

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



FEUP

Desequilíbrios de tensão em micro-redes durante o funcionamento em modo isolado

Gabriel José Pinto Vieira

Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Orientador: Prof. Dr. Carlos Coelho Leal Monteiro Moreira

Co-orientadora: Eng^a. Clara Sofia Teixeira Gouveia

24 de Julho de 2012

A Dissertação intitulada

***“Desequilíbrios de Tensão em Micro-redes Durante o Funcionamento em
Modo Isolado”***

foi aprovada em provas realizadas em 19-07-2012

o júri



Presidente Professor Doutor António Carlos Sepúlveda Machado e Moura
Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de
Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Professor Doutor André Guimarães Madureira
Professor Auxiliar Departamento de Engenharia Eletrotécnica e Sistemas de Energia
da Universidade Lusófona



Professor Doutor Carlos Coelho Leal Monteiro Moreira
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Mestre Clara Sofia Gouveia
Investigadora do INESC - Porto

O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projeto) é da sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros extratos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e demais referências bibliográficas usadas, são corretamente citados.



Autor - Gabriel José Pinto Vieira

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Resumo

O conceito de micro-rede consiste numa rede de baixa tensão capaz de funcionar em interligação com a rede de distribuição de média tensão local, ou em regime isolado (desligado da rede de média tensão). A capacidade de funcionar em modo isolado, é-lhe conferida pela presença de micro-fontes e dispositivos de armazenamento de energia que possibilitam que a carga, ou pelo menos uma parte significativa da mesma, continue a ser alimentada perante uma situação em que o isolamento seja solicitado (por exemplo, um colapso generalizado da rede a montante). Todavia, para que este modo de operação seja possível, a micro-rede requer uma estratégia de controlo e gestão apropriada. Quando se dá o isolamento, a micro-rede funciona autonomamente. Para que essa autonomia seja possível, é necessária uma vasta infra-estrutura de comunicações, capaz de medir em tempo real grandezas de interesse em diversos pontos da rede.

O tema desta dissertação foca-se no conceito de micro-rede e, em especial, no problema de controlo de tensão associado à operação da mesma, em modo de funcionamento isolado. Dado que as redes de baixa tensão são trifásicas com neutro, e existem micro-fontes e cargas monofásicas a ela ligadas, o desequilíbrio de tensão entre fases é potenciado. Este desequilíbrio é sentido principalmente quando se dá o isolamento, devido à diminuição da potência de curto-circuito a ele associado. É por isso necessário garantir o equilíbrio de tensão, recorrendo a estratégias de controlo, sob pena de danificar equipamentos trifásicos acoplados à micro-rede, ou violar limites técnicos.

Tendo em vista a resolução do problema enunciado, são avaliadas qualitativamente estratégias de balanceamento de tensão em situações representativas da realidade, nomeadamente em cenários urbanos e rurais. De forma a mitigar o problema do desequilíbrio de tensão, foram identificadas soluções de controlo que passam pela utilização de estratégias do tipo Single Master Operation (SMO) e Multi Master Operation (MMO). É também contemplada neste estudo a inclusão de sistemas de controlo ao nível dos inversores do tipo fonte de tensão, com capacidade de proporcionar o equilíbrio da respetiva tensão de saída, independentemente da corrente fornecida.

Os casos de estudo diferenciam-se pela implementação de estratégias diferentes, sendo o principal objetivo o de encontrar as melhores soluções para cada cenário estudado. A unidade Voltage Source Inverter (VSI) será colocada em pontos distintos da rede, de modo a possibilitar a avaliação do impacto da sua localização. Os efeitos da inclusão de uma unidade de balanceamento de tensão (B.U.) no barramento da unidade VSI serão também avaliados. O desempenho qualitativo da micro-rede em modo isolado é avaliado, sendo o principal objetivo a verificação da capacidade de funcionamento da mesma, cumprindo os requisitos de qualidade da tensão no que se refere ao seu desequilíbrio, mediante a instalação das referidas estratégias de controlo.

Abstract

The microgrid concept consists of a low voltage network capable of operating connected to the medium voltage grid (normal operation mode), or isolated from the upstream network (emergency mode). The ability to operate in emergency mode, is conferred by the presence of micro-sources and energy storage devices that allow the load, or at least a significant part of it, to be fed in a situation in which the isolation is requested (for example, a general breakdown of the upstream network). However, for this operation mode to be feasible, the microgrid requires an appropriate control and management strategy. When the isolation occurs, the microgrid has to operate autonomously. For this autonomy to be feasible, a vast communication infrastructure, capable of measuring various real-time quantities in several parts of the microgrid is needed.

The subject of this thesis focuses on the concept of microgrid, and in particular, the voltage balancing issue related to its operation, in emergency mode. Since the low voltage networks are four wired, and there are micro-sources and single-phase loads connected to it, the voltage unbalance between phases is enhanced. This unbalance is particularly felt when the microgrid operates isolated from the upstream network, due to the decrease of the short circuit power associated to the isolation. It is therefore necessary to ensure the voltage balance, using voltage control strategies. If the voltage balance is not assured, three-phase equipment coupled to microgrid can be damaged and technical limits can be violated.

In order to solve the stated problem, voltage balancing strategies are qualitatively evaluated in reality representative situations, particularly in typical rural and urban scenarios. In order to mitigate the voltage unbalance problem, some control solutions were identified. Those solutions consist of using Single Master Operation (SMO) and Multi Master Operation (MMO) control strategies. This study also contemplates the implementation of voltage balance systems at the voltage source inverter's terminals, capable of providing balanced voltage at its output, independently of the current supplied.

The strategies used vary in each study case, the main objective being to find the best solutions for each scenario studied. The Voltage Source Inverter (VSI) is placed at different points of the network, in order to permit a proper evaluation of its location effects. The effects of adding a B.U. to the same bus where the VSI is coupled, will also be evaluated. The qualitative performance of the microgrid operating under isolated conditions is evaluated, the main objective being the verification of its operation capability, meeting the quality requirements of the voltage balance, through the implementation of the referred control strategies.

Agradecimentos

Termina desta forma, uma importante etapa da minha vida. Quero partilhar os louros de todo o orgulho e felicidade que sinto, com todas as pessoas que se preocuparam, me ajudaram e torceram por mim ao longo desta trilha atribulada. Felizmente, foram muitas.

Começo pelos que me são mais queridos: a minha família. Aos meus pais, Candida e Jose, agradeço todo o apoio que nunca me negaram, e a fé inabalável que tiveram em mim, mesmo nos piores momentos. A minha irmã, Carolina, agradeço a paciência que sempre teve comigo. A minha namorada, Madalena, um profundo agradecimento por todos os momentos de apoio, em que me ouviu, aconselhou, acarinhou e animou incansavelmente. Aos meus tios, Miguel e Sonia, um muito obrigado por terem lá estado quando foi preciso.

Ao Gabriel Barros agradeço a lealdade, humildade e grande companheirismo que partilhamos. Agradeço ao Pedro Carneiro, por ser um amigo sempre presente, preocupado e pronto a ajudar. Ao Ricardo Alves, outro amigo de sempre, um obrigado por ser tão bom ouvinte e ter lá estado, sempre que precisei. Ao Patrick Sousa, um obrigado pelas tardes de pesca, pelas conversas construtivas, pelo apoio e pelas ambições que partilhamos. Ao Paulo Sousa, um agradecimento pelas noites passadas na conversa, e pela sinceridade que caracteriza a nossa amizade. Ao Filipe Magalhaes, agradeço a boa disposição que tantas vezes me arrancou sorrisos, e a humildade que tanto aprecio.

Ao Miguel Correia, Joao Ferreira e Ruben Silva, um obrigado pela amizade, por terem partilhado todos estes anos de faculdade comigo, e terem lá estado nos bons e maus momentos.

Ao grupo Habibi, que me acompanhou ao longo deste semestre, e que teve sempre uma palavra amiga e de incentivo para me dirigir quando precisei, um grande obrigado.

Aos professores, Maciel Barbosa, Claudio Monteiro, Joao Claro, Joao Tome Saraiva, Margarida Ferreira e Carlos Moreira, um bem haja por terem marcado o meu percurso académico de forma positiva. Em especial ao professor Carlos Moreira, meu orientador na dissertação, um profundo agradecimento pela paciência, disponibilidade, dedicação e apoio prestado ao longo do semestre. A co-orientadora Clara Gouveia, um muito obrigado pela simpatia, disponibilidade, e tempo perdido a ajudar-me a resolver os problemas que foram surgindo.

Aos amigos que não referi, porque não posso referir todos, obrigado por existirem e por poder contar convosco.

Todos vos, de uma maneira ou de outra, contribuíram para que eu pudesse alcançar este objetivo. Todos vos me ajudaram a crescer, e tornar-me na pessoa que sou hoje. A todos vos, um muito obrigado!

Gabriel Vieira

*“Nao tenho tempo a perder
a vida e muito curta para fazer todas as coisas que eu quero fazer,
para viver tudo o que eu quero viver,
para dizer tudo que eu quero dizer,
para ver tudo que eu quero ver.”*

Gabriel, O pensador.

Índice

Resumo	i
Abstract	iii
Agradecimentos	v
Índice	xi
Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xviii
Abreviaturas e Símbolos	xix
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento da dissertação	1
1.2 Objetivos e motivação da dissertação	3
1.3 Estrutura da dissertação	4
2 Microgeração , micro-redes e desequilíbrios de tensão - conceptualização	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 Solar fotovoltaico	7
2.2.2.2 Micro eólica	9
2.2.2.3 Micro-turbinas	10
2.2.2.4 Pilhas de combustível	11
2.2.3 Tecnologias de armazenamento de energia	12
2.2.3.1 Baterias	12
2.2.3.2 Supercondensadores	13
2.2.3.3 Volantes de inércia	14
2.3 Micro-redes	14
2.3.1 O conceito de micro-rede	15
2.3.2 Arquitetura funcional da micro-rede	16
2.3.2.1 Operação e estratégias de controlo da micro-rede em modo normal	18
2.3.2.2 Operação e estratégias de controlo da micro-rede em modo isolado	19
2.4 Desequilíbrios e balanceamento de tensão	23
2.4.1 Conceito de desequilíbrio de tensão	23

2.4.2	Medição e análise da magnitude dos desequilíbrios	24
2.4.3	Soluções para balanceamento de tensão em micro-redes	25
2.4.4	Medição de potência em sistemas desequilibrados	25
2.5	Sumário e conclusões	26
3	Modelização da micro-rede e seus componentes	29
3.1	Introdução	29
3.2	Modelização da rede de MT	30
3.3	Modelização de cargas	30
3.4	Modelização de linhas	31
3.5	Modelização de microfones	32
3.5.1	Modelização do Painele Fotovoltaico	32
3.5.2	Modelização da Microturbina	35
3.5.3	Modelização de Dispositivos de Armazenamento	36
3.6	Modelização de Inversores Eletrônicos de Potência	37
3.6.1	Modelização do Inversor PQ	38
3.6.2	Modelização do Inversor Fonte de Tensão (VSI)	41
3.6.3	Modelização do Inversor de quatro pernas (4-leg inverter)	45
3.7	Sumário e conclusões	49
4	Estratégias de controlo e balanceamento de tensão em micro-redes	51
4.1	Introdução	51
4.2	Controlo e balanceamento de tensão em modo interligado	52
4.3	Controlo e balanceamento de tensão em modo isolado	52
4.3.1	Estratégia de controlo SMO	53
4.3.2	Estratégia de controlo MMO	56
4.4	Sumário e conclusões	56
5	Avaliação e apresentação de resultados das estratégias de controlo e balanceamento de tensão	59
5.1	Introdução	59
5.2	Descrição da rede de teste	60
5.3	Análise de resultados de estratégias de operação SMO	62
5.3.1	Inversor fonte de tensão, sem unidade de balanceamento de tensão	63
5.3.2	Inversor fonte de tensão, com unidade de balanceamento de tensão	71
5.4	Análise de resultados de estratégias de operação MMO	78
5.4.1	Inversores fonte de tensão, sem unidade de balanceamento de tensão	78
5.4.2	Inversores fonte de tensão, com unidade de balanceamento de tensão	85
5.5	Sumário e conclusões	91
6	Conclusões e futuros desenvolvimentos	93
6.1	Conclusões	93
6.2	Futuros desenvolvimentos	96
A		99
A.1	Cargas presentes na rede de teste, em cada cenário	99
A.2	Plataforma, modelos e parâmetros de simulação	100
A.3	Desequilíbrios de tensão	104
A.3.1	Cenário Rural, 1 VSI, sem B.U.	104

A.3.2	Cenário Rural, 1 VSI (nó 2), sem B.U.	105
A.3.3	Cenário Urbano, 1 VSI, sem B.U.	106
A.3.4	Cenário Rural, 1 VSI, com B.U.	108
A.3.5	Cenário Urbano, 1 VSI, com B.U.	109
A.3.6	Cenário Rural, 2 VSI, sem B.U.	110
A.3.7	Cenário Urbano, 2 VSI, sem B.U.	112
A.3.8	Cenário Rural, 2 VSI, com B.U.	113
A.3.9	Cenário Urbano, 2 VSI, com B.U.	114
Referências		117

Lista de Figuras

2.1	Configurações possíveis da célula solar FV	8
2.2	Diagrama de blocos de um sistema FV ligado à rede	8
2.3	Esquema de funcionamento de uma micro-turbina de um veio	10
2.4	Esquema de um supercondensador eletroquímico.	13
2.5	Arquitetura da MR	17
2.6	Esquema de controlo SMO	21
2.7	Esquema de controlo MMO	22
3.1	Modelo da rede MT	30
3.2	Modelo das cargas monofásicas e trifásicas	31
3.3	Modelo das linhas de transmissão	31
3.4	Circuito equivalente de uma célula FV	32
3.5	Característica V-I e P-V de uma célula FV genérica	33
3.6	Influência da temperatura na característica V-I de uma célula FV	34
3.7	Influência da radiação na característica V-I de uma célula FV	34
3.8	Configuração de um sistema FV	35
3.9	Diagrama de blocos do sistema de controlo de uma microturbina	35
3.10	Resposta ao degrau de uma microturbina	36
3.11	Modelização de um inversor PQ monofásico	38
3.12	Esquema do balanço energético no condensador link-DC	39
3.13	Modelo dinâmico do link-DC	40
3.14	Modelo do inversor PQ implementado em ambiente matlab/simulink	40
3.15	Modelização de um inversor PQ do tipo trifásico	41
3.16	Curva característica de variação "Frequência vs Potência Ativa" do VSI	42
3.17	Curva característica de variação "Tensão vs Potência Reativa" do VSI.	43
3.18	Esquema de controlo de um VSI.	44
3.19	Implementação de um VSI em ambiente matlab/simulink.	44
3.20	Topologia do inversor de quatro pernas.	45
3.21	Estrutura de controlo da unidade de equilíbrio.	46
3.22	Esquema de controlo de tensão da unidade de balanceamento.	47
3.23	Diagrama fasorial da transformada de Park.	48
3.24	Estrutura do bloco de controlo de corrente em ambiente matlab/simulink.	49
4.1	Implementação conjunta de unidade VSI e unidade de balanceamento de tensão, em ambiente matlab/simulink	55
5.1	Diagrama resumo das simulações efetuadas	60
5.2	Esquema da topologia da MR de teste utilizada (SMO)	61
5.3	Tensão por fase no barramento 1 da MR, cenário rural, 1 VSI, sem B.U.	64

5.4	Tensão por fase no barramento 2 da MR, cenário rural, 1 VSI, sem B.U.	64
5.5	Tensão por fase no barramento 3 da MR, cenário rural, 1 VSI, sem B.U.	64
5.6	Tensão por fase no barramento 4 da MR, cenário rural, 1 VSI, sem B.U.	65
5.7	Frequência na MR	65
5.8	Tensão por fase no barramento 1 da MR, cenário rural, 1 VSI (nó 2), sem B.U. . .	66
5.9	Tensão por fase no barramento 2 da MR, cenário rural, 1 VSI (nó 2), sem B.U. . .	67
5.10	Tensão por fase no barramento 3 da MR, cenário rural, 1 VSI (nó 2), sem B.U. . .	67
5.11	Tensão por fase no barramento 4 da MR, cenário rural, 1 VSI (nó 2), sem B.U. . .	68
5.12	Tensão por fase no barramento 1 da MR, cenário urbano, 1 VSI, sem B.U.	69
5.13	Tensão por fase no barramento 2 da MR, cenário urbano, 1 VSI, sem B.U.	70
5.14	Tensão por fase no barramento 3 da MR, cenário urbano, 1 VSI, sem B.U.	70
5.15	Tensão por fase no barramento 4 da MR, cenário urbano, 1 VSI, sem B.U.	70
5.16	Tensão por fase no barramento 1 da MR, cenário rural, 1 VSI, com B.U.	71
5.17	Tensão por fase no barramento 2 da MR, cenário rural, 1 VSI, com B.U.	72
5.18	Tensão por fase no barramento 3 da MR, cenário rural, 1 VSI, com B.U.	72
5.19	Tensão por fase no barramento 4 da MR, cenário rural, 1 VSI, com B.U.	72
5.20	Tensão por fase no barramento 1 da MR, cenário urbano, 1 VSI, com B.U.	74
5.21	Tensão por fase no barramento 2 da MR, cenário urbano, 1 VSI, com B.U.	75
5.22	Tensão por fase no barramento 3 da MR, cenário urbano, 1 VSI, com B.U.	75
5.23	Tensão por fase no barramento 4 da MR, cenário urbano, 1 VSI, com B.U.	75
5.24	Comportamento da unidade VSI e microturbina após o isolamento (cenário rural com B.U.)	77
5.25	Comportamento da unidade VSI e microturbina após o isolamento (cenário urbano com B.U.)	78
5.26	Tensão por fase no barramento 1 da MR, cenário rural, 2 VSI, sem B.U.	79
5.27	Tensão por fase no barramento 2 da MR, cenário rural, 2 VSI, sem B.U.	80
5.28	Tensão por fase no barramento 3 da MR, cenário rural, 2 VSI, sem B.U.	80
5.29	Tensão por fase no barramento 4 da MR, cenário rural, 2 VSI, sem B.U.	80
5.30	Potência à saída das unidades VSI - cenário rural	82
5.31	Tensão por fase no barramento 1 da MR, cenário urbano, 2 VSI, sem B.U.	82
5.32	Tensão por fase no barramento 2 da MR, cenário urbano, 2 VSI, sem B.U.	83
5.33	Tensão por fase no barramento 3 da MR, cenário urbano, 2 VSI, sem B.U.	83
5.34	Tensão por fase no barramento 4 da MR, cenário urbano, 2 VSI, sem B.U.	83
5.35	Potência à saída das unidades VSI - cenário urbano	85
5.36	Tensão por fase no barramento 1 da MR, cenário rural, 2 VSI, com B.U.	87
5.37	Tensão por fase no barramento 2 da MR, cenário rural, 2 VSI, com B.U.	87
5.38	Tensão por fase no barramento 3 da MR, cenário rural, 2 VSI, com B.U.	87
5.39	Tensão por fase no barramento 4 da MR, cenário rural, 2 VSI, com B.U.	88
5.40	Tensão por fase no barramento 1 da MR, cenário urbano, 2 VSI, com B.U.	88
5.41	Tensão por fase no barramento 2 da MR, cenário urbano, 2 VSI, com B.U.	89
5.42	Tensão por fase no barramento 3 da MR, cenário urbano, 2 VSI, com B.U.	89
5.43	Tensão por fase no barramento 4 da MR, cenário urbano, 2 VSI, com B.U.	89
A.1	Plataforma de simulação matlab/simulink - rede de testes	100
A.2	Detalhe da máscara do modelo da micro-turbina utilizado em ambiente matlab/simulink	101
A.3	Detalhe do modelo da micro-turbina utilizado em ambiente matlab/simulink, incluindo o modelo da parte mecânica, do gerador síncrono trifásico e do conversor	101

A.4	Caixa de diálogo preenchida com os dados da unidade VSI utilizada no barramento de interligação, em todas as simulações	102
A.5	Caixa de diálogo preenchida com os dados da unidade VSI utilizada no barramento 4 (estratégia MMO, cenário rural)	102
A.6	Caixa de diálogo preenchida com os dados da unidade VSI utilizada no barramento 4 (estratégia MMO, cenário urbano)	103
A.7	Desequilíbrios de tensão no barramento 1 - cenário rural, 1 VSI, sem B.U.	104
A.8	Desequilíbrios de tensão no barramento 2 - cenário rural, 1 VSI, sem B.U.	104
A.9	Desequilíbrios de tensão no barramento 3 - cenário rural, 1 VSI, sem B.U.	104
A.10	Desequilíbrios de tensão no barramento 4 - cenário rural, 1 VSI, sem B.U.	105
A.11	Desequilíbrios de tensão no barramento 1 - cenário rural, 1 VSI (nó 2), sem B.U.	105
A.12	Desequilíbrios de tensão no barramento 2 - cenário rural, 1 VSI (nó 2), sem B.U.	105
A.13	Desequilíbrios de tensão no barramento 3 - cenário rural, 1 VSI (nó 2), sem B.U.	106
A.14	Desequilíbrios de tensão no barramento 4 - cenário rural, 1 VSI (nó 2), sem B.U.	106
A.15	Desequilíbrios de tensão no barramento 1 - cenário urbano, 1 VSI, sem B.U.	106
A.16	Desequilíbrios de tensão no barramento 2 - cenário urbano, 1 VSI, sem B.U.	107
A.17	Desequilíbrios de tensão no barramento 3 - cenário urbano, 1 VSI, sem B.U.	107
A.18	Desequilíbrios de tensão no barramento 4 - cenário urbano, 1 VSI, sem B.U.	107
A.19	Desequilíbrios de tensão no barramento 1 - cenário rural, 1 VSI, com B.U.	108
A.20	Desequilíbrios de tensão no barramento 2 - cenário rural, 1 VSI, com B.U.	108
A.21	Desequilíbrios de tensão no barramento 3 - cenário rural, 1 VSI, com B.U.	108
A.22	Desequilíbrios de tensão no barramento 4 - cenário rural, 1 VSI, com B.U.	109
A.23	Desequilíbrios de tensão no barramento 1 - cenário urbano, 1 VSI, com B.U.	109
A.24	Desequilíbrios de tensão no barramento 2 - cenário urbano, 1 VSI, com B.U.	109
A.25	Desequilíbrios de tensão no barramento 3 - cenário urbano, 1 VSI, com B.U.	110
A.26	Desequilíbrios de tensão no barramento 4 - cenário urbano, 1 VSI, com B.U.	110
A.27	Desequilíbrios de tensão no barramento 1 - cenário rural, 2 VSI, sem B.U.	110
A.28	Desequilíbrios de tensão no barramento 2 - cenário rural, 2 VSI, sem B.U.	111
A.29	Desequilíbrios de tensão no barramento 3 - cenário rural, 2 VSI, sem B.U.	111
A.30	Desequilíbrios de tensão no barramento 4 - cenário rural, 2 VSI, sem B.U.	111
A.31	Desequilíbrios de tensão no barramento 1 - cenário urbano, 2 VSI, sem B.U.	112
A.32	Desequilíbrios de tensão no barramento 2 - cenário urbano, 2 VSI, sem B.U.	112
A.33	Desequilíbrios de tensão no barramento 3 - cenário urbano, 2 VSI, sem B.U.	112
A.34	Desequilíbrios de tensão no barramento 4 - cenário urbano, 2 VSI, sem B.U.	113
A.35	Desequilíbrios de tensão no barramento 1 - cenário rural, 2 VSI, com B.U.	113
A.36	Desequilíbrios de tensão no barramento 2 - cenário rural, 2 VSI, com B.U.	113
A.37	Desequilíbrios de tensão no barramento 3 - cenário rural, 2 VSI, com B.U.	114
A.38	Desequilíbrios de tensão no barramento 4 - cenário rural, 2 VSI, com B.U.	114
A.39	Desequilíbrios de tensão no barramento 1 - cenário urbano, 2 VSI, com B.U.	114
A.40	Desequilíbrios de tensão no barramento 2 - cenário urbano, 2 VSI, com B.U.	115
A.41	Desequilíbrios de tensão no barramento 3 - cenário urbano, 2 VSI, com B.U.	115
A.42	Desequilíbrios de tensão no barramento 4 - cenário urbano, 2 VSI, com B.U.	115

Lista de Tabelas

2.1	Sub-classificação de pequenas turbinas eólicas.	9
2.2	Comparação entre micro-turbinas Single Shaft e Split Shaft.	11
5.1	Características elétricas das linhas no cenário rural (modelo RL série)	62
5.2	Características elétricas das linhas no cenário urbano (modelo RL série)	62
5.3	Produção inicial e nominal das MF no caso rural	62
5.4	Produção inicial e nominal das MF no caso urbano	63
5.5	Carga total e carga total por fase no cenário rural e urbano	63
5.6	Tabela resumo da componente inversa e homopolar dos desequilíbrios de tensão - VSI no nó 1	66
5.7	Tabela resumo da componente inversa e homopolar dos desequilíbrios de tensão - VSI no nó 2	68
5.8	Comparação dos desequilíbrios de tensão no cenário rural, mediante alteração da localização da unidade VSI	69
5.9	Tabela resumo da componente inversa e homopolar dos desequilíbrios de tensão .	71
5.10	Tabela resumo da componente inversa e homopolar dos desequilíbrios de tensão - unidade VSI com B.U.	73
5.11	Comparação dos desequilíbrios de tensão do caso sem B.U. com o caso com B.U. (cenário rural)	73
5.12	Tabela resumo da componente inversa e homopolar dos desequilíbrios de tensão - unidade VSI com B.U.	74
5.13	Comparação dos desequilíbrios de tensão do caso sem B.U. com o caso com B.U. (cenário urbano)	76
5.14	Comparação da diminuição da componente inversa do desequilíbrio de tensão, causada pela introdução da B.U na MR, (cenário rural vs cenário urbano)	77
5.15	Tabela resumo da componente inversa e homopolar dos desequilíbrios de tensão - cenário rural com 2 unidades VSI	81
5.16	Comparação dos desequilíbrios da componente inversa e homopolar da tensão, entre o cenário rural, com 1 e 2 unidades VSI	81
5.17	Tabela resumo da componente inversa e homopolar dos desequilíbrios de tensão - cenário urbano com 2 unidades VSI	84
5.18	Comparação dos desequilíbrios da componente inversa e homopolar da tensão, entre o cenário urbano, com 1 e 2 unidades VSI	84
5.19	Tabela resumo da componente inversa e homopolar dos desequilíbrios de tensão - cenário rural, 2 unidades VSI, com B.U.	85
5.20	Comparação dos desequilíbrios da componente inversa e homopolar da tensão, entre o cenário rural com 2 unidades VSI, com e sem B.U.	86

5.21	Tabela resumo da componente inversa e homopolar dos desequilíbrios de tensão - cenário urbano, 2 unidades VSI, com B.U.	90
5.22	Comparação dos desequilíbrios da componente inversa e homopolar da tensão, entre o cenário urbano com 2 unidades VSI, com e sem B.U.	90
A.1	Distribuição de cargas por tipo e fase no cenário rural	99
A.2	Distribuição de cargas por tipo e fase no cenário urbano	99

Abreviaturas e Símbolos

AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
B.U.	Balancing Unit
CHP	Combined Heat and Power
CERTS	The Consortium for Electric Reliability Technology Solutions
DMS	Distribution Management System
FDT	Fator de Desequilíbrio de Tensão
FV	Fotovoltaicos
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbines
LC	Load Controller
MC	Microsource Controller
MF	Micro-fontes
MG	Microgeração
MGCC	Micro Grid Central Controller
MMO	Multi Master Operation
MPP	Maximum Power Point
MPPT	Maximum Power Point Tracker
MR	Micro-rede
MT	Média Tensão
PD	Produção Dispersa
SEE	Sistema Elétrico de Energia
SMO	Single Master Operation
VAWT	Vertical Axis Wind Turbines
VSI	Voltage Source Inverter

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento da dissertação

Inicialmente, a estratégia de controlo dos sistemas elétricos de energia (SEE) era centralizada e baseada em economias de escala. Os centros produtores alimentavam centros consumidores e consequentemente, o fluxo energético fazia-se unicamente de montante (centrais produtoras) para jusante (cargas elétricas). A energia elétrica era maioritariamente produzida em centrais convencionais, de grandes potências instaladas, que geravam energia principalmente através da utilização de combustíveis fósseis, sendo o petróleo e o carvão os mais utilizados.

Todavia, nas últimas décadas os sistemas elétricos de energia têm evoluído para uma estratégia de controlo cada vez mais descentralizada. A justificar esta mudança de paradigma, aparecem o aumento do preço dos combustíveis fósseis, a dependência da maioria dos países destas fontes energéticas, a sua escassez e a crescente preocupação ambiental por parte da população em geral, e das organizações ambientalistas em particular, quanto ao uso das mesmas. Este conjunto de fatores e a necessidade imperiosa de garantir o fornecimento de energia elétrica à escala mundial, levou a um desenvolvimento tecnológico na área da produção de energia elétrica. Na verdade, o consumo de energia elétrica está a aumentar ano após ano a nível mundial e, por esta razão, há uma crescente necessidade de projetar cuidadosamente as futuras infra-estruturas e redes energéticas, de modo a diminuir custos de investimento e aumentar a fiabilidade.

Uma das causas da referida descentralização é a integração já existente de geração de energia eólica, co-geração ou mini-hídricas nas redes de média e alta tensão. Nos últimos anos, a tendência tem sido a de alastrar a integração de produção distribuída para a rede de baixa tensão. Os avanços tecnológicos na área dos micro-geradores possibilitaram esta nova abordagem. Existem já diversos tipos de micro-geradores, tais como painéis fotovoltaicos (FV), microturbinas, células de combustível, e micro-turbinas eólicas, sendo que a sua presença junto dos centros consumidores é cada vez mais usual. A utilização destas tecnologias diminui as emissões de gases poluentes, principalmente pelos micro-geradores que utilizem recursos endógenos, o que representa uma grande vantagem a nível ambiental. A capacidade de utilizar microgeração (MG) e injetar potência junto das cargas, introduziu uma mudança de paradigma no funcionamento dos sistemas

elétricos de energia (SEE). Até então, o trânsito de potência fazia-se invariavelmente de montante para jusante. Já com a presença de produção dispersa (PD), e em particular de MG, é comum observarem-se trânsitos inversos. Esta inversão de trânsitos de potência, depende do balanço entre consumo e produção de energia. Se a produção for superior ao consumo num dado barramento (devido à presença de PD), passa a haver injeção de potência na rede por parte desse barramento, dando-se a inversão do habitual fluxo de potência. Tanto a produção distribuída existente nas redes de média e alta tensão, como a existente nas redes de baixa tensão (microgeração), pode originar este fenómeno.

A introdução dos micro-geradores e a massificação da MG, trouxe diversas vantagens, mas trouxe também novos desafios.

A mudança de paradigma causada pela introdução de MG nos SEE, levou ao aparecimento do conceito de micro-rede (MR). A MR pode ser definida como sendo uma rede de baixa-tensão, com baixos valores de potência instalada, à qual estão acoplados micro-geradores e dispositivos de armazenamento de energia (tais como flywheels ou baterias) [1]. A existência de uma adequada rede de comunicações capaz de monitorizar, controlar e gerir a MR, é indispensável à implementação deste conceito.

Esta abordagem inovadora traz consigo numerosas vantagens tanto para os utilizadores como para os operadores de rede, por diversos motivos.

Do ponto de vista do modo de operação, uma MR funciona geralmente interligada com o SEE, mas possui a capacidade de funcionar em modo isolado, isto é, desligada do SEE e de forma autónoma [2]. Esta capacidade tem grande preponderância na melhoria de indicadores de qualidade tais como energia não fornecida e número de interrupções por unidade de tempo. Contudo, a operação de uma MR em modo isolado, acarreta vários desafios ao nível do controlo e gestão da mesma.

As MR são redes de BT com presença maioritária de cargas monofásicas, que dificilmente se encontram equitativamente distribuídas pelas três fases. Isto leva a que, na eventualidade de ser necessário funcionar em modo isolado, surjam inevitavelmente desequilíbrios de tensão entre fases. Estes desequilíbrios causam, quando se analisam as componentes simétricas, a introdução de componentes inversas e homopolares da tensão. A presença da componente inversa da tensão é a mais preocupante do ponto de vista operacional da rede, pelos impactos que causa nas cargas trifásicas (principalmente nas máquinas elétricas rotativas).

Os desequilíbrios são agravados, quando comparados com o caso em que a MR se encontra acoplada à rede, pelo facto das MR verem a sua potência de curto-circuito significativamente diminuída quando funcionam em modo isolado. Tratando-se de uma rede bastante mais fraca, os impactos causados pelos desequilíbrios em termos de qualidade de serviço, são mais notórios. Para que a qualidade de serviço seja mantida devem ser respeitados valores limite para os desequilíbrios existentes na rede.

Outro dos desafios na gestão das MR, prende-se com a garantia de estabilidade no funcionamento da mesma, seja na altura do isolamento, durante o funcionamento em modo isolado ou mesmo no momento de sincronização e religação com a rede de MT.

Para solucionar estes problemas são necessárias metodologias de controlo adequadas, que permitam um bom funcionamento da MR.

1.2 Objetivos e motivação da dissertação

O conceito de MR encontra-se irremediavelmente ligado ao presente/futuro do SEE, o que o torna um assunto atual, preponderante e aliciante. Com a crescente integração de PD e massificação da utilização de MG, a passagem do conceito de MR da teoria à prática, está a tornar-se uma realidade. A possibilidade de identificar possíveis soluções para os problemas encontrados na operação destas MR, em particular no que concerne os desequilíbrios de tensão em modo isolado, é a principal motivação para esta dissertação.

A possibilidade de utilizar as MR em prol da qualidade de serviço vem associada à necessidade de implementação de estratégias de controlo e gestão adequadas. Os objetivos desta dissertação passam por:

- Quantificar desequilíbrios de tensão em MR, derivados da existência de cargas e produção monofásicas;
- Identificar mecanismos capazes de corrigir estes desequilíbrios, ao nível dos inversores;
- Identificar estratégias de controlo e balanceamento de tensão capazes de solucionar o problema ao nível da MR;
- Testar e avaliar qualitativamente as soluções estudadas;

Para isso, serão simulados cenários representativos de uma MR que se encontre inserida num meio rural ou urbano. De forma a atingir cenários credíveis, variaram-se perfis de carga (monofásica e trifásica), reatâncias de linhas e volume de integração de MG (monofásica e trifásica) na rede, em cada um dos cenários.

Em cada cenário serão implementadas várias estratégias de controlo de tensão, com o objetivo de determinar as diferenças entre cada solução encontrada e concluir qual a que melhor se adequa ao caso de estudo. As simulações realizadas permitirão discutir diversos aspetos relativos às vantagens de cada solução. As análises de maior interesse são:

- Comparação de resultados entre cenários idênticos e estratégias distintas, de forma a determinar qual a melhor estratégia de controlo em cada cenário;
- Comparação de resultados entre cenários distintos e estratégias idênticas, de forma a determinar o cenário em que a eficiência da estratégia comparada é maior;

As estratégias de controlo de tensão testadas, diferenciam-se entre si pelo número e tipo de mecanismos de balanceamento de tensão presentes na MR e pela localização geográfica dos mesmos.

Para atingir os objetivos referidos, recorre-se à simulação computacional dos modelos criados na plataforma “Matlab – Simulink”.

1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação é constituída por 6 capítulos, onde se inclui todo o trabalho realizado no âmbito da mesma. O conteúdo de cada um deles é descrito de seguida.

O presente capítulo, é um capítulo introdutório, que tem como objetivo enquadrar o assunto tratado, além de estabelecer os principais objetivos que se pretendem alcançar e a motivação que levou à escolha do tema.

No segundo capítulo, aborda-se o conceito de microgeração e é feito um resumo das tecnologias de microgeração existentes. O conceito de micro-rede, a sua arquitetura funcional e estratégias de controlo existentes são também analisadas neste capítulo. Há ainda lugar à análise do conceito de desequilíbrios de tensão e métodos de análise dos mesmos, bem como à descrição de soluções de balanceamento de tensão existentes.

O terceiro capítulo serve para descrever os modelos matemáticos de todos os componentes utilizados no ambiente de simulação dinâmica.

No quarto capítulo, aprofundam-se as características das estratégias de controlo da micro-rede (SMO e MMO), e enunciam-se as estratégias de controlo e balanceamento de tensão estudadas no âmbito desta dissertação.

No quinto capítulo, expõem-se os resultados numéricos alcançados através das simulações levadas a cabo. Faz-se ainda uma análise qualitativa dos mesmos, comparando as diversas estratégias de controlo e balanceamento de tensão estudadas.

Finalmente, as conclusões retiradas da análise efetuada no capítulo 5, são apresentadas no sexto e último capítulo desta dissertação. Este capítulo serve ainda para sugerir futuros desenvolvimentos nesta área.

Capítulo 2

Microgeração , micro-redes e desequilíbrios de tensão - conceptualização

2.1 Introdução

Nas últimas décadas, a utilização de produção distribuída nas redes elétricas tem vindo a aumentar. A justificar este aumento, aparece a necessidade de diversificar o mix energético e diminuir a dependência de combustíveis fósseis. Fatores económicos e ambientais, bem como a crescente evolução tecnológica na área, são também justificativos do mesmo.

Quando se fala em produção dispersa (PD), é habitual pensar em geradores distribuídos pela rede e acoplados em barramentos de alta-tensão (AT) ou média-tensão (MT). Contudo os avanços tecnológicos permitiram criar sistemas economicamente atrativos e com dimensões e potências adequadas à baixa-tensão (BT). Esta forma de entregar energia à rede é chamada de microgeração (MG). Este tipo de produção de energia é já muito usado por diversos motivos. Além de a sua utilização se demonstrar vantajosa a nível ambiental, também os incentivos monetários dados a quem nele investe o tornam atrativo.

A microgeração pode trazer vantagens para a operação do SEE. Todavia, traz também novos problemas e desafios. A mudança de paradigma introduzida pela MG no que diz respeito ao modo de operação do SEE é grande. O trânsito de potência no SEE era tradicionalmente unidirecional, dirigido de montante (grandes centrais produtoras) para jusante (consumidores). A introdução da PD, e em particular da MG, fez com que passasse a ser possível observar trânsitos bidirecionais, o que representa por si só um novo desafio relativamente ao dimensionamento da rede e seus componentes. A atual política de integração da MG nas redes de distribuição, denominada na literatura anglo-saxónica de “fit & forget”, apresenta debilidades notórias. Com esta política, corre-se o risco de ver a MG a antecipar a necessidade de investimento em reforço de rede, ao invés de o diferir.

