do neutro do inversor.

Na Figura 3-13 está representado um esquema de controlo do sistema de equilíbrio de tensões (a) assim como a sua implementação em ambiente *Matlab/Simulink* (b).



(a)

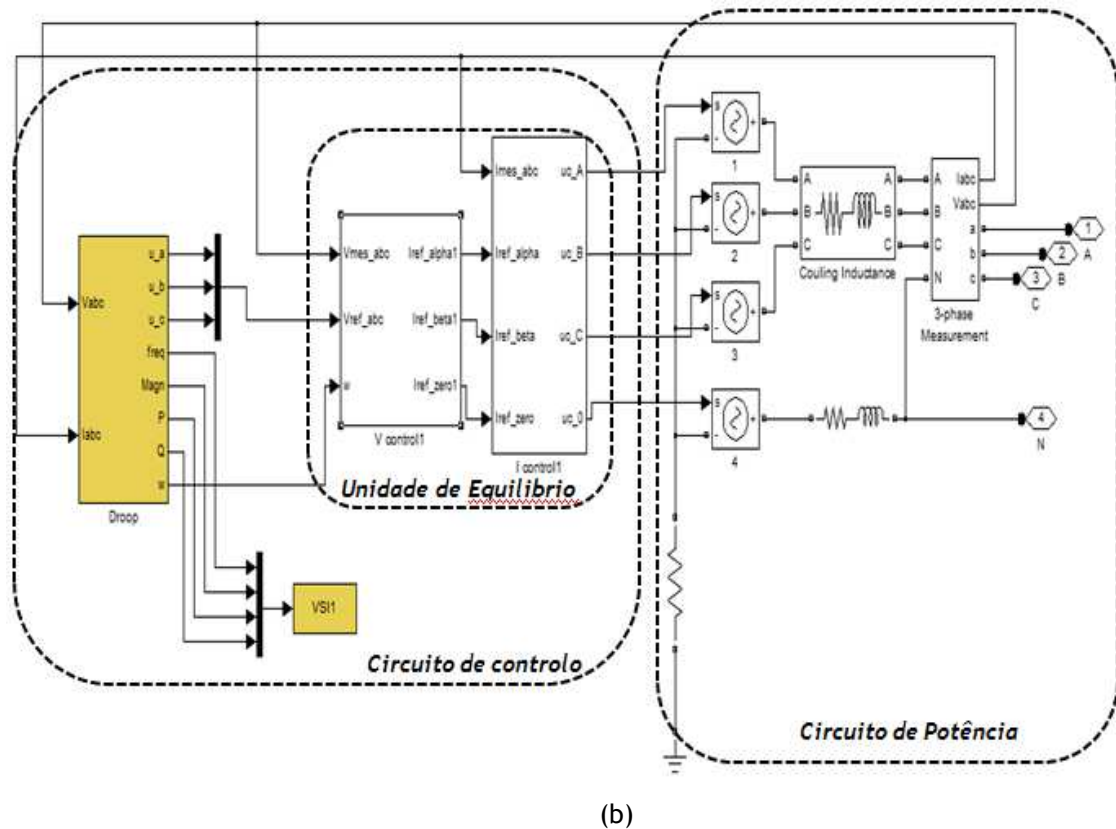


Figura 3-13 - (a) Estrutura de controlo da unidade de equilíbrio [11] (b) Implementação da estrutura de controlo da unidade de equilíbrio em ambiente Matlab/Simulink

3.3 - Modelização de Micro-Fontes

O desenvolvimento do conceito de MR apresentado anteriormente tem como base uma estrutura de controlo hierárquico sobre todos os elementos constituintes da MR. Essa estrutura de controlo permite que durante situações de emergência o sistema responda autonomamente, actuando sobre as unidades de MG que lhes estão associadas. De modo a avaliar a capacidade de operação da MR, sobretudo em condições de emergência, é necessário desenvolver-se uma plataforma de simulação capaz de simular o comportamento dinâmico das microfontes.

No capítulo anterior foi referido que nesta dissertação seriam utilizados apenas dois tipos de MF juntamente com os dispositivos de armazenamento. A escolha do tipo de MF a utilizar, bem como a necessidade de utilização de dispositivos de armazenamento fora já explicada anteriormente. No entanto, isso corresponde à condição mínima exigida para que seja testada a reposição de serviço, podendo-se utilizar a partir daí qualquer tipo e número de MF, uma vez que é sempre possível exercer por parte do MGCC algum tipo de controlo

sobre estas. No entanto, a consideração de mais MF acarretaria também maior complexidade computacional, comprometendo assim a eficiência das simulações. Assim, sem prejuízo da correcta validação do conceito pretendido, foram utilizados apenas dois tipos tecnológicos de MF, que serão descritos nas secções seguintes.

3.3.1 - Modelização do Painel Fotovoltáico

Existem vários modelos reportados na literatura com diferentes tipos de complexidade que podem ser utilizados para descrever o comportamento da célula fotovoltaica (FV). Em [1] encontram-se descritas as equações matemáticas de um modelo baseado em elementos eléctricos discretos agrupados num circuito equivalente. Os modelos reflectem a característica Tensão-Corrente da célula e pode ser representado pelo circuito eléctrico equivalente apresentado na Figura 3-14:

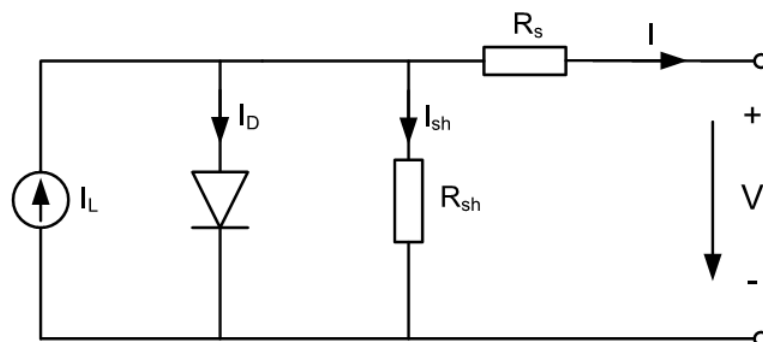


Figura 3-14 - Circuito equivalente de uma célula FV [1]

onde:

- I : Corrente na carga (A)
- I_L : Corrente gerada pela radiação solar (A)
- I_{sh} : Corrente shunt (A)
- R_{sh} : Resistência paralelo (Ω)
- :
- R_s : Resistência série (Ω)
- V : Tensão na carga (V)

Na Figura 3-15 estão representadas as características Tensão-Corrente e Potência-Tensão de uma genérica célula FV. É possível observar que a potência máxima extraída da célula FV depende do ponto de operação. O ponto correspondente ao máximo de extracção de potência da célula é designado de PPM - Ponto de Potência Máxima (MPP - *Maximum Power Point*).

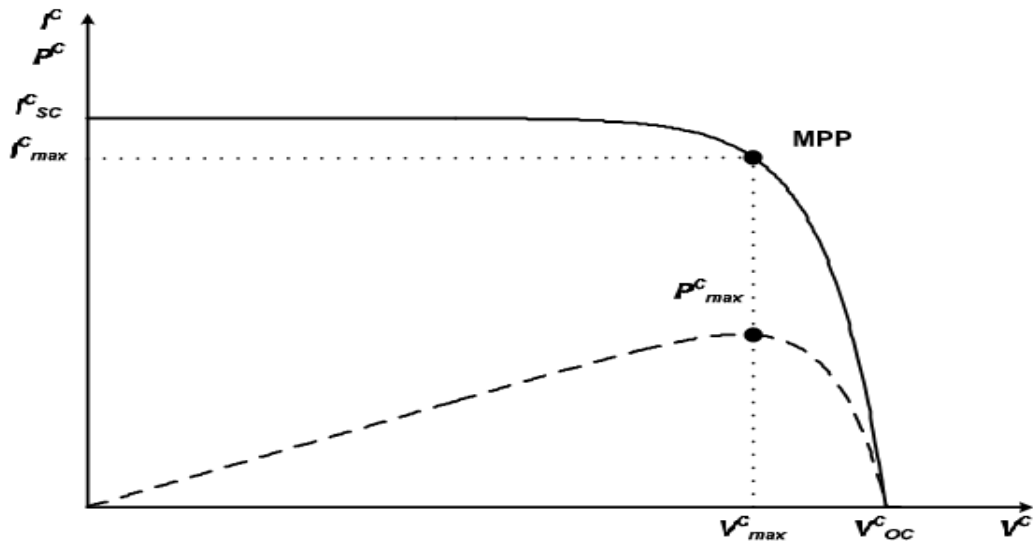


Figura 3-15 - Características típicas de I-V e P-V de uma célula solar [1]

Além das curvas características apresentadas na Figura 3-15, o fabricante fornece ainda, os coeficientes de variação da corrente de curto-circuito e da tensão de circuito aberto com a temperatura, (como é ilustrada na Figura 3-16 e 3-17, estes valores apresentam alterações significativas com a temperatura de operação do painel). O valor do MPP depende também da radiação solar. Para uma dada radiação solar G_T constante, a diminuição da temperatura traduz-se num aumento do V^c_{max} e consequentemente aumento do MPP. Alternativamente, para uma temperatura constante e diminuição da radiação solar, o MPP diminui, enquanto que V^c_{max} mantém-se praticamente constante [1].

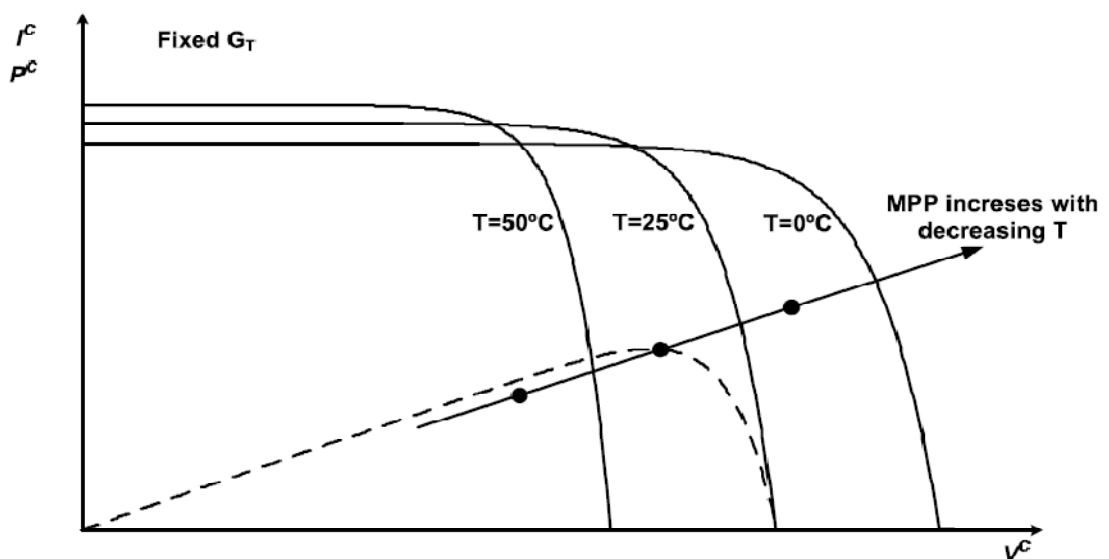


Figura 3-16 - Influência da temperatura na característica I-V da célula PV [1]

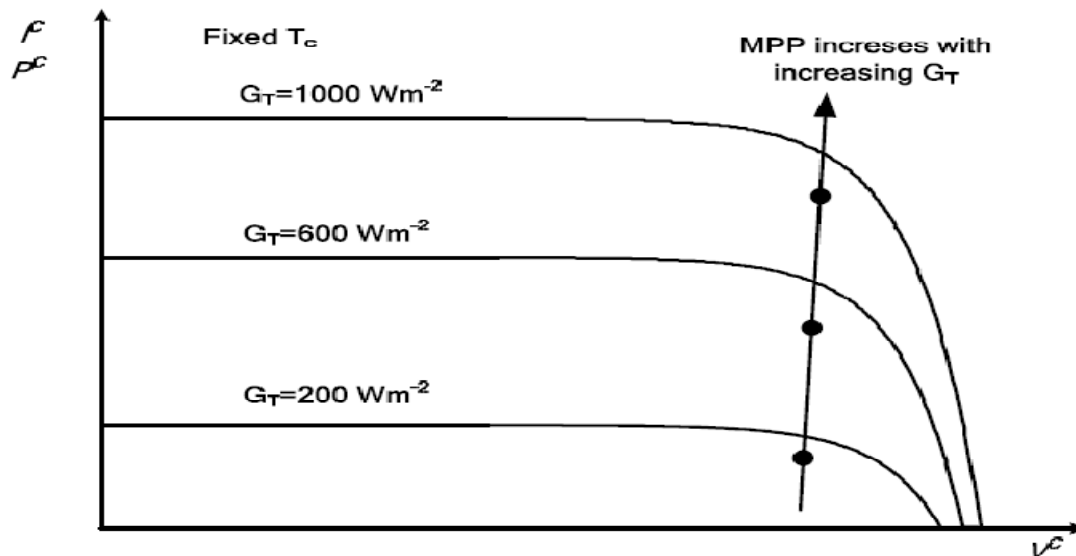


Figura 3-17 - Influência da radiação solar na característica I-V da célula FV [2]

Dada a particularidade da curva característica I-V da célula FV, é necessário desenvolverem-se sistemas de controlo para a extracção da potência máxima do painel solar - *Maximum Power Point Tracker* (MPPT). Na Figura 3-18 é possível ver um esquema típico de ligação de um painel solar fotovoltaico. Como é possível verificar-se também na mesma figura, o MPPT corresponde ao primeiro andar de controlo, antecedendo ao controlo do inversor.

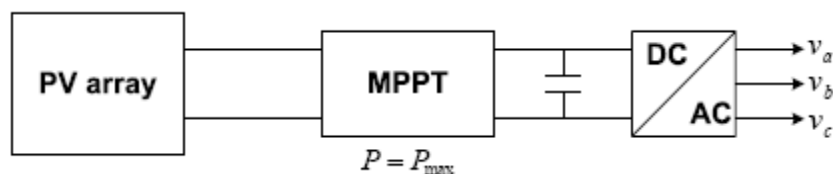


Figura 3-18 - Configuração de um Sistema FV [1]

O ponto de extracção de potência máxima - MPP é atingido com recurso ao MPPT. Existem diversos algoritmos para actuação e controlo do MPPT. Não sendo o âmbito desta dissertação o sistema de controlo do MPPT, este controlador foi modelizado considerando que a sua actuação é tão rápida que o painel está a operar sempre na potência máxima.

No entanto, é possível encontrar-se em [1] informação adicional relativa aos algoritmos de controlo habitualmente utilizados no MPPT.

O segundo andar de controlo, referente ao conversor DC/AC, corresponde ao controlo de um inversor PQ, descrito na secção 3.2.1

3.3.2 - Modelização da MicroTurbina

A importância para a MR de unidades totalmente controláveis, sobretudo quando esta opera no modo de Emergência, foi já discutida no capítulo anterior. Também foi já referido anteriormente que as microturbinas são algo “lentas” a reagir a solicitações de carga. Na Figura 3-19 é apresentado a resposta ao degrau da microturbina em malha aberta, com base no modelo dinâmico proposto em [1]. Para suplantar essa limitação da resposta da microturbina, estas devem ter acoplados dispositivos de armazenamento. Além da necessidade de socorrer a microturbina sempre que haja variações transitórias na MR, os dispositivos de armazenamento são responsáveis pela prestação de serviço auxiliares à microturbina, conferindo-lhe assim capacidade de arranque autónomo.

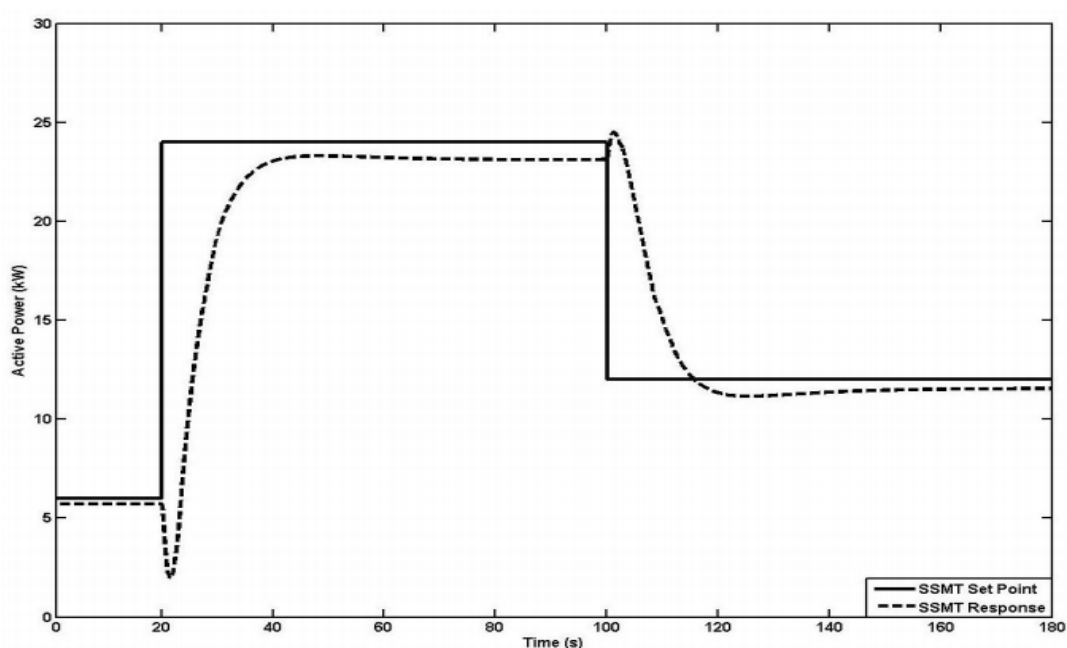


Figura 3-19 - Resposta ao degrau de uma MicroTurbina [1]

Em [1] é apresentado um modelo matemático completo da microturbina, que permite estudar o seu comportamento dinâmico. Como tem vindo a ser referido, estas unidades de produção controláveis requerem que lhes esteja associado dispositivos de armazenamento, capazes de fornecer uma resposta imediata a solicitações de carga, como também para permitir o seu arranque autónomo, determinante para a reposição de serviço. A presença de baterias permite não considerar a dinâmica da microturbina, uma vez que são estas as responsáveis por garantir a resposta a qualquer variação de carga. Em consequência, o respectivo inversor da microturbina é também modelizado como inversor fonte de tensão.

3.3.3 - Modelização de Dispositivos de Armazenamento

Tal como as MF descritas previamente, os dispositivos de armazenamento assumem um papel muito importante e específico, em termos de resposta aos sinais de controlo. Assim, os dispositivos de armazenamento devem fornecer energia de modo a equilibrar perturbações transitórias e/ou mudanças significativas de carga, funcionando como um *buffer*.

