



TÉCNICO
LISBOA

Controlo de Micro-redes e Ligação com a Rede Elétrica

Bruno Rafael dos Santos Chaves

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientadores: Prof. Luís António Fialho Marcelino Ferreira

Prof^a. Célia Maria Santos Cardoso de Jesus

Júri

Presidente: Prof. Rui Manuel Gameiro de Castro

Orientador: Prof^a. Célia Maria Santos Cardoso de Jesus

Vogal: Prof. Duarte de Mesquita e Sousa

Novembro 2018

Declaração

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

Agradecimentos

Aos meus orientadores, Professor Luís Marcelino Ferreira e Professora Célia de Jesus, pela disponibilidade, apoio, orientação e por todo o conhecimento que me transmitiram ao longo deste trabalho.

Aos meus pais, pela educação que me deram, por tudo o que me ensinaram, pelas condições muito para além do exigido que sempre me proporcionaram e pelos valores que desde pequeno me passaram e fizeram de mim a pessoa que sou hoje. Tudo o que sou e tudo o que consegui devo-o a vocês.

Ao meu irmão, porque a vida é muito mais que estudo e livros, por ser o meu companheiro de brincadeiras e patéticas e por ser o meu melhor amigo de sempre e para sempre.

À minha namorada, pelo exemplo de força, determinação e superação que todos os dias é para mim, por estar sempre ao meu lado, pelo apoio imensurável que me deu durante todos estes anos e por me ter mostrado que a vida é tão boa quanto aquilo que nós queremos fazer dela.

Aos meus avós e à minha tia que nunca deixaram de estar perto de mim e de me apoiar da melhor maneira que sempre conseguiram.

A todos os amigos e colegas que se cruzaram comigo ao longo deste percurso e de alguma forma deixaram a sua marca em mim.

Sou um sortudo por vos ter na minha vida.

A todos, o meu enorme e sincero obrigado!

Resumo

Definindo-se como um conjunto de recursos energéticos distribuídos que entre si formam um subsistema independente, com possibilidade de operação em ligação com a rede de distribuição ou de forma autónoma, as micro-redes apresentam-se como uma real solução face às sucessivas necessidades de expansão da rede de distribuição. Questões como as preocupações ambientais, a ampla disponibilidade de energia obtida através de renováveis, o rápido desenvolvimento de sistemas de armazenamento, o aparecimento de sistemas de comunicação fiáveis e o desenvolvimento de eficazes algoritmos de controlo e gestão de energia, têm tornado o conceito de micro-rede extremamente interessante. Porém, por razões económicas e pela segurança de fornecimento de energia, uma micro-rede beneficia da interligação à rede de distribuição.

Neste trabalho pretende-se abordar, de uma forma detalhada e através de simulações concretas, as estratégias de controlo aplicáveis a micro-redes, focando o estudo na estabilidade das suas variáveis controláveis, tensão e frequência, nos momentos subsequentes a perturbações no sistema causadas por processos de *islanding*. Para tal, desenvolveu-se uma plataforma de simulação constituída por duas fontes de microgeração distintas, painel fotovoltaico e célula de combustível, ambas dinamicamente modeladas e simuladas, sistemas de armazenamento, dispositivos de conversão de energia e cargas fixas. São abordadas, de forma detalhada, as estratégias de controlo a aplicar pelos inversores, e são avaliados e comparados dois modos de operação distintos. As simulações são realizadas mediante quatro cenários específicos, de forma a ilustrar com clareza os processos dinâmicos de estabilidade que ocorrem na micro-rede e permitindo retirar algumas considerações importantes relativamente ao comportamento das variáveis e ao tempo que estas demoram a restabelecer os seus valores nominais.

Através dos resultados obtidos pretende-se analisar a viabilidade de operação de um sistema baseado nas características que suportam o conceito de micro-rede, partindo de um ponto de vista exclusivo de avaliação do seu comportamento dinâmico.

Palavras-Chave

Micro-rede

Micro-fontes

Controlo

Ilhamento

Estabilidade

Abstract

Defined as a group of distributed energy resources forming between them an independent subsystem capable of operating interconnected to the main grid or autonomously, microgrids are becoming a real solution to face the continuous expansion needs related to the distribution grid. Environmental concerns, the ample supply of renewable energy, the advent of powerful storage equipment, the availability of reliable inexpensive communication systems and the development of powerful algorithms for control and scheduling have made the concept of microgrid increasingly interesting. Yet, for economic reasons and for the sake of security of supply, a microgrid benefits from its connection to the main grid.

The presented work aims to approach, through detailed and concise simulations, control strategies implemented in the microgrid scope, focusing the study in the stability of the system's controllable variables, frequency and voltage, in the moments immediately after the occurrence of a disturbance caused by an islanding process. For such purpose, a simulation platform was developed composed by two distinct microgeneration sources, namely the photovoltaic panel and the fuel cell, both modeled and simulated, storage units, conversion equipment and fixed loads. It is shown a detailed approach to the control strategies applied by the inverters, and two different modes of operation were evaluated and compared. The simulations are made based on four different scenarios, in way that illustrates clearly the dynamic stability processes that occur in a microgrid and, by that, allowing to draw some major conclusions regarding the variable's behavior and the time that they take before restoring their rated values.

Through the obtained results it's possible to analyze the feasibility of the system's operation based on the set of characteristics that support the microgrid concept, from a point of view focused exclusively on the dynamic behavior control.

Keywords

Microgrid

Microsources

Control

Islanding

Stability

Índice

Declaração	II
Agradecimentos	III
Resumo	IV
Abstract	V
Índice	VI
Lista de Figuras	X
Lista de Tabelas	XIII
Lista de Abreviaturas	XIV
Capítulo 1 - Introdução	1
1.1 Objetivos	2
1.2 Estrutura do trabalho	3
Capítulo 2 - Conceptualização teórica de micro-rede	4
2.1 Definição	4
2.2 Modos de operação	5
2.3 Classes	5
2.4 Arquitetura de controlo	6
2.5 Objetivos associados ao uso de micro-redes	8
2.5.1 Agentes	8
2.5.2 Potenciais benefícios	8
2.5.2.1 Económicos	9
2.5.2.2 Qualidade de Energia	9
2.5.2.3 Ambientais	10
2.5.2.4 Segurança	11
2.6 Micro-redes AC e DC	11
2.6.1 Micro-redes híbridas	12

2.7	Principais tecnologias implementadas	12
2.7.1	Micro-fontes	13
2.7.1.1	<i>Fotovoltaico</i>	13
2.7.1.2	<i>Turbinas eólicas de pequena escala</i>	14
2.7.1.3	<i>Células de Combustível</i>	15
2.7.1.4	<i>Microturbina</i>	16
2.7.1.5	<i>CHP</i>	18
2.7.2	Sistemas de Armazenamento	19
2.7.2.1	<i>Baterias</i>	19
2.7.2.2	<i>Volantes de Inércia</i>	20
2.7.2.3	<i>Supercondensadores</i>	21
Capítulo 3 - Modelação dinâmica dos componentes da micro-rede		23
3.1	Micro-fontes	23
3.1.1	Painel Fotovoltaico	23
3.1.1.1	<i>Standard Test Conditions</i>	24
3.1.1.2	<i>Circuito Equivalente</i>	24
3.1.1.3	<i>Parametrização</i>	27
3.1.1.4	<i>Temperatura Normal de Funcionamento da Célula</i>	28
3.1.1.5	<i>Comportamento do modelo</i>	29
3.1.1.6	<i>Implementação em Simulink</i>	31
3.1.2	Célula de Combustível	32
3.1.2.1	<i>Dinâmica da célula</i>	33
3.1.2.2	<i>Corrente da Célula</i>	35
3.1.2.3	<i>Processador de Combustível</i>	35
3.1.3.4	<i>Implementação em Simulink</i>	36
3.3	Sistemas de Armazenamento	37
3.4	Inversores	37
3.5	Cargas	38
Capítulo 4 - Controlo aplicado a micro-redes		39
4.1	Princípios de controlo de micro-redes	39

4.1.1	Estrutura de controlo	39
4.1.2	Classificação das micro-fontes.....	40
4.2	Estratégias de controlo dos inversores	41
4.2.1	Estratégia de controlo por PQ	42
4.2.1.1	Controlo da tensão no andar DC.....	43
4.2.1.2	Controlador PI	44
4.2.1.3	Transformação de Coordenadas abc para dq0.....	44
4.2.1.4	Diagrama geral de controlo	45
4.2.2	Estratégia de controlo por VSI.....	46
4.2.2.1	Aplicação das características de droop.....	46
4.2.2.2	Diagrama geral de controlo	47
4.3	Estratégias de operação da micro-rede	48
4.3.1	Operação em <i>Single-Master</i>	48
4.3.2	Operação em <i>Multi-Master</i>	49
4.4	Controlo Secundário	51
4.4.1	Frequência/Potência Ativa	51
4.4.2	Tensão/Potência Reativa	51
Capítulo 5 - Simulação, Resultados e Discussão		53
5.1	Configuração do sistema de teste.....	53
5.1.1	Rede de teste de controlo em <i>Single-Master</i>	53
5.1.2	Rede de teste de controlo em <i>Multi-Master</i>	55
5.2	Importação da rede elétrica	56
5.2.1	<i>Single-Master</i>	56
5.2.2	<i>Multi-Master</i>	60
5.3	Exportação para rede elétrica	63
5.3.1	<i>Single-Master</i>	63
5.3.2	<i>Multi-Master</i>	67
5.4	Comparação: <i>Single-Master</i> vs. <i>Multi-Master</i>	70
Capítulo 6 - Conclusão.....		72

6.1 Trabalho Futuro	73
Referências	75
Anexo A - Implementação dos modelos em <i>Simulink</i>.....	79
Anexo B - Dados das micro-fontes	83

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Crescimento do mercado norte-americano nas diferentes classes de micro-redes [6]	6
Figura 2.2 - Arquitetura de micro-rede com micro-fontes, cargas e sistema de armazenamento [7].....	7
Figura 2.3 - Benefícios associados ao uso de micro-redes [8]	8
Figura 2.4 - Esquema da micro-rede AC e DC [10]	12
Figura 2.5 - Equipamento Fotovoltaico [14]	14
Figura 2.6 - Equipamento Eólico [16]	15
Figura 2.7 - Estrutura da Célula de Combustível [17]	16
Figura 2.8 - Esquema de funcionamento da Microturbina [21]	18
Figura 2.9 - Equipamento de CHP [23]	19
Figura 3.1 - Circuito equivalente da célula fotovoltaica.....	24
Figura 3.2 - Curva I-V: Variação da radiação solar incidente	29
Figura 3.3 - Curva P-V: Variação da radiação solar incidente	30
Figura 3.4 - Curva I-V: Variação da temperatura do módulo	30
Figura 3.5 - Curva P-V: Variação da temperatura do módulo	30
Figura 3.6 - Interface do painel fotovoltaico em ambiente <i>Simulink</i>	31
Figura 3.7 - Resposta do modelo PV: (a) parâmetros de entrada fixos; (b) variação dos parâmetros de entrada.....	32
Figura 3.8 - Interface da célula de combustível em ambiente <i>Simulink</i>	36
Figura 3.9 - Resposta do modelo SOFC: (a) parâmetros de entrada fixos; (b) variação dos parâmetros de entrada	36
Figura 4.1 - Balanço de potência no andar DC [32]	43
Figura 4.2 - Modelo do andar DC [32].....	43
Figura 4.3 - Diagrama de blocos do controlador PI [34]	44
Figura 4.4 - Modelo de controlo PQ [32]	46
Figura 4.5 - Modelo de controlo VSI [32].....	47
Figura 4.6 - Estratégia de operação em <i>Single-Master</i> [33]	49
Figura 4.7 - Partilha de potência entre dois VSI [38]	50
Figura 4.8 - Estratégia de operação em <i>Multi-Master</i> [33].....	50
Figura 4.9 - Controlo secundário de frequência [39].....	51

Figura 4.10 - Limites de variação de tensão no sistema [38].....	52
Figura 5.1 - Micro-rede de teste (Controlo em Single-Master).....	54
Figura 5.2 - Micro-rede de teste (Controlo em Multi-Master)	55
Figura 5.3 - Frequência do sistema (Importação em <i>Single-Master</i>).....	58
Figura 5.4 - Potência fornecida pelo sistema de armazenamento (Importação em <i>Single-Master</i>).....	59
Figura 5.5 - Potência fornecida pelos SOFC (Importação em <i>Single-Master</i>).....	59
Figura 5.6 - Tensão de referência do sistema (Importação em <i>Single-Master</i>).....	60
Figura 5.7 - Tensão nos SOFC (Importação em <i>Single-Master</i>)	60
Figura 5.8 - Frequência imposta pelo VSI 1 e pelo VSI 2 (Importação em <i>Multi-Master</i>)	61
Figura 5.9 - Potência fornecida pelos sistemas de armazenamento (Importação em <i>Multi-Master</i>)....	61
Figura 5.10 - Potência fornecida pelos SOFC (Importação em <i>Multi-Master</i>)	62
Figura 5.11 - Tensão de referência do sistema (Importação em <i>Multi-Master</i>)	62
Figura 5.12 - Tensão nos SOFC (Importação em <i>Multi-Master</i>).....	63
Figura 5.13 - Frequência do sistema (Exportação em <i>Single-Master</i>)	65
Figura 5.14 - Potência fornecida pelo sistema de armazenamento (Exportação em <i>Single-Master</i>)...	65
Figura 5.15 - Potência fornecida pelos SOFC (Exportação em <i>Single-Master</i>)	66
Figura 5.16 - Tensão de referência do sistema (Exportação em <i>Single-Master</i>)	67
Figura 5.17 - Tensão nos SOFC (Exportação em <i>Single-Master</i>)	67
Figura 5.18 - Frequência imposta pelo VSI 1 e pelo VSI 2 (Exportação em <i>Multi-Master</i>)	68
Figura 5.19 - Potência fornecida pelos sistemas de armazenamento (Exportação em <i>Multi-Master</i>) .	68
Figura 5.20 - Potência fornecida pelos SOFC (Exportação em <i>Multi-Master</i>).....	69
Figura 5.21 - Tensão de referência do sistema (Exportação em <i>Multi-Master</i>).....	70
Figura 5.22 - Tensão nos SOFC (Exportação em <i>Multi-Master</i>).....	70
Figura 0.1 - Cálculo dos 3 parâmetros	79
Figura 0.2 - Cálculo da temperatura do módulo.....	79
Figura 0.3 - Cálculo de V_t	80
Figura 0.4 - Cálculo de I_0	80
Figura 0.5 - Cálculo da Corrente de Curto-Circuito.....	80
Figura 0.6 - Cálculo da tensão e da corrente de saída	80
Figura 0.7 - Modelo dinâmico da célula	81
Figura 0.8 - Corrente da célula.....	81

Lista de Tabelas

Tabela 4.1: Associação entre a estratégia de controlo do inversor e a classificação do respetivo componente	42
Tabela 5.1 - Dados de geração das micro-fontes em situação de importação.....	57
Tabela 5.2 - Dados de consumo das cargas em situação de importação	57
Tabela 5.3 - Balanço de potências em situação de importação	57
Tabela 5.4 - Dados de geração das micro-fontes em situação de exportação.....	64
Tabela 5.5 - Dados de consumo das cargas em situação de exportação	64
Tabela 5.6 - Balanço de potências em situação de exportação	65
Tabela 5.7 - Comparação de desempenho entre Single-Master e Multi-Master	71
Tabela 0.1 - Dados de simulação do painel fotovoltaico.....	83
Tabela 0.2 - Dados de simulação da célula de combustível.....	83

Lista de Abreviaturas

AC	Corrente Alternada
AFC	Alkaline Fuel Cell
BT	Baixa Tensão
CHP	Combined Heat and Power
CIGRÉ	Conseil International des Grands Réseaux Électriques
DC	Corrente Contínua
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell
DMS	Distribution Management System
GD	Geração Distribuída
ICE	Motor de Combustão Interna
LC	Load Controller
MC	Microsource Controller
MCFC	Molten Carbonates Fuel Cell
MGCC	Microgrid Central Controller
MPPT	Maximum Power Point Tracking
MT	Média Tensão
NOCT	Normal Operation Cell Temperature
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell
PCC	Point of Common Coupling
PI	Proporcional-Integral
PMEFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell
PV	Photovoltaic
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
SPIDERS	Smart Power Infrastructure Demonstration for Energy Reliability and Security
STC	Standard Test Conditions
V2G	Vehicle to Grid

Capítulo 1 - Introdução

Ao longo dos anos, o fornecimento de eletricidade tem vindo a ser feito com base, principalmente, em grandes centrais de geração de energia que com o auxílio de longas linhas de transmissão e distribuição levam a energia até aos locais de consumo. Porém, questões como a preocupação ambiental, o rápido surgimento de energias renováveis e o forte desenvolvimento de equipamentos de armazenamento de energia fizeram crescer o interesse no conceito de micro-rede. Ainda assim, por questões económicas e de modo a garantir o fornecimento de energia ao longo das 24 horas do dia, a micro-rede beneficia da ligação à rede eléctrica principal, ou pelo menos, a uma rede maior (macro-rede).

O conceito de micro-rede baseia-se no conjunto de recursos energéticos distribuídos de geração, armazenamento e cargas, geograficamente próximos, que entre si formam uma unidade autónoma com sistema de controlo próprio dentro da rede principal, com possibilidade de operar em dois modos distintos: ligada ou desligada da rede principal (vulgarmente designada de operação em ilha). O ponto de conexão entre a micro-rede e a respetiva macro-rede, designa-se por PCC, do inglês *Point of Common Coupling*.

Um dos pontos de principal atração no desenvolvimento e estudo das micro-redes é o facto de motivar uma maior penetração de fontes de energia renováveis na rede de distribuição. A produção distribuída fazendo uso de sistemas de geração de pequena escala permite aumentar rendimento energético e, assim, aumentar as vantagens ambientais em comparação com as grandes centrais [1]. É, no entanto, necessário ter em atenção a intermitência das fontes de geração renováveis, tornando essencial o uso de um sistema de armazenamento que garanta que a energia disponível é suficiente para satisfazer o consumo. O sistema de armazenamento é utilizado para armazenar o excesso de energia produzida quando o consumo é inferior à geração ou, por sua vez, para fornecer energia às cargas em situações em que o consumo excede a geração. Além disso, as baterias podem ser utilizadas para consumo durante as horas de pico, onde o preço da energia proveniente da rede é mais elevado, reduzindo assim custos para os consumidores. Outra opção válida é a venda do excedente de produção das fontes renováveis à rede, caso se verifique que as baterias estão totalmente carregadas e a produção é superior ao consumo. Caso a produção seja superior ao consumo, mas as baterias não estejam carregadas, então o excesso de produção será usado para recarregar as baterias e assim garantir que há energia armazenada disponível para as horas em que as fontes não estão em produção.

Uma questão de particular importância e fundamental em qualquer micro-rede é o uso de dispositivos de electrónica de potência. Algumas das fontes de geração e sistemas de armazenamento não podem ser conectados diretamente à micro-rede pois a característica da energia gerada ou armazenada não é apropriada. É, portanto, necessário o uso de conversores de potência na ligação entre estes dispositivos e a micro-rede. Tome-se como exemplo os painéis fotovoltaicos que produzem energia em corrente contínua, tornando obrigatório o uso do conversor de modo a transformar a corrente

contínua em corrente alternada e possibilitando assim o seu consumo pelas cargas da micro-rede. Considere-se ainda o exemplo das turbinas eólicas, que apesar de produzirem em corrente alternada, devido às irregularidades na velocidade do vento, necessitam de um conversor de modo a controlar a potência de saída injetada na micro-rede. Os conversores são, ainda, elementos fundamentais para o controlo dos valores internos de tensão e frequência da micro-rede. Quando em modo de operação em ilha, a micro-rede precisa de controlar internamente estes valores, tirando para tal proveito de algoritmos e esquemas de controlo implementados em grande parte pelos controladores dos conversores. Quando em modo de operação ligada à rede principal, a micro-rede vê a rede de distribuição como uma fonte de potência infinita ficando, portanto, a seu cargo as funções de controlo de tensão e frequência.

O conceito de micro-rede e as suas aplicações têm vindo a ser abundantemente estudadas e desenvolvidas nas últimas décadas, porém, existe ainda um vasto potencial a ser explorado tanto em questões técnicas, como económicas e de regulamentação. O uso de micro-redes é uma solução eficaz para combater as questões de impacto ambiental, que hoje em dia, são fortemente tomadas em atenção na geração de energia. Fazendo uso de recursos locais e renováveis, a geração de energia numa micro-rede tende a reduzir fortemente os níveis de poluição em comparação com as grandes centrais. Este novo paradigma de produção local e em pequena escala apresentado pelas micro-redes é um passo importante no sentido da possível criação de pequenas comunidades autossuficientes, que usam os recursos locais disponíveis para geração de toda a energia que consomem, criando assim pequenas economias locais e contribuindo para a sustentabilidade do planeta.

1.1 Objetivos

Ao longo do trabalho pretende-se estudar as dinâmicas que ocorrem numa micro-rede após a sua separação da rede de distribuição. Para isso estabelecem-se, de uma forma geral, os seguintes objetivos que, quando concretizados, permitem através dos seus resultados avaliar o desempenho do sistema:

- Modelação dinâmicas das componentes necessárias à simulação de um sistema de teste;
 - Modelação do painel fotovoltaico, célula de combustível, sistema de armazenamento, inversores e cargas;
- Estudar estratégias de controlo aplicadas a micro-redes;
 - Inversores controlados por PQ e inversores controlados por VSI;
 - Operação com controlo em *Single-Master* e em *Multi-Master*;
 - Estudo do controlo secundário;
- Realizar um estudo de estabilidade da micro-rede;
 - Avaliar dinamicamente a micro-rede para casos de importação e de exportação de energia da rede de distribuição.

1.2 Estrutura do trabalho

O trabalho apresentado foi dividido em 6 capítulos.

No Capítulo 2 é feita uma contextualização do conceito de micro-rede, onde se pretende discutir os princípios que o definem, mostrar os principais benefícios associados, tanto a nível técnico como ambiental, e apresentar, resumidamente, as principais tecnologias que são hoje abundantemente utilizadas no âmbito das micro-redes.

No Capítulo 3 pretende-se definir detalhadamente os modelos utilizados na simulação da micro-rede de teste. Definem-se modelos para dois tipos distintos de micro-fontes, o painel fotovoltaico e a célula de combustível, são introduzidos os modelos de controlo a implementar pelos conversores, e apresentam-se modelos simples para o sistema de armazenamento e para as cargas.

No Capítulo 4 são discutidas as estratégias de controlo a implementar pelos inversores que compõem a micro-rede e são apresentados dois modos de controlo que permitem abordagens e resultados distintos na avaliação de estabilidade do sistema.

No Capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados obtidos na realização das simulações, e é feita uma comparação entre os dois modos de controlo implementados.

No Capítulo 6 é feito um resumo dos principais resultados obtidos ao longo do trabalho apresentado.

Capítulo 2 - Conceptualização teórica de micro-rede

Neste capítulo pretende-se estudar, de um ponto de vista puramente teórico, os aspetos mais relevantes relacionados com o estudo das micro-redes. É feita uma abordagem introdutória que propõe esclarecer conceitos básicos de definição e classificação de micro-redes, são apresentados com detalhe os principais benefícios e beneficiados pelo uso das micro-redes, e são introduzidas as principais tecnologias de geração e armazenamento que, hoje em dia, servem de recursos às micro-redes.

2.1 Definição

Embora um assunto vastamente discutido, uma definição clara do que é e, o que não é uma micro-rede, está ainda por clarificar. As micro-redes necessitam de incorporar energias renováveis? As micro-redes têm que ter implementados contadores inteligentes? As micro-redes devem desligar-se e ligar-se a uma rede elétrica maior? Todas estas são ainda questões em aberto [2]. Apesar da escassez de uma definição formal e globalmente aceite, várias definições de diversas entidades são facilmente encontradas.

Comece-se pelo *U.S. Department of Energy* nos Estados Unidos que define micro-rede como um grupo de recursos de energia distribuídos e cargas com limites elétricos claramente definidos que atua como uma entidade controlável única em relação à rede. A micro-rede pode ligar e desligar-se da rede de modo a que possa operar em modo ligada ou em ilha [3].

No entanto, o *International Council on Large Electric Systems, CIGRÉ*, opta por definir micro-rede como um sistema elétrico distribuído que contem cargas e recursos de energia distribuídos (como geradores, equipamentos de armazenamento, e cargas controláveis) que pode operar de um modo controlado e coordenado quer esteja ligado à rede ou esteja em operação em ilha [4].

Por sua vez, o *EU Research Projects* define micro-rede como sistemas de distribuição de BT com recursos energético distribuídos (microturbinas, células de combustível, PV, etc.) em conjunto com dispositivos de armazenamento (volantes de inércia, condensadores e baterias) e cargas controláveis. Tal sistema pode operar de modo não autónomo, se ligado à rede, ou de modo autónomo se desligado da rede. O uso de micro-fontes na rede pode providenciar diversos benefícios para a performance global do sistema se gerenciados e coordenados eficientemente [5].

Partindo deste conjunto de definições é possível retirar algumas conclusões que, embora não sejam suficientes para o definir o conceito de micro-rede, são certamente úteis para entender, de forma simples e concreta, as ideias que o suportam:

- Conjunto localizado de fontes de geração, sistemas de armazenamento e cargas - ou seja, o foco do conceito de micro-rede passa por ter as fontes de geração e os sistemas de armazenamento geograficamente perto das cargas;
- Capacidade de operar em dois modos distintos, ligada à rede ou em ilha;
- Capacidade de planeamento, gestão e coordenação de todos os seus componentes, formando assim uma entidade única e controlável.

Estas ideias são, de certa forma, comuns às três definições apresentadas e pretendem clarificar, tanto quanto possível, não o conceito de micro-rede, mas a ideia por trás do conceito.

2.2 Modos de operação

As micro-redes apresentam, como referido anteriormente, dois modos distintos de operação. No modo de ligação à rede elétrica, a micro-rede usufrui dessa ligação para realizar trocas de energia com a rede elétrica, de tal forma que se a energia produzida pelas micro-fontes não for suficiente para satisfazer o consumo, então a micro-rede recebe energia da rede, e tem por isso que acarretar com os custos associados à compra de energia, e por outro lado, se a energia produzida for superior à consumida, a micro-rede pode enviar o excesso para a rede e receber um valor monetário pela venda de energia.

No modo de operação em ilha a micro-rede desliga-se totalmente da rede e opera autonomamente. Este modo pode ser ativo em casos de emergência como uma falha de energia na rede, ou pode ser um evento previamente planeado, por exemplo caso sejam necessárias realizar serviços de manutenção.

2.3 Classes

As diferentes classes de micro-redes são distinguidas em diferentes segmentos de mercado onde o uso de micro-redes se apresenta como solução. Identificam-se cinco categorias distintas [1]:

- **Campus/Institucional:** foca-se na agregação de geração existente no local com múltiplas cargas localizadas (ex. parque industrial). Este segmento em particular tem atraído imenso interesse no campo das micro-redes, devido à possibilidade de um proprietário a nível individual ter a exploração da geração e do consumo num espaço geográfico restrito facilitando a sua gestão e evitando obstáculos de regulamentação;
- **Remotas ("Off Grid"):** nunca se ligam à rede elétrica, operando sempre em modo ilha. Exemplos incluem sistemas elétricos em pequenas vilas ou ilhas normalmente com geradores a diesel interligados, com a possibilidade de integração de geração renovável (sendo o mais usual as turbinas eólicas ou painéis fotovoltaicos);

- **Militares:** altamente desenvolvidas com principal foco na segurança, tanto física como em aspetos de cibersegurança, das instalações militares de modo a garantir a fiabilidade da energia sem necessidade de dependência da rede elétrica;
- **Comercial e Industrial:** apesar de ser considerada uma classe de micro-redes, não tem ainda padronização concreta o que leva a limitações de implementação a nível global;
- **Comunidade:** segmento de mercado fortemente utilizado na Europa que, no entanto, vai contra o conceito clássico de micro-redes visto não ter a capacidade de operar em ilha.

Na Figura 2.1 é apresentado o crescimento, verificado nos últimos anos, das classes apresentadas. Os dados são relativos ao mercado norte-americano e são reveladores de como tem aumentado o interesse, o estudo e o desenvolvimento das micro-redes. Em 2012 havia cerca de 1000 MW de potência instalada em micro-redes e num intervalo de 6 anos, esse valor triplicou. As maiores porções de capacidade instalada representam a classe Campus/Institucional e a classe Comunidade. Ainda assim, recentemente a classe Militar tem vindo a ter um investimento bastante significativo. O *U.S. Department of Defense* tem vindo a apostar incisivamente na implementação deste tipo de micro-redes pois as instalações militares dependem fortemente na rede elétrica local e tal pode não ser adequado em certos cenários. Está em vigor um programa, denominado SPIDERS, que passa pelo uso de energia solar e eólica em vez de geradores a diesel nas bases militares de modo a aumentar a fiabilidade da energia, diminuir os consumos de combustível e reduzir a pegada ecológica. Além disso, nesta classe de micro-redes incluem-se micro-redes móveis instaladas nas bases militares situadas em locais remotos [1].

