

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



# **Operação de micro-redes híbridas AC/DC**

**Filipe Pinto Ferreira Guerra Duarte**

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Clara Sofia Teixeira Gouveia Moura

Co-orientador: João Abel Peças Lopes

21 de Agosto de 2022



# Resumo

A pobreza energética em países subdesenvolvidos e a necessidade de aumentar a fiabilidade de sistemas de distribuição em edifícios como hospitais ou *Data centers* conduziu ao desenvolvimento de novas soluções de eletrificação com a capacidade de funcionar em modo autonomamente, isolados da rede principal de distribuição. Surge assim o conceito de micro-redes, que pode ser definido como um sistema flexível, com capacidade de coordenar a produção local, carga e outros recursos energéticos distribuídos para funcionar em modo interligado ou isolado. Este sistema não só aumenta a fiabilidade e resiliência do sistema como também contribui para a descarbonização, facilitando a integração de produção renovável e outros recursos energéticos distribuídos como os sistemas de armazenamento de energia e veículos elétricos.

Atualmente a grande maioria das micro-redes são estabelecidas em corrente alternada (CA), no entanto o desenvolvimento de cargas CC levou à necessidade de criar soluções alternativas de modo melhorar a eficiência e qualidade de onda, reduzindo também o número de conversores necessários. Surgem assim as micro-redes estabelecidas em corrente contínua (CC) e as micro-redes híbridas CA/CC.

Esta dissertação estuda os diferentes tipos de micro-rede e as suas topologias, em particular as micro-redes híbridas CA/CC, no que respeita as estratégias de controlo para a sua operação interligada à rede de distribuição e em modo isolado. Ao longo desta dissertação são apresentados métodos de controlo para micro-redes CA, CC e posteriormente para micro-redes híbridas, focando em particular no controlo do conversor de interligação, que desempenha uma função essencial para a coordenação micro-rede CC e a micro-rede CA que formam a micro-rede híbrida CA/CC.

Para a análise das diferentes estratégias de controlo, foram desenvolvidos modelos simplificados dos componentes da micro-rede, que permitem o estudo do comportamento dinâmico da micro-rede em modo isolado e em modo interligado.



# Abstract

Energy poverty in less developed countries and the need to increase the reliability of power supply in buildings like hospitals or data centres, has led to the development of new electrification solutions with the capacity of operating autonomously, islanded from the main distribution grid. Microgrids are one of these solutions, and it can be defined as a flexible system capable of coordinating local generation, load and other distributed energy resources to operate either interconnected to the main grid or in islanded mode. Microgrids not only improve the resilience and reliability of power supply but also contribute to the decarbonization of the energy system, facilitating the secure connection.

Micro-grids today are mainly established in alternated current (AC). However, the growing number of Direct current (DC) loads are leading to the identification of alternative topologies, namely DC and hybrid AC/DC, more efficient, reliable and with improved power quality, reducing at the same time the number of power converters required.

This dissertation presents the different microgrid topologies identified in the literature, and its power, control strategies for interconnected and islanded operation of AC, DC and hybrid AC/DC microgrids. For the hybrid microgrids, the work focused in the control of the interlink converter, which ensures the coordinated operation of the DC and AC microgrids. Microgrid simulation models were developed in this work to enable the analysis of the microgrid dynamic behaviour when operating interconnected and islanded, considering the different control strategies identified.



# Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer à orientadora Clara Sofia Gouveia pela disponibilidade mostrada, pelos desafios colocados ao longo destes meses na realização desta dissertação, pela ajuda dada sempre que necessário e de forma pedagógica e pelos recursos fornecidos para uma melhor realização desta dissertação.

Gostava também de agradecer ao professor Carlos Moreira por fornecer modelos de simulação utilizados noutras dissertações de modo a facilitar o entendimento do problema e da modelização em MatLAB/Simulink.

Agradeço também aos meus colegas de curso que durante estes 5 anos, presencialmente e à distância, me ajudaram não só no percurso académico mas que também me ajudaram a crescer a nível pessoal.

Gostava de agradecer aos meus amigos por me terem acompanhado durante este percurso, ajudando-me sempre que necessário independentemente da situação.

Por último, agradecer à minha família por tudo o que fez para eu chegar este momento, não só nestes 5 anos mas durante toda a minha vida.