A crescente integração de novas unidades de MG na rede tem, do ponto de vista técnico, fortes implicações no comportamento da mesma, tais como: alteração dos perfis de tensão, aumento da potência de curto-circuito, possível aumento da taxa de distorção harmónica, estabilidade na operação do sistema e capacidade de funcionamento em modo isolado [2]. Quando se pensa num elevado volume de integração de MG numa dada rede, é importante considerar a necessidade de proceder a uma mudança de paradigma na operação da mesma. As micro-redes (MR) podem representar a mudança requerida.

Uma MR pode ser definida como sendo uma rede de baixa-tensão, (p.ex: uma pequena cidade, um centro comercial ou um parque industrial), ao qual estão ligadas cargas e pequenos sistemas de geração energética, as micro-fontes (MF) [3].

A existência de uma vasta infra-estrutura de comunicações, responsável por medir em tempo real grandezas de interesse em diversos pontos da rede e possibilitar a adequada gestão e controlo, enquadra-se naquilo que é o conceito de MR. Este conceito centra-se em torno da capacidade de realizar um controlo ativo sobre todos os componentes da MR. Passa a haver, por exemplo, a capacidade de participação dos microgeradores nos serviços auxiliares da rede.

A capacidade de funcionar em modo isolado, confere à MR uma flexibilidade de operação enorme. Todavia, o controlo da MR nestas condições de funcionamento é complexo. Aquando do funcionamento em modo isolado, a MR torna-se uma rede pouco robusta quando comparada com o SEE. Como tal, manter a sua estabilidade assegurada é um desafio.

Um dos desafios encontrados em modo isolado, é o de manter as tensões equilibradas. Dado que as cargas numa rede de BT são maioritariamente monofásicas e que a sua distribuição pelas três fases não é equitativa, geram-se desequilíbrios de tensão entre fases que podem prejudicar dispositivos trifásicos acoplados à rede. Estes desequilíbrios agravam-se quando a MR passa a funcionar em modo isolado, devido à consequente redução de potência de curto-circuito do sistema. Para garantir o equilíbrio de tensão, é necessário desenvolver e estudar estratégias de controlo e balanceamento de tensão.

2.2 Microgeração

2.2.1 Conceito de microgeração

A necessidade de reduzir emissões poluentes no campo da produção de energia elétrica, avanços tecnológicos recentes no campo da MG, e a reestruturação do setor elétrico, são os principais fatores responsáveis pelo crescente interesse na utilização da MG [4]. A microgeração pode ser definida como sendo um tipo de produção de energia elétrica suportada por unidades geradoras de pequenas dimensões, as MF. Estas unidades encontram-se acopladas à rede de BT e podem explorar recursos endógenos ou recursos não renováveis (neste último caso, temos o exemplo das centrais de micro-cogeração (CHP)). Devido às suas características, são passíveis de ser instaladas em qualquer habitação, não sendo necessário garantir condições de espaço muito exigentes. Por

este motivo, é frequente encontrar micro-geradores instalados em habitações comuns. A sua aquisição é fortemente incentivada pelas entidades governamentais, essencialmente devido a vantagens ecológicas e protocolos ambientais existentes. A integração na rede elétrica de PD em geral, e MG em particular, traz diversas vantagens à operação do sistema, entre as quais [2]:

- Descongestionamento de linhas de distribuição e consequente redução de perdas;
- Deferimento de investimento no reforço de redes;
- Melhoria de qualidade de serviço e aumento de fiabilidade do sistema;

Todavia uma integração massiva e desregulada destas tecnologias pode também trazer problemas operacionais à rede. A integração de PD, e de MG em particular, obriga a avaliar corretamente questões como:

- Controlo de perfis de tensão
- Avaliação de níveis de congestionamento em steady state;
- Análise de correntes de curto-circuito;
- Análise do esquema de proteções da rede;

2.2.2 Tecnologias de microgeração

Como se tem vindo a referir, existem diversos tipos de micro-geradores utilizados na PD. No caso particular das MR e da MG, as tecnologias utilizadas são as seguintes:

- Solar fotovoltaico;
- Micro eólica;
- Micro-turbinas;
- Pilhas de combustível;

Estes micro-geradores podem ser trifásicos ou monofásicos e ligam-se à rede de BT, como já foi referido. Habitualmente possuem potências na ordem das poucas dezenas de kW.

2.2.2.1 Solar fotovoltaico

As células fotovoltaicas (FV) têm a capacidade de produzir energia elétrica através da energia entregue pela radiação solar. São constituídas por um material semicondutor, habitualmente silício, e variam as suas características e rendimento dependendo das características desse material. Uma célula FV é capaz de gerar uma tensão em circuito aberto entre 0,5V e 1,0V e uma corrente de curto-circuito de algumas dezenas de miliamperes por cm^2 [2]. Dado que estes valores são muito diminutos para a maioria das aplicações, agregam-se várias células FV em paralelo e em

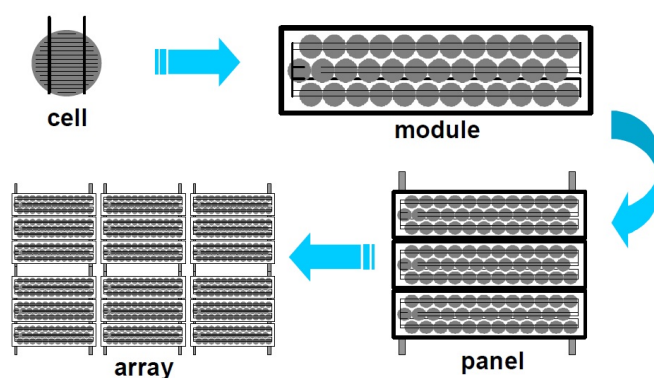


Figura 2.1: Configurações possíveis da célula solar FV [5].

série, de modo a obter os valores de tensão e corrente desejados. Ao conjunto de células FV dá-se o nome de painel FV. Dependendo das características pretendidas, também os painéis podem ser agregados da mesma forma, daí se obtendo uma matriz de painéis.

Os sistemas FV podem funcionar ligados à rede, ou em modo isolado. Nesta dissertação apenas interessa considerar o caso em que funcionam ligados à rede, dado que no funcionamento em modo isolado não se acrescenta nada de valor ao tema tratado.

Nos sistemas FV ligados à rede, há possibilidade de potenciar uma integração bi-direcional com a mesma. Caso haja mais produção por parte do painel FV do que consumo por parte das cargas, o excesso é entregue à rede elétrica. Por outro lado, se houver mais carga do que produção, o painel entrega toda a energia produzida diretamente às cargas [5].

Há ainda possibilidade de instalar baterias que funcionam como dispositivo de armazenamento em situação de falha da rede. Em situação normal, as baterias estão totalmente carregadas, sendo apenas usadas em caso de colapso da rede. Nessa situação, o painel, em conjunto com as baterias, poderá alimentar as cargas durante um dado período de tempo.

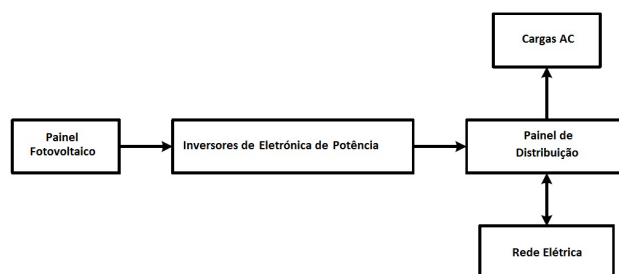


Figura 2.2: Diagrama de blocos de um sistema FV ligado à rede [5].

2.2.2.2 Micro eólica

As turbinas eólicas são utilizadas há já várias décadas, representando atualmente uma parte significativa da produção energética a nível mundial. A nível nacional, havia cerca de 4100 MW de potência instalada no final de 2011, de acordo com a rede elétrica nacional. Isto coloca Portugal entre os primeiros dez países do mundo neste setor, ultrapassando países pioneiros como Dinamarca e Espanha, respectivamente em potência instalada e na percentagem da energia elétrica consumida com origem no vento [6]. A inovação no setor eólico contempla além das grandes turbinas instaladas em terra, a eólica offshore e as micro-turbinas eólicas.

No contexto de MR e PD, o estudo das micro-eólicas faz todo o sentido, dado que se encontram cada vez mais frequentemente este tipo de MF. Como se sabe, as MF têm geralmente potências na ordem das dezenas de kW. Contudo, é comum no caso das micro-turbinas eólicas, haver uma sub-classificação e categorização quanto à dimensão e orientação do rotor.

Na tabela seguinte, apresenta-se a sub-classificação das mesmas quanto à dimensão do rotor proposta na norma IEC 61400-2 e a sub-classificação quanto à potência nominal comumente aceite no setor [6].

Tabela 2.1: Sub-classificação de pequenas turbinas eólicas. (adaptado de [6]).

Sub-Classe	Diâmetro do rotor [m]	Potência nominal [kW]	Aplicações
Micro-turbina	$D < 1,6$ m	< 5 kW	Domésticas
Mini-turbina	$1.6\text{m} < D < 5$ m	$5 < P < 50$ kW	Urbanizações e pequenas empresas
Pequena Turbina	$5 \text{ m} < D < 16$ m	$50 < P < 500$ kW	Grandes urbanizações e PMEs de consumo significativo

Quanto à orientação do rotor, as micro-turbinas classificam-se como tendo eixos de rotação horizontais (HAWT) ou verticais (VAWT). Habitualmente são mais utilizadas as turbinas HAWT, por serem mais eficientes. Na realidade, a eficiência máxima de uma turbina VAWT é cerca de 80% da eficiência máxima de uma HAWT [6].

Sendo as turbinas HAWT mais utilizadas, apenas estas últimas serão, ainda que sucintamente, descritas. As turbinas HAWT podem ser constituídas por 2 ou 3 pás. As pás são normalmente feitas de fibra de vidro com a resistência apropriada. A orientação das pás deverá ser perpendicular à direção do vento de modo a maximizar a extração da energia cinética [7]. Esta extracção é potenciada por sistemas de controlo presentes nas micro-turbinas - o pitch control. Este permite orientar as pás na direção pretendida, variando o posicionamento das mesmas convenientemente. 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 [2].

Dada a variabilidade da velocidade do vento, é impossível garantir-se uma frequência constante de 50 Hz por parte da micro-turbina eólica, sem que se recorra a uma interface de eletrónica

de potência. Esta é indispensável se quisermos garantir as características pretendidas e adequadas da energia entregue à rede ou cargas.

2.2.2.3 Micro-turbinas

As micro-turbinas são pequenas turbinas de combustão cuja potência nominal pode variar entre 25kW e 400kW [2].

Estas oferecem algumas vantagens de relevo quando comparadas com outras tecnologias de MG. Por exemplo o fato de ter tamanho e peso diminuto por unidade de potência produzida, o que leva a menores custos de instalação. Também o fato de ter poucas partes móveis (menor frequência de manutenção), ser pouco ruidoso, ter a capacidade de funcionar em regime de cogeração e ser alimentado por diversos combustíveis (gás natural, gasóleo, querosene e gás propano) são vantagens a ter em conta [8].

Além destas, possuem ainda vantagens a nível ambiental. Quando comparadas com centrais convencionais, as suas emissões de gases poluentes são muito menores e a sua eficiência energética é superior. Representam ainda uma mais valia para a operação da rede elétrica, visto que possibilitam o fornecimento de energia elétrica em pontos mais isolados do SEE, diferindo investimentos avultados em infra-estruturas de distribuição. Do ponto de vista das MR, é um elemento chave, dado que confere capacidade de controlo e autonomia de produção às mesmas.

A operação das micro-turbinas é baseada no Ciclo Termodinâmico de Brayton. Nas micro-turbinas, o ar que entra é comprimido num compressor e pré aquecido no recuperador, usando o calor libertado pelos gases de escape da turbina. 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 aciona o compressor e que permite a produção de energia elétrica [7]. A presença do recuperador é opcional, contudo aumenta significativamente a eficiência da micro-turbina, (aumenta de 15% para 30%) [2]. Dado que a maioria das micro-turbinas gera correntes AC a altas frequências, é necessária uma conversão AC/DC e novamente DC/AC para garantir que se entrega

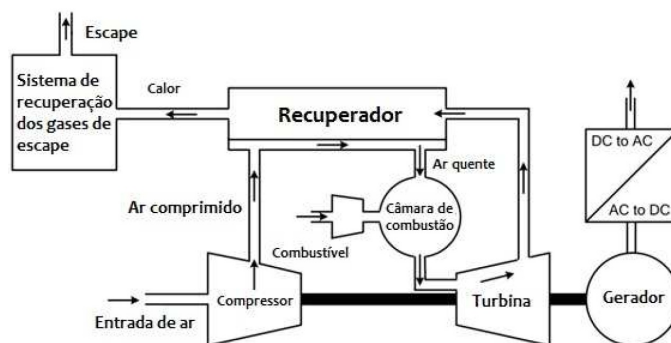


Figura 2.3: Esquema de funcionamento de uma micro-turbina de um veio.

energia elétrica com característica semelhantes às da rede. Este exercício requer dispositivos de eletrônica de potência altamente eficientes e robustos.

Existem duas configurações possíveis para as micro-turbinas: Um veio (Single-Shaft) (figura 2.3), ou Dois Veios (Split Shaft).

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 e 120000 rpm). A sua característica de funcionamento a velocidades elevadas permite suportar variações de carga, mantendo elevados níveis de eficiência e uma ótima fiabilidade a longo prazo [7]. É de referir que no arranque, o gerador funciona como motor, de modo a elevar a velocidade de rotação da micro-turbina para o valor necessário ao seu funcionamento. Para que isto aconteça, o motor tem que ser alimentado por uma fonte externa. Essa fonte pode ser a rede ou, em caso de funcionamento em regime isolado, baterias. A existência de baterias, torna a micro-turbina capaz de funcionar de modo autónomo, o que é particularmente interessante do ponto de vista das MR, como já foi referido.

Tabela 2.2: Comparação entre micro-turbinas Single Shaft e Split Shaft [7].

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

Já na configuração do tipo Split Shaft, o compressor encontra-se acoplado a um veio enquanto o gerador está acoplado a um segundo veio. Existem portanto duas turbinas, associadas respetivamente ao compressor e ao gerador. As micro-turbinas Split Shaft caracterizam-se por funcionar a velocidades mais baixas, havendo possibilidade de usar um desmultiplicador de velocidade para fazer o acoplamento à rede.

2.2.2.4 Pilhas de combustível

As pilhas de combustível baseiam-se numa tecnologia de produção de energia que consiste em células eletroquímicas. Estas convertem energia química em energia elétrica, através de reações químicas de oxidação-redução. O leque de combustíveis passíveis de serem usados é grande e varia entre gás natural, propano, gasóleo, metanol ou hidrogénio.

Embora esta tecnologia esteja ainda num baixo estado de maturação e não tenha uma projeção de relevo a nível comercial (o que a torna uma tecnologia cara), conta já com vantagens interessantes.

A nível ambiental trata-se de uma energia extremamente limpa, visto que não envolve combustão, e a sua utilização não acarreta emissões de gases poluentes. Em termos de eficiência, as pilhas de combustível podem alcançar rendimentos na ordem dos 60%, o que é cerca do dobro dos

valores atingidos em motores típicos de combustão interna. 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 respetivo nível de carga [2]. Dado que se baseiam em processos eletroquímicos para a produção de energia, as pilhas de combustível são lentas a modificar o seu regime de produção e consequentemente a responder a variações súbitas de carga. Esta debilidade faz com que esta tecnologia não seja indicada para responder a variações de carga muito frequentes, sendo mais apropriada para usar como unidade de base no diagrama de cargas. As suas características e a capacidade de arrancar de forma autónoma, tornam as pilhas de combustível uma ótima opção no que diz respeito à operação das MR, principalmente em modo isolado.

Do ponto de vista operacional, a célula eletroquímica é composta por ânodo, cátodo e eletrólito. O ânodo cria uma interface entre o combustível e o eletrólito, fornecendo um caminho pelo qual os eletrões livres são conduzidos à carga através de um circuito externo. O processo global ocorre em dois passos: A oxidação no ânodo e redução no cátodo. Desta reação química, resulta como sub-produto água líquida [2].

2.2.3 Tecnologias de armazenamento de energia

Além dos micro-geradores, também os dispositivos de armazenamento de energia são parte fundamental da arquitetura de uma MR. Como já se mencionou, a MR tem a capacidade de funcionar em modo isolado. Lasseter [9] refere que numa rede com presença de micro-redes, projetadas para funcionar em modo isolado, é obrigatória a existência de sistema de armazenamento de energia para garantir o equilíbrio energético inicial. No momento do isolamento, os dispositivos de armazenamento de energia têm portanto um papel fundamental no sucesso da operação, dado que têm a capacidade de compensar a perda de potência causada pelo súbito desacoplamento da rede. Além de terem a capacidade de fornecer energia, podem também absorvê-la. Esta funcionalidade é extremamente útil em casos em que a carga é mais baixa do que a produção, pois garante que o equilíbrio entre ambas é mantido, sem ser necessário deslastrar produção. Os dispositivos de armazenamento de energia mais utilizados, são os seguintes [2]:

- Baterias;
- Supercondensadores;
- Volantes de Inércia (flywheels);

2.2.3.1 Baterias

Assume-se que a bateria seja uma fonte de tensão constante, com um valor fixo para a quantidade de energia que consegue armazenar. A entrega de energia é feita em modo DC. A duração da bateria depende da quantidade de corrente que esta é obrigada a fornecer. Como é óbvio, quanto maior for a solicitação de corrente, menos tempo durará a bateria até se descarregar [10].

O funcionamento da bateria baseia-se em reações eletroquímicas de oxidação-redução. Estando a bateria ligada a uma carga externa, os elétrons livres gerados na reação de oxidação-redução, movimentam-se do ânodo para o cátodo, percorrendo e alimentando a carga. No processo citado, dá-se a oxidação no ânodo e a redução no cátodo. No processo inverso, isto é, no processo de recarga da bateria, passa a ocorrer redução no ânodo e oxidação no cátodo [2].

A durabilidade das baterias é o seu maior ponto fraco. Na verdade, as baterias não são capazes de enfrentar mais do que um dado número (varia entre tipos de bateria) de ciclos de carga/descarga, a partir dos quais as suas características e capacidade de armazenamento ficam irremediavelmente afetadas. Isto acontece devido ao tipo de reações químicas envolvidas no processo de geração de energia. Nesse processo, vai havendo alterações moleculares na constituição de alguns componentes e os eletrólitos vão sendo danificados reduzindo assim o tempo de vida útil das baterias [11].

Refira-se que a durabilidade das baterias é mais afetada quando há ciclos de carga/descarga completos, isto é, quando a bateria é totalmente descarregada. É por isso de todo o interesse que, nas aplicações em que são usadas, se procure evitar este tipo de descargas.

2.2.3.2 Supercondensadores

Os supercondensadores são a última inovação tecnológica no campo do armazenamento de energia.

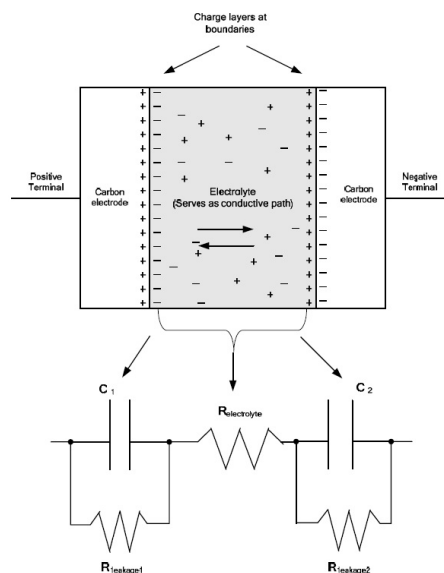


Figura 2.4: Esquema de um supercondensador eletroquímico [2].

Entre as suas grandes vantagens, contam-se a capacidade de suavizar o impacto de aumentos súbitos de carga na rede de distribuição e fornecer avultados valores de corrente instantaneamente. Comparativamente com as baterias e os condensadores convencionais, os supercondensadores possuem uma densidade energética bastante superior, sendo ainda assim de tamanho e peso inferior.

Além destas vantagens, os supercondensadores têm um tempo de vida útil muito superior (> 10 000 ciclos) sendo que este não é afetado pelo grau de descarga a que está sujeito. A sua eficiência energética ronda os 90% [12].

Do ponto de vista operacional, os supercondensadores têm um funcionamento em tudo parecido com o das baterias. Possuem dois eléktodos imersos numa solução eletrolítica. Por utilizar materiais porosos nos eléktodos (carbono) e uma solução eletrolítica líquida, a superfície de contato aumenta significativamente quando comparada com os condensadores convencionais, levando a valores de capacitância elevados [2].

2.2.3.3 Volantes de inércia

Outra das tecnologias de armazenamento de energia, é o volante de inércia. O volante de inércia armazena energia cinética numa massa em rotação. Estes dispositivos podem ser utilizados em aplicações onde baterias convencionais se utilizam. Todavia, a utilização de volantes de inércia tem diversas vantagens relativamente a outros dispositivos do mesmo tipo, tal como a bateria. O tempo de vida útil, a densidade energética e a capacidade de sofrer sucessivos ciclos de descarga completa sem prejuízo das suas características, fazem do volante de inércia uma ótima solução de armazenamento de energia [13]. Outra grande vantagem desta tecnologia é a facilidade com que se pode determinar a quantidade de energia armazenada, bastando para isso determinar a velocidade de rotação do volante de inércia [14]. Esta facilidade de monitorização e controlo é muito interessante no contexto da MR, em que a monitorização em tempo real e a necessidade em aceder à mesma são fatores importantes.

Num volante de inércia, a massa em rotação onde se encontra armazenada a energia cinética, está ligada a um gerador síncrono de ímanes permanentes de velocidade variável, que pode operar como motor ou gerador. No caso de funcionamento como motor, a sua função é acelerar a massa rotativa, de modo a esta armazenar mais energia cinética (o correspondente ao ciclo de carga de uma bateria). No caso de funcionamento como gerador, a sua função é absorver a energia cinética armazenada e transformá-la em energia elétrica, tendo como consequência a diminuição da velocidade de rotação da massa e consequentemente a diminuição da quantidade de energia armazenada no volante.

Dado que a frequência de saída do gerador é variável, é necessária uma interface de eletrónica de potência para converter a frequência para os valores necessários.

2.3 Micro-redes

O conceito de MR é relativamente recente, e surgiu com a massificação das tecnologias de PD. A crescente integração deste novo tipo de produção de energia, levantou questões que até então não tinham sido consideradas. A mudança de paradigma introduzida no modo de operação do SEE, levou a que se tentassem encontrar novas abordagens relativamente à operação e gestão do mesmo. Com o objetivo de aproveitar as vantagens da introdução de micro-geradores nos níveis de baixa-tensão e simultaneamente resolver problemas criados pelos mesmos, surgiu o conceito de MR.

Com ele surgiram também novas capacidades e oportunidades de melhoramento da fiabilidade e eficiência energética do sistema. Estes assuntos serão abordados nos próximos tópicos.

2.3.1 O conceito de micro-rede

O consórcio para as soluções tecnológicas de fiabilidade elétrica (CERTS - The Consortium for Electric Reliability Technology Solutions) iniciou a investigação na área dos impactos causados pela ligação de grandes volumes de PD, com o objetivo de melhorar a fiabilidade do SEE [15]. Este projeto visa desenvolver mecanismos e técnicas que melhorem a fiabilidade da rede elétrica e seus serviços, através de um sistema descentralizado baseado em grandes volumes de integração de PD. Além do CERTS, existem outros projetos de investigação em curso na área das MR, nomeadamente um projeto a nível europeu que visa a investigação, desenvolvimento e demonstração de operação das MR (acessível em www.microgrids.eu).

Tanto o projeto europeu como o CERTS conceptualizam a MR de forma similar. No entanto, existem diferenças. Uma das diferenças está na potência instalada considerada como passível de ser integrada numa MR. A CERTS considera que as MF podem atingir os 500 kW de potência, enquanto que o projeto europeu considera valores bastante mais baixos [1]. Na verdade, as MF habitualmente existentes nas MR são de baixas potências ($< 100\text{kW}$), e encontram-se maioritariamente acopladas à rede através de interfaces de eletrónica de potência, de modo a providenciar capacidade de controlo e flexibilidade [16]. Ambos os projetos referidos defendem a capacidade de integração de MG numa lógica de plug & play. Esta lógica defende que para ligar novas MF à rede, não é necessário modificar estruturas de controlo e proteção de unidades já existentes no sistema. A existência de uma estrutura hierárquica de controlo da MR, é também um ponto comum nos dois projetos. Todavia, a forma de definir o sistema hierárquico difere entre ambos. A integração de PD deve ser acompanhada por um esquema de controlo e gestão hierárquico, apoiado por uma infraestrutura de comunicações capaz de garantir que todos os constituintes da MR estão a ser adequadamente monitorizados e, no caso do projeto europeu, em contato com o SEE a montante.

O conceito de MR adotado nesta dissertação, foi adotado pela primeira vez no âmbito do Projeto Europeu Microgrids [17] e consiste numa rede de baixa-tensão ao qual estão acopladas MF, cargas controláveis e dispositivos de armazenamento de energia. Essa rede deve ser capaz de fornecer energia elétrica e térmica aos seus consumidores. Este conceito de MR, envolve a existência de uma rede de controlo sobre todos os elementos do sistema, de modo a garantir elevados níveis de flexibilidade na sua operação. Questões envolvendo a arquitetura funcional das MR, serão abordadas no ponto 2.3.2.

A MR assenta num princípio de produção de energia elétrica descentralizado. Em consequência disso, a implementação do conceito de MR, traz inúmeras vantagens em diversas áreas.

Comparativamente com redes elétricas de grandes dimensões e produção centralizada, a MR proporciona uma distribuição de energia mais eficiente, dado à elevada integração de PD. As perdas energéticas nas linhas são grandemente reduzidas, dado que a distância entre produção e

consumo é drasticamente diminuída. Esta proximidade possibilita ainda a exploração da micro-cogeração e a consequente entrega do calor produzido para fins domésticos. A exploração de tecnologias micro-CHP contribui ainda para o aumento da eficiência energética global do sistema, elevando-a para níveis muito além dos valores atingíveis em centrais convencionais [2]. A diminuição de perdas e o aumento da eficiência energética, levam a ganhos relevantes a nível económico.

Se for bem projetada, a MR é ainda capaz de aumentar a fiabilidade da rede, dado que passa a haver duas formas de alimentar as cargas (a rede de MT, e as MF integradas na MR). Também a estabilidade dinâmica do sistema pode ser melhorada, dado que a MR tem possibilidade de participar no fornecimento de serviços auxiliares à rede.

As MF integradas nas MR utilizam maioritariamente recursos endógenos, caracterizados pelos seus baixos (ou nulos) valores de emissão de gases de efeito de estufa. A referida diminuição de perdas nas linhas, contribui também para a atenuação da emissão destes gases. Estes motivos contribuem para ganhos significativos a nível ambiental.

As MR têm, pelo que foi dito, a capacidade de explorar recursos endógenos e combustíveis fósseis (através da utilização de micro-turbinas em regime de micro-cogeração) de forma eficiente. Isto permite diminuir a dependência destes últimos e aumenta a independência energética, potenciando a capacidade de abastecimento elétrico da rede [2]. Contudo, a exploração destes recursos obriga à utilização de interfaces de eletrónica de potência, o que representa uma grande diferença comparativamente com os sistemas convencionais, que utilizam geradores síncronos. O tipo de MF utilizadas não têm inércia, o que leva a que o comportamento dinâmico das MR seja bastante diferente do das redes convencionais (principalmente se funcionar em modo isolado, como se verá mais à frente).

2.3.2 Arquitetura funcional da micro-rede

Como já foi dito, o conceito de MR adotado nesta dissertação, consiste numa rede de baixa-tensão ao qual estão acopladas MF, cargas controláveis e dispositivos de armazenamento de energia, capaz de fornecer energia elétrica e térmica aos seus consumidores. Foi também referido que todos os componentes da MR são monitorizados por meio de uma rede de controlo.

O projeto europeu Microgrids [17], propõe uma estrutura hierárquica para o controlo da MR. Nesta abordagem, o elemento principal é o controlador central (Micro Grid Central Controller - MGCC), que é instalado no ponto de interligação da MR com a rede de MT. O seu papel é o de garantir uma gestão adequada da MR a nível técnico e económico [16]. O MGCC é capaz de providenciar previsões de consumo de cargas e previsões de capacidade de produção de MF intermitentes (FV, eólica...). Tendo também acesso a informações como preços de mercado, propostas de compra por parte das MF e prioridades das cargas a alimentar, o MGCC torna-se uma unidade de controlo e gestão extremamente completa.

No segundo nível hierárquico encontram-se os controladores dos dispositivos de armazenamento de energia e das MF (Microsource Controller - MC). Os controladores MC possibilitam

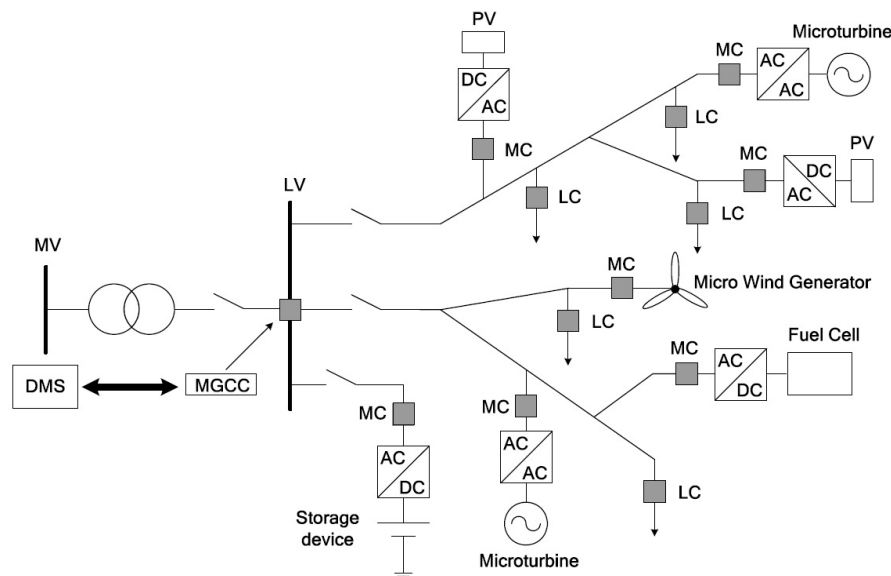


Figura 2.5: Arquitetura da MR [18].

controlar a produção de potência ativa e reativa (a menos que a MF não o permita). Ainda no segundo nível hierárquico, encontram-se os sistemas de controlo de cargas (Load Controller - LC). O LC é responsável pelo controlo de cargas, sendo capaz de, em caso de necessidade, deslastrar cargas não prioritárias mantendo as prioritárias alimentadas.

É necessária uma rede de comunicações para que o MGCC possa comunicar com os LC e MC. Refira-se que o volume de dados trocado é diminuto, visto que, as comunicações entre dispositivos consistem essencialmente no envio de set points do MGCC para os LC e MC e, paralelamente, pedidos e respetivos envios de leitura dos níveis de potência ativa e reativa do MGCC, aos LC e MC.

Existe ainda comunicação entre o MGCC e o Distribution Management System (DMS), do lado do operador de sistema. Esta interligação entre MR e SEE, permite explorá-la como um eventual meio para melhorar a operação da rede, dado que possibilita também à MR participar nos serviços auxiliares do sistema, tais como regulação de tensão e controlo de potência.

Como já foi referido, existem dois modos de funcionamento de uma MR, que podem ser definidos da seguinte forma [3]:

- Funcionamento em modo normal: A MR encontra-se ligada à rede de MT a montante, sendo por ela alimentada total ou parcialmente, ou injetando um dado valor de potência na rede (dependendo da relação entre a produção das MF e o consumo total da MR);
- Funcionamento em modo de emergência: Na sequência de uma anomalia na rede a montante, ou em caso de necessidade de ações (de manutenção, por exemplo) planeadas na MR, esta pode ser obrigada a funcionar em regime isolado, isto é, desligada da rede de MT;

A arquitetura funcional da MR já foi exposta e as funções de cada componente foram explicadas. Contudo, e apesar de se continuar a verificar o mesmo tipo de arquitetura, a MR é gerida de forma diferente e apresenta características distintas perante cada um dos modos de operação. Seguidamente, ambos os modos de operação serão descritos. O modo de funcionamento normal será menos aprofundado, visto que não tem tanto interesse quanto o modo de emergência, no âmbito desta dissertação.

2.3.2.1 Operação e estratégias de controlo da micro-rede em modo normal

No modo de funcionamento normal, o MGCC fica responsável por levar a cabo uma gestão adequada da MR a nível técnico e económico. Recorrendo às capacidades de previsão anteriormente mencionadas, o MGCC otimiza o funcionamento da MR, contando com a ajuda dos MC e LC situados num nível hierárquico inferior. Esta ajuda é garantida pela troca de informação existente entre os dois níveis hierárquicos.

As comunicações entre estas unidades processam-se da seguinte forma:

- O MGCC lida com a questão técnica e económica da MR, atuando como um operador de mercado e determinando os set points a enviar aos MC e LC;
- Os set points são enviados aos MC e LC;
- A partir dos set points recebidos, os LC são informados acerca das cargas que devem alimentar ou deslastrar e respetivas prioridades, enquanto que os MC regulam os níveis de produção de energia ativa e reativa das MF;
- Os LC e MC procedem ao envio de informação acerca dos níveis de carga ou produção existentes naquele instante, caso sejam facultados pelo MGCC;

O MGCC tem capacidade para prever consumos e produção, e tem acesso aos preços de combustíveis e eletricidade do mercado. Com base em todas estas informações, é capaz de determinar a quantidade de energia que a MR deve absorver da rede de distribuição de MT a montante, otimizando a capacidade de produção local [2]. O cenário operacional otimizado definido, é alcançado graças à possibilidade de gerir as MF e cargas controláveis, bastando para isso enviar os sinais (set points) necessários para o terreno [19].

Do ponto de vista económico e relativamente às operações de mercado, duas estratégias de mercado podem ser consideradas. Uma primeira em que o MGCC se concentra em minimizar o custo da energia para os consumidores finais sem vender energia à rede, e uma segunda em que se concentra em maximizar o valor da MG, vendendo o excesso de energia à rede [18].

Mais detalhes relativamente a estas estratégias, bem como a assuntos relacionados, são descritos em [20].

2.3.2.2 Operação e estratégias de controlo da micro-rede em modo isolado

O funcionamento da MR em modo isolado, pode ser causado por anomalias na rede de distribuição que obriguem ao isolamento da MR por questões de segurança, ou por ações planeadas que levem ao isolamento da mesma. Durante o funcionamento em modo isolado, a MR tem que ser capaz de alimentar as cargas que lhe estão associadas (pelo menos as cargas mais prioritárias) e manter os níveis de tensão e frequência dentro de uma gama de valores bem definida. No momento do isolamento, uma súbita alteração ao despacho das MF é requerida à MR, dado que esta passa a controlar de forma ativa toda a porção de rede isolada. As estratégias adotadas pelo MGCC são por este motivo, diferentes das adotadas em modo normal de funcionamento, dando-se neste caso prioridade à manutenção de estabilidade da MR e alimentação do máximo número de cargas, sendo menor a importância dada a questões económicas (despacho ótimo, por exemplo).

Atualmente, na eventualidade de haver o isolamento de parte da rede de distribuição, causado por um defeito na rede a montante, todas as unidades de PD (e consequentemente cargas) aí existentes são desligadas, só voltando a funcionar após o defeito ser extinto. Isto acontece por motivos de segurança dado que, não havendo infra-estruturas de comunicação suficientes, é impossível determinar quais as linhas que se encontram sob tensão na porção isolada da rede. Isto representa um grande risco para as equipas de manutenção. Além disto, põe-se ainda a questão de incapacidade, por parte das MF, de manter níveis de frequência e tensão aceitáveis na rede, o que levaria a sérios problemas do ponto de vista da qualidade de fornecimento de energia elétrica. Também o sistema de proteções das redes correm sérios riscos de deixar de se enquadrar com o novo regime de funcionamento, devido à redução das correntes de curto-circuito envolvidas no processo de isolamento [7].

Segundo a atual filosofia do Operador de Distribuição, a segurança, a qualidade de serviço e a integridade do sistema elétrico, são pontos-chave para garantir o bom funcionamento do sistema, sendo fatores fortemente condicionantes à aceitação da operação em modo isolado [2]. Isto deve-se principalmente à falta de infra-estruturas de monitorização e controlo.

Já foi diversas vezes referida a capacidade da MR melhorar a fiabilidade geral do SEE, principalmente devido à capacidade de funcionamento em modo isolado. Contudo, esta melhoria foi sempre relacionada com a existência de uma estrutura de controlo autónoma capaz de possibilitar o funcionamento das MF e o abastecimento das cargas em modo isolado. A existência de equipamentos de proteção devidamente dimensionados e preparados para proteger a MR é também indispensável.

Numa situação ideal, em que todas as infra-estruturas necessárias são disponibilizadas, há ainda diversas questões operacionais a considerar. A MR é obrigada a manter a sua tensão e frequência controlada. Contudo, o tipo de MF utilizadas, ligam-se à MR maioritariamente através de dispositivos de eletrónica de potência, o que significa que não têm inércia. Isto leva a um comportamento dinâmico diferente daquele que se observa em redes convencionais. Para impor valores de referência para tensão e frequência na MR, é necessário recorrer à eletrónica de potência, de modo a emular o comportamento de uma máquina síncrona (inexistentes nas MR).

Os dispositivos responsáveis por emular esse comportamento são os inversores fonte de tensão (Voltage Source Inverters - VSI).

Mesmo com a utilização dos VSI, há dificuldade em equilibrar instantaneamente produção e carga aquando de um súbito desequilíbrio (devido, por exemplo, ao ligar de uma carga), principalmente porque a resposta da maioria das MF utilizadas é "lenta" [2]. A utilização de dispositivos de armazenamento de energia é por este motivo fundamental à operação da MR em modo isolado. Também o deslastre de cargas tem que ser considerado como uma alternativa válida no que diz respeito à regulação de tensão e frequência na MR.