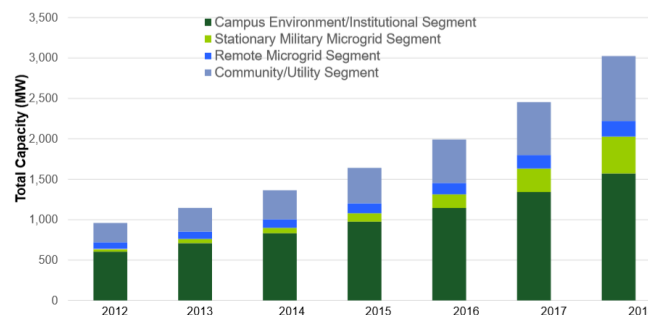


Figura 2.1 - Crescimento do mercado norte-americano nas diferentes classes de micro-redes [6]

2.4 Arquitetura de controlo

O controlo de micro-redes tem sido regularmente estudado ao longo do tempo e atualmente existem diversas abordagens na literatura a esta questão. Na Figura 2.2 é apresentado o diagrama simplificado da arquitetura operacional de micro-redes, desenvolvido pelo *EU R&D Microgrids Project*, composta pela rede BT, cargas (algumas ininterruptas), micro-fontes controláveis e não-controláveis, equipamentos de armazenamento e um esquema de controlo suportado por uma infraestrutura de comunicações usado para monitorizar e controlar as micro-fontes e as cargas [7]. O

o sistema de controle é composto por três unidades distintas que operam em sintonia: *Microgrid Central Controller* (MGCC), *Microsource Controllers* (MC) e *Load Controllers* (LC).

A micro-rede é gerida e controlada centralmente pelo MGCC instalado na subestação MT/BT. O MGCC ocupa a primeira posição do sistema hierárquico de controle [7], sendo a interface entre a micro-rede e os outros intervenientes (ex: Operador da Rede de Distribuição) e desempenha funções-chaves, como a gestão económica e as funções de controle. Os LC são controladores localizados nas cargas ou grupos de cargas servindo como interface ao controle das cargas através da implementação do vulgarmente designado deslastre de carga, que consiste na interrupção de alimentação em situações de emergência. Os MC são controladores localizados nas micro-fontes e controlam as potências ativa e reativa produzidas em cada micro-fonte [7]. Tanto os LC como os MC encontram-se no mesmo nível hierárquico, abaixo do MGCC. Estes controladores trocam informações com o MGCC fazendo o planeamento e gestão da micro-rede através do fornecimento de set-points de operação. As informações trocadas incluem, além mensagens com os *set-points* para os MC e LC, pedidos de informações enviados pelo MGCC para o LC e o MC relativos a potências ativa e reativa ou níveis de tensão e mensagens de controle dos interruptores da micro-rede. As infraestruturas de comunicação usadas apresentam custos consideravelmente baixos, devido à proximidade geográfica entre os componentes da micro-rede [7].

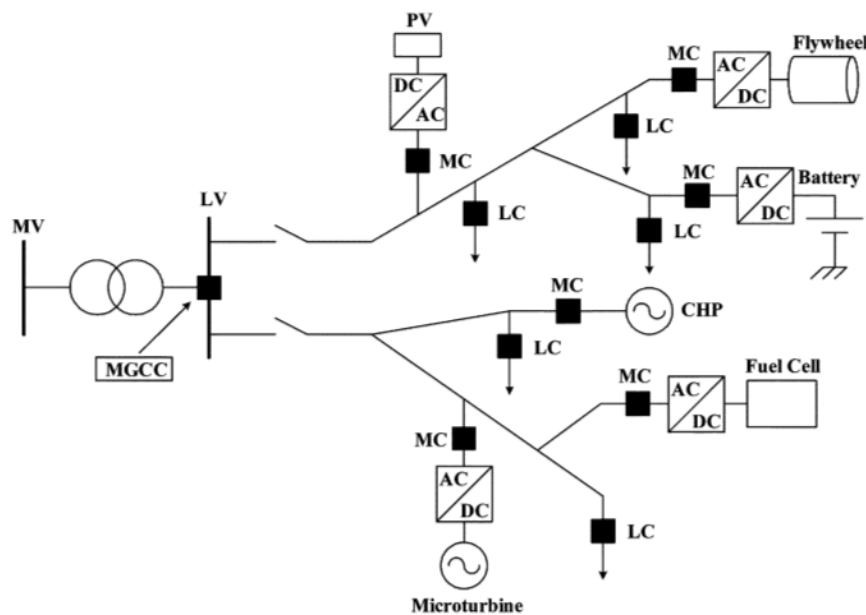


Figura 2.2 - Arquitetura de micro-rede com micro-fontes, cargas e sistema de armazenamento [7]

2.5 Objetivos associados ao uso de micro-redes

2.5.1 Agentes

Os agentes são qualquer entidade que tem uma participação direta ou indireta na gestão e resultados de uma empresa, um negócio ou uma indústria, podendo ser afetados positivamente ou negativamente, conforme as suas políticas e forma de atuação. No caso das micro-redes é identificado um conjunto de diferentes agentes, divididos em duas categorias diferentes: essenciais e opcionais [8]. Da categoria de agentes essenciais fazem parte os consumidores, os responsáveis pelas micro-fontes, o Operador da Rede de Distribuição e o fornecedor de energia. Por sua vez, na categoria de agentes opcionais encontram-se todas as entidades que podem tirar partido da sua participação em micro-redes, mas que não são elementos obrigatórios na sua atuação. Desta categoria fazem parte os operadores que têm autoridade de decisão sobre as cargas controláveis, as subestações de armazenamento e os veículos elétricos que podem ser usados no conceito de V2G (*vehicle to grid*, baseia-se no uso das baterias dos veículos elétricos para fornecer energia à micro-rede quando os veículos se encontram ligados à micro-rede)

2.5.2 Potenciais benefícios

A identificação dos benefícios associados ao uso de micro-redes é uma tarefa de coordenação de múltiplos objetivos e com múltiplos intervenientes. A escala e tipo de benefícios obtidos estão dependentes das circunstâncias de design e planeamento implementado. O desempenho de uma micro-rede é fortemente afetado por fatores como a localização e dimensionamento, a sua operação em tempo-real, a configuração do sistema de distribuição local, a capacidade da infraestrutura já existente da rede elétrica de acompanhar o crescimento local de carga e a abundância de recursos locais [8].

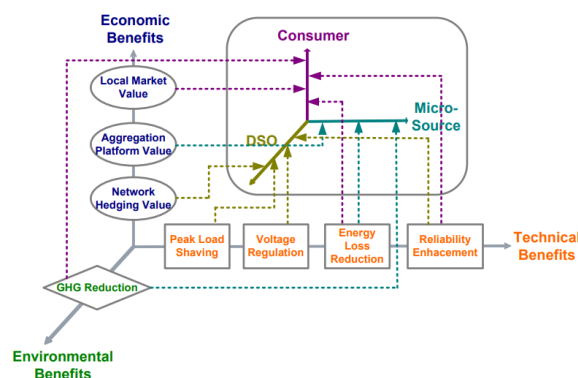


Figura 2.3 - Benefícios associados ao uso de micro-redes [8]

2.5.2.1 *Económicos*

O ponto de vista económico é um fator crítico que levou ao desenvolvimento de micro-redes e que continua a potenciar o seu estudo. A este nível uso de micro-redes possibilita [9]:

- **Reduzir os custos da energia:** através do consumo da energia produzida/armazenada na micro-rede é possível reduzir, ou até mesmo eliminar, a compra de eletricidade à rede; além disso, se a micro-rede estiver equipada com CHP, é possível recuperar o calor libertado pelas fontes de geração, possibilitando aos consumidores reduzir custos relacionados com aspetos térmicos;
- **Vender o excesso de produção à rede:** o proprietário da micro-rede tem a possibilidade de vender o excedente da produção à rede elétrica e assim criar valor financeiro. Este excedente de produção aparece quando dois fatores acontecem em simultâneo: a energia produzida é superior àquela consumida pelas cargas e o nível de carga das baterias está completo (caso contrário, o excedente é usado para carregar as baterias).
- **Reduzir gastos nos serviços auxiliares:** os serviços auxiliares são todos os serviços implicitamente agregados à energia (ex: controlo de tensão, compensação de perdas) que suportam o funcionamento da sua operação de produção e transmissão. Como alguns destes serviços são da responsabilidade da micro-rede, como o controlo da tensão, os custos relacionados com estes aspetos são reduzidos;
- **Reduzir as perdas elétricas na transmissão e distribuição:** como as fontes de geração de energia nas micro-redes estão geograficamente perto das cargas, os cabos são extremamente reduzidos em termos de comprimento quando comparados àquelas que transportam a energia produzida pelas grandes centrais, reduzindo assim as perdas, e, de forma indireta, os custos;
- **Evitar/reduzir investimentos na rede:** as redes elétricas necessitam de investimentos regulares nos sistemas de transmissão e distribuição (como substituição de linhas de alta tensão ou de transformadores) de modo a garantir que a capacidade dos cabos e das linhas é sempre suficiente para transportar a quantidade de energia necessária aos consumidores. O uso das micro-redes pode reduzir estes investimentos, pois ao consumir energia gerada na própria micro-rede, esta "remove" cargas que, caso a micro-rede não existisse, consumiriam energia da rede. Pode assim reduzir-se o consumo de pico em certas áreas, ou evitar o aumento de cargas, evitando por ventura investimentos de aumento de capacidade na rede;
- **Influenciar o preço da energia:** ao reduzir o consumo da rede elétrica, particularmente quando a procura é elevada, pode-se reduzir o custo marginal ou de pico das centrais e assim reduzir o preço da energia no mercado;

2.5.2.2 *Qualidade de Energia*

O desenvolvimento e sofisticação dos equipamentos de eletrônica tem tido um papel cada vez mais importante no estudo das micro-redes. Estes equipamentos são sensíveis tanto a flutuações de tensão como à existência de harmônicas, e como tal requerem fontes de maior fiabilidade. Enquanto um aumento de qualidade de energia e da sua fiabilidade é, sem dúvida, um benefício económico, nem todos os consumidores requerem ou estão dispostos a pagar pelo mesmo serviço de alta qualidade. Poderá acontecer que apenas uma porção dos consumidores tenham necessidade de energia ininterrupta ou de condições de qualidade de energia particularmente sensíveis. A micro-rede tem a capacidade de fornecer diferentes e personalizados níveis de qualidade e fiabilidade de energia, podendo assim podem fornecer diferentes serviços a diferentes consumidores [9]. O uso de micro-redes permite:

- **Reduzir interrupções de energia:** as falhas de energia, mesmo que momentâneas, apresentam riscos significativos na operação de sistemas de energia, tanto a nível económico como de segurança. Para muitos consumidores, o risco de falha de energia leva-os à necessidade de instalação geradores de *back-up* ou qualquer outro sistema de energia ininterrupta. As micro-redes representam uma solução eficaz na mitigação deste problema, pois apresentam a possibilidade isolar cargas internas e continuar a alimentá-las, em caso de falhas na rede elétrica;
- **Melhorar a qualidade da energia:** quando os níveis de tensão ou corrente se desviam de valores específicos a possibilidade de ocorrência de danos nos equipamentos aumenta. Através de eletrônica de potência, como conversores de potência e retificadores que convertem a potência de saída das fontes em formas de onda reguladas, a micro-rede controla internamente os níveis de tensão e frequência que fornece às cargas.

2.5.2.3 Ambientais

Através da integração de tecnologias de energias renováveis com baixas ou nenhuma emissões de poluentes para a atmosfera, as micro-redes potenciam a redução do impacto ambiental causada pela geração de energia. Como dito anteriormente, a produção de energia junto às cargas reduz as perdas elétricas e por consequência reduz as emissões associadas a essas perdas [9]. Do ponto de vista ambiental uso de micro-redes possibilita:

- **Reduzir emissões de dióxido de carbono:** quando comparadas com as grandes centrais e devido ao uso prioritário de fontes de energias renováveis, as micro-redes apresentam uma redução clara nas emissões de CO₂,
- **Reduzir emissões de poluentes atmosféricos:** os poluentes atmosféricos são o ozono, o material particulado, o monóxido de carbono, os óxidos de nitrogénio e o dióxido de enxofre. Estes poluentes são limitados por níveis de permissividade regulados tendo por base o seu perigo para a saúde (potenciadores de problemas respiratórios) e para o ambiente (potenciadores de chuvas ácidas). As micro-redes que dispõe de tecnologias de CHP

reduzem significativamente estas emissões, principalmente porque as tecnologias de combustão usadas no CHP, libertam uma quantidade muito inferior destes gases, em comparação com a combustão de combustível fóssil das centrais.

2.5.2.4 *Segurança*

Devido à possibilidade de funcionamento autónomo quando desligadas da rede, as micro-redes contribuem para o aumento da resiliência do sistema elétrico, podendo assim fornecer serviços públicos de segurança e servir como refúgio durante falhas de energia. Instalações, como hospitais, que possam receber energia vinda da micro-rede podem continuar em operação durante situações de emergência que causem falhas de longa duração na rede elétrica (ex. catástrofes naturais) [9].

2.6 Micro-redes AC e DC

As redes elétricas em todo o mundo são maioritariamente constituídas por infraestruturas AC e, por isso, o estudo e implementação de micro-redes tem também seguido essa tendência. No entanto, o estudo de micro-redes de característica DC tem vindo a ganhar ênfase atualmente, motivado pelo forte desenvolvimento de sistemas de energia DC que surgiu com o aparecimento das energias renováveis. Ainda assim, existem alguns desafios neste tipo de micro-redes que impedem o seu uso como um sistema completamente fiável. Um dos principais e mais importantes passa pelo sistema de proteção visto que, e como em qualquer sistema DC, a sua corrente não tem uma passagem natural por zero, tornando a sua implementação numa tarefa difícil [10].

A estrutura geral de uma micro-rede AC e de uma micro-rede DC é apresentada na Figura 2.4. O sentido das setas indica o sentido do fluxo de potência.

No caso das micro-redes AC são usados inversores trifásicos para ligar as micro-fontes DC ao barramento comum, retificadores trifásicos nas cargas DC e, um transformador e interruptor no PCC de modo a ligar a micro-rede e rede de distribuição.

No caso das micro-redes DC são necessários retificadores trifásicos e transformadores para conectar as fontes AC ao barramento comum, inversores monofásicos e trifásicos para fornecer energia às cargas AC, um conversor DC/AC/DC trifásico, um transformador e um interruptor no PCC. É ainda de notar que diferentes cargas DC requerem diferentes níveis de tensão DC, portanto em alguns casos é ainda necessário o uso de conversores DC/DC de modo a alterar o nível de tensão para o valor desejado [10].

Em ambos os casos, tanto micro-redes AC como DC, é considerado um barramento comum que agrupa todas as ligações entre geração, armazenamento e cargas na micro-rede. Este barramento pode representar um ou mais sistemas de distribuição radiais que ligam cargas e fontes distribuídas

dentro da micro-rede [10]. No caso das micro-redes AC, esse barramento lida com correntes e tensões alternadas, enquanto no caso de micro-redes DC, lida com correntes e tensões contínuas.

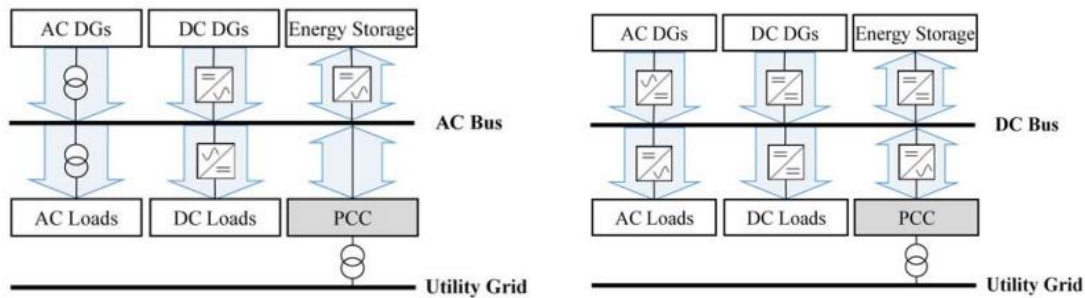


Figura 2.4 - Esquema da micro-rede AC e DC [10]

2.6.1 Micro-redes híbridas

Devido ao número elevado de conversores e níveis de conversão apresentadas nas micro-redes AC e DC, a eficiência do sistema diminui significativamente. O estudo de micro-redes híbridas surge com o objetivo de minimizar este problema, tentando reduzir as perdas através da redução do número de conversores na micro-rede. Uma estrutura típica deste tipo de micro-redes consiste em dividir os seus componentes de modo a obter um barramento AC e um barramento DC. Os barramentos AC e DC têm as suas micro-fontes, sistemas de armazenamento e cargas correspondentes, e estão ligados entre si através de um conversor trifásico bidirecional. O barramento AC é ligado à rede elétrica através de um transformador e um interruptor no PCC. Em [11] é estudada uma micro-rede híbrida constituída por tecnologias de geração fotovoltaica e baterias ligadas ao barramento DC, tecnologias eólicas ligadas ao barramento AC e cargas ligadas em ambos os barramentos. O estudo que pretende averiguar a estabilidade do sistema em ambos os modos de operação, ilha e ligada à rede. Conclui-se que embora a micro-rede proposta ofereça uma estabilidade satisfatória em ambos os modos, se torna difícil aplicar este tipo de micro-redes na sociedade atual, devido à predominância de infraestruturas AC já existentes nas redes elétricas atuais.

2.7 Principais tecnologias implementadas

O estudo das micro-redes assenta no pressuposto de tirar o máximo de proveito do uso de recursos de geração distribuída (GD). As unidades de geração distribuída são pequenas fontes, ou micro-fontes, localizadas perto dos pontos de utilização. Tipicamente incluem painéis fotovoltaicos (PV), turbinas eólicas, pilhas de combustível, microturbinas e geradores de combustão interna. Alguns destes tipos de geração distribuída podem ainda fornecer energia e calor combinados (CHP) através da recuperação do calor desperdiçado pelas micro-fontes. O uso do CHP permite aumentar significativamente a eficiência de qualquer micro-fonte. Algumas destas tecnologias requerem o uso de interfaces de eletrónica de potência que convertam a energia produzida para AC, de modo a ser compatível com a rede. Estes conversores poderão ser um conjunto retificador e inversor, ou apenas

um inversor. Os conversores são compatíveis em termos de tensão e frequência com a rede à qual serão conectados e contêm filtros de saída necessários [12]. Além destes, as micro-redes tiram partido do uso de tecnologias de armazenamento distribuídas. Estas tecnologias melhoram a performance geral da micro-rede em vários aspetos distintos, estabilizando as unidades de GD e permitindo que estas funcionem com saída constante e estável, independentemente de variações de carga, e permitindo a ininterrupção do sistema (capacidade *ride-through*) quando acontecem variações dinâmicas nas fontes primárias de energia (ex: sol, vento, fontes hídricas). Além disto, as tecnologias de armazenamento trazem benefícios aos sistemas em que estão inseridas, permitindo atenuar o consumo de pico, contrariando perturbações momentâneas durante falhas de energia atuando enquanto se espera a resposta dos geradores de *back up*, e reservando energia para consumos futuros [12].

2.7.1 Micro-fontes

2.7.1.1 Fotovoltaico

A tecnologia fotovoltaica, também denominada de células solares, é a interface que permite converter a energia proveniente da radiação solar em energia elétrica. Esta tecnologia é particularmente atrativa do ponto de vista das micro-redes por poder ser instalada no topo de edifícios e assim solucionar problemas com a instalação em locais de área reduzida. A tecnologia fotovoltaica oferece a possibilidade de facilmente se aumentar (ou diminuir) a potência instalada desejada, através do simples aumento (ou diminuição) da quantidade de painéis solares instalados. Esta tecnologia tem vindo a apresentar um enorme crescimento no sector das energias renováveis principalmente devido a questões ambientais relacionados com as emissões de carbono, segurança de energia e o aumento dos preços dos combustíveis fósseis.

As células solares são fabricadas com um material semicondutor, geralmente silício cristalino dopado. O silício não pode ser usado na sua forma pura pois é mau condutor, ou seja, não possui eletrões livres e para inverter esta situação, o silício é dopado com percentagens de outros elementos. Dopando-o com fósforo obtém-se um material com eletrões livres ou portadores de carga negativa (tipo n) e, dopando-o com boro obtém-se um material com características inversas, isto é, com cargas positivas livres (tipo p), vulgarmente denominadas por lacunas. Deste modo obtém-se dois tipos de matérias diferentes, um que fornece eletrões (tipo n) e outro que recebe eletrões (tipo p). Cada célula solar é composta por uma camada fina do material do tipo n e por outra, de maior espessura, do tipo p que, em conjunto, formam uma junção p-n. Os eletrões difundem-se da camada tipo n para a camada tipo p ocupando os espaços das lacunas. Quando a luz solar incide sobre a célula fotovoltaica, os fotões chocam com os eletrões da estrutura de silício, fornecendo-lhes energia. No entanto, devido à presença do campo elétrico que se forma na área de união entre os dois materiais (região de depleção), estes eletrões não conseguem fluir da camada tipo n para a camada tipo p. Ligando um condutor externo entre as camadas, pode aproveitar-se este fluxo de eletrões

energizados pela luz solar que se forma na passagem dos eletrões de uma camada para a outra, obtendo assim corrente elétrica. Este fluxo manter-se-á enquanto a luz continuar a incidir na célula e variará na mesma proporção da intensidade da luz incidente. A célula solar não tem capacidade para armazenar energia elétrica, apenas mantém o fluxo de eletrões enquanto houver incidência de luz solar sobre ela. Este fenómeno que explica o funcionamento das células solares, denomina-se efeito fotovoltaico.

O equipamento de geração fotovoltaica inclui ainda, para além dos painéis fotovoltaicos, mais dois componentes: a estratégia de controlo e a tecnologia de eletrónica de potência. O primeiro consiste no MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), enquanto o segundo é um componente indispensável ao sistema PV e consiste principalmente num inversor [13]. Tendo em conta que o desempenho do sistema PV modifica consoante a temperatura do módulo e a radiação solar incidente, a função do MPPT passa por obrigar o sistema a operar no ponto de máxima potência, garantindo que o sistema opera com um rendimento tão elevado quanto possível. Por outro lado, os sistemas fotovoltaicos produzem em DC, sendo então indispensável o uso do inversor, de modo a fazer a conversão para AC e assim permitindo que o sistema possa ser ligado ao barramento da micro-rede.

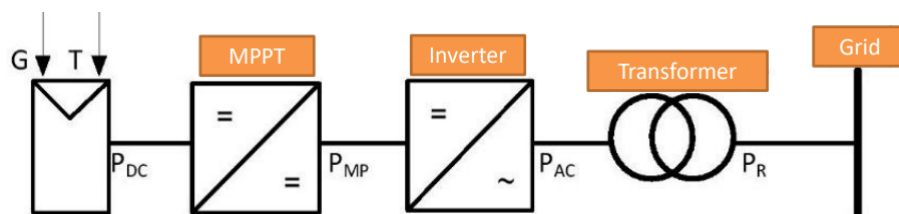


Figura 2.5 - Equipamento Fotovoltaico [14]

2.7.1.2 Turbinas eólicas de pequena escala

A tecnologia eólica permite aproveitar a energia cinética do vento e através de turbinas eólicas (também denominados aerogeradores), transformá-la em energia mecânica e conseqüentemente em energia elétrica. Na Figura 2.6 apresenta-se a disposição dos principais elementos numa turbina eólica. A torre permite elevar a turbina até alturas onde os ventos são mais regulares. A nave ou *nacelle* contém e protege o sistema mecânico [15]. O sistema mecânico inclui elementos como a caixa de velocidades, o rotor ou o gerador elétrico. O rotor está conectado a um veio, que o liga ao gerador elétrico através da caixa de velocidades. As pás permitem "absorver" a energia cinética do vento e assim fazer girar o rotor [15]. Outro elemento importante e que não se encontra representado na Figura 2.6 é o anemómetro. O anemómetro tem a função de medir a velocidade e a direção do vento e comunicar ao sistema essa informação de modo a otimizar a sua operação.

O princípio de funcionamento da turbina eólica é relativamente simples. As pás rotativas são dispostas de modo a absorverem a energia cinética do vento e quando estas começam a rodar, provocam a rotação do veio que liga o centro do rotor a um gerador elétrico. Por sua vez, o gerador transforma essa energia rotacional em eletricidade.

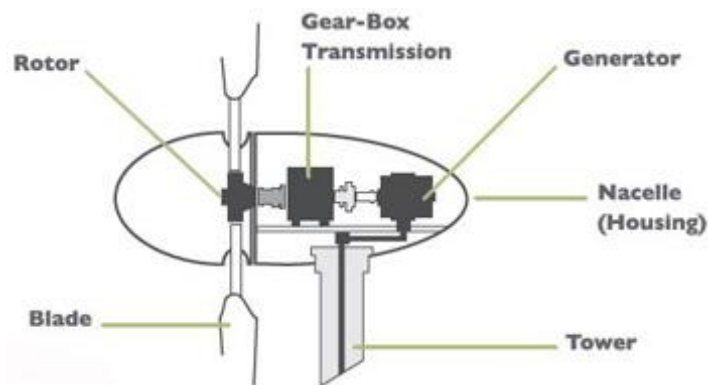


Figura 2.6 - Equipamento Eólico [16]

A adaptação da tecnologia eólica para a micro-redes passa pela utilização destas turbinas em pequena escala para que possam ser dispostas em zonas próximas dos consumidores. A construção deste tipo de turbinas compreende capacidades na ordem dos 100 kW, existindo ainda o desenvolvimento de microturbinas eólicas com capacidades na ordem dos 5 kW que são desenhadas com o intuito de serem instaladas nos telhados dos edifícios. Apesar do desenvolvimento que hoje em dia se verifica nesta tecnologia, existem alguns aspetos considerados inconvenientes na sua implementação como o impacto visual, a exigência de requerimentos de segurança estrutural dos edifícios, a fiabilidade de operação ou os níveis de ruído. De modo a combater estes aspetos, novas implementações têm sido estudadas, como o uso de microturbinas de eixo horizontal ou a integração da turbina na própria estrutura do edifício.

2.7.1.3 Células de Combustível

As células de combustível são dispositivos que convertem energia química diretamente em energia elétrica através de uma reação eletroquímica entre hidrogénio e oxigénio. O seu funcionamento é similar ao das baterias. Todas as células de combustível contêm dois eléctrodos, um positivo (ânodo) e um negativo (cátodo), um eletrólito que transporta os eletrões de um eléctrodo para o outro, e um catalisador que aumenta a velocidade da reação. As reações que produzem eletricidade ocorrem nos eléctrodos. O material usado como eletrólito é geralmente usado para identificar o tipo de célula [17].

O princípio de funcionamento das células de combustível baseia-se na produção de corrente elétrica através de uma reação química. Na Figura 2.7 apresenta-se a estrutura da célula de combustível. Em termos gerais, os átomos de hidrogénio entram no ânodo da célula onde uma reação química lhes retira eletrões. Os átomos de hidrogénio ficam assim ionizados e passam a transportar carga positiva. Através de fios condutores que liguem o ânodo a uma carga e por sua vez a carga ao cátodo, os eletrões libertados da reação de ionização fornecem corrente DC à carga. Por outro lado, o oxigénio entra no cátodo e dois processos podem ocorrer dependente do tipo de célula a ser utilizada. Em certos tipos de células o oxigénio combina-se com os eletrões que retornam ao cátodo pelo circuito elétrico e com os iões de hidrogénio que foram transportados desde o ânodo pelo eletrólito. Noutros

tipos de células, o oxigênio absorve os elétrons e viaja através do eletrólito até ao ânodo onde se recombina com os íons de hidrogênio. A presença do eletrólito é essencial pois permite que apenas os íons transitem entre o ânodo e o cátodo. Caso elétrons livres ou outra qualquer substância pudesse fazer esta transição, a reação química seria interrompida. Independentemente da combinação entre o oxigênio e os íons de hidrogênio ocorrer no ânodo ou no cátodo, o seu produto de reação é água que, por sua vez, é drenada da célula. Desde que, e enquanto forem fornecidos átomos de hidrogênio e oxigênio à célula, esta continuará a produzir eletricidade [18]. Um detalhe importante é que uma célula apenas gera uma quantidade muito reduzida de corrente DC, portanto na prática são utilizadas várias células empilhadas. Independentemente de ser usado uma célula individual ou uma pilha de células, o princípio de funcionamento é o mesmo [18].

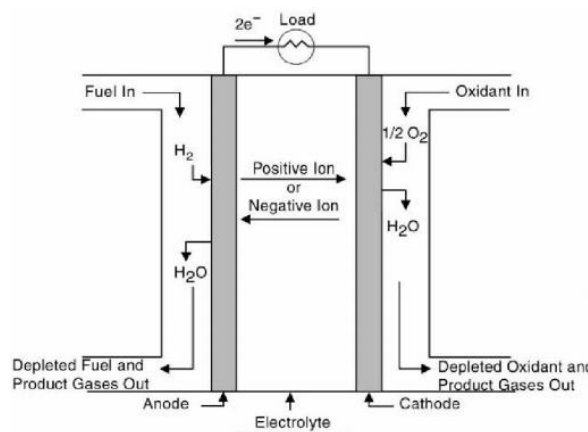


Figura 2.7 - Estrutura da Célula de Combustível [17]

Na última década, as células de combustível têm se tornado uma das soluções mais promissoras para fazer face aos sucessivos aumentos de consumo de energia no século XXI. Esta é uma tecnologia adequada e recomendada a ser usada em geração distribuída devido à sua alta eficiência, escalamento, modulação e praticamente negligenciáveis níveis de emissões prejudiciais ao ambiente [17]. Neste sentido, a previsão é que no futuro os mercados de energia sejam uma combinação entre produção centralizada, através de grandes centrais, e geração distribuída de pequena e média escala. Neste último, onde o conceito de micro-rede se insere, acredita-se que as células de combustível irão ter um papel importante no seu estudo, desenvolvimento e expansão.