Encontram-se na literatura modelos que analisam o comportamento de dispositivos de armazenamento como baterias, volantes de inércia ou supercondensadores [26]. No entanto, uma vez mais a natureza do trabalho realizado não requer um conhecimento profundo sobre as variáveis internas dos dispositivos de armazenamento. No presente trabalho é requerido que os dispositivos de armazenamento actuem como buffers, de modo a garantir estabilidade à MR sempre que existam perturbações transitórias, sobretudo quando a MR opera em modo isolado. Considerando o período de tempo de interesse para análise do comportamento dinâmico da MR, os dispositivos de armazenamento podem ser modelizados como fontes de tensão de corrente contínua de valor constante, utilizando um interface de electrónica de potência para efeitos do seu acoplamento à rede [1]. Apesar de se considerar os dispositivos de armazenamento fontes de tensão, há no entanto que considerar também que estes têm limitações físicas e por isso a sua capacidade de armazenamento não é infinita

Os dispositivos de armazenamento utilizados distinguem-se entre dispositivos de armazenamento distribuído e dispositivos de armazenamento principal (central). O armazenamento distribuído é todo aquele associado às MF controláveis, que como já fora explicado na secção anterior, dá resposta a todas variações de carga. O dispositivo de armazenamento principal, localizado imediatamente a jusante do ponto de interligação da MR com a rede a montante, é o responsável por formar a rede, colocando-a em tensão, no caso da operação da MR em modo de emergência. Além disso, tem como função fornecer suporte às MF associadas à MR sempre que haja um desvio de frequência na rede, em consequência de variações de carga.

3.4 - Modelização das Cargas

A modelização das cargas, tanto monofásicas como trifásicas, consistiu numa simples associação RL em série de parâmetros constantes. As cargas trifásicas equilibradas foram consideradas como estando ligadas em estrela (com neutro acessível). Uma ilustração da modelização das cargas feita em ambiente *Matlab/Simulink* é apresentada na Figura 3-20. De forma a poder ligar-se as cargas à rede de forma controlada, foi necessário utilizar-se disjuntores.

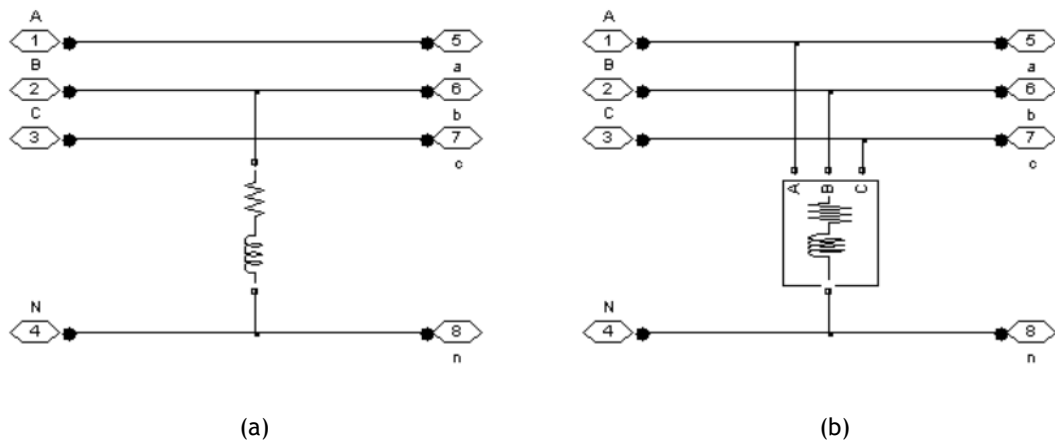


Figura 3-20 - Modelos das cargas monofásicas (a) e trifásicas (b) em ambiente *Matlab/Simulink*

3.5 - Modelização das Linhas de Transmissão

A modelização das linhas de transmissão consistiu numa configuração de 4 condutores (3 condutores de fase e um condutor de neutro), onde cada condutor é modelizado por uma impedância RL em paralelo (Figura 3-21). Os parâmetros utilizados são similares aos utilizados em [11]. Esta modelização, modelo RL em paralelo foi admitida em detrimento de outras possíveis (e.g: modelo em π) pois torna mais célere as simulações. Contudo, é preciso atender a modelos mais detalhados se o ambiente de simulação assim o exigir.

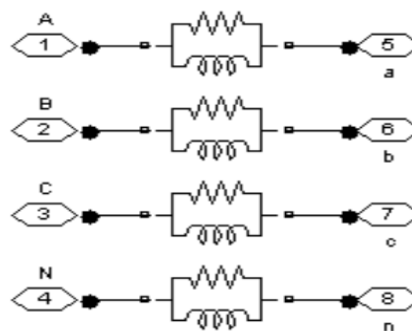


Figura 3-21- Modelo das linhas de transmissão em ambiente *Matlab/Simulink*.

3.6 - Modelização da Rede de Média Tensão

O processo de reposição de serviço na MR culmina com a ligação desta à rede a montante, de Média Tensão (MT). A modelização da rede de Média Tensão foi utilizada com o propósito de avaliar o comportamento dinâmico da MR no momento em que esta faz a ligação

com a rede a montante, ou seja, quando abandona o Modo de Emergência para passar ao Modo Normal. Para o efeito, a rede de distribuição de MT foi modelizada para jusante do quadro geral de baixa tensão do posto de transformação como uma fonte de potência infinita fornecendo um sistema trifásico equilibrado de tensões (neutro acessível). A Figura 3-22 demonstra essa modelização.

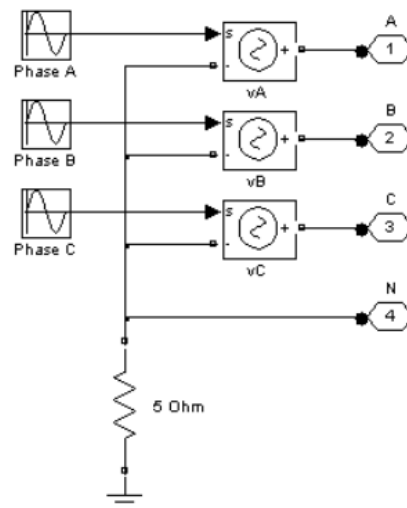


Figura 3-22 - Modelo da Rede a montante em ambiente *Matlab/Simulink*.

3.7 - Sumário e Principais Conclusões

Ao longo deste capítulo foram apresentados modelos que permitiram avaliar o desempenho da MR em condições de emergência. Sendo o elemento dominante numa MR o inversor electrónico de potência, a sua completa modelização no âmbito do estudo realizado revelou-se determinante para explorar a capacidade de controlo da MR.

Para o funcionamento da MR em modo isolado, em particular no caso da MR conduzir uma acção de reposição de serviço, é fundamental que exista pelo menos uma unidade de MG com capacidade de arranque autónomo. A escolha da unidade de MG com essa capacidade recaiu sobre a microturbina a gás. Apesar de possuir a capacidade de arranque autónomo, a sua resposta às solicitações de carga é “lenta”, pelo que estas devem estar equipadas dispositivos de armazenamento de energia capazes de dar resposta às variações de carga. A consideração de uma unidade de armazenamento de energia responsável por dar resposta às variações de carga, permitiu não considerar-se a dinâmica da máquina primária.

No capítulo seguinte será apresentada a proposta de reposição de serviço em MR desequilibradas, suportada por simulações dinâmicas utilizando os modelos matemáticos descritos no presente capítulo.

Capítulo 4

Estratégia de Reposição de Serviço em Micro-Redes

4.1 - Introdução

Nos capítulos anteriores, foram identificados os principais problemas e cuidados a ter quando a Micro-Rede (MR) opera em modo de emergência e apresentados os modelos matemáticos adoptados para simular, em regime dinâmico, o comportamento da MR. Neste capítulo são apresentados os procedimentos necessários para efectuar a reposição de serviço numa MR considerando os desequilíbrios de tensão que normalmente se verificam nas redes de distribuição de Baixa Tensão (BT). Uma possível estratégia de reposição de serviço em MR foi já definida em [1]. No entanto, a MR foi considerada como sendo um sistema trifásico e perfeitamente equilibrado. Esse pressuposto frequentemente evocado em estudos transitórios e estacionários do Sistema Eléctrico de Energia (S.E.E), sempre que os eventuais desequilíbrios sejam “pequenos” e por isso desprezáveis, não é devidamente adequado ao caso das MR, particularmente em situações de operação em modo de emergência. De facto, por um lado, a predominante distribuição monofásica de cargas, bem como a existência de micro-fontes (MF) monofásicas, não augura que o sistema seja realmente equilibrado. Por outro lado, durante o processo de reposição deserviço, as acções de controlo não têm como prioridade manter a rede equilibrada, mas antes assegurar a estabilidade de tensão e de frequência. Assim, neste capítulo, a estratégia de reposição de serviço apresentada em [1] é adaptada para o caso de MR trifásicas e desequilibradas. Os procedimentos adoptados são apresentados nas secções seguintes.

4.2 - Sequência de Acções para a Reposição de Serviço

Recordando a secção 2.4.2.3, a sequência de acções para a reposição de serviço consiste essencialmente nos seguintes passos:

1. Formação de pequenas ilhas em torno de cada MF com capacidade de arranque autónomo;
2. Criação da rede BT, através do dispositivo de armazenamento principal
3. Sincronização das pequenas ilhas criadas em 1. Verificadas as condições de sincronismo, a MF é ligada à rede de BT;
4. Ligação das cargas à medida que as MF com capacidade de arranque autónomo sincronizam com a rede de BT;
5. Ligação das MF não controláveis (sem capacidade de arranque autónomo);
6. Ligação de outras cargas. As cargas indutivas deverão ser ligadas nesta fase, onde a MR se encontra mais estável desde o início da reposição.
7. Mudança de estratégia de controlo dos inversores das MF, passando de uma operação Multi Master para uma operação em Single Master.
8. Sincronização da MR com a rede de MT a montante.

Durante as diferentes fases da reposição de serviço, é dada uma especial atenção ao controlo de tensão e frequência, pois é através desse controlo que se consegue uma operação estável da MR.

Dos 8 passos supracitados, o número 3 e número 8 são aqueles que terão de ser adaptados ao caso da rede desequilibrada. De facto, o algoritmo que permite realizar a sincronização em redes equilibradas não é compatível com redes desequilibradas. Nas secções seguintes é apresentado um algoritmo de sincronização para redes equilibradas e um outro algoritmo para redes desequilibradas.

Tal como já foi referido, a realização destas operações que irão conduzir à reposição de serviço admitem uma estrutura de comunicação subjacente, envolvendo o controlador central, controlador local e controlador das MF. Para que o processo se inicie, também é

necessária comunicação com o controlador situado ao nível hierárquico superior, DMS - *Distribution Management System*.

No que se refere à estratégia de controlo da MR durante o processo de reposição de serviço na MR, é imperativo que se utilize uma estratégia Multi-Master, por razões já justificadas anteriormente.

Já fora discutido nos capítulos anteriores a necessidade de dispositivos de armazenamento para assegurar a operação estável da MR. Em particular, nos instantes iniciais do processo de reposição de serviço na MR, o dispositivo de armazenamento principal pode ser utilizado para colocar em tensão a rede de BT, funcionando como unidade de formação da rede, de modo a sincronizar posteriormente as MF com capacidade de arranque autónomo. Uma vez realizada a sincronização da MF com a MR, o dispositivo de armazenamento principal contribui transitoriamente para equilibrar a geração e o consumo na sequência da ligação de cargas na MR, não fornecendo potência activa quando a MR se encontra a operar a 50 Hz.

4.3 - Sincronização das Micro-Fontes com a Micro-Rede

Do modo similar ao que acontece nos sistemas de produção convencionais do S.E.E., a sincronização das MF com a rede de BT deverá atender a um conjunto de procedimentos para minimizar os efeitos transitórios e consequentemente o impacto desta acção na MR. Para tal as MF só devem ser sincronizadas quando se verificarem as condições de sincronismo, ou seja, entre as MF e a rede de BT deve verificar-se o seguinte:

- ✓ Mesma sequência de fases;
- ✓ Mesma amplitude de tensão;
- ✓ Mesma frequência;
- ✓ Mesmo esfasamento.

Em regime desequilibrado, das quatro condições de sincronismo, a que se revela pertinente é a que impõe a mesma amplitude de tensão em ambos os sistemas, MF e rede de BT. Por essa razão, a primeira abordagem consistiu em desenvolver um algoritmo de sincronização capaz de efectuar a sincronização em regime equilibrado e com possibilidade de generalizar o princípio de funcionamento para regime desequilibrado. Nas secções seguintes são apresentados os algoritmos desenvolvidos e implementados em ambiente *Matlab/Simulink*.

4.4 - Algoritmo de sincronização para regime trifásico equilibrado

Nesta secção são descritos os procedimentos para a implementação do algoritmo de sincronização em ambiente de simulação dinâmica.

O algoritmo de sincronização consiste nas seguintes etapas:

1. Verificação das condições de sincronismo;
2. Actuação sobre as MF;
3. Actuação sobre o disjuntor que faz a ligação eléctrica entre a MF e a rede de BT.

O primeiro passo consiste em verificar se a sequência de fases entre a MF a sincronizar e a rede de BT é a mesma. No caso de não ser, é feita a alteração das fases da MF. De seguida, são medidos os valores eficazes das tensões do lado da MF e do lado da rede de BT. Sendo a rede trifásica equilibrada, basta efectuar a medição apenas numa das fases, pois as restantes terão o mesmo valor eficaz. Foi considerado que a tolerância máxima admitida para a diferença entre os valores eficazes é de 2%. O valor de referência de tensão da MF, $V_{0_{novo}}^{MF}$, é actualizado pelo valor do desvio entre os valores eficazes da seguinte forma:

$$\Delta V = V_{RMS}^{MF} - V_{RMS}^{MR} \quad (4.1)$$

$$V_{0_{novo}}^{MF} = V_0^{MF} - \Delta V \quad (4.2)$$

onde V_{RMS}^{MF} e V_{RMS}^{MR} são respectivamente os valores eficazes da MF e da rede de BT no sistema p.u e V_0^{MF} é o valor de referência da tensão do inversor associado à MF.

Para garantir a mesma frequência entre a MF e a rede de BT ($\omega^{MF} = \omega^{MR}$), a referência de frequência do inversor da MF - ω_0^{MF} - é ajustada de acordo com a característica de estatismo do inversor. Combinando as Equações (4.3), (4.4) e (4.5) a referência de frequência para o inversor da MF é dada pela Equação (4.6)

$$\omega_0^{MF} = \omega^{MF} + k_p^{MF} \times P_{MF} \quad (4.3)$$

$$\omega_0^{MR} = \omega^{MR} + k_p^{MR} \times P_{MR} \quad (4.4)$$

$$\omega^{MF} = \omega^{MR} \quad (4.5)$$

$$\omega_0^{MF} = \omega_0^{MR} - k_p^{MR} \times P_{MR} + k_p^{MF} \times P_{MF} \quad (4.6)$$

onde k_p^{MF}, k_p^{MR} são os estatismos (valores positivos) da MF e da rede de BT respectivamente e P_{MF}, P_{MR} são as potências activas fornecidas por parte do inversor da MF e o inversor associado ao dispositivo de armazenamento principal, respectivamente.

A verificação do esfasamento entre as tensões da MF e da rede de BT é também uma condição essencial. É conveniente referir que no momento da sincronização o esfasamento entre as tensões de ambos os sistemas deve ser nulo de modo a minimizar a circulação de correntes transitórias podendo resultar em problemas para o funcionamento do inversor [1].

De modo a ser possível sobrepor uma onda de tensão a outra (esfasamento nulo), a frequência de ambos os sinais terá de ser forçosamente diferente, para que haja um movimento relativo entre eles. Para tal a acção de ajuste de frequência da MF definida na Equação (4.6) é adaptada de acordo com a Equação (4.7):

$$\omega_0^{MF} = \omega_0^{MR} + (k_p^{MR} \times P_{MR}) - (k_p^{MF} \times P_{MF}) + (2\pi \times \Delta f) \quad (4.7)$$

onde o desvio de frequência Δf é introduzido de modo a proporcionar movimento relativo entre o fasor correspondente à tensão aos terminais da MF e o fasor correspondente à tensão na rede de BT.

Foi considerado um desvio de frequência de 0,1 Hz, que resultou de uma solução de compromisso entre um desvio de frequência mínimo (verificado entre a MF e a rede de BT) e um tempo reduzido de espera para a verificação do esfasamento nulo (próximo de zero).

A partir do momento em que o fasor da tensão aos terminais da MF está coincidente com o fasor da tensão na rede de BT, estão verificadas as condições de sincronismo e o algoritmo emite uma ordem de comando para sincronizar a MF com a rede de BT.

De modo a verificar a sobreposição dos fasores, correspondente ao momento em que o esfasamento das tensões é nulo, recorreu-se à transformação do sistema de coordenadas, através da Transformada de *Park*, comunmente utilizada na representação matemática das máquinas eléctricas e em aplicações de controlo, nomeadamente no controlo vectorial.

A transformada de *Park* é uma transformação linear utilizada para simplificar a análise de circuitos trifásicos. Do ponto de vista geométrico, a Transformada de *Park* corresponde à projecção das três fases, separadas entre si de 120°, num referencial de dois eixos rodando com a mesma velocidade angular que a correspondentes fases sinusoidais. A Figura 4-2 representa gráficamente as componentes trifásicas da corrente no sistema de coordenadas $a-b-c$ e a respectiva transformação nas componentes contínuas $d-q$.