Além do VSI, existe outro modo de operação das MF através da eletrónica de potência. Esta solução de controlo não emula o comportamento de uma máquina síncrona e por isso não tem a capacidade de impor valores de frequência ou tensão na rede. Trata-se dos inversores PQ. Seguidamente, descreve-se sucintamente o modo de funcionamento destes inversores [1]:

- Inversores PQ - Toda a energia disponível é injetada na rede. A potência reativa injetada é determinada localmente ou pelo sistema de supervisão e controlo.
- Inversores VSI - Como já foi dito, estes inversores emulam o comportamento de uma máquina síncrona. Quando funcionam em regime normal, interligados com uma rede robusta, tensão e frequência são impostas externamente pela rede. Em funcionamento em modo isolado, o VSI atua como uma fonte de tensão com magnitude e frequência controlados pela potência ativa e reativa aos seus terminais. As medições de tensão e frequência efetuadas aos terminais da unidade VSI, são comparadas com valores de referência pré-estabelecidos. Caso a tensão ou frequência medida esteja abaixo/acima do valor de referência, há injeção/absorção de potência reativa ou ativa, respetivamente. A quantidade de potência injetada ou absorvida perante um dado desvio de tensão/frequência, é definida pelos parâmetros de controlo associados à unidade VSI. Este tipo de controlo é referido na literatura anglo-saxónica como droop control. O droop control permite que o VSI responda a variações de carga, baseando-se apenas na informação disponível aos seus terminais [21].

As MF existentes, apresentam características e capacidades diferentes entre si, no que concerne a possibilidade de participar na regulação de tensão e frequência da MR. De acordo com o que se encontra explicado em [2], as MF podem ser classificadas da seguinte forma:

- Unidades de formação da rede - as unidades de formação de rede definem a tensão e frequência da rede, dado serem capazes de equilibrar produção e consumo de forma rápida. Habitualmente há apenas uma destas unidades na rede (por exemplo, unidades VSI e dispositivos de armazenamento de energia);
- Unidade de suporte da rede - é possível controlar a potência ativa e/ou reativa das unidades de suporte de rede. Essa potência é determinada com base na frequência e tensão da rede. Deste modo, estas unidades participam na regulação de tensão e frequência, embora não sejam capazes de o fazer isoladamente (por exemplo, as micro-turbinas);

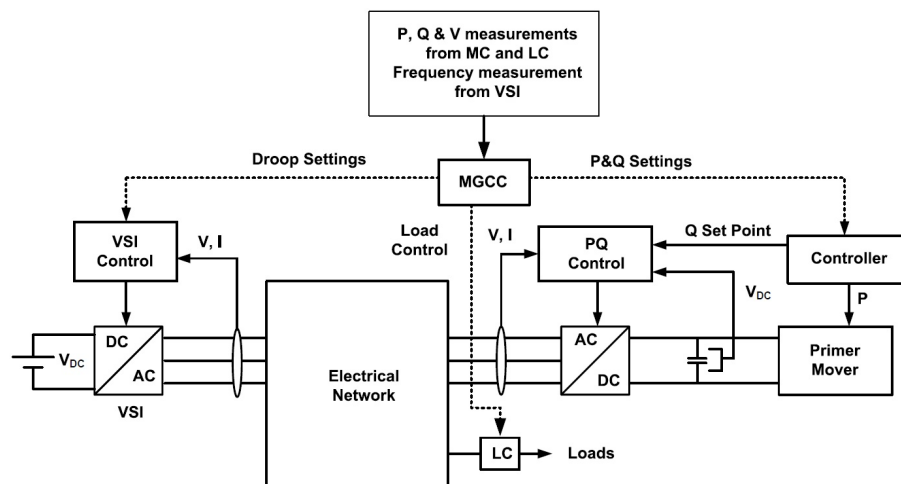


Figura 2.6: Esquema de controle "Single Master Operation" [2].

- Unidades de paralelo à rede - as unidades de paralelo à rede são incontroláveis, ou parcialmente incontroláveis (por exemplo, painéis FV ou micro-eólicas). Por este motivo, são geralmente operadas de forma a injetar a máxima potência na rede;

Neste ponto debateram-se já os principais desafios da implementação de uma MR na atualidade. Debateram-se também os principais desafios operacionais afetos às MR. Falta agora investigar possíveis estratégias de controlo de uma MR, com base nas tecnologias de eletrónica de potência debatidas e tendo em consideração a controlabilidade e características de cada tipo de MF.

Em [3], são apresentadas duas estratégias possíveis. Estas designam-se na literatura anglo-saxónica por Single Master Operation (SMO), e Multi Master Operation (MMO). Estratégias bastante similares são também sugeridas pelo CERTS [1].

Seguidamente explica-se o conceito funcional de cada estratégia:

- Single Master Operation - esta estratégia de controlo considera apenas um inversor VSI na topologia da rede. Este poderá estar acoplado a uma MF com o suporte de um dispositivo de armazenamento de energia, ou estar afeto apenas ao segundo. Todas as outras MF são operadas por inversores PQ. O VSI fornece referência de tensão e frequência para a operação dos inversores PQ, quando a MR está em modo isolado [2]. O MGCC tem a responsabilidade de, mediante a informação recebida pelos controladores locais, atualizar os set points dos inversores PQ, de modo a atingir um cenário ótimo de operação. Este é ainda responsável por eventuais deslastres de carga necessários e ligação de cargas prioritárias.
- Multi Master Operation - esta estratégia de controlo é semelhante à anterior, com a diferença que divide a tarefa de controlar tensão e frequência por duas ou mais unidades VSI. À semelhança da estratégia SMO, as restantes MF são operadas por inversores PQ. A estratégia MMO apresenta-se como sendo mais robusto e mais fiável, dado que a MR tem deste modo

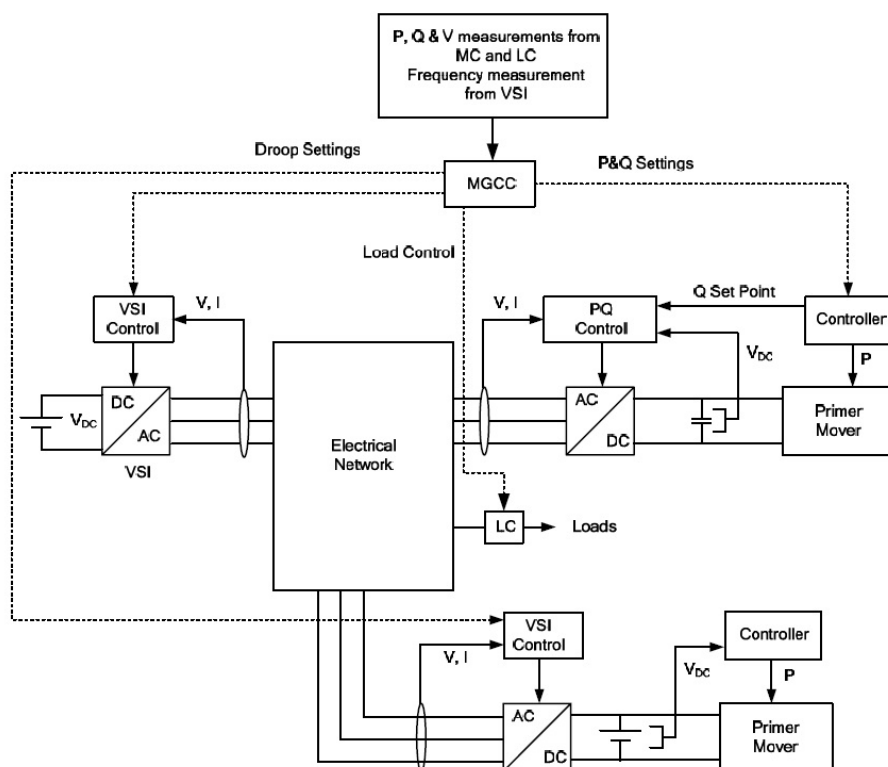


Figura 2.7: Esquema de controlo "Multi Master Operation" [2].

mais do que uma MF controlável a assegurar os níveis de tensão e frequência pretendidos. Caso se pretenda dotar a MR de capacidade de reposição de serviço, a estratégia MMO é fundamental.

A capacidade de manter o balanço energético entre produção e consumo numa MR em modo isolado, requer a presença de um ou mais inversores VSI, dependendo da estratégia utilizada (SMO ou MMO). A estes inversores tem que estar acoplado um dispositivo de armazenamento de energia, capaz de compensar rapidamente a diferença entre produção e consumo, sempre que haja uma perturbação no equilíbrio energético da MR. O desequilíbrio energético pode ser causado pelo período transitório entre o modo interligado e o modo isolado, pela variação de produção de uma MF ou pelo ligar/desligar de uma carga na MR. Os dispositivos de armazenamento de energia apenas devem injetar/absorver potência em situações transitórias, como as referidas. Todavia, se o valor de frequência ou tensão da rede estabilizar num valor diferente do nominal (devido ao uso de controladores proporcionais no droop control das unidades VSI, com erro em regime permanente associado), estes dispositivos continuam a sua injeção/absorção de potência. Esta situação não é admissível, dado que os referidos dispositivos têm uma capacidade de armazenamento finita, o que lhes limita a capacidade de injetar/absorver potência durante longos intervalos de tempo. Para que esta situação seja corrigida, é necessário garantir um controlo secundário, capaz de corrigir desvios em regime permanente, relativamente ao valor nominal das grandezas referidas. Para cor-

rigir estes desvios, são utilizados controladores PI (proporcional-integral) em cada MF controlável (habitualmente utilizam-se micro-turbinas ou pilhas de combustível).

O deslastre de cargas pode também ser uma ajuda no que diz respeito ao controlo das condições de funcionamento da MR em situações transitórias. Em situações em que a carga é superior à produção, um sistema de deslastre de carga pode ser implementado, de modo a ajudar a MR a restaurar os valores nominais de frequência. A percentagem de carga temporariamente deslastrada, permite que os geradores com capacidade de regulação reajam aos desvios de frequência, sem prejuízo da estabilidade da MR. Posteriormente, caso haja condições para tal, a carga pode ser novamente ligada e alimentada pela MR.

2.4 Desequilíbrios e balanceamento de tensão

Muitos têm sido os estudos realizados acerca das MR de energia e dos problemas de controlo associados às mesmas. A maioria dos estudos realizados até à data, admite o funcionamento da MR como sendo um sistema trifásico equilibrado. Contudo, sabe-se que essa suposição não corresponde à realidade.

Na verdade, as redes de BT e as MR em particular, são desequilibradas. Este fato revela-se problemático na operação das MR, dado que os desequilíbrios de tensão acarretam problemas de funcionamento em equipamentos trifásicos ligados à rede. O estudo de casos em que a MR é simulada como sendo desequilibrada é por isso pertinente e necessário, para poderem ser estudadas estratégias de balanceamento de tensão capazes de colmatar este problema.

2.4.1 Conceito de desequilíbrio de tensão

O conceito de desequilíbrio de tensão, pode ser definido como sendo uma situação em que [22]:

- À frequência fundamental do sistema, a amplitude das tensões trifásicas, difere entre as fases ;
- Existem desfasamentos desiguais entre as fases;
- Existem diferentes níveis de distorção harmónica entre as fases;

Nos geradores trifásicos existentes no SEE, as tensões produzidas vêm com a mesma magnitude e desfasadas 120 graus entre si, ou seja, trata-se de uma produção em regime trifásico equilibrado. Contudo, os desequilíbrios de tensão existem em todos os SEE e têm origens diferentes.

De acordo com [23], os desequilíbrios de tensão podem ser causados por:

- Configuração geométrica dos condutores em linhas aéreas;
- Cargas trifásicas com impedâncias desequilibradas;

- Ocorrência de um defeito num ponto distante da rede;
- Distribuição não equitativa de cargas monofásicas;

Além destas, também a recente introdução de MF monofásicas na rede traz problemas análogos. Os desequilíbrios de tensão são preocupantes em ambos os modos de funcionamento da MR (modo interligado e modo de emergência). Todavia em modo de emergência os efeitos da distribuição desequilibrada de cargas e MF monofásicas é mais sentida, dado que a potência de curto-circuito baixa consideravelmente neste modo de funcionamento. No modo de funcionamento interligado, apesar de o problema não ser desprezável, a presença de centrais geradores de potência elevada (e consequentemente uma elevada potência de curto-circuito), garante níveis menos preocupantes de desequilíbrio.

2.4.2 Medição e análise da magnitude dos desequilíbrios

Há diversas formas de calcular a magnitude dos desequilíbrios de tensão, como se apresenta em [24]. Nesta dissertação optou-se por utilizar o indicador Fator de Desequilíbrio de Tensão (FDT).O seu cálculo envolve a decomposição prévia das tensões trifásicas nas respetivas componentes simétricas (direta - V^+ , inversa - V^- e homopolar - V^0) e formula-se da seguinte forma:

$$\%FDT^{(-)} = \frac{|V^-|}{|V^+|} \times 100\% \quad , \quad \%FDT^{(0)} = \frac{|V^0|}{|V^+|} \times 100\% \quad (2.1)$$

A presença de desequilíbrios de tensão (da componente inversa) é indesejada, principalmente pelos efeitos nefastos que induz nas máquinas elétricas trifásicas ligadas à rede. Estes efeitos são abordados pelos autores em [22] e [24]. Entre os principais problemas abordados, contam-se:

- Redução do binário total da máquina (introdução de uma força eletromotriz contrária, pela componente inversa da tensão);
- Aumento do ruído do circuito magnético;
- Aquecimento adicional da máquina;
- Diminuição de eficiência e tempo de vida da máquina;
- Aumento das perdas energéticas;

Refira-se que a magnitude dos desequilíbrios influi na gravidade dos danos causados, sendo que estes aumentam com os desequilíbrios. O funcionamento de cargas mais sensíveis pode também ser afetado por estes.

Relativamente ao desequilíbrio calculado com base na componente inversa da tensão, e de acordo com o que é dito na norma europeia (DIN EN50160 "Voltage characteristics of electricity

supplied by public distribution systems"), existem limitações para a magnitude deste desequilíbrio de tensão. A norma diz que em situação normal de operação e num intervalo temporal de uma semana, 95% das médias calculadas em intervalos de 10 minutos, deverão corresponder a valores inferiores a 2%. Em algumas situações estes valores poderão atingir os 3%.

Já quanto ao desequilíbrio homopolar da tensão, não existem restrições para o seu valor, dado que a sua presença não inflige danos em equipamentos e máquinas elétricas. No caso particular dos motores de indução trifásicos, dado que a sua ligação é feita tipicamente em triângulo ou estrela sem neutro acessível, não há passagem da componente homopolar da tensão o que impossibilita que este seja por ela danificado. Assim sendo, o cálculo do FDT para a componente homopolar, representa um valor meramente indicativo.

2.4.3 Soluções para balanceamento de tensão em micro-redes

Diversas estratégias foram já propostas com vista à resolução do problema de desequilíbrios de tensão existentes nos SEE e em particular nas MR. No projeto europeu "microgrids" assim como no CERTS, a problemática do desequilíbrio de tensão é tratada admitindo a operação das MF até um dado valor de desequilíbrio, saindo de serviço seletivamente sempre que este exceder o valor limite estabelecido [1, 7].

Contudo outras soluções mais técnicas, e que não envolvem saídas de serviço de MF ou cargas, foram também estudadas. Dado que, como já foi referido, a principal causa dos desequilíbrios é a distribuição não equitativa das cargas monofásicas pelas fases, uma das soluções passa por transferir carga das fases mais carregadas para as menos carregadas através de operações de comutação manuais ou automáticas. Esta solução não permite contudo um equilíbrio dinâmico das tensões do sistema, visto que o controlo é feito de forma discreta [1].

O balanceamento de tensão pode ser garantido por filtros passivos localizados na rede de distribuição, que aumentam ou diminuem a impedância de uma dada linha, de modo a atingir valores de tensão iguais nas três fases. Existem algumas desvantagens do uso desta metodologia, sendo que a principal se prende com a geração de harmónicos, causada pela comutação a frequências baixas dos compensadores [25]. Existem também soluções baseadas em eletrónica de potência tal como se apresenta em [26] e [27].

Em [28] propõe-se uma metodologia de controlo de tensão capaz de compensar a componente inversa e homopolar da tensão através de inversores de 4 pernas (four leg inverters). Estas unidades de balanceamento de tensão devem estar presentes em cada uma das MF existentes na MR em que se pretenda garantir o equilíbrio de tensão.

Nesta dissertação, este foi o método adotado para o balanceamento de tensão necessário. Estas unidades serão abordadas mais detalhadamente no capítulo seguinte.

2.4.4 Medição de potência em sistemas desequilibrados

As estratégias de controlo das MR discutidas anteriormente, operam a rede com base nas medições efetuadas. A qualidade das medições de potência é por esse motivo fulcral ao bom

funcionamento da MR. Esta deverá funcionar adequadamente em qualquer situação, mas isso dependerá da qualidade e precisão das medições de potência ativa e reativa efetuadas à saída dos inversores.

Existem diferentes definições para potências instantâneas. Nesta dissertação utiliza-se a definição apresentada em [29]. O método de medição utilizado nesta dissertação foi também utilizado em [30].

As tensões e correntes instantâneas são expressas por vetores espaciais:

$$\vec{v} = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}, \quad \vec{i} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Em que v_a , v_b e v_c representam as tensões fase-neutro e i_a , i_b e i_c as correntes em cada fase.

Após determinar estes vetores, pode-se calcular a potência ativa instantânea da seguinte forma:

$$p = v \bullet i \quad (2.3)$$

onde " $\bullet$ " representa o produto interno entre os vetores. O vetor de potência reativa instantânea é dado pelo produto externo entre tensão e corrente:

$$q = \|\vec{v} \times \vec{i}\| \quad (2.4)$$

$$\|q\| = \sqrt{q_a^2 + q_b^2 + q_c^2} \quad (2.5)$$

O módulo de q pode também ser calculado, como se pode ver na expressão (2.5).

2.5 Sumário e conclusões

Neste capítulo foi realizada uma revisão bibliográfica relativamente a PD, MG e MR. Esta revisão permitiu o enquadramento com o panorama atual das soluções tecnológicas existentes nesta área.

Primeiramente foi abordado o tema da MG, o conceito, as vantagens e tecnologias associadas a este assunto.

Também as MR foram conceptualizadas e descritas quanto aos seus modos de operação e arquitetura de controlo. As razões que motivaram o aparecimento deste conceito e a mudança de paradigma a que se assiste na atualidade no SEE, foram também assuntos abordados. As características, especificidades e requisitos de ambos os modos de operação foram também estudados. Foi no entanto dado especial enfoque ao modo isolado, visto ser de maior interesse para o desenvolvimento desta dissertação.

Os desequilíbrios de tensão existentes em ambos os modos de operação da MR foram analisados, dado representarem uma especificidade de elevada importância no funcionamento da MR

e para o tema tratado nesta dissertação. Os problemas que estes desequilíbrios acarretam e várias tecnologias existentes para os combater foram enunciados, tendo sido referida a metodologia adotada.

Concluiu-se neste capítulo a importância da integração de sistemas de controlo com vários níveis hierárquicos, capazes de gerir a MR. A necessidade de infra-estruturas de comunicação foi justificada pela importância que estas representam na gestão e controlo da MR. A necessidade de integrar MF e dispositivos de armazenamento de energia na MR ficou também esclarecida, e a sua importância foi reconhecida especialmente aquando do funcionamento (da MR) em modo isolado.

Capítulo 3

Modelização da micro-rede e seus componentes

3.1 Introdução

No capítulo anterior discutiu-se a crescente integração de PD nos SEE e as consequências que esta introdução acarreta. Foi dada especial atenção à integração de MF em baixa-tensão, e às possíveis soluções para acomodar os novos geradores. Surgiu nesse contexto, o termo de MR. Como se referiu anteriormente, uma MR pode ser definida como sendo uma rede de baixa-tensão, ao qual estão ligadas cargas, pequenos sistemas de geração energética e dispositivos de armazenamento de energia.

Para poder ser implementado na prática, este conceito tem que ser primeiramente testado, de modo a que se possam identificar e solucionar problemas operacionais relacionados com o seu funcionamento.

As simulações levadas a cabo são realizadas em ambiente computacional, o que torna necessária a elaboração de modelos matemáticos capazes de reproduzir o comportamento dinâmico dos constituintes da MR, de acordo com o que seria o seu comportamento em situação real. Os modelos elaborados são tão simples quanto possível, de modo a potenciar a rapidez de simulação mas não comprometer a qualidade dos resultados.

Na rede de teste foram implementadas unidades de formação de rede, suporte de rede e de paralelo à rede. A presença da unidade VSI ao qual está acoplado um dispositivo de armazenamento de energia, representa a indispensável unidade de formação de rede. Foram utilizados apenas dois tipos de MF. Neste caso, optou-se pela micro-turbina e pelo painel fotovoltaico. Com a inclusão da micro-turbina e painel FV, garante-se também a presença de uma unidade de suporte de rede e outra de paralelo à rede, no modelo da rede de teste. Outras tecnologias poderiam ter sido incluídas, contudo introduziriam um peso computacional desnecessário e não acrescentariam valor (na perspetiva dos testes levados a cabo) ao modelo utilizado.

As simulações foram realizadas no ambiente de simulação dinâmica matlab-simulink.

3.2 Modelização da rede de MT

As simulações efetuadas partem de uma situação em que a MR se encontra interligada com a rede de MT. A simulação inicia-se com a MR a funcionar em modo interligado. Após o início da simulação e de um habitual período transitório (justificado pelo uso de modelos simulados computacionalmente), as grandezas da MR estabilizam. Isto permite verificar as condições de funcionamento da MR em condições de pré-isolamento. Só desta forma se pode avaliar o comportamento dinâmico da MR e a evolução dos desequilíbrios a partir do momento de isolamento.

Dado que a rede de MT a montante da MR representa num caso real uma rede extremamente robusta, esta foi modelizada por uma fonte de tensão em série com uma impedância. Esta modeliza a impedância do transformador e da rede a montante. Este modelo da rede de MT, fornece um sistema trifásico equilibrado de tensões, com neutro acessível.

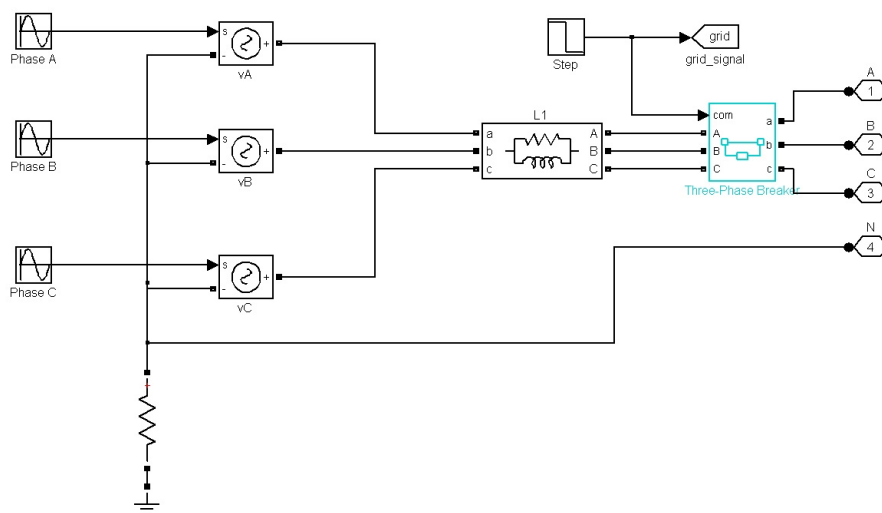


Figura 3.1: Modelo da rede MT em ambiente matlab-simulink

Foi também necessária a introdução de um disjuntor, para possibilitar a simulação de saída de serviço da rede de MT.

3.3 Modelização de cargas

As cargas foram modelizadas por simples associações RL série de parâmetros constantes (dado que as cargas que se pretendem simular são de impedância constante). Esta modelização foi válida para cargas monofásicas e trifásicas. As cargas trifásicas foram modelizadas de forma a ligarem à rede em estrela, com neutro acessível. Note-se que esta é uma abordagem simplificada. Os modelos poderiam ser mais complexos, caso se pretendesse modelizar cargas do tipo motor, por exemplo. Todavia, para o estudo a ser efetuado, esta simplificação não tem influência na qualidade dos resultados.

Dado que as linhas são modelizadas por impedâncias RL paralelo, foi necessário fazer a transformação das impedâncias série para as impedâncias paralelo. As fórmulas necessárias para efetuar essa transformação (ou a transformação inversa) são seguidamente expostas:

$$R_s + jX_s = \frac{R_p \cdot jX_p}{R_p + jX_p} \Leftrightarrow R_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{R_s} ; X_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{X_s} \quad (3.1)$$

Note-se que R_s e X_s correspondem aos parâmetros RL série, enquanto que R_p e X_p correspondem aos parâmetros RL paralelo.

3.5 Modelização de microfontes

O comportamento das MF é preponderante no sucesso de operação da MR. Como tal, é necessário criar modelos que sejam fiéis às características das unidades simuladas. Como já tinha sido referido anteriormente, as MF escolhidas, foram o painel FV e a micro-turbina. Serão naturalmente estas as MF modelizadas neste sub-capítulo.

As MF necessitam do apoio dos dispositivos de armazenamento de energia para fazer face a alterações súbitas do balanço entre carga e produção. Na realidade, a uma unidade de suporte de rede (como é o caso da micro-turbina), deve estar associado um dispositivo de armazenamento de energia. Por este motivo, e apesar dos dispositivos de armazenamento de energia não serem propriamente uma MF, serão também incluídos neste sub-capítulo.

3.5.1 Modelização do Painel Fotovoltaico

Existem na literatura vários modelos, com níveis de complexidade diferentes, capazes de reproduzir o comportamento dinâmico de um painel FV. Em termos de modelos matemáticos, o modelo de um só díodo é um dos mais utilizados para modelizar uma célula FV. O circuito elétrico equivalente do referido modelo é o apresentado na figura 3.4.

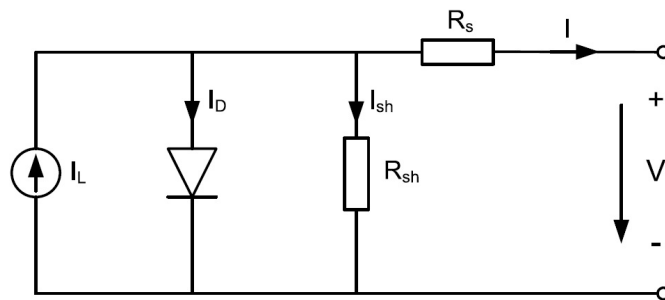


Figura 3.4: Circuito equivalente de uma célula FV

Onde:

I : Corrente na carga (A)

I_l : Corrente gerada pela radiação solar (A)

I_{sh} : Corrente shunt (A)

I_D : Corrente no díodo (A)

R_{sh} : Resistência paralelo (Ω)

R_{sh} : Resistência série (Ω)

V : Tensão na carga (V)

As características de Tensão-Corrente e Potência-Tensão de célula, são representadas na figura 3.5. A curva representa os diversos pontos de operação da célula, sendo que o ponto em que a potência produzida é máxima, é chamado de Maximum Power Point - MPP.

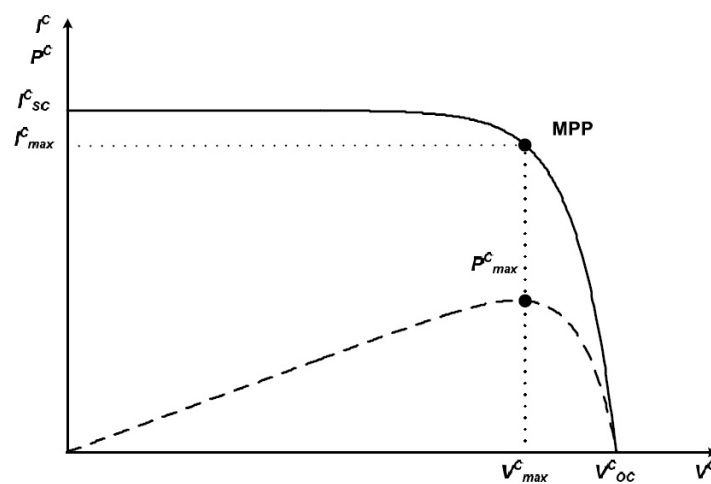


Figura 3.5: Característica V-I e P-V de uma célula FV genérica [2].

Os parâmetros do modelo representado na figura 3.4, variam com a temperatura e magnitude da radiação solar à superfície da célula FV.

Dado que o modelo matemático é calculado com base nestes parâmetros, o seu MPP e consequentemente a potência de saída da célula, é por eles influenciada.

O fabricante fornece na folha de características do equipamento, os coeficientes de variação da corrente de curto-circuito (I_{SC}) e de tensão de circuito aberto (V_{OC}). Estes coeficientes permitem apurar a variação da característica V-I com a temperatura. A curva características do tipo V-I que representa a influência da temperatura numa célula genérica, é apresentada na figura 3.6.

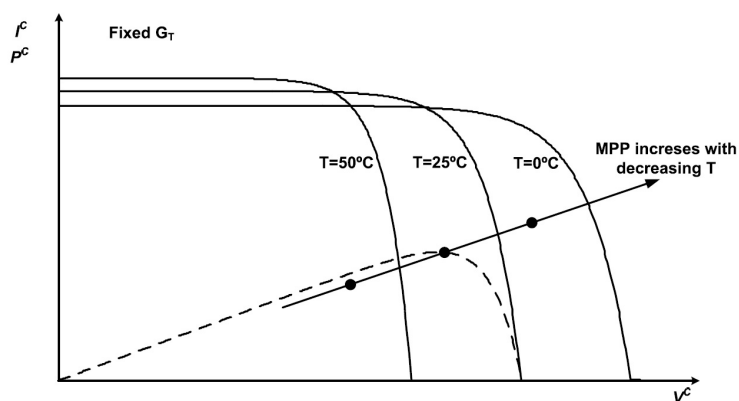


Figura 3.6: Influência da temperatura na característica V-I de uma célula FV [2].

Como se pode observar, para uma radiação G_T constante, o MPP aumenta com a diminuição da temperatura da célula.

A curva características do tipo V-I que representa a influência da radiação solar numa célula genérica, é apresentada na figura 3.7. Fazendo a mesma análise, facilmente se conclui que, para uma temperatura constante, o MPP aumenta juntamente com a radiação solar.

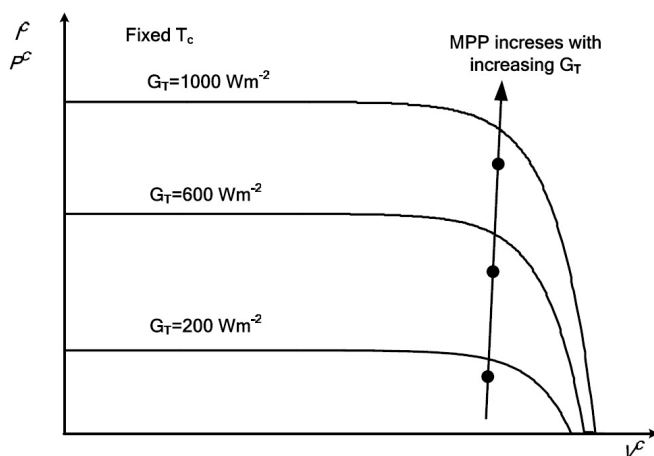


Figura 3.7: Influência da radiação na característica V-I de uma célula FV [2].

Dado que a tecnologia FV depende de um recurso que não se pode controlar, esta é explorada de forma a contribuir sempre com o máximo de potência disponível (unidade de paralelo à rede). Visto que o MPP não é constante e varia com diversos fatores, é necessário implementar um sistema de controlo capaz de operar a célula sempre no seu MPP. O sistema responsável pela máxima extração de potência das células FV é o Maximum Power Point Tracker - MPPT.

O esquema de ligação à rede de um sistema FV é representado na figura 3.8. Como se pode verificar, o MPPT insere-se entre o sistema FV e o conversor DC/AC, representando um andar

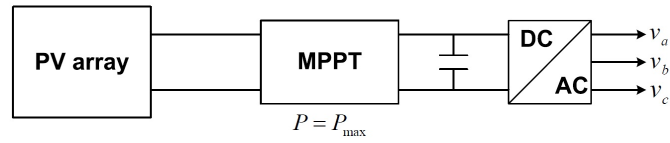


Figura 3.8: Configuração de um sistema FV [2].

intermédio de controlo. O conversor DC/AC é por sua vez controlado por um inversor PQ, que será modelizado mais adiante.

Há diversos algoritmos para modelizar este tipo de controlo (MPPT). Contudo, no âmbito desta dissertação não se considera necessário modelizar o MPPT. Isto deve-se ao facto de os tempos de simulação serem suficientemente reduzidos para considerar que não há alterações significativas de temperatura ou radiação, o que por sua vez, permite considerar que o gerador FV se encontra já a funcionar no seu MPP. Isto permite considerar que não haverá perturbações significativas na potência de saída do painel FV. Todavia, informações adicionais acerca dos algoritmos de controlo habitualmente utilizados nos dispositivos MPPT podem ser retiradas de [2].

3.5.2 Modelização da Microturbina

As microturbinas têm um papel importante na operação de uma MR, visto serem unidades controláveis do ponto de vista de injeção de potência. Esta característica confere-lhes a capacidade de aumentar ou diminuir a sua produção de modo a satisfazer a solicitação das cargas presentes na MR. O esquema de controlo de uma microturbina é apresentado na figura 3.9.

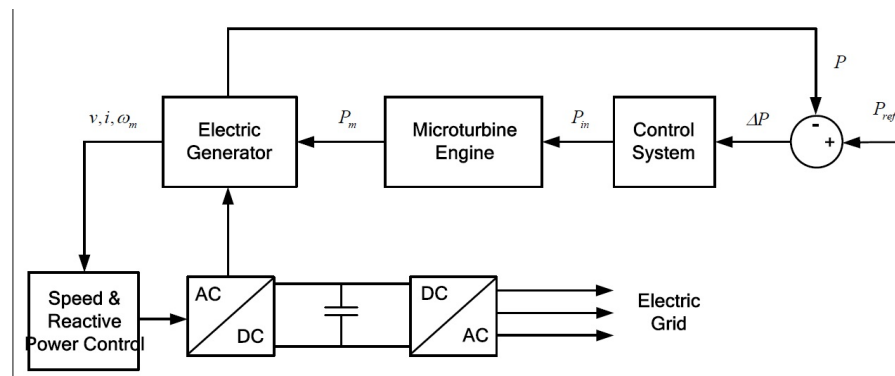


Figura 3.9: Diagrama de blocos do sistema de controlo de uma microturbina [2].

Como se pode verificar, o esquema de controlo representado modeliza:

- O controlador ativo de potência;
- A máquina (motor) da micro-turbina;

- O gerador elétrico (gerador síncrono de ímãs permanentes);
- Os conversores de eletrônica de potência (acoplamento AC/DC - DC/AC)

O modelo de cada bloco não será aqui pormenorizado, sendo contudo possível encontrar um modelo matemático completo em [2]. O modelo referido permite estudar o comportamento dinâmico da microturbina.

Do ponto de vista de comportamento dinâmico da MR, em que o balanço energético varia frequente e subitamente ao longo do tempo, a velocidade de respostas da microturbina não é suficiente. Na figura 3.10 pode-se observar a resposta de uma microturbina ao degrau, de acordo com o modelo dinâmico proposto em [2]. Observando a figura, conclui-se que a microturbina tem um tempo de resposta de alguns segundos perante uma variação de carga súbita e abrupta. Contudo, numa rede elétrica, o balanço de potência tem que ser garantido a cada instante, o que torna a microturbina incapaz de equilibrar a carga adequadamente sem auxílio.

Para fazer face às constantes variações de carga existentes numa MR real, é necessário contar com dispositivos de armazenamento de energia para compensar variações súbitas de carga, dada a resposta atrasada da microturbina.

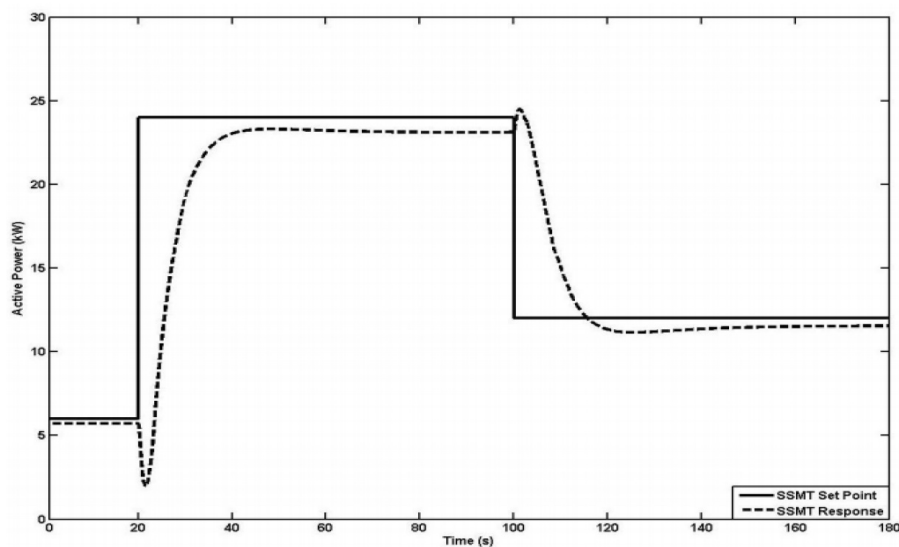


Figura 3.10: Resposta ao degrau de uma microturbina [2].

Os dispositivos de armazenamento de energia podem também ser responsáveis pela prestação de serviços auxiliares à microturbina, conferindo-lhe capacidade de arranque autónomo.

3.5.3 Modelização de Dispositivos de Armazenamento

No SEE, a presença de grandes geradores representa uma capacidade de produção volumosa. Além disso, estes possibilitam a realização de regulação primária (através da disponibilização, sob forma de energia elétrica, da energia cinética armazenada no rotor). Esta energia armazenada, é

capaz de equilibrar oscilações súbitas de carga, sendo que a velocidade de rotação do rotor varia mediante seja necessário fornecer ou absorver potência (regulação primária). Esta característica permite manter a todo o instante o equilíbrio entre produção e consumo no SEE, garantindo o balanço energético necessário à estabilidade do sistema em situação de funcionamento normal.

Numa MR, esta regulação primária tem que ser efetuada de forma diferente, dado apenas existirem MF para produzir energia. A maioria destas MF liga-se à rede através de eletrónica de potência, o que impossibilita um controlo semelhante ao efetuado pelos grandes grupos geradores presentes no SEE. Por outro lado, a maioria das MF não é sequer controlável, dada a imprevisibilidade dos recursos que utiliza (sol, vento...). As MF que são efetivamente controláveis do ponto de vista de geração (microturbinas) são, como se viu anteriormente, demasiado lentas a responder a oscilações de carga.