2.7.1.4 Microturbina

As microturbinas são pequenas turbinas de combustão utilizadas como fontes de geração locais ou móveis ou, em aplicações de acionamento mecânico. São sistemas de geração de energia que se baseiam na combinação entre uma pequena turbina a gás e um gerador de alta velocidade. Em muitos casos, a turbina a gás inclui um recuperador de gases de exaustão, o que melhora significativamente a eficiência do sistema. Além disso, as microturbinas incluem ainda um combustor que pode operar com diversos combustíveis como gás natural, diesel, etanol ou biogás [19].

Resumidamente, esta tecnologia não é mais que um tipo de turbina de combustão que produz calor e eletricidade numa escala relativamente reduzida [20]. Existem no mercado dois tipos distintos de microturbinas, *single-shaft* e *split-shaft*, cujas diferenças se encontram no seu tipo de construção. Por um lado, as turbinas *single-shaft* apresentam o compressor e a turbina dispostos no mesmo eixo (*shaft*) que o gerador elétrico e incluem um gerador de magnetos permanentes de alta velocidade (variação entre os 50000 e os 120000 rpm). Por outro lado, as turbinas *split-shaft*, ou *twin-shaft* como também são conhecidas, tem o gerador e o compressor em eixos diferentes, e operam com uma turbina de velocidades mais reduzidas conectada a um gerador convencional através de uma caixa de velocidades. As microturbinas *split-shaft*, em comparação com as turbinas de eixo único, sacrificam a simplicidade de construção de modo a permitir a eliminação do gerador de alta velocidade.

Em relação aos componentes, grande parte das microturbinas são compostas por um compressor, um combustor, uma turbina, um inversor, um recuperador (que tem a função de capturar o calor desperdiçado de modo a melhorar a eficiência no nível de compressão) e um gerador [20]. A disposição e interação de tais componentes são apresentados na Figura 2.8. O compressor comprime o ar de entrada que é depois pré aquecido no recuperador através o calor expelido pelo exaustor da turbina. De seguida, o ar aquecido passa pelo combustor onde é misturado com um fluido e origina gases de combustão que por sua vez são expandidos na turbina. Nas microturbinas *single-shaft* durante a expansão a turbina aciona o compressor, que por sua vez, aciona o gerador, produzindo eletricidade. No caso das microturbinas *split-shaft*, o compressor aciona o exaustor da turbina que por sua vez aciona uma segunda turbina, que finalmente aciona o gerador [21].

As microturbinas oferecem uma quantidade vasta de potenciais vantagens na sua utilização quando comparadas com outras tecnologias de geração de pequena escala. Destas vantagens destacam-se o facto de terem um número reduzido de partes móveis, tamanho compacto, peso leve, melhores eficiências, baixas emissões de poluentes, baixos custos de eletricidade, e oportunidade de reutilizar calor desperdiçado. A implementação do recuperador de calor permite obter uma eficiência global do sistema superior a 80%. Devido ao seu tamanho reduzido, custos de investimento relativamente baixos, custos de operação e manutenção execravelmente baixos, e controlo eletrónico automático, espera-se que as microturbinas captem uma porção significativa do mercado da geração distribuída [20]. As microturbinas são ideais para aplicações de geração distribuída devido à sua flexibilidade de métodos de conexão, capacidade de ser empilhadas em paralelo de modo a alimentar cargas maiores, capacidade de fornecer energia estável e fiável, e por apresentarem níveis de emissões baixos [21].

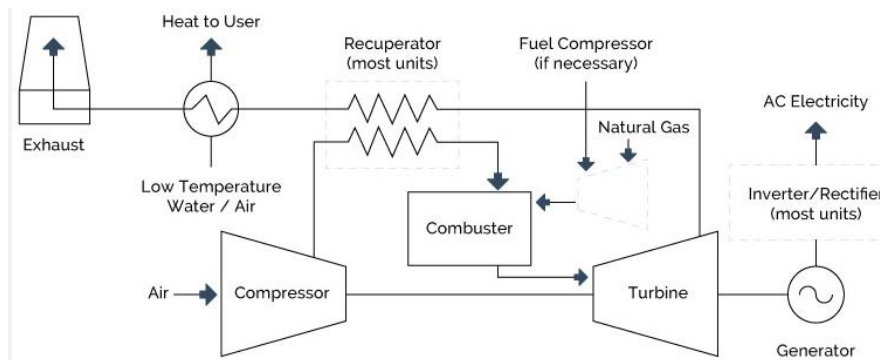


Figura 2.8 - Esquema de funcionamento da Microturbina [21]

2.7.1.5 CHP

A sigla CHP provem do inglês *Combined Heat and Power* e é, como o nome indica, uma forma de geração de energia e calor. Também vulgarmente designada como cogeração, esta tecnologia consiste na produção em simultâneo, através de uma única fonte, de energia elétrica ou mecânica e calor útil (a ser usado em aplicações de aquecimento e/ou arrefecimento). Um sistema de CHP compreende um conjunto de tecnologias que pode utilizar uma variedade de combustíveis, fósseis ou renováveis, de modo a gerar eletricidade próximo dos pontos de consumo. Esta proximidade permite que o calor libertado no processo de geração, que normalmente seria desperdiçado, seja recuperado e aplicado em serviços de aquecimento ou arrefecimento. Esta tecnologia tem sido desenvolvida ao longo dos anos, principalmente para aplicações industriais, comerciais de grande escala ou institucionais. É razoável esperar que as aplicações de CHP apresentem rendimentos entre 65% e 75%, o que resulta numa melhoria significativa em relação aos 50% que estes serviços (produção de eletricidade e produção de calor) apresentam se fornecidos em separado [22].

Na Figura 2.9 apresenta-se um sistema de CHP. O seu princípio de funcionamento, de uma forma simples e resumida, inicia-se com a combustão gás natural ou biogás na câmara de combustão de um ICE (motor de combustão interna), originando um fluxo de gás quente que aciona a turbina. Por sua vez a turbina está acoplada a um gerador que é acionado e produz eletricidade. Uma parte do gás quente é depois recuperado e orientado para a caldeira recuperadora de calor onde é transformado em calor útil e utilizado para aquecimento. A outra parte do gás quente é utilizado para acionar um *chiller* de absorção e produzir ar frio a ser usado para arrefecimento (ex: ar condicionados).

O sistema de CHP tem um impacto bastante positivo no desenvolvimento e suporte de economias locais e é, por isso, um tema de particular interesse em aplicações de geração distribuída e micro-redes. A utilização destes sistemas permite obter um aumento significativo de rendimento, pois através de uma única fonte origina dois tipos de energia distintos, elétrica e térmica. Além disso, apresenta baixos níveis de emissões de gases poluentes, melhora a fiabilidade da energia, pois não se tratando de uma fonte renovável não apresenta intermitência e, permite desenvolver valor

económico através de poupança em custos de energia uma vez que apresenta custos de manutenção reduzidos e permite reduzir a compra de energia da rede elétrica.

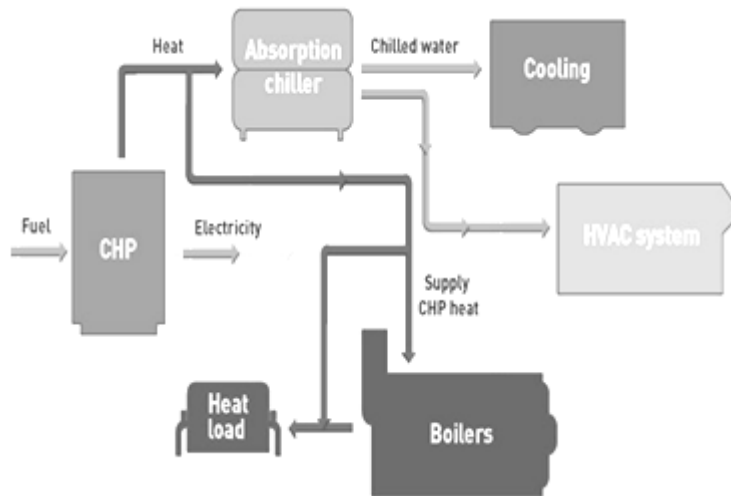


Figura 2.9 - Equipamento de CHP [23]

2.7.2 Sistemas de Armazenamento

2.7.2.1 Baterias

As baterias são dispositivos compostos por uma ou mais células eletroquímicas que armazenam energia elétrica na forma de energia química. Existem três componentes fundamentais e distintos que as constituem: dois terminais, denominados elétrodos, feitos de químicos distintos (normalmente metais), o ânodo e o cátodo, respetivamente; e o eletrólito, que separa esses terminais. O eletrólito é um meio químico que permite o fluxo de cargas elétricas entre o cátodo e o ânodo. Quando um dispositivo é ligado através de um circuito externo a uma bateria ocorrem reações químicas nos elétrodos que criam um fluxo de energia elétrica até esse dispositivo. De uma forma mais específica, durante o processo de descarga de eletricidade, o químico no ânodo liberta eletrões para o terminal negativo e iões para o eletrólito através de uma reação denominada oxidação. Entretanto, no terminal positivo, o cátodo recebe eletrões fechando o circuito do fluxo de eletrões. O eletrólito é indispensável pois tem a função de colocar os diferentes químicos do ânodo e do cátodo em contacto uns com os outros, de forma a que o potencial químico possa ser equilibrado entre os terminais e assim converter a energia química armazenada em energia elétrica útil. Estas duas reações acontecem em simultâneo, os iões transportam corrente através do eletrólito enquanto os eletrões fluem no circuito externo, gerando corrente elétrica. Se a bateria for descartável, irá produzir eletricidade até os reagentes se esgotarem. Estas baterias operam em sentido único, isto é, apenas transformam energia química em energia elétrica. Noutros tipos de baterias, a reação pode ser revertida. Este tipo de baterias designa-se de recarregáveis e são projetadas de forma a que a energia elétrica

proveniente de uma fonte externa (ex: sistema PV no caso da micro-redes) possa ser aplicada ao sistema químico e assim reverter a operação, restaurando a carga da bateria [24].

Existem diferentes tipos de baterias com diferentes características consoante os seus químicos constituintes. As utilizadas com mais regularidade no mercado dos sistemas de energia são as baterias de chumbo-ácido, as de Níquel-Cádmio (NiCd), as de Níquel-hidreto de metal (NiMH) e as de íões de lítio (Li-ion). Há um conjunto de aspetos a ter em conta quando se escolhe uma bateria para um sistema de energia, como o preço, a densidade de energia (quantidade de energia que a bateria consegue armazenar num determinado volume), a densidade de potência (rapidez com que a bateria consegue fornecer energia) e os níveis de poluição. As baterias de chumbo-ácido são as mais utilizadas em sistemas de *back-up* de energia, e tem como principal vantagem o facto de ter um custo reduzido. No entanto a bateria de íões de lítio tem vindo a ganhar destaque devido a um conjunto de vantagens que apresenta, como o facto de apresentarem densidades de energia e de potência superiores, apesar de apresentar também um custo relativamente mais elevado.

2.7.2.2 Volantes de Inércia

Os volantes de inércia, ou *flywheels*, são sistemas que baseiam o seu funcionamento no armazenamento de energia cinética numa massa rotacional. Essa energia poderá depois ser convertida em energia elétrica através de um gerador. Os volantes de inércia têm um tempo de resposta muito curto e são capazes de fornecer níveis de energia elevados o que os torna úteis para proteção de cargas críticas. Quando comparado com as baterias, os volantes de inércia apresentam um tempo de vida muito mais longo e que é praticamente independente do padrão de carga/descarga a que é sujeito. Tal característica permite que haja inúmeros ciclos de carga, reduzindo significativamente a necessidade de manutenção periódica do equipamento. No entanto, limitações como a capacidade de armazenamento, as dimensões relativamente grandes e as elevadas perdas quando em *standby* fazem desta tecnologia ineficaz para armazenamento durante longos períodos de tempo. Na rede elétrica atual, os volantes de inércia têm principalmente funções de proteção cargas como hospitais perante falhas de energia. São capazes de prevenir, sem necessidade de fontes de geração adicionais, falhas em grande parte das ocorrências visto que 97% das falhas elétricas na rede AC duram menos de 3 segundos e para tal duração os volantes de inércia são suficientes. No entanto, para falhas de duração superior é necessário e fundamental o acionamento de outros recursos de geração de energia de modo a manter o sistema operacional [25].

O princípio básico de funcionamento do volante de inércia consiste numa massa rotacional ligada a e máquina elétrica a funcionar como motor ou gerador consoante o modo de operação, ligados entre si através de dois conversores *back-to-back*.

Durante o modo de carga, energia elétrica é convertida em energia mecânica aumentando assim a velocidade rotacional da massa. O primeiro conversor opera como retificador, enquanto o segundo opera como inversor e aciona a máquina como motor.

Durante o modo de descarga, energia mecânica da massa rotacional é convertida em energia elétrica através da máquina que, neste caso, opera como gerador. O segundo conversor opera como retificador, enquanto o primeiro opera como inversor com a frequência da rede e a velocidade da massa rotacional diminui. No caso se não haver trocas de energia, o sistema entra em modo standby e a massa roda a velocidade constante [26].

A quantidade de energia armazenada nos volantes de inércia é proporcional ao quadrado da velocidade de rotação da massa, como mostra a equação (2.1).

$$E = \frac{1}{2}J\omega_m^2 \quad (2.1)$$

onde E representa a energia armazenada (J) no volante de inércia, J representa o momento de inércia da massa rotacional ($kg \cdot m^2$) e ω_m representa a velocidade angular da massa rotacional ($rad \cdot s^{-1}$).

2.7.2.3 Supercondensadores

Os supercondensadores também conhecidos como ultracondensadores ou condensadores eletroquímicos, são uma nova e emergente tecnologia com potencial para proporcionar avanços importantes no campo do armazenamento de energia. O princípio de funcionamento desta tecnologia segue o mesmo princípio fundamental dos condensadores convencionais, utilizando, no entanto, um eletrodo com áreas de contacto superiores e dielétricos mais finos de modo a obter capacitâncias mais elevadas. Esta característica permite obter valores de densidade de energia superiores aos apresentados pelas baterias, mantendo ainda assim a elevada densidade de potência apresentada pelos condensadores convencionais [27]. Os supercondensadores são compostos por dois eletrodos condutores separados por um material dielétrico isolante. Quando aplicada uma tensão, cargas opostas acumulam-se na superfície de cada eletrodo. As cargas mantêm-se separadas pelo dielétrico, produzindo assim um campo elétrico que permite ao condensador armazenar energia [27]. A capacitância do supercondensador, tal como nos condensadores convencionais, é definida como a razão entre a carga armazenada e a tensão aplicada. Como mostra a equação (2.2), a capacitância é diretamente proporcional à área da superfície dos eletrodos e inversamente proporcional à distância entre eles.

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{D} \quad (2.2)$$

onde C representa a capacitância (F), ε_0 e ε_r representam a constante dielétrica (ou permitividade) no vácuo e a constante dielétrica do material isolante entre os eletrodos ($A^2 \cdot s^4 \cdot kg^{-1} \cdot m^{-3}$), respetivamente, A a área da superfície dos eletrodos (m^2) e D a distância entre eles (m). O produto entre ε_0 e ε_r é uma constante. Por sua vez, a energia armazenada pelo condensador é diretamente proporcional à capacitância, relacionando-se através de:

$$E = \frac{1}{2}CV^2 \quad (2.3)$$

onde E é a energia armazenada (J), e V a tensão aplicada ao condensador (V). Pelas equações (2.2) e (2.3) conclui-se que a energia armazenada será tanto maior quanto a área dos elétrodos.

Quando se pretende usar supercondensadores em aplicações de potência, estes necessitam de ser ligados em série, formando módulos que variam entre os 50 e os 100 kW, de modo a serem alcançadas capacidades de armazenamento normais de funcionamento. Os supercondensadores apresentam usualmente uma vida útil que varia entre os 8 e os 10 anos e podem atingir rendimentos na ordem dos 95% [27].

Capítulo 3 - Modelação dinâmica dos componentes da micro-rede

O principal objetivo da presente dissertação passa pela simulação e conseqüente avaliação do desempenho operacional e do controlo de uma micro-rede. Como referido no capítulo anterior, uma micro-rede poderá funcionar segundo dois modos distintos de operação e, de modo a avaliar o seu comportamento em ambos os casos, é necessário desenvolver uma simulação capaz de representar as dinâmicas operacionais entre a rede de distribuição de Média Tensão e os componentes da micro-rede. Para tal, é necessário adotar modelos de simulação para todos os componentes cujo comportamento dinâmico se pretende analisar. Nas secções seguintes serão apresentados todos os modelos dinâmicos adotados para as micro-fontes, sistemas de armazenamento, inversores e cargas. Estes modelos servirão para descrever o comportamento dos diferentes componentes de geração, armazenamento e consumo permitindo assim uma avaliar a resposta global de operação da micro-rede.

3.1 Micro-fontes

Nesta secção pretende-se descrever detalhadamente os modelos dinâmicos das micro-fontes que foram adotados na plataforma de simulação. Em [28] e [29] apresentam-se diversas propostas de modelação para o conjunto de micro-fontes mencionadas no capítulo anterior. No âmbito deste trabalho foram escolhidos e modelados os painéis fotovoltaicos e as células de combustível. Ambos os modelos adotados têm como objetivo o cálculo da potência extraída em função dos respetivos parâmetros de entrada. Na situação do painel fotovoltaico, esses parâmetros serão a temperatura ambiente e a radiação solar incidente, tratando-se de variáveis sujeitas a intermitência e impossíveis de ser definidas pelo utilizador do painel, pelo que a potência extraída não poderá ser ajustada conforme as necessidades de consumo. Por outro lado, no caso da célula de combustível o parâmetro de entrada será a potência requisitada, permitindo ajustar a potência extraída conforme as necessidades de consumo. Esta característica torna a célula de combustível extremamente útil ao controlo do sistema, como será demonstrado no Capítulo 4.

3.1.1 Painel Fotovoltaico

Na literatura existe uma extensa variedade de modelos úteis à descrição do comportamento dinâmico de fontes de geração fotovoltaica. Na escolha do modelo que melhor se adequa à simulação pretendida deve ter-se em consideração a relação entre a precisão e a simplicidade do modelo, de modo a minimizar a complexidade computacional que a simulação poderá apresentar. Deve optar-se

por um modelo tão simples quanto possível, sem que, no entanto, com isso se sacrifique a precisão matemática dos resultados.

No âmbito deste trabalho a modelação do painel fotovoltaico foi realizada através da adoção do modelo simplificado descrito em [30].

3.1.1.1 *Standard Test Conditions*

O modelo matemático implementado recorre a um conjunto de valores fornecidos em catálogo pelo fabricante do painel. Tais valores são obtidos segundo testes experimentais, realizados ao painel em questão, sob condições nominais de teste, normalizadas para a realização das medidas dos parâmetros característicos da célula [30]. Estas condições, designadas por *Standard Test Conditions* (STC), são os seguintes valores de referência de temperatura do módulo e radiação solar incidente:

$$\begin{aligned} T^{stc} &= 25 [^{\circ}C] \\ G^{stc} &= 1000 [W \cdot m^{-2}] \end{aligned} \tag{3.1}$$

Em todo o seguimento do trabalho, o índice *stc* será utilizado como referência a qualquer resultado obtido segundo estas condições.

3.1.1.2 *Circuito Equivalente*

Como referido no capítulo 2, uma célula fotovoltaica consiste no uso de dois materiais condutores, um do tipo n e outro do tipo p, que quando em contacto entre si formam uma junção p-n. Por sua vez, a junção p-n funciona como um díodo atravessado por uma corrente interna unidirecional dependente da tensão aos terminais da célula [30], pelo que o método mais comum de modelar a célula fotovoltaica passa por usar o paralelo entre um díodo e uma fonte de corrente que pretende representar a corrente gerada pelo feixe de radiação luminosa. Na Figura 3.1 é apresentado o circuito simplificado equivalente que serve de base matemática ao modelo.

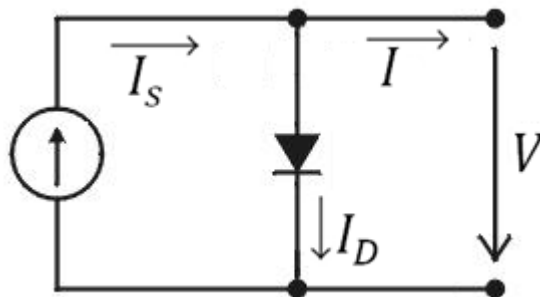


Figura 3.1 – Circuito simplificado equivalente da célula fotovoltaica [29]

Aplicando as Leis de Kirchoff, nomeadamente a lei dos nós e a lei das malhas, ao circuito em questão obtém-se as seguintes equações:

$$V = V_D \quad (3.2)$$

$$I = I_s - I_D \quad (3.3)$$

onde V_D representa a tensão no díodo [V], I representa a corrente injectada pela fonte de corrente [A] e I_D a corrente que atravessa o díodo [A] que é, por sua vez, obtida através de:

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{V}{mV_t}} - 1 \right) \quad (3.4)$$

onde I_0 representa a corrente inversa de saturação [A], m representa o factor de idealidade do díodo e V_t o potencial térmico [V]. O potencial térmico representa a tensão criada no semiconductor devido ao movimento dos electrões a uma dada temperatura e é calculada pela equação (3.5).

$$V_t = \frac{KT}{q} \quad (3.5)$$

onde K é a constante de Boltzmann e tem o valor de $1,380650 \cdot 10^{-23} \left[\frac{J}{K} \right]$, q é a carga do electrão e tem o valor de $1,602176 \cdot 10^{-19} [C]$, e T representa a temperatura [K].

De modo a estudar o comportamento do circuito da Figura 3.1, realizam-se dois ensaios: ensaio em curto-circuito e ensaio em circuito aberto.

Ligando-se a saída dos terminais em curto-circuito, verificam-se as seguintes condições:

- A tensão de saída da célula, V , é nula;
- A corrente que atravessa o díodo, I_D , é nula.

Aplicando tais condições à equação (3.2), conclui-se que a corrente de saída da célula é igual à corrente injectada pela fonte, ou, em termos matemáticos:

$$I = I_s = I_{cc} \quad (3.6)$$

onde I_{cc} representa a corrente de curto-circuito [A]. Este valor é característico da célula, sendo, portanto, obtido experimentalmente pelo fabricante, a condições de temperatura do módulo e radiação de referência. e fornecido em catálogo como I_{cc}^{stc} .

Passando ao ensaio seguinte, deixa-se agora em aberto a ligação entre os terminais do circuito, verificando-se a seguinte condição:

- A corrente de saída da célula, I , é nula;

Pelo que voltando à equação (3.2) se deduz que a corrente que atravessa o díodo é igual à corrente injectada pela fonte:

$$I_s = I_D = I_0 \left(e^{\frac{V_{ca}}{mV_t}} - 1 \right) \quad (3.7)$$

onde V_{ca} representa a tensão em vazio [V]. Resolvendo a equação em ordem à variável de interesse, V_{ca} , conclui-se que esta é matematicamente definida por:

$$V_{ca} = mV_t \ln \left(1 + \frac{I_s}{I_0} \right) \quad (3.8)$$

Este valor é também característico da célula, obtido experimentalmente pelo fabricante, a condições de temperatura do módulo e radiação de referência. e fornecido em catálogo como V_{ca}^{stc} . Substituindo as equações (3.3) e (3.5) na equação (3.2) obtém-se a expressão analítica que define a corrente de saída da célula:

$$I = I_{cc} - I_0 \left(e^{\frac{V}{mV_t}} - 1 \right) \quad (3.9)$$

De modo a calcular a potência produzida pela célula, visto tratar-se de um circuito de corrente contínua, basta multiplicar a tensão e corrente de saída, obtendo-se a equação (3.9),

$$P = VI = V \left[I_{cc} - I_0 \left(e^{\frac{V}{mV_t}} - 1 \right) \right] \quad (3.10)$$

A potência máxima, que pressupõe que a célula opera no ponto de máxima potência descrito no capítulo anterior, pode ser obtida através da aplicação da seguinte condição à equação (3.9):

$$\frac{dP}{dV} = 0 \leftrightarrow I_{cc} + I_0 \left(1 - e^{\frac{V}{mV_t}} - \frac{V}{mV_t} e^{\frac{V}{mV_t}} \right) = 0 \leftrightarrow e^{\frac{V}{mV_t}} = \frac{I_{cc} + 1}{\frac{V}{mV_t} + 1} \quad (3.11)$$

A solução da equação (3.10) é $V = V_{MP}$, sendo a correspondente corrente, $I = I_{MP}$, obtida através da equação (3.9) posteriormente ao resultado V_{MP} ser conhecido. No entanto, a equação (3.10) não é linear, pelo que a sua solução tem que ser obtida através de métodos iterativos. O método escolhido no âmbito do modelo em estudo é o método de Gauss-Seidel que garante a solução converge para o resultado exato à medida que o número de iterações aumenta. Aplicando o método ao resultado da equação (3.10), obtém-se:

$$V_{MP}^{(k+1)} = mV_t \ln \left(\frac{\frac{I_{cc} + 1}{\frac{V_{MP}^{(k)}}{mV_t} + 1}}{\frac{V_{MP}^{(k)}}{mV_t} + 1} \right) \quad (3.12)$$

onde k representa o número da iteração. O método deve ser repetido as vezes necessárias até que a diferença entre $V_{MP}^{(k)}$ e $V_{MP}^{(k+1)}$ seja tão pequena quanto desejado, sendo que quanto menor essa diferença, maior a precisão do modelo. O ponto de máxima potência é então calculado através de:

$$P_{max} = V_{MP} I_{MP} \quad (3.13)$$

Tal como I_{cc} e V_{ca} , também P_{max} , V_{MP} e I_{MP} são obtidos experimentalmente pelo fabricante, a condições de referência, e são fornecidas em catálogo como P_{MP}^{stc} , V_{MP}^{stc} e I_{MP}^{stc} . A potência máxima obtida em condições STC é designada por potência de ponta ou potência de pico.

O rendimento do painel, para determinada temperatura do módulo e radiação incidente, pode ser calculado através da relação entre a potência máxima produzida e a potência da radiação incidente, através de:

$$\eta = \frac{P_{max}}{AG} \quad (3.14)$$

onde A representa a área do painel [m^2] e G representa a radiação solar incidente [$W \cdot m^{-2}$].

Note-se que o modelo descrito é referente a apenas um painel fotovoltaico, no entanto, no âmbito das micro-redes a instalação contém vários painéis de modo a aumentar a potência produzida, usualmente para valores na ordem dos kW. Como tal, a potência total produzida pela instalação é dada por:

$$P_{pv} = N_{pv}P_{max} \quad (3.15)$$

onde P_{pv} representa a potência produzida pela instalação [W] e N_{pv} representa o número de painéis instalados.

3.1.1.3 Parametrização

Tendo em conta os dados de catálogo até aqui descritos é possível desenvolver o modelo através da introdução de equações de cálculo de 3 parâmetros fundamentais que, apesar de não serem dados reais do painel, são auxiliares ao modelo e de extrema utilidade à análise do comportamento do painel. Os três parâmetros em questão foram introduzidos na análise do circuito equivalente, são eles: o fator de idealidade do díodo, m , a corrente inversa de saturação em condições STC, I_0^{STC} e a corrente injectada pela fonte em condições STC, I_s^{STC} . Note-se que estes parâmetros são obrigatoriamente obtidos em condições STC, pois são calculados recorrendo exclusivamente aos valores de catálogo.