Filipe Duarte



*“Freedom is nothing but a chance to be better.”*

Albert Camus



# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Motivação . . . . .	1
1.2	Objetivos da Dissertação . . . . .	2
1.3	Estrutura da Dissertação . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b>	<b>5</b>
2.1	Definição de micro-redes . . . . .	5
2.2	Componentes da micro-rede . . . . .	5
2.2.1	Geração . . . . .	5
2.2.2	Sistemas de armazenamento de energia . . . . .	6
2.2.3	Cargas . . . . .	7
2.3	Topologias de micro-redes . . . . .	8
2.3.1	Micro-redes CA . . . . .	8
2.3.2	Micro-redes CC . . . . .	8
2.3.3	Micro-redes híbridas CA/CC . . . . .	10
2.4	Análise crítica das diferentes topologias . . . . .	14
2.5	Conclusões . . . . .	15
<b>3</b>	<b>Estratégia de controlo para micro-redes híbridas</b>	<b>17</b>
3.1	Introdução . . . . .	17
3.2	Arquitetura de controlo de micro-redes . . . . .	17
3.3	Controlo de micro-redes CA . . . . .	20
3.3.1	Utilização de veículos elétricos para controlo local da frequência . . . . .	22
3.4	Controlo de micro-redes CC . . . . .	23
3.4.1	Utilização de veículos elétricos para controlo local de tensão . . . . .	25
3.5	Estratégias de controlo para micro-redes híbridas . . . . .	25
3.5.1	Estratégias de controlo para micro-redes híbridas a funcionar em modo interligado . . . . .	27
3.5.2	Estratégias de controlo para micro-redes híbridas a funcionar em modo isolado . . . . .	28
3.5.3	Estratégias de controlo para <i>interlink converters</i> . . . . .	28
3.6	Conclusões . . . . .	29
<b>4</b>	<b>Modelização de uma micro-rede híbrida CA/CC em MATLAB/Simulink</b>	<b>31</b>
4.1	Introdução . . . . .	31
4.2	Modelização de micro-rede CC . . . . .	32
4.2.1	Modelo PV . . . . .	32
4.2.2	Modelo do sistema de armazenamento de energia . . . . .	32

4.2.3	Veículos elétricos para suporte ao controlo primário da tensão CC . . . . .	34
4.2.4	Cargas . . . . .	35
4.2.5	Linhas . . . . .	35
4.3	Modelização de micro-rede CA . . . . .	36
4.3.1	Voltage Source Inverter (VSI) . . . . .	36
4.3.2	Inversores PQ . . . . .	37
4.3.3	Veículos elétricos para suporte ao controlo primário de frequência . . . . .	38
4.3.4	Cargas . . . . .	39
4.3.5	Linhas . . . . .	40
4.4	Modelização do <i>Interlinking converter</i> . . . . .	40
4.4.1	Modelização do IC apenas responsável por trânsito de potência entre o lado CA e CC com a potência de saída a ser despachada . . . . .	40
4.4.2	Modelização do IC responsável pelo controlo da tensão CC . . . . .	41
4.4.3	Modelização do IC responsável pelo controlo da tensão CA . . . . .	42
4.4.4	Modelização do IC responsável pelo controlo de frequência . . . . .	42
4.5	Conclusões . . . . .	43
<b>5</b>	<b>Simulação e resultados</b>	<b>45</b>
5.1	Introdução . . . . .	45
5.2	Simulação de micro-rede CC . . . . .	45
5.2.1	Cenários de teste e parametrização . . . . .	46
5.2.2	Simulações da micro-rede CC . . . . .	48
5.3	Simulação de micro-rede CA . . . . .	52
5.3.1	Cenários de teste e parametrização . . . . .	53
5.3.2	Simulações da micro-rede CA . . . . .	55
5.4	Simulação de micro-rede híbrida CA/CC . . . . .	57
5.4.1	Cenários de teste para o modo de operação interligado . . . . .	58
5.4.2	Cenário de teste para modo de Operação isolado . . . . .	59
5.4.3	Simulações das micro-redes híbridas em modo interligado . . . . .	61
5.4.4	Simulações das micro-redes híbridas em modo isolado . . . . .	64
5.5	Conclusões . . . . .	67
<b>6</b>	<b>Conclusões e Trabalho Futuro</b>	<b>69</b>
6.1	Sumário . . . . .	69
6.2	Satisfação dos Objectivos . . . . .	70
6.3	Trabalho Futuro . . . . .	70
<b>A</b>	<b>Micro-rede CC</b>	<b>71</b>
<b>B</b>	<b>Micro-rede CA</b>	<b>73</b>
<b>C</b>	<b>Micro-rede híbrida</b>	<b>75</b>
<b>D</b>	<b>Parameterização extra</b>	<b>77</b>
	<b>Referências</b>	<b>79</b>