Pelos motivos referidos, a presença de dispositivos de armazenamento de energia é indispensável à operação de uma MR em modo isolado. Estes representam um buffer de energia capaz de equilibrar carga e produção instantaneamente em situação de desequilíbrios energéticos causados por aumentos ou diminuições súbitas de carga.

É possível encontrar modelos dinâmicos para o comportamento destes dispositivos (baterias, flywheels ou supercondensadores) na literatura [31]. Todavia, no tipo de simulações efetuadas no âmbito desta dissertação, não é necessário o conhecimento detalhado das variáveis internas dos dispositivos de armazenamento de energia. É apenas necessário garantir que estes atuem como buffers de energia capazes de estabilizar a MR sempre que haja perturbações transitórias, principalmente em modo isolado.

Dado que as simulações efetuadas no âmbito desta dissertação são de curta duração, os dispositivos de armazenamento de energia podem ser modelizados como uma fonte de tensão DC constante, acoplados à rede através de uma interface de eletrónica de potência. É de salientar o fato de, apesar de se comportarem como fontes de tensão, os dispositivos mencionados terem um valor máximo de energia armazenada, devido a limitações físicas obviamente existentes. O dispositivo de armazenamento de energia injeta a potência ativa necessária para balancear carga e produção na MR, de acordo com a estratégia de controlo implementada pela interface de eletrónica de potência. As diversas soluções de interfaces de eletrónica de potência existentes são descritas de seguida.

3.6 Modelização de Inversores Eletrônicos de Potência

As MF presentes nas MR, são maioritariamente acopladas à rede através de dispositivos de eletrónica de potência. Será raro encontrar geradores síncronos numa MR. Isto significa que o controlo de tensão e frequência da mesma, dependerá dos inversores que fazem o acoplamento das MF à MR. Estes terão a responsabilidade de substituir os geradores síncronos, entregando a potência necessária à rede com as características de tensão e frequência desejadas.

Por este motivo, é de grande importância ser capaz de compreender os princípios de funcionamento dos inversores de eletrónica de potência utilizados nas MR. Esta compreensão é essencial

para assegurar a estabilidade de operação da MR perante as constantes variações de carga e produção a que está sujeita.

Como foi referido no capítulo anterior, existem essencialmente duas estratégias de controlo dos inversores:

- Inversores PQ;
- Inversores VSI (fonte de tensão);

Estas soluções serão modelizadas seguidamente neste capítulo. Ainda relacionado com o tema desta dissertação, surgem as soluções de balanceamento de tensão. A solução utilizada é também ela uma interfaces de eletrónica de potência, sendo que será também modelizada de seguida (inversor de 4 pernas).

3.6.1 Modelização do Inversor PQ

O controlo por inversores PQ faz com que toda a potência disponível na MF seja injetada na MR, e pressupõe a ligação a uma rede já eletrificada.

Estes inversores têm a capacidade de controlar a injeção de potência ativa e reativa de acordo com um dado set-point, fornecido pelo controlador local (MC) ou central (MGCC). O comportamento do inversor pode ser aproximado ao de uma fonte de corrente controlada (por tensão).

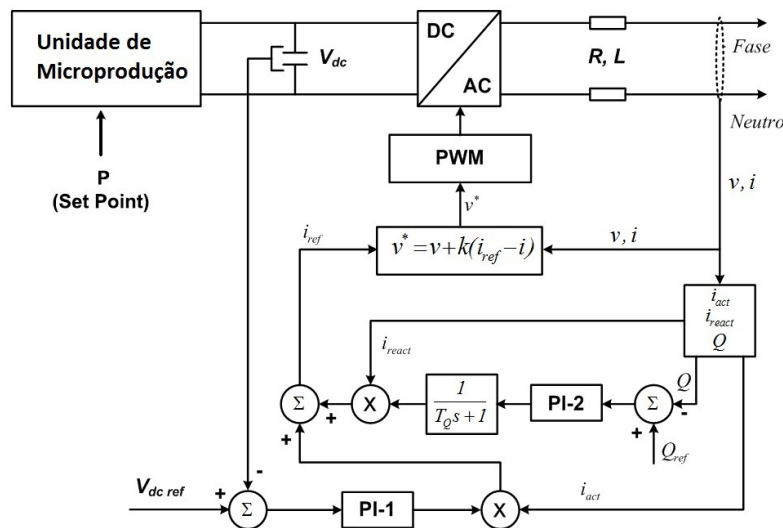


Figura 3.11: Modelização de um inversor PQ monofásico.

Existem inversores PQ monofásicos e trifásicos. O esquema de controlo de um inversor PQ monofásico está representado na figura 3.11. A tensão terminal e a corrente de saída do inversor, são medidas para que seja possível contabilizar a potência ativa e reativa de saída do inversor. A medição da tensão terminal, permite obter dois sinais sinusoidais normalizados, um em fase e

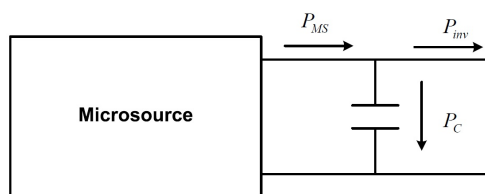


Figura 3.12: Esquema do balanço energético no condensador link-DC [2].

outro em quadratura com a tensão terminal da rede. Estes sinais permitem efetuar o controlo do fluxo de potência (ativa e reativa) do inversor, e correspondem ao valor normalizado da corrente ativa e reativa.

Como se vê na figura 3.11, existem duas malhas de controlo. A malha exterior, determina as referências de corrente para a operação do inversor, através dos fluxos de potência ativa e reativa. Relativamente ao fluxo de potência ativa, este é regulado de forma a manter constante o valor da tensão no link-DC. Isto é alcançado através da determinação da amplitude da componente ativa da corrente de saída, através do controlador PI-1. Por sua vez, o fluxo de potência reativa é controlado pela amplitude da componente reativa da corrente de saída do inversor, desta feita realizado pelo controlador PI-2. A saída dos dois controladores PI (amplitude da componente ativa e reativa da corrente) afetam a componente normalizada da respetiva corrente (ativa e reativa), obtendo-se finalmente o valor de referência para a corrente de saída do inversor.

A malha interior é responsável por determinar a tensão de saída do inversor, com base na incorporação do valor de referência da corrente num sistema de controlo do tipo proporcional.

É possível especificar um fator de potência para o funcionamento deste inversor, ou optar por enviar um set-point (por parte do MGCC) para o valor pretendido de potência reativa [2].

A modelização do link-DC, foi feita desprezando as perdas. A potência no condensador do link-DC (P_C), é a diferença entre a potência fornecida pela MF (P_{MF}) e a potência de saída do inversor (P_{inv}), como se vê na expressão 3.2. Um esquema deste balanço energético pode ser consultado na figura 3.12.

$$P_C = P_{MF} - P_{inv} \quad [W] \quad (3.2)$$

A potência entregue pelo condensador pode também ser calculada da seguinte forma:

$$P_C = V_{DC} \times I_{DC} \quad [W] \quad (3.3)$$

Onde V_{DC} e I_{DC} são respetivamente a tensão e a corrente no condensador.

síncrono d-q e é do tipo PI. O esquema de controlo de um inversor PQ trifásico, está representado na figura 3.15.

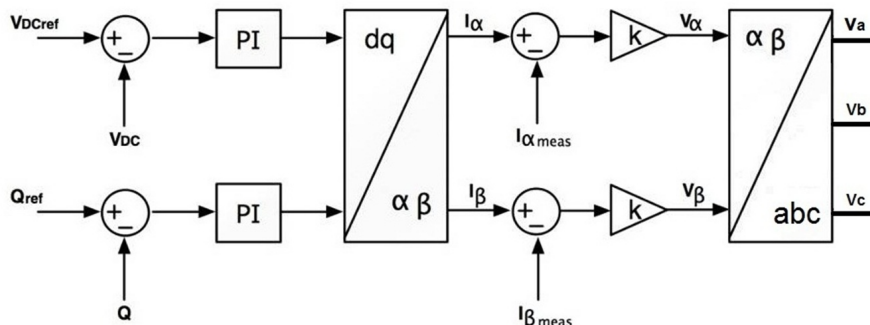


Figura 3.15: Modelização de um inversor PQ do tipo trifásico.

Note-se que existem outros modelos para inversores PQ explicados na literatura [31, 32, 33]. O modelo para esta dissertação foi escolhido com base na sua simplicidade de implementação, sendo que esta característica não põe em causa a qualidade dos resultados alcançados.

3.6.2 Modelização do Inversor Fonte de Tensão (VSI)

Nos SEE, as oscilações de carga são compensadas pelo estatismo dos geradores síncronos (controlo primário). Perante um aumento de carga, a frequência do rotor diminui, numa proporção que depende das características do gerador. Fisicamente, essa compensação é feita à custa da energia cinética armazenada no rotor. Também a tensão é regulada pelos geradores, através do controlo de potência reativa.

Dado que nas MR não há possibilidade de fazer este tipo de compensação (dado não existirem máquinas com estas características), é necessário encontrar soluções capazes de realizar um controlo análogo.

O inversor VSI emula o comportamento de uma máquina síncrona. Análogamente ao que se passa nos geradores síncronos, o VSI diminui a frequência de referência aos seus terminais quando há um aumento de carga na MR, e vice-versa. Também a tensão é controlada com base no balanço de potência reativa. O VSI comporta-se portanto como uma fonte de tensão com magnitude e frequência da tensão de saída, controlada por curvas características com parâmetros pré-definidos (droop control). As equações que permitem o funcionamento do VSI como uma fonte de tensão controlada, são as seguintes:

$$\omega = \omega_0 - k_p \times P \quad (3.5)$$

$$V = V_0 - k_Q \times Q \quad (3.6)$$

Onde (P) e (Q) representam respetivamente potência ativa e reativa à saída do inversor, (k_P) e (k_Q) são os valores definidos para o estatismo do VSI, e (ω_0) e (V_0) são os valores de referência para a frequência angular e tensão.

Este princípio de controlo, permite que um VSI funcione sob uma rede isolada, controlando frequência e tensão.

Caso o VSI se encontre a funcionar em interligação com uma rede externa, tanto a frequência como a tensão, são por ela impostas. Nessa situação, caso os valores de referência do VSI sejam os mesmos que os valores impostos pela rede (V_{grid} e ω_{grid}), o VSI não injetará potência no sistema. Facilmente se verifica através das equações 3.5 e 3.6 que, se o valor de referência for igual ao valor medido aos terminais do VSI, a potência injetada pelo VSI (P ou Q) terá obrigatoriamente que ser nula.

De modo a controlar a potência ativa e reativa injetada pelo VSI na situação referida, basta ajustar os valores de referência (V_0 e ω_0). Nas figuras 3.16 e 3.17 ilustra-se o comportamento do VSI, relativamente à injeção de potência, em função da alteração dos seus valores de referência para frequência e tensão (regulação de potência ativa e reativa, respetivamente).

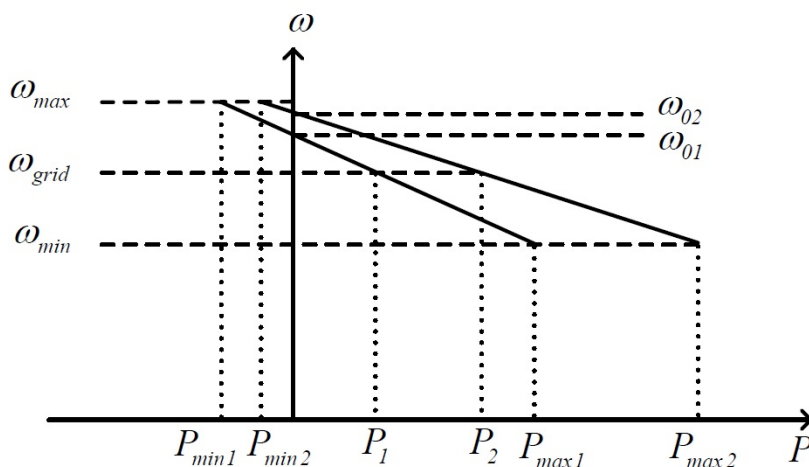


Figura 3.16: Curva característica de variação "Frequência vs Potência Ativa" do VSI. [2]

$$P_1 = \frac{\omega_{grid} + \omega_{01}}{k_P^1} \quad , \quad P_2 = \frac{\omega_{grid} + \omega_{02}}{k_P^2} \quad (3.7)$$

O par de equações 3.7 permite verificar que, considerando a frequência da rede e o valor de estatismo definido constante (ω_{grid} e $k_P = constante$), a potência ativa injetada pelo VSI é tanto maior quanto maior for o seu valor de referência ω_0 . Análogamente, o par de equações 3.8 permite verificar que, considerando a tensão da rede e o valor de estatismo definido constante (V_{grid} e $k_Q = constante$), a potência reativa injetada pelo VSI é tanto maior quanto maior for o seu valor de referência V_0 .

Como é óbvio, só há lugar a injeção de potência caso os valores de referência sejam superiores aos valores da rede. Caso contrário, haverá lugar a absorção de potência (caso a MF controlada pelo VSI o permita).

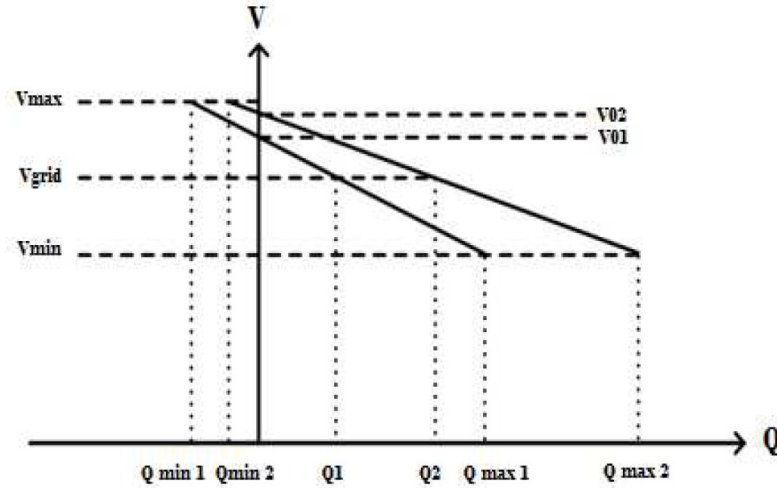


Figura 3.17: Curva característica de variação "Tensão vs Potência Reativa" do VSI. [2]

$$Q_1 = \frac{v_{grid} + v_{01}}{k_Q^1} \quad , \quad Q_2 = \frac{v_{grid} + v_{02}}{k_Q^2} \quad (3.8)$$

Numa situação em que haja um grupo de VSI a operar em modo isolado, as variações de carga serão compensadas por variações de potência de todos os inversores, de acordo com a equação 3.9. Caso se pretenda que todos os inversores partilhem a carga equitativamente, os coeficientes k_P deverão ser escolhidos de modo a obedecerem à expressão 3.10.

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n \Delta P_i \quad (3.9)$$

Onde ΔP representa a variação total de potência na rede e ΔP_i , a variação no i -ésimo inversor.

$$k_{P1}P_1 = k_{P2}P_2 = k_{P3}P_3 = \dots k_{Pn}P_n \quad (3.10)$$

A equação 3.11 permite calcular a variação de frequência angular em função da variação de carga num dado inversor.

$$\Delta \omega = \omega_{0i} - k_{Pi} \times P_i - [\omega_{0i} - k_{Pi} \times (P_i + \Delta P_i)] = k_{Pi} \times \Delta P_i \quad (3.11)$$

O mesmo princípio poderia ser aplicado à partilha de potência reativa pelos inversores. Todavia, devido às impedâncias dos ramos presentes nas MR, é impossibilitada uma partilha precisa entre os VSI.

Na figura 3.18 apresenta-se o esquema de controlo de um VSI.

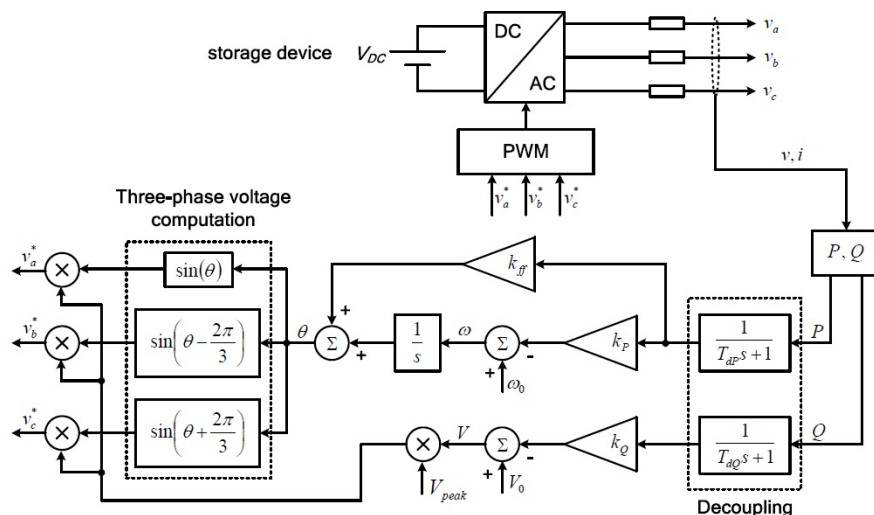


Figura 3.18: Esquema de controlo de um VSI. [2]

O aspeto gráfico da implementação do VSI em ambiente matlab/simulink é apresentada na imagem 3.19. Note-se que o o ganho k_{ff} é introduzido no modelo por questões de estabilidade [2].

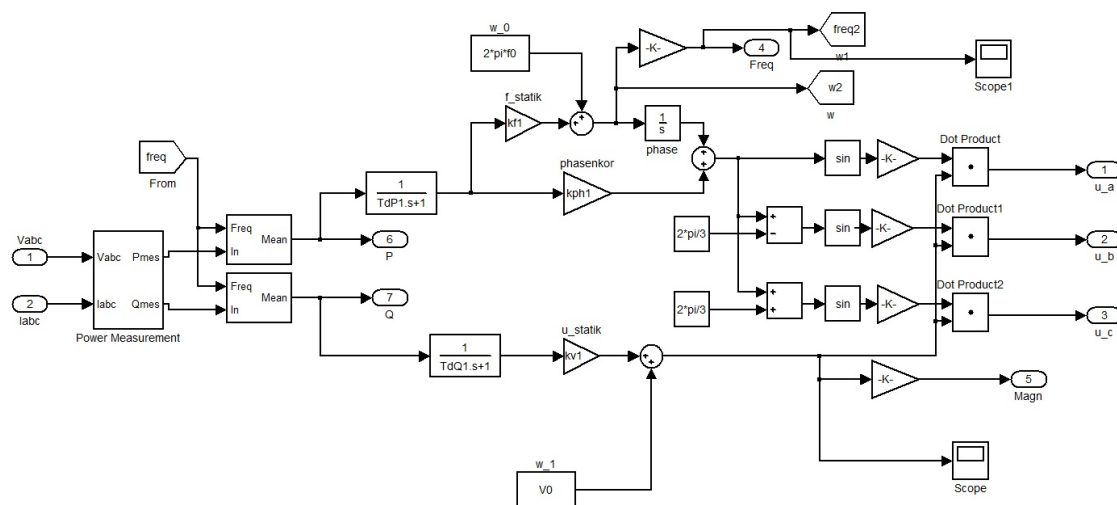


Figura 3.19: Implementação de um VSI em ambiente matlab/simulink.

3.6.3 Modelização do Inversor de quatro pernas (4-leg inverter)

Um dos grandes desafios na operação da MR em modo isolado, é garantir a capacidade de balanceamento de tensão da mesma. Para solucionar os problemas de desequilíbrio de tensão existentes, várias soluções possíveis foram já referidas em 2.4.3.

A solução adotada no âmbito desta dissertação, é o inversor de 4 pernas (na literatura anglo-saxónica, four-leg inverter). O inversor de 4 pernas será apenas utilizado em barramentos em que se implemente a estratégia de controlo baseada em inversores VSI.

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 [1]. Esta topologia só tem capacidade de produzir tensões trifásicas equilibradas se as cargas (ligadas em estrela) e os filtros utilizados forem equilibrados [34]. Para situações em que as cargas a alimentar se apresentam desequilibradas entre as três fases, foram desenvolvidos os inversores de 4 pernas. Estes inversores são capazes de controlar a tensão no neutro e não conduzem qualquer corrente pelo mesmo. Desta forma, os inversores podem impôr três tensões independentes à sua saída, independentemente da distribuição de carga aos seus terminais [1]. O princípio de operação destes dispositivos baseia-se no cancelamento de todas as componentes de tensão não desejadas (componente inversa, componente homopolar). A topologia deste inversor está representada na figura 3.20.

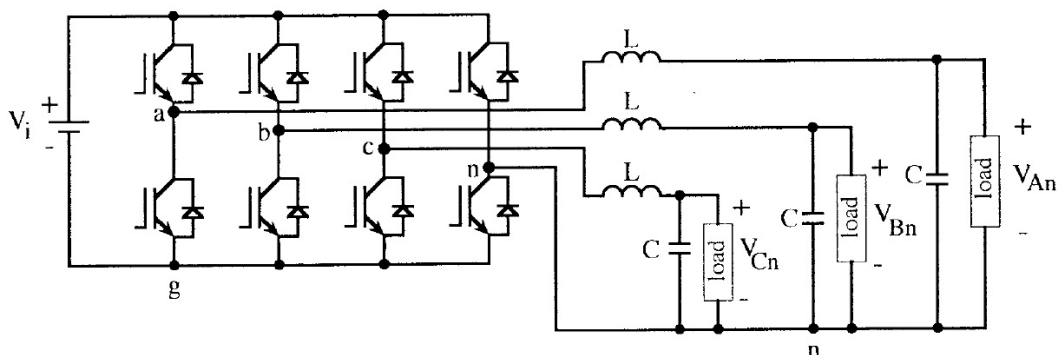


Figura 3.20: Topologia do inversor de quatro pernas [34].

O modelo da unidade de balanceamento de tensão (B.U.) utilizado nesta dissertação, foi já utilizado em [1]. O seu esquema de controlo consiste em blocos de regulação tensão-corrente e um bloco de controlo externo de estatismo (droop control). O esquema da estrutura de controlo está ilustrado na figura 3.21.

A modelização dos referidos blocos, foi feita de forma semelhante ao que se encontra descrito em [1]:

Bloco de controlo "droop control": Este bloco está modelizado para operar de forma semelhante ao VSI, tal como se encontra explicado em 3.6.2. Este bloco providencia um valor de

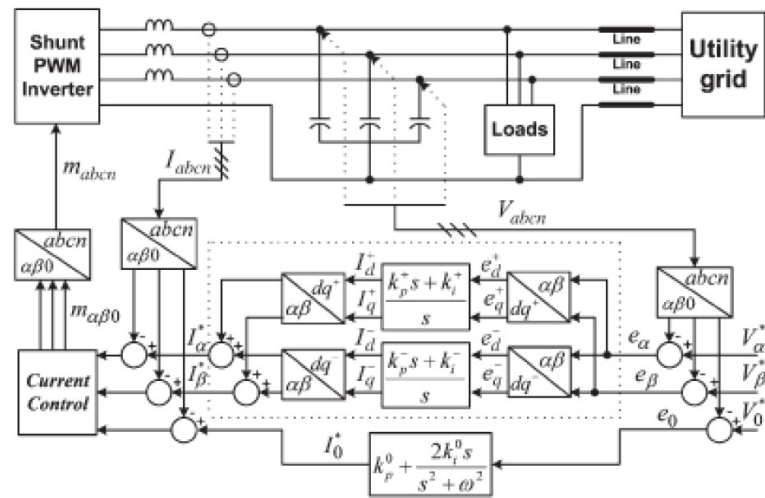


Figura 3.22: Esquema de controle de tensão da unidade de balanceamento. [1].

Onde ω é a frequência angular de ressonância do controlador, K_p é o ganho proporcional e K_i é o ganho integral.

O esquema de controle de tensão da unidade de balanceamento, pode ser visto na figura 3.22.

O vetor espacial u é multiplicado por $e^{j\omega Nt}$, de modo a obter o vetor complexo espacial no sistema de coordenadas $d-q-0$. O diagrama fasorial da transformada de Park encontra-se ilustrado na figura 3.23. No referencial com sentido de rotação positivo, a função de transferência do controlador PI é dado por [7]:

$$i_{ref}^r = \frac{k_p s + k_i}{s} e^r \quad (3.13)$$

Multiplicando a equação 3.12 por $e^{j\omega Nt}$, obtém-se a projeção no sistema de coordenadas estacionárias $\alpha-\beta-0$. Multiplicar no domínio dos tempos por $e^{j\omega Nt}$, corresponde a substituir s por $(s - j\omega)$ no domínio das frequências, tal como se encontra descrito na equação 3.13.

$$f(t)e^{j\omega Nt} \rightarrow F(s - j\omega_n) \quad (3.14)$$

Desta transformação, resulta a equação 3.12 escrita no sistema de coordenadas $\alpha-\beta-0$, tal como se mostra na equação 3.14.

$$i_{ref}^s = \frac{k_p(s - j\omega_n) + k_i}{(s - j\omega_n)} e^s \quad (3.15)$$

A mesma metodologia é utilizada para transformar o referencial com sentido de rotação negativo. O resultado encontra-se na equação 3.15.

$$i_{ref}^s = \frac{k_p(s + j\omega_n) + k_i}{(s + j\omega_n)} e^s \quad (3.16)$$

Combinando as equações 3.14 e 3.15, resulta numa nova estrutura de controlo no referencial estacionário $\alpha - \beta - 0$. A estrutura mencionada está representada na equação 3.16.

$$\begin{bmatrix} I_{ref\alpha} \\ I_{ref\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2k_p \frac{2k_i s}{s^2 + \omega_N^2} & 0 \\ 0 & 2k_p \frac{2k_i s}{s^2 + \omega_N^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Bloco de controlo de corrente: Este bloco é implementado recorrendo apenas ao uso de controladores proporcionais. Na figura 3.24 pode-se observar o modelo implementado em matlab/simulink utilizado nesta dissertação, em que se confirma a utilização dos referidos controladores.

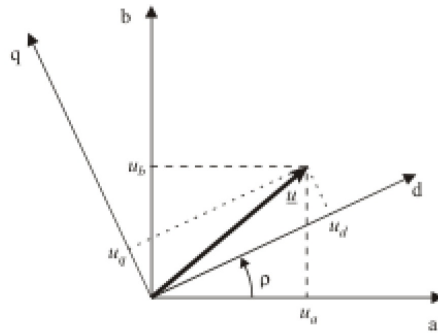


Figura 3.23: Diagrama fasorial da transformada de Park [1].

O ganho destes controladores (k_{ii}) é escolhido de modo a que o modelo atinja um bom comportamento dinâmico. Isto permite que o bloco de controlo de corrente obtenha as tensões internas do inversor, que por sua vez possibilitam a obtenção de um sistema trifásico equilibrado de tensão como saída do inversor, independentemente do regime de carga e dos desequilíbrios entre fases.

Como se vê na figura 3.24, o sinal volta a ser transformado do sistema de coordenadas $\alpha - \beta - 0$ para o sistema original $a - b - c - n$, após passar pelo controlador proporcional. Os sinais sinusoidais resultantes controlarão diretamente a fonte de tensão ideal que modela o inversor.

Isto permite obter as tensões internas do inversor, e estas, por sua vez, permitem que em qualquer condição de carga, a respetiva tensão de saída constitua um sistema trifásico equilibrado.

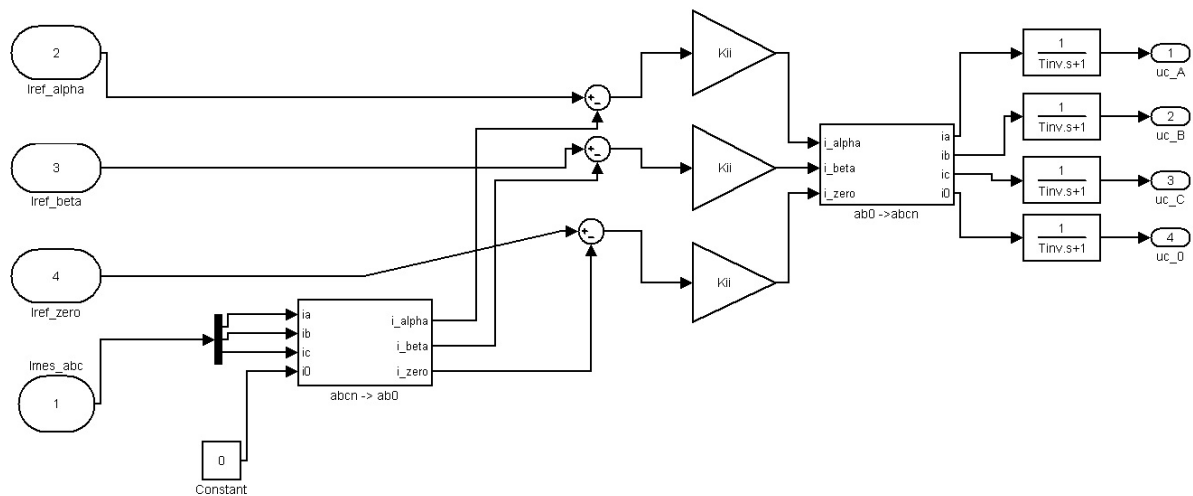


Figura 3.24: Estrutura do bloco de controlo de corrente em ambiente matlab/simulink.

3.7 Sumário e conclusões

Neste capítulo foram apresentados e explicados os modelos de todos os elementos constituintes da MR simulada. Esta modelização permitirá avaliar o comportamento da MR, e em especial as estratégias de balanceamento de tensão estudadas.

Dado que a presença de eletrónica de potência é predominante numa MR, foi dada especial atenção aos modelos dos inversores. A modelização de inversores é de extrema importância no estudo da MR, dado serem estes os principais responsáveis pela capacidade de controlo da mesma.

Capítulo 4

Estratégias de controlo e balanceamento de tensão em micro-redes

4.1 Introdução

As potencialidades que a MR tem no que diz respeito ao aumento de fiabilidade do SEE, foram já diversas vezes referidas neste documento. A capacidade de permitir que uma rede de grandes proporções seja sub-dividida, caso necessário, em pequenos núcleos de operação autónoma é uma grande inovação na área das redes elétricas de energia. Contudo, seja qual for o regime de funcionamento do SEE, é necessário garantir padrões de qualidade de fornecimento de energia, e segurança adequada. O funcionamento em modo isolado, obriga a estratégias de controlo de tensão diferentes das que se utilizam em redes elétricas de grandes dimensões, dado que também as características e condições de operação são distintas.

Diferentes estudos relacionados com esta temática têm sido efetuados, e com eles, também novas soluções têm vindo a ser desenvolvidas. A utilização de PD em MR para diminuir a emissão de gases poluentes, o impacto da implementação do conceito de MR nos índices de fiabilidade do SEE, a arquitetura funcional e as estratégias de gestão da rede (nomeadamente o controlo de frequência e o controlo de tensão) são temas frequentemente abordados. A relevância que estes assuntos têm no âmbito do estudo de MR, justifica os esforços continuamente realizados a nível de investigação científica.

Muitos destes estudos partem do pressuposto de que a MR é uma rede trifásica equilibrada, o que não corresponde à realidade de nenhuma rede de BT. Esta simplificação pode ser justificada pela natureza do estudo levado a cabo. Contudo a questão dos desequilíbrios de tensão, levante problemas na operação das MR, especialmente em modo isolado, o que motiva a procura de soluções capazes de suplantarem os mesmos. Foi esta temática que incentivou a elaboração desta dissertação, e como tal, algumas soluções de balanceamento de tensão foram estudadas.

No ponto 2.4.3 as principais estratégias de balanceamento de tensão conhecidas, foram enunciadas e explicadas sucintamente. Neste capítulo, serão expostas as soluções testadas no âmbito do trabalho elaborado.

4.2 Controlo e balanceamento de tensão em modo interligado

Nos modos de operação da MR, estão compreendidos o funcionamento em modo interligado (com a rede de MT) e modo isolado. No funcionamento em modo interligado, os valores de tensão e frequência são impostas pela rede de MT, o que deixa a MR com poucas responsabilidades no que concerne o cumprimento dos limites técnicos destas grandezas. Contudo, caso a arquitetura da rede esteja corretamente implementada, a MR pode ser uma mais valia no controlo do SEE. A hierarquia de controlo (explicada em 2.3.2) é composta por DMS, MGCC, LC's e MC's. A comunicação existente entre os diversos constituintes do esquema de controlo, possibilita a participação ativa da MR na prestação de serviços auxiliares ao SEE. A comunicação entre DMS e MGCC permite que haja, por exemplo, uma redução de perdas de transporte e uma melhoria do despacho a nível económico. Paralelamente, também o controlo de tensão pode ser melhorado, dado haver possibilidade de controlar a injeção de potência mais perto do consumo. No barramento de interligação, habitualmente munido de um inversor fonte de tensão (VSI), este controlo pode, por exemplo, ser efetuado através da modificação do droop, sendo deste modo possível o controlo de injeção ou absorção de potência ativa e reativa.

Relativamente ao problema de desequilíbrios de tensão, o efeito da presença dos dispositivos de balanceamento de tensão implementados nas MR tendo em vista o funcionamento destas em modo isolado, não foi estudada em modo interligado. Este estudo não é justificado, dado que estes dispositivos estão geralmente localizados no ponto de interligação com a rede de MT e no barramento em causa, o desequilíbrio de tensões é geralmente pouco preocupante, devido à influência da forte rede elétrica a montante. Embora possa haver uma influência positiva do dispositivo de balanceamento de tensão no equilíbrio de tensão do barramento de interligação e de outros fisicamente próximos, o estudo qualitativo da presença do mesmo foge ao âmbito desta dissertação.

Este tipo de problemas poderá ainda existir noutros locais da rede, principalmente nas extremidades. A capacidade de a rede impôr tensões trifásicas equilibradas em situações em que a carga por fase não está equitativamente distribuída, vai-se diluindo ao longo da rede (apesar de se tratar de uma rede extremamente robusta). Na referida situação, pode haver necessidade de regulação e compensação locais, caso se atinjam valores proibitivos de desequilíbrio. Apesar de ser relevante, este assunto também não se enquadra no âmbito da desta dissertação.

4.3 Controlo e balanceamento de tensão em modo isolado

O modo de funcionamento mais interessante e desafiante da MR, é o modo isolado (ou modo de emergência). Apesar de o SEE poder tirar partido da presença da MR em modo interligado, é em modo isolado que as maiores vantagens das MR se observam. Numa situação de colapso generalizado da rede elétrica, a MR é capaz de dar continuidade ao fornecimento de energia às suas cargas, diminuindo significativamente a duração e frequência de eventuais interrupções de serviço. Esta diminuição leva ao aumento da fiabilidade do sistema e eleva a qualidade do serviço

prestado. Diversos estudos indicam que a MR pode ainda ter a capacidade de realizar ações de reposição de serviço (ou blackstart) do SEE, em caso de colapso generalizado do mesmo.

Mesmo funcionando em modo de emergência, a qualidade das características elétricas da energia fornecida, tem que ser assegurada. Quando se dá o isolamento da MR, há inevitavelmente grandes modificações na topologia e nas características da mesma. Entre as principais alterações, vem a diminuição da potência de curto-circuito, causada pelo isolamento entre MR e rede de MT. Como consequência, passa a haver predominância de MF interligadas à rede por intermédio de eletrónica de potência, dado que a maioria delas tem necessidade de se ligar à mesma dessa forma. Isto deve-se ao fato de as MF utilizadas, poderem produzir energia em corrente contínua, com frequência variável ou com frequência diferente da nominal da rede, dependendo do tipo de tecnologia empregue. Estas grandezas têm que ser (e são, através da eletrónica de potência) convertidas, de modo a se compatibilizarem com as grandezas usadas nos SEE em geral e na MR em particular.

A predominância na MR de MF acopladas através de eletrónica de potência, leva a necessidades de controlo (nomeadamente de tensão e frequência), diferentes das encontradas no SEE. A inexistência de grandes centrais, obriga a um controlo primário de frequência diferente, sendo necessário efetuá-lo através de eletrónica de potência (droop control dos VSI, como falado anteriormente). No controlo de tensão em particular, há ainda a possibilidade de integrar unidades de balanceamento de tensão em pontos estratégicos da rede, de modo a diminuir os desequilíbrios de tensão existentes.

As tecnologias referidas podem ser integradas em locais diferentes da MR. Podem existir barramentos com um ou mais tipos de inversores, dando origem a diversas soluções que podem ser implementadas na MR. O principal objetivo desta dissertação é a avaliação de cada uma delas. Seguidamente serão lembrados os métodos de controlo existentes numa MR (SMO, e MMO), na perspectiva de como poderão ser explorados para o problema de controlo e balanceamento de tensão. As diversas possibilidades de controlo de tensão estudadas, serão também referidas.

4.3.1 Estratégia de controlo SMO

A estratégia de operação SMO, foi sucintamente explicada em 2.3.2.2. Trata-se de uma estratégia que envolve a presença de uma unidade VSI, responsável por impôr uma referência de tensão e frequência para a operação de outros inversores, e da MR em geral. A unidade VSI emula o comportamento de um gerador síncrono trifásico.

Para poder responder súbitamente a variações de carga ou produção, e manter um balanço energético equilibrado, é necessário que no mesmo barramento da unidade VSI, exista um dispositivo de armazenamento de energia capaz de responder às solicitações da mesma. Estes dispositivos têm tempos de resposta muito diminutos, o que lhes permite fornecer qualquer valor de energia em curtíssimos intervalos de tempo, desde que se respeitem os seus limites técnicos. Além do dispositivo de armazenamento de energia, pode também existir uma MF. Apesar de esta apresentar tempos de resposta superiores, acaba por tomar a carga inicialmente providenciada pelo dispositivo de armazenamento de energia, ao longo do tempo. Isto permite manter reservas energéticas

suficientes no mesmo, e caso seja necessário, assegura a possibilidade de recarregar o dispositivo em causa.

Dado que as MR são redes de BT, surgem inevitavelmente desequilíbrios de tensão, derivados da distribuição não equitativa das cargas monofásicas pelas três fases. Enquanto a MR se encontra a funcionar em regime interligado, o barramento de interligação, alimentado pela rede a montante, é um barramento trifásico de potência elevada e com desequilíbrios pouco acentuados. Isto significa que a rede a montante impõe tensões trifásicas praticamente equilibradas ao barramento de interligação. Contudo não elimina os desequilíbrios existentes nos barramentos mais a jusante da MR. No modo interligado, um dado regime de carga apresenta desequilíbrios inferiores comparativamente ao mesmo regime em modo isolado (caso não existam tecnologias de balanceamento de tensão presentes). Isto deve-se à diferença entre potências de curto-circuito em cada caso, muito superiores em modo interligado.