Tendo com base a equação (3.3) que calcula a corrente de saída do painel e aplicando as condições já estudadas de ensaio em curto-circuito, ensaio em circuito aberto e o ponto de máxima potência, obtêm-se respetivamente, em condições STC:

$$0 = I_s^{stc} - I_0^{stc} \left(e^{\frac{V_{ca}^{stc}}{mV_t^{stc}}} - 1 \right) \quad (3.16)$$

$$I_{cc}^{stc} = I_s^{stc} \quad (3.17)$$

$$I_{MP}^{stc} = I_s^{stc} - I_0^{stc} \left(e^{\frac{V_{MP}^{stc}}{mV_t^{stc}}} - 1 \right) \quad (3.18)$$

Através de alguma manipulação algébrica, obtendo o valor de I_0^{stc} pela equação (3.16) e posteriormente substituindo o resultado na equação (3.18), é possível obter a equação que define o fator de idealidade do díodo:

$$m = \frac{V_{MP}^{stc} - V_{ca}^{stc}}{V_t^{stc} \ln \left(1 - \frac{I_{MP}^{stc}}{I_{cc}^{stc}} \right)} \quad (3.19)$$

Segundo o modelo em questão, este valor é constante e independente das condições de temperatura do módulo e radiação solar incidente. Recorrendo, novamente, à equação (3.16), calcula-se o valor da corrente inversa de saturação em condições STC:

$$I_0^{stc} = \frac{I_{cc}^{stc}}{\frac{V_{ca}^{stc}}{e^{m'V_t^{stc}} - 1}} \quad (3.20)$$

Apesar dos dados serem fornecidos ao utilizador nas condições de STC, para atestar a fiabilidade do modelo é útil fazer uma análise para variações de temperatura do módulo e radiação incidente. Para tal, admite-se que a corrente inversa de saturação é unicamente dependente do valor de temperatura do módulo, podendo então ser descrita em termos das características do material e da temperatura [30] através de:

$$I_0 = I_0^{stc} \left(\frac{T}{T^{stc}} \right)^3 e^{\frac{\varepsilon}{m'} \left(\frac{1}{V_t^{stc}} - \frac{1}{V_t} \right)} \quad (3.21)$$

onde T representa temperatura do módulo [$^{\circ}C$]. Em relação à equação (3.21) são introduzidos dois valores, ε e m' , que têm especial importância no cálculo. O valor de ε , designa-se por hiato de silício, e representa a energia necessária para que os eletrões do silício passem da banda de valência para a banda de condução. No caso do cristal de silício apresenta o valor de 1.12 eV. O valor de m' designa-se por factor de idealidade equivalente e surge da necessidade de ligar várias células em série de modo a aumentar a tensão aos terminais do painel, uma vez que, individualmente, cada célula fotovoltaica apresenta aos seus terminais uma tensão muito baixa. Esta variável funciona como o fator de idealidade de cada célula individual que constitui o painel e é calculada por:

$$m' = \frac{m}{N_s} \quad (3.22)$$

onde N_s é o número de células ligadas em série.

Admitindo agora que a corrente de curto-circuito é exclusivamente dependente da radiação solar incidente, o seu valor pode ser calculado através de:

$$I_{cc} = I_{cc}^{stc} \frac{G}{G^{stc}} \quad (3.23)$$

onde G representa radiação solar incidente no módulo [$W \cdot m^{-2}$].

Recorrendo ao conjunto de todas as equações apresentadas é possível fazer uma análise ao comportamento do painel fotovoltaico para qualquer valor de radiação solar e temperatura do módulo desejado. Note-se que todas as equações apresentadas para condições STC são, igualmente, válidas qualquer que sejam os valores de temperatura do módulo e radiação solar incidente.

3.1.1.4 Temperatura Normal de Funcionamento da Célula

Para efeitos de modelação são considerados como entradas do modelo a radiação solar incidente e a temperatura ambiente. No entanto, o modelo considera como entrada a temperatura do módulo, pelo

que é necessário arranjar uma relação matemática entre tal valor e a temperatura ambiente. Para tal é necessário introduzir o conceito de NOCT. A temperatura normal de funcionamento da célula, habitualmente abreviado para NOCT do inglês *Normal Operation Cell Temperature*, é um valor fornecido pelo fabricante em catálogo que representa a temperatura atingida pela célula em condições normalizadas de funcionamento [30]. As condições de medição do NOCT são:

$$\begin{aligned} T^a &= 20 \text{ [}^\circ\text{C]} \\ G &= 800 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2}\text{]} \end{aligned} \quad (3.24)$$

onde T^a representa a temperatura ambiente [$^\circ\text{C}$].

A relação entre a temperatura ambiente e temperatura do módulo é então dada por:

$$T = T^a + \frac{G(\text{NOCT} - 20)}{800} \quad (3.25)$$

onde T representa a temperatura do módulo [$^\circ\text{C}$].

3.1.1.5 Comportamento do modelo

O estudo da resposta do modelo à variação dos parâmetros de entrada permite ter uma noção próxima do comportamento real do painel fotovoltaico. Para tal são analisadas as curvas I-V e P-V, leia-se curva da corrente em função da tensão e curva de potência em função da tensão, para diferentes valores dos parâmetros definidos como entradas do modelo.

Comece-se por estudar a influência da radiação solar incidente. As Figura 3.2 e Figura 3.3 mostram, respetivamente, a curva I-V e a curva P-V obtidas para diferentes valores de radiação.

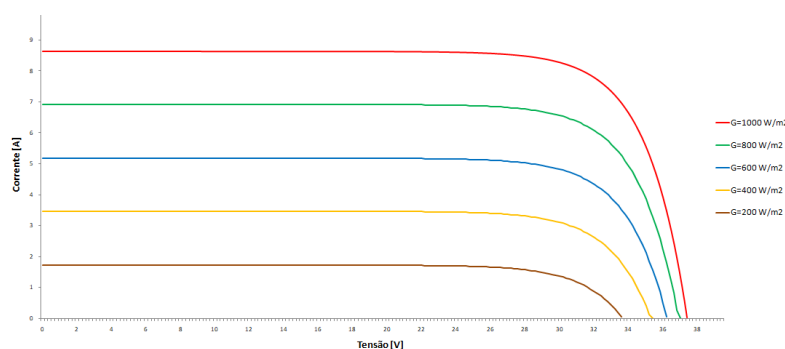


Figura 3.2 - Curva I-V: Variação da radiação solar incidente

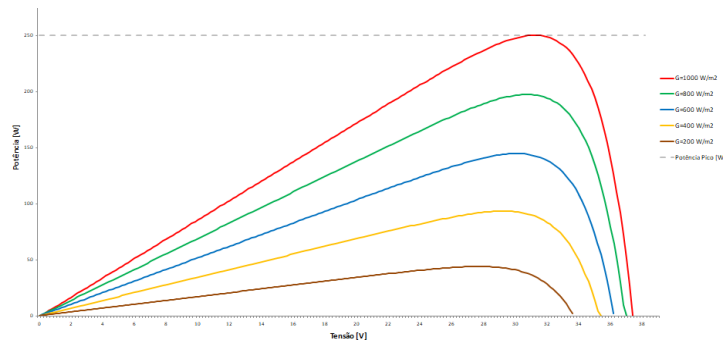


Figura 3.3 - Curva P-V: Variação da radiação solar incidente

Através da análise destas figuras retiram-se algumas conclusões que atestam o bom desempenho do modelo:

- Quanto maior a radiação solar, maior a corrente e, conseqüentemente, maior a potência produzida pelo painel;
- A corrente de curto-circuito (ponto que cruza o eixo das ordenadas na Figura 3.2) varia linearmente com a radiação solar;
- A tensão de vazio (ponto que cruza o eixo das ordenadas na Figura 3.2) varia pouco com a radiação solar, sendo a variação mais considerável para valores mais baixos de radiação.

Estude-se agora a influência da temperatura. As Figura 3.4 e Figura 3.5 mostram, respectivamente, a curva I-V e a curva P-V obtidas para diferentes valores de temperatura do módulo.

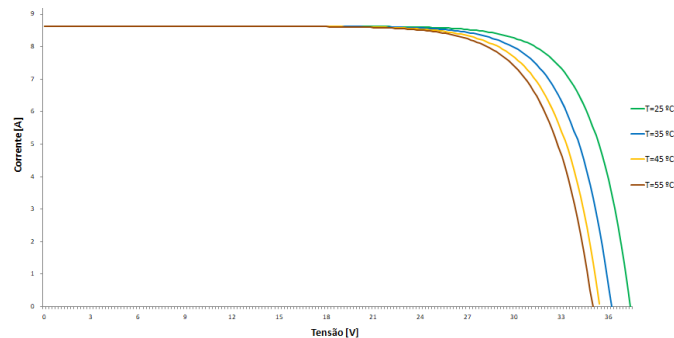


Figura 3.4 - Curva I-V: Variação da temperatura do módulo

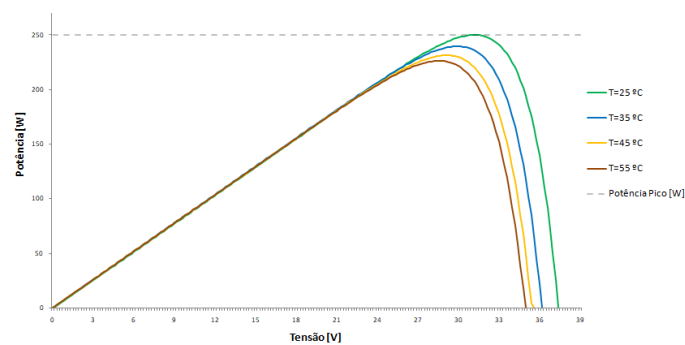


Figura 3.5 - Curva P-V: Variação da temperatura do módulo

Tal como no caso anterior, a análise das figuras permite retirar algumas conclusões:

- Quanto maior a temperatura do módulo, menor a corrente e, conseqüentemente, menor a potência produzida pelo painel;
- A corrente de curto-circuito (ponto que cruza o eixo das ordenadas na Figura 3.2) não varia linearmente temperatura; tal não se verifica na realidade, porém é uma variação relativamente pequena pelo que no modelo foi considerada desprezável;
- A tensão de vazio (ponto que cruza o eixo das ordenadas na Figura 3.4) decresce com a temperatura.

Analisando os gráficos apresentados e fazendo a comparação com gráficos obtidos através de testes aos painéis que são fornecidos por qualquer catálogo, verifica-se uma forte semelhança entre ambos, pelo que se comprova a fiabilidade do modelo na descrição do comportamento real do painel fotovoltaico. Em [31] é apresentado o catálogo de onde de obteve os dados usados para a realização dos gráficos apresentados.

3.1.1.6 Implementação em Simulink

O modelo descrito foi implementado em ambiente *Simulink* de modo a ser utilizado na simulação da micro-rede teste. Um estudo que avalie a capacidade de resposta do modelo perante a variação dos parâmetros de entrada é especialmente útil, pois os tempos de resposta são um aspeto importante do ponto de vista do controlo.

A Figura 3.6 mostra a interface do painel fotovoltaico conforme utilizado para efeitos de simulação. No Anexo A são apresentados detalhadamente cada um dos subsistemas.

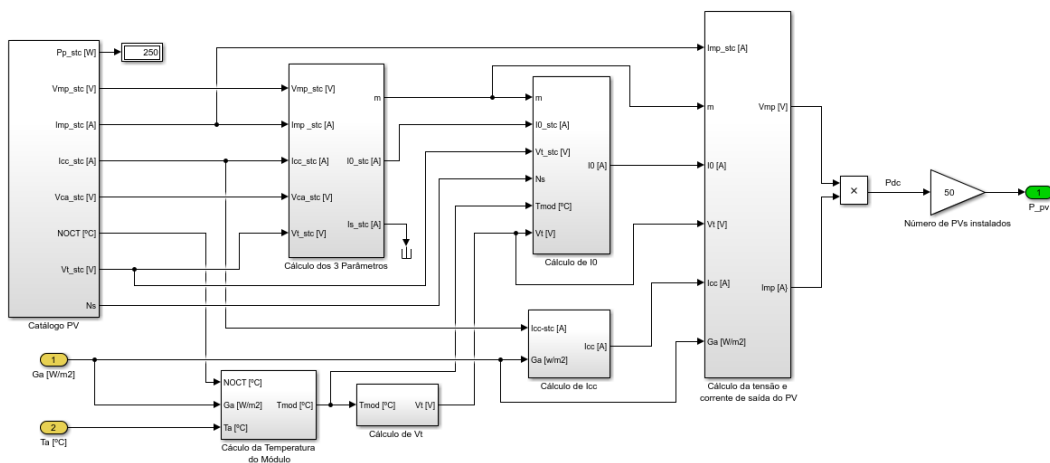


Figura 3.6 - Interface do painel fotovoltaico em ambiente *Simulink*

Foram então realizados dois testes ao modelo:

- Temperatura ambiente e radiação solar incidente fixas ao longo do tempo (Figura 3.7 (a));
- Variação da temperatura ambiente e radiação solar incidente em $t = 40$ s (Figura 3.7 (b)).

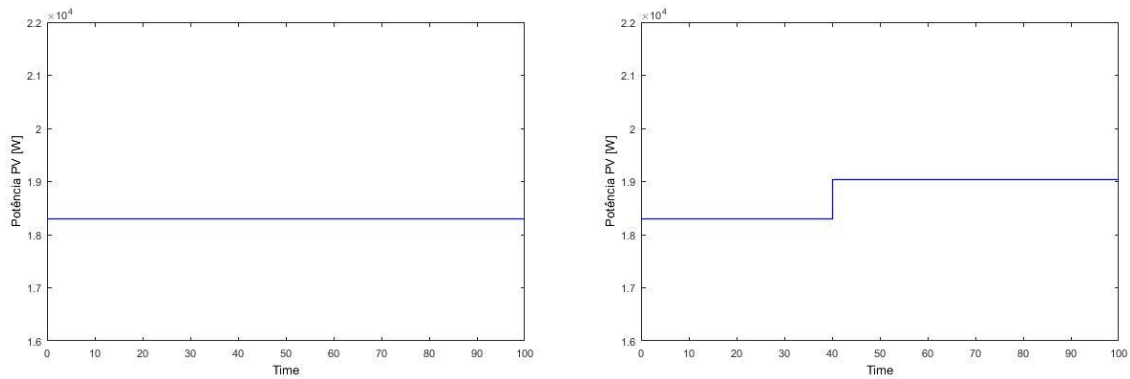


Figura 3.7 - Resposta do modelo PV: (a) parâmetros de entrada fixos; (b) variação dos parâmetros de entrada

Mediante os resultados obtidos e apresentados na Figura 3.7 é possível confirmar que o modelo apresenta um tempo de resposta instantâneo, ou seja, para qualquer variação dos parâmetros de entrada a sua resposta é imediata, o que seria de esperar visto que o modelo não tem em conta nenhuma constante de tempo. Isto acontece porque as constantes de tempo associadas à operação do painel fotovoltaico são muito pequenas e podem, portanto, ser desprezadas.

3.1.2 Célula de Combustível

As células de combustível são uma das tecnologias com maior interesse de estudo pois permitem obter rendimentos de conversão extremamente elevados quando comparadas com outras micro-fontes. Existe um conjunto variado de tipos de células de combustível, agrupadas em duas categorias distintas, células de baixa temperatura e células de alta temperatura. Na categoria de células de baixa temperatura encontram-se as *Alkaline Fuel Cell* (AFC), *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PMEFC), *Direct Methanol Fuel Cell* (DMFC) e as *Phosphoric Acid Fuel Cell* (PAFC). Na categoria de células de alta temperatura encontram-se as *Molten Carbonates Fuel Cell* (MCFC) e as *Solid Oxide Fuel Cell* (SOFC). Em [28] são apresentadas as diferentes características que as diferenciam, assim como outras considerações importantes sobre esta tecnologia. Condições como o fluxo de combustível, o fluxo de oxidante, a temperatura da célula, a pressão e as exigências da carga afetam o processo eletroquímico que ocorre no interior da célula, que posteriormente afetam os valores de tensão e corrente e por consequência afetam a potência extraída da célula.

O modelo adotado foi validado pelo projeto *Microgrids* [28] e corresponde à modelação da SOFC. O desenvolvimento do modelo em questão assenta no seguinte conjunto de suposições [29]:

- Os gases são ideais;
- A célula é alimentada por hidrogénio e ar;
- Os canais que transportam os gases ao longo dos elétrodos têm um volume fixo e um comprimento suficientemente pequeno, que permite que apenas seja necessário definir um valor único de pressão no seu interior;
- O escape de cada canal é um orifício único, sendo que o rácio entre as pressões interior e exterior do canal é grande o suficiente para que se considere que o orifício está saturado;

- A temperatura da célula é estável ao longo do tempo;
- As únicas perdas existentes são perdas óhmicas;
- A equação de Nernst, que determina a diferença de potencial de uma pilha num certo instante de funcionamento, pode ser aplicada.

O modelo em questão pode ser dividido em três conjuntos de dinâmicas diferentes: as dinâmicas de obtenção da corrente da célula, as dinâmicas do processador de combustível e as dinâmicas internas da célula.

3.1.2.1 Dinâmica da célula

De modo a descrever as principais reações eletroquímicas que ocorrem na SOFC, começa-se por assumir que o ânodo é alimentado apenas por hidrogénio, H_2 , enquanto o cátodo é alimentado apenas por oxigénio, O_2 , de forma a que a única reação a acontecer na célula seja a descrita em (3.26).



Estabelece-se assim uma diferença de potencial entre o ânodo e o cátodo que pode ser calculada combinando a equação de Nernst e a lei de Ohm através de:

$$V_{fc}^r = N_0 \left[E_o + \frac{RT}{2F} \left(\ln \frac{p_{H_2} p_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{p_{H_2O}} \right) \right] - r I_{fc}^r \quad (3.27)$$

Onde E_o representa a tensão associada à energia livre de Gibbs [V], p_{H_2} , p_{O_2} e p_{H_2O} são as pressões parciais de cada componente [$N \cdot m^{-2}$], N_0 representa o número de células, r representa a resistência elétrica da célula [Ω], I_{fc}^r é a corrente de saída [A], R é a constante universal dos gases [$J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$], T é a temperatura do canal [K] e F é a constante de Faraday [$C \cdot mol^{-1}$].

As pressões parciais de cada componente estão relacionadas com os respetivos fluxos molares. Esta relação é dada pela lei dos gases ideais:

$$p_i V_{ch} = n_i RT \quad (3.28)$$

onde V_{ch} representa o volume do canal [m^3] e n_i o número de moles de cada componente [mol]. Aplicando a derivada temporal a (3.27) e sabendo ainda que a derivada temporal do número de moles corresponde ao fluxo de combustível que atravessa o canal (diferença entre o fluxo que entra no canal e o fluxo que é utilizado na reação) obtém-se:

$$\frac{dp_i}{dt} = \frac{RT}{V_{ch}} \frac{dn_i}{dt} = \frac{RT}{V_{ch}} q_i \quad (3.29)$$

onde q_i representa fluxo molar de um determinado componente [$kmol \cdot s^{-1}$]. Aplicando a equação (3.29) para o caso do hidrogénio, existem três componentes que contribuem para o seu fluxo molar:

$$\frac{dp_{H_2}}{dt} = \frac{RT}{V_{ch}} (q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^{out} - q_{H_2}^r) \quad (3.30)$$

onde $q_{H_2}^{in}$ é o fluxo que entra na célula, $q_{H_2}^{out}$ o fluxo de saída e $q_{H_2}^r$ a quantidade de fluxo de entrada que é utilizado na reacção. Em [28] é fornecida a expressão para a última componente:

$$q_{H_2}^r = \frac{N_o I_{fc}^r}{2F} = 2K_r I_{fc}^r \quad (3.31)$$

Onde K_r é uma constante auxiliar definida para fins de cálculos no modelo e definida como:

$$K_r = \frac{N_o}{4F} \quad (3.32)$$

O fluxo molar de um gás através de um canal pode ser considerado como proporcional à sua pressão parcial dentro desse canal através da equação (3.33).

$$\frac{q}{p} = \frac{K_{ch}}{\sqrt{M}} = K \quad (3.33)$$

onde K representa a constante molar do canal [$kmol \cdot (atm \cdot s)^{-1}$]. Usando a equação (3.30), (3.31) e (3.32), obtém-se a equação que representa a dinâmica do hidrogénio na célula.

$$\frac{dp_{H_2}}{dt} = \frac{RT}{V_{ch}} (q_{H_2}^{in} - K_{H_2} p_{H_2} - 2K_r I_{fc}^r) \quad (3.34)$$

Aplicando a transformada de Laplace nos dois lados da equação e isolando a pressão parcial de hidrogénio, obtém-se a equação (3.35).

$$p_{H_2} = \frac{\frac{1}{K_{H_2}}}{1 + \tau_{H_2} s} (q_{H_2}^{in} - 2K_r I_{fc}^r) \quad (3.35)$$

onde τ_{H_2} representa a constante de tempo associada às dinâmicas do fluxo de hidrogénio [s].

Repetindo o processo acima descrito para o oxigénio, e sabendo que segundo a equação (3.26) a quantidade de oxigénio que reage é metade da quantidade de hidrogénio, ou seja, $q_{O_2}^r = \frac{1}{2} q_{H_2}^r = K_r I_{fc}^r$. Obtém-se a equação da pressão parcial de oxigénio.

$$p_{O_2} = \frac{\frac{1}{K_{O_2}}}{1 + \tau_{O_2} s} (q_{O_2}^{in} - K_r I_{fc}^r) \quad (3.36)$$

De acordo com (3.26), a água é o produto da reacção resultante do processo eletroquímico. Repetindo novamente o processo tendo em atenção que neste caso não existe fluxo de entrada e que, também segundo (3.26), a quantidade de água resultante é igual à quantidade de hidrogénio, ou seja, $q_{H_2O}^r = q_{H_2}^r = 2K_r I_{fc}^r$, obtém-se então a expressão para a pressão parcial da água.

$$p_{H_2O} = \frac{\frac{1}{K_{H_2O}}}{1 + \tau_{H_2O} s} 2K_r I_{fc}^r \quad (3.37)$$

3.1.2.2 Corrente da Célula

Na célula existem duas correntes distintas: a corrente de entrada, I_{fc}^{in} , e a, já mencionada, corrente de saída, I_{fc}^r . A corrente de entrada é obtida mediante a potência requisitada, através da equação (3.38)

$$I_{fc}^{in} = \frac{P_{req}}{V_{fc}^{in}} \quad (3.38)$$

onde P_{req} representa a potência requisitada à célula [W] e V_{fc}^{in} a tensão nominal da célula [V].

Por outro lado, a corrente de saída é obtida tendo em conta os limites de segurança que permitem o bom funcionamento da célula. De modo a garantir esses limites é definido um fator de utilização como sendo o rácio entre o fluxo que reage e o fluxo que entra na célula.

$$U_f = \frac{q_{H_2}^r}{q_{H_2}^{in}} = \frac{2K_r I_{fc}^r}{q_{H_2}^{in}} \quad (3.39)$$

Assumindo para determinado fluxo de hidrogénio o valor típico para o fator de utilização deve variar entre dos 80% a 90% de modo a evitar qualquer tipo de danos à célula. Caso exceda os 90%, danos irreversíveis causados por falta de combustível suficiente poderão ocorrer, enquanto que se o fator for inferior a 80%, poderão ocorrer tensões excessivamente elevadas na célula. A corrente na célula será igual à corrente de entrada desde que limitada à seguinte gama:

$$\frac{0,8q_{H_2}^{in}}{2K_r} \leq I_{fc}^r \leq \frac{0,9q_{H_2}^{in}}{2K_r} \quad (3.40)$$

Além desta condição, a corrente de saída da célula é ainda afetada pela constante de tempo associada à componente elétrica da célula. A dinâmica de resposta elétrica é relativamente rápida e é modelada por uma função de transferência de primeira ordem com constante de tempo $T_e(s)$, que habitualmente apresenta valores que rondam os 0,8 s.

3.1.2.3 Processador de Combustível

O processador de combustível permite regular os fluxos de entrada dos reagentes. Assume-se um fator de utilização ótimo (U_{f_opt}) de 85%, que permite controlar o fluxo de entrada pela medição da corrente de saída da célula, tal que:

$$q_{H_2}^{in} = \frac{2K_r I_{fc}^{in}}{0,85} \quad (3.41)$$

A proporção molecular entre o hidrogénio e o oxigénio, r_{H-O} , é de dois para um, no entanto é sempre permitida a entrada de oxigénio em excesso de forma a maximizar a sua reação com o hidrogénio.

De acordo com [28], em condições de operação normais, essa proporção deve ser de 1,145 de modo a garantir que a diferença de pressão da célula não excede os 4 *kPa*.

Neste ponto tem ainda que se ter em conta a dinâmica de resposta da parte correspondente às reações químicas que ocorrem na célula. Esta resposta é mais lenta, quando comparada com a resposta elétrica, e é, igualmente, modelada através de uma função de transferência de primeira ordem com uma constante de tempo $T_f(s)$, que neste caso ronda os 5 s.

3.1.3.4 Implementação em Simulink

O modelo descrito foi também implementado em ambiente *Simulink* com o objetivo de ser utilizado na simulação da micro-rede teste. A Figura 3.6 mostra a interface do painel fotovoltaico conforme utilizado para efeitos de simulação. No Anexo A são apresentados detalhadamente cada um dos subsistemas.

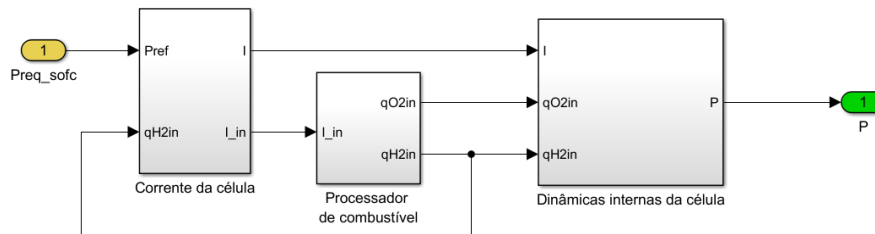


Figura 3.8 - Interface da célula de combustível em ambiente *Simulink*

Foram então realizados os mesmos dois testes ao modelo:

Potência requisitada fixa ao longo do tempo (

- Figura 3.9 (a));

Varição da potência requisitada em $t = 200$ s (

- Figura 3.9 (b)).

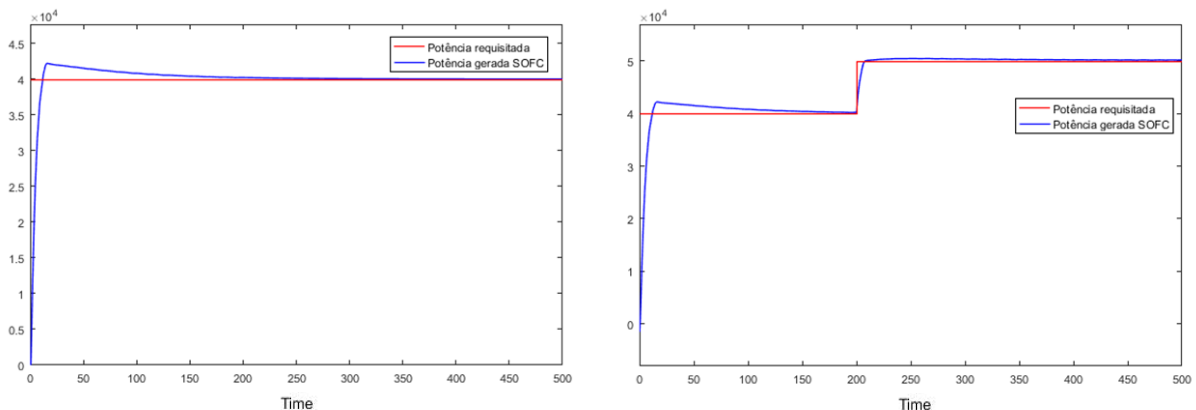


Figura 3.9 - Resposta do modelo SOFC: (a) parâmetros de entrada fixos; (b) variação dos parâmetros de entrada

Mediante os resultados obtidos e apresentados na

Figura 3.9 é possível confirmar que, neste caso, o modelo já não é instantâneo, ou seja, para uma variação do parâmetro de entrada a sua resposta demora um certo tempo até atingir um valor estável e constante. Tal seria expectável pois na descrição são introduzidas duas constantes de tempos, relativas às dinâmicas elétrica e química da célula, que introduzem atrasos no modelo.

3.3 Sistemas de Armazenamento

Os dispositivos de armazenamento numa micro-rede são fundamentais para garantir a ininterruptão de fornecimento de energia, devendo ser capazes de fornecer a potências ativa e reativa necessárias garantindo o equilíbrio do sistema em casos de perturbações ou de variação de carga.

Do ponto de vista do controlo da micro-rede a modelação destes dispositivos é feita através do respetivo inversor que serve de interface com a rede. Esta estratégia permite que os dispositivos de armazenamento funcionem como fontes de tensão AC controláveis e de rápida capacidade de resposta a alterações de carga ou perturbações. Além disso e apenas para efeitos de modelação porque na realidade tal não se verifica, os dispositivos de armazenamento atuam como fontes ilimitadas de capacidade de armazenamento. A potência ativa necessária para balancear a geração e o consumo dentro da micro-rede é injetada pelos dispositivos de armazenamento de acordo com a estratégia de controlo implementada pelo respetivo inversor. Essas estratégias de controlo dos inversores serão introduzidas na secção seguinte e serão aprofundadas detalhadamente no capítulo 4.

3.4 Inversores

Os dispositivos de eletrónica de potência têm um papel fundamental no desempenho de qualquer micro-rede, servindo de interface às micro-fontes e aos sistemas de armazenamento. Os modelos antes descritos mostram que os painéis fotovoltaicos, as células de combustível e os sistemas de armazenamento produzem energia DC e, portanto, os inversores são indispensáveis de modo a fazer a conversão de energia para AC antes desta ser injetada na rede.

Num sistema de energia convencional, as máquinas síncronas são normalmente responsáveis pelo controlo de tensão e frequência, no entanto, numa micro-rede não é comum encontrar este tipo de dispositivos. Entender as estratégias de controlo dos inversores é fundamental para garantir a estabilidade da micro-rede quando em presença de variações de geração ou consumo. As estratégias de controlo de inversores adotadas podem dividir-se em dois tipos:

- **Controlo por PQ:** o inversor tem a função de fornecer um dado valor de potência ativa e reativa de acordo com um *set-point* previamente estipulado. O inversor opera em modo interligado com a rede, injetando na rede a potência que tem disponível aos seus terminais.