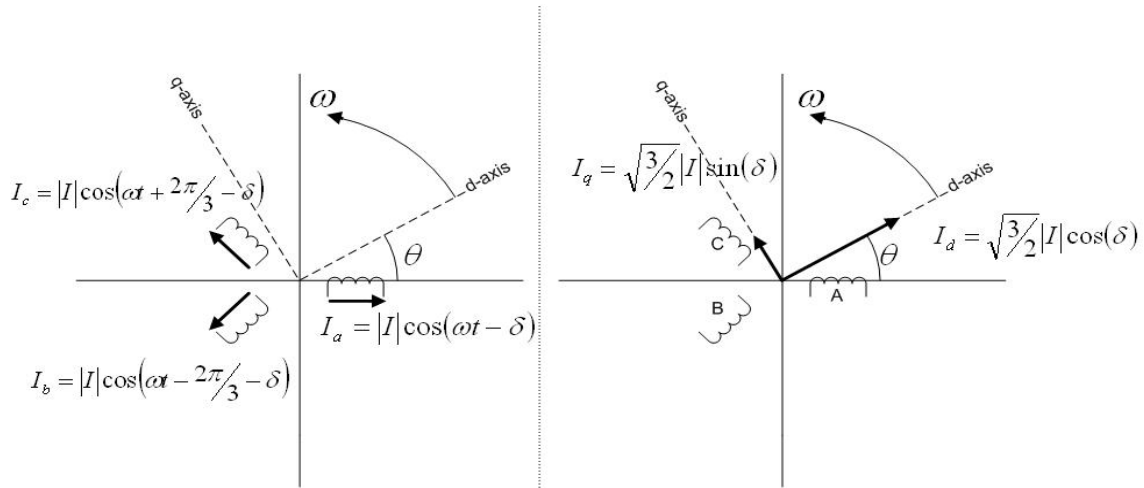


Figura 4-1 - Representação gráfica das componentes trifásicas da corrente no sistema de coordenadas $a-b-c$ e $d-q-0$

A transformação do sistema de coordenadas $a-b-c$ para o sistema $d-q-0$ é feita de acordo com a Equação (4.8):

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

A utilização deste sistema de coordenadas, irá permitir identificar o momento exacto em que as ondas de tensão da MF e da rede de BT estão em fase. Para tal, foram feitas medições da queda de tensão nas fases A, B e C entre a MF e a rede de BT, designadas respectivamente por ΔV_A , ΔV_B e ΔV_C . Aplicando a transformação de *Park*, obtêm-se as respectivas quedas de tensão em coordenadas $d-q$, ΔV_d e ΔV_q . A queda de tensão será nula quando a onda de tensão da MF for igual em módulo e em fase, à onda de tensão da rede de BT, ou seja, quando o módulo da queda tensão em coordenadas $d-q$ dado pela Equação (4.9) for igual a zero.

$$|\Delta V_{dq}| = \sqrt{\Delta V_d^2 + \Delta V_q^2} \quad (4.9)$$

Uma vez verificado um esfasamento muito próximo de zero, o algoritmo de sincronização gera um sinal de comando que dá ordem para sincronizar a MF com a rede de BT, tal como referido anteriormente para o caso da sincronização em regime equilibrado.

4.5 - Algoritmo de sincronização para regime trifásico desequilibrado

O desenvolvimento de um algoritmo de sincronização compatível com o carácter desequilibrado da MR seguiu os mesmos procedimentos do algoritmo apresentado na secção anterior. No entanto, a tarefa de garantir a mesma amplitude de tensão entre a MF e a rede de BT teve de ser abordada de modo diferente, dado o carácter desequilibrado das tensões.

Tal como no algoritmo de sincronização para regime equilibrado, a primeira verificação a realizar é a sequência de fases de ambos os sistemas trifásicos. Estando verificada essa primeira condição de sincronismo, é necessário garantir a mesma amplitude para a tensão aos terminais da MF e para a tensão na rede de BT. Em regime equilibrado, essa correcção consistiu em medir numa das fases a tensão e introduzir o desvio de tensão, calcular o desvio e adicionar esse desvio à tensão de referência do inversor da MF. Existindo desequilíbrios de tensão, não é possível igualar em simultâneo, as tensões nas três fases com base no desvio medido para uma das fases. Assim, foi necessário decompor o sistema trifásico de tensões nas suas componentes simétricas: directa (sequência positiva, +), inversa (sequência negativa, -) e homopolar (0).

Um sistema trifásico equilibrado é caracterizado por possuir apenas componente directa, sendo as restantes componentes nulas. Havendo desequilíbrios de tensão, existirá sempre componente directa e inversa, podendo existir ou não componente homopolar [16]. A metodologia proposta para igualar as tensões trifásicas desequilibradas entre a MF e a rede de BT tira partido da possibilidade de decompor o sistema trifásico nas suas componentes simétricas, utilizando a transformada de *Fortescue* já apresentada na secção 2.3.4.

O ajuste do módulo da tensão da MF foi feito com base no desvio verificado entre as componentes directas das tensões aos terminais da MF e da rede de BT. A componente inversa e homopolar existirá consoante a causa do desequilíbrio, pelo que não seria possível ajustar simultaneamente as três componentes simétricas de ambos os sistemas trifásicos. Como tal, quando as componentes directas forem coincidentes o algoritmo de sincronização assume que as tensões aos terminais da MF e na rede de BT têm módulo igual. Este algoritmo foi implementado em ambiente *Matlab/Simulink* tal como mostra a Figura 4-4.

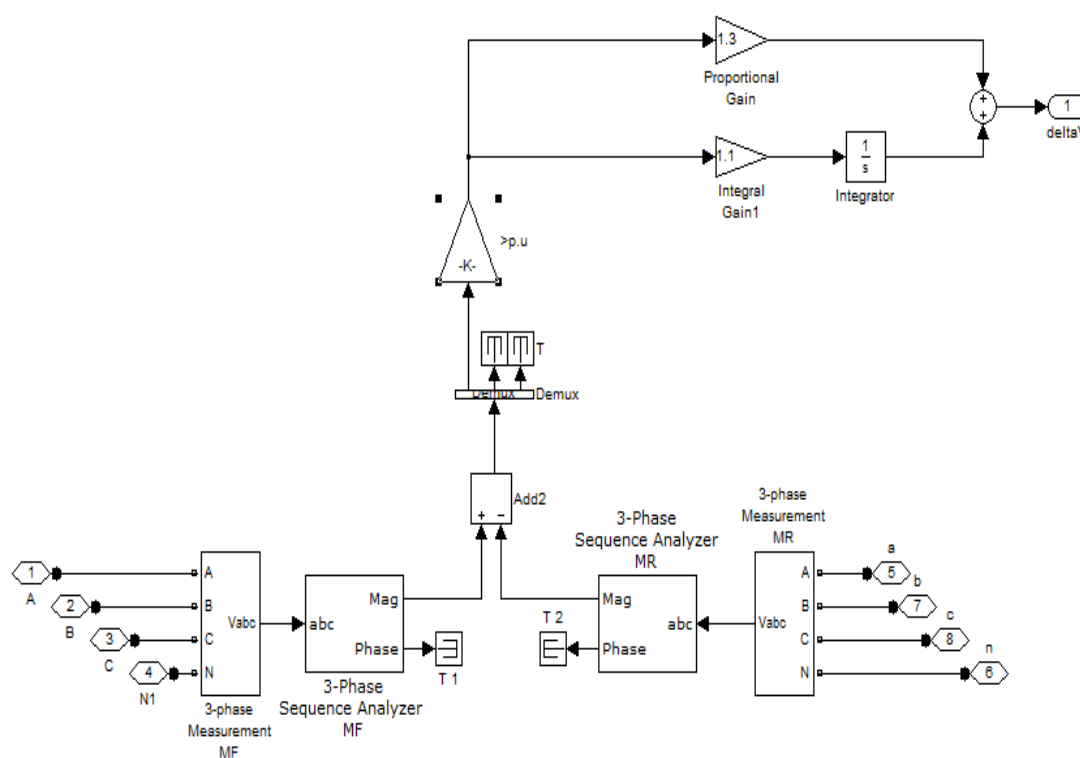
Tal como se pode observar na Figura 4-2, o desvio de tensão a adicionar à tensão de referência do inversor é gerada por um controlador Proporcional Integral (PI) com base no erro entre as componentes directas das tensões aos terminais da MF a sincronizar e na rede de BT.

A verificação das restantes condições de sincronismo foi realizada à semelhança do que foi feito no algoritmo de sincronização para regime equilibrado. O ajuste de frequência é realizado por correcção do valor da frequência de referência do inversor fonte de tensão acoplado à MF a sincronizar. De modo a ser possível fazer-se o ajuste do esfasamento da onda

de tensão da MF para que esta fique em fase à onda de tensão da rede de BT, repetiu-se o procedimento realizado no modelo de sincronizador apresentado anteriormente. Sendo este regime desequilibrado, o cálculo do módulo de tensão em coordenadas $d-q-0$ é agora obtido como apresentado na Equação (4.10).

$$|\Delta V_{dq0}| = \sqrt{\Delta V_d^2 + \Delta V_q^2 + \Delta V_0^2} \quad (4.10)$$

Assim como no caso anterior, quando o módulo da queda de tensão entre a MF e a rede de BT atingir um valor suficientemente próximo de zero, é gerado um sinal de comando que dá ordem para sincronizar a MF com a rede de BT



No capítulo seguinte, serão apresentados os resultados que validam a metodologia utilizada.

Figura 4-2 - Algoritmo de medição e cálculo do desvio de tensão implementado em *Matlab/Simulink*

4.6 - Controlo de Frequência

Na secção anterior foi apresentado o modo de funcionamento do mecanismo que permite às MF ligar às MR. Recordando os diferentes passos a seguir na reposição de serviço, a sincronização das MF com a rede de BT constitui o 3º passo da sequência. Os passos subsequentes, consistem na ligação das cargas das restantes MF não controláveis. A ligação das cargas é feita de forma gradual e em coordenação com a ligação e das restantes MF não controláveis, de modo a evitar variações elevadas de frequência. Embora em modo isolado sejam permitidos desvios de frequência superiores àqueles permitidos em modo normal, para manter a operação da MR estável, bem como assegurar o mínimo de qualidade de serviço, o controlo de frequência da MR deverá ser considerado.

Uma vez sincronizada a MF com a rede BT, existe apenas uma frequência comum a todo o sistema. Existindo variações de carga na rede de BT, a MF e o dispositivo de armazenamento principal irão suportar essas variações, de acordo com os seus estatismos. Se a frequência de referência não for actualizada em função do novo regime de carga, a frequência da rede de BT irá estabilizar num valor diferente dos 50Hz.

Para actualizar-se o regime de produção em função das variações de carga da rede de BT, a característica de estatismo do inversor (apresentada na secção 3.2.2) da MF deverá deslocar-se na vertical, o que corresponde a variar o valor da frequência de referência do inversor. A necessidade de realizar-se controlo secundário de frequência prende-se com o facto do dispositivo de armazenamento principal ter capacidade limitada de injeção e absorção de potência activa. Dada esta limitação técnica do dispositivo de armazenamento, o inversor que lhe está associado é controlado de forma a injectar/absorver potência activa somente quando a frequência da rede de BT for diferente de 50 Hz.

De modo a ser possível ajustar o valor da frequência de referência da MF, e assim garantir a frequência de 50Hz na MR, foi desenvolvido um controlador PI. O controlador PI actuará sobre o valor da frequência de referência sempre que a frequência da MR for diferente de 50 Hz. A Figura 4-3 ilustra o esquema de controlo de frequência desenvolvido.

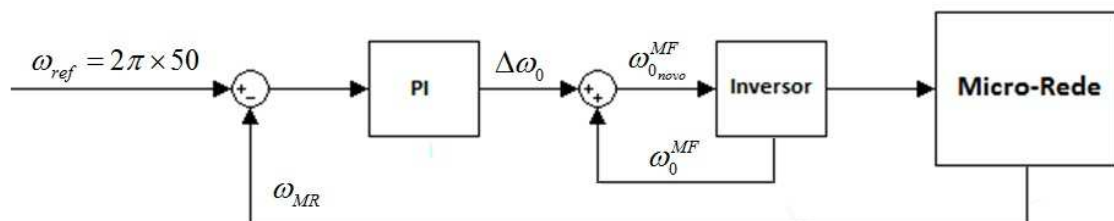


Figura 4-3 - Esquema de controlo de frequência da MR

O controlador PI poderia ser dimensionado de modo a indicar directamente na sua saída o valor da frequência de referência ao inversor. No entanto, não foi adoptada essa solução pois a saída do controlador PI oscila transitoriamente, podendo introduzir frequências de referência muito instáveis nos momentos iniciais. Alternativamente, o controlador PI foi desenvolvido de modo a actualizar a frequência de referência do inversor, $\omega_{0_{\text{NOVO}}}^{MF}$, a partir da soma entre o valor pré-definido, ω_0^{MF} , e a variação de frequência de referência, $\Delta\omega_0$, de modo a anular a diferença entre a frequência pretendida - 50 Hz - e a frequência da rede de BT.

4.7 - Sincronização da rede de Baixa tensão com a rede de MT a montante

O processo de reposição de serviço é finalizado com a sincronização da rede BT com a rede de abastecimento a montante, abandonando assim o modo de emergência para passar a operar no modo Normal. Assim como no caso das MF em relação à rede de BT, a rede de BT terá de respeitar as condições de sincronismo antes de ligar-se à rede a montante. Sendo necessário verificar-se exactamente as mesmas condições de sincronismo que as anteriormente apresentadas, o desenvolvimento do algoritmo de sincronização baseou-se nos mesmos pressupostos do desenvolvido para sincronizar a microturbina com a rede de BT. No entanto, este novo algoritmo terá de actuar agora em todos os inversores fonte de tensão, de forma a permitir à rede de BT verificar as condições de sincronismo no menor espaço de tempo, mantendo a estabilidade da rede BT atingida até esse momento.

Uma vez atingidas as condições de sincronismo, o algoritmo de sincronização dá ordem de sincronização ao disjuntor.

4.8 - Sumário e Principais Conclusões

Neste capítulo foram recordados os procedimentos propostos em [2] para a reposição de serviço em MR equilibradas. Sendo o presente estudo dedicado à reposição de serviço em MR desequilibradas, foi necessário atender à necessidade de desenvolverem-se algoritmos que permitam a condução da reposição de serviços por parte da MR em condições de tensões desequilibradas.

Inicialmente, com o intuito de validar os pressupostos a utilizar no algoritmo de sincronização em redes desequilibradas, foi feita uma abordagem admitindo inicialmente a

rede equilibrada. Uma vez validado o algoritmo para sincronizar com redes equilibradas, foi necessário adaptá-lo de modo a generalizar a sua operação, permitindo a sua utilização em regime equilibrado e em regime desequilibrado.

O algoritmo de sincronização proposto tira partido da possibilidade de decomposição das componentes trifásicas de tensão em correspondentes componentes simétricas, sendo a partir destas feita a correcção dos desvios de tensão .

Na sequência de reposição de serviço, as acções como: ligação de MF à rede BT e ligação das cargas resultam em desvios de frequência na rede. O controlo primário de frequência implementado nos inversores fonte de tensão não garante por si só erro nulo em regime permanente, pelo que foi necessário desenvolver-se um sistema de controlo secundário local que corrigisse o valor da frequência do inversor de modo produzir erro nulo em regime permanente.

Finalmente, para finalizar a acção de reposição de serviço, foi desenvolvido um algoritmo de sincronização da rede de BT com a rede de MT, à semelhança do que fora desenvolvido para sincronizar a MF com a rede de BT.

Capítulo 5

Avaliação da Estratégia de Reposição de Serviço em Micro-Redes desequilibradas

5.1 - Introdução

No capítulo anterior foi apresentada e discutida a estratégia de reposição de serviço a ser explorada numa Micro-Redes (MR), sendo dada especial atenção a condições de operação desequilibradas (em resultado da existência de cargas e sistemas de microgeração (MG) monofásicos). A estratégia proposta foi desenvolvida com base na adaptação de uma outra já validada sobre uma rede trifásica perfeitamente equilibrada e que permitiu identificar os requisitos essenciais a um procedimento deste género.

Assim sendo, o objectivo principal deste capítulo é avaliar a performance da estratégia de controlo proposta através de simulações numéricas realizadas sobre uma rede de teste. Para tal, a plataforma de simulação (desenvolvida em ambiente *Matlab/Simulink*) que permitiu o estudo das condições de reposição referenciadas em [1] foi adaptada, de forma a ser possível a representação de condições de operação desequilibradas. Assim sendo, foi possível analisar o comportamento dinâmico da MR na situação de reposição de serviço, baseado nos modelos descritos no Capítulo 3 e na estratégia definida no Capítulo 4.

Na secção seguinte será apresentado a rede de teste utilizada para validar estratégia de reposição de serviço proposta, seguindo-se as secções com a apresentação dos resultados obtidos por via de simulação computacional da sequência proposta para a reposição de serviço numa MR.

É importante referir que o âmbito dos resultados a serem apresentados neste capítulo é focado essencialmente nos aspectos referentes ao comportamento da frequência e dos perfis de tensão da MR e respectivos níveis de desequilíbrio. A análise de tensões harmónicas

de ressonância e sobretensões transitórias, que podem ocorrer sobretudo na presença de elementos capacitivos estão fora do âmbito desta dissertação.

5.2 - Rede de Teste

O esquema unifilar da rede de teste utilizada é apresentado na Figura 5-1. A rede de Baixa Tensão utilizada é formada por um transformador de distribuição MT/BT que estabelece ligação com a rede de BT a jusante, quando a MR está a operar em modo normal. A jusante do transformador estão dois *feeders* que servem as cargas de consumidores residenciais e recebem a potência produzida por diversas unidades de MG : duas do tipo solar fotovoltaico com ligação monofásica e uma microturbina a gás com ligação trifásica. De modo a tornar possível o funcionamento da MR em modo isolado, assume-se ainda a existência de um dispositivo de armazenamento de energia ligado sobre o barramento de saída do transformador MT/BT. No sentido de serem criadas condições de operação desequilibradas (para além dos sistemas de MG monofásicos), foi ainda considerada a presença de algumas cargas monofásicas. O valor das cargas, bem como a fase onde estão conectadas são apresentados na Tabela 5-1. A separação eléctrica entre a MR e a rede MT a montante é feita por um disjuntor localizado a jusante do transformador de distribuição. À semelhança do que caracteriza a MR, as cargas são assumidas como controláveis, sendo todas elas ligadas/desligadas por intermédio de disjuntores. Adicionalmente, as diversas canalizações da rede são delimitadas por dispositivos de corte adequados no sentido de facilitar a implementação das metodologias propostas.

O valor da carga considerada neste cenário de reposição de serviço é de cerca de 58 kVA, enquanto que a potência instalada de microgeração ronda os 39 kVA. Deste modo, não é possível a MR operar em rede isolada fornecendo potência a todas as cargas. Assim, na sequência de reposição de serviço, será definido um critério para a ligação de cargas, sendo certo que somente após a MR operar em modo Normal é que será possível repor a totalidade das cargas. Todos os dados relevantes relativos à rede de teste serão apresentados em Anexo.

Os modelos dinâmicos utilizados, bem como as estratégias de controlo definidas, foram implementadas em ambiente *Matlab/Simulink* recorrendo sempre que possível à biblioteca *SimPowerSystems*.