# Lista de Figuras

2.1	Arquitetura micro-rede CA . . . . .	9
2.2	Arquitetura micro-rede CC com um barramento e sistema de armazenamento de energia diretamente ligados ao barramento comum . . . . .	9
2.3	Arquitetura micro-rede CC com um barramento e sistema de armazenamento de energia ligados ao barramento comum através de um conversor . . . . .	10
2.4	Arquitetura micro-rede CC bipolar com barramento comum . . . . .	10
2.5	Arquitetura micro-rede híbrida CA/CC . . . . .	11
2.6	Arquitetura micro-rede híbrida com CA acoplado parcialmente isolado . . . . .	12
2.7	Arquitetura micro-rede híbrida com CA acoplado completamente isolado . . . . .	12
2.8	Arquitetura micro-rede híbrida com CA desacoplado completamente isolado em duas etapas . . . . .	13
2.9	Arquitetura micro-rede híbrida com CA desacoplado parcialmente isolado em duas etapas . . . . .	13
2.10	Arquitetura micro-rede híbrida com CA desacoplado parcialmente isolado em três etapas . . . . .	13
3.1	Hierarquia de controlo de micro-redes . . . . .	18
3.2	Controlo centralizado . . . . .	19
3.3	Controlo distribuído . . . . .	20
3.4	Controlo descentralizado . . . . .	20
3.5	<i>Droop</i> P-f para micro-rede CA . . . . .	21
3.6	<i>Droop</i> Q-V para micro-rede CA . . . . .	21
3.7	Suporte ao controlo primário e controlo secundário da frequência utilizando veículos elétricos . . . . .	23
3.8	Curva do <i>Droop</i> para veículos elétricos . . . . .	23
3.9	<i>Droop</i> P-V para micro-rede CC . . . . .	24
3.10	Suporte ao controlo primário de tensão utilizando veículos elétricos . . . . .	25
3.11	Curva do <i>Droop</i> para veículos elétricos . . . . .	26
3.12	Controlo de micro-redes híbridas . . . . .	27
4.1	Modelo simulink de painel fotovoltaico . . . . .	32
4.2	Modelo simulink do sistema de armazenamento de energia . . . . .	33
4.3	<i>Droop</i> P-V para micro-rede CC . . . . .	34
4.4	<i>Droop</i> P-V para suporte ao controlo primário da tensão CC . . . . .	34
4.5	Modelo Simulink para VE para suporte ao controlo primário e com controlo secundário da tensão CC . . . . .	35
4.6	Modelo simulink das cargas CC . . . . .	35
4.7	Modelo simulink das linhas CC . . . . .	36