Este tipo de inversor não tem funcionalidade de formar a micro-rede por si só, isto é, não consegue impor uma onda de tensão com amplitude e frequência desejada. No caso de operação em ilha, este tipo de inversores sozinhos não garantem a estabilidade da operação, sendo necessário a existência de pelo menos um inversor controlado por VSI;

- **Controlo por VSI:** o inversor opera como uma fonte de tensão controlada de modo a fornecer às cargas valores pré-definidos de tensão e frequência. A potência ativa e reativa fornecida pelo inversor é definida dependentemente da carga e não com base em *set-points* como no caso do controlo PQ. O inversor é responsável por estabelecer a onda de tensão com valores de amplitude e frequência desejados. O controlo por VSI simula o princípio usado nas máquinas síncronas dos sistemas de energia convencionais, onde a variação da frequência é função da potência ativa e variação de tensão é função da potência reativa, permitindo assim o controlo de tensão e frequência através do controlo do inversor.

A modelação aqui apresentada é feita de um ponto de vista exclusiva de controlo, pelo que aspetos relacionados como transitórios, harmónicas ou perdas nos inversores não foram tomadas em conta na análise do comportamento. No capítulo 4 as estratégias de controlo aqui apresentadas serão estudadas em detalhe.

3.5 Cargas

Todas as cargas utilizadas ao longo do trabalho foram modeladas seguindo uma característica de potência constante, o que significa que as potências ativa e reativa consumidas têm um valor fixo e inalterável durante o período de tempo da simulação. Considerou-se, ainda, que a rede onde se efetuam as simulações é trifásica e está sempre em operação equilibrada.

Capítulo 4 - Controlo aplicado a micro-redes

Neste capítulo é abordado o estudo do controlo de micro-redes, baseado maioritariamente com as estratégias implementadas pelos inversores integrantes do sistema. Analisa-se a influência de cada inversor na operação e estuda-se a importância da existência de um controlo secundário na estabilização das variáveis de interesse nos momentos subsequentes a perturbações e processos de transição. São, ainda, introduzidos dois modos de controlo que se diferenciam entre si na forma como se apresentam na configuração da micro-rede.

4.1 Princípios de controlo de micro-redes

As micro-redes são sistemas extremamente flexíveis quando implementadas na rede elétrica de distribuição convencional, devido à sua capacidade de operação autónoma em relação a qualquer outro sistema de energia. No entanto, tal só é possível se a micro-rede operar sob estratégias de controlo e gestão apropriadas.

4.1.1 Estrutura de controlo

O controlo de qualquer micro-rede assenta numa estrutura que permite assegurar a flexibilidade de operação desejada. Na Figura 2.2 é introduzida a arquitetura de controlo que contém os agentes comuns a qualquer micro-rede. Tal como descrito em [32], a micro-rede é controlada centralmente pelo *Microgrid Central Controller* (MGCC), e localmente pelos *Microsource Controllers* (MC) e *Load Controllers* (LC). É ainda expectável que o MGCC seja capaz de comunicar com o *Distribution Management System* (DMS), localizado a montante da micro-rede e inserido na rede de distribuição, cujo objetivo passa por otimizar a operação de gestão e controlo.

Cada componente estrutural da micro-rede apresenta as suas funções próprias e tem um papel diferente do ponto de vista de controlo:

- **DMS:** decisão do modo de operação da micro-rede (se em interligação ou em ilha), responsável pela coordenação do que se passa a montante da micro-rede e pela participação da micro-rede no mercado de energia;
- **MGCC:** responsável pelo controlo secundário de tensão e frequência e pela ligação entre a micro-rede e a rede elétrica nos casos da transição entre modos de operação;
- **MC:** responsável pelo controlo local primário de tensão e frequência em cada micro-fonte e pela gestão de energia nos sistemas de armazenamento;

- **LC:** responsável pelo controlo de cargas controláveis de modo a implementar as funcionalidades de deslastre de carga durante situações de emergência.

Tanto o MC com o LC se relaciona com as interfaces de eletrónica de potência de cada micro-fonte ou carga, respetivamente, e usam a informação local disponível em conjunto com as informações enviadas pelo MGCC para controlar o dispositivo a si associado. Estas componentes são as responsáveis por assegurar a estabilidade da operação nos primeiros momentos subsequentes às transições de modo, e apresentam uma rapidez resposta na ordem dos milissegundos [32].

O MGCC é o principal responsável pelo controlo dos pontos de vista técnico e económico da micro-rede. Durante o modo de interligação com a rede coleciona informação a partir do MC e do LC e faz a previsão de consumo e geração local. É o responsável por fornecer ao sistema as previsões de carga. Tem ainda a função prever a produção de energia (explorando dados como a velocidade do vento ou os níveis de radiação solar), analisar os custos da energia e as questões de segurança de modo a determinar a quantidade de energia que a micro-rede deve absorver vinda da rede de distribuição [32].

No caso de transição para modo em ilha, é necessária uma alteração imediata no *set-point* da potência de saída do sistema de controlo de pelo menos um componente da micro-rede (podendo ser uma micro-fonte ou, mais normalmente, no sistema de armazenamento) de modo a cobrir a diferença em falta que, antes da transição, estaria a ser fornecida pela rede. Perante este cenário, os MC e os LC asseguram a estabilidade nos momentos subsequentes à transição alterando os valores de tensão e frequência do sistema para novos valores calculados com base na alteração da potência de saída do sistema de controlo. O MGCC assegura a otimização técnica da micro-rede neste novo modo de operação, repondo, através da implementação do controlo secundário, a tensão e a frequência nos valores nominais ou, pelo menos, em valores dentro dos limites aceitáveis de segurança.

4.1.2 Classificação das micro-fontes

Nos sistemas de energia convencionais, quando acontece uma alteração de carga no sistema, esta é resolvida pela estratégia de controlo dos geradores. Caso a carga aumente, os geradores reduzem ligeiramente a sua frequência angular, sendo a energia cinética armazenada no rotor injetada no sistema e por consequência a sua velocidade diminui. Esta função é usualmente denominada de controlo primário, e permite ao sistema aumentar ou diminuir a potência produzida proporcionalmente ao seu desvio de frequência. No entanto, no caso estudado não existe a presença de geradores na micro-rede e este processo tem que ser emulado. Com base nesta ideia, as micro-fontes podem ser classificadas, tal como apresentado em [33], nas seguintes categorias:

- **Unidade de formação de rede:** define a tensão e a frequência de referência, assegurando a rápida resposta de formar a garantir o balanço correto entre geração e consumo na micro-rede.

- **Unidade de suporte de rede:** componentes cuja potência ativa e reativa é determinada/modificada de acordo com as características temporais de tensão e frequência do sistema;
- **Unidade em paralelo com a rede:** componentes não controláveis, cuja função é injetar tanta potência na rede quanto possível.

Quando a micro-rede opera em modo interligado com a rede, a definição dos valores de tensão e frequência é responsabilidade da rede de distribuição. No caso de operação em modo de ilha essa função tem que ser levada a cabo internamente pela micro-rede

Quando se verifica algum tipo de perturbação na micro-rede, seja devido a um aumento/diminuição de carga ou devido a uma transição de modo de operação, a unidade de formação rede entra em ação, aumentando ou diminuindo a potência por si injetada na micro-rede de modo a compensar o excesso/défice causado pela perturbação. Como consequência da variação de potência aos terminais da unidade de formação, estabelecem-se novos valores de frequência e tensão proporcionais a essa mesma variação e diferentes dos nominais pretendidos. Este tipo de unidade é, normalmente, o sistema de armazenamento devido às suas características não intermitentes e à sua capacidade de resposta extremamente rápida.

As unidades de suporte de rede são micro-fontes que permitem alterar a quantidade de potência por si injetada na micro-rede ao longo do tempo. Apresentam como principal função a compensação da variação de potência imposta inicialmente pelas unidades formadoras de rede, isto é, estas unidades adaptam a sua potência de modo a compensar o efeito da perturbação e permitindo assim que a unidade formadora de rede volte aos valores de produção pré-perturbação e consequentemente trazendo os valores de tensão e frequência de volta às condições nominais de operação. Os tempos de resposta destas unidades, em comparação com os sistemas de armazenamento, são muito mais elevados, sendo esta a principal razão para o processo de compensação da perturbação ser inicialmente assegurada pelo sistema de armazenamento [33].

As unidades em paralelo com a rede são micro-fontes não controláveis que apenas injetam potência na micro-rede, como é o caso do PV e do gerador eólico cuja produção depende da radiação solar e da velocidade do vento, respetivamente, e não da necessidade do utilizador [33].

4.2 Estratégias de controlo dos inversores

O tipo de micro-redes em estudo não apresentam qualquer tipo de geradores síncronos, e como referido anteriormente, todos os aspetos do ponto de vista do controlo são integralmente relacionados com os inversores. O estudo do controlo de um sistema como uma micro-rede remete para a necessidade perceber as interfaces eletrónicas que a constituem.

Como mencionado na secção 3.4.1 do capítulo anterior, existem dois tipos de estratégia de controlo para os inversores que servem de interface às micro-fontes. Os inversores controlados por PQ, usados para fazer a ligação de micro-fontes a uma rede cujos valores de tensão e frequência são

definidos por outra(s) componente(s) e, por sua vez, os inversores controlados por VSI, usados com o objetivo que construir a rede, quando esta opera em modo isolado. Tendo em conta a classificação das micro-fontes estudada na secção anterior, é possível fazer a correspondência entre a respetiva categoria e o tipo de estratégia de controlo adequada à função pretendida.

Tabela 4.1: Associação entre a estratégia de controlo do inversor e a classificação do respetivo componente

Categoria	Estratégia de Controlo	Componente
Formação de Rede	VSI	Sistema de Armazenamento
Suporte de Rede	PQ	Célula de Combustível Microturbina
Paralelo com a Rede	PQ	Painel Fotovoltaico Gerador Eólico

Os inversores controlados por PQ podem ser vistos como uma unidade "escrava" da rede, visto não serem capazes, de por si só estabelecer a rede (i.e., estabelecer uma referência de tensão e frequência a ser seguida pelos restantes componentes). Por outro lado, os inversores controlados por VSI, devido à sua capacidade de formação de rede, são vistos como unidades "mestre" do sistema. A potência requisitada aos VSI precisa de estar disponível de uma forma praticamente instantânea no andar DC, sendo para isso necessário que a fonte a si associada, apresente uma capacidade de resposta extremamente rápida de modo a manter a tensão no andar DC constante.

Quando a micro-rede opera em modo interligado não existe a necessidade de existência de inversores controlados por VSI. No entanto, essa opção não é fiável pois no caso de quebra de ligação repentina com a rede de distribuição, a micro-rede ficaria desgovernada, não sendo capaz de garantir que os valores de tensão e frequência não oscilassem para intervalos de valores que excedessem os valores de segurança. Como tal, é útil ter sempre um inversor em modo VSI na micro-rede, pois estes podem operar em paralelo com outras fontes de tensão, seja com a rede de distribuição ou com outro VSI, e garantem a continuidade do controlo, assim como uma transição suave para o modo em ilha, atuando de uma forma praticamente instantânea quando o controlo com a rede de distribuição se perde.

4.2.1 Estratégia de controlo por PQ

Os inversores controlados por PQ apresentam na sua operação duas funções fundamentais de controlo: injeção de potência ativa e reativa na micro-rede mediante um set-point estipulado e controlo da tensão andar DC. Para tal, o módulo e a fase da tensão à saída do inversor deve ser controlada de forma a manter a tensão no andar DC numa referência específica e as potências ativa e reativa num set-point desejado.

O modelo de controlo utilizado foi consultado em [32], e é descrito nas secções seguintes.

4.2.1.1 Controlo da tensão no andar DC

O controlo da tensão do andar DC é realizado através um controlador proporcional-integral (PI) que corrige, através do ajuste da magnitude da corrente ativa injetada, o erro de tensão que surge no andar DC.

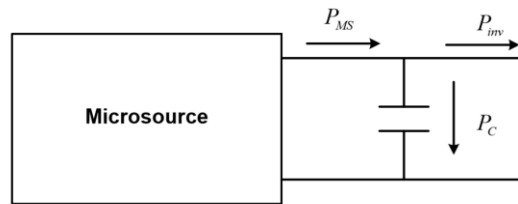


Figura 4.1 - Balanço de potência no andar DC [32]

Analisando a Figura 4.1 conclui-se que a potência no condensador do andar DC é a diferença entre a potência injetada pela micro-fonte e a potência injetada pelo inversor, isto é:

$$P_C = P_{MS} - P_{inv} \quad (4.1)$$

onde P_C representa o fluxo de potência no andar DC, P_{MS} representa o fluxo de potência injectada pela micro-fonte e P_{inv} o fluxo de potência injectada pelo inversor. Por outro lado, o fluxo de potência no andar DC pode ser definida como:

$$P_C = V_{DC} I_{DC} \quad (4.2)$$

onde V_{DC} e I_{DC} representam, respectivamente, a tensão e a corrente no andar DC. A tensão no condensador é dada por:

$$V_{DC} = \frac{1}{C} \int I_{DC} dt \quad (4.3)$$

onde C é o valor da capacidade. Combinando as equações (4.2) e (4.3) e aplicando a transformada de Laplace, é possível modelar as dinâmicas que ocorrem no andar DC através do esquema da Figura 4.2.

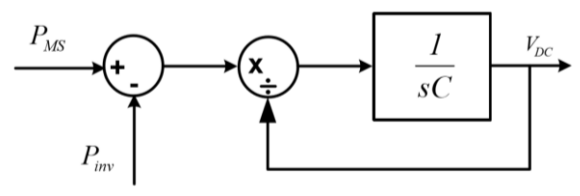


Figura 4.2 - Modelo do andar DC [32]

O valor de tensão DC obtido pelo modelo é posteriormente comparado com o valor de referência previamente estipulado e o erro resultante é corrigido através de um controlador PI.

4.2.1.2 Controlador PI

O controlador PI é apresentado tal como descrito em [34]. Trata-se de um mecanismo de controlo por *feedback* amplamente utilizado em sistemas de controlo industriais, assim como em variadas aplicações cujo um controlo contínuo seja necessário. O controlador opera através do cálculo contínuo do erro entre o *set-point* desejado e o valor medido [35], aplicando a esse erro uma correção baseada em dois termos:

- **Proporcional:** termo mais influente do controlador, que altera o seu valor de saída proporcionalmente ao erro calculado. Quanto mais aumentar o erro, mais aumenta também a ação do controlador [34];
- **Integral:** enquanto o erro persistir, o controlo integral irá continuamente aumentar ou diminuir o seu valor de saída de modo a reduzi-lo. Dado um certo intervalo de tempo, a ação integral levará a saída do controlador a reduzir o erro a zero. Se o erro for grande, o controlador irá aumentar/diminuir a saída rapidamente, por outro lado, se o erro for pequeno, as alterações serão mais lentas [34].

A Figura 4.3 apresenta o diagrama de blocos do controlador PI. Como se verifica, o erro é processado mutuamente através do controlador proporcional e do controlador integral, sendo a saída do controlador a soma desses dois termos.

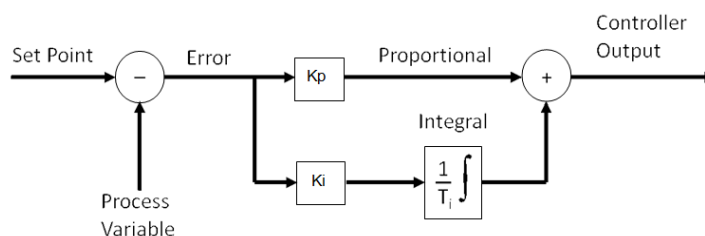


Figura 4.3 - Diagrama de blocos do controlador PI [34]

Matematicamente, o controlador PI é definido através da função de transferência:

$$TF(s) = K_p + \frac{K_I}{s} \quad (4.4)$$

onde K_p corresponde ao termo de controlo proporcional e K_I e ao termo de controlo integral.

4.2.1.3 Transformação de Coordenadas abc para dq0

A transformação dq0 (direta-quadratura-zero), também conhecida como transformação de Park, consiste na modificação do vetor espacial de componentes trifásicas definidas no domínio do tempo de um sistema de coordenadas de fase estacionária (abc) para um sistema de coordenadas de

rotação (dq0). As equações a seguir descritas foram consultadas em [36], onde se pode encontrar informação complementar à aqui apresentada.

A transformação de Park é regularmente usada de modo a simplificar a análise de máquinas síncronas trifásicas ou para simplificação dos cálculos relacionados com o controlo de inversores. Matematicamente, a transformação dq0 é definida como:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

onde $\theta = \omega t + \delta_A$ representa o ângulo entre o sistema de coordenadas de rotação e o sistema fixo no instante t e δ_A representa a mudança de fase inicial da componente.

No caso de sistemas trifásicos equilibrados, a aplicação da transformação dq0 permite reduzir as três componentes AC (u_a, u_b, u_c), em duas componentes DC (u_d, u_q), pois a componente referente à coordenada 0 é nula. Além disso, com esta simplificação é possível controlar independentemente as potências ativa e reativa através do controlo das componentes d e q, respetivamente. Com isto, consegue-se simplificar os cálculos intermédios associados ao controlo, recorrendo-se depois à transformação inversa de modo a recuperar os sinais AC trifásicos de operação, através de:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Este método permite ainda simplificar o controlo dos inversores, possibilitando que o sistema seja composto apenas por um controlador para o eixo direto e um controlador para o eixo em quadratura enquanto que se a operação fosse feita em referência *abc* seria necessário usar três controladores, o que aumentaria a complexidade do sistema.

4.2.1.4 Diagrama geral de controlo

O esquema de controlo dos inversores controlados por PQ é apresentado na Figura 4.4 tal como descrito em [32]. O sistema de controlo apresenta como entradas, a tensão medida no andar DC, V_{DC} , a potência reativa medida à saída do conversor, Q , e as componentes direta e em quadratura da corrente injetada pelo inversor na micro-rede, i_d e i_q . Estas últimas são obtidas usando as a matriz de transformação dq0 apresentada na secção anterior, enquanto que a tensão no andar DC é obtida através do esquema apresentado na secção 4.2.1.1. Os valores de tensão DC de referência, V_{DC}^{ref} , e de potência reativa de referência, Q^{ref} , são definidos pelo MGCC e fornecidos aos MC da respectiva micro-fonte.

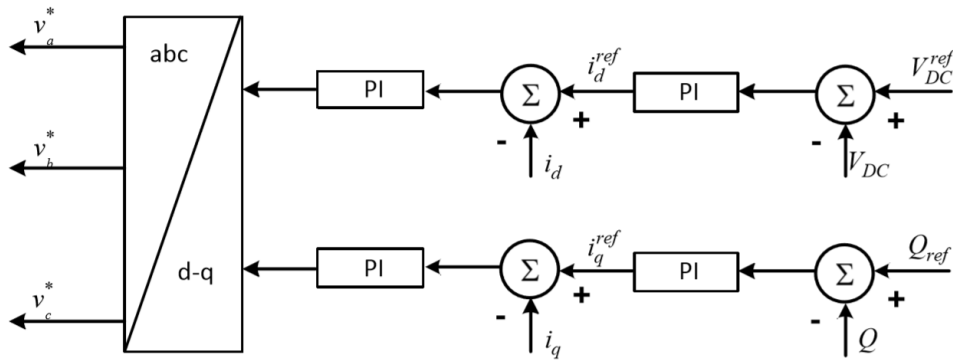


Figura 4.4 - Modelo de controle PQ [32]

Como já foi vista na secção 4.2.1.1 o controle por PQ está relacionado com o controle da tensão no andar DC. O erro na tensão DC é corrigido através um controlador PI cuja saída é usada de modo a gerar a componente direta de referência da corrente, i_d . As variações de potência causam desvios na tensão DC que são controlados através do ajuste da magnitude da componente direta da corrente entregue à micro-rede pela respectiva micro-fonte. Por outro lado, o erro obtido pela diferença entre o valor de potência reativa de referência e o valor de reativa injetado pelo inversor na micro-rede é corrigido através de outro controlador PI cuja saída é usada de modo a gerar a componente em quadratura de referência da corrente, i_q . Qualquer erro na potência reativa é controlado através do ajuste da magnitude da componente em quadratura da corrente injetada na micro-rede pela respectiva micro-fonte [32]. De seguida estas componentes da corrente passam por um *loop* de controlo composto por dois controladores PI de modo gerar as componentes direta e em quadratura de tensão, v_d e v_q , que posteriormente serão sujeitas à transformação inversa apresentada na secção 4.2.1.1 e servindo assim de referência de tensão ao inversor. A tensão obtida em v_a^* , v_b^* e v_c^* consiste nos valores de tensão pretendidos à saída do inversor.

4.2.2 Estratégia de controlo por VSI

Os inversores controlados por VSI têm a função de emular o comportamento dos geradores síncronos dos sistemas convencionais de energia alterando os valores de frequência e tensão mediante respetivas variações de potência ativa e reativa. Estes inversores são usualmente associados aos sistemas de armazenamento. O modelo de controlo VSI adotado é descrito em [32].

4.2.2.1 Aplicação das características de droop

Numa micro-rede o princípio de controlo implementado pelo VSI é baseado nas características de *droop* definidas pelas equações (4.7). A variação de frequência é inversamente proporcional à variação de potência ativa assim como, a variação de tensão é inversamente proporcional à variação de potência reativa. Os inversores VSI comportam-se, portanto, como fontes de tensão com magnitude e frequência de saída controlada [32]:

$$\omega = \omega_0 - k_p \cdot P$$

$$V = V_0 - k_Q \cdot Q$$
(4.7)

onde P e Q representam as potências ativa e reativa de saída do inversor, k_p e k_Q representam os coeficientes de *droop*, e ω_0 e V_0 representam os valores de frequência e tensão de referência do sistema. É de notar que os coeficientes de *droop*, segundo o método estudado, são sempre valores positivos.

4.2.2.2 Diagrama geral de controlo

O esquema de controlo dos inversores controlados por VSI é apresentado na Figura 4.5 tal como ilustrado em [32]. O modelo baseia-se em três etapas de controlo: cálculo de potência injetada pelo inversor, aplicação das características de *droop* e obtenção do sinal de referência.

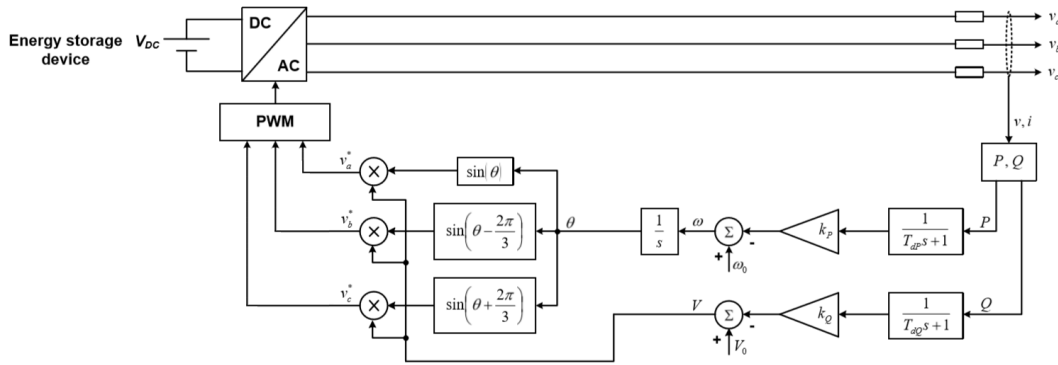


Figura 4.5 - Modelo de controlo VSI [32]

A tensão e corrente de saída do inversor são medidas de forma a calcular as potências ativa e reativa injetadas pelo inversor no sistema. Esta etapa de cálculo introduz no sistema um atraso temporal definido pelas constantes T_{dP} e T_{dQ} . Recorrendo ao valor de potência ativa medido, é determinada a frequência da tensão de saída do inversor através da característica de *droop* associada ao coeficiente k_p . Similarmente, a potência reativa medida determina a magnitude da tensão de saída do inversor através da característica de *droop* associada ao coeficiente k_Q [32]. Através do valor de frequência obtido é possível calcular o ângulo através de [37]:

$$\theta = \int \omega dt$$
(4.8)

Recorrendo aos valores de magnitude e fase obtidos é possível calcular os sinais de saída de referência para cada uma das três fases a fornecer ao inversor

4.3 Estratégias de operação da micro-rede

O controlo de micro-redes é baseado principalmente na aplicação das estratégias de controlo dos inversores apresentadas na secção anterior. Com base nessas estratégias é possível identificar dois modos de operação globais do sistema: Operação em *Single-Master* e Operação em *Multi-Master*. Em ambos os casos, é necessária a implementação de um controlo secundário de frequência e tensão associados às micro-fontes controláveis. Tanto as estratégias de operação, como a implementação do controlo secundário serão detalhados nas secções seguintes.

4.3.1 Operação em *Single-Master*

A operação em *Single-Master* consiste no uso de vários inversores controlados por PQ e apenas um único inversor controlado por VSI com a função de fornecer as referências de tensão e frequência ao sistema quando este se encontra em modo de ilha. A estratégia *Single-Master* implementada foi estudada em [33].

O modelo de controlo do VSI descrito pela Figura 4.5, mostra que este reage a variações de carga na micro-rede de acordo exclusivamente com a informação disponível aos seus terminais. Considerando apenas um VSI em operação, qualquer variação de potências ativa ou reativa levará a uma variação de frequência e tensão, respetivamente, determinadas pela característica de *droop* do inversor, portanto:

$$\begin{aligned}\Delta\omega &= \omega_{pré} - \omega_{pós} = \omega_0 - k_P \cdot P - [\omega_0 - k_P \cdot (P + \Delta P)] = k_P \cdot \Delta P \\ \Delta V &= V_{pré} - V_{pós} = V_0 - k_Q \cdot Q - [V_0 - k_Q \cdot (Q + \Delta Q)] = k_Q \cdot \Delta Q\end{aligned}\tag{4.9}$$

onde $\omega_{pré}$ e $V_{pré}$ representam o valor de frequência e tensão do sistema antes da variação de potência e $\omega_{pós}$ e $V_{pós}$ representa o valor de frequência resultante da variação de potência. O inversor controlado por VSI é então responsável por responder rapidamente a qualquer variação de carga. O sistema de comunicações interno da micro-rede faz a troca de informações entre os seus componentes, permitindo que o MGCC receba informações dos controladores locais da micro-rede, ficando assim responsável por atualizar os *set-points* de cada inversor PQ associado a micro-fontes controláveis de modo a garantir a normal operação do sistema durante este tipo de perturbações. O MGCC é responsável pelas ações dos controladores de carga (é o responsável pela decisão de corte de carga se necessário) e pela configuração dos parâmetros de *droop* do VSI. A Figura 4.6 mostra o esquema de operação de um micro-rede neste tipo de operação.

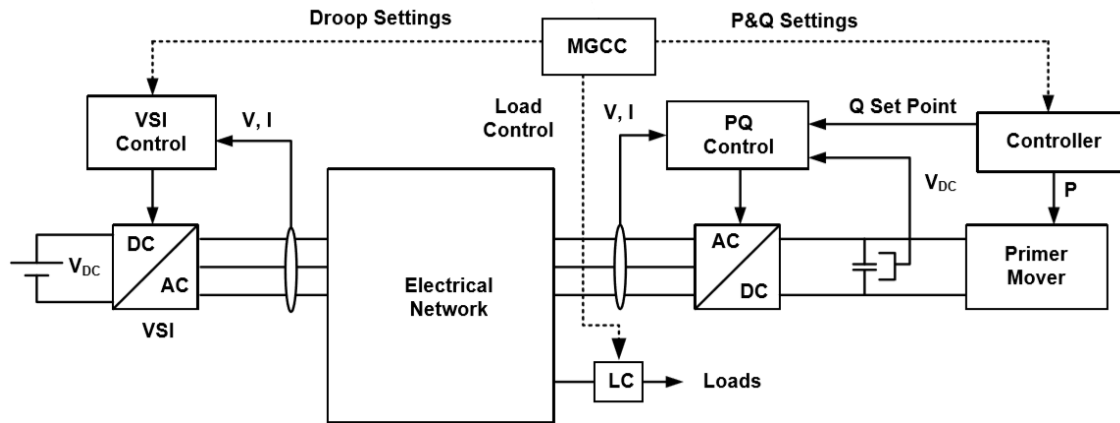


Figura 4.6 - Estratégia de operação em *Single-Master* [33]

4.3.2 Operação em *Multi-Master*

A operação em *Multi-Master* consiste no uso de vários inversores controlados por VSI e eventualmente outros inversores controlados por PQ. A estratégia *Multi-Master* aqui adotada é apresentada em [33] e complementada com informação contida em [38].

Neste tipo de operação, a variação de potência é partilhada entre todos os VSI de modo a garantir que não há componentes a operar a diferentes frequências. Num sistema com n VSI, a variação de potência provocada por um aumento de carga é dada por:

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n \Delta P_i \quad (4.10)$$

onde ΔP representa a variação total de potência no sistema e ΔP_i representa a variação de potência associada individualmente a cada VSI. Com isto, a frequência do sistema pode ser obtida através de:

$$\Delta \omega = \omega_{pré} - \omega_{pós} = \omega_0 - k_{P_i} \cdot P_i - [\omega_0 - k_{P_i} \cdot (P_i + \Delta P_i)] = k_{P_i} \cdot \Delta P_i \quad (4.11)$$

Como se pode observar, a variação de frequência depende da variação de potência em cada VSI e não da variação total, o que permite concluir que o uso de mais que um VSI no sistema permite reduzir o desvio de frequência em relação ao valor de referência. A Figura 4.7 mostra graficamente o processo de partilha de carga entre dois VSI, onde os declives das retas são definidos pelo coeficiente de *droop* da respetiva componente, k_{P_i} .