Tabela 5-1 - Valores de potência das cargas fase correspondente

Carga	P [kW]	Q [kVAR]	FASE
C1	8	3	B
C2	11	4	B
C3	4	2	C
C4	9	3,5	ABC
C5	2	0	A
C6	20	9	ABC

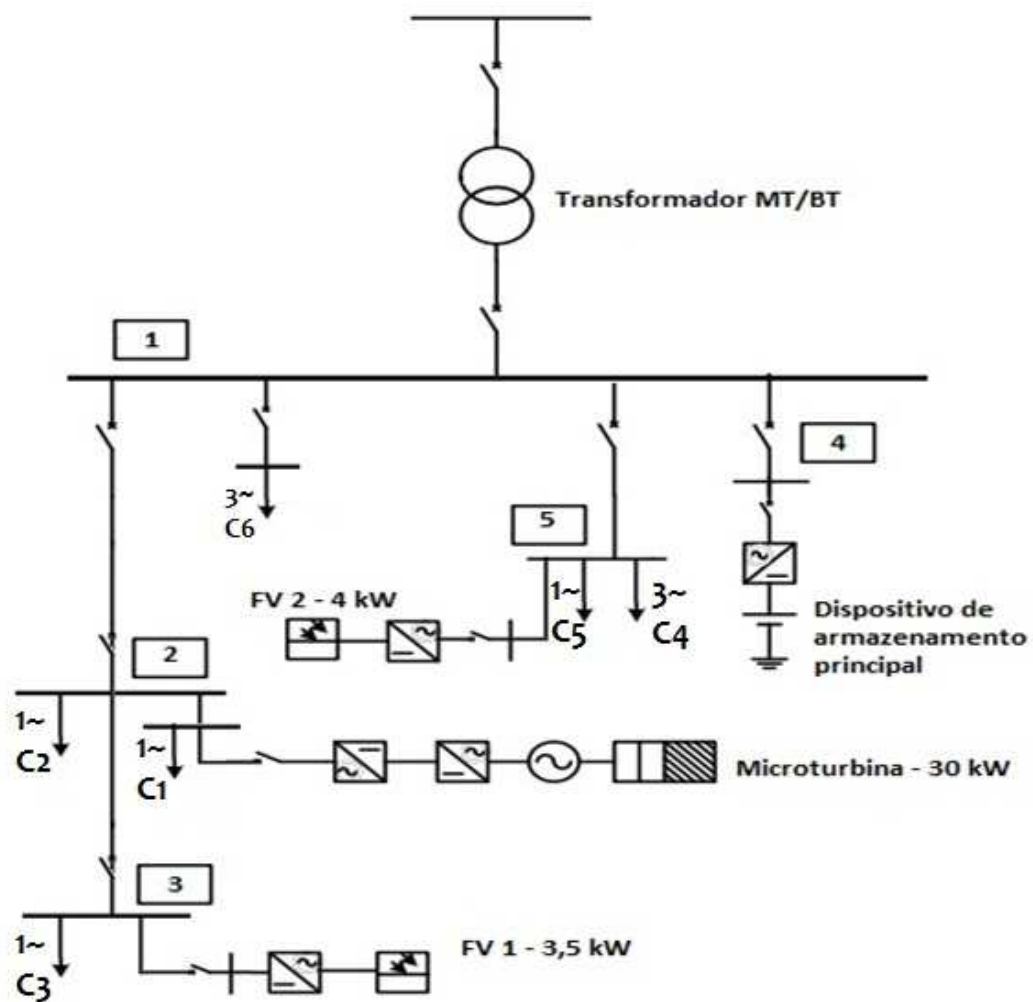


Figura 5-1 - Rede de teste de Baixa Tensão

5.3 - Resultados Numéricos

5.3.1 - Sincronização da Micro-Fonte com a rede de BT em regime equilibrado

Um dos aspectos essenciais a ter em consideração durante a implementação da estratégia de reposição de serviço proposta para MR desequilibradas, consiste no desenvolvimento de um algoritmo que permita validar e estabelecer a sincronização entre uma Micro-Fonte (MF) e a rede de Baixa Tensão (BT). A importância da utilização desse algoritmo resulta directamente da sequência de acções proposta para a reposição de serviço numa MR, baseando-se na criação de pequenas ilhas autónomas dentro da própria MR, que vão sendo sincronizadas até ao completo restabelecimento da rede de BT. O desenvolvimento desse algoritmo teve como abordagem inicial a consideração de que a MR é perfeitamente equilibrada. A validação deste algoritmo seguindo esta primeira abordagem permitirá evoluir por adaptação para um algoritmo generalizado de sincronização, compatível com redes desequilibradas.

Como já foi previamente referido no capítulo 4, o processo de sincronização pressupõe que:

- a rede BT esteja já colocada sob tensão (o que é possível mediante a utilização do dispositivo de armazenamento principal)
- foi possível realizar o arranque autónomo da MF mediante os sistemas de armazenamento de energia de que dispõe e encontra-se já em funcionamento e a alimentar algumas das cargas na sua vizinhança (cargas protegidas);

Para que seja realizada a sincronização o controlador central da MR (MGCC) emite um sinal de comando ao controlador da MF (MC) que assegura todo o processo de sincronização. Na Figura 5-2 é apresentado a evolução temporal da frequência da MF e da rede de BT. Nos instantes que precedem o início da sincronização, verifica-se que a frequência da MF e da rede de BT estão muito próximas, ainda que não coincidentes. No instante $t=2s$, é emitido uma ordem por parte do MGCC para o MC para iniciar-se a sincronização. Nesse instante, em consequência da actuação do MC sobre o inversor, a MF sofre um desvio de frequência (0,1 Hz) de modo a poder verificar as condições de sincronismo. As condições de sincronismo foram verificadas no instante $t=13s$, sendo o período transitório de estabilização da frequência de cerca de 2s. Após estabilização da frequência no valor de 50Hz, foi conectada uma carga ($S = 10 + j5 \text{ kVA}$) em $t=20s$. Em consequência da ligação dessa carga, a frequência da rede diminui e a MF juntamente com o dispositivo de armazenamento principal partilham em conjunto a variação de potência activa da carga, como é observável na Figura

5-3. Também a potência reactiva da carga (Figura 5-4) é partilhada pela MF e pelo dispositivo de armazenamento principal, embora que não seja de forma proporcional ao estatismo dos inversores como acontece com a potência activa, devido à impedância dos cabos de BT, como foi referido no capítulo 3.

Na Figura 5-3 também é possível verificar-se que, o dispositivo de armazenamento principal apenas injecta e absorve potência activa quando a frequência da rede de BT difere de 50Hz, por razões já justificadas no capítulo anterior. A tomada de carga por parte do dispositivo de armazenamento e pela MF é diferente, como se pode constatar na Figura 5-3 e Figura 5-4. Essa diferença reside na característica do estatismo dos inversores associados ao dispositivo de armazenamento principal e à MF. Sendo o estatismo do dispositivo de armazenamento principal menor que o estatismo da MF, este tem de fornecer maior potência.

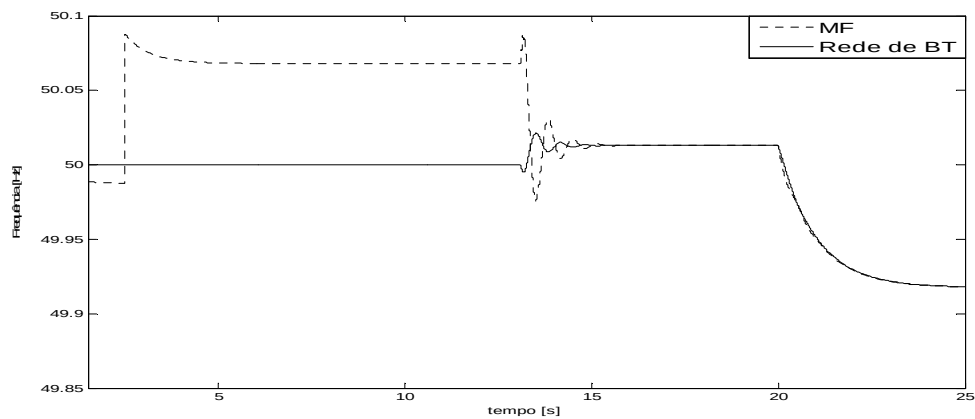


Figura 5-2 - Frequência da MF e da rede de BT

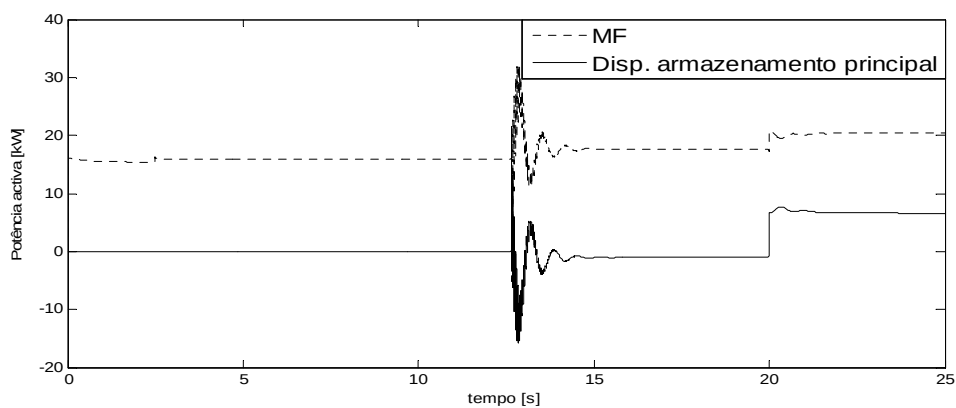


Figura 5-3 - Potência activa da MF e do dispositivo de armazenamento principal

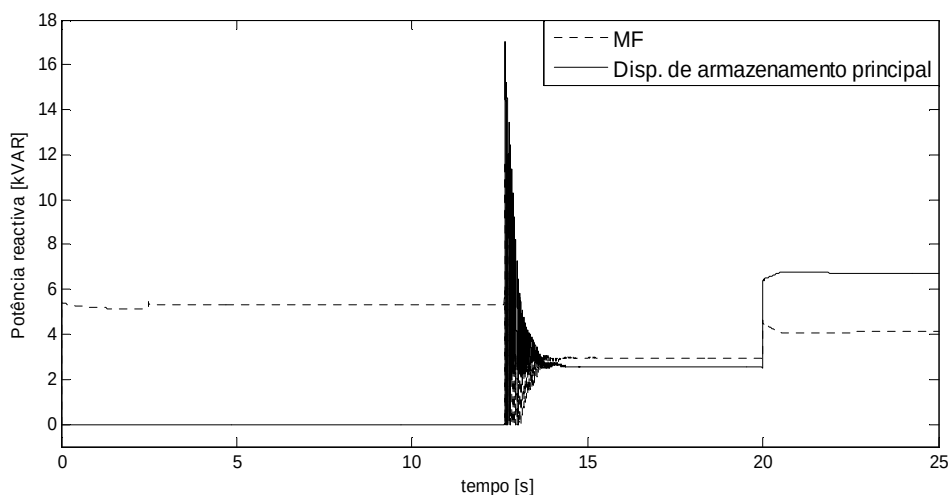


Figura 5-4 - Potência reactiva da MF e do dispositivo de armazenamento principal

5.3.2 - Sequência de Reposição de Serviço em regime desequilibrado

Nesta secção é apresentada a sequência completa de reposição de serviço, onde é avaliada a performance da sequência de reposição de serviço quando utilizada sobre MR desequilibradas. É importante referir que neste caso, o inversor que faz o acoplamento da unidade de armazenamento principal à rede de BT ainda não possui os mecanismos de equilíbrio de tensões descritos na secção 3.3.3. Na secção 5.3.3, será avaliado o desempenho da estratégia de reposição de serviço quando esse sistema de equilíbrio de tensões se encontra em funcionamento na MR.

Na secção anterior foram já referidos os pressupostos essenciais que antecedem toda a sequência da reposição de serviço, e que aqui também se assumem como já verificados. Uma vez já estabelecida a rede de BT, bem como o arranque da microturbina e a ligação da sua carga própria, a sequência de reposição consistiu nas seguintes acções:

1. Sincronização da microturbina com a rede BT ($t=9.05s$);
2. Ligação da carga C5 ($t=15s$);
3. Sincronização dos painéis FV 1 ($t=20s$);
4. Ligação das cargas C3 e C4 ($t=25s$);
5. Sincronização dos painéis FV 2 ($t=30s$);
6. Ligação da carga C2 ($t=35s$);
7. Actuação do controlo secundário de frequência ($t=40s$);
8. Sincronização da MR com a rede de MT a montante ($t=61s$);

Foi referido na secção 5.2 que o valor da carga excede a capacidade de produção da MR. Assim, na impossibilidade de ligar-se todas as cargas em modo isolado, o critério utilizado para a ligação das cargas consistiu em ligar o maior número de cargas possíveis.

Assim como no procedimento apresentado na secção anterior, é ao nível do controlador central (MGCC) que é dada ordem de sincronização, sendo a respectiva verificação e actuação realizada ao nível do controlador local (MC). Na Figura 5-5 é apresentada a evolução temporal da frequência da microturbina e da rede de BT, no momento em que é feita a sincronização. Tal como acontece na aplicação do algoritmo de sincronização para redes equilibradas, após verificação das condições de sincronismo e consequente ordem por parte do MC para sincronizar, verifica-se um período oscilatório na frequência da microturbina e na frequência da rede de BT. No entanto, essa oscilação transitória é limitada a cerca de 0,2Hz, e poderá ser condicionada por ajustes de parâmetros de diversos controladores dos inversores.

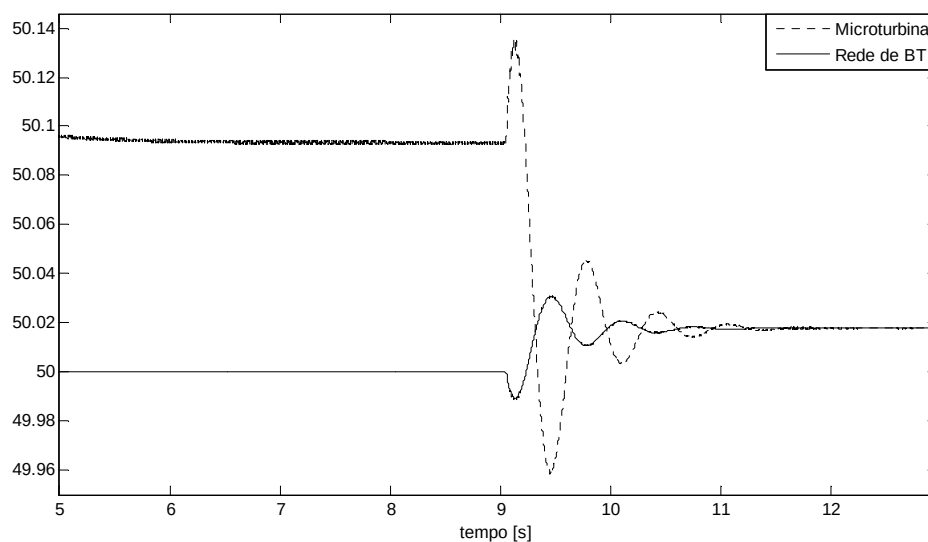


Figura 5-5 - Frequência da microturbina e da rede de BT no momento de sincronização

No instante $t=2,5s$ o MC recebe ordem do MGCC para iniciar o processo de sincronização. Nesse instante, o algoritmo de sincronização é inicializado, começando por corrigir o desvio de tensão entre a microturbina e a rede de BT. Num intervalo de tempo de cerca de dois segundos, a estratégia de sincronização proposta permite eliminar o desvio de tensão, sendo o restante tempo de sincronização necessário à verificação e das restantes condições de sincronismo (diferença de fase entre as tensões). Após a sincronização, o sistema de correcção dos desvios de tensão deixa de actuar, mantendo como referência de tensão o último valor calculado imediatamente antes de sincronizar.

Na Figura 5-6 estão representadas as componentes simétricas das ondas de tensão da microturbina e da rede de BT. Na Figura 5-8 (a), verifica-se a acção do controlador sobre o inversor da microturbina, de modo a eliminar o desvio de tensão verificado sobre a componente directa. Na Figura 5-6 (b) e Figura 5-6 (c) observa-se que a acção do controlador no inversor da microturbina sobre a componente directa da tensão não influencia as componentes inversa e homopolar.

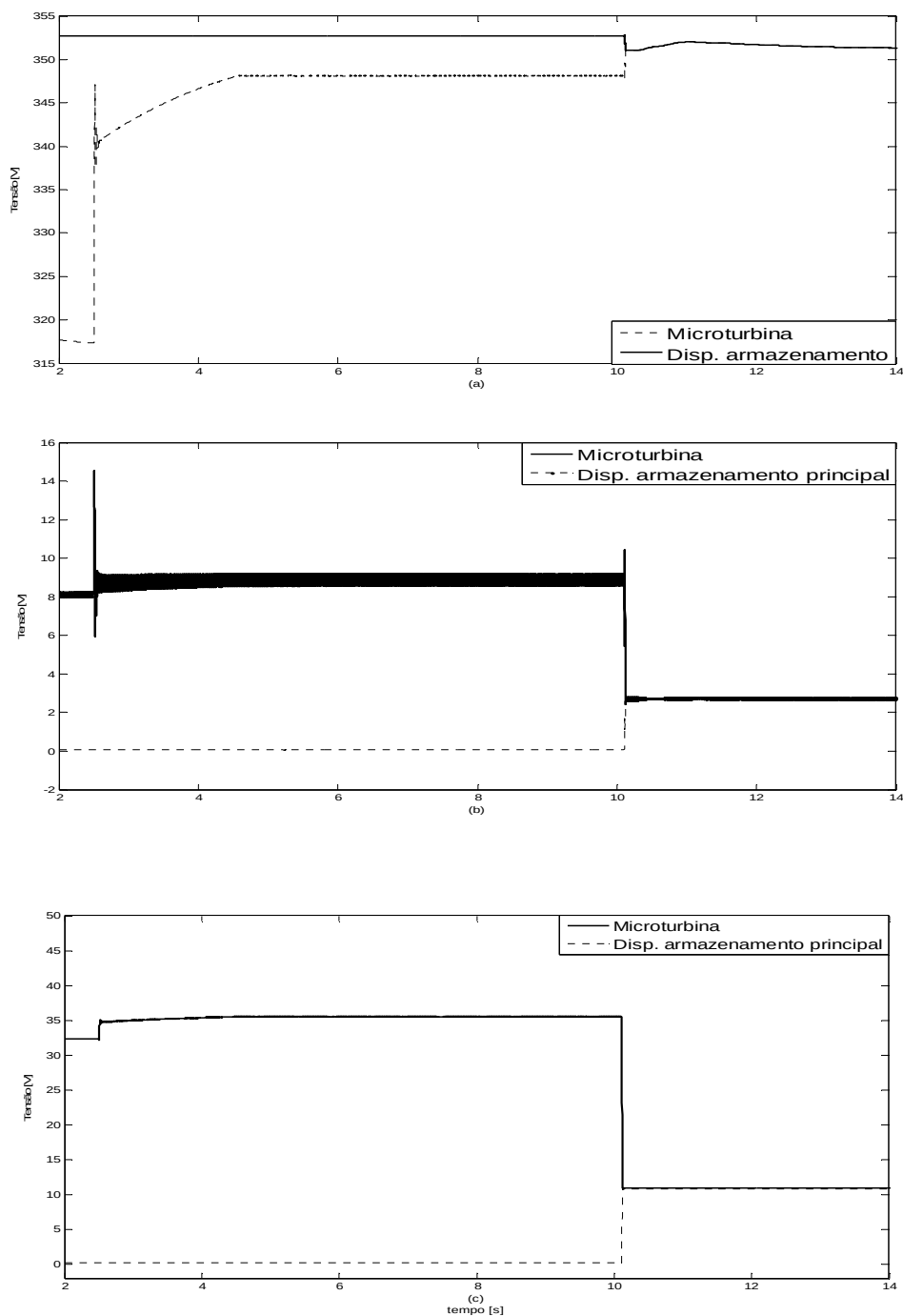


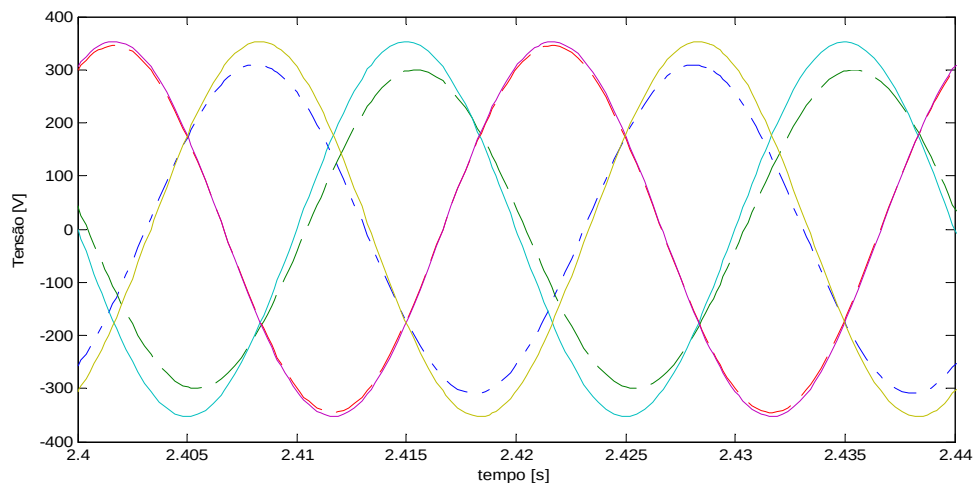
Figura 5-6 - Componente directa da tensão (a), Componente inversa da tensão (b), Componente homopolar de tensão (c)