Para o funcionamento em modo isolado, é indispensável a existência de uma unidade VSI, capaz de emular o comportamento dinâmico de um gerador síncrono, pelas razões referidas. Todavia, para que se garanta o correto funcionamento de cargas trifásicas (principalmente máquinas elétricas rotativas), a unidade VSI pode não ser suficiente. De fato, a unidade VSI responde a solicitações de carga e produção na rede, injetando ou absorvendo potência (com o auxílio das unidades de armazenamento de energia). Contudo, se existirem desequilíbrios de tensão, haverá consequentemente diferentes valores de corrente em cada fase e, apesar de o balanço energético ser garantido em cada fase, o desequilíbrio entre elas continuará a existir. Daí que seja tão importante procurar soluções capazes de garantir o adequado balanceamento de tensões. O conceito associado aos desequilíbrios de tensão, bem como algumas soluções para o problema são referidas no ponto 2.4. É também identificada a solução adotada no âmbito desta dissertação, o inversor de 4 pernas.

A unidade de balanceamento de tensão utilizada é baseada em eletrónica de potência, que funciona com base num inversor de 4 pernas. Estes inversores são capazes de controlar a tensão no neutro e não conduzem qualquer corrente pelo mesmo. Desta forma, podem impôr três tensões independentes à sua saída, independentemente da distribuição de carga aos seus terminais. Esta capacidade possibilita que, à saída do inversor se obtenha uma tensão trifásica equilibrada, eliminando qualquer desequilíbrio de tensão aí existente.

Esta solução de balanceamento de tensão, pode funcionar em conjunto com a unidade VSI no mesmo barramento. A junção dos dois inversores (VSI e inversor de 4 pernas), pode-se tornar uma solução de interesse no balanceamento de tensão numa MR. Aliando as capacidades de controlo de cada inversor no mesmo barramento, garante-se a presença de um barramento com tensões trifásicas equilibradas, com as características elétricas desejadas. A presença de um barramento com estas características deverá diminuir os desequilíbrios de tensão noutros barramentos da MR.

É de interesse testar a implementação de estratégias de controlo SMO numa MR em modo isolado, optando pela presença de unicamente uma unidade VSI na rede, colocada inicialmente no barramento de interligação com a rede MT. Isto permitirá verificar se os desequilíbrios de tensão na MR apresentam valores aceitáveis. Todavia é de esperar que estes se agravem, ainda que

ligeiramente, quando comparados com o modo interligado, pelos motivos acima referidos. Com vista a melhorar as condições de equilíbrio de tensão da solução referida, poderá haver a junção da unidade VSI com a unidade de balanceamento de tensão adotada. Isto permitirá estudar os impactos introduzidos por esta última no balanceamento de tensão de toda a MR. A implementação desta solução em ambiente matlab/simulink, encontra-se ilustrada na figura 4.1.

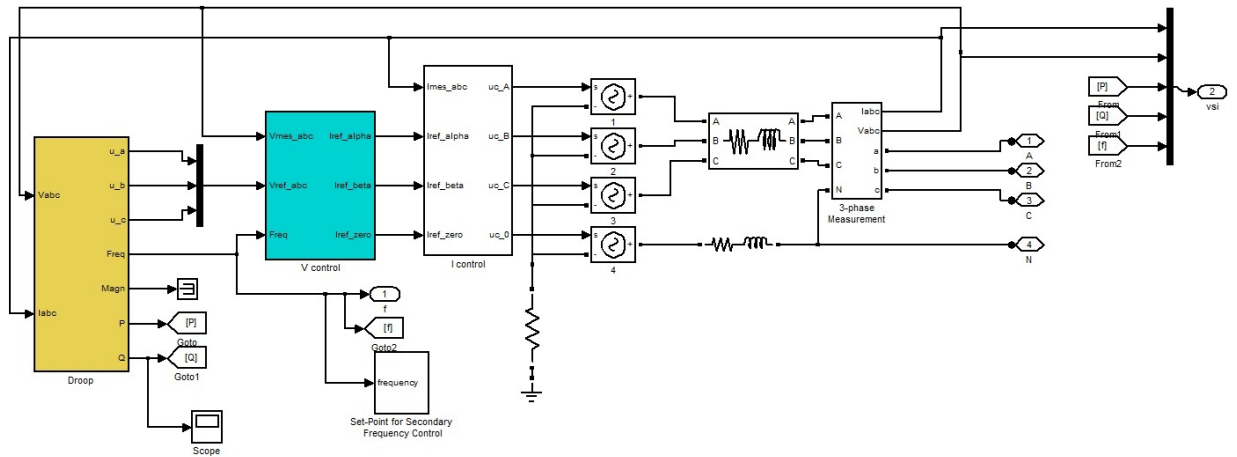


Figura 4.1: Implementação conjunta de unidade VSI e unidade de balanceamento de tensão, em ambiente matlab/simulink.

A unidade VSI e a unidade de balanceamento de tensão, são tendencialmente instaladas no barramento de interligação, de modo a simular as condições aí existentes no pré-isolamento. Contudo, dependendo da topologia e características da rede (distribuição de cargas, comprimento de linhas, etc.), pode ser interessante modificar a localização destas unidades na MR. Como tal, as soluções acima referidas serão também avaliadas quanto à sua localização na MR estudada. De fato, nas simulações levadas a cabo, as soluções referidas serão avaliadas em mais que uma localização, na MR testada.

Resumidamente, relativamente ao modo de operação SMO da MR, as estratégias de controlo e balanceamento de tensão estudadas no âmbito desta dissertação são as seguintes:

- Presença de apenas uma unidade VSI, no barramento de interligação da MR com a rede a montante;
- Presença de uma unidade VSI e uma unidade de balanceamento de tensão, no barramento de interligação da MR com a rede a montante;
- Presença de apenas uma unidade VSI, num barramento distinto do barramento de interligação da MR com a rede a montante;
- Presença de uma unidade VSI e uma unidade de balanceamento de tensão, num barramento distinto do barramento de interligação da MR com a rede a montante;

4.3.2 Estratégia de controlo MMO

Tal como a estratégia de operação SMO, também a estratégia MMO foi sucintamente explicada em 2.3.2.2. Ambas têm os mesmos princípios de funcionamento. A grande diferença reside no fato de, na estratégia MMO, a tarefa de controlar tensão e frequência ser partilhada por duas ou mais unidades VSI, colocadas em locais distintos da MR.

Este modo de operação confere uma maior robustez ao funcionamento da MR, dado haver maior capacidade de garantir o balanço energético, e consequentemente haver maior facilidade em manter os níveis de tensão e frequência nos valores desejados.

As simulações levadas a cabo na MR em modo de operação MMO, vão de encontro ao que foi explicado anteriormente, relativamente à estratégia SMO. Também neste caso deverão existir dispositivos de armazenamento de energia acoplados aos inversores. Dado que as estratégias de controlo e balanceamento de tensão serão testadas na mesma rede, esta apresentará as mesmas características que no caso SMO (cargas, impedância das linhas, geradores, etc.).

A unidade de balanceamento de tensão utilizada na estratégia MMO será também idêntica à que se utilizou anteriormente. O principal interesse de realizar simulações operando a rede com a estratégia MMO, é verificar quais são as melhorias introduzidas pela segunda unidade VSI.

Na operação em MMO, começa-se por simular o comportamento da rede, quando a ela se encontram acopladas duas unidades VSI em locais distintos. Uma unidade VSI é instalada no barramento de interligação, à semelhança do que se fez anteriormente. A segunda unidade é instalada num ramal mais a jusante na rede. Posteriormente, avalia-se o impacto da introdução de uma unidade de balanceamento de tensão no barramento de interligação, onde se encontra uma das unidades VSI. Isto permitirá avaliar, entre outras coisas, a influência da presença da B.U. no modo de operação MMO.

De forma análoga ao que se referiu relativamente ao modo de operação SMO, também em relação ao MMO se apresentam de seguida as estratégias de controlo e balanceamento de tensão estudadas no âmbito desta dissertação.

- Presença de duas unidades VSI, uma no barramento de interligação da MR com a rede a montante e outra num barramento mais a jusante;
- Presença de duas unidades VSI localizadas nos dois barramentos acima referidos, e uma unidade de balanceamento de tensão, localizada no barramento de interligação da MR com a rede a montante;

4.4 Sumário e conclusões

Uma MR deve funcionar autonomamente, quando se encontra em modo isolado. Para tal, todas as funções de controlo têm que ser garantidas de forma intrínseca pela mesma. Esta dissertação, foca em especial o tema do controlo de tensão. Como tal, o principal objetivo deste capítulo é o de dar a entender de forma clara as estratégias de controlo e balanceamento de tensão estudadas.

Foi realizado ao longo do capítulo, quando se achou pertinente, um enquadramento de conceitos relacionados com as referidas estratégias, de modo a facilitar a compreensão das mesmas. A importância da presença de dispositivos de armazenamento de energia nas MR, a causa dos desequilíbrios existentes nas redes de BT e nas MR em particular, ou a importância da existência de mecanismos de balanceamento de tensão, foram alguns dos temas enquadrados.

Finalmente, as estratégias utilizadas na MR simulada foram descritas e enunciadas. A análise de resultados feita no próximo capítulo, dirá respeito à implementação das estratégias apresentadas no presente capítulo.

Capítulo 5

Avaliação e apresentação de resultados das estratégias de controlo e balanceamento de tensão

5.1 Introdução

O tema dos desequilíbrios de tensão em MR foi tratado ao longo do documento. Foram estudadas questões relacionadas com a arquitetura funcional, modos de funcionamento, vantagens e desvantagens operacionais da MR, dando sempre ênfase à questão dos desequilíbrios de tensão em modo isolado. No último capítulo foram referidas as estratégias de controlo e balanceamento de tensão propostas, e que são agora avaliadas em redes de teste, com o objetivo de encontrar soluções válidas para o problema. Foram incluídas soluções baseadas em estratégias SMO e MMO, com e sem unidades de balanceamento, com o intuito de procurar diferenças entre elas e ser capaz de identificar eventuais vantagens e desvantagens de cada uma, em cada cenário. Os resultados alcançados neste capítulo, dirão respeito às soluções descritas no último capítulo.

Para possibilitar a simulação da rede de teste utilizada, recorreu-se à ferramenta de simulação matlab/simulink. Desta forma, e utilizando para isso os modelos dinâmicos dos constituintes da MR expostos no capítulo 3, construiu-se a MR analisada em ambiente de simulação numérica. A topologia da rede será igual em todas as simulações. No entanto, houve necessidade de criar dois cenários com topologias idênticas, mas com características diferentes entre si. Entre estes, variaram-se impedâncias de cabos, potências instaladas das MF e regimes de carga. A criação de dois cenários distintos, teve o objetivo de avaliar as estratégias implementadas em situações de funcionamento diferentes. Pretende-se que ambos os casos sejam representativos do que poderia ser um cenário real. As características elétricas da rede, foram escolhidas em cada cenário com o intuito de representar uma MR estabelecida numa zona rural e outra estabelecida numa zona urbana. Refira-se que uma rede rural é, por norma, uma rede mais longa (maiores impedâncias de linha) e menos carregada que uma rede urbana.

Esta dissertação foca-se no modo de funcionamento isolado da MR. Contudo, as simulações são iniciadas em modo interligado, de forma a permitir a estabilização das grandezas elétricas da MR em condições de pré-isolamento. Dado que é importante ser capaz de avaliar o comportamento da MR no momento transitório entre modo normal e modo isolado, é necessário conhecer o estado da MR nos momentos anteriores ao isolamento.

As simulações compreendem intervalos de 90 segundos e o isolamento entre a MR e a rede a montante dá-se aos 10 segundos de simulação.

5.2 Descrição da rede de teste

Como se referiu, neste capítulo haverá lugar à exposição dos resultados alcançados. Pode-se observar na figura 5.1, um diagrama que resume genericamente as simulações efetuadas.

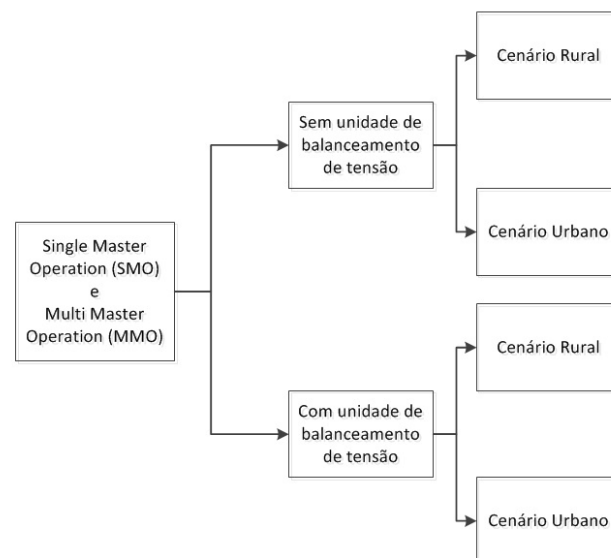


Figura 5.1: Diagrama resumo das simulações efetuadas.

Para poder efetuar as simulações e testar as soluções anteriormente enunciadas, foi necessário elaborar uma rede de teste. A MR genérica utilizada é constituída por 4 barramentos, um dos quais é o barramento de interligação com a rede de MT, onde não existe carga. Existem duas MF: uma micro-turbina localizada no barramento 2 (produção trifásica), e um painel solar fotovoltaico localizado no barramento 4 (produção monofásica). Existem ainda cargas trifásicas e monofásicas nos 3 barramentos mais a jusante. A inclusão de cargas monofásicas na rede, bem como a sua distribuição não equitativa pelas 3 fases, criará os desequilíbrios necessários ao teste das soluções que se pretendem estudar.

No caso das simulações envolvendo estratégias SMO, a unidade VSI encontra-se acoplada ao barramento de interligação. Contudo, haverá um par de condições de estudo em que a localização do inversor será alterada para o barramento 2. As razões desta alteração serão referidas

mais à frente. Refira-se ainda que às unidades VSI se encontra sempre acoplado um dispositivo de armazenamento de energia, independentemente da sua localização. A topologia da MR está representada na figura 5.2.

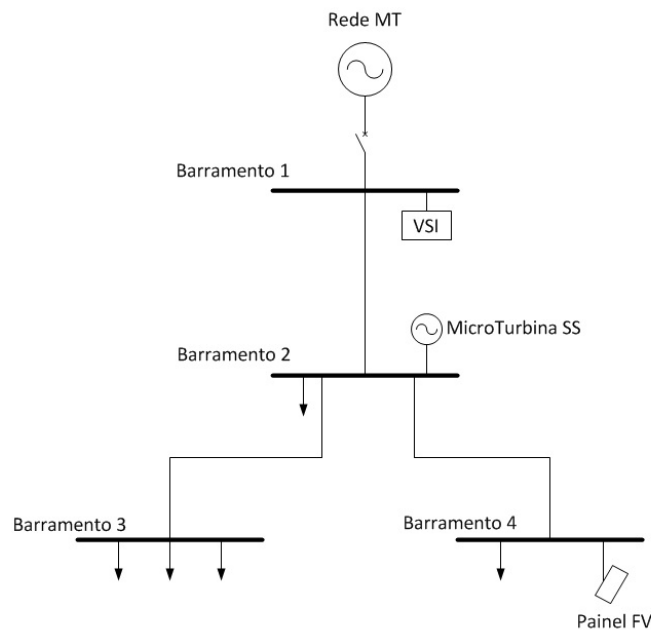


Figura 5.2: Esquema da topologia da MR de teste utilizada (SMO).

Nas estratégias MMO, haverá obviamente uma segunda unidade acoplada à rede. O barramento escolhido para tal, foi o barramento 4. Dado ser um barramento que se encontra na extremidade da MR, e possuir produção monofásica a si acoplada, é uma localização interessante para um inversor com as características do VSI.

As simulações efetuadas contaram com a criação de dois cenários, que têm por objetivo tipificar condições de operação de redes de distribuição, associadas a ambientes rurais e urbanos. As duas principais diferenças entre eles, são a carga total, e o comprimento e tipo de canalizações, que se traduz em variações significativas de impedância. No caso rural, assim como acontece na realidade, a impedância das linhas é superior (maiores distâncias entre barramentos) e a carga total é inferior (menor densidade de carga) face às características do caso urbano. Nas seguintes tabelas, apresentam-se os dados do cenário rural e urbano, quanto à impedância das linhas, cargas e produção total na rede, por fase.

Quanto às linhas, basta atentar nas tabelas 5.1 e 5.2 para perceber que as características no cenário rural vêm duplicadas, comparativamente com as mesmas características do cenário urbano. Isto vai de encontro ao que se referiu anteriormente relativamente ao maior comprimento das linhas de transmissão rurais.

A microturbina acoplada ao barramento 2 tem a mesma potência instalada em ambos os cenários, mas a sua produção inicial é mais baixa no cenário rural. Considera-se a mesma potência

Tabela 5.1: Características elétricas das linhas no cenário rural (modelo RL série)

De nó	Para nó	Comprimento (m)	R (ohm)	X (ohm)	L(H)
1	2	293	0,2113	1,0923	0,0034
2	3	168	0,5229	10,8268	0,0345
2	4	102	0,9350	19,0028	0,0605

instalada em ambos os cenários, pois o estudo levado a cabo no âmbito desta dissertação não compreende situações que obriguem a deslastre de carga. Deste modo, e sendo a microturbina a fonte mais potente da MR, garante-se que há capacidade de alimentar toda a MR em ambos os cenários, não correndo riscos de entrar em situações de desequilíbrio energético que não permitam avaliar devidamente as estratégias estudadas.

Tabela 5.2: Características elétricas das linhas no cenário urbano (modelo RL série)

De nó	Para nó	Comprimento (m)	R (ohm)	X (ohm)	L(H)
1	2	146,5	0,1057	0,5462	0,0017
2	3	84	0,2615	5,4134	0,0172
2	4	51	0,4675	9,5014	0,0302

No barramento 4, encontra-se acoplado um MG monofásico (painel fotovoltaico). As redes rurais têm geralmente menos capacidade de acolher MG, fato que pode ser agravado pelo seu funcionamento em modo isolado. Optou-se então por diminuir a potência entregue à rede por parte do painel fotovoltaico no caso rural, face ao que era entregue no caso urbano.

Apresenta-se nos anexos do documento, sob forma de tabela, a distribuição de cargas por tipo (mono ou trifásicas), na MR. No caso das cargas monofásicas, identifica-se ainda a fase a que estão acopladas.

Tabela 5.3: Produção inicial e nominal das MF no caso rural

Nó	Potência inicial (kW)	Potência Nominal (kW)	Tipo	Fase
2	7,5	30	Trifásico	abc
4	2	2	Monofásico	c

Expõe-se ainda uma tabela indicativa da carga total por fase, e a carga total existente na MR tanto no cenário rural como no cenário urbano. Os dados permitem verificar que o cenário rural se apresenta menos carregado do que o cenário urbano, pelos motivos acima mencionados. Comparativamente, verifica-se que o cenário urbano apresenta cerca de 64% mais carga do que o cenário rural, o que vai de encontro ao que acontece na realidade, em que as redes urbanas apresentam maior densidade de carga do que as redes rurais.

5.3 Análise de resultados de estratégias de operação SMO

As estratégias de controlo e balanceamento de tensão aplicadas numa rede operado com base em estratégias SMO, serão analisadas neste ponto.

Tabela 5.4: Produção inicial e nominal das MF no caso urbano

Nó	Potência inicial (kW)	Potência Nominal (kW)	Tipo	Fase
2	15	30	Trifásico	abc
4	10	10	Monofásico	c

Começando pelo cenário rural, simulou-se a rede com a presença da unidade VSI no barramento de interligação da MR com a rede de MT, com o intuito de verificar a magnitude dos desequilíbrios existentes, após se dar o isolamento. Seguidamente, introduziu-se uma unidade de balanceamento de tensão no barramento de interligação (onde se encontra a unidade VSI), para verificar as melhorias por esta introduzidas. Precisamente a mesma análise foi efetuada para o cenário urbano. Isto permitirá comparar as melhorias verificadas pela inclusão da unidade de balanceamento de tensão na MR em cada cenário, e inclusivamente apurar em qual deles houve melhorias mais significativas.

Optou-se ainda por alterar a localização da unidade VSI no cenário rural, para o barramento 2 e efetuar novamente a respetiva simulação. Esta alteração permitirá concluir qual é a influência da localização do inversor na MR. Contudo, esta análise foi efetuada apenas para um dos cenários (neste caso, o cenário rural), pois os resultados alcançados seriam análogos em ambos, ainda que o valor das melhorias introduzidas pela localização pudessem ser ligeiramente diferentes em cada um dos casos.

5.3.1 Inversor fonte de tensão, sem unidade de balanceamento de tensão

Cenário rural - 1 unidade VSI no nó 1 A primeira simulação efetuada, compreende a presença da unidade VSI no barramento de interligação da MR com a rede de MT. O principal objetivo desta análise é o de verificar se existem efetivamente problemas de desequilíbrio de tensão na MR.

A tensão por fase em cada barramento, pode ser consultada nas imagens seguintes. Como se vê, existem desníveis significativos entre as 3 fases (exceto no barramento 1, derivado da presença da unidade VSI), sendo que há casos em que a diferença de tensão entre fases chega aos 50 V.

Como se referiu anteriormente, o isolamento da MR dá-se aos 10 segundos de simulação. Tal fato está bem patente no gráfico da frequência, ilustrado na figura 5.7. A simulação inicia-se com a MR a funcionar em modo interligado, com uma frequência estável de 50 Hz, imposta pela rede a montante. No momento do isolamento, há uma queda de frequência abrupta, como seria de esperar, causada pela perda da potência injetada pela rede de MT. Nos segundos seguintes, o valor da frequência da MR vai aumentando, tendendo novamente para o valor nominal. A recuperação do valor da frequência é justificado pelo re-equilíbrio do balanço energético garantido

Tabela 5.5: Carga total e carga total por fase no cenário rural e urbano

Cenário	Fase A (W)	Fase B (W)	Fase C (W)	Carga total no cenário (W)
Rural	11961,33	7942,33	3414,33	23318
Urbano	10803	13684	13706	38193

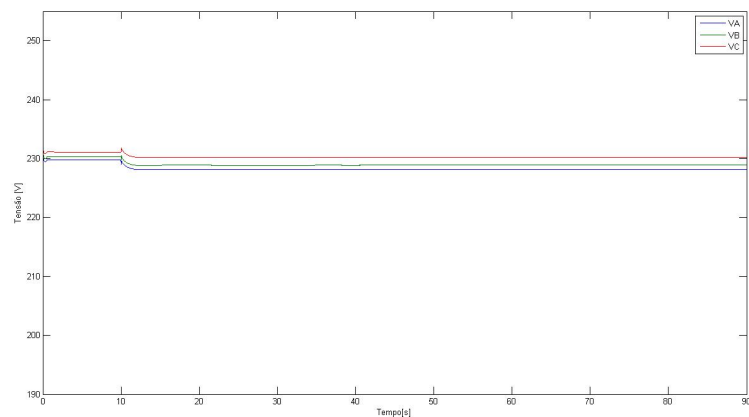


Figura 5.3: Tensão por fase no barramento 1 da MR, cenário rural, 1 VSI, sem B.U.

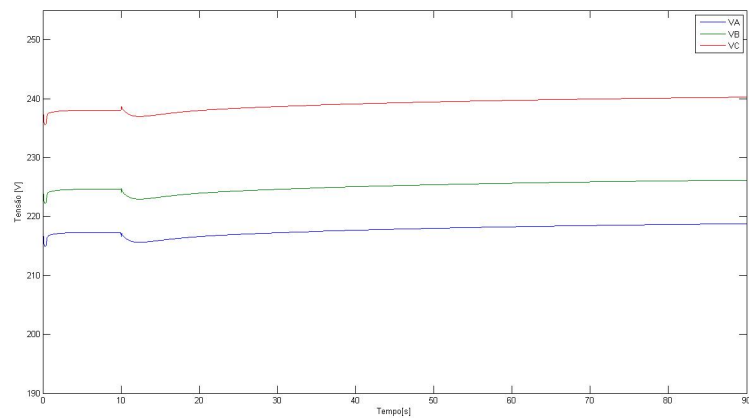


Figura 5.4: Tensão por fase no barramento 2 da MR, cenário rural, 1 VSI, sem B.U.

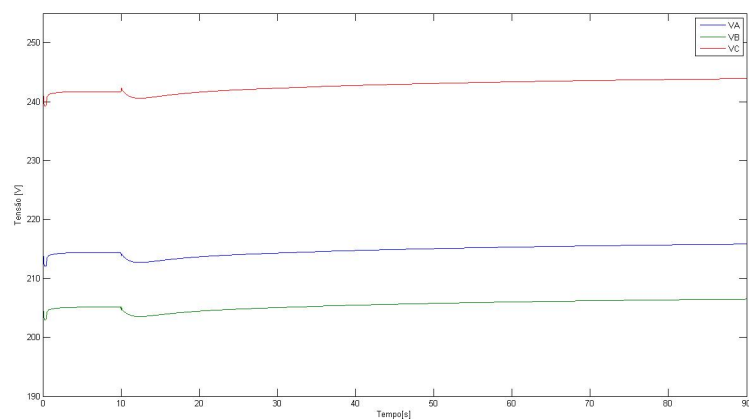


Figura 5.5: Tensão por fase no barramento 3 da MR, cenário rural, 1 VSI, sem B.U.

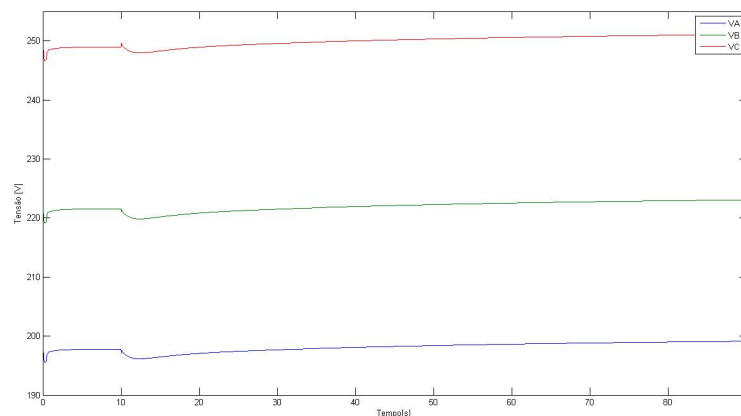


Figura 5.6: Tensão por fase no barramento 4, cenário rural, 1 VSI, sem B.U.

pela unidade VSI e pelo dispositivo de armazenamento de energia durante os primeiros instantes, e posteriormente pelo aumento de produção da microturbina.

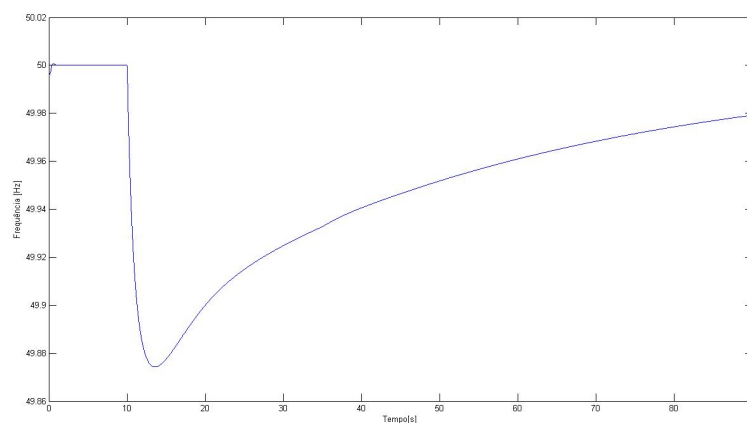


Figura 5.7: Frequência na MR.

O fator de equilíbrio de tensão (FDT), foi calculado para a componente inversa e homopolar da tensão, embora a primeira tenha maior preponderância. De fato, esta é prejudicial a algumas cargas acopladas à rede (principalmente máquinas rotativas trifásicas). Por ser a única a poder ser nociva às cargas alimentadas pela rede, é também a única cujo valor se encontra limitado pela norma europeia DIN EN50160.

Os resultados gráficos dos desequilíbrios de tensão podem ser observados nos anexos deste documento. Todavia, pode ser consultado seguidamente um quadro resumo dos valores apurados para o fator FDT em cada nó, e para cada componente. Estes valores foram medidos ao fim dos 90 segundos de simulação, o que permite desprezar eventuais períodos de estabilização das grandezas medidas. Desta forma, é possível considerar que a rede atingiu as condições de regime permanente

Tabela 5.6: Tabela resumo da componente inversa e homopolar dos desequilíbrios de tensão - VSI no nó 1

Nó	(-)FDT (%)	(0)FDT(%)
1	0,838	0,811
2	1,529	4,126
3	2,979	7,208
4	2,876	10,271

aquando da leitura dos valores, e que por esse motivo, estes não sofreriam alterações significativas dali em diante.

Como se verifica pela análise da tabela, os barramentos com maiores desequilíbrios, e que inclusivamente violam a norma europeia DIN EN50160, são os barramentos 3 e 4. Estes são também os barramentos mais distantes da unidade VSI. No SEE o efeito dos grandes geradores síncronos sobre o equilíbrio de tensão vai-se diluindo com a distância aos mesmos. Analogamente, também na MR o efeito da unidade VSI (que emula o comportamento de um gerador síncrono), se vai diluindo ao longo da rede.

Cenário rural - 1 unidade VSI no nó 2 Com o intuito de verificar a influência da localização da unidade VSI na rede, simulou-se o mesmo cenário com o inversor localizado mais a jusante, no barramento 2. Isto diminui a distância entre o inversor e os barramentos mais afetados pelos desequilíbrios de tensão. Como se pode verificar nas imagens seguintes, a tensão por fase em cada

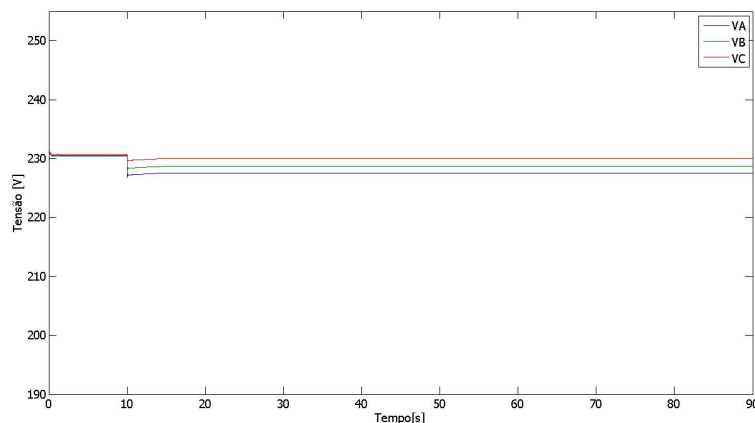


Figura 5.8: Tensão por fase no barramento 1 da MR, cenário rural, 1 VSI (nó 2), sem B.U.

barramento alterou-se. Com a alteração da localização da unidade VSI, deixou de haver trânsito de potência entre o barramento 1 (sem cargas a ele acopladas) e o resto da MR. Como tal, as tensões deste barramento passaram a ser as mesmas que as do barramento a que se encontra ligado (barramento 2). No barramento 2, verifica-se que as tensões se aproximaram do valor nominal (230 V), devido à presença da unidade VSI nesse barramento.

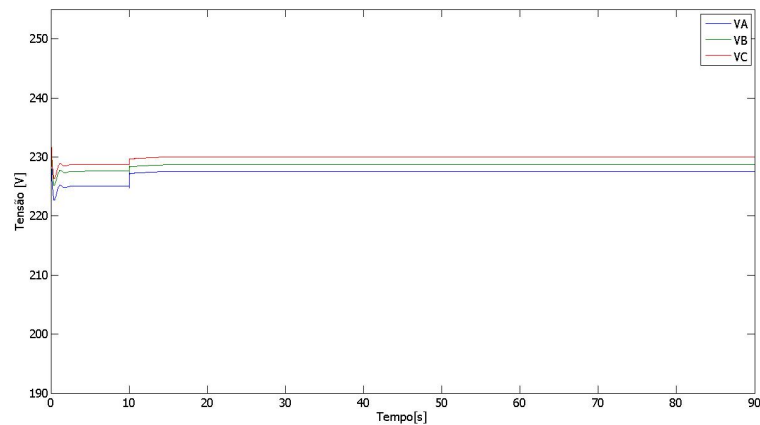


Figura 5.9: Tensão por fase no barramento 2 da MR, cenário rural, 1 VSI (nó 2), sem B.U.

No barramento 3 e 4, a tensão nas fases a e b subiram face ao caso em que a unidade VSI se encontrava no barramento de interligação. Dado que a distância entre a unidade VSI e os barramentos diminuiu, a queda de tensão é também menor, o que pode ser parte da justificação para a subida de tensão verificada. Já na fase c, a tensão diminuiu ao invés do que sucedeu nas outras duas fases.

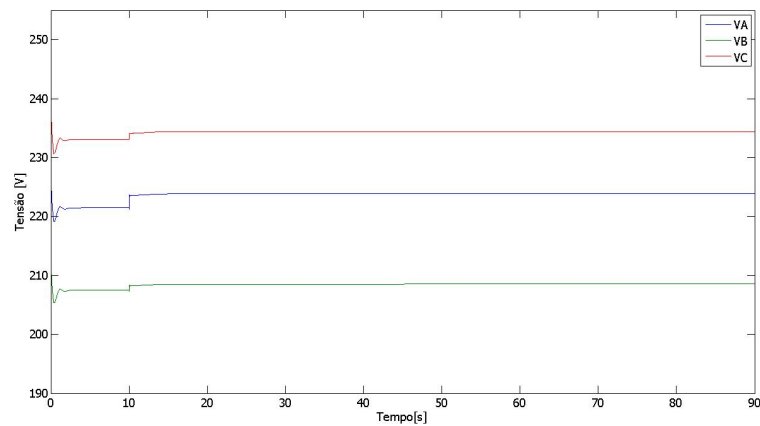


Figura 5.10: Tensão por fase no barramento 3 da MR, cenário rural, 1 VSI (nó 2), sem B.U.

Atentando nos valores de tensão medidos, verifica-se que as fases a e b se encontram abaixo dos 230 V, enquanto que a fase c é a única que ultrapassava este valor. Como a unidade VSI é uma fonte de tensão que impõe um determinado valor de tensão à sua saída no local onde é ligado, a sua influência é, neste caso, a de aproximar o valor de tensão de cada fase, para o valor nominal da rede. O seu efeito dilui-se ao longo da MR, e vice-versa, como já se referiu. Por essa razão, a alteração da sua localização para o barramento 2, aumentou a sua influência nas tensões dos barramentos 3 e 4 (a distância entre os barramentos e o inversor diminuiu). Este é o principal

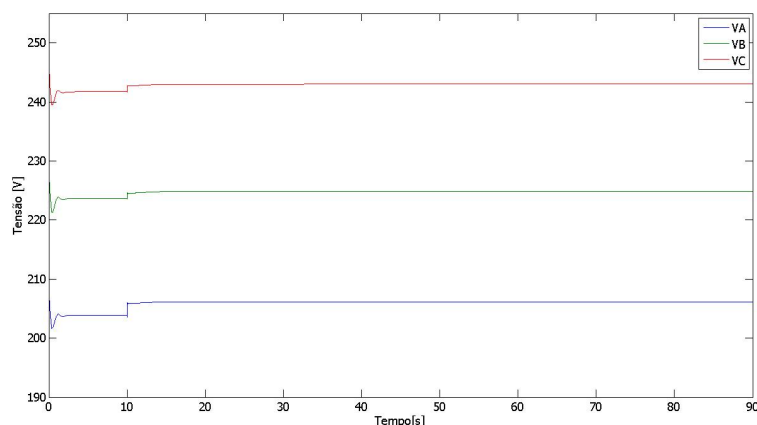


Figura 5.11: Tensão por fase no barramento 4 da MR, cenário rural, 1 VSI (nó 2), sem B.U.

motivo pelo qual a tensão nas fases a e b subiu, enquanto que na fase c desceu nesses barramentos quando se alterou a localização do inversor para uma posição mais a jusante na MR.

De seguida apresentam-se organizados numa tabela, os valores do FDT para a componente inversa e homopolar, no caso em que o inversor se encontra acoplado ao barramento 2.

Tabela 5.7: Tabela resumo da componente inversa e homopolar dos desequilíbrios de tensão - VSI no nó 2

Nó	(-)FDT (%)	(0)FDT (%)
1	0,872	0,922
2	0,872	0,922
3	2,198	4,623
4	1,907	7,449

Como seria de esperar, houve uma diminuição do valor dos desequilíbrios. Esta diminuição foi até suficiente para, no caso do barramento 4, levar o valor da componente inversa do desequilíbrio para valores regulamentarmente aceites. O valor da componente homopolar do desequilíbrio, teve também melhorias significativas em toda a rede. A tabela 5.8 compara o valor dos desequilíbrios em ambos os casos.

Prova-se que há de fato influência da localização da unidade VSI relativamente à magnitude dos desequilíbrios. Quanto mais próxima estiver esta unidade dos barramentos desequilibrados, menores serão as magnitudes dos mesmos.

As restantes simulações serão todavia efetuadas com a unidade VSI localizada no barramento de interligação. Na prática o fato de esta não se encontrar no referido barramento, dificulta eventuais operações de re-sincronização com a rede a montante, o que não é desejável. Daí que a localização preferencial para o inversor, seja o barramento de interligação.

Tabela 5.8: Comparação dos desequilíbrios de tensão no cenário rural, mediante alteração da localização da unidade VSI

Nó	(-)FDT (%) 1 VSI, nó 1	(-) FDT (%) 1 VSI, nó 2	Diferença
1	0,838	0,872	-0,034
2	1,529	0,872	0,657
3	2,979	2,198	0,781
4	2,876	1,907	0,969
Nó	(0)FDT (%) 1 VSI, nó 1	(0) FDT (%) 1 VSI, nó 2	Diferença
1	0,811	0,922	-0,111
2	4,126	0,922	3,204
3	7,208	4,623	2,585
4	10,271	7,449	2,822

Cenário urbano - 1 unidade VSI no nó 1 As análises efetuadas neste cenário são análogas ao que foi realizado no cenário rural. Neste caso não foi contudo contemplada a modificação da localização do inversor, por motivos já anteriormente referidos.