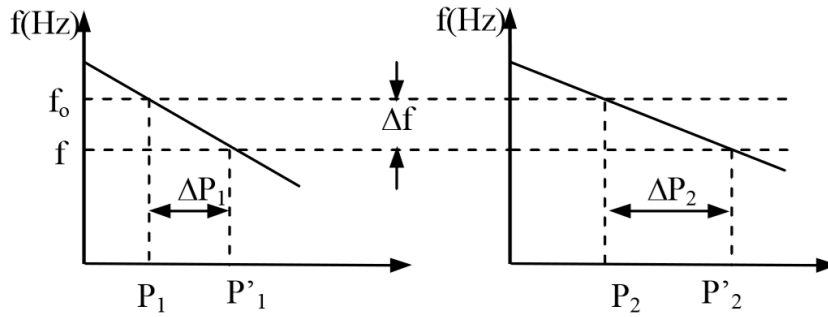


Figura 4.7 - Partilha de potência entre dois VSI [38]

Caso existam dois VSI no sistema, a partilha de potência tem que ser processada de forma a que a variação de frequência imposta por cada VSI seja igual, portanto:

$$\Delta\omega = k_{p_1} \cdot \Delta P_1 = k_{p_2} \cdot \Delta P_2 \quad (4.12)$$

Sabe-se ainda que os coeficientes de *droop*, k_{p_1} e k_{p_2} , são valores conhecidos impostos pelo controlador e que a soma das variações de potência em cada VSI é necessariamente igual à variação total de potência, pelo que resolvendo o sistema de equações (4.13) é possível calcular a variação de potência a suportar por cada um dos VSI.

$$\begin{cases} k_{p_2} \cdot \Delta P_1 = k_{p_1} \cdot \Delta P_2 \\ \Delta P_1 + \Delta P_2 = \Delta P \end{cases} \quad (4.13)$$

Este raciocínio é válido para qualquer que seja o número de VSI no sistema. É possível repetir o processo para o caso de controlo por *droop* de tensão/reactiva, no entanto, nas redes de Baixa Tensão as impedâncias dos cabos de distribuição não permitem uma partilha precisa de potência reativa entre VSI [33]. A Figura 4.8 mostra o esquema de operação de uma micro-rede neste tipo de operação.

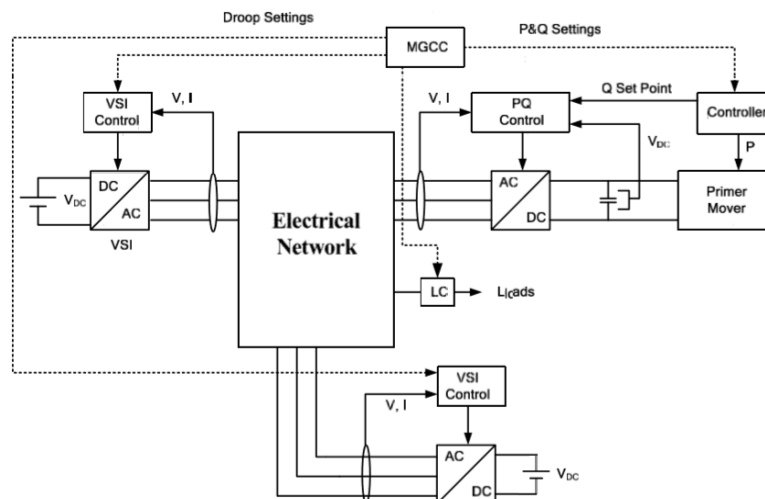


Figura 4.8 - Estratégia de operação em *Multi-Master* [33]

4.4 Controlo Secundário

O controlo apresentado nas secções anteriores, vulgarmente denominado de controlo primário, permite estabilizar a micro-rede após uma variação de carga, porém não permite que esta volte aos valores nominais de tensão e frequência verificados antes da respetiva variação. Posto isto, o uso de um controlo secundário torna-se fundamental de modo a restabelecer os valores de volta às suas condições nominais. A implementação deste tipo de controlo é feita através de um controlador PI, cujas entradas serão o valor nominal pretendido no sistema e o valor medido, que corrigirá o erro calculado entre estes dois valores, atuando sobre as micro-fontes controláveis de modo a que estas aumentem a sua produção e compensem a atuação do sistema de armazenamento. Deste modo, é possível que o valor de potência ativa ou reativa injetada pelo sistema de armazenamento volte ao seu valor pré-perturbação e como consequência os valores de tensão e frequência, definidos pelo VSI associado ao sistema de armazenamento, voltam aos seus valores nominais. O funcionamento do controlo secundário é responsabilidade do MGCC, pelo que, quando a micro-rede se encontra em interligação com a rede de distribuição, o MGCC inativa o controlo secundário e a rede de distribuição é a responsável pelo equilíbrio do sistema. No caso de operação em ilha, o MGCC é o responsável pela regulação do controlo secundário associado a cada micro-fonte. O método de controlo secundário de seguida apresentado é estudado em [38] e [39].

4.4.1 Frequência/Potência Ativa

O controlo secundário de frequência é ativo sempre que, operando em modo ilha, é detetada uma variação de potência na micro-rede que por consequência originem desvios de frequência em relação ao seu valor nominal de 50 Hz. É medido o erro entre o valor nominal e o valor medido, que por sua vez, é corrigido através de um controlador PI. De seguida, o valor da correção é somado ao *set-point* definido antes da perturbação, gerando assim uma nova referência de potência ativa a ser fornecido localmente à micro-fonte controlável associada ao controlador secundário em questão.

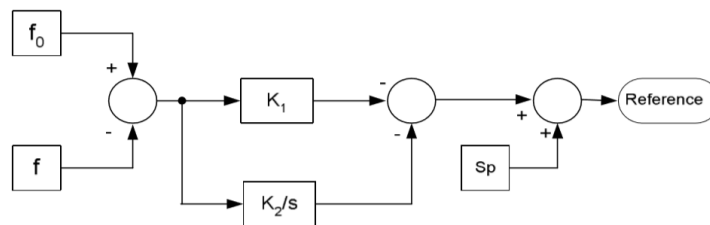


Figura 4.9 - Controlo secundário de frequência [39]

4.4.2 Tensão/Potência Reativa

O controlo secundário de tensão é implementado segundo exatamente o mesmo processo que o controlo secundário de frequência, no entanto a tensão não é uma variável tão sensível pelo que,

face a variações de tensão muito pequenas, não é necessário a atuação do controlo secundário. A Figura 4.10 exemplifica o estabelecimento dos valores limite como indicado em [38].

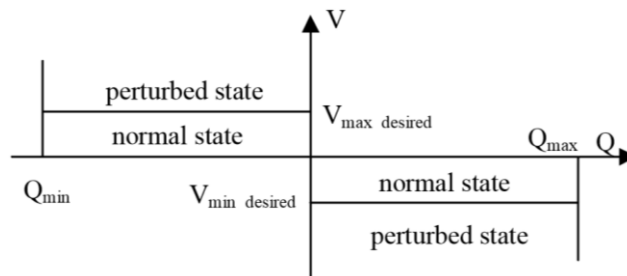


Figura 4.10 - Limites de variação de tensão no sistema [38]

É definido pelo MGCC um valor de desvio máximo e mínimo de tensão, em que caso o valor medido não exceda esses limites, a atuação da correção pelo controlo secundário é dispensável. Por outro lado, caso o valor medido exceda os limites, provoca perturbações no sistema que podem pôr em causa o seu bom funcionamento pelo que a atuação do controlo secundário é fundamental. Esta é também uma medida que permite salvaguardar o estado das micro-fontes e dos respetivos sistemas de controlo, evitando o desgaste dos componentes perante variações que em nada prejudicariam o funcionamento do sistema [38].

Capítulo 5 - Simulação, Resultados e Discussão

Neste capítulo serão apresentados os resultados de diversas simulações realizadas com o intuito de analisar o desempenho das funções de controlo evidenciadas no capítulo anterior. Foi definida uma micro-rede de teste, implementada em ambiente *Simulink*, sob a qual foram realizados diversos testes, e cujos resultados serão apresentados e discutidos nas secções seguintes.

O principal objetivo da simulação é avaliar a resposta, em termos de estabilização de operação, da micro-rede após a ocorrência de um *islanding*. Para tal foram simulados os modos de controlo descritos no capítulo anterior, *Single-Master* e *Multi-Master*, e foram avaliadas as dinâmicas das micro-fontes e dos sistemas de armazenamento em conjunto com as estratégias de controlo implementadas pelos inversores. Foram tomados em consideração dois cenários distintos no instante do *islanding*: um em que a micro-rede se encontra a importar potência ativa da rede elétrica, e outro em que a micro-rede se encontra a exportar potência ativa para a rede elétrica.

O *islanding* da micro-rede pode ser considerado como intencional ou como forçado. O *islanding* é considerado intencional quando é realizado de forma planeada, por exemplo em caso de necessidade de manutenção da rede de distribuição de Média Tensão a montante. Por outro lado, é considerado forçado caso ocorra devido a uma falha da rede de Média Tensão. Nas simulações efetuadas considera-se sempre que se trata de um *islanding* intencional, pois no trabalho em questão não foram estudados os efeitos dos curto-circuitos no sistema.

5.1 Configuração do sistema de teste

Todos os dispositivos que compõem a micro-rede foram modelados segundo os métodos apresentados nos capítulos anteriores. No Anexo B encontram-se dados adicionais relativos aos modelos das micro-fontes que foram utilizados na sua implementação.

5.1.1 Rede de teste de controlo em *Single-Master*

A rede de teste utilizada na simulação do controlo da micro-rede em *Single-Master* é adaptada da rede proposta em [40]. A rede em questão foi desenvolvida para o âmbito de realização de testes e análise de resultados (ou seja, não é uma rede que exista fisicamente) e é constituída por todas as micro-fontes referidas no Capítulo 2. No entanto, e como no decorrer deste trabalho apenas foram modelados o painel fotovoltaico e a célula de combustível, foi feita a seguinte adaptação: substituiu-se o gerador eólico pelo painel fotovoltaico e substituiu-se a microturbina pela célula de combustível.

Tal adaptação não provoca nenhuma alteração significativa na rede de teste, uma vez que, e como visto anteriormente, tanto o gerador eólico como o painel fotovoltaico são unidades de operação em paralelo com a rede, e tanto a microturbina como a célula de combustível são unidades de suporte rede, pelo que, para ambos os casos, a contribuição dinâmica que cada um impõe no sistema é idêntica e a sua substituição em nada afeta o comportamento dinâmico geral da micro-rede. Na Figura 5.1 apresenta-se a rede tal como utilizada no âmbito deste trabalho.

A capacidade instalada do sistema é de 115 kW, sendo composto por três instalações fotovoltaicas correspondentes a 80 kW de potência nominal e uma instalação composta por duas células de combustível que totalizam 35 kW de potência nominal. O sistema de armazenamento não é contabilizado pois para os efeitos do estudo em questão é utilizado apenas para injetar/absorver potência na micro-rede nos transitórios correspondentes a situações de *islanding*. A rede é ainda composta por um transformador MT/BT. No lado BT do transformador encontra-se o dispositivo responsável pela separação da micro-rede da rede elétrica. No sistema existem ainda quatro blocos distintos de cargas.

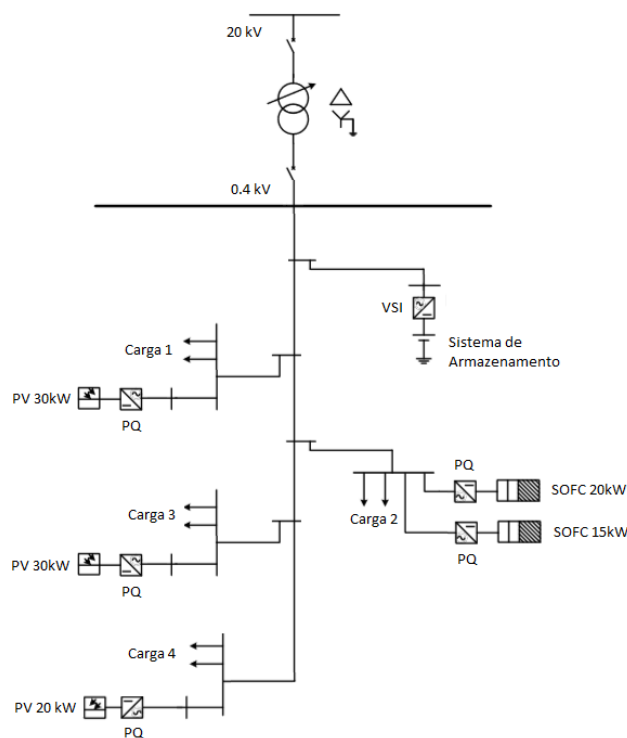


Figura 5.1 - Micro-rede de teste (Controlo em Single-Master)

A rede em questão foi usada para a realização de todos os testes ao controlo em *Single-Master* cujos resultados, tanto numéricos como gráficos, serão apresentadas nas secções seguintes para casos de importação/exportação da/para a rede elétrica.

5.1.2 Rede de teste de controlo em *Multi-Master*

A rede de teste utilizada na simulação do controlo da micro-rede em *Multi-Master* é apresentada na Figura 5.2 e foi, igualmente, obtida a partir da adaptação mencionada na secção anterior da rede apresentada em [40]. A rede em questão é praticamente idêntica à utilizada para o controlo em *Single-Master*, apresentando uma capacidade de 115 kW, sendo composta por três instalações fotovoltaicas correspondentes a 80 kW de potência nominal e uma instalação composta por duas células de combustível que totalizam 35 kW de potência nominal. No entanto, neste caso é adicionado um dispositivo de armazenamento de energia ligado a um inversor controlado por VSI em paralelo com o já existente, de modo a que o sistema tenha as especificações pretendidas para o teste do controlo em *Multi-Master*. Recorde-se que a diferença entre estes dois modos de controlo verifica-se na quantidade de VSI que compõem o sistema, sendo que no caso do controlo em *Multi-Master* existe a necessidade de haver pelo menos dois VSI a operar em conjunto com a função de impor os valores de frequência e tensão de frequência a ser seguidos pelos restantes componentes da micro-rede.

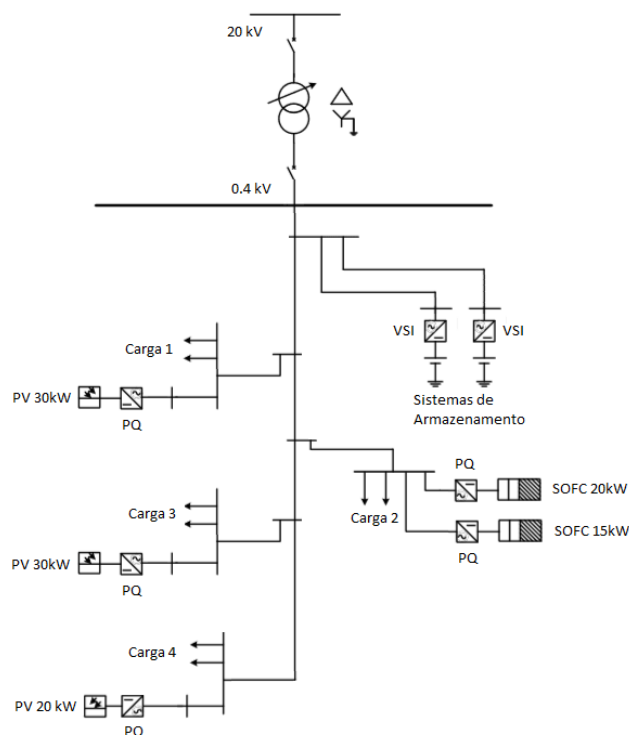


Figura 5.2 - Micro-rede de teste (Controlo em Multi-Master)

De novo, a rede em questão foi usada para a realização de todos os testes ao controlo em *Multi-Master* sendo que os respetivos resultados, numéricos e gráficos, serão apresentadas nas secções seguintes para casos de importação/exportação da/para a rede elétrica.

5.2 Importação da rede elétrica

Nesta secção será avaliada a resposta de estabilidade da micro-rede, pós *islanding*, em situação de importação de potência da rede elétrica. Para tal, é definido um instante em que se dá a interrupção da ligação entre a micro-rede e a rede de distribuição e será avaliado o comportamento de certas variáveis de interesse. Com isto, é possível avaliar a eficiência das estratégias de controlo aplicadas aos inversores e mencionadas no Capítulo 4. Será simulado o mesmo cenário de distribuição de geração e distribuição de carga tanto para o caso da rede a operar com controlo em *Single-Master* como para a rede a operar com controlo em *Multi-Master*, permitindo assim chegar a algumas conclusões em relação às semelhanças e às diferenças que cada método impõe na operação da micro-rede. Todos os resultados numéricos e gráficos apresentados foram obtidos através de simulação dinâmica em plataforma *Simulink*.

5.2.1 *Single-Master*

No teste com a rede a operar em *Single-Master* é considerada a rede apresentada na Figura 5.1. Os dados referentes à distribuição de geração interna na micro-rede antes da ocorrência do *islanding* apresentam-se na Tabela 5.1. Em relação aos valores de potência gerada nos painéis fotovoltaicos, estes são obtidos através do modelo descrito no Capítulo 3, mediante a definição das condições meteorológicas de entrada. No caso da célula de combustível, o valor de potência gerada é igual ao valor requisitado tal como o modelo, também descrito no Capítulo 3, descreve. Os valores de potência reativa são gerados pelo respetivo inversor uma vez que tanto os painéis fotovoltaicos como as células de combustível são de produção exclusivamente DC. Em forma de resumo, a geração interna total da micro-rede é de 65,86 kW de potência ativa e de 21 kvar de potência reativa.

Em relação à distribuição de cargas, esta é apresentada na Tabela 5.2. Todas as cargas são modeladas como potência constante, como referido no Capítulo 3. O consumo das cargas na micro-rede totalizam 75 kW de potência ativa e 24 kvar de potência reativa.

Na

Tabela 5.3 é feito um balanço das potências ativa e reativa totais geradas e consumidas pelo sistema completo, de onde se conclui que há um défice de geração interna de 9,14 kW de potência ativa e 3 kvar de potência reativa, sendo, portanto, esses valores compensados através da sua respetiva importação pela rede de distribuição elétrica. A potência ativa importada é aumentada para os 10 kW de forma a ter em conta as perdas de Joule no sistema de distribuição da micro-rede que até aqui não tinham sido consideradas.

Tabela 5.1 - Dados de geração das micro-fontes em situação de importação

Micro-fonte	Condições Meteorológicas		P [kW]	Q [kvar]
	Ga [W/m^2]	Ta [°C]		
Fotovoltaico (30 kW)	882	27	17,95	6
Fotovoltaico (30 kW)			17,95	6
Fotovoltaico (20 kW)			11,96	3
	Potência Requisitada			
Célula de Combustível (20 kW)	10		10	3,5
Célula de Combustível (15 kW)	8		8	2,5
Total			65,86	21

Tabela 5.2 - Dados de consumo das cargas em situação de importação

Carga	P [kW]	Q [kvar]
Carga 1	19	6
Carga 2	24	8
Carga 3	19	6
Carga 4	13	4
Total	75	24

Tabela 5.3 - Balanço de potências em situação de importação

	P [kW]	Q [kvar]
Geração	65,86	21
Carga	75	24
Importação da rede	10	3

Os dados apresentados nas Tabela 5.1, Tabela 5.2 e Tabela 5.3 foram utilizados como condições iniciais da simulação. Não há possibilidade de começar a simulação a partir de um ponto de operação estável, ou seja, não é possível assumir que os dispositivos já estavam ligados antes de $t = 0 s$, o que se torna mais problemático para o caso da célula de combustível que, segundo o modelo estudado, demora cerca de $120 s$ a estabilizar e igualar o valor de potência de saída e potência requisitada em caso de início de operação. Como tal é iniciada a operação e apenas num instante superior $120 s$ é realizado o *islanding* de forma a garantir a estabilidade de operação de todo o sistema no instante em que a micro-rede e a rede de distribuição se desligam uma da outra.

Foram definidos como parâmetros de limite para a ativação do controlador secundário de tensão os valores de 0,98 e 1,02 pu, respetivamente, portanto para qualquer variação de tensão que não ultrapasse nenhum destes limites, o controlador secundário não deve intervir.

Definiu-se que o *islanding* ocorreu em $t = 200 s$. De seguida são apresentados os resultados gráficos obtidos pela simulação das variáveis de interesse para o estudo em questão. Nas Figura 5.3, Figura 5.4 e Figura 5.5 apresentam-se os resultados obtidos para as variáveis de potência ativa e frequência, que como se viu pelas estratégias de controlo estudadas antes são variáveis que dependem uma da outra. Nas Figura 5.6 e Figura 5.7 apresentam-se as variáveis relacionadas com a tensão do sistema, que como visto antes, se relacionam com a variação de potência reativa.

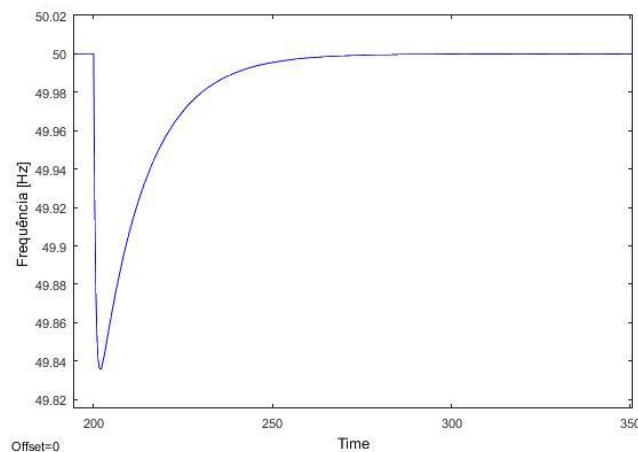


Figura 5.3 - Frequência do sistema (Importação em *Single-Master*)

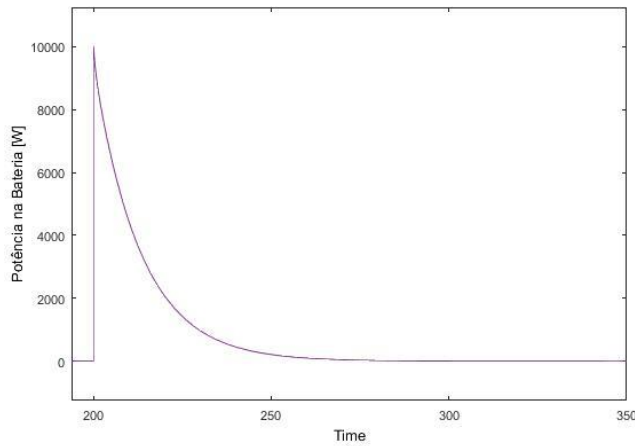


Figura 5.4 - Potência fornecida pelo sistema de armazenamento (Importação em *Single-Master*)

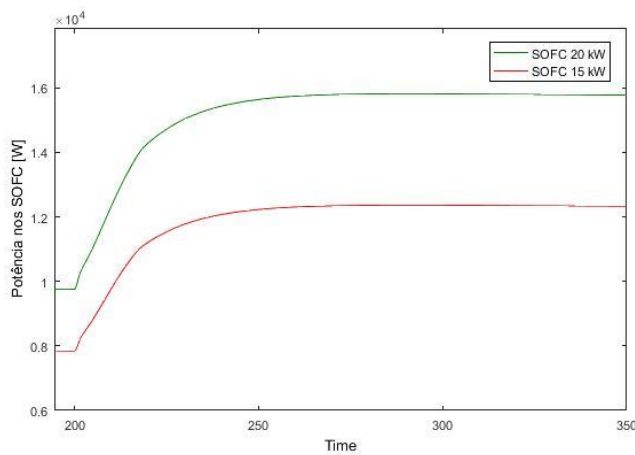


Figura 5.5 - Potência fornecida pelos SOFC (Importação em *Single-Master*)

Em $t = 200\text{ s}$ ocorre o *islanding*, originando um déficit de 10 kW (valor que antes estava a ser importado pela rede de distribuição). Nesse mesmo instante o VSI e sistema de armazenamento atuam, compensado esse déficit e por consequência alterando o valor de frequência do sistema para 49,84 Hz. De forma a repor o valor de frequência no seu valor nominal, o MGCC altera os valores de potência requisitada das células de combustível de forma a que sejam estas a compensar o déficit até aqui suportado pelo sistema de armazenamento. Há um aumento de 5,714 kW na célula de combustível de 20 kW nominais e um aumento de 4,286 kW na célula de combustível de 15 kW nominais. Como o modelo da célula de combustível descreve, esta tem nas suas dinâmicas constantes de tempo que levam a que este aumento não seja instantâneo, pelo que à medida que as células de combustível vão aumentando a sua potência gerada, o sistema de armazenamento, por ação do controlo secundário, vai diminuindo a potência que injeta na micro-rede e assim restabelece o valor da frequência no seu valor nominal pretendido. A operação volta à estabilidade passado cerca de 60 s após o *islanding*.

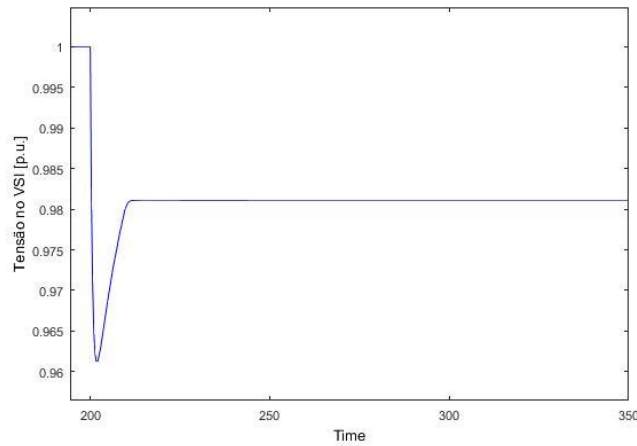


Figura 5.6 - Tensão de referência do sistema (Importação em *Single-Master*)

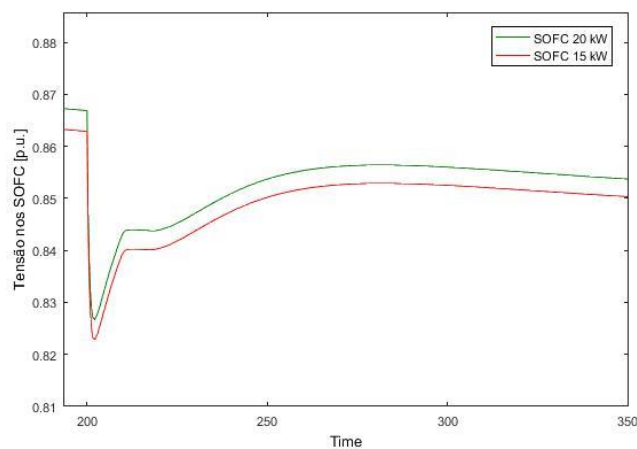


Figura 5.7 - Tensão nos SOFC (Importação em *Single-Master*)

A tensão de referência do sistema diminui em $t = 200\text{ s}$ devido ao déficit de potência reativa originado pelo *islanding*. A estabilização do seu valor ocorre cerca de 15 s após o *islanding* nos $0,9811\text{ p.u.}$ A tensões de saída das células de combustível diminuem ligeiramente como consequência da diminuição do valor de amplitude de tensão de referência, estabilizando nos $0,8541\text{ p.u.}$ na célula de combustível de 20 kW nominais e nos $0,8502\text{ p.u.}$ na célula de combustível de 15 kW nominais, cerca de 100 s após o *islanding*. A estabilização do valor de tensão das células de combustível é mais demorada devido dois fatores: as já mencionadas constantes de tempo da célula e o facto da tensão também ser influenciada pela variação de potência na célula que ocorre devido às dinâmicas de controlo de frequência mencionadas acima.