Na Figura 5-7 estão representados as formas de onda de tensão aos terminais da microturbina e da rede de BT nos seguintes momentos:

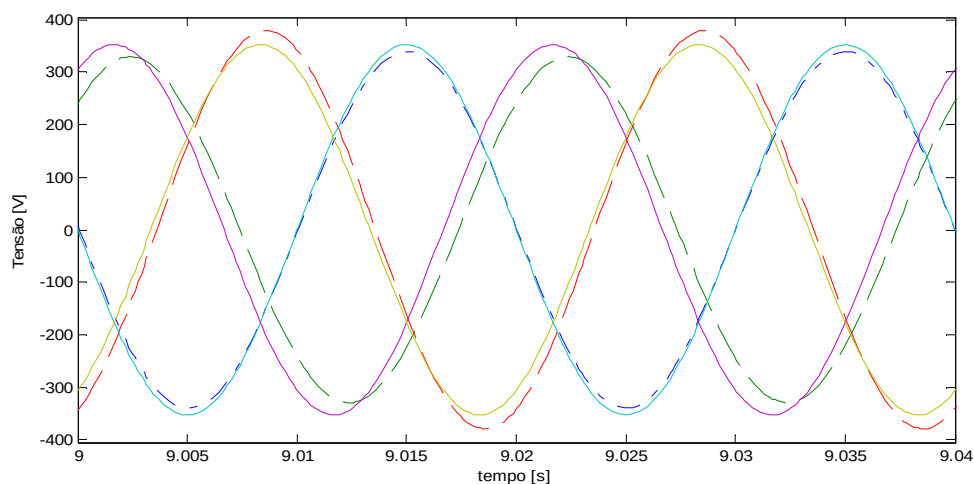
- (a) imediatamente antes da actuação do algoritmo de sincronização;
- (b) imediatamente após actuação do algoritmo de de sincronização;
- (c) transitório em que ocorre sincronização da microturbina com a rede de BT;

Na Figura 5-7(a) é visível o desequilíbrio das ondas de tensão aos terminais da microturbina, em resultado da existência da carga própria monofásica. A rede BT, estando em vazio no momento que antecede a sincronização, é perfeitamente equilibrada até esse instante. Uma vez inicializado o algoritmo de sincronização (Figura 5-7 (b)), é identificado o desvio das tensões e assim o algoritmo efectua uma correcção desses mesmos desvios, tendo por base os valores das componentes directas de tensão, tal como proposto no capítulo 4.

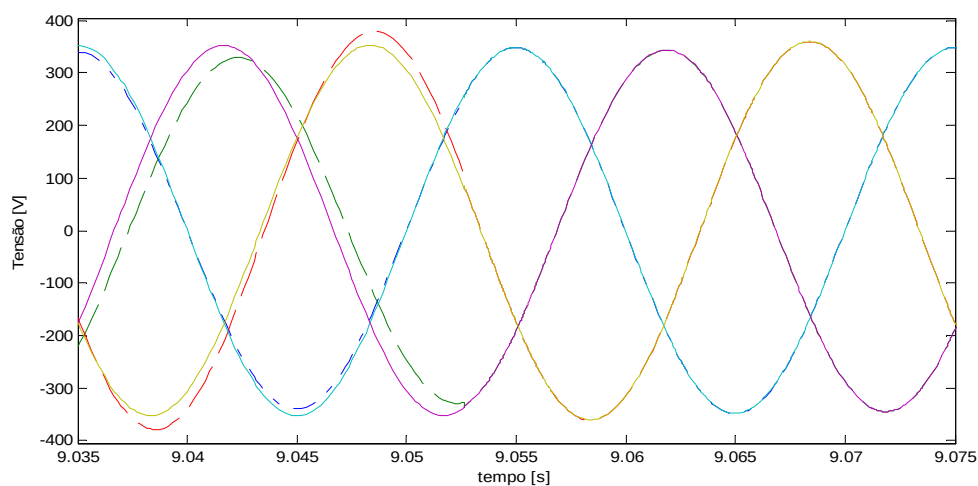
Na Figura 5-6 (c) é perfeitamente identificável o momento em que ocorre a sincronização. A partir do instante $t=9,055s$ as ondas de tensão estão completamente sobrepostas, indicando o momento em que a sincronização entre a microturbina e a rede de BT foi estabelecida. Nos instantes que antecedem a sincronização é possível verificar-se que, a menos das tolerâncias admissíveis no cumprimento das condições de sincronismo, os valores terminais das tensões registadas do lado da microturbina e do lado da rede de BT cumprem as condições necessárias à realização do sincronismo.



(a)



(b)



(c)

Figura 5-7- Formas de onda de tensão aos terminais da microturbina (linhas a tracejado) e da rede de BT (linhas a cheio)

Uma vez sincronizada a microturbina com a rede de BT, procedeu-se à ligação da carga C5, de pequena dimensão, de modo a não introduzir um desvio de frequência elevado. Na Figura 5-8 observa-se a variação de frequência da rede em resultado da ligação da carga C5. Na Figura 5-9 e Figura 5-10 estão representados a potência activa e reactiva fornecida pela microturbina e pelo dispositivo de armazenamento principal. Tratando-se agora de um regime de funcionamento desequilibrado, evoluções temporais das potências são apresentadas em cada uma das fases da rede (e correspondem ao valor médio da potência em cada fase). Assim como no regime equilibrado, a tomada de carga por parte da microturbina e por parte do dispositivo de armazenamento obedece às respectivas características de estatismo. Essa variação de produção em resposta à variação de carga é observável na fase onde a carga está a ser alimentada.

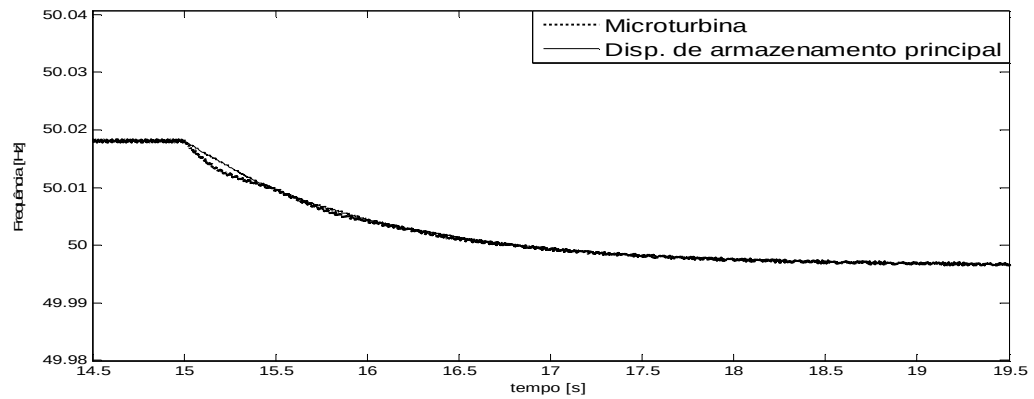


Figura 5-8 - Frequência da microturbina e da rede de BT

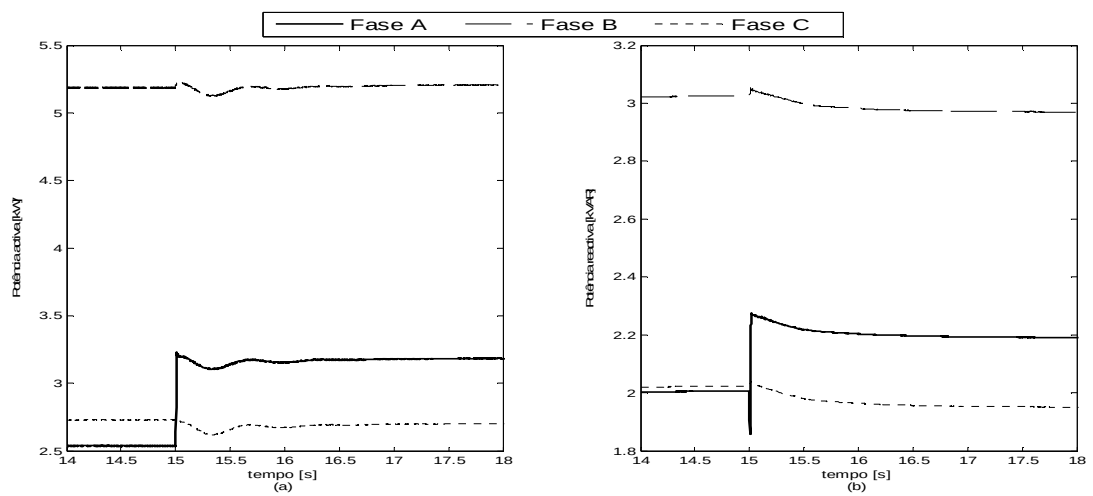


Figura 5-9 - (a) Valores por fase da potência activa da microturbina, (b) Valores por fase da potência reactiva por fase da microturbina

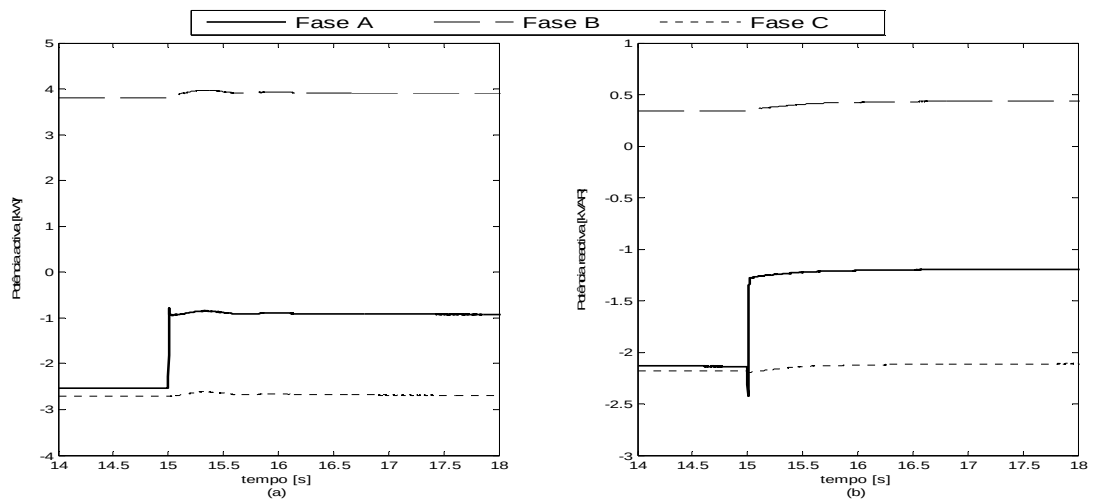


Figura 5-10 - (a)Valores por fase da potências activa do dispositivo de armazenamento principal, (b)Valores por fase da potências reactiva do dispositivo de armazenamento principal

No instante $t=20s$, foram ligados os painéis fotovoltaicos FV1 na fase A. Sendo os painéis FV fontes monofásicas, a sua sincronização obedece a um algoritmo de sincronização diferente do utilizado para sincronizar a microturbina. Esse algoritmo está já incorporado internamente na modelização do painel, apresentada previamente no capítulo 3. Na Figura 5-11 está apresentado a frequência da rede de BT quando os painéis FV são ligados à rede. Como seria de esperar, da ligação dos painéis FV resulta um aumento de frequência, tentando assim equilibrar a variação introduzida anteriormente pela ligação da carga. De modo análogo, a potência activa fornecida (Figura 5-12) pela microturbina e pelo dispositivo de armazenamento diminui, em consequência da injeção de potência activa por parte dos painéis.

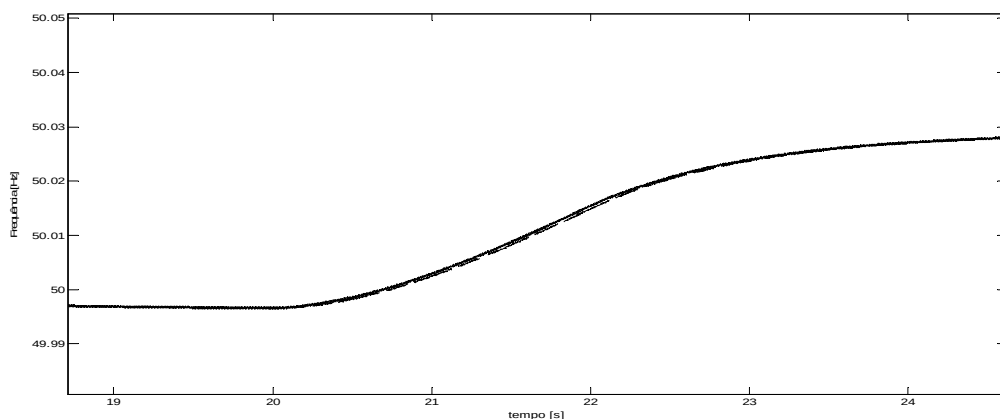


Figura 5-11 - Frequência da microturbina e da rede de BT

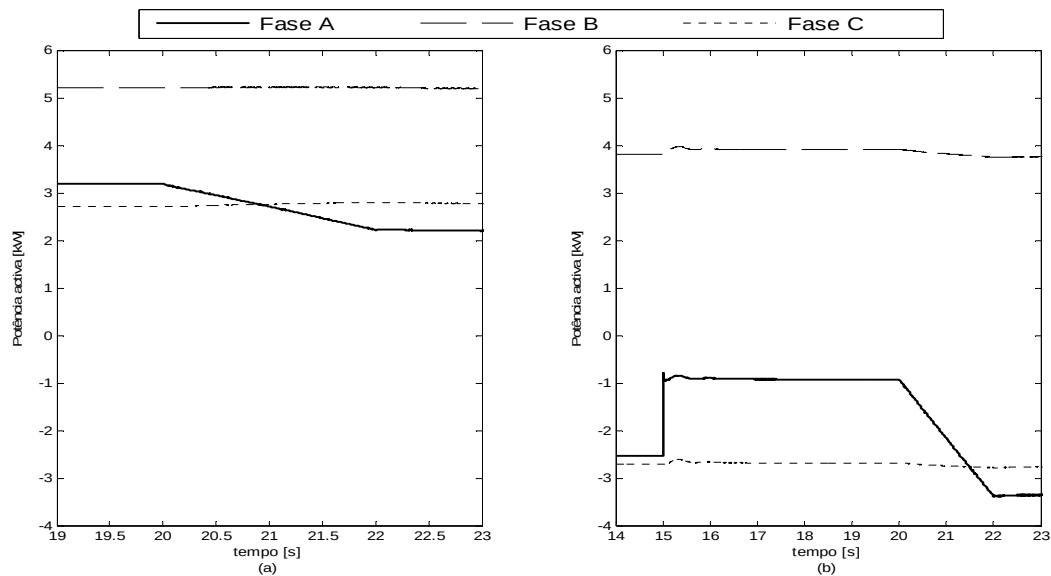


Figura 5-12 - Valores por fase da potências activa da microturbina(a), Valores por fase da potências activa do dispositivo de armazenamento principal(b)

Um comportamento dinâmico semelhante verificou-se no momento de ligação das cargas C3 e C4, no instante $t=25s$ e na ligação dos painéis FV 2 na fase C e da carga C2 nos instantes $t=30s$ e $t=35s$ respectivamente.