As tensões por fase em cada barramento, são apresentadas nas seguintes imagens.

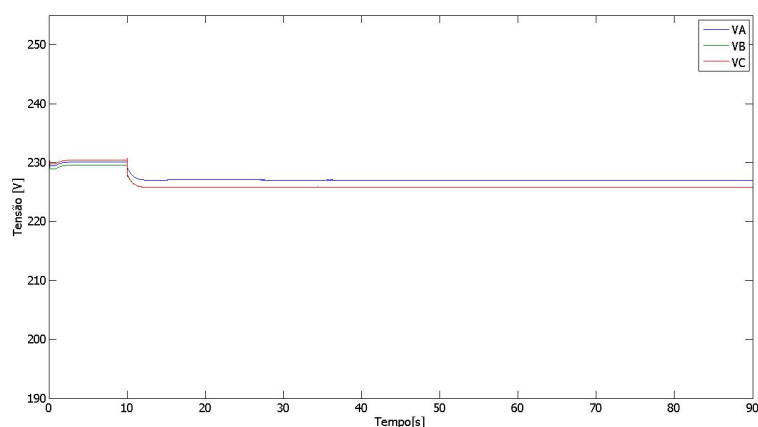


Figura 5.12: Tensão por fase no barramento 1 da MR, cenário urbano, 1 VSI, sem B.U.

Comparando as tensões do cenário urbano com o caso análogo do cenário rural, facilmente se verifica que as primeiras apresentam valores menos distanciados entre si, e mais próximos do valor nominal. Na verdade, embora as redes urbanas possam ter mais carga, têm menores comprimentos de canalização, o que contribui para a redução das quedas de tensão.

Apesar de as tensões apresentarem valores mais favoráveis no caso urbano, continuam a existir desequilíbrios de tensão. De forma semelhante ao que se expôs no cenário rural, o FDT para a componente inversa e homopolar dos desequilíbrios são apresentadas seguidamente, organizados numa tabela.

Como se pode verificar, os desequilíbrios de tensão são menores no cenário urbano do que no cenário rural. Este resultado já era esperado, dado que também as magnitudes das tensões por fase

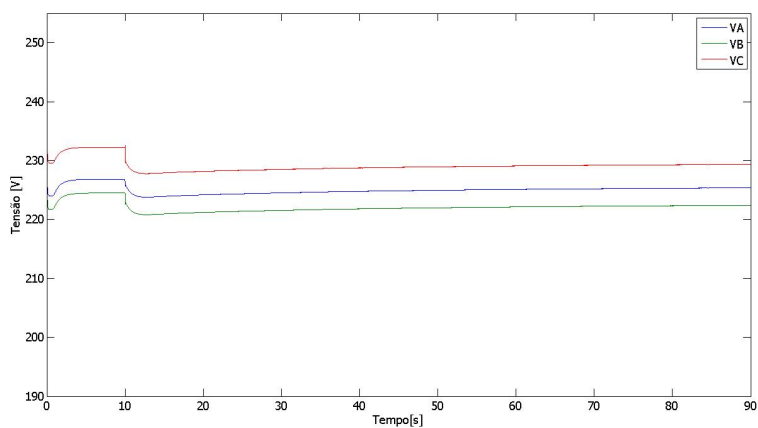


Figura 5.13: Tensão por fase no barramento 2 da MR, cenário urbano, 1 VSI, sem B.U.

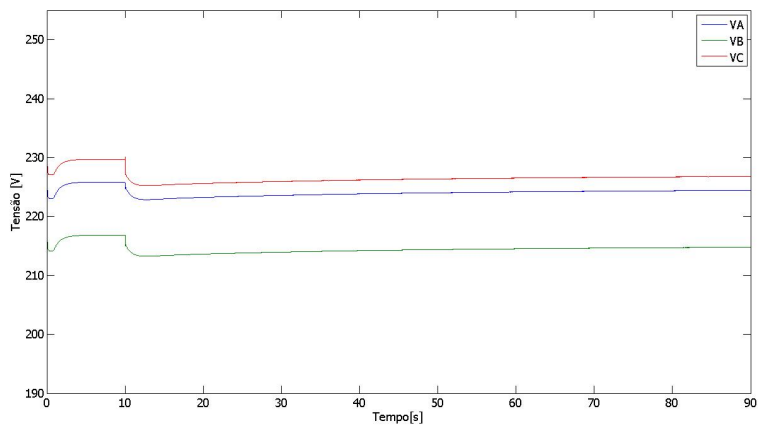


Figura 5.14: Tensão por fase no barramento 3 da MR, cenário urbano, 1 VSI, sem B.U.

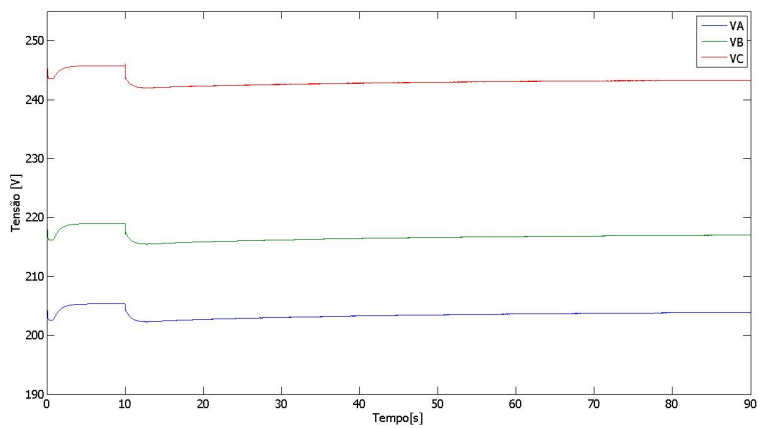


Figura 5.15: Tensão por fase no barramento 4 da MR, cenário urbano, 1 VSI, sem B.U.

estavam mais próximas do valor nominal. Todavia, atentando nos valores apurados, conclui-se que o valor da componente inversa do desequilíbrio no barramento 4 continua a ultrapassar os valores limite propostos na norma europeia DIN EN50160.

Tabela 5.9: Tabela resumo da componente inversa e homopolar dos desequilíbrios de tensão

Nó	(-)FDT (%)	(0)FDT (%)
1	0,885	0,535
2	1,162	1,477
3	1,489	2,008
4	2,184	9,013

Com as simulações efetuadas, comprova-se a necessidade de, em ambos os cenários, implementar estratégias de controlo e balanceamento de tensão, de forma a eliminar valores proibitivos de desequilíbrios de tensão na MR. Serão seguidamente incluídas unidades de balanceamento de tensão na MR, de modo a estudar os efeitos introduzidos por estas no que concerne o balanceamento de tensões. Esta análise será efetuada para ambos os cenários estudados (rural e urbano).

5.3.2 Inversor fonte de tensão, com unidade de balanceamento de tensão

Cenário rural - 1 unidade VSI com unidade de balanceamento de tensão Após incluir uma unidade de balanceamento de tensão no barramento de interligação com a rede de MT, simulou-se novamente a MR de teste.

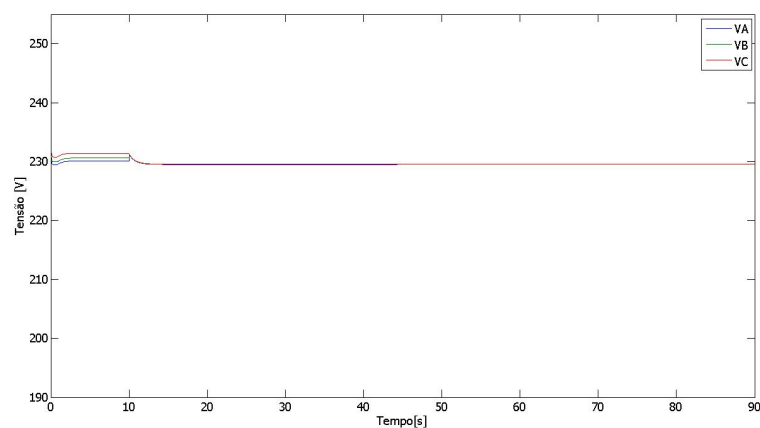


Figura 5.16: Tensão por fase no barramento 1 da MR, cenário rural, 1 VSI, com B.U.

Os gráficos representativos das tensões por fase podem ser consultados seguidamente. A diferença entre as tensões do cenário rural sem unidade de balanceamento de tensão (B.U) relativamente ao mesmo cenário com B.U. são muito pequenas. Na verdade, variam numa gama de cerca de 0-1 V, sendo que uma variação tão pequena não é considerada relevante.

Apesar de a introdução da unidade de balanceamento na MR não causar variações relevantes no valor das tensões da rede, espera-se que tenha efeitos apreciáveis no valor dos desequilíbrios

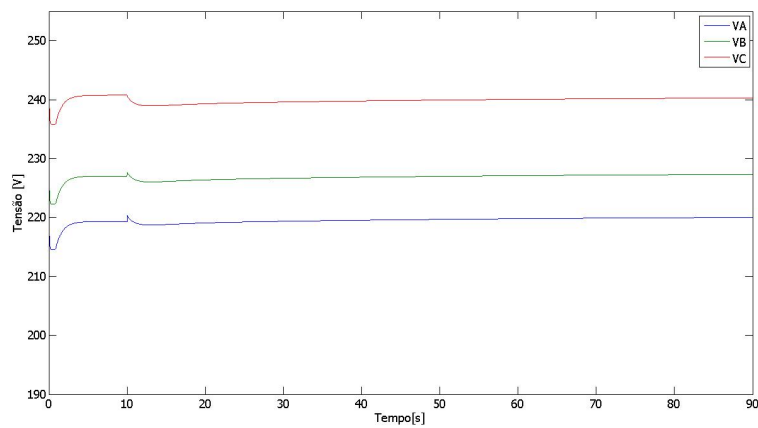


Figura 5.17: Tensão por fase no barramento 2 da MR, cenário rural, 1 VSI, com B.U.

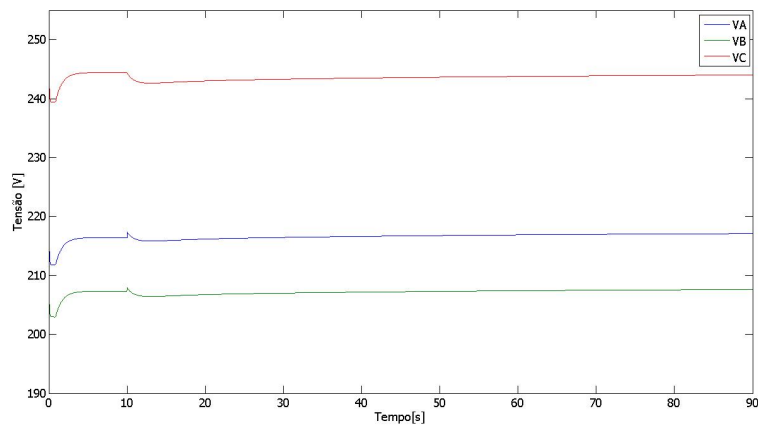


Figura 5.18: Tensão por fase no barramento 3 da MR, cenário rural, 1 VSI, com B.U.

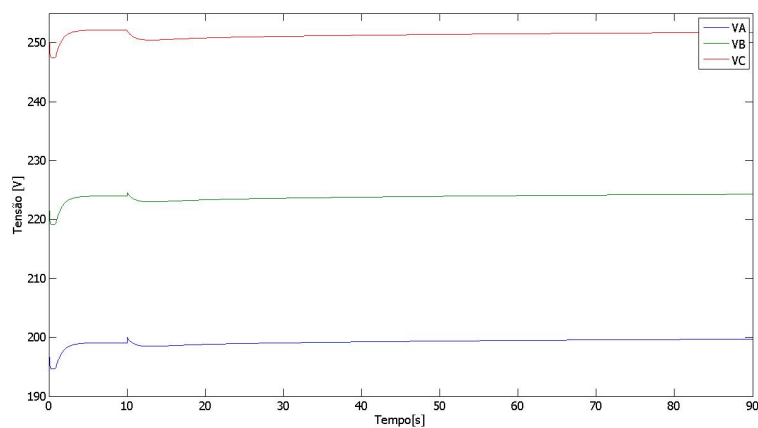


Figura 5.19: Tensão por fase no barramento 4 da MR, cenário rural, 1 VSI, com B.U.

verificados. Como tal, o fator FDT foi calculado para a componente inversa e homopolar. No caso estudado (cenário rural com presença de unidade de balanceamento de tensão), os desequilíbrios de tensão verificados são apresentados na tabela 5.10.

Tabela 5.10: Tabela resumo da componente inversa e homopolar dos desequilíbrios de tensão - unidade VSI com B.U.

Nó	(-)FDT (%)	(0)FDT (%)
1	0,012	0,010
2	1,142	4,046
3	2,464	7,556
4	2,731	10,481

Focando os valores da componente inversa dos desequilíbrios, e comparando os valores obtidos com os que se apresentaram na tabela 5.6 referentes a caso análogo sem B.U., verifica-se que houve uma diminuição do valor do desequilíbrio em todos os barramentos.

Os valores de desequilíbrio obtidos com e sem a presença da unidade de balanceamento de tensão para a componente inversa e homopolar da tensão, são apresentados na tabela 5.11.

Tabela 5.11: Comparação dos desequilíbrios de tensão do caso sem B.U. com o caso com B.U. (cenário rural)

Nó	(-)FDT (%) 1 VSI, sem BU	(-) FDT (%) 1 VSI, com BU	Diferença
1	0,838	0,012	0,826
2	1,529	1,142	0,387
3	2,979	2,464	0,515
4	2,876	2,731	0,145
Nó	(0)FDT (%) 1 VSI, sem BU	(0) FDT (%) 1 VSI, com BU	Diferença
1	0,811	0,010	0,801
2	4,126	4,046	0,080
3	7,208	7,556	-0,348
4	10,271	10,481	-0,210

O barramento 1, ao qual se acoplou a unidade de balanceamento, viu os seus desequilíbrios praticamente eliminados, tendo passado a ser um barramento trifásico equilibrado (não considerando os valores desprezáveis de desequilíbrio verificados nesse barramento). Este barramento passou portanto a apresentar valores desprezáveis, da componente inversa e homopolar da tensão.

Relativamente à componente inversa em particular, os restantes barramentos viram também o valor dos seus desequilíbrios diminuídos. Essa diminuição foi mais pronunciada no barramento 2, mais próximo da unidade VSI e da unidade de balanceamento. Nos barramentos 3 e 4, apesar de uma melhoria introduzida pela presença da B.U., continua a haver valores de desequilíbrios proibitivos.

À semelhança do que se verifica relativamente à unidade VSI, também o efeito da unidade de balanceamento de tensão é diluído ao longo da MR. O seu efeito é perentório no barramento ao qual se encontra acoplado, tendo sido capaz de eliminar os desequilíbrios da componente inversa e

homopolar ali existentes. Contudo nos restantes barramentos, este efeito torna-se menos pronunciado, fato que depende (entre outros) da impedância total presente entre a B.U e o barramento em questão. Quanto maior for esta última, mais atenuado será o efeito da B.U. no barramento.

Cenário urbano - 1 unidade VSI com unidade de balanceamento de tensão No cenário urbano foi também introduzida uma unidade de balanceamento de tensão no barramento de interligação, à semelhança do que se fez no cenário rural.

Também neste caso o valor das tensões por fase são muito idênticas ao caso em que não existia B.U. na MR. isto pode ser confirmado nos gráficos das tensões por fase seguidamente apresentados.

O fator FDT foi novamente calculado para a componente inversa e homopolar da tensão, para o cenário urbano presentemente tratado. Os valores calculados, estão ilustrados na tabela 5.12.

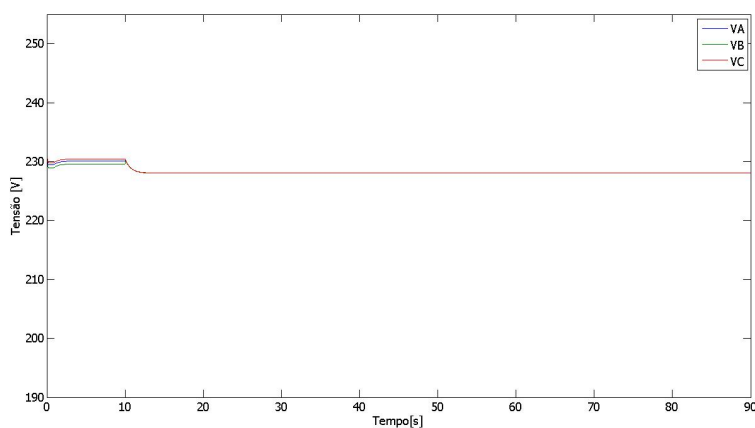


Figura 5.20: Tensão por fase no barramento 1 da MR, cenário urbano, 1 VSI, com B.U.

Como se verifica, à semelhança do que acontece no cenário rural com presença de B.U., há diminuição do valor da componente inversa dos desequilíbrios de tensão na MR, causada pela introdução da B.U..

Se forem comparados os valores dos desequilíbrios da componente inversa e homopolar da tensão do cenário urbano com e sem B.U., tal como foi feito para o cenário rural, algumas conclusões podem ser retiradas.

Tabela 5.12: Tabela resumo da componente inversa e homopolar dos desequilíbrios de tensão - unidade VSI com B.U.

Nó	(-)FDT (%)	(0)FDT (%)
1	0,011	0,006
2	0,597	1,333
3	0,992	2,234
4	2,104	8,681

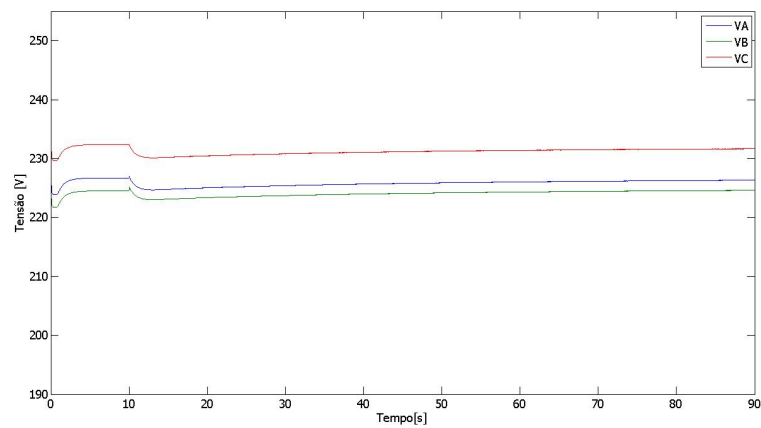


Figura 5.21: Tensão por fase no barramento 2 da MR, cenário urbano, 1 VSI, com B.U.

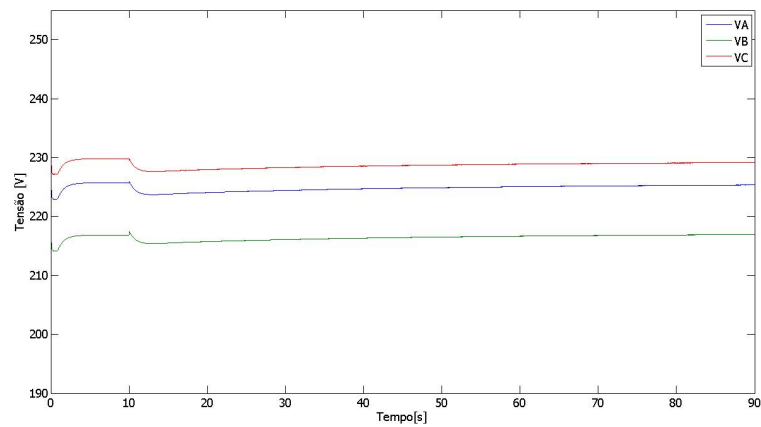


Figura 5.22: Tensão por fase no barramento 3 da MR, cenário urbano, 1 VSI, com B.U.

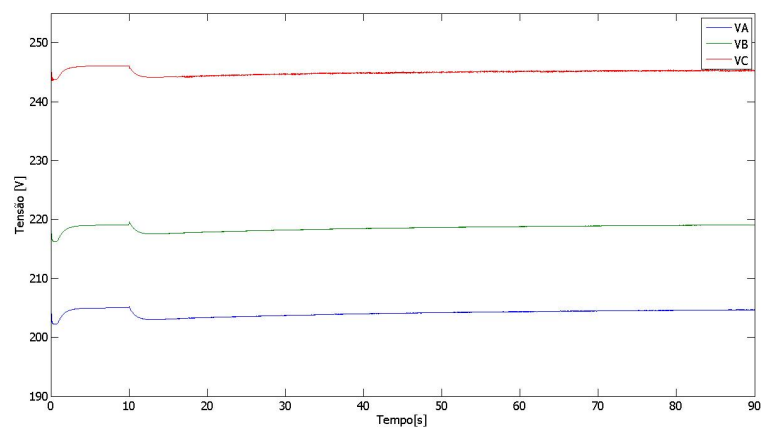


Figura 5.23: Tensão por fase no barramento 4 da MR, cenário urbano, 1 VSI, com B.U.

Atentando na tabela comparativa 5.13, verifica-se que há uma tendência análoga ao cenário rural. De fato, no barramento 1 o desequilíbrio de tensão foi também praticamente eliminado, tal como acontecia no cenário rural. Nos restantes barramentos houve uma diminuição da componente inversa do FDT, tal como anteriormente.

Tabela 5.13: Comparação dos desequilíbrios de tensão do caso sem B.U. com o caso com B.U. (cenário urbano)

Nó	(-)FDT (%) 1 VSI, sem BU	(-) FDT (%) 1 VSI, com BU	Diferença
1	0,885	0,01	0,875
2	1,162	0,597	0,565
3	1,489	0,992	0,497
4	2,184	2,104	0,080
Nó	(0)FDT (%) 1 VSI, sem BU	(0) FDT (%) 1 VSI, com BU	Diferença
1	0,535	0,006	0,529
2	1,477	1,333	0,144
3	2,008	2,234	-0,226
4	9,013	8,681	0,332

Dado que o cenário urbano é caracteristicamente menos desequilibrado do que o cenário rural, apenas um barramento se encontrava inicialmente com desequilíbrios de tensão proibitivos (barramento 4). Com a introdução da unidade de balanceamento no cenário urbano, esse valor foi diminuído. Contudo, não passou a estar dentro dos limites aceitáveis para a componente inversa dos desequilíbrios de tensão, dado que a influência da B.U. foi muito diminuta.

Após realizar uma análise análoga às componentes de interesse dos desequilíbrios de tensão no caso rural e urbano, comprova-se que existe de fato influência da unidade de balanceamento de tensão na correção dos desequilíbrios existentes na MR. Comprova-se ainda que a influência da B.U. é máxima no barramento em que se interliga (resolvendo o problema de desequilíbrio de tensão aí existente), e diminui ao longo da rede. A análise de desequilíbrios foi efetuada tanto para a componente inversa como homopolar. Todavia, a importância de cada uma para o funcionamento da MR, é bem diferente. A eliminação da componente inversa é preponderante ao correto funcionamento de certas cargas que possam existir na MR. A componente homopolar não prejudica o funcionamento da MR e das cargas a ela acopladas, pelo que a sua análise se torna secundária. A análise seguidamente referida, será por este motivo efetuada apenas para a componente inversa da tensão.

A tabela 5.14 compara a diminuição (causada pela introdução da unidade de balanceamento de tensão) dos valores da componente inversa dos desequilíbrios de tensão, verificada no cenário rural com a verificada no cenário urbano.

Da análise dos valores calculados, conclui-se que a influência da unidade de balanceamento de tensão existe em ambos os cenários. Na verdade, as melhorias introduzidas são da mesma ordem de grandeza.

O comportamento da MR depende do correto funcionamento da unidade VSI, dispositivo de

Tabela 5.14: Comparação da diminuição da componente inversa do desequilíbrio de tensão, causada pela introdução da B.U na MR, (cenário rural vs cenário urbano)

Nó	Cenário rural (%)	Cenário urbano (%)
1	0,826	0,875
2	0,387	0,565
3	0,515	0,497
4	0,146	0,081

armazenamento de energia e microturbina. Antes do isolamento, em regime permanente, a microturbina encontra-se a injetar um dado valor de potência, enquanto que a unidade VSI não faz qualquer injeção de potência ativa (visto que o desvio de frequência relativamente ao valor nominal é nulo).

Após o isolamento, a estratégia de controlo consiste em anular o erro em regime permanente de frequência, levando a que o VSI deixe de injetar potência ativa (droop control). As unidades controláveis (como a microturbina), são utilizadas para efetuar o re-despacho de potência.

Este comportamento pode ser representado pelas figuras 5.24 e 5.25, que correspondem respetivamente ao cenário rural e urbano, com presença de B.U.. Nos cenários rural e urbano em que não há B.U. integrada no barramento de interligação, o comportamento da unidade VSI e da microturbina é idêntico. Deste modo, não foi necessário representar esses gráficos.

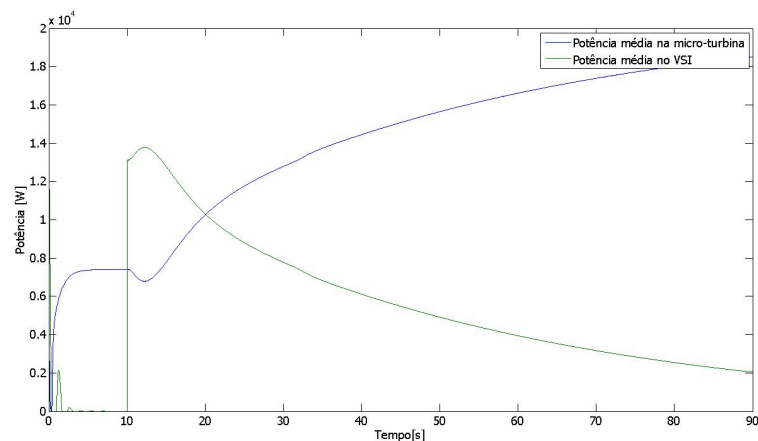


Figura 5.24: Comportamento da unidade VSI e microturbina após o isolamento (cenário rural com B.U.)

Nos momentos subsequentes ao isolamento, o dispositivo de armazenamento de energia acooplado à unidade VSI, deve equilibrar o balanço energético, injetando a potência necessária (que corresponde à potência que deixou de ser entregue pela rede a montante).

Entretanto, a microturbina vai aumentando a sua produção de modo a tomar a carga inicialmente providenciada pelo dispositivo de armazenamento de energia. Isto permite ao dispositivo diminuir a sua contribuição energética, até que, posteriormente, volte a não injetar potência ativa

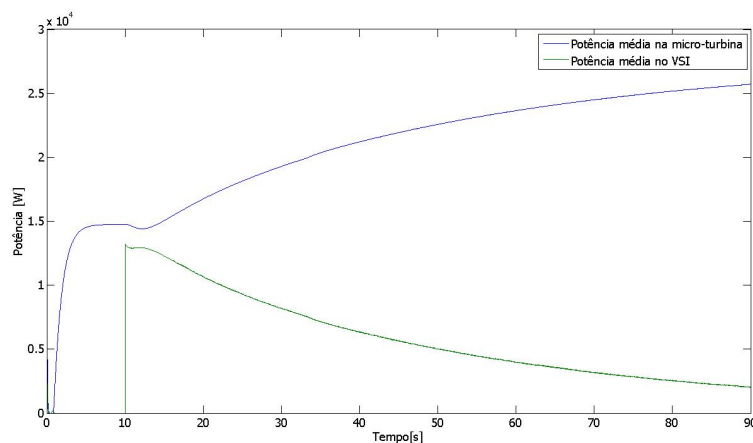


Figura 5.25: Comportamento da unidade VSI e microturbina após o isolamento (cenário urbano com B.U.)

na rede. Como se vê nas figuras 5.24 e 5.25, o comportamento descrito é verificado pela MR simulada, o que permite concluir que esta tem um funcionamento adequado e estável numa estratégia de controlo SMO.

5.4 Análise de resultados de estratégias de operação MMO

Este ponto serve para analisar as estratégias de controlo e balanceamento de tensão aplicadas numa rede operado com base em estratégias MMO.

Nos testes efetuados, e à semelhança do que se fez nas simulações anteriores, começa-se por analisar o caso em que não existe qualquer unidade de balanceamento de tensão presente. De forma análoga, começa-se por analisar o cenário rural e seguidamente passa-se à análise do caso urbano.

O principal objetivo destas simulações, é o de comparar os resultados de estratégias de controlo SMO e MMO, verificando quais são efetivamente as vantagens da introdução de mais uma unidade VSI na MR (no barramento 4, mais especificamente).

Seguidamente simulam-se os mesmos cenários, com a introdução da unidade de balanceamento de tensão no nó de interligação com a rede de MT. Foi acrescentada apenas uma unidade deste tipo à MR. Esta foi introduzida no barramento de interligação, pois é comum implementar este dispositivo nessa zona da rede. A razão pela qual isso acontece, prende-se com o fato de se pretender reproduzir em modo isolado, o comportamento que o barramento apresenta em modo interligado, relativamente às características de equilíbrio de tensão.

5.4.1 Inversores fonte de tensão, sem unidade de balanceamento de tensão

Cenário rural - 2 unidades VSI A simulação inicialmente efetuada com base na estratégia de controlo MMO, utiliza duas unidades VSI. A primeira encontra-se localizada no barramento

de interligação, tal como acontecia na estratégia SMO, enquanto que a segunda foi colocada no barramento 4.

Após simular o cenário rural com a estratégia proposta, as tensões por fase encontradas em cada barramento, foram as que se mostram nas imagens seguintes.

Verifica-se que estas continuam a estar muito próximas dos 230 V no barramento 1, tal como acontecia no caso com apenas uma unidade VSI, derivado da presença desse inversor no referido barramento. Da mesma forma que o inversor é capaz de impor tensões próximas do valor nominal no barramento 1, também a unidade VSI presente no barramento 4 teve o mesmo efeito. A existência de barramentos mais equilibrados, influencia as tensões de outros (mais desequilibrados), que se encontrem nas proximidades. Como tal, e devido à proximidade dos barramentos 1 e 4, os barramentos 2 e 3 passaram a ter tensões por fase mais próximas entre si.

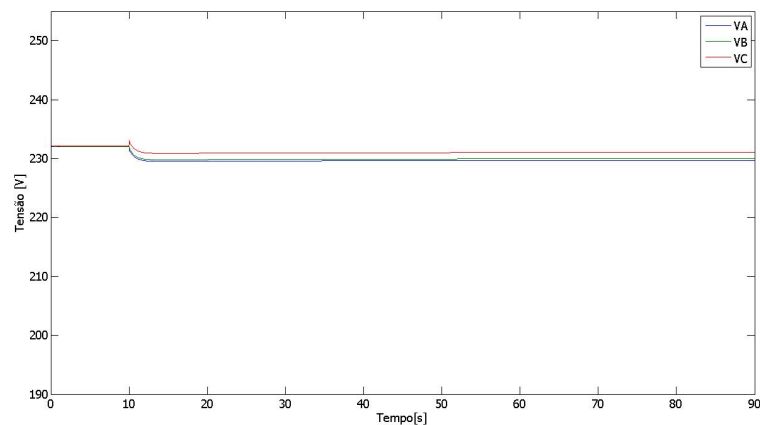


Figura 5.26: Tensão por fase no barramento 1 da MR, cenário rural, 2 VSI, sem B.U.

Contudo, o efeito foi menos sentido no barramento 3, dado que este se encontra mais afastado do que o barramento 2 relativamente aos barramentos 1 e 4. Em suma, a introdução da segunda unidade VSI na MR, teve um efeito positivo sobre as tensões por fase. Este efeito, como se verificou já nas estratégias SMO, dilui-se contudo ao longo da MR.

Quanto ao FDT, os valores calculados para a componente inversa e homopolar da tensão, são os apresentados na tabela 5.15.

Quando comparados com o cenário rural apenas com uma unidade VSI, os valores de desequilíbrio sofreram uma diminuição. Como seria de esperar, a adição de uma segunda unidade VSI, melhorou a qualidade de tensão da MR em todos os aspetos.

Na tabela 5.16, expõem-se os valores do FDT de ambos os cenários comparados. Facilmente se percebe que a introdução da segunda unidade VSI na MR, induziu melhorias notórias, no que diz respeito aos desequilíbrios calculados.

O barramento mais beneficiado pela unidade VSI acrescentada à MR, face ao mesmo cenário com apenas uma destas unidades, foi o barramento 4. Este barramento passou a contar com valores de desequilíbrio bastante baixos, quando inicialmente era dos barramentos que sofria de

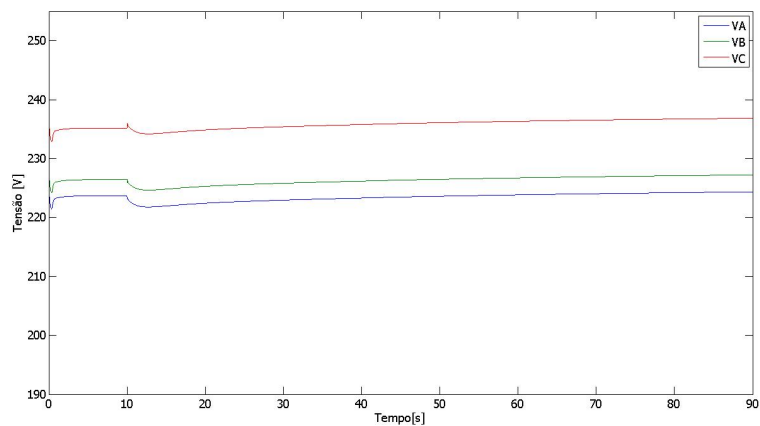


Figura 5.27: Tensão por fase no barramento 2 da MR, cenário rural, 2 VSI, sem B.U.

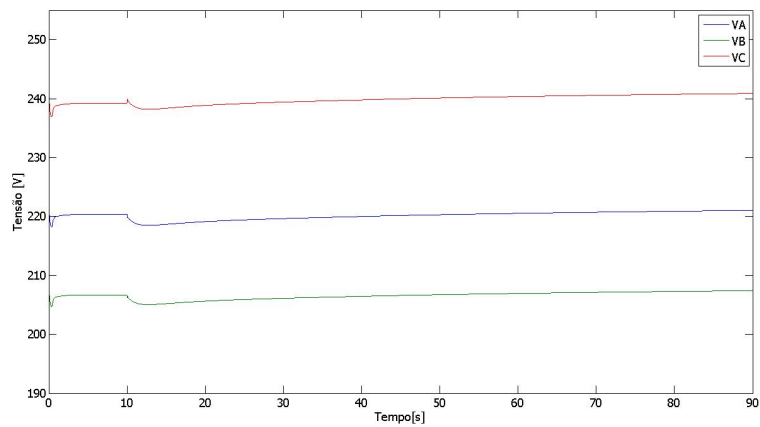


Figura 5.28: Tensão por fase no barramento 3 da MR, cenário rural, 2 VSI, sem B.U.

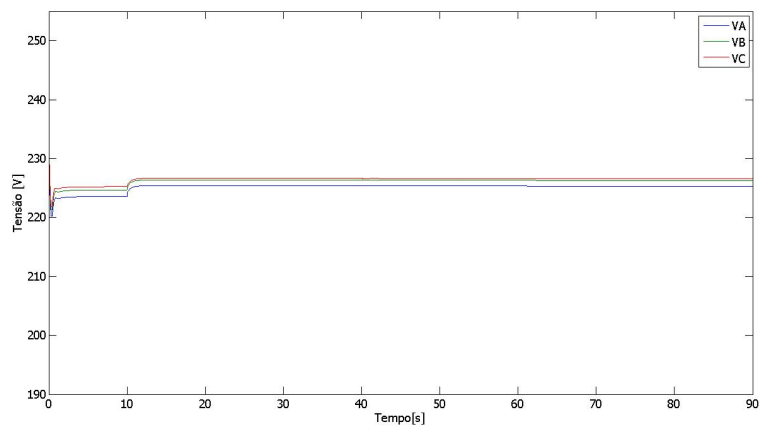


Figura 5.29: Tensão por fase no barramento 4 da MR, cenário rural, 2 VSI, sem B.U.

maiores desequilíbrios e violava a norma europeia estabelecida. Ao encontro do que se tem referido, também o barramento 2 teve uma descida de desequilíbrios significativa, principalmente na componente homopolar, derivado da sua proximidade aos barramentos 1 e 4.

Ao adotar uma estratégia MMO, conseguiram-se valores bastante mais baixos para os desequilíbrios de tensão em toda a rede. Os resultados da estratégia SMO no cenário rural, apresentavam dois barramentos (barramentos 3 e 4) que violavam a norma europeia DIN EN50160. Com a adoção de estratégias MMO e a introdução da segunda unidade VSI no barramento 4, toda a MR passou a respeitar os limites impostos pela referida norma, exceto o barramento 3. A estratégia MMO revela-se neste caso extremamente eficiente no que concerne a eliminação de desequilíbrios de tensão.

Tabela 5.15: Tabela resumo da componente inversa e homopolar dos desequilíbrios de tensão - cenário rural com 2 unidades VSI

Nó	(-)FDT (%) 2 VSI, sem BU	(0) FDT (%) 2 VSI, sem BU
1	0,490	0,435
2	0,894	2,441
3	2,323	6,508
4	0,497	0,603

Tabela 5.16: Comparação dos desequilíbrios da componente inversa e homopolar da tensão, entre o cenário rural, com 1 e 2 unidades VSI

Nó	(-)FDT (%) 1 VSI, sem BU	(-) FDT (%) 2 VSI, sem BU	Diferença
1	0,837	0,490	0,347
2	1,529	0,894	0,635
3	2,979	2,323	0,656
4	2,876	0,497	2,379
Nó	(0)FDT (%) 1 VSI, sem BU	(0) FDT (%) 2 VSI, sem BU	Diferença
1	0,811	0,435	0,376
2	4,126	2,441	1,685
3	7,208	6,508	0,700
4	10,271	0,603	9,668

Com a introdução da segunda unidade VSI na MR, a carga nos momentos subsequentes ao isolamento passa a ser partilhada pelos dois dispositivos de armazenamento de energia, acoplados ao respetivo inversor. Um gráfico da potência ativa à saída de cada inversor, pode ser visto na figura 5.30.