5.2.2 *Multi-Master*

No teste com a rede a operar em *Multi-Master* é considerada a rede apresentada na Figura 5.2. Todos os dados de distribuição de geração e de distribuição de carga são iguais aos considerados no teste em *Single-Master*, portanto os dados relativos à geração são os apresentados na Tabela 5.1 e os dados relativos à carga são os apresentados na Tabela 5.2. O balanço de potências apresentado na

Tabela 5.3 é novamente válida visto não haver alterações nem na geração, nem no consumo. Definiu-se novamente que o *islanding* ocorre no instante $t = 200$ s. Apresentam-se de seguida os resultados gráficos obtidos pela simulação das variáveis de interesse para o estudo em questão. Nas Figura 5.8, Figura 5.9 e Figura 5.10 apresentam-se os resultados obtidos para as variáveis de potência ativa e frequência. Nas Figura 5.11 e Figura 5.12 apresentam-se as variáveis relacionadas com a tensão do sistema

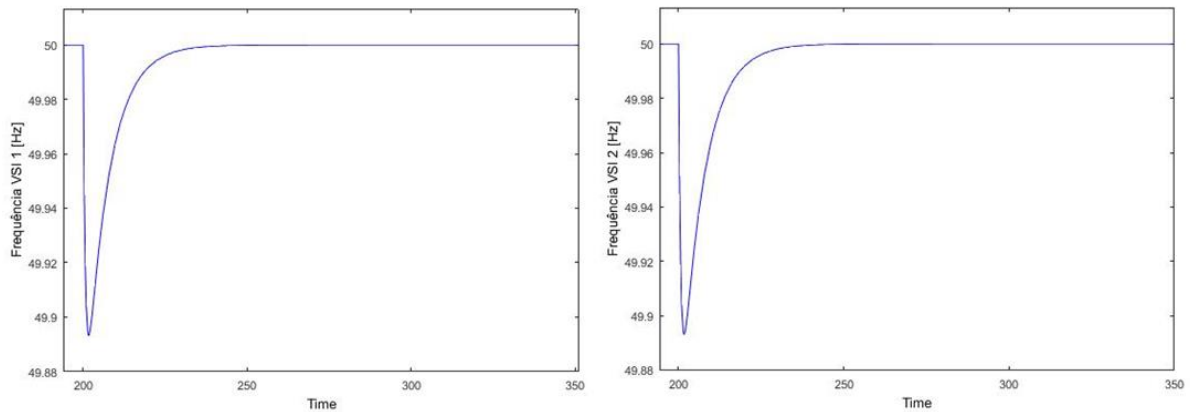


Figura 5.8 - Frequência imposta pelo VSI 1 e pelo VSI 2 (Importação em *Multi-Master*)

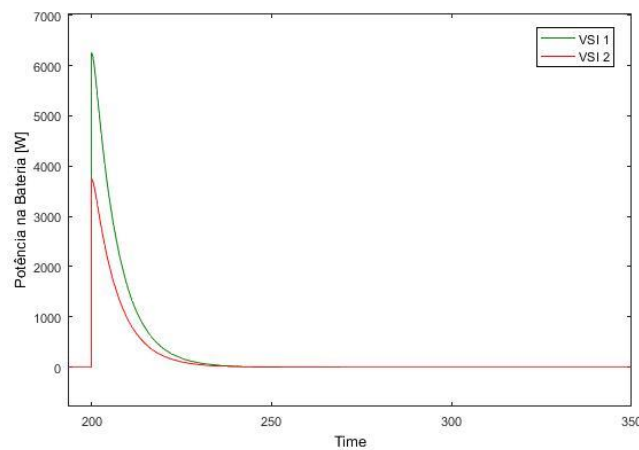


Figura 5.9 - Potência fornecida pelos sistemas de armazenamento (Importação em *Multi-Master*)

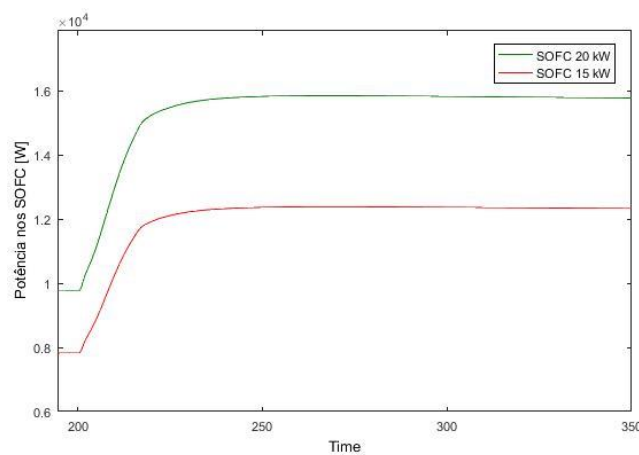


Figura 5.10 - Potência fornecida pelos SOFC (Importação em *Multi-Master*)

O processo de retorno à estabilidade é, de certa forma idêntico, ao processo descrito para o controle em *Single-Master*. Em $t = 200$ s ocorre o *islanding*, originando um déficit de 10 kW (valor que antes estava a ser importado pela rede de distribuição). Nesse instante atuam os sistemas de armazenamento de forma a compensar de uma forma partilhada o déficit de potência. A partilha é, como visto no Capítulo 4, dependente dos respetivos coeficientes de *droop* impostos pelo seu VSI associado, e é feita de tal forma que garante que ambos os VSI, em todos os instantes, impõem na micro-rede o mesmo valor de frequência. Os 10 kW de déficit foram partilhados da seguinte forma: o VSI 1 assumiu 6,252 kW do valor e o VSI 2 assumiu 3,744 kW. Este processo fez com que a frequência do sistema baixasse para os 49,89 Hz. De maneira a repor o valor de frequência no seu valor nominal, o MGCC altera os valores de potência requisitada das células de combustível de forma a que sejam estes a compensar o déficit até aqui suportado pelos sistemas de armazenamento, aumentando 5,714 kW na célula de combustível de 20 kW nominais e aumentando 4,286 kW na célula de combustível de 15 kW nominais. Novamente as constantes de tempo modelo da célula de combustível levam a que este aumento não seja instantâneo, pelo que à medida que as células de combustível vão aumentando a sua potência gerada, o sistema de armazenamento, por ação do controlo secundário, vai diminuindo a potência que injeta na micro-rede e assim restabelece o valor da frequência no seu valor nominal pretendido. A operação volta à estabilidade passado cerca de 40 s após o *islanding*.

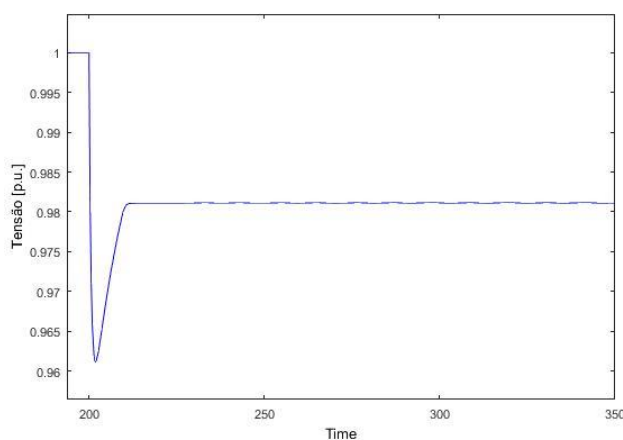


Figura 5.11 - Tensão de referência do sistema (Importação em *Multi-Master*)

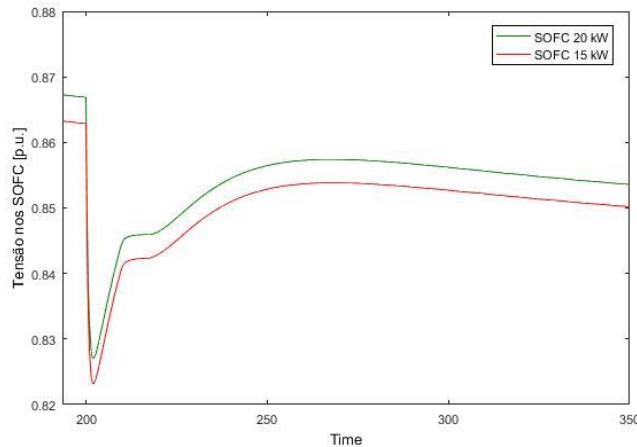


Figura 5.12 - Tensão nos SOFC (Importação em *Multi-Master*)

Em relação à tensão no sistema, como se pode observar pela comparação gráfica entre as Figura 5.11 e Figura 5.12 e os respetivos gráficos para o controlo em *Single-Master*, não existem diferenças significativas entre ambos. Isto deve-se ao facto de, como mencionado no Capítulo 4, nas redes de Baixa Tensão as impedâncias dos cabos de distribuição não permitirem uma partilha precisa de potência reativa entre VSI, pelo que a função de controlo tensão/potência reativa, mesmo em operação em *Multi-Master*, é responsabilidade apenas de um dos VSI do sistema.

5.3 Exportação para rede elétrica

Nesta secção será avaliada resposta de estabilidade da micro-rede, pós *islanding*, em situação de exportação de potência para rede elétrica. Para tal, todo o processo de simulação já mencionado e demonstrado para o caso de importação será replicado, alterando-se apenas as condições iniciais do sistema antes do *islanding*. Definem-se essas condições de forma a que a geração interna na micro-rede supere o consumo das cargas possibilitando assim exportar o excesso para a rede de distribuição. Será, novamente, simulado o mesmo cenário de distribuição de geração e distribuição de carga tanto para o caso da rede a operar com controlo em *Single-Master* como para a rede a operar com controlo em *Multi-Master*,

5.3.1 *Single-Master*

No teste com a rede a operar em *Single-Master* é, novamente, considerada a rede apresentada na Figura 5.1. Os dados referentes à distribuição de geração interna na micro-rede antes da ocorrência do *islanding* apresentam-se na Tabela 5.4. Em forma de resumo, a geração interna total da micro-rede é de 73,83 kW de potência ativa e de 21 kvar de potência reativa. Em relação à distribuição de cargas, esta é apresentada na Tabela 5.5. O consumo das cargas na micro-rede totalizam 61 kW de potência ativa e 24 kvar de potência reativa. Na Tabela 5.6 é apresentado o balanço das potências ativa e reativa totais geradas e consumidas pelo sistema completo, de onde se conclui que há um

excesso de geração interna de 12.83 kW de potência ativa e um déficit de 3 kvar de potência reativa. A potência ativa exportada é reduzida para os 12 kW de forma a ter em conta as perdas de Joule no sistema de distribuição da micro-rede.

Foram, novamente, definidos como parâmetros de limite para a ativação do controlador secundário de tensão os valores de 0,98 e 1,02 pu, respetivamente, portanto para qualquer variação de tensão que não ultrapasse nenhum destes limites, o controlador secundário não deve intervir.

Tabela 5.4 - Dados de geração das micro-fontes em situação de exportação

Micro-fonte	Condições Meteorológicas		P [kW]	Q [kvar]
	Ga [W/m^2]	Ta [°C]		
Fotovoltaico (30 kW)	906	27	18,31	6
Fotovoltaico (30 kW)			18,31	6
Fotovoltaico (20 kW)			12,21	3
	Potência Requisitada			
Célula de Combustível (20 kW)	10		15	3,5
Célula de Combustível (15 kW)	8		10	2,5
Total			73,83	21

Tabela 5.5 - Dados de consumo das cargas em situação de exportação

Carga	P [kW]	Q [kvar]
Carga 1	16	6
Carga 2	19	8
Carga 3	16	6
Carga 4	10	4
Total	61	24

Tabela 5.6 - Balanço de potências em situação de exportação

	P [kW]	Q [kvar]
Geração	73,83	21
Carga	61	24
Exportação da rede	12	3

Os dados apresentados nas Tabela 5.4, Tabela 5.5 e Tabela 5.6 foram utilizados como condições iniciais da simulação. Definiu-se novamente que o *islanding* ocorre no instante $t = 200$ s. Apresentam-se de seguida os resultados gráficos obtidos das variáveis de interesse para o estudo em questão. Nas Figura 5.13, Figura 5.14 e Figura 5.15 apresentam-se os resultados obtidos para as variáveis de potência ativa e frequência. Nas Figura 5.16 e Figura 5.17 apresentam-se as variáveis relacionadas com a tensão do sistema.

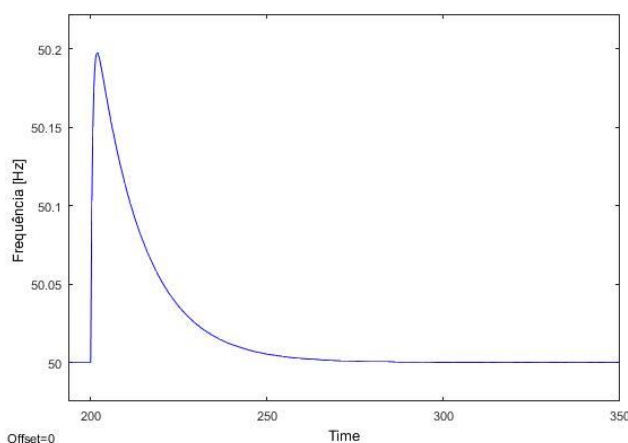


Figura 5.13 - Frequência do sistema (Exportação em *Single-Master*)

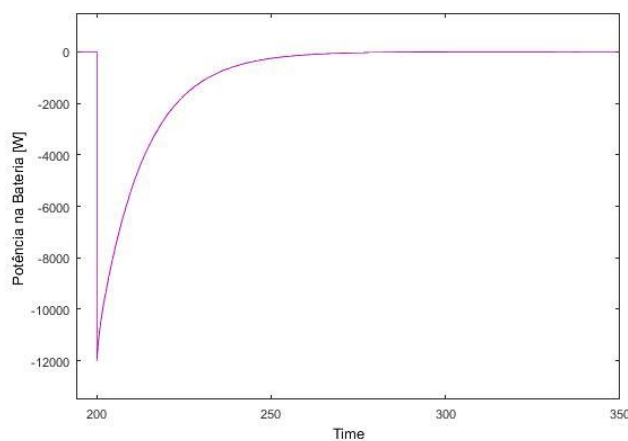


Figura 5.14 - Potência fornecida pelo sistema de armazenamento (Exportação em *Single-Master*)

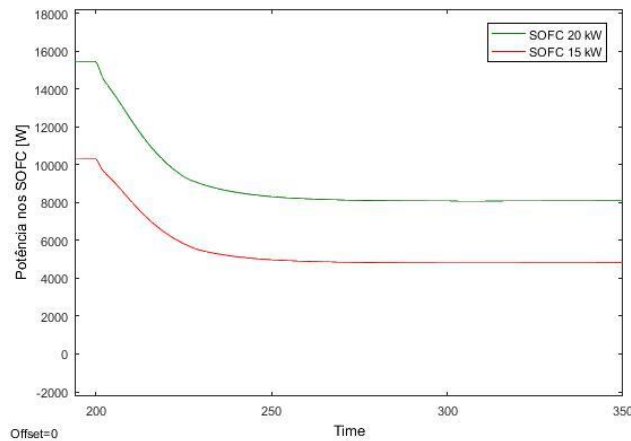


Figura 5.15 - Potência fornecida pelos SOFC (Exportação em *Single-Master*)

Em $t = 200\text{ s}$ ocorre o *islanding*, originando um excesso de 12 kW (valor que antes estava a ser exportado para a rede de distribuição). Nesse mesmo instante o VSI e sistema de armazenamento atuam, absorvendo esse excesso, e por consequência alterando o valor de frequência do sistema para 50,2 Hz. De forma a repor o valor de frequência no seu valor nominal, o MGCC reduz os valores de potência requisitada das células de combustível de forma a diminuir a geração interna na micro-rede. Há uma diminuição de 6,857 kW na célula de combustível de 20 kW nominais e uma diminuição de 5,143 kW na célula de combustível de 15 kW nominais. Mais uma vez, as constantes de tempo modelo da célula de combustível levam a que esta diminuição não seja instantânea, pelo que à medida que as células de combustível vão diminuindo a sua potência gerada, vai diminuindo o excesso de geração na micro-rede, e por consequência diminui também, por ação do controlo secundário, a quantidade de potência absorvida pelo sistema de armazenamento (o sistema de armazenamento vai absorvendo o excesso de geração que não vai sendo compensado pelas células de combustível). Este processo dura até ao instante em que o conjunto das células de combustível diminuíram a sua produção conjunta em 12 kW (valor de excesso original) e, segundo o balanço de potências, não há mais excesso de potência na micro-rede. A partir do instante em que o sistema de armazenamento deixa de absorver potência o valor da frequência é restabelecido para o seu valor nominal. Toda esta operação de restabelecimento de estabilidade após o *islanding* dura cerca de 60 s.

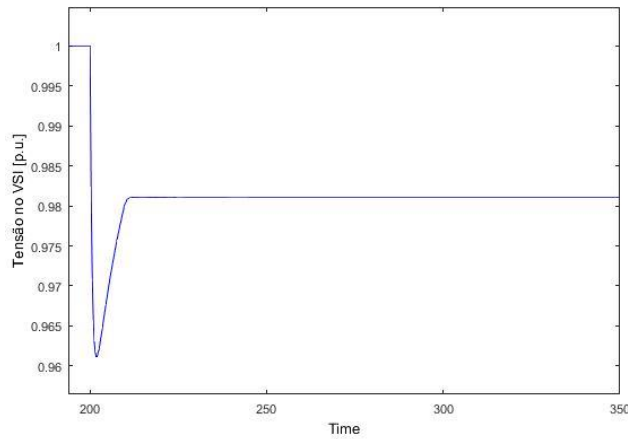


Figura 5.16 - Tensão de referência do sistema (Exportação em *Single-Master*)

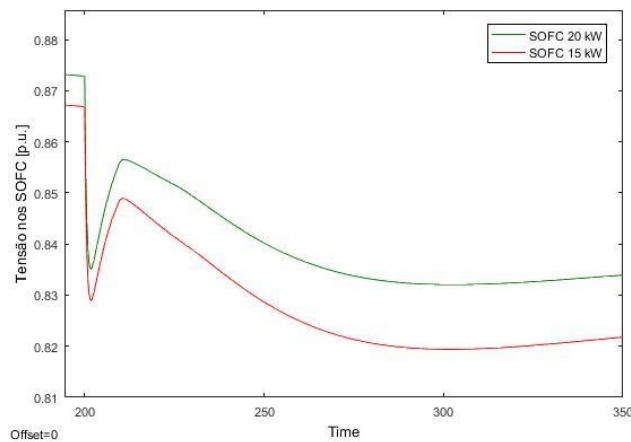


Figura 5.17 - Tensão nos SOFC (Exportação em *Single-Master*)

A tensão de referência do sistema diminui em $t = 200\text{ s}$ devido ao déficit de potência reativa originado pelo *islanding*. A estabilização do seu valor ocorre cerca de 15 s após o *islanding* nos $0,9811\text{ p.u.}$ As tensões de saída das células de combustível diminuem ligeiramente como consequência da diminuição do valor de amplitude de tensão de referência, estabilizando nos $0,8339\text{ p.u.}$ na célula de combustível de 20 kW nominais e nos $0,8218\text{ p.u.}$ na célula de combustível de 15 kW nominais, cerca de 100 s após o *islanding*. A tensão nas células de combustível apresenta uma descida mais acentuada quando comparada com a mesma situação em caso de importação, uma vez que a tensão de saída está diretamente relacionada com a potência de saída. Na exportação, após o *islanding*, a potência das células de combustível reduz-se e consequentemente a tensão diminui, enquanto que na importação a potência aumenta e consequentemente tensão também aumenta.

5.3.2 *Multi-Master*

No teste com a rede a operar em *Multi-Master* é considerada a rede apresentada na Figura 5.2. Todos os de distribuição de geração e de distribuição de carga são iguais aos considerados no teste

em *Single-Master*, portanto os dados relativos à geração são os apresentados na Tabela 5.4 e os dados relativos à carga são os apresentados na Tabela 5.5. O balanço de potências apresentado na Tabela 5.6 é novamente válido visto não haver alterações nem na geração, nem no consumo. Definiu-se novamente que o *islanding* ocorre no instante $t = 200$ s. Apresentam-se de seguida os resultados gráficos obtidos pela simulação das variáveis de interesse para o estudo em questão. Nas Figura 5.18, Figura 5.19 e Figura 5.20 apresentam-se os resultados obtidos para as variáveis de potência ativa e frequência. Nas Figura 5.21 e Figura 5.22 apresentam-se as variáveis relacionadas com a tensão do sistema.

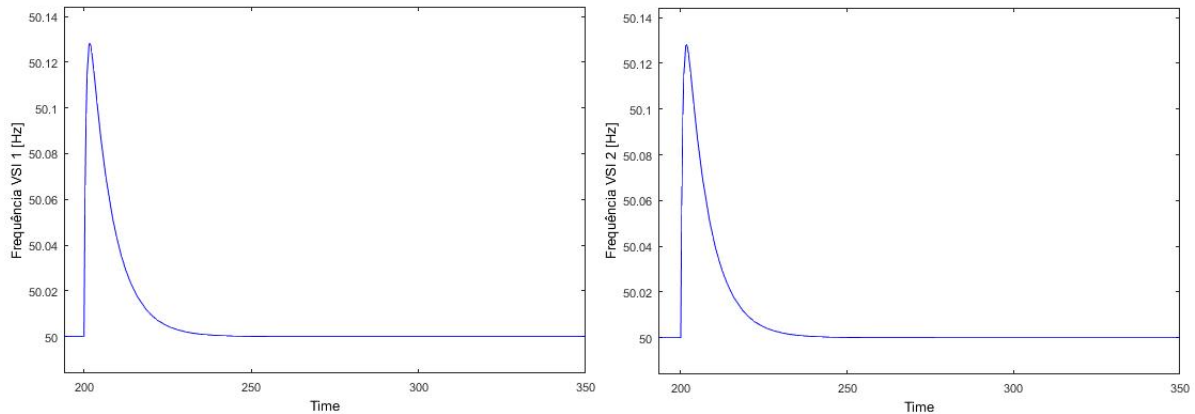


Figura 5.18 - Frequência imposta pelo VSI 1 e pelo VSI 2 (Exportação em *Multi-Master*)

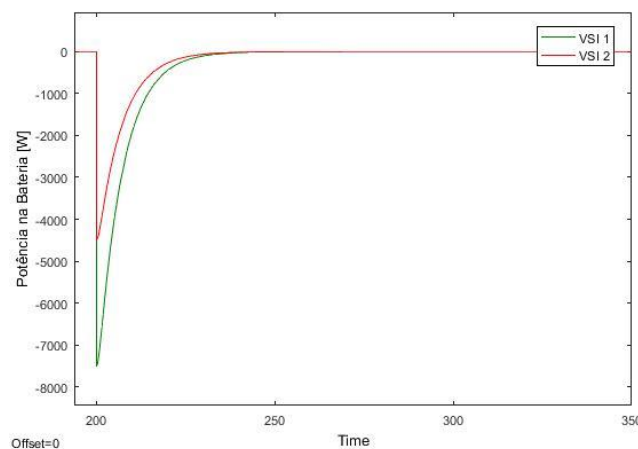


Figura 5.19 - Potência fornecida pelos sistemas de armazenamento (Exportação em *Multi-Master*)

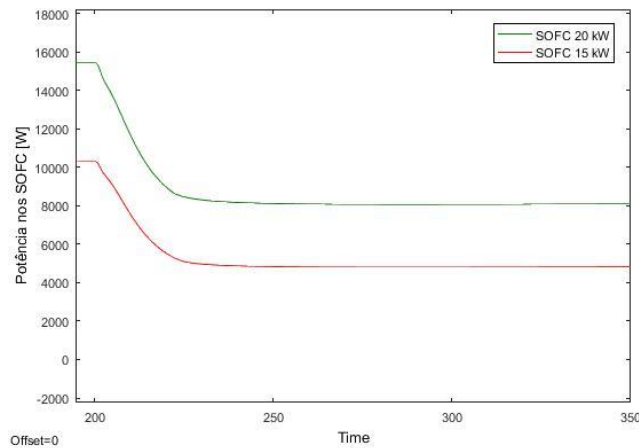


Figura 5.20 - Potência fornecida pelos SOFC (Exportação em *Multi-Master*)

Em $t = 200\text{ s}$ ocorre o *islanding*, originando um excesso de 12 kW (valor que antes estava a ser exportado para a rede de distribuição). Nesse instante atuam os sistemas de armazenamento de forma a absorver, de uma forma partilhada o excesso de potência. A partilha é dependente dos respetivos coeficientes de *droop* impostos pelo seu VSI associado, e é feita de tal forma que garante que ambos os VSI, em todos os instantes, impõem na micro-rede o mesmo valor de frequência. Os 12 kW de excesso foram partilhados da seguinte forma: o VSI 1 absorveu 7,507 kW do valor e o VSI 2 absorveu 4,493 kW. Este processo fez com que a frequência do sistema aumentasse para os 50,13 Hz. De maneira a repor o valor de frequência no seu valor nominal, o MGCC reduz os valores de potência requisitada das células de combustível de forma a diminuir a geração interna na micro-rede. Há uma diminuição de 6,857 kW na célula de combustível de 20 kW nominais e um aumento de 5,143 kW na célula de combustível de 15 kW nominais. Novamente devido às constantes de tempo do modelo da célula de combustível esta diminuição não é instantânea, pelo que à medida que as células de combustível vão diminuindo a sua potência gerada, vai diminuindo o excesso de geração na micro-rede, e por ação do controlo secundário diminui também a quantidade de potência absorvida pelos dois sistemas de armazenamento. Este processo dura até ao instante em que o conjunto das células de combustível diminuíram a sua produção de tal forma que não há mais excesso de potência na micro-rede. A partir do instante em que o sistema de armazenamento deixa de absorver potência o valor da frequência é restabelecido para o seu valor nominal. Esta operação dura cerca de 40 s.

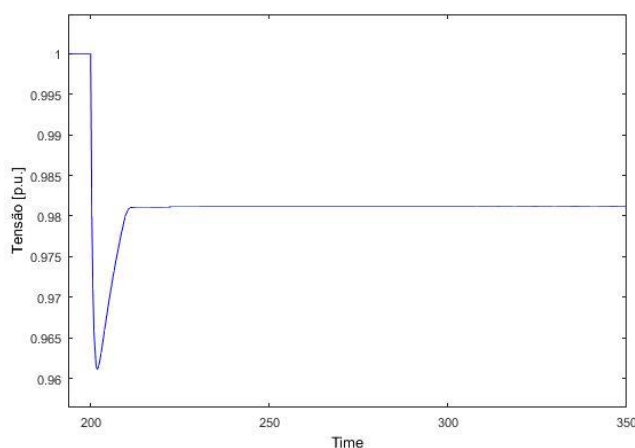


Figura 5.21 - Tensão de referência do sistema (Exportação em *Multi-Master*)

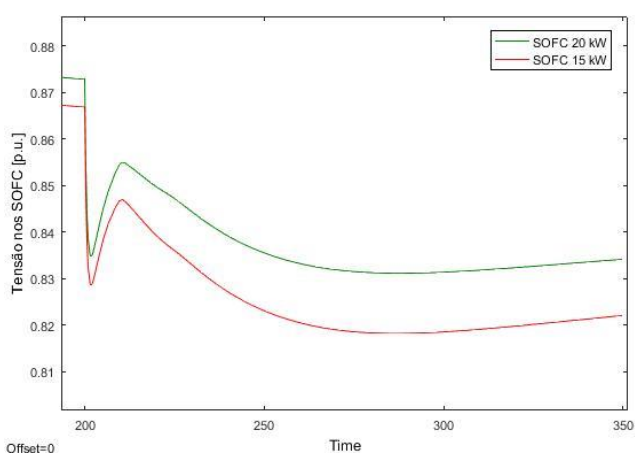


Figura 5.22 - Tensão nos SOFC (Exportação em *Multi-Master*)

Em relação à tensão no sistema, não há diferenças significativas em comparação com o controlo em *Single-Master*, devido ao facto de, como visto para o caso de importação, nas redes de Baixa Tensão as impedâncias dos cabos de distribuição não permitirem uma partilha precisa de potência reativa entre VSI, pelo que a função de controlo tensão/potência reativa, mesmo em operação em *Multi-Master*, é responsabilidade apenas de um dos VSI do sistema.

5.4 Comparação: *Single-Master* vs. *Multi-Master*

Na Tabela 5.7 são apresentados, em forma de resumo, os resultados numéricos obtidos nas simulações relativos às dinâmicas entre frequência e potência ativa. Os dados relativos às dinâmicas entre tensão e potência reativa não estão apresentados pois como foi dito antes, mesmo em *Multi-Master*, esta função é responsabilidade de apenas um VSI, pelo que não é útil fazer uma comparação do desempenho entre os dois tipos de controlo para esse caso.

Tabela 5.7 - Comparação de desempenho entre Single-Master e Multi-Master

	Importação		Exportação	
	<i>Single-Master</i>	<i>Multi-Master</i>	<i>Single-Master</i>	<i>Multi-Master</i>
Potência Requisitada ao Sistema de Armazenamento [kW]	10	6,252 + 3,744	12	7,507 + 4,993
Desvio Máximo de Frequência [Hz]	0,16	0,11	0,20	0,13
Tempo de restabelecimento [s]	60	40	60	40

Pela análise da tabela conclui-se que se a micro-rede operar com controlo em *Multi-Master*, visto o défice/excesso ser partilhado entre os sistemas de armazenamento, consegue-se obter menores desvios de frequência em relação ao seu valor nominal e tempos de restabelecimento também menores. Na operação em *Multi-Master*, consegue-se diminuir o valor máximo de potência suportado por cada VSI, dividindo-se o total pelos dois (em *Single-Master* o VSI suporta a totalidade da variação de potência) e consequentemente é possível obter um desvio de frequência mais reduzido como é facilmente perceptível através da análise da equação de *droop* que rege a operação de controlo implementada pelo VSI. Em relação ao tempo de restabelecimento, este reduz-se devido à compensação de potência ser feita em simultâneo pelos dois sistemas de armazenamento, o que garante que a operação é feita mais rapidamente do que quando realizada apenas por um. Portanto, de um ponto de vista exclusivo de controlo, a operação em *Multi-Master* é preferível pois apresenta melhores resultados. No entanto, a implementação deste tipo de controlo é mais dispendiosa, uma vez que necessita de pelo menos dois dispositivos de armazenamento de energia, aumentando assim o investimento no sistema.