Em consequência da ligação de cargas e de MF, a frequência da rede foi sofrendo desvios em relação ao valor no momento da sincronização. Assim, de modo a restabelecer o valor de frequência inicial, o MGCC em conjunto com os restantes controladores das microfontes, dá início ao controlo secundário de frequência, em $t=40s$. Na Figura 5-13 e Figura 5-14 é possível observar a acção do controlo de frequência sobre nas unidades de MG controláveis (neste caso, a microturbina) pelas contribuições para esse controlo. Assim, a potência injectada pela microturbina aumenta de forma a permitir o balanço entre a carga e geração na MR (tendo por consequência a reposição de frequência da rede no valor nominal). Em simultâneo, a potência injectada pelo dispositivo de armazenamento principal diminui à medida que a frequência evolui até ao seu valor nominal

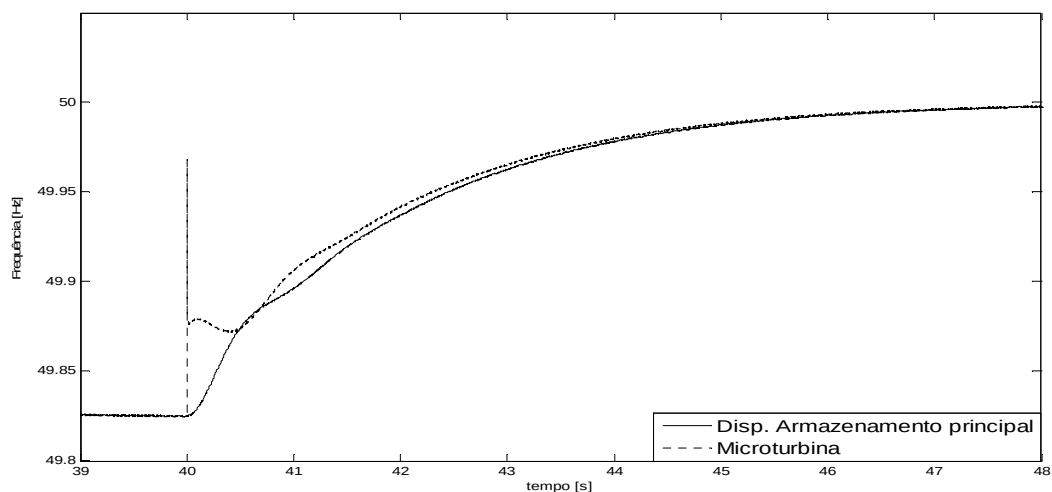


Figura 5-13- Frequência da rede de BT durante a acção do controlo secundário

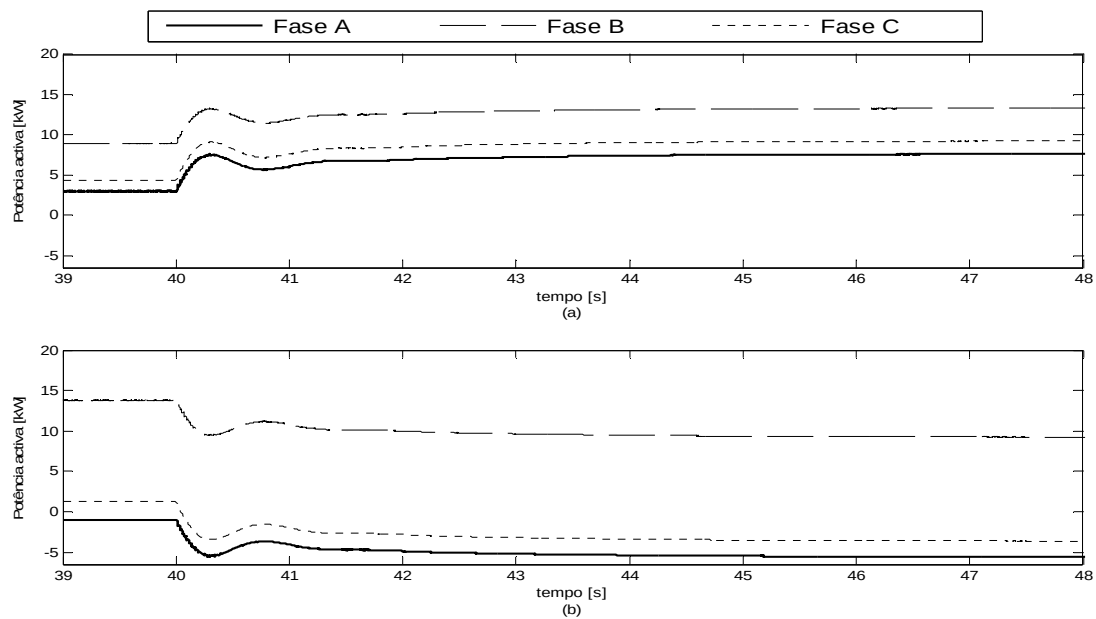


Figura 5-14 - Potências activa por fase da microturbina (a), Potências activa por fase do dispositivo de armazenamento principal (b)

O processo de reposição finaliza com a sincronização da rede de BT com a rede a montante. No instante $t=50s$ o MGCC leva a cabo o algoritmo de sincronização da rede de BT com a rede a montante. Na Figura 5-15 é apresentado a frequência da rede no momento da sincronização. Aos 50s o dispositivo de armazenamento principal introduz um desvio de frequência na rede de BT para que se verifiquem as condições de sincronismo. Na Figura 5-16 é possível verificar que tal como na sincronização da microturbina com a rede de BT, as componentes inversa e homopolar das tensões mantém-se constantes no momento do ajuste de tensão, alterando-se apenas no momento da sincronização.

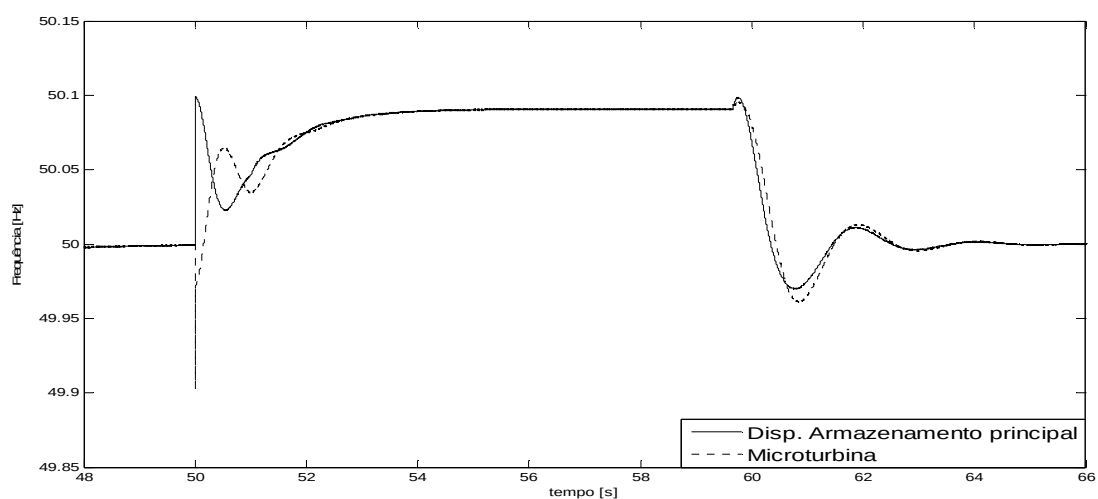


Figura 5-15 - Frequência da rede BT no momento de sincronização com a rede montante

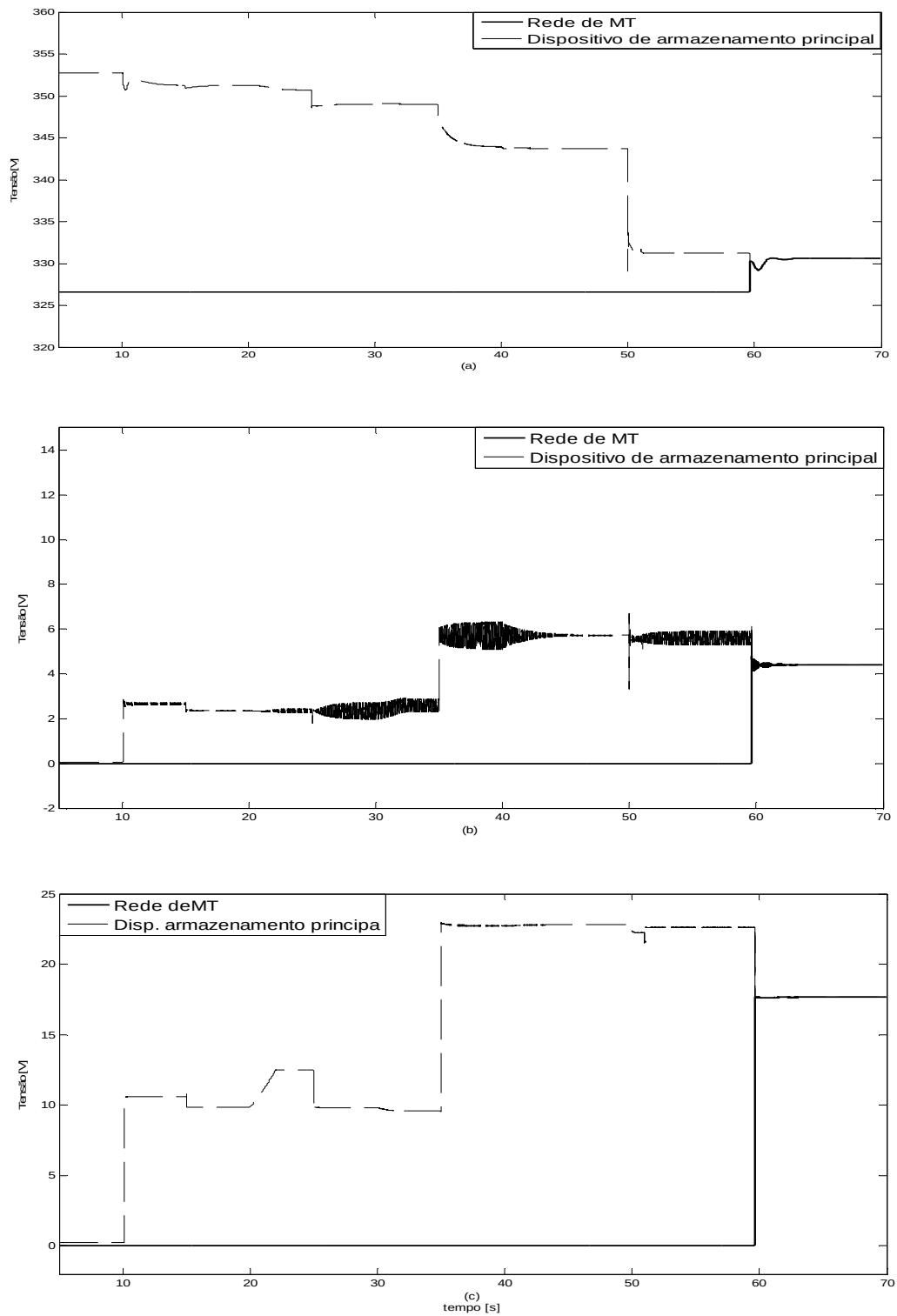


Figura 5-16- Componente (a)directa, (b)inversa e (c)homopolar da tensão da rede de BT e da rede de MT

Concluído o processo de reposição de serviço, as figuras seguintes mostram alguns resultados já apresentados, conjugados agora no sentido de proporcionar uma perspectiva global de todo o processo de sincronização e focando as principais variáveis eléctricas associadas ao comportamento da MR.

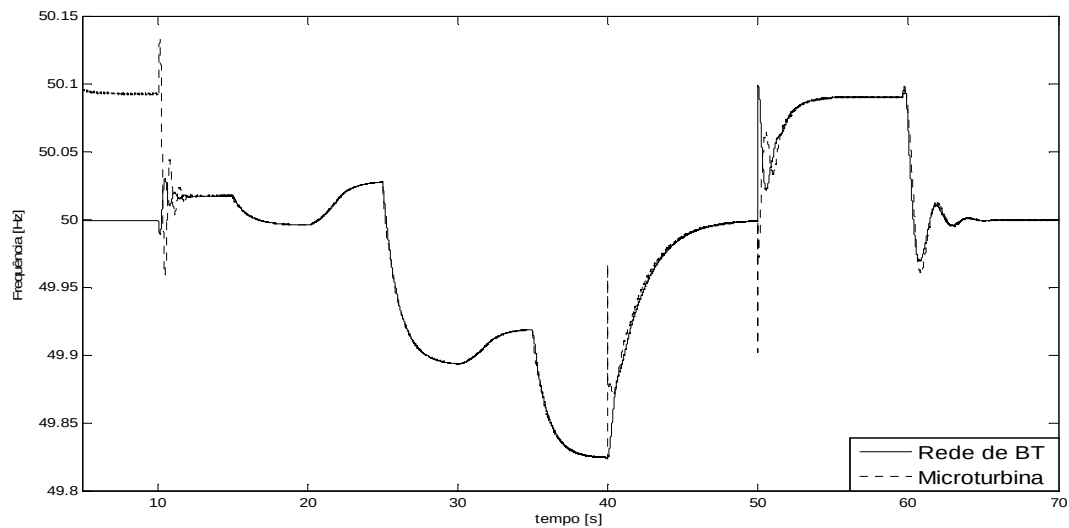


Figura 5-17 - Frequência da microturbina e da rede de BT

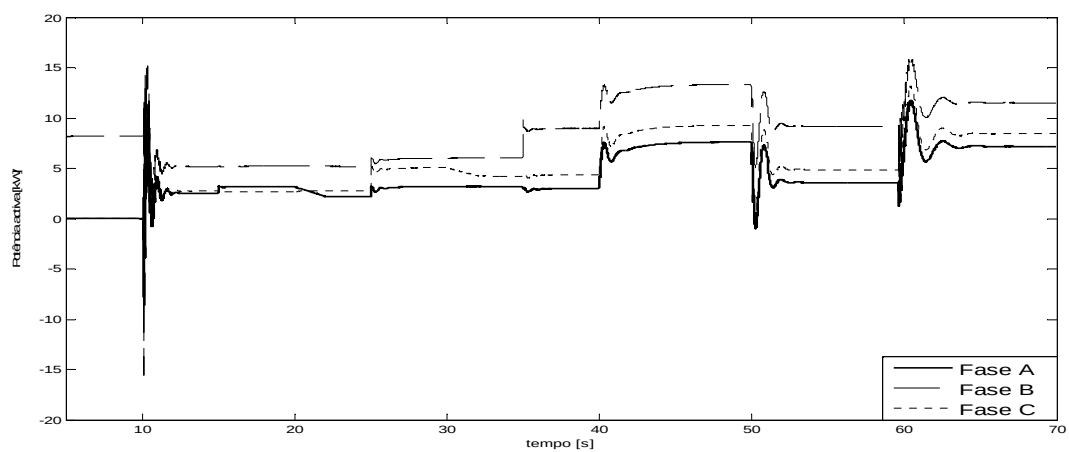


Figura 5-18 - Valores por fase da potência activa da microturbina

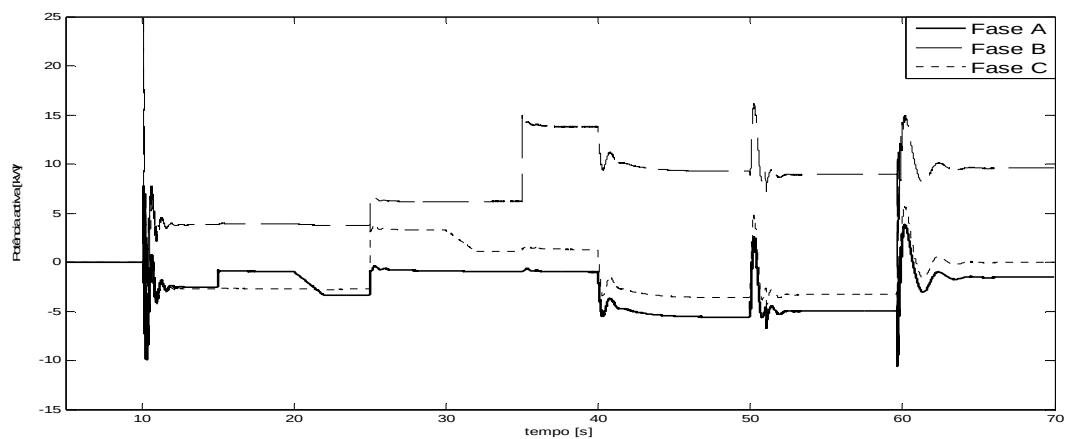


Figura 5-19 - Valores por fase da potência activa no dispositivo de armazenamento principal

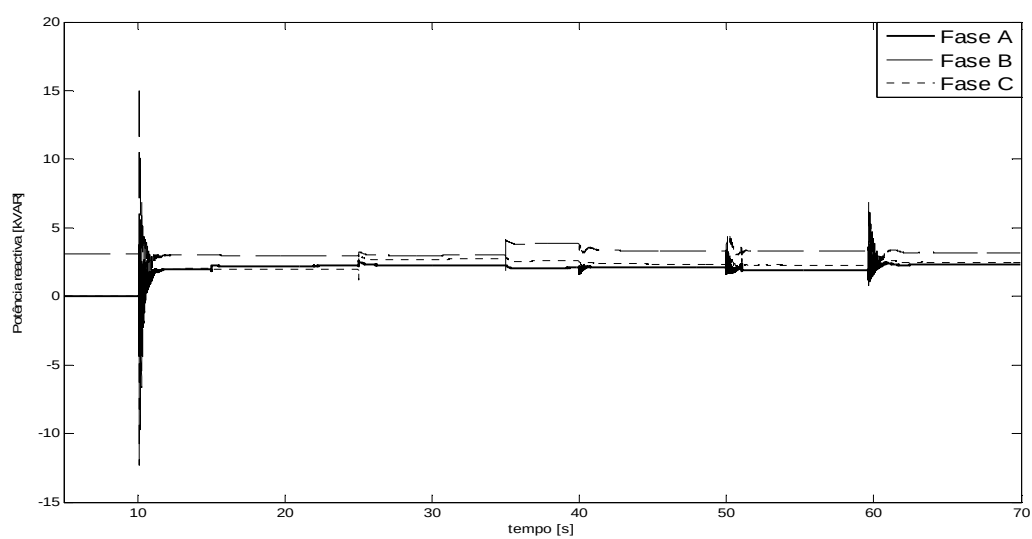


Figura 5-20 - Valores por fase da potência reactiva da microturbina

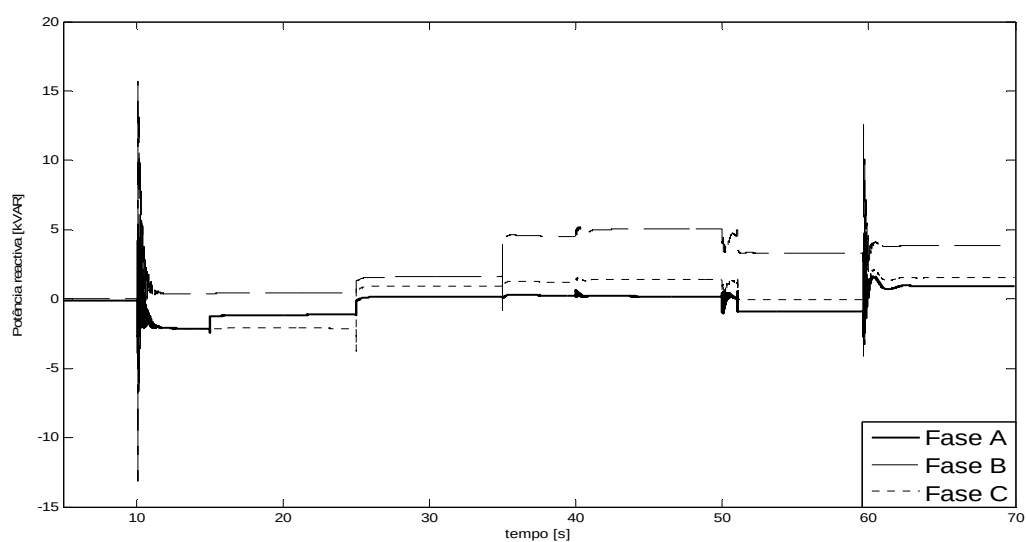


Figura 5-21 - Valores por fase da potência reactiva no dispositivo de armazenamento principal