Como se pode observar, a unidade acoplada ao barramento de interligação, toma mais carga do que a unidade acoplada ao barramento 4. Isto deve-se aos parâmetros que definem o modelo de cada unidade VSI na ferramenta de simulação, e mais concretamente ao parâmetro que define o droop de potência-frequência. Os parâmetros utilizados, podem ser consultados no anexo do documento. A segunda unidade VSI foi modelizada propositadamente de modo a que a sua potência máxima fosse mais baixa, dado encontrar-se na extremidade da MR, que é uma zona mais fraca

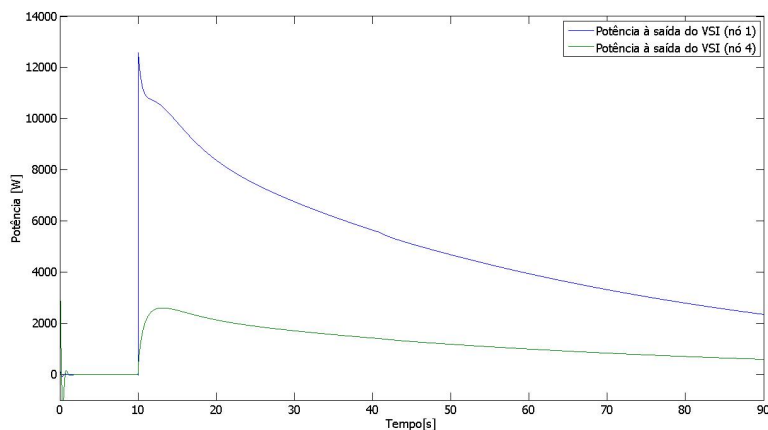


Figura 5.30: Potência à saída das unidades VSI - cenário rural

da mesma. Visto que as linhas da MR são extremamente resistivas (especialmente a linha que liga o barramento 2 ao barramento 4), a injeção de potência ativa por parte do inversor pode causar perturbações na tensão da rede. Assim, por questões técnicas, numa situação real (que é o que a criação do cenário pretende simular), dificilmente se permitiriam elevados valores de integração de MG no referido barramento.

Cenário urbano - 2 unidades VSI O cenário urbano foi também simulado com a inclusão de uma segunda unidade VSI, localizada no barramento 4. As tensões por fase obtidas neste caso, apresentam-se nas imagens seguintes.

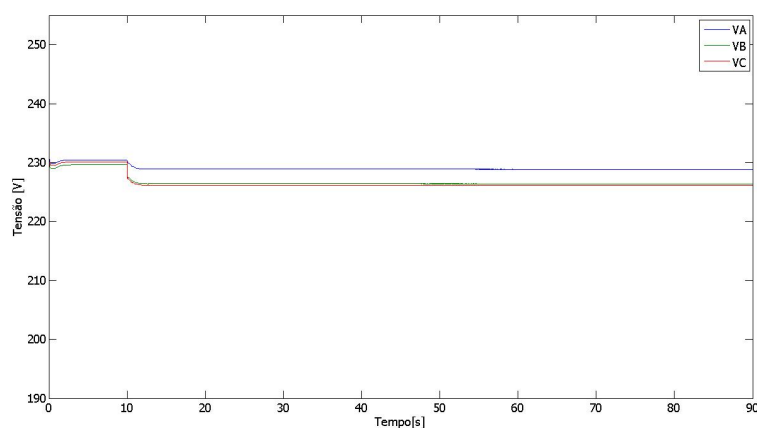


Figura 5.31: Tensão por fase no barramento 1 da MR, cenário urbano, 2 VSI, sem B.U.

Quando se comparam os valores de tensão do cenário urbano com uma unidade VSI, com o mesmo cenário com 2 unidades VSI, tiram-se algumas conclusões.

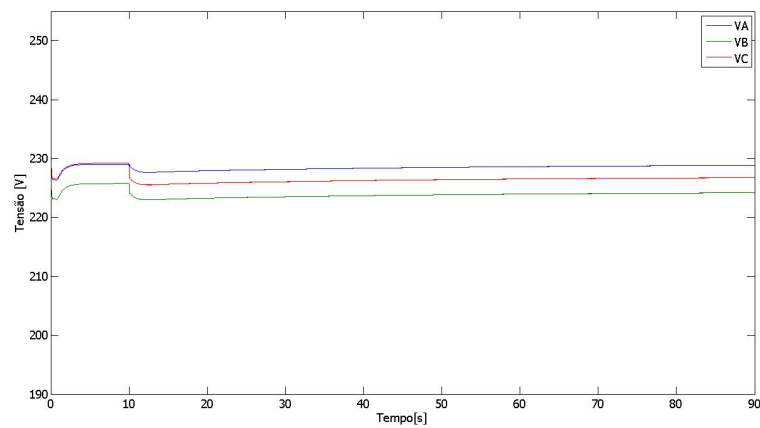


Figura 5.32: Tensão por fase no barramento 2 da MR, cenário urbano, 2 VSI, sem B.U.

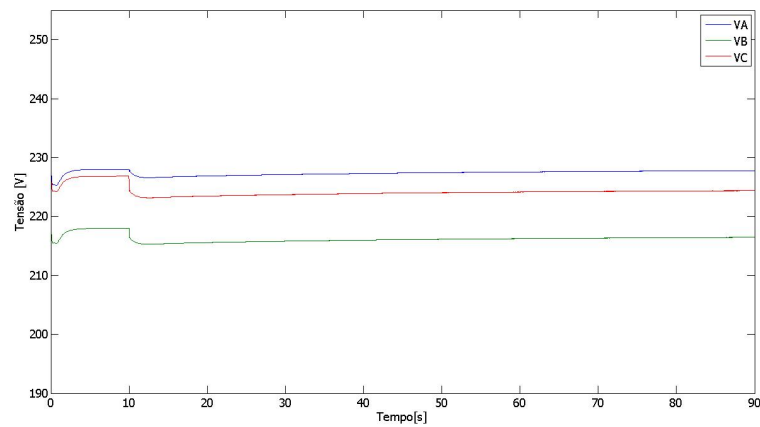


Figura 5.33: Tensão por fase no barramento 3 da MR, cenário urbano, 2 VSI, sem B.U.

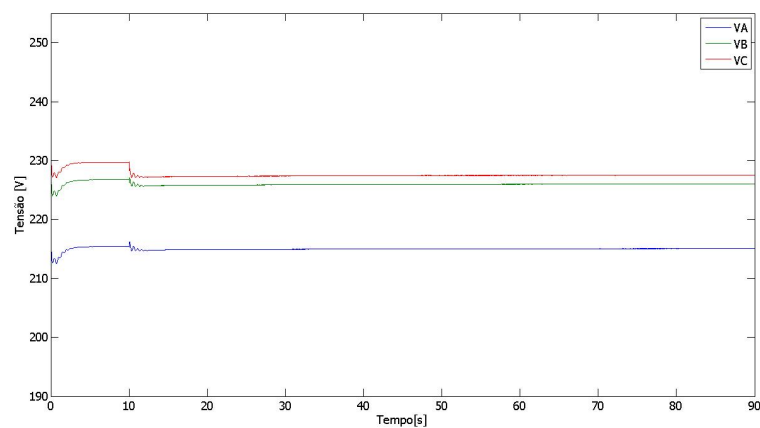


Figura 5.34: Tensão por fase no barramento 4 da MR, cenário urbano, 2 VSI, sem B.U.

No barramento 1, as tensões continuam dentro da mesma gama de valores, dado que existe uma unidade VSI acoplada a esse barramento em ambos os casos, com uma influência similar sobre as mesmas. No barramento 2 e 3, as diferenças não são grandes quando comparadas com o caso em que há apenas uma unidade VSI. No entanto, apesar de pouco significativa, houve uma aproximação das tensões por fase ao valor nominal de tensão da MR. Também no barramento 4 os perfis de tensão se alteraram de forma análoga. Todavia neste último barramento, esta melhoria foi mais acentuada, consequência da segunda unidade VSI acoplada.

Em relação ao FDT para este caso, os resultados para a componente inversa e homopolar são representado na tabela 5.17. Como se verifica, o barramento 4 passou a estar dentro dos limites admissíveis, relativamente à componente inversa dos desequilíbrios.

Tabela 5.17: Tabela resumo da componente inversa e homopolar dos desequilíbrios de tensão - cenário urbano com 2 unidades VSI

Nó	(-)FDT (%) 2 VSI, sem BU	(0) FDT (%) 2 VSI, sem BU
1	0,816	0,052
2	1,077	0,197
3	1,352	1,663
4	1,871	4,428

Tabela 5.18: Comparação dos desequilíbrios da componente inversa e homopolar da tensão, entre o cenário urbano, com 1 e 2 unidades VSI

Nó	(-)FDT (%) 1 VSI, sem BU	(-) FDT (%) 2 VSI, sem BU	Diferença
1	0,885	0,816	0,069
2	1,162	1,077	0,085
3	1,489	1,352	0,137
4	2,184	1,871	0,313
Nó	(0)FDT (%) 1 VSI, sem BU	(0) FDT (%) 2 VSI, sem BU	Diferença
1	0,535	0,052	0,483
2	1,477	0,197	1,280
3	2,008	1,663	0,345
4	9,013	4,428	4,585

Da análise da tabela 5.18, retiram-se conclusões quanto à influência da presença da segunda unidade VSI, nos desequilíbrios de tensão da MR. De fato, a aplicação de uma estratégia MMO atenuou os desequilíbrios da MR. À semelhança do que aconteceu no cenário rural, também no cenário urbano as componentes homopolar e inversa foram diminuídas devido à introdução da segunda unidade VSI na MR.

A estratégia MMO demonstra em dois cenários de operação diferentes, resultados positivos. Em ambos os cenários foi capaz de limitar os desequilíbrios a valores admissíveis, nos barramentos em que tal não sucedia.

À semelhança do que acontece no cenário rural, também no cenário urbano, operado com a estratégia de controlo MMO, as unidades VSI partilham carga entre si nos momentos subsequentes

ao isolamento da MR. Pelos mesmos motivos apontados no cenário rural, essa distribuição não é proporcional, sendo que a unidade VSI (e respetivo dispositivo de armazenamento de energia) acoplada ao barramento de interligação, toma a maior percentagem de carga.

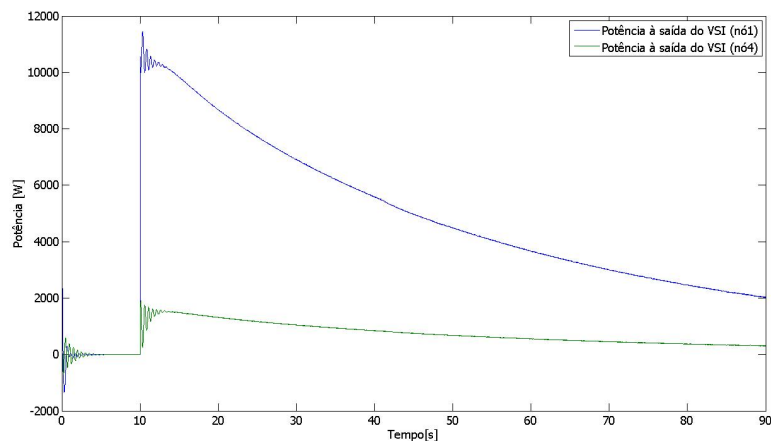


Figura 5.35: Potência à saída das unidades VSI - cenário urbano

A partilha de potência ativa efetuada pelas unidades no cenário urbano, pode ser consultada na figura 5.35.

5.4.2 Inversores fonte de tensão, com unidade de balanceamento de tensão

Cenário rural - 2 unidades VSI Inicialmente a estratégia MMO foi testada na MR através da adição de uma segunda unidade VSI, acoplada ao barramento 4, sem presença adicional de unidades de balanceamento de tensão em nenhum barramento da MR. Como se verificou, esta estratégia resolveu os problemas de desequilíbrio de tensão do cenário rural, em toda a MR, exceto no barramento 3.

Apesar de se respeitarem a maioria dos limites referidos na norma europeia DIN EN50160, existe a possibilidade de acrescentar uma unidade de balanceamento à MR (neste caso, no barramento de interligação). O objetivo é o de verificar se as condições de desequilíbrio de tensão conseguem ser, ainda assim, melhoradas perante o caso com duas unidades VSI em que não se utilizam unidades de balanceamento.

Tabela 5.19: Tabela resumo da componente inversa e homopolar dos desequilíbrios de tensão - cenário rural, 2 unidades VSI, com B.U.

Nó	(-)FDT (%) 2 VSI, com BU	(0) FDT (%) 2 VSI, com BU
1	0	0
2	0,688	2,333
3	2,049	6,643
4	0,488	0,594

As tensões por fase nos barramentos da MR, são apresentadas nas seguintes imagens.

Observa-se que estas sofreram alterações desprezáveis relativamente ao caso análogo sem unidade de balanceamento, excetuando o barramento em que a unidade de balanceamento foi efetivamente implementada. É de referir que as tensões por fase nesse barramento passaram a ter exatamente a mesma magnitude entre elas, como se vê pela imagem 5.36.

Os desequilíbrios de tensão (FDT) medidos na MR utilizando a estratégia proposta, são os apresentados na tabela 5.19. Para se poder avaliar a contribuição da unidade de balanceamento de tensão adicionada à MR, é necessário comparar os valores de desequilíbrio medidos no caso em que apenas se implementaram 2 unidades VSI com os valores em que se adiciona a unidade de balanceamento de tensão a esse modo de operação.

A tabela 5.20 compara os valores entre ambas as soluções. Atentando nos valores expostos, conclui-se que a introdução da unidade de balanceamento de tensão no barramento de interligação, é benéfica para o adequado balanceamento de tensão da MR.

Tabela 5.20: Comparação dos desequilíbrios da componente inversa e homopolar da tensão, entre o cenário rural com 2 unidades VSI, com e sem B.U.

Nó	(-)FDT (%) 2 VSI, sem BU	(-) FDT (%) 2 VSI, com BU	Diferença
1	0,490	0	0,490
2	0,894	0,688	0,206
3	2,323	2,049	0,274
4	0,497	0,488	0,009
Nó	(0)FDT (%) 2 VSI, sem BU	(0) FDT (%) 2 VSI, com BU	Diferença
1	0,435	0	0,435
2	2,441	2,333	0,108
3	6,508	6,643	-0,135
4	0,603	0,594	0,009

O efeito da B.U. foi mais notório no barramento a que esta foi acoplada (neste caso, barramento 1), eliminando por completo os desequilíbrios previamente existentes naquele ponto da MR.

A aplicação de uma unidade de balanceamento de tensão traz benefícios para qualquer MR, apesar de em certos pontos da mesma poder ter uma influência negativa ou inexistente. No caso presentemente estudado, o valor dos desequilíbrios encontrava-se já de acordo com o valor mencionado como sendo máximo na norma europeia DIN EN50160, excetuando o barramento 3. Estes foram ainda assim diminuídos pela introdução da unidade de balanceamento. A aplicação da B.U. reduz, na generalidade dos casos, a componente inversa e homopolar da tensão em toda a MR, melhorando indubitavelmente a qualidade de tensão da mesma.

Cenário urbano - 2 unidades VSI A análise do efeito que uma unidade de balanceamento de tensão tem nos desequilíbrios de uma MR, foi feita relativamente ao cenário rural. Todavia, é de interesse descobrir se, perante condições de funcionamento diferentes, a B.U. introduz as mesmas melhorias. Para tal, simula-se a MR com duas unidades VSI e uma unidade de balanceamento de

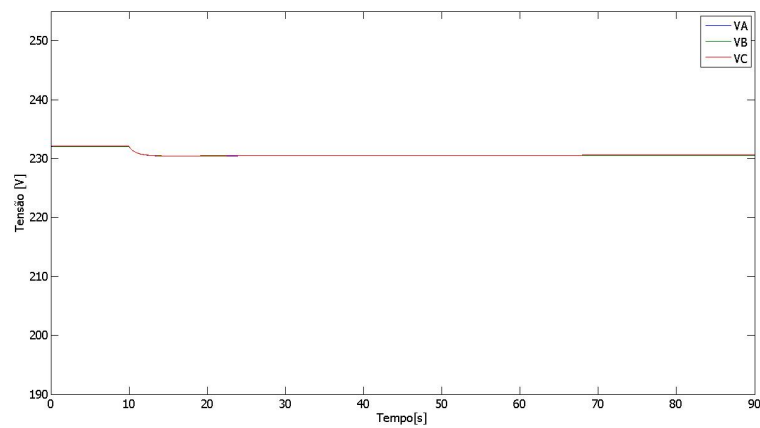


Figura 5.36: Tensão por fase no barramento 1 da MR, cenário rural, 2 VSI, com B.U.

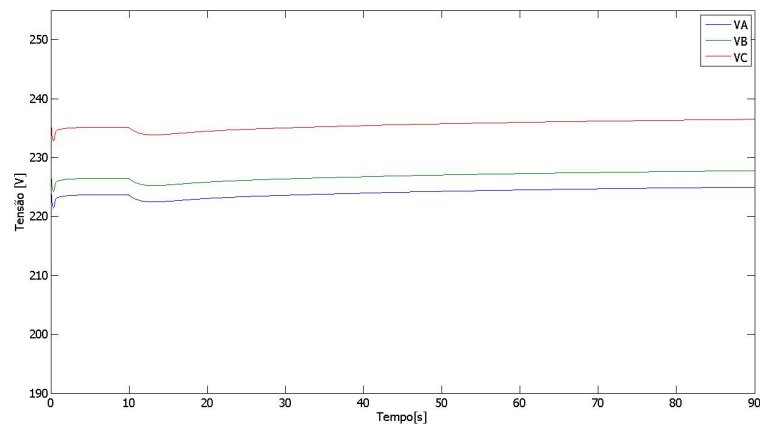


Figura 5.37: Tensão por fase no barramento 2 da MR, cenário rural, 2 VSI, com B.U.

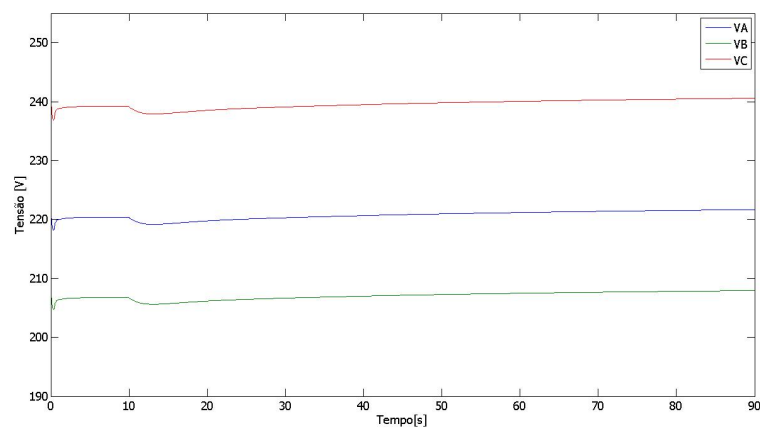


Figura 5.38: Tensão por fase no barramento 3 da MR, cenário rural, 2 VSI, com B.U.

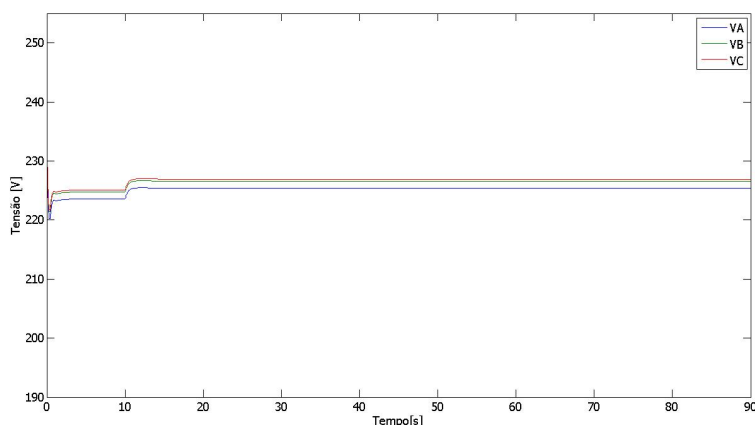


Figura 5.39: Tensão por fase no barramento 4 da MR, cenário rural, 2 VSI, com B.U.

tensão (colocada no barramento de interligação) no cenário urbano, à semelhança do que se faz para o cenário rural.

O cenário urbano respeita os valores limite para os desequilíbrios de tensão, quando simulado em estratégia MMO sem B.U.. Ainda assim, é mais uma vez de interesse verificar quais as melhorias introduzidas pelo acrescento da unidade de balanceamento ao barramento 1 da MR.

Com o propósito de avaliar esta solução, os gráficos das tensões por fase são apresentados nas próximas imagens, à semelhança do que se tem vindo a fazer.

Comparando os gráficos do caso em que não se implementou a B.U. no barramento 1 e o caso em que isso foi efetuado, retiram-se conclusões análogas às que se retiraram no cenário rural. De fato, o barramento 1 (onde se implementou a B.U.) passou a ter tensões por fase muito próximas entre si, e de valor praticamente igual a 230 V. Tal também sucedeu no cenário rural, em situação análoga.

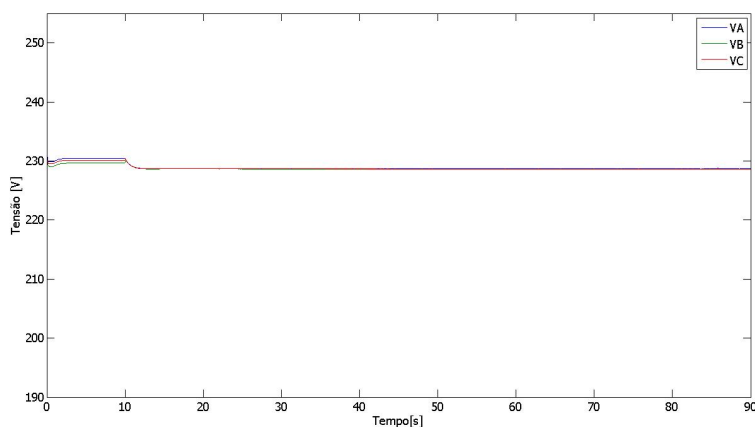


Figura 5.40: Tensão por fase no barramento 1 da MR, cenário urbano, 2 VSI, com B.U.

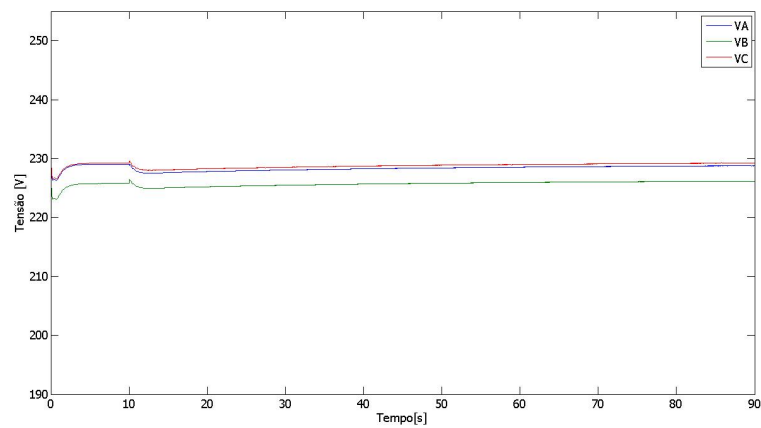


Figura 5.41: Tensão por fase no barramento 2 da MR, cenário urbano, 2 VSI, com B.U.

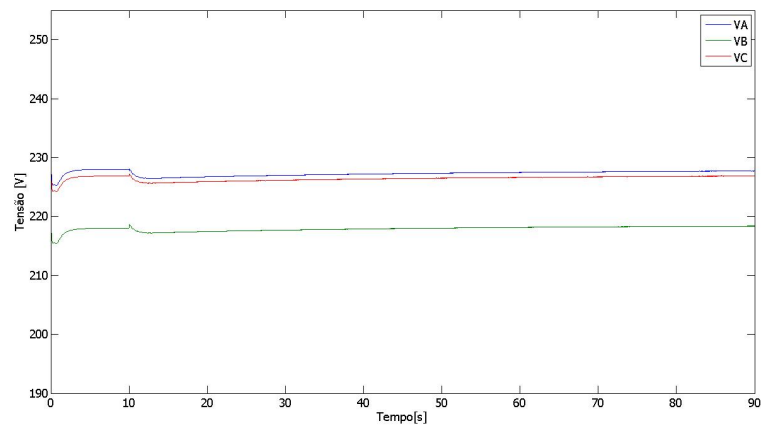


Figura 5.42: Tensão por fase no barramento 3 da MR, cenário urbano, 2 VSI, com B.U.

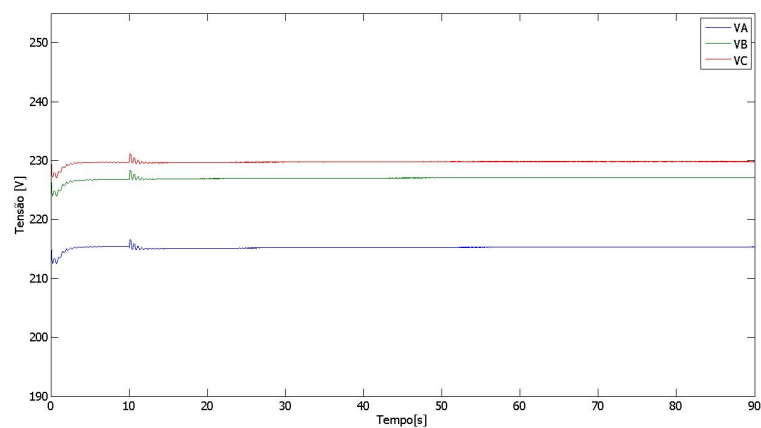


Figura 5.43: Tensão por fase no barramento 4 da MR, cenário urbano, 2 VSI, com B.U.

Relativamente ao FDT, os resultados obtidos, são seguidamente expostos na tabela 5.21. Além desta, também se apresenta uma tabela comparativa entre o cenário urbano com 2 unidades VSI (MMO) sem presença de uma B.U. e o mesmo cenário com presença de uma B.U..

Tabela 5.21: Tabela resumo da componente inversa e homopolar dos desequilíbrios de tensão - cenário urbano, 2 unidades VSI, com B.U.

Nó	(-)FDT (%) 2 VSI, com BU	(0) FDT (%) 2 VSI, com BU
1	0	0
2	0,607	0,217
3	1,011	1,724
4	1,956	4,295

Tabela 5.22: Comparação dos desequilíbrios da componente inversa e homopolar da tensão, entre o cenário urbano com 2 unidades VSI, com e sem B.U.

Nó	(-)FDT (%) 2 VSI, sem BU	(-) FDT (%) 2 VSI, com BU	Diferença
1	0,816	0	0,816
2	1,077	0,607	0,470
3	1,352	1,011	0,341
4	1,871	1,956	-0,085
Nó	(0)FDT (%) 2 VSI, sem BU	(0) FDT (%) 2 VSI, com BU	Diferença
1	0,053	0	0,053
2	0,197	0,217	-0,020
3	1,663	1,724	-0,061
4	4,428	4,295	0,133

Analisando a tabela 5.22, conclui-se que a introdução da unidade de balanceamento de tensão melhorou os valores de desequilíbrio existentes na rede. A maior melhoria deu-se no barramento onde a unidade de balanceamento foi instalada. Contudo também os barramentos 2 e 3 obtiveram uma melhoria dos desequilíbrios de tensão aos seus terminais, devido à unidade de balanceamento acrescentada à MR.

Neste caso específico, nota-se que o barramento 4 se manteve sensivelmente na mesma, no que diz respeito à correção de desequilíbrios. O fato de ser um barramento produtor, e de já contar com a influência de uma unidade VSI, pode fazer com que o efeito da B.U. não seja sentido. Além disso, trata-se de um barramento que se encontra na extremidade da rede, ligado por uma linha bastante resistiva. Pode acontecer em certas condições, que a implementação de uma unidade de balanceamento de tensão num dado ponto da rede, tenha uma influência negativa ou simplesmente não tenha influência nas tensões e desequilíbrios de um dado barramento.

Pode no entanto afirmar-se que, pelo menos no barramento em que se encontra instalada, a B.U. tem um efeito pronunciado e positivo no equilíbrio de tensões. Este efeito estende-se geralmente aos nós vizinhos.

5.5 Sumário e conclusões

Ao longo deste capítulo foram simuladas e avaliadas diversas estratégias de controlo e balanceamento de tensão. Os resultados daí obtidos, foram analisados de modo a permitir retirar conclusões quanto ao comportamento de cada estratégia estudada. Oportunamente ao longo do capítulo, retiraram-se conclusões e fizeram-se comparações entre diversas soluções.

Foi dada especial atenção às tensões por fase, e aos desequilíbrios de tensão presentes na MR. A variação destas grandezas, foi a base da análise qualitativa feita a cada solução estudada.

Estudaram-se essencialmente dois cenários, rural e urbano, operados com estratégias SMO e MMO. Em determinados casos de estudo foram também incluídas unidades de balanceamento de tensão, e o seu efeito no comportamento dos desequilíbrios de tensão foi alvo de análise.

Entre as principais conclusões, destaca-se o fato de ser possível corrigir eventuais problemas de tensão na MR com recurso às estratégias estudadas. Todavia, apesar de estas permitirem corrigir o problema localmente, nem sempre são capazes de o eliminar em todos os pontos da MR simultaneamente.

Capítulo 6

Conclusões e futuros desenvolvimentos

6.1 Conclusões

A crescente integração de PD em geral, e MG em particular, trouxe novas vantagens, mas também desafios aos SEE. Em resultado da mudança de paradigma causada pela crescente integração de MG nas redes de BT, surgiu o conceito de MR. Esta abordagem traz numerosas vantagens, por diversos motivos. A redução de perdas de transporte, a capacidade de funcionamento em modo isolado, e o consequente aumento da fiabilidade do sistema são algumas das principais vantagens. Além disto, a MR é também uma célula que permite conferir grande flexibilidade de operação a uma rede de distribuição de baixa tensão com micro-geração.

Em modo isolado, a MR deve funcionar de forma autónoma, sendo obrigada a garantir os padrões de qualidade de serviço. Dado que nesse modo de funcionamento esta tem características totalmente diferentes do caso em que se encontra interligada com o SEE, também as estratégias de controlo passíveis de serem utilizadas são diferentes. A justificar este fato vem, por exemplo, a inexistência de geradores síncronos capazes de efetuar controlo de tensão e frequência, a predominância de MF acopladas à rede através de dispositivos de eletrónica de potência, ou a grande diminuição de potência de curto-circuito verificada aquando do isolamento.

O controlo de tensão é um dos maiores desafios operacionais da MR. O objetivo do último capítulo, foi o de avaliar estratégias de controlo e balanceamento de tensão que permitam controlar o valor dos desequilíbrios de tensão em MR, durante o funcionamento em modo isolado. Para tal, foram enunciadas e descritas diversas estratégias atualmente existentes e identificadas as que se adotaram nesta dissertação.

Foram criados dois cenários distintos. Estes pretendem simular condições de funcionamento diferentes, testando a capacidade de cada solução, numa MR com características rurais ou urbanas. Cada cenário foi testado com estratégias de operação SMO e MMO. A cada caso estudado, foi ainda acrescentada uma unidade de balanceamento de tensão (sempre no barramento de interligação).

Com base nos cenários referidos, foram testadas diversas soluções possíveis, analisaram-se e compararam-se as melhorias introduzidas por cada uma, e identificaram-se os principais pontos

fortes e fracos de cada estratégia, pretendendo-se analisar o respetivo desempenho em diversas condições de operação.

Relativamente às estratégias SMO, tanto no cenário rural como no urbano verificou-se que existiam desequilíbrios de tensão preocupantes, em resultado do desequilíbrio de carga existente, mas também pela introdução de produção monofásica. A existência de problemas de desequilíbrios de tensão na MR foi desta forma comprovada, assim como a necessidade de encontrar soluções capazes de suplantarem os mesmos. Ficou no entanto claro em ambos os cenários que o barramento ao qual se encontra acoplada a unidade VSI, apresenta baixos valores de desequilíbrio, devido à influência que o inversor tem no seu perfil de tensão.

Com o intuito de verificar qual o efeito da localização da unidade VSI, alterou-se esta do barramento de interligação, para o barramento imediatamente a jusante na MR (barramento 2). Este teste foi apenas efetuado para um dos cenários (neste caso, o cenário rural), por se entender que uma análise similar para o cenário urbano, não acrescentaria nada de novo às conclusões retiradas. A alteração da localização do inversor, permitiu concluir que a maior proximidade deste aos restantes barramentos, diminuiu os desequilíbrios na MR. No caso do barramento 4, a influência desta alteração foi até suficiente para que a norma europeia DIN EN50160 passasse a ser cumprida. Estes resultados demonstram que a existência da unidade VSI nos desequilíbrios de tensão é positiva. Mostra-se ainda que a proximidade do inversor ao barramento desequilibrado, está relacionada com a capacidade de este combater os desequilíbrios aí existentes.

Ainda relativamente às estratégias SMO, acrescentou-se uma unidade de balanceamento de tensão ao barramento de interligação, com o intuito de verificar os efeitos desta no comportamento dos desequilíbrios em toda a MR. No barramento ao qual se liga a unidade de balanceamento, o efeito é perentório e elimina todos os desequilíbrios existentes. Tanto no cenário rural como no urbano, observou-se uma diminuição generalizada dos desequilíbrios nos restantes barramentos da MR. Essa diminuição foi menos sentida, em ambos os cenários, nos barramentos mais afastados dos inversores fonte de tensão. Isto demonstra que tanto a unidade VSI como a unidade de balanceamento de tensão vêm o seu efeito diminuído por impedâncias elevadas e distâncias longas (que leva ao aumento da impedância total da linha). Em ambos os cenários estudados, conclui-se que a presença de uma unidade de balanceamento de tensão no barramento de interligação, não foi capaz de resolver todos os problemas de desequilíbrio existentes na MR, apesar de ter introduzido algumas melhorias.

Quanto às estratégias MMO, acrescentou-se uma unidade VSI num dos nós extremos da MR, onde se verificavam problemas significativos de desequilíbrio de tensão, em ambos os cenários. A introdução de uma segunda unidade VSI na extremidade da MR, mostrou-se influente na diminuição dos desequilíbrios no barramento onde é instalada, contribuindo também para algumas melhorias noutros barramentos na extremidade da rede. Como já se referiu, a influência dos inversores VSI no equilíbrio de tensão da MR é máxima no barramento a que estes são acoplados. No caso referido, a unidade VSI foi acoplada precisamente no barramento mais desequilibrado, sendo capaz de diminuir grandemente o problema aí existente.

No cenário rural, as melhorias foram igualmente notórias. Da mesma forma, também os barramentos da extremidade da MR passaram a apresentar valores de desequilíbrio bastante mais baixos e de acordo com a norma europeia. Todavia, neste cenário a utilização da estratégia MMO não resolveu por completo o problema anteriormente verificado num dos barramentos problemáticos, apesar de a melhoria apresentada ter sido considerável.

O cenário que viu maiores melhorias no valor dos seus desequilíbrios, devido à implementação de estratégias MMO, foi o rural. A introdução da unidade VSI na extremidade da rede teve mais impacto no cenário rural, dado que este é um cenário propenso a apresentar desequilíbrios mais elevados. As suas redes mais extensas e consequentemente os maiores valores de impedância entre o barramento de interligação e as extremidades da MR, diluem o efeito do inversor VSI. Por este motivo, a introdução de uma unidade VSI nas extremidades da rede é mais sentido numa rede mais extensa, onde os problemas de tensão são mais sentidos.

Analogamente ao que se fez para as estratégias SMO, acrescentou-se uma unidade de balanceamento de tensão ao barramento de interligação da MR com a rede de MT. O objetivo foi novamente o de verificar se há melhorias nos perfis de tensão ao longo da MR, causadas pela B.U.. As conclusões retiradas foram similares às que se referiram no caso das estratégias SMO. O efeito desta unidade no barramento a que é acoplada é idêntico, eliminando novamente todos os desequilíbrios ali existentes. A generalidade dos barramentos da rede (excetuando-se o que inclui a unidade com B.U.), não sofreram alterações apreciáveis no que diz respeito aos desequilíbrios de tensão. Na estratégia SMO estes barramentos tinham já sido os menos influenciados pela introdução da B.U. pelos motivos acima referidos. Dado que a estratégia MMO sem inclusão de B.U. reduziu os desequilíbrios de tensão em todos os barramentos da MR, a introdução da B.U. nesse caso, teve um efeito menor do que no caso análogo com apenas uma unidade VSI (e onde os desequilíbrios eram superiores).

Para assegurar um perfil de tensão de qualidade durante o funcionamento em modo isolado, é necessário ter em consideração as características da MR, analisando as necessidades de balanceamento de tensão caso a caso. Nos casos estudados (em que existiam desequilíbrios de tensão proibitivos na MR) e numa estratégia de operação SMO, a unidade VSI instalada no barramento de interligação, não é capaz de garantir o adequado equilíbrio de tensão em toda a MR. Perante a introdução de uma B.U. no mesmo barramento, verificam-se melhorias na qualidade do perfil de tensão (principalmente no barramento a que é acoplada). Contudo, estas demonstraram-se insuficientes para eliminar os referidos problemas, em ambos os cenários. Isto pode ser explicado pela distância que separa esta unidade dos restantes barramentos.

Relativamente às estratégias de operação MMO estudadas, pode-se concluir que a introdução de uma segunda unidade VSI numa extremidade da MR tem grande influência nos perfis de tensão.

No cenário urbano, a implementação desta estratégia foi suficiente para levar a que todos os barramentos cumprissem os valores limite de desequilíbrio impostos pela norma europeia. No cenário rural, a estratégia implementada foi também capaz de reduzir grandemente os desequilíbrios e fez inclusivamente com que um dos barramentos que violavam os valores limite impostos pela norma europeia, deixasse de o fazer. A introdução da unidade de balanceamento de tensão,

melhora o perfil de tensão do barramento a que é acoplada. No caso rural, em que existia ainda um barramento a violar o limite para o valor do desequilíbrio, esta foi capaz de o reduzir. A redução foi pequena, mas levou o desequilíbrio para um valor próximo de respeitar a norma europeia DIN EN50160.

Resumindo, o problema do desequilíbrio de tensão numa MR em modo isolado é um problema muito local. Isto significa que as estratégias utilizadas resultam muito bem no barramento a que são acopladas, e na vizinhança do mesmo. Contudo, não são geralmente suficientes para resolver o problema em toda a MR. O efeito das unidades VSI sobre a tensão, tem tendência a diminuir ao longo da MR. Como é óbvio, esta diminuição depende da extensão da rede.

Isto torna a estratégia SMO menos eficiente do que a estratégia MMO, no que toca à eliminação de desequilíbrios numa MR. Contudo, a aplicação de estratégias SMO ou MMO e a inclusão de dispositivos de balanceamento de tensão numa MR, tem que ser analisada caso a caso. A aplicação da estratégia SMO pode ser suficiente em determinados casos e não o ser noutros. O mesmo se pode dizer da estratégia MMO.