Capítulo 6 - Conclusão

A penetração de geração distribuída nas redes de distribuição de Média Tensão vem, ao longo do tempo, tornando-se numa possibilidade cada vez mais real nos sistemas de distribuição modernos de modo a fazer face ao contínuo crescimento da rede elétrica. O desenvolvimento de tecnologias de microgeração como o painel fotovoltaico ou a célula de combustível, ambas tratadas no âmbito do trabalho, assim como as microturbinas ou os microgeradores eólicos, vieram contribuir consideravelmente para a evolução do conceito de geração distribuída. Associado a este conceito surge o conceito de micro-rede, como sendo um sistema de energia que agrega elementos de geração distribuída (microgeração), elementos de armazenamento de energia, elementos de conversão de energia (inversores) e elementos de consumo de energia (cargas), formando entre si uma entidade única do ponto de vista da rede de distribuição, e contendo funcionalidades de gestão e controlo próprias que lhe permite funcionar em dois modos distintos de operação: em ligação com a rede elétrica ou de forma autónoma. A implementação do conceito de micro-rede é, porém, uma tarefa árdua pois requer a interligação de um número considerável de funcionalidades de gestão e controlo em operação simultânea de forma a garantir o bom desempenho do sistema. No âmbito deste trabalho foram abordadas algumas dessas funcionalidades, relacionadas em exclusivo com o controlo das variáveis de interesse do sistema, nomeadamente a frequência e a tensão. A implementação das funcionalidades de controlo é realizada através das interfaces de eletrónica de potência dos elementos de conversão de energia que compõe a micro-rede. Estes dispositivos são agregados tanto aos elementos de microgeração que no caso estudado geram energia DC, e necessita de ser convertida em energia AC de forma a ser consumida pelas cargas ou injetada na rede de distribuição, como aos elementos de armazenamento de energia que apresentam, igualmente, uma característica DC.

No âmbito do trabalho foram desenvolvidos modelos dinâmicos detalhados para os sistemas de microgeração utilizados. Foram modelados o painel fotovoltaico e a célula de combustível. A principal razão pela escolha destas duas tecnologias prende-se com a sua forma distinta de interagir com o sistema onde estão inseridos. Apesar de ambas terem como finalidade a injeção de potência na micro-rede, o modo como o fazem difere. No caso do painel fotovoltaico, este trata-se de um dispositivo que opera em paralelo com a rede pelo que a potência injetada depende exclusivamente das condições meteorológicas. No caso da célula de combustível a potência injetada depende da potência requisitada à entrada do sistema, o que permite que este auxilie nas variações de carga e tenha um papel fundamental no seu controlo. Devido a estas características, a célula de combustível designa-se como um dispositivo de suporte de rede.

Do ponto de vista do controlo, foram estudadas estratégias distintas de controlo a implementar pelos referidos dispositivos de conversão que permitem associar o tipo de micro-fonte ou sistema de armazenamento à função de controlo pretendida. Foi estudado o conversor com controlo VSI, que pretende emular o controlo realizado pelos geradores síncronos nos sistemas convencionais de energia através da implementação de características de *droop*, e assim definir os valores de

referência de frequência e tensão a ser seguidos por todo o sistema em caso de operação desligada da rede de distribuição. Este tipo de conversor é associado principalmente aos sistemas de armazenamento devido à sua rápida resposta a variações de carga no sistema. Foi, também, estudado o conversor com controlo PQ que pretende regular os valores de potência ativa e reativa que o dispositivo que lhe está agregado injeta no sistema. Estes tipos de conversores são por sua vez associados às fontes de microgeração que alimentam o sistema, no caso o painel fotovoltaico e a célula de combustível. Foi estudado e implementado um controlo secundário que permite que o sistema recupere a operação para os seus valores nominais em momentos consequentes a um *islanding* do sistema. Foram abordadas duas estratégias de composição da micro-rede que influenciam diretamente o seu desempenho: a estratégia de controlo em *Single-Master* e a estratégia de controlo em *Multi-Master*. A estratégia *Single-Master* consiste na presença de apenas um conversor com controlo por VSI no sistema, o que garante que apenas um dispositivo define de forma exclusiva as referências de frequência e tensão de todo o sistema. Por sua vez, o controlo em *Multi-Master* consiste na presença de mais que um conversor controlado por VSI no sistema, pelo que terão que operar em conjunto na definição das variáveis de referência garantido que em todos os instantes os valores que estes definem como referências para o sistema são iguais.

Foram realizados testes e simulações de operação de uma micro-rede teste para duas situações de *islanding* distintas, uma num instante que se importava potência ativa da rede de distribuição e outra num instante em que se exportava excesso de energia gerada na micro-rede para a rede de distribuição. Concluiu-se que tanto a estratégia de *Single-Master* como a estratégia de *Multi-Master* são eficazes na execução do controlo do sistema. Foram, no entanto, apontadas diferenças entre ambos os métodos e mediante uma análise dos resultados concluiu-se que a estratégia de *Multi-Master* apresenta um melhor desempenho, uma vez que origina de picos de variação das variáveis a controlar mais reduzidos e, além disso, apresenta tempos de restabelecimento mais pequenos, significando portanto que a micro-rede se encontra em operação instável, ou pelo menos fora dos valores de operação nominais, durante um período de tempo mais reduzido em comparação com a operação em *Single-Master*.

No âmbito do trabalho desenvolvido foram implementadas e avaliadas funcionalidades de contributo relevante no estudo do desempenho das estratégias de controlo necessárias à estabilidade de um sistema complexo, como uma micro-rede, que difere de um sistema de energia convencional e por isso apresenta abordagens de controlo distintas dos convencionais

6.1 Trabalho Futuro

Através dos estudos realizados no âmbito deste trabalho foi possível testar o controlo de operação de uma micro-rede e avaliar a sua estabilidade para diferentes cenários dinâmicos relativos à sua respetiva interligação com a rede de distribuição. O conceito de micro-rede, embora não sendo recente, tem sido amplamente estudado, devido à rápida evolução de dispositivos de microgeração, como uma solução eficaz para o combate às sucessivas necessidades de expansão da rede elétrica.

Tratando-se de um campo de estudo vasto e de grande relevância, existe uma necessidade constante de procura de novas estratégias e abordagens de forma a tornar a operação das micro-redes o mais eficiente possível.

Tendo em conta o estudo efetuado, considera-se de especial importância a investigação futura da implementação de uma estratégia de controlo centralizada de potência reativa que permita a gestão e controlo de tensão na micro-rede em operação em *Multi-Master*, de uma forma idêntica ao estudado para a potência ativa, e que no caso da potência reativa apresenta limitações a nível dos cabos de Baixa Tensão.

No que diz respeito a variações de carga que originem variações de frequência muito elevadas e que não sejam possíveis de mitigar através das fontes de microgeração da micro-rede, deve ser estudada a implementação de estratégias de deslastre de carga que permitam desligar cargas não essenciais do sistema. Desta forma pretende-se diminuir a variação de carga e por consequência reduzir a variação de frequência, permitindo que o seu valor se aproxime do valor nominal.

Ao nível da rede de distribuição de Média Tensão, será interessante o estudo da interligação entre várias micro-redes e das modificações que tal implicaria no Operador da Rede de Distribuição de forma a implementar a ideia de "centrais elétricas virtuais" descentralizadas, com o objetivo de libertar o Operador da Rede de Distribuição de alguns serviços, funcionando em cooperação com a geração centralizada.

Será interessante e relevante ainda a análise das estratégias de controlo sob condições de operação desequilibrada, uma vez que micro-fontes de pequena escala, como o painel fotovoltaico e os microgeradores eólicos com potências nominais de poucos kW serão unidades monofásicas, que podem contribuir para o desequilíbrio do sistema e podendo tornar as estratégias aqui estudadas ineficazes.

Por fim, considera-se útil o estudo da estrutura de comunicações implementado na micro-rede, que deve ter em conta a globalidade do sistema necessária ao sistema de controlo.

Referências

- [1] E. Hayden, "Introduction to Microgrids," 2013. [Online]. Available: <https://vdocuments.mx/introduction-to-microgrids-securicon-20131.html>. [Accessed 26 Março 2018].
- [2] P. Asmus, "Why Microgrids Are Moving Into the Mainstream: Improving the efficiency of the larger power grid," *Electrification Magazine, IEEE*, pp. 12-19, March 2014.
- [3] D. T. Ton and M. A. Smith, "The U.S. Department of Energy's Microgrid Initiative," *The Electricity Journal*, pp. 84-94, 30 October 2012.
- [4] S. Aceky, J. Tjader and C. Bastholm, "Electricity Supply to Africa and Developing Economies... Challenges and Opportunities," in *8th Southern Africa Regional Conference*, Southern Africa, 2017.
- [5] C. Schwaegerl and L. Tao, "The Microgrids Concept," in *Microgrids: Architectures and Control*, John Wiley & Sons, Ltd., 2013, pp. 1-24.
- [6] D. McCormack and B. Luyster, "The Impact of Self-Generation and Microgrids," [Online]. Available: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/us/Documents/energy-resources/us-er-2014-aes-presentation-es7-topic6-112614.pdf>. [Accessed 2018 Março 30].
- [7] J. A. P. Lopes, C. L. Moreira and A. G. Madureira, "Defining Control Strategies for MicroGrids Islanded Operation," *Transactions on Power Systems, IEEE*, vol. 21, no. 2, pp. 916-924, 1 May 2006.
- [8] C. Schwaegerl, "Technical, Economic and Environmental Benefits of Microgrids Operation," January 2009. [Online]. Available: http://www.microgrids.eu/documents/Ch._Schwaegerl_Technical_Economical_and_Environmental_Benefits.pdf. [Accessed 4 Abril 2018].
- [9] A. Awai, T. Bourgeois, K. Cataldo, S. A. Hammer, T. Kelly, S. Kraham, J. Mitchel, L. Nurani, W. Pentland, L. Perfetto and J. Van Nostrand, "Microgrids: An Assessment of the Value, Opportunities and Barriers to Deployment in New York State," pp. 10-35, 2010.
- [10] H. Lotti and A. Khodaei, "AC vs. DC Microgrid Planning," *Transactions on Smart Grid IEEE*, vol. 8, no. 1, pp. 296-3014, 26 August 2015.
- [11] X. Liu, P. Wang and P. C. Loh, "A Hybrid AC/DC Micro-Grid," in *Conference Proceedings IPEC, IEEE*, Singapore, 2010.

- [12] B. Kroposki, T. S. Basso and R. Deblasio, "Microgrids standards and technologies," *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, IEEE*, 12 August 2008.
- [13] Z. Gao, S. Li, X. Zhou and Y. Ma, "An Overview of PV System," in *International Conference of Mechatronics and Automation, IEEE*, Harbin, China, 2016.
- [14] R. Castro, "Chapter 3: Photovoltaic Energy," in *Renewable Energy Sources and Distributed Power Generation*, Lisboa, IST, 2016.
- [15] CEEETA - Centro de Estudos em Economia da Energia dos Transportes e do Ambiente, "Tecnologias de Micro-geração e Sistemas Periféricos," Dezembro 2001. [Online]. Available: <http://www.marioloureiro.net/tecnica/energProdu/TecnologiasMicroGeracaoCapa.pdf>. [Accessed 5 Abril 2018].
- [16] Yukon Government, "Wind Energy," [Online]. Available: <http://www.esc.gov.yk.ca/wind.html>. [Accessed 19 Fevereiro 2018].
- [17] X. Huang, Z. Zhang and J. Jiang, "Fuel Cell Technology for Distributed Generation: An Overview," *International Symposium on Industrial Electronics, IEEE*, 29 January 2006.
- [18] Smithsonian Institute, "Fuel Cells Basics," The National Museum of American History, 2017. [Online]. Available: <http://americanhistory.si.edu/fuelcells/basics.htm>. [Accessed 19 Fevereiro 2018].
- [19] GlobalSpec, "Microturbines Information," Engineering 360 powered by IEEE GlobalSpec, [Online]. Available: https://www.globalspec.com/learnmore/electrical_electronic_components/power_generation_storage/microturbines. [Accessed 20 Fevereiro 2018].
- [20] WBDG, "Microturbines," Whole Building Design Guide, [Online]. Available: <https://www.wbdg.org/resources/microturbines>. [Accessed 20 Fevereiro 2018].
- [21] ESC - Energy Solutions Center, "Microturbines," Understanding CHP, [Online]. Available: <http://understandingchp.com/chp-applications-guide/4-2-microturbines/>. [Accessed 21 Fevereiro 2018].
- [22] Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, "Combined Heat and Power Basics," Energy Efficiency & Renewable Energy, [Online]. Available: <https://energy.gov/eere/amo/combined-heat-and-power-basics>. [Accessed 21 Fevereiro 2018].
- [23] NSC USA, "Trigeneration," NSC USA Inc., [Online]. Available: <http://www.nscusa.com/CHP/pmiTriGeneration.aspx>. [Accessed 21 Fevereiro 2018].
- [24] M. Bates, "How Does a Battery Work?," MIT - School of Engineering, [Online]. Available: <https://engineering.mit.edu/engage/ask-an-engineer/how-does-a-battery-work/>. [Accessed 22

Fevereiro 2018].

- [25] R. Sebastián and R. Peña Alzola, "Flywheel energy storage systems: Review and simulation for an isolated wind power system," in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 9 ed., vol. 16, Madrid, Elsevier Ltd., 2012, pp. 6803-6813.
- [26] M. A. Awadallah and B. Venkatesh, "Energy Storage in Flywheels: An Overview," *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, IEEE*, vol. 38, 9 June 2015.
- [27] M. S. Halper and J. C. Ellenbogen, "Supercapacitors: A Brief Overview," March 2006. [Online]. Available:
http://www.tuks.nl/pdf/Reference_Material/Electrolytic_Caps_and_Super_Caps/Halper%20and%20Ellenbogen%20-%20Supercapacitors:%20A%20Brief%20Overview.pdf. [Accessed 6 May 2018].
- [28] G. Kariniotakis, R. Almeida, S. Busquet, C. Camez, K. Elmasidis, N. Gil, N. Hatziaargyriou, G. Iliadis, N. Jayawarna, N. Jenkins, F. Kanellos, G. Kariniotakis, J. Labbe, Z. Larrabe, X. Le Pivert, R. Metkemeyer, J. Oyarzabal, J. A. Peças Lopes, J. S. Pinto and A. Tsouchnikas, "Large Scale Integration of Micro-Generation to Low Voltage Grids: Digital Models for Micro Sources," in *Conference: CIGRE 2006, 41st Session Conference*, Paris, France, 2003.
- [29] F. Mohamed, "Microgrid modelling and simulation," Helsinki University of Technology Control Engineering Laboratory, Helsinki, 2006.
- [30] R. Castro, *Uma Introdução às Energias Renováveis: Eólica, Fotovoltaica e Mini-hídrica*, Lisboa: IST Press, 1ª Edição, 2011.
- [31] Suntech, "Evo Energy," [Online]. Available: <https://www.evoenergy.co.uk/wp-content/uploads/2012/05/Suntech-250-Datasheet.pdf>. [Accessed 19 Junho 2018].
- [32] C. L. Moreira and J. A. Peças Lopes, "MicroGrids Operation and Control under Emergency Conditions," in *Intelligent Automation and Soft Computing*, vol. 15, Porto, INESC, 2009, pp. 1-18.
- [33] C. Moreira, "Identification and Development of MicroGrids Emergency Control Procedures," Faculty of Engineering, University of Porto, Porto, 2008.
- [34] J. Smuts, "Control Notes," PID Controllers Explained, 7 Março 2011. [Online]. Available: <http://blog.opticontrols.com/archives/344>. [Accessed 7 Agosto 2018].
- [35] "PID controller," Wikipedia - The Free Encyclopedia, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller#Proportional. [Accessed 7 Agosto 2018].
- [36] Open Electrical, "Dq0 Transformation," [Online]. Available: https://wiki.openelectrical.org/index.php?title=Dq0_Transform. [Accessed 8 Agosto 2018].
- [37] A. Bidram and A. Davoudi, "Hierarchical Structure of Microgrids Control System," *Transactions*

on *Smart Grid, IEEE*, vol. 3, pp. 1963-1976, 18 May 2012.

- [38] N. A. Luu, Q.-T. Tran and S. Bacha, "Control strategies of a hybrid PV-diesel-battery system in different operation modes," in *Grenoble Conference, IEEE*, Grenoble, France, 2013.
- [39] A. Madureira, C. Moreira and J. Peças Lopes, *Secondary Load-Frequency Control for MicroGrids in Islanded Operation*, Porto: INESC Porto, 2015.
- [40] A. Madureira, "Definição de Estratégias de Controlo e Avaliação da Estabilidade em Redes de Baixa Tensão com Miro-Geração Funcionanado em Rede Isolada," Faculty of Engineering, University of Porto, Porto, 2005.

Anexo A - Implementação dos modelos em *Simulink*

Com o objetivo de clarificar a implementação dos modelos apresentam-se de seguida os esquemas, retirados diretamente da plataforma de simulação Simulink, das micro-fontes descritas no Capítulo 3. Em relação ao painel fotovoltaico, a sua interface Simulink é apresentada no decorrer da descrição do modelo, porém aqui pretende-se apresentar cada um dos subsistemas que o compõem. Como a referida interface mostra, o modelo é composto por 7 subsistemas:

- Catálogo PV (cujo esquema se considera irrelevante visto tratar-se apenas da introdução de constantes obtidas em catálogo);
- Cálculo dos 3 parâmetros;
- Cálculo de I_0 ;
- Cálculo de I_{cc} ;
- Cálculo da temperatura do módulo;
- Cálculo da tensão e corrente de saída do PV;
- Cálculo de V_t .

De seguida apresentam-se os esquemas de simulação dos subsistemas referidos.

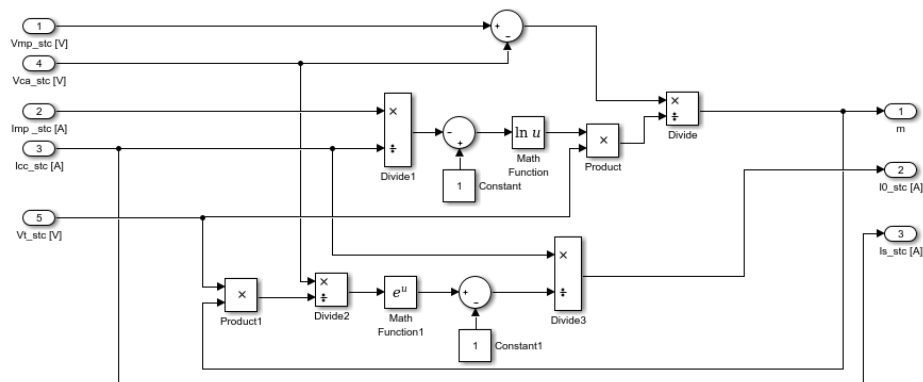


Figura 0.1 - Cálculo dos 3 parâmetros

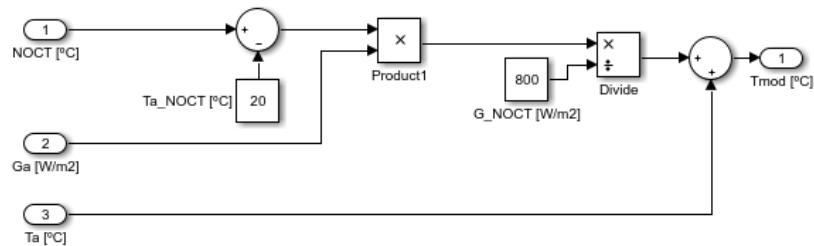


Figura 0.2 - Cálculo da temperatura do módulo

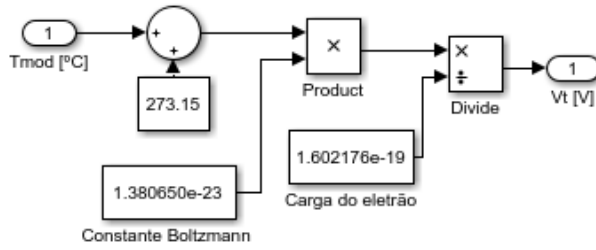


Figura 0.3 - Cálculo de V_t

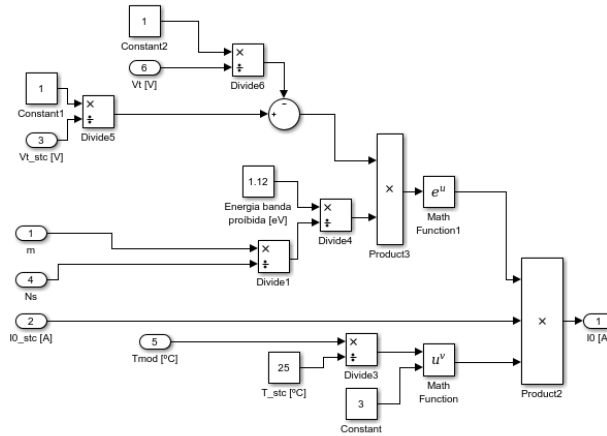


Figura 0.4 - Cálculo de I_0

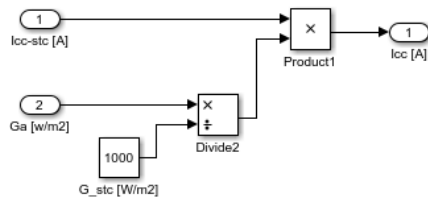


Figura 0.5 - Cálculo da Corrente de Curto-Circuito

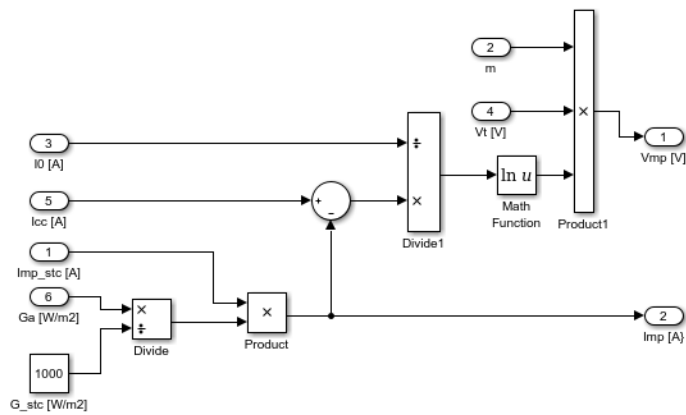


Figura 0.6 - Cálculo da tensão e da corrente de saída

Em relação à célula de combustível, a interface mostra que o modelo é composto por 3 subsistemas:

- Corrente da célula;
- Processador de combustível;
- Modelo dinâmico da célula.

De seguida apresentam-se os esquemas de simulação dos subsistemas referidos.

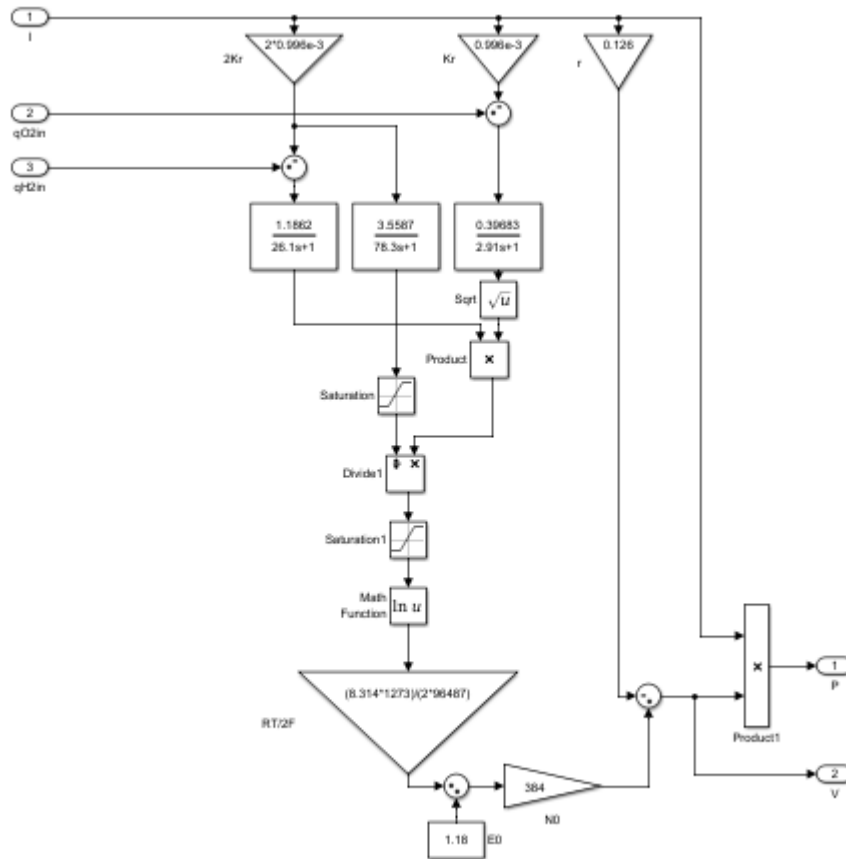


Figura 0.7 - Modelo dinâmico da célula

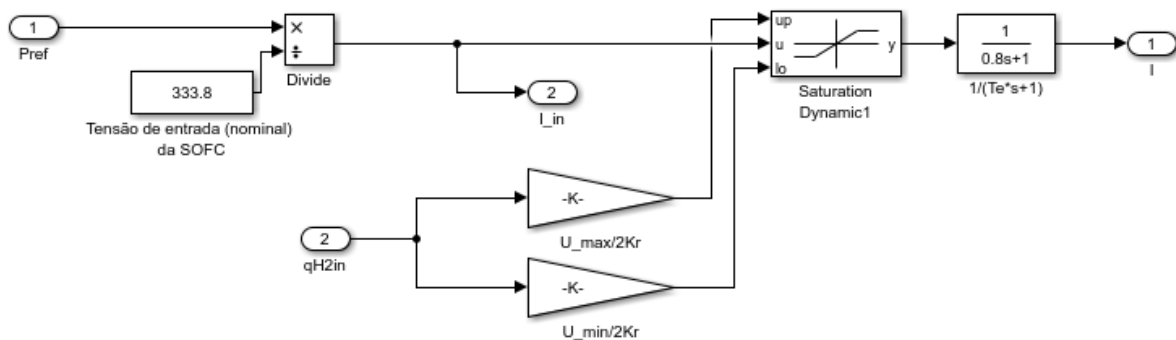


Figura 0.8 - Corrente da célula

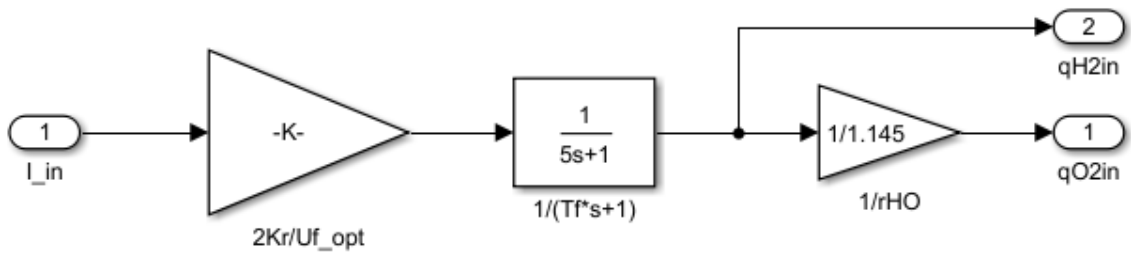


Figura 0.9 - Processador de Combustível

Anexo B - Dados das micro-fontes

Apresentam-se os valores utilizados para efeitos de simulação das variáveis características da cada uma das micro-fontes modeladas. Comece-se por apresentar os dados relativos à modelação do painel fotovoltaico e de seguida os dados relativos à modelação da célula de combustível.

Tabela 0.1 - Dados de simulação do painel fotovoltaico

Potência de pico [W]	250
Tensão de máxima potência [V]	30,7
Corrente de máxima potência [A]	8,15
Corrente de Curto-Circuito [A]	8,63
Tensão de Circuito Aberto [V]	37,4
Células em série	45
Constante de Boltzmann [J/K]	$1,3806503 \times 10^{-23}$
Carga do eletrão [C]	$1,602176 \times 10^{-23}$
Energia de banda proibida [eV]	1,12

Tabela 0.2 - Dados de simulação da célula de combustível

Temperatura absoluta [K]	1273
Constante de Faraday [C/mol]	96487
Constante universal dos gases [J/(kmolK)]	8314
Potencial Standard Ideal [V]	1,18
Número de células em série	384
Constante K_r [Kmol/(sA)]	$0,996 \times 10^{-6}$
Máxima utilização de combustível	0,9

Mínima utilização de combustível	0,8
Utilização de combustível ótima	0,85
Constante molar do hidrogénio [<i>kmol/(s · atm)</i>]	$8,43 \times 10^{-4}$
Constante molar da água [<i>kmol/(s · atm)</i>]	$2,81 \times 10^{-4}$
Constante molar do oxigénio [<i>kmol/(s · atm)</i>]	$2,52 \times 10^{-4}$
Constante de tempo do fluxo de hidrogénio [<i>s</i>]	26,1
Constante de tempo do fluxo de água [<i>s</i>]	78,3
Constante de tempo do fluxo de oxigénio [<i>s</i>]	2,91
Perdas óhmicas [<i>V</i>]	0,126
Constante de tempo elétrica [<i>s</i>]	0,8
Constante de tempo do processador de combustível [<i>s</i>]	5
Rácio entre hidrogénio e oxigénio	1,145