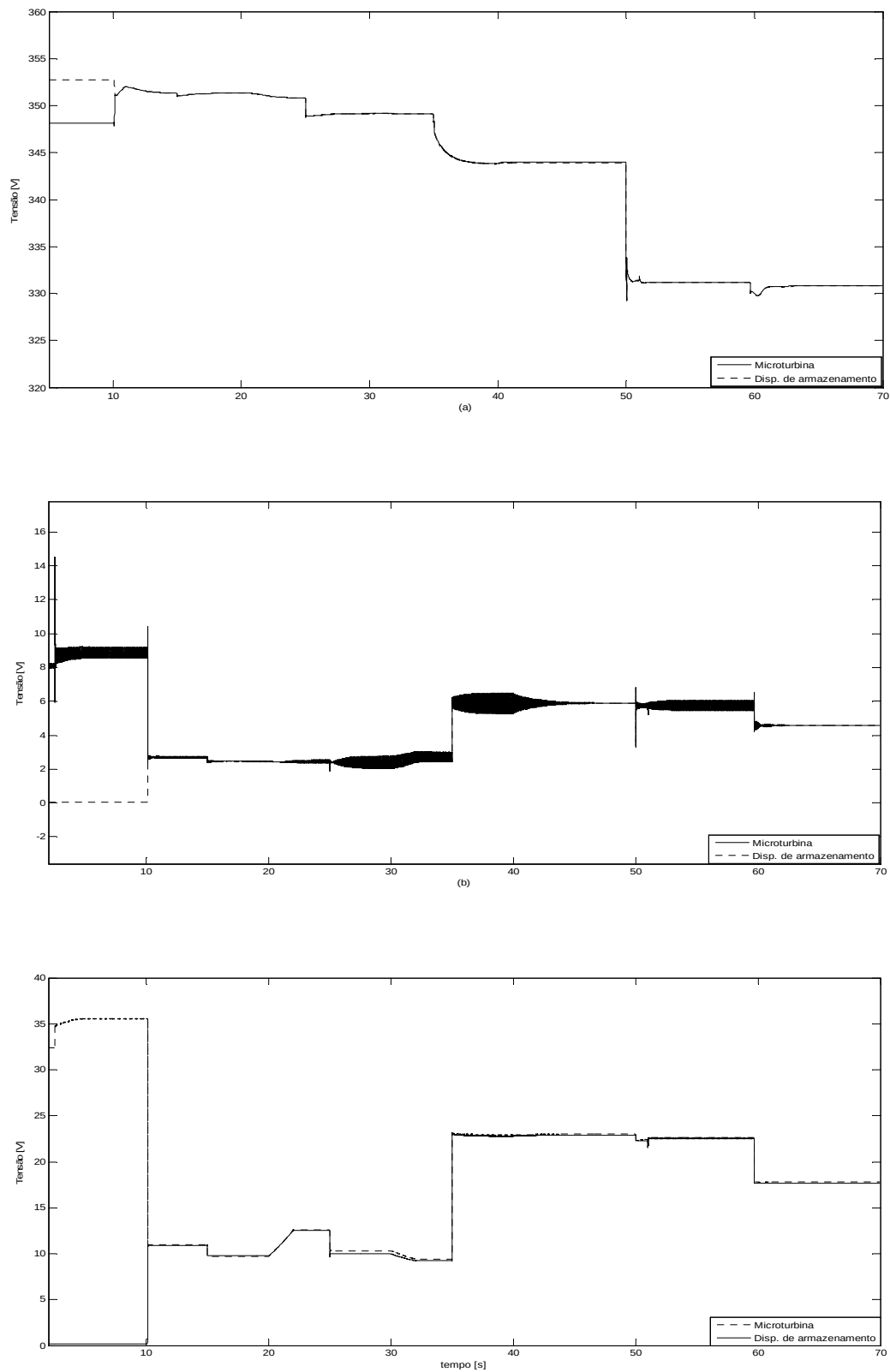


Figura 5-22-Componente directa(a), inversa(b) e homopolar (c) da tensão da microturbina e da rede de BT

5.3.3 - Sequência de Reposição de serviço em regime desequilibrado utilizando o sistema de equilíbrio de tensões

Na secção anterior foram apresentados os resultados numéricos obtidos na reposição de serviço com a rede desequilibrada. Nesta secção é realizado o mesmo procedimento de reposição de serviço, considerando agora o algoritmo desenvolvido em [11] que permite equilibrar as tensões quando estas estão em desequilíbrio. A sequência de procedimentos realizados e o instante em que ocorreram foi a seguinte:

1. Sincronização da microturbina com a rede BT ($t=10.5s$);
2. Ligação da carga C5 ($t=15s$);
3. Sincronização dos painéis FV 1 ($t=20s$);
4. Ligação das cargas C3 e C4 ($t=25s$);
5. Sincronização dos painéis FV 2 ($t=30s$);
6. Ligação da carga C2 ($t=35s$);
7. Actuação do controlo secundário de frequência ($t=40s$);
8. Sincronização da MR com a rede de MT a montante ($t=60.4s$).

Na Figura 5-23 está representado a evolução temporal da frequência da microturbina e da rede de BT, no momento em que o MGCC ordena a inicialização do algoritmo de sincronização. Verifica-se que assim como no caso onde o sistema de equilíbrio não fora considerado, a sincronização é realizada após um período de tempo no qual estavam a ser verificadas a condições para sincronismo.

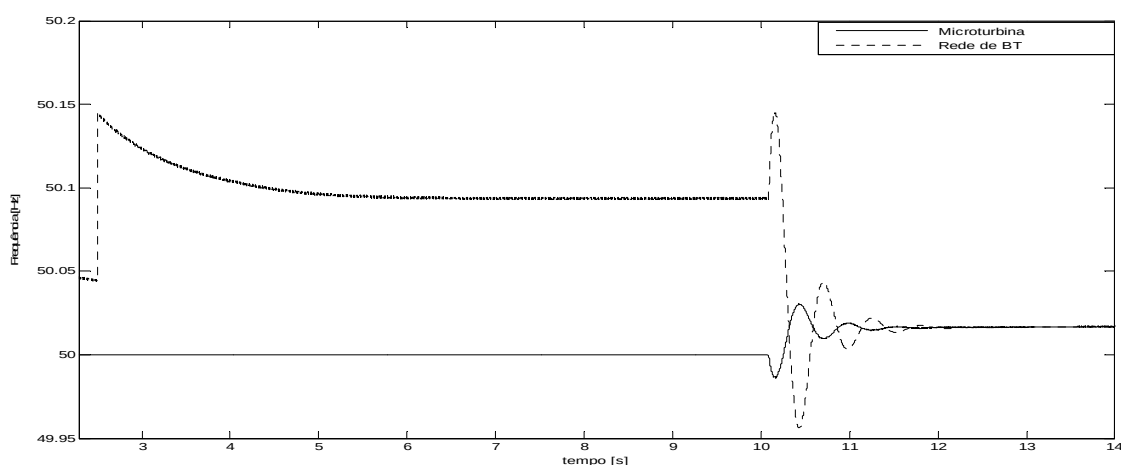


Figura 5-23 - Frequência da Microturbina e da Rede de BT

Na Figuras seguintes são apresentados as evoluções temporais de algumas variáveis eléctricas associadas ao comportamento da MR, para o procedimento completo de reposição de serviço.

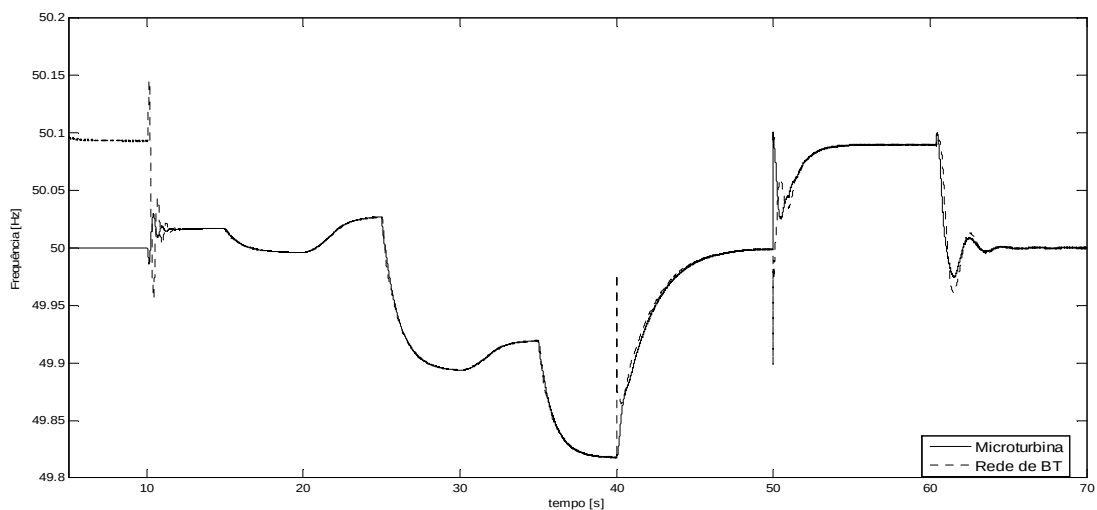


Figura 5-24 - Frequência da microturbina e da rede de BT

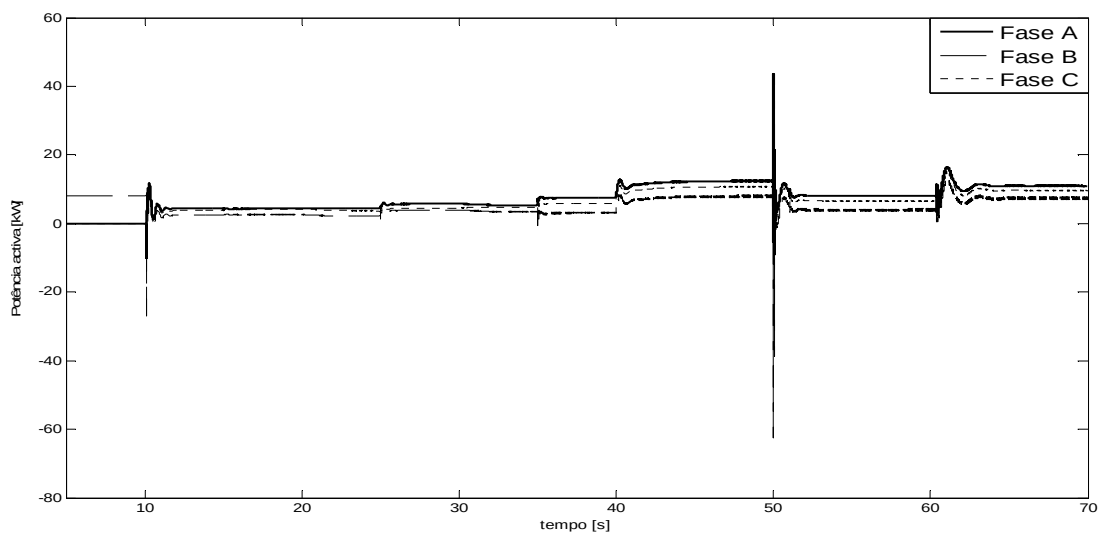


Figura 5-25 - Valores por fase da potência activa da microturbina

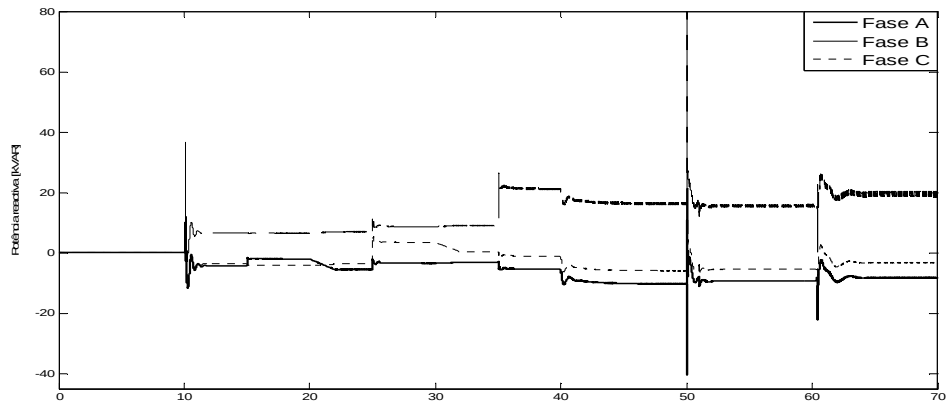


Figura 5-26 - Valores por fase da potência activa do dispositivo de armazenamento

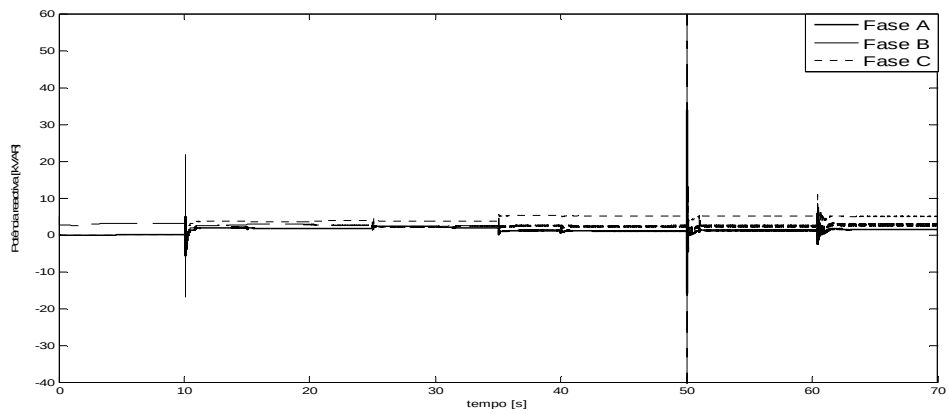


Figura 5-27 - Valores por fase da potência reactiva da microturbina

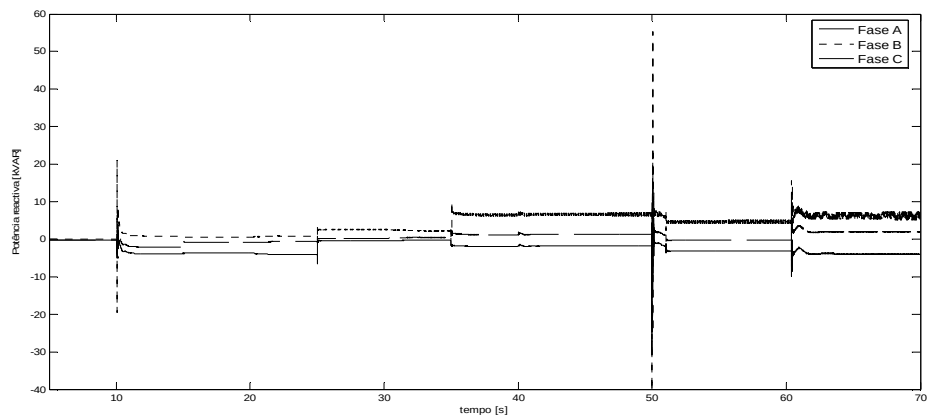


Figura 5-28 - Valores por fase da potência reactiva do dispositivo de armazenamento

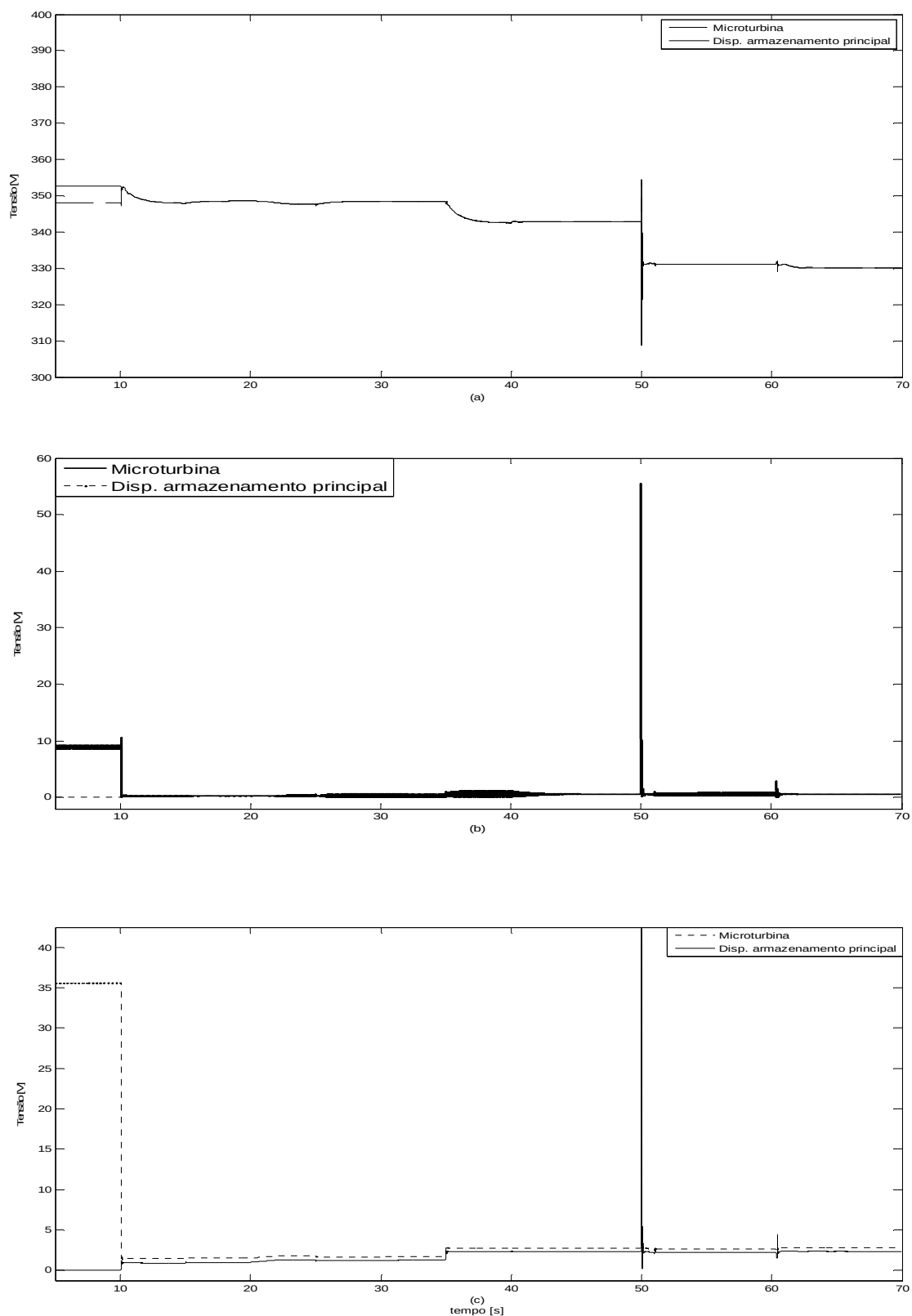


Figura 5-29 - Componentes directa(a), inversa(b) e homopolar(c) de tensão da microturbina e do dispositivo de armazenamento principal

A partir dos resultados obtidos da reposição de serviço utilizando o sistema de equilíbrio de tensões, verifica-se que o desempenho da operação ocorre de forma semelhante à apresentada na secção anterior, em que o sistema de equilíbrio de tensão não fora utilizado. No entanto, tal como seria espectável, a introdução deste sistema de equilíbrio de tensões permitiu que houvesse uma redução das componentes inversa e homopolar de tensão (Figura 5-29), atenuando dessa forma a situação de desequilíbrio previamente existente.