Quanto às unidades de balanceamento de tensão estudadas, conclui-se que se apresentam como uma ótima solução na eliminação de desequilíbrios num dado barramento da MR. Contudo, o seu efeito noutras localizações, que não o barramento em que se encontram instaladas, é muito diminuto.

6.2 Futuros desenvolvimentos

A dissertação focou-se essencialmente no problema dos desequilíbrios de tensão. Relativamente às soluções abordadas, ficam ainda alguns pontos por explorar detalhadamente. A unidade de balanceamento de tensão pode ser estudada quanto à sua localização ideal, em vez de ser localizada sempre no barramento de interligação com a rede de MT. Poderá ainda estudar-se o efeito de ter várias unidades de balanceamento de tensão distribuídas em pontos distintos da rede e tentar apurar quais são, e como se definem, os pontos mais indicados para acoplar as mesmas.

Existem ainda outros problemas relativos ao funcionamento de uma MR, tais como controlo de frequência, cavas de tensão, distorção harmónica ou operações de re-sincronização, que devem ser estudados para comprovar a possibilidade de implementar este conceito na prática.

Além de ser capaz de funcionar em modo isolado, a MR pode ser utilizada em operações de reposição de serviço. O estudo desta capacidade e as implicações que traz para o funcionamento da MR devem também ser aprofundadas.

Tal como foi referido nesta dissertação, as MR assentam num princípio de funcionamento que obriga à existência de uma infra-estrutura de comunicação sólida. Este aspeto operacional está ainda pouco desenvolvido a nível prático. É necessário encontrar soluções viáveis técnica e economicamente, para que o conceito de MR possa ser implementado devidamente, e as comunicações entre os componentes da mesma sejam asseguradas.

Por último, será indispensável testar as soluções encontradas nesta dissertação, e noutras relacionadas com outros problemas, em ambiente laboratorial. Isto permitirá validar de forma prática, os resultados alcançados.

Anexo A

Este anexo serve para apresentar dados não ilustrados no corpo do documento da dissertação.

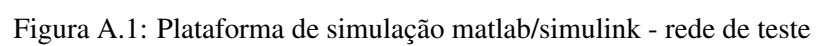
A.1 Cargas presentes na rede de teste, em cada cenário

Tabela A.1: Distribuição de cargas por tipo e fase no cenário rural

Nó	Carga trifásica (W)	Fase A (W)	Fase B (W)	Fase C (W)
1	0	0	0	0
2	1250	5500	1150	1150
3	1943	2250	4828	0
4	1200	2747	500	800

Tabela A.2: Distribuição de cargas por tipo e fase no cenário urbano

Nó	Carga trifásica (W)	Fase A (W)	Fase B (W)	Fase C (W)
1	0	0	0	0
2	7650	0	2800	1150
3	7772	0	2328	0
4	10246	2247	0	4000



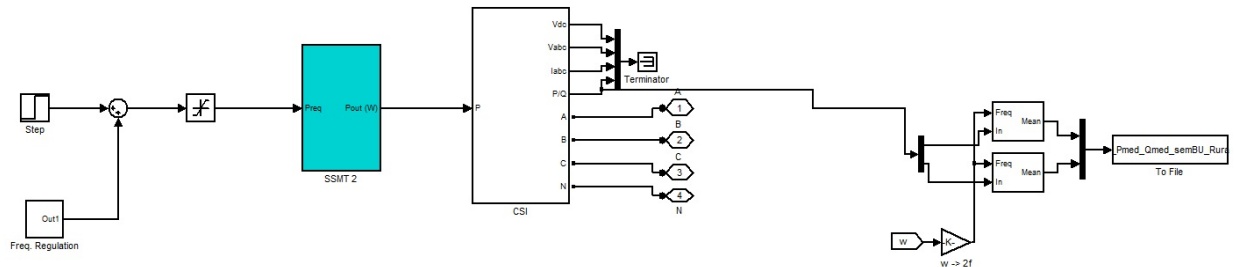


Figura A.2: Detalhe do modelo da micro-turbina utilizado em ambiente matlab/simulink

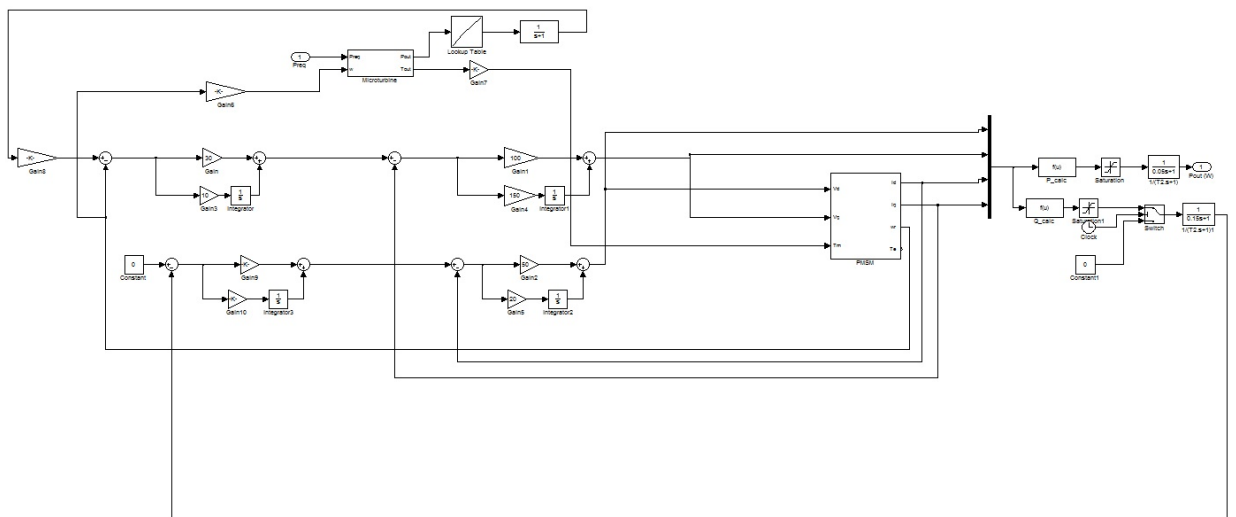


Figura A.3: Detalhe do modelo da micro-turbina utilizado em ambiente matlab/simulink, incluindo o modelo da parte mecânica, do gerador síncrono trifásico e do conversor

Block Parameters: VSI

Subsystem (mask)

Droop Characteristic | Balancing Unit

TdP1: 0.8

TdQ1: 0.8

kf1: -6.28319e-005

kv1: -1.2180e-006

kph1: -8e-6

V0: 1.055

f0: 50

OK Cancel Help Apply

Figura A.4: Caixa de diálogo preenchida com os dados da unidade VSI utilizada no barramento de interligação, em todas as simulações

Block Parameters: VSI1

Subsystem (mask)

Droop Characteristic | Balancing Unit

TdP1: 0.3

TdQ1: 0.3

kf1: $-1 \cdot 2 \cdot \pi / (25e3) + 0 \cdot -6.28319e-004$

kv1: $-0.1 / (25000)$

kph1: $-7.25e-5 + 0 \cdot 0.001 / 250000$

V0: 1.05

f0: 50

OK Cancel Help Apply

Figura A.5: Caixa de diálogo preenchida com os dados da unidade VSI utilizada no barramento 4 (estratégia MMO, cenário rural)

Block Parameters: VSI1

Subsystem (mask)

Droop Characteristic | Balancing Unit

TdP1
0.3

TdQ1
0.3

kf1
-1*6.28319e-004

kv1
-0.1/15000

kph1
0.01/15000

V0
1.05

f0
50

OK Cancel Help Apply

Figura A.6: Caixa de diálogo preenchida com os dados da unidade VSI utilizada no barramento 4 (estratégia MMO, cenário urbano)

A.3 Desequilíbrios de tensão

A.3.1 Cenário Rural, 1 VSI, sem B.U.

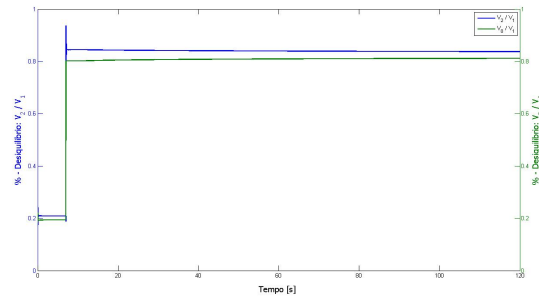


Figura A.7: Desequilíbrios de tensão no barramento 1 - cenário rural, 1 VSI, sem B.U.

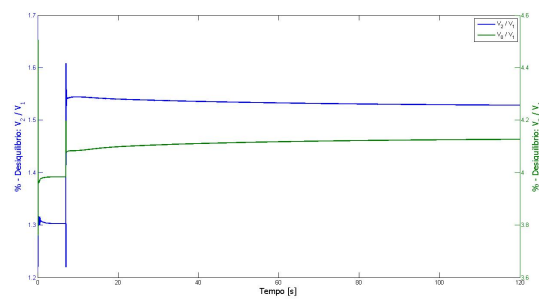


Figura A.8: Desequilíbrios de tensão no barramento 2 - cenário rural, 1 VSI, sem B.U.

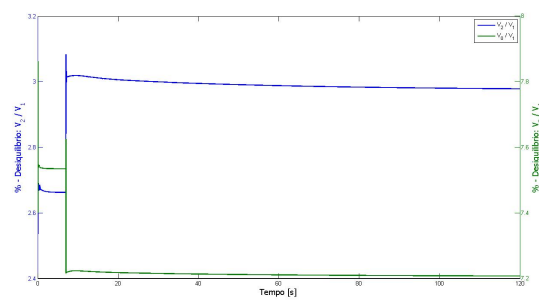


Figura A.9: Desequilíbrios de tensão no barramento 3 - cenário rural, 1 VSI, sem B.U.

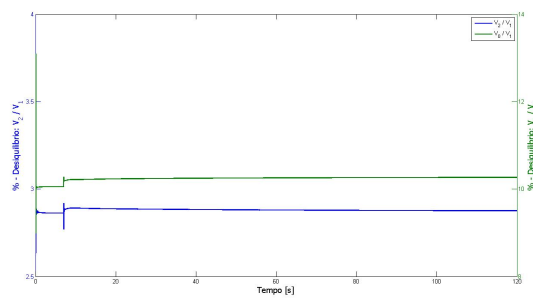


Figura A.10: Desequilíbrios de tensão no barramento 4 - cenário rural, 1 VSI, sem B.U.

A.3.2 Cenário Rural, 1 VSI (nó 2), sem B.U.

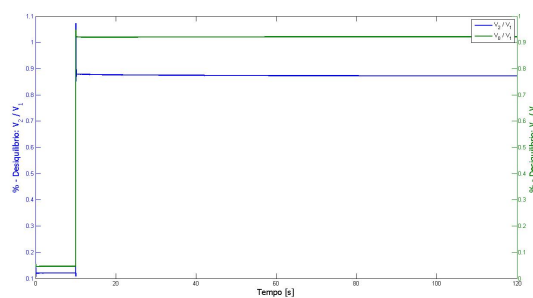


Figura A.11: Desequilíbrios de tensão no barramento 1 - cenário rural, 1 VSI (nó 2), sem B.U.

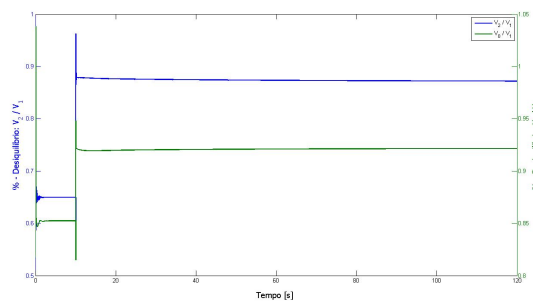


Figura A.12: Desequilíbrios de tensão no barramento 2 - cenário rural, 1 VSI (nó 2), sem B.U.

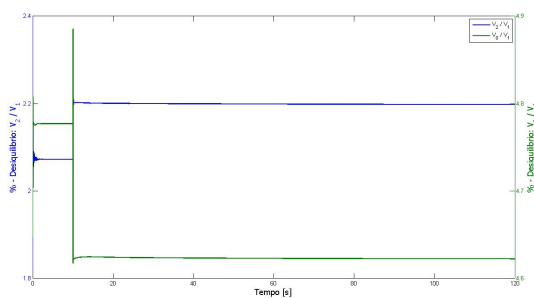


Figura A.13: Desequilíbrios de tensão no barramento 3 - cenário rural, 1 VSI (nó 2), sem B.U.

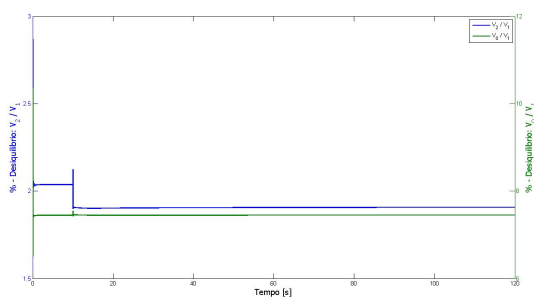


Figura A.14: Desequilíbrios de tensão no barramento 4 - cenário rural, 1 VSI (nó 2), sem B.U.

A.3.3 Cenário Urbano, 1 VSI, sem B.U.

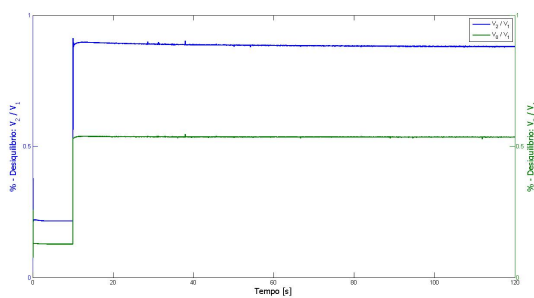


Figura A.15: Desequilíbrios de tensão no barramento 1 - cenário urbano, 1 VSI, sem B.U.

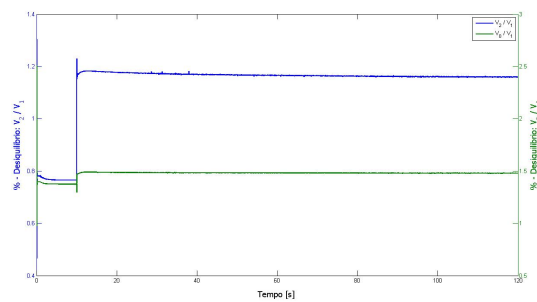


Figura A.16: Desequilíbrios de tensão no barramento 2 - cenário urbano, 1 VSI, sem B.U.

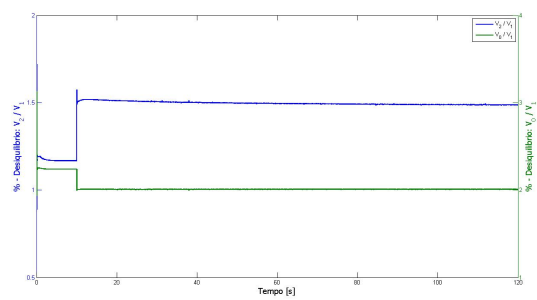


Figura A.17: Desequilíbrios de tensão no barramento 3 - cenário urbano, 1 VSI, sem B.U.

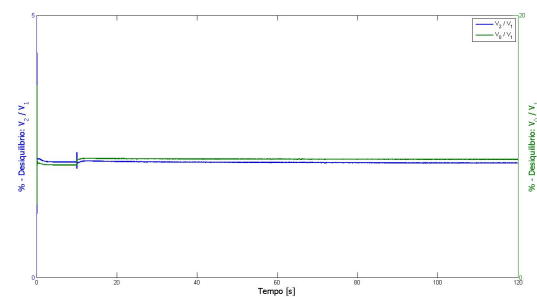


Figura A.18: Desequilíbrios de tensão no barramento 4 - cenário urbano, 1 VSI, sem B.U.

A.3.4 Cenário Rural, 1 VSI, com B.U.

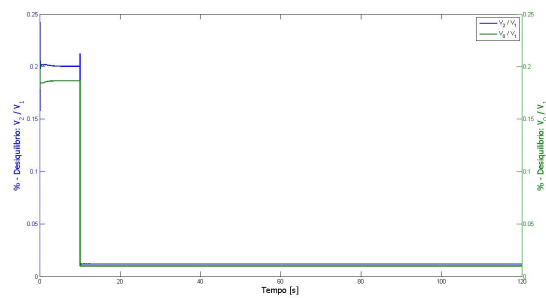


Figura A.19: Desequilíbrios de tensão no barramento 1 - cenário rural, 1 VSI, com B.U.

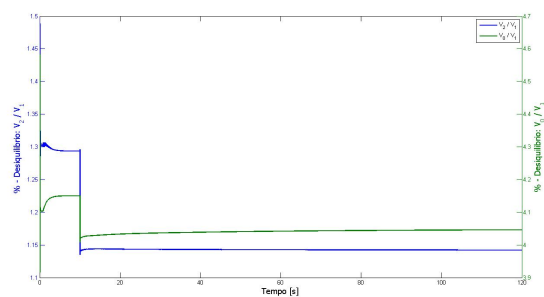


Figura A.20: Desequilíbrios de tensão no barramento 2 - cenário rural, 1 VSI, com B.U.

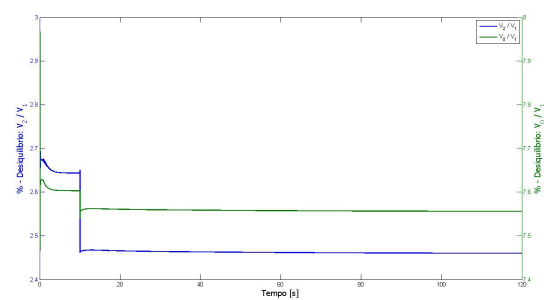


Figura A.21: Desequilíbrios de tensão no barramento 3 - cenário rural, 1 VSI, com B.U.

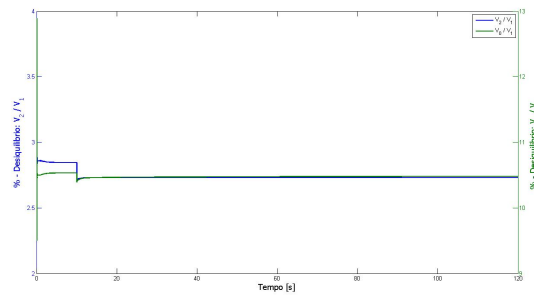


Figura A.22: Desequilíbrios de tensão no barramento 4 - cenário rural, 1 VSI, com B.U.

A.3.5 Cenário Urbano, 1 VSI, com B.U.

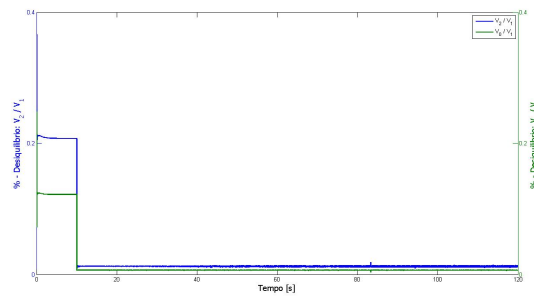


Figura A.23: Desequilíbrios de tensão no barramento 1 - cenário urbano, 1 VSI, com B.U.

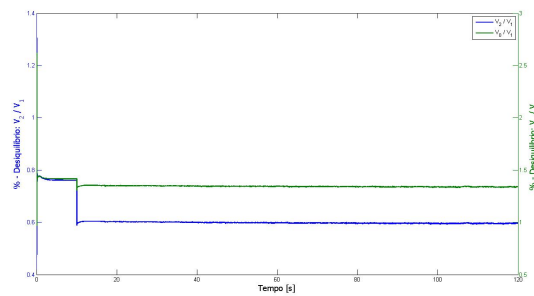


Figura A.24: Desequilíbrios de tensão no barramento 2 - cenário urbano, 1 VSI, com B.U.

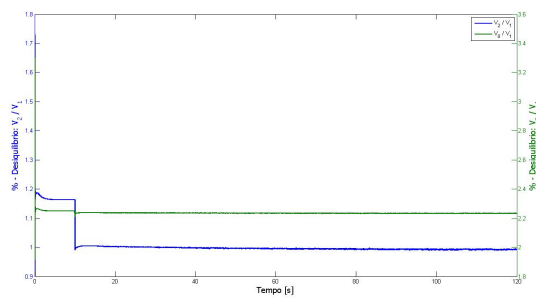


Figura A.25: Desequilíbrios de tensão no barramento 3 - cenário urbano, 1 VSI, com B.U.

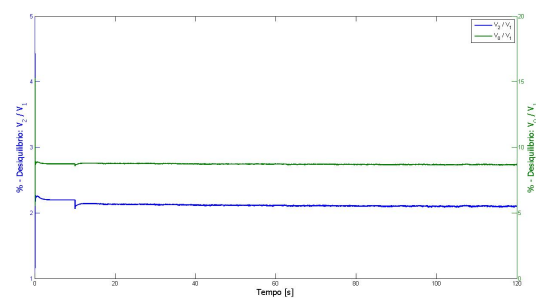


Figura A.26: Desequilíbrios de tensão no barramento 4 - cenário urbano, 1 VSI, com B.U.

A.3.6 Cenário Rural, 2 VSI, sem B.U.

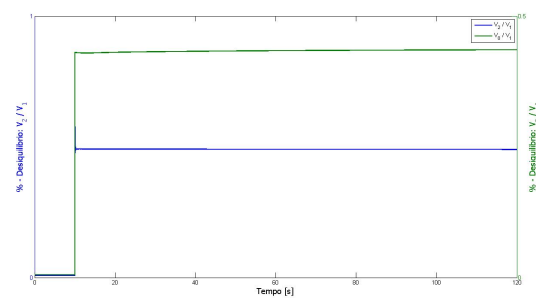


Figura A.27: Desequilíbrios de tensão no barramento 1 - cenário rural, 2 VSI, sem B.U.

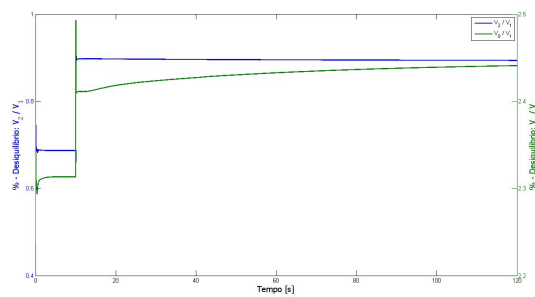


Figura A.28: Desequilíbrios de tensão no barramento 2 - cenário rural, 2 VSI, sem B.U.

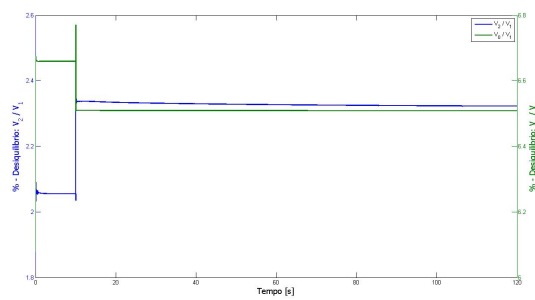


Figura A.29: Desequilíbrios de tensão no barramento 3 - cenário rural, 2 VSI, sem B.U.

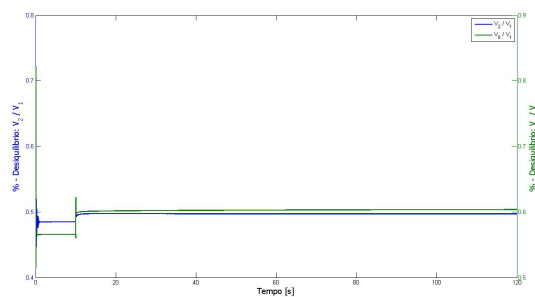


Figura A.30: Desequilíbrios de tensão no barramento 4 - cenário rural, 2 VSI, sem B.U.

A.3.7 Cenário Urbano, 2 VSI, sem B.U.

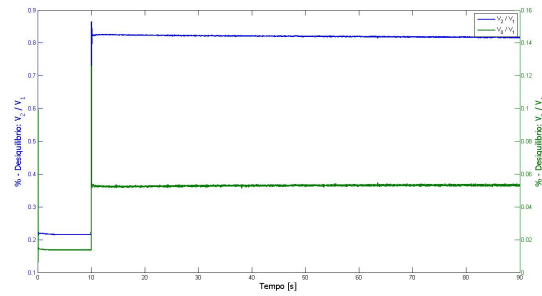


Figura A.31: Desequilíbrios de tensão no barramento 1 - cenário urbano, 2 VSI, sem B.U.

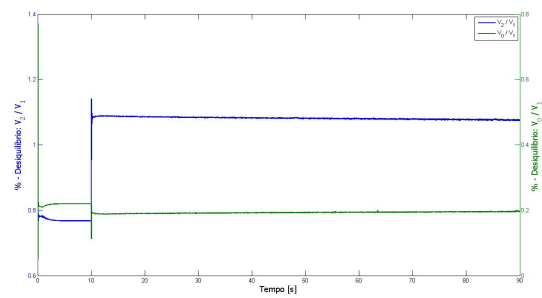


Figura A.32: Desequilíbrios de tensão no barramento 2 - cenário urbano, 2 VSI, sem B.U.

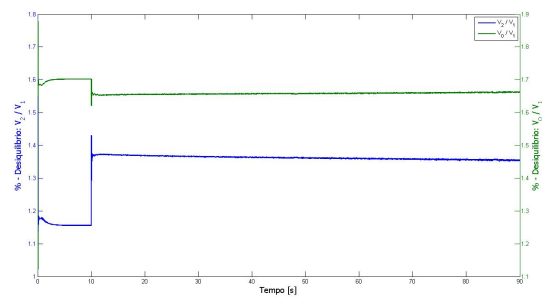


Figura A.33: Desequilíbrios de tensão no barramento 3 - cenário urbano, 2 VSI, sem B.U.

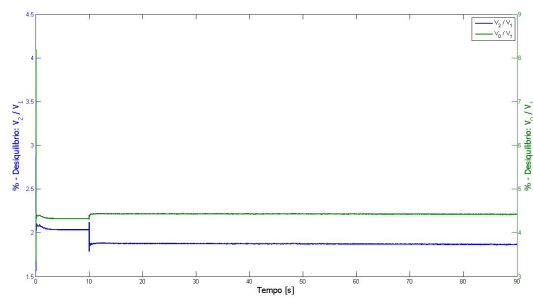


Figura A.34: Desequilíbrios de tensão no barramento 4 - cenário urbano, 2 VSI, sem B.U.

A.3.8 Cenário Rural, 2 VSI, com B.U.

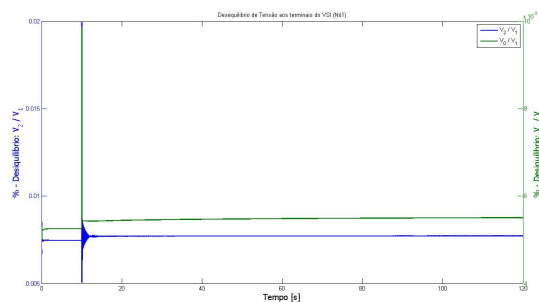


Figura A.35: Desequilíbrios de tensão no barramento 1 - cenário rural, 2 VSI, com B.U.

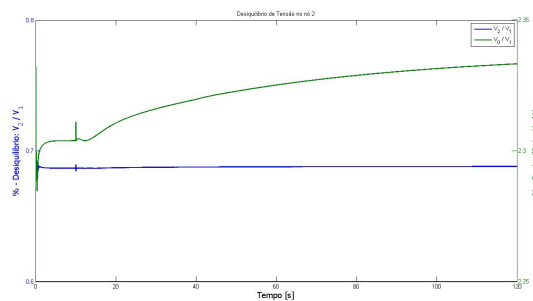


Figura A.36: Desequilíbrios de tensão no barramento 2 - cenário rural, 2 VSI, com B.U.

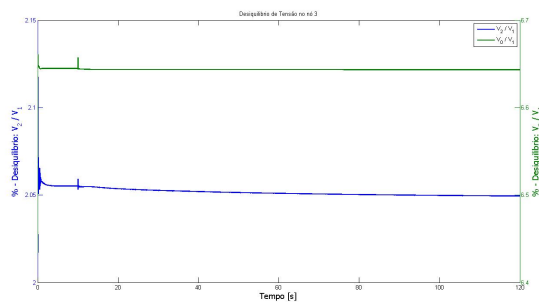


Figura A.37: Desequilíbrios de tensão no barramento 3 - cenário rural, 2 VSI, com B.U.

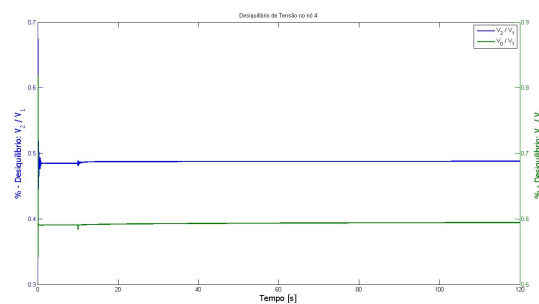


Figura A.38: Desequilíbrios de tensão no barramento 4 - cenário rural, 2 VSI, com B.U.

A.3.9 Cenário Urbano, 2 VSI, com B.U.

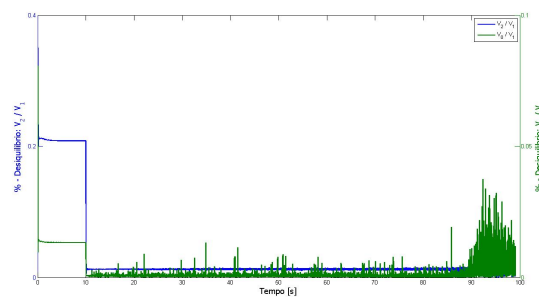


Figura A.39: Desequilíbrios de tensão no barramento 1 - cenário urbano, 2 VSI, com B.U.

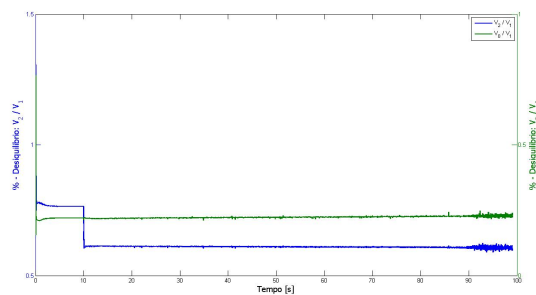


Figura A.40: Desequilíbrios de tensão no barramento 2 - cenário urbano, 2 VSI, com B.U.

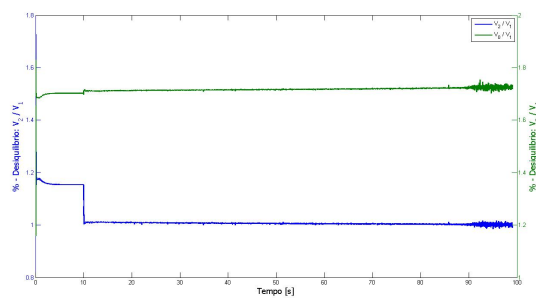


Figura A.41: Desequilíbrios de tensão no barramento 3 - cenário urbano, 2 VSI, com B.U.

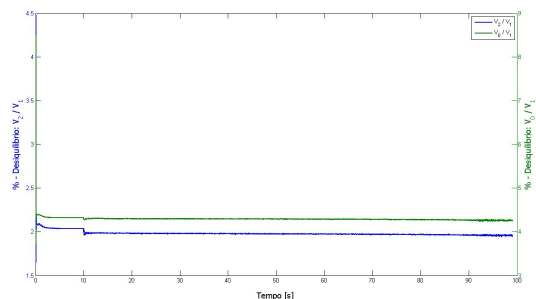


Figura A.42: Desequilíbrios de tensão no barramento 4 - cenário urbano, 2 VSI, com B.U.

Referências

- [1] 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.
- [2] C. L. Moreira. "identification and development of microgrids emergency control procedures". Dissertação de Doutorado, Novembro de 2008.
- [3] J.A.P. Lopes, C.L. Moreira, e A.G. Madureira. Defining control strategies for microgrids islanded operation. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 21(2):916 – 924, may 2006.
- [4] R. Lasseter et al. "white paper on integration of distributed energy resources — the certs microgrid concept". Disponível em: <http://certs.lbl.gov/pdf/50829.pdf>.
- [5] Florida Solar Energy Centre. "installing photovoltaic systems: a question and answer guide for solar electric systems.". Disponível em: <http://www.fsec.ucf.edu/en/research/photovoltaics/vieo/resources/documents/PVPrimer.pdf>.
- [6] T. Estanqueiro, A.; Simões. Aproveitamento de energia eólica em ambiente urbano e construído. *Renováveis Magazine*, (2):44 – 49, 2010.
- [7] M. Lunardelli Ribeiro. "estratégia de reposição de serviço utilizando micro-redes". Dissertação de Mestrado, Junho 2010.
- [8] P.A. Pilavachi. Mini- and micro-gas turbines for combined heat and power. *Applied Thermal Engineering*, 22(18):2003 – 2014, 2002.
- [9] R.H. Lasseter. Microgrids. *IEEE Power Eng Soc Transm Distrib Conf* 2002(1):305–8.
- [10] Farhad Shahnia, Ritwik Majumder, Arindam Ghosh, Gerard Ledwich, e Firuz Zare. Operation and control of a hybrid microgrid containing unbalanced and nonlinear loads. *Electric Power Systems Research*, 80(8):954 – 965, 2010.
- [11] M. S. Illindala e G. Venkataramanan. "battery energy storage for stand-alone micro-source distributed generation systems.". *Proceedings PES 2002 - Power and Energy Systems*, Marina del Rey, USA, 13-15 May 2002.
- [12] N.S. Zhai, Y.Y. Yao, D.L. Zhang, e D.G. Xu. Design and optimization for a supercapacitor application system. Em *Power System Technology, 2006. PowerCon 2006. International Conference on*, páginas 1 –4, oct. 2006.
- [13] P. Kascak, R. Jansen, B. Kenny, e T. Dever. Demonstration of attitude control and bus regulation with flywheels. Em *Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2004 IEEE*, volume 3, páginas 2018 – 2029 vol.3, oct. 2004.

- [14] R. Hebner, J. Beno, e A. Walls. Flywheel batteries come around again. *Spectrum, IEEE*, 39(4):46–51, apr 2002.
- [15] C. Marnay J. Stephens J. Dagle R. Guttromson A. S. Meliopoulos R. Yinger R. Lasseter, A. Akhil e Eto J. "white paper on integration of distributed energy resources, the certs micro-grid concept.". Technical report, Consortium for Electric Reliability Technology Solutions, 2002.
- [16] Alvaro Llaría, Octavian Curea, Jaime Jiménez, e Haritza Camblong. Survey on microgrids: Unplanned islanding and related inverter control techniques. *Renewable Energy*, 36(8):2052–2061, 2011.
- [17] B. Kroposki, R. Lasseter, T. Ise, S. Morozumi, S. Papatlianassiou, e N. Hatziargyriou. Making microgrids work. *Power and Energy Magazine, IEEE*, 6(3):40–53, may-june 2008.
- [18] A.G. Anastasiadis, A.G. Tsikalakis, e N.D. Hatziargyriou. Operational and environmental benefits due to significant penetration of microgrids and topology sensitivity. Em *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE*, páginas 1–8, july 2010.
- [19] MICROGRIDS. "large scale integration of micro-generation to low voltage grids.". EU Contract no. ENK5-CT-2002-00610, Technical Annex, May 2002.
- [20] A.G. Tsikalakis e N.D. Hatziargyriou. Centralized control for optimizing microgrids operation. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 23(1):241–248, march 2008.
- [21] M.C. Chandorkar, D.M. Divan, e R. Adapa. Control of parallel connected inverters in standalone ac supply systems. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 29(1):136–143, jan/feb 1993.
- [22] A. von Jouanne e B. Banerjee. Assessment of voltage unbalance. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 16(4):782–790, oct 2001.
- [23] R. Lasseter e P. Piagi. "control and design of microgrid components.". Technical report, University of Wisconsin-Madison, 2006.
- [24] A. Siddique, G.S. Yadava, e B. Singh. Effects of voltage unbalance on induction motors. Em *Electrical Insulation, 2004. Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on*, páginas 26–29, sept. 2004.
- [25] A. Campos, G. Joos, P.D. Ziogas, e J.F. Lindsay. Analysis and design of a series voltage unbalance compensator based on a three-phase vsr operating with unbalanced switching functions. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 9(3):269–274, may 1994.
- [26] Eduard Muljadi, Rich Schiferl, e Thomas A. Lipo. Induction machine phase balancing by unsymmetrical thyristor voltage control. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, IA-21(3):669–678, may 1985.
- [27] V.B. Bhavaraju e P.N. Enjeti. An active line conditioner to balance voltages in a three-phase system. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 32(2):287–292, mar/apr 1996.
- [28] Y.W. Li, D.M. Vilathgamuwa, e P.C. Loh. Microgrid power quality enhancement using a three-phase four-wire grid-interfacing compensator. Em *Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2004 IEEE*, volume 3, páginas 1439–1446 vol.3, oct. 2004.

- [29] Fang Zheng Peng e Jih-Sheng Lai. Generalized instantaneous reactive power theory for three-phase power systems. *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, 45(1):293 –297, feb 1996.
- [30] J.A. Peças Lopes, Silvan A. Polenz, C.L. Moreira, e Rachid Cherkaoui. Identification of control and management strategies for lv unbalanced microgrids with plugged-in electric vehicles. *Electric Power Systems Research*, 80(8):898 – 906, 2010.
- [31] P. V. d. Bossche J. V. Mierlo e G. Maggetto. "models of energy sources for ev and ehv: fuel cells, batteries, ultracapacitors, flywheels and engine-generators.". *Journal of Power Sources*, vol. 128, no. 1, pp. 76-89, March 2004.
- [32] Yunwei Li, D.M. Vilathgamuwa, e Poh Chiang Loh. Microgrid power quality enhancement using a three-phase four-wire grid-interfacing compensator. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 41(6):1707 – 1719, nov.-dec. 2005.
- [33] M.C. Chandorkar, D.M. Divan, e R. Adapa. Control of parallel connected inverters in standalone ac supply systems. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 29(1):136 –143, jan/feb 1993.
- [34] M.J. Ryan, R.D. Lorenz, e R. De Doncker. Modeling of multileg sine-wave inverters: a geometric approach. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 46(6):1183 –1191, dec 1999.