5.4 - Sumário e Principais Conclusões

Atendendo às estratégias de reposição de serviço já identificadas sobre uma MR desequilibrada, foi avaliada a sua aplicabilidade em MR com características desequilibradas. No processo de reposição de serviço na MR desequilibrada, houve a necessidade de ter em consideração as especificidades do sistema em termos dos desequilíbrios de tensão bem como as suas implicações ao nível dos sistemas de sincronização, necessários à reposição de serviço numa MR.

No processo de ligação de cargas, na sequência de reposição de serviço, observou-se a variação da produção da microturbina e do dispositivo de armazenamento, de acordo com as respectivas características de estatismo. Foi também possível verificar a necessidade do controlo secundário de frequência, uma vez que o controlo primário, baseado na característica do estatismo, não assegura erro nulo em regime permanente.

Uma vez validada a estratégia proposta no capítulo 4 para a condução da reposição de serviço em MR desequilibradas, foram ainda avaliadas as melhorias introduzidas sobre os perfis de tensão quando se assume na MR a existência de um sistema com capacidade de contribuir para o equilíbrio de tensão na rede, a partir do controlo das componentes simétricas da sua tensão terminal. Conclui-se que a estratégia de reposição de serviço proposta, assim como os algoritmos desenvolvidos para a sincronização das MF com a rede de BT são compatíveis com o sistema de equilíbrio de tensão integrado na MR. Além disso, verificou-se que a unidade de equilíbrio de tensão desempenha um papel importante, no que à qualidade de serviço da rede diz respeito, dada a sua contribuição para o equilíbrio de tensão na rede.

Capítulo 6

Conclusões e Futuros Desenvolvimentos

6.1 - Conclusões gerais

Durante a apresentação do trabalho desenvolvido, foram feitas referências às razões que motivaram o interesse no desenvolvimento das MR, em resposta à crescente integração da MG nas redes. O conceito de MR bem como os requisitos que definem o seu funcionamento nos seus distintos modos de operação foram também identificados.

Suportado por uma estrutura hierárquica de controlo, onde admite-se também disponível uma estrutura de comunicação entre os controladores da rede, a MR é então capaz de operar autonomamente, podendo fazer uma gestão eficiente da rede de BT que lhe está associada. Nesse sentido, foi explorada uma estratégia de reposição utilizada em MR equilibradas como base para a estratégia a definir em MR desequilibradas.

Para avaliar a estratégia de reposição de serviço proposta para MR desequilibradas, foi utilizado uma rede de teste com cargas e unidades de MG monofásicas, responsáveis pela situação de desequilíbrio de tensões. Os resultados obtidos mediante a simulação computacional de uma rede de teste confirmam a aplicabilidade das sequências de reposição de serviço a uma Micro-Rede desequilibrada.

Por fim, foi ainda avaliada a influência de um dispositivo de equilíbrio de tensões integrado na MR, ao nível da unidade de armazenamento principal. A presença dessa unidade de equilíbrio na MR permite uma melhoria na qualidade de serviço durante todo o processo.

A validação da estratégia de reposição de serviço em MR desequilibradas constitui um importante avanço face ao actual desenvolvimento das MR. Em estudos do S.E.E, quer em regime estacionário ou transitório, é frequentemente admitido que o regime de tensões é equilibrado, sem que dessa consideração resultem erros grosseiros ao nível das redes de distribuição de grandes dimensões de MT ou mesmo BT. No entanto, numa MR em BT, com

cargas e micro-fontes monofásicas e particularmente no momento da reposição, em que a MR se encontra em modo de emergência (modo isolado), os desequilíbrios de tensão acentuam-se. Dessa forma, foi importante testar os procedimentos de reposição já definidos de forma a validar a real capacidade da MR assegurar um processo tão exigente como a reposição de serviço.

Este contributo na área das MR poderá ainda servir de incentivo a futuros desenvolvimentos nesta área tão promissora, de forma a explorar todas as potencialidades que uma MR poderá oferecer.

6.2 - Futuros Desenvolvimentos

O estudo realizado na presente dissertação assume alguns pressupostos fundamentais de operação da MR. A existência de uma plataforma de comunicação entre todos os elementos da MR é um dado adquirido para o sucesso das operações da MR, mas que ainda não está devidamente consolidado, sendo por isso necessário encontrar-se a melhor solução técnico-económica que viabilize a rápida e fiável comunicação entre os elementos da MR.

No presente estudo da reposição de serviço, não foram considerados os esquemas de protecção da rede de BT. Sendo a reposição de serviço caracterizada por ligação de cargas e de MF faseadamente, a topologia da rede irá variar à medida que o serviço vai sendo repostado. Consequentemente, a potência de curto-circuito da rede irá variar e dessa forma comprometer a actuação do sistema de protecção em caso de defeito. É então necessário que seja feito em simultâneo com a reposição de serviço, uma coordenação eficiente dos sistemas de protecção, de forma a garantir segurança de pessoas, bens e de equipamentos.

Seria também interessante testar e validar os procedimentos propostos nesta dissertação em ambiente laboratorial, assim como as restantes potencialidades de operação das MR.

Referências

- [1] C. L. Moreira, "Identification and Development of MicroGrids Emergency Control Procedures", Dissertação de Doutoramento, Novembro 2008.
- [2] C.L.Moreira, F.O.Resende e A.Peças Lopes, "Using Low Voltage MicroGrids for Service Restoration", IEEE - Transaction on Power Systems, Vol.22, No.1, Fevereiro 2007.
- [3] H. Ibrahim, A. Ilinca e J. Perron, "Energy Storage Systems - characteristics and comparisons". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 12, No.5, Junho 2008.
- [4] Projecto Europeu de Investigação e Desenvolvimento sobre Micro-Redes.
Disponível em: <http://www.microgrids.eu/default.php>
- [5] MICROGRIDS - Large Scale Integration of Micro-Generation to Low Voltage Grids, EU Contract no. ENK5-CT-2002-00610, Technical Annex, Maio 2002.
- [6] N.Harziargyriou, A. Tsikalakis, J. Vlachogiannis, K. Papadogiannis, G. Kariniotakis, J.P. Lopes, C. L. Moreira, A. Madureira, I. Cobelo, "Microgrids Central Controller Strategies and Algorithms", *MicroGrids Project*, Junho 2004. Disponível online em:
http://www.microgrids.eu/micro2000/deliverables/Deliverable_DC1_part1.pdf
- [7] A.G.Madureira, J.A.PeçasLopes, "Coordinatedvoltage support indistribution networkswithdistributed generation and microgrids",*Published in IET Renewable Power Generatio*.
- [8] Dimeas, A.L.; Hatziargyriou, N.D.; "Operation of a Multiagent System for Microgrid Control, Power Systems, IEEE Transaction, Agosto 2005.
- [9] Tsikalakis, A.G.; Hatziargyriou, N.D.; "Centralized Control for Optimizing Microgrids Operation", *Energy Conversion*, IEEE Transaction , Março 2008.

- [10] A. Von Jouanne and B. Banerjee. Assessment of voltage unbalance. *Power Delivery, IEEE Transaction on*, Outubro 2001.
- [11] M. Urs Zahnd, "Control Strategies for Load-Following Unbalanced MicroGrids Islanded Operation", *Diploma project of M. Urs Zahnd, candidate for the EPFL electrical engineering degree*, 2007.
- [12] S.J.S. Tsai e C. Yun. "Dynamic and unbalance voltage compensation using STATCOM." *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*. 2008
- [13] X.Yan, L.M. Tolbert, e J.D. Kueck. "Voltage and Current Unbalance Compensation Using a Parallel Active Filter".*Power Electronics Specialists Conference, 2007. PESC 2007. IEEE*. 2007
- [14] A.von Jouanne, B.Banerjee, "Assessment of voltage unbalance", *IEEE Trans. Power Deliv.* 16, 2001.
- [15] V.B. Bhavaraju e P.N. Enjeti. "An active line conditioner to balance voltages in a three-phase system". *Industry Applications, IEEE Transactions on*, Março-Abril 1996.
- [16] J. A. Peças Lopes , et al., "Identification of control and management strategies for LV unbalanced microgrids with plugged-in electric vehicles". *Electric Power Systems Research. In Press*.
- [17] DyLiacco, T.E. - "The Adaptative Reliability Control System". *IEEE Trans. On PAS*, Vol. PAS-86, Maio de 1967.
- [18] M. M. Adibi e L.H.Fink , "Power System restoration planning", *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol. 9, No.1,Fevereiro 1994.
- [19] M. M. Adibi, P. Clelland, L. H. Fink, H. Happ, R. J. Kafka, J. Raine, D. Sceurer, and F. Trefny, "Power System restoration - a task force report." *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol. 2, No. 2, Maio 1987.
- [20] T. Kostic, "Decision aid functions for restoration of transmission power systems after a blackout." Tese de Doutorado submetida a École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1997.
- [21] M. M. Adibi e R. J. Kafka, "Power system restoration issues." *IEEE Computer Applications in Power*, Vol. 4, No. 2, Abril 1991
- [22] M. M. Adibi, J. N. Borkoski, R. J. Kafka, e T. L. Volkmann, "Frequency response of prime movers during restoration." *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol. 14, No. 2, Maio 1999.
- [23] T. Kostic, A. J. Germond, e J. L. Alba, "Optimization and learning of load restoration strategies." *Electric Power & Energy Systems*, Vol. 20, No. 2, Maio 1998.

- [24] M. M. Adibi e D. P. Milanicz, "Reactive capability limitations of synchronous machines." *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol. 9, No. 1, Fevereiro 1994
- [25] Y.W.Li. D.M.Vilathgamuwa e P.C Loh. , "Microgrid power quality enhancement using a three-phase four-wire grid interfacing compensator", *Industry Applications, IEEE Transactions* , 2005
- [26] J. V. Mierlo, P. V. d. Bossche, and G. Maggetto, "Models of energy sources for EV and EHV: fuel cells, batteries, ultracapacitors, flywheels and engine-generators." *Journal of Power Sources*, vol. 128, Março 2004.

Anexo A

Neste anexo são apresentados os parâmetros da rede de teste da MR utilizada nesta dissertação.

Tabela A-1 - Parâmetros eléctricos das linhas de BT da MR

Linha	R (Ω) (condutores de fase)	L (H) condutores de fase)	R (Ω) (condutor de neutro)	L (H) (condutor de neutro)
L1	0.012658537	0.000236004	0.0241	0.00044841
L2	0.012658537	0.000236004	0.0241	0.00044841
L3	0.012658537	0.000236004	0.0241	0.00044841
L4	0.012658537	0.000236004	0.0241	0.00044841
L5	0.012658537	0.000236004	0.0241	0.00044841
L6	0.012658537	0.000236004	0.0241	0.00044841

Tabela A-2 - Parâmetros eléctricos cargas da MR

Carga	P [kW]	Q [kVAR]	FASE
C1	8	3	B
C2	11	4	B
C3	4	2	C
C4	9	3,5	ABC
C5	2	0	A
C6	20	9	ABC

Tabela A-3 - Parâmetros eléctricos do inversor fonte de tensão

Parâmetro	Designação	Valor	Unidades
TdP	Atraso de acoplamento de potência activa Tensão em vazio	0.6	s
TdQ	Atraso de acoplamento de potência reactiva	0.6	s
KP	Estatismo de potência activa	$1,2566 \times 10^{-4}$	Rad.s ⁻¹ .W ⁻¹
KQ	Estatismo da potência reactiva	3×10^{-8}	V(p.u).var ⁻¹
Kff	Ganho de fase feed- forward	-5×10^{-6}	Rad.W ⁻¹

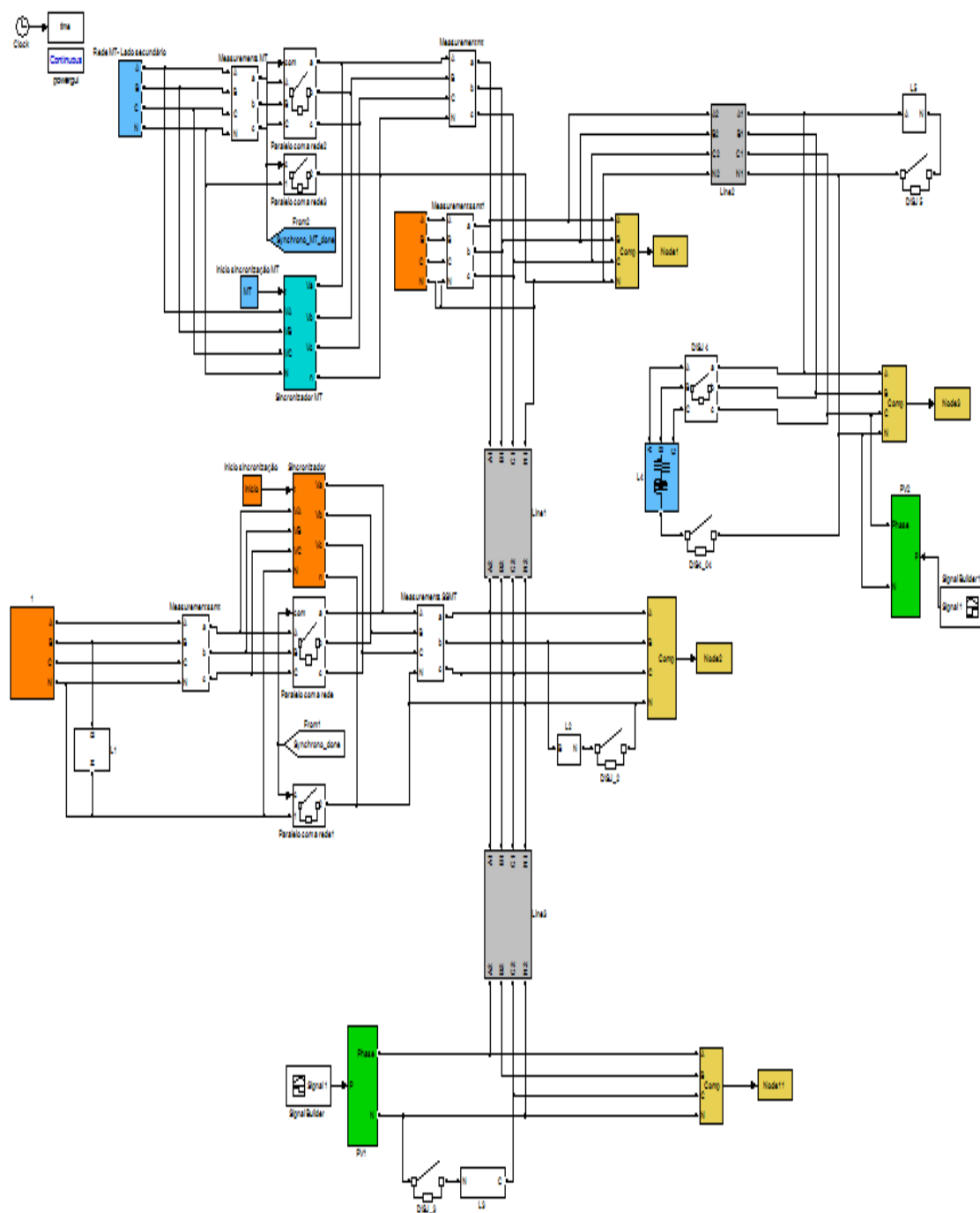


Figura A-1 - Topologia da MR utilizada em ambiente de simulação *Matlab®/Simulink®*

Tabela A-4 - Parâmetros eléctricos do Sistema de Equilíbrio de tensão

Parâmetro	Designação	Valor	Unidades
TdP	Atraso de acoplamento de potência activa Tensão em vazio	0.1	s
TdQ	Atraso de acoplamento de potência reactiva	0.1	s
K p	Ganho proporcional	10	-
K i	Ganho intergral	1000	-
T _{inv}	Atraso do inversor	-5 x 10 ⁻⁶	Rad.W-1

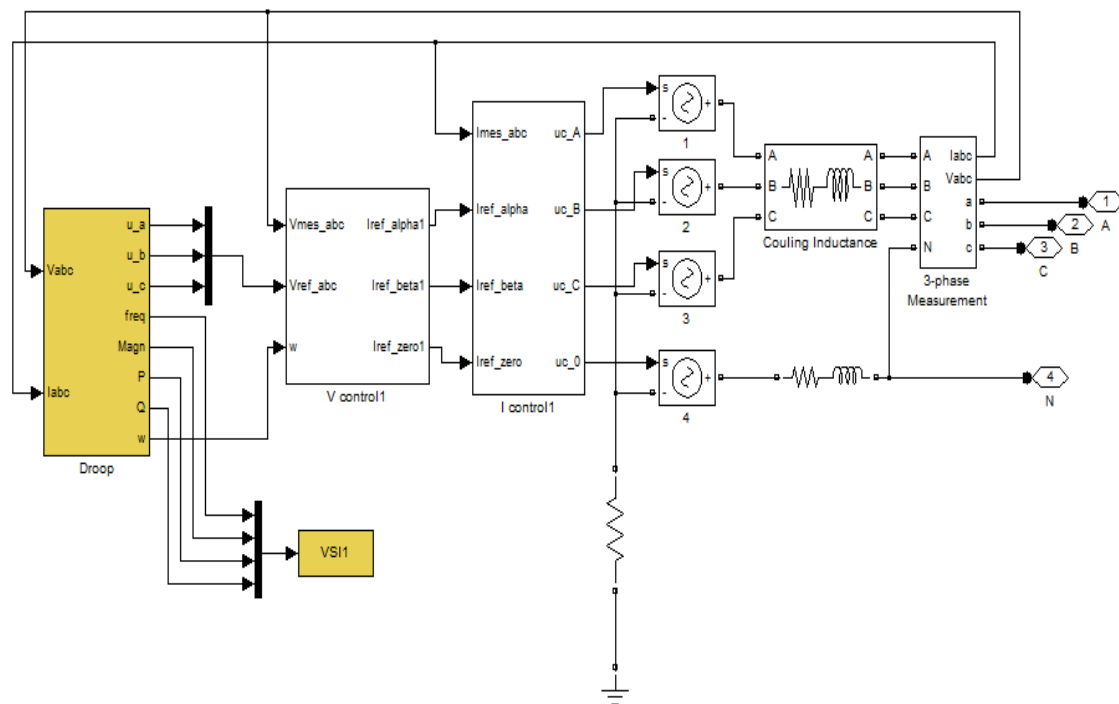


Figura A-2 - Topologia do Sistema de Equilíbrio de Tensões em ambiente de simulação
Matlab®/Simulink®