4.8	Função de transferência do VSI . . . . .	37
4.9	Modelo simulink do VSI . . . . .	37
4.10	Modelo simulink do PQ Inverter . . . . .	38
4.11	<i>Droop</i> P-f para suporte ao controlo primário da frequência . . . . .	38
4.12	Modelo Simulink para VE para suporte de controlo primário de frequência e controlo secundário . . . . .	39
4.13	Modelo simulink das cargas CA . . . . .	39
4.14	Modelo Simulink de linhas CA . . . . .	40
4.15	Modelo Simulink do IC . . . . .	41
4.16	Modelo Simulink do IC . . . . .	41
4.17	Modelo Simulink do IC . . . . .	42
4.18	Modelo Simulink do IC . . . . .	43
5.1	Circuito CC utilizado na simulação 1 . . . . .	46
5.2	Circuito CC utilizado na simulação 2 . . . . .	46
5.3	Circuito CC utilizado nas simulações 3 e 4 . . . . .	46
5.4	Tensão no módulo PV, bateria e carga - Simulação 1 . . . . .	49
5.5	Potência no módulo PV, bateria e carga - Simulação 1 . . . . .	49
5.6	Potência fornecida pelas baterias - Simulação 2 . . . . .	49
5.7	Tensão na carga sem existência de veículos elétricos - Simulação 3 . . . . .	50
5.8	Tensão na carga e no VE com existência de veículos elétricos - Simulação 3 . . . . .	50
5.9	Potência transmitida pelos VE - Simulação 3 . . . . .	51
5.10	Tensão no VE - Simulação 4 . . . . .	51
5.11	Potência transmitida pelos VE e pela bateria - Simulação 4 . . . . .	52
5.12	Tensão no VE - Simulação 4 . . . . .	52
5.13	Potência transmitida pelos VE e pela bateria - Simulação 4 . . . . .	52
5.14	Diagrama unifilar da micro-rede CA . . . . .	53
5.15	Tensão no barramento 3 da micro-rede CA - Simulação 5 . . . . .	55
5.16	Tensão no barramento 3 da micro-rede CA - Simulação 6 . . . . .	56
5.17	Frequência da rede - Simulação 6 . . . . .	56
5.18	Potência transferida pelo VSI - Simulação 6 . . . . .	56
5.19	Frequência da rede - Simulação 7 . . . . .	57
5.20	Diagrama unifilar da micro-rede híbrida CA/CC utilizado . . . . .	57
5.21	Frequência da rede CA - Simulação 8 . . . . .	61
5.22	Potência ativa transferida no IC e fornecida pela rede principal - Simulação 8 . . . . .	62
5.23	Potência reativa fornecida pela rede principal - Simulação 8 . . . . .	62
5.24	Tensão CC no IC - Simulação 8 . . . . .	62
5.25	Potência ativa transferida no IC - Simulação 9 . . . . .	63
5.26	Tensão CC no IC - Simulação 9 . . . . .	63
5.27	Tensão CA no IC - Simulação 9 . . . . .	63
5.28	Tensão CA no IC - Simulação 10 . . . . .	64
5.29	Frequência da rede - Simulação 11 . . . . .	64
5.30	Potência ativa transferida no IC - Simulação 11 . . . . .	65
5.31	Tensão CA no IC - Simulação 11 . . . . .	65
5.32	Tensão CC no IC - Simulação 11 . . . . .	65
5.33	Tensão CA no IC - Simulação 12 . . . . .	66
5.34	Frequência da rede - Simulação 13 . . . . .	67
5.35	Potência ativa transferida no IC - Simulação 13 . . . . .	67

A.1	Modelo MatLab/simulink utilizado na simulação 1 . . . . .	71
A.2	Modelo MatLab/simulink utilizado na simulação 2 . . . . .	71
A.3	Modelo MatLab/simulink utilizado nas simulações 3 e 4 . . . . .	72
B.1	Modelo MatLab/simulink para micro-rede CA . . . . .	73
C.1	Modelo MatLab/simulink para micro-rede híbrida CA/CC . . . . .	75



# Lista de Tabelas

2.1	Vantagens e desvantagens de micro-redes CA e CC . . . . .	14
5.1	<i>Droops</i> nas baterias . . . . .	46
5.2	Parâmetros para simulação 1 . . . . .	47
5.3	Parâmetros para simulação 2 . . . . .	47
5.4	Parâmetros para simulação 3 . . . . .	48
5.5	Parâmetros para simulação 3 . . . . .	48
5.6	Parâmetros para simulação 4 . . . . .	48
5.7	Parâmetros das cargas utilizadas na simulação CA . . . . .	53
5.8	Parâmetros para simulação 5 . . . . .	54
5.9	Parâmetros para simulação 6 . . . . .	54
5.10	Parâmetros para simulação 7 . . . . .	54
5.11	Parâmetros para simulação 8 . . . . .	58
5.12	Parâmetros para simulação 9 . . . . .	59
5.13	Parâmetros para simulação 10 . . . . .	59
5.14	Parâmetros para simulação 11 . . . . .	60
5.15	Parâmetros para simulação 12 . . . . .	60
5.16	Parâmetros para simulação 13 . . . . .	61
D.1	Parâmetros utilizados na simulação CC . . . . .	77
D.2	Parâmetros das linhas CA . . . . .	77
D.3	Ganhos VSI . . . . .	77
D.4	Curva característica para EV do lado CC . . . . .	77
D.5	<i>Droops</i> nas baterias para simulações CC . . . . .	78
D.6	Curva característica para VE do lado CA . . . . .	78



# Abreviaturas e Símbolos

CA	Corrente alternada
PAC	Ponto de interligação comum
RED	Recursos de energia distribuída
CC	Corrente contínua
BT	Baixa tensão
MT	Média tensão
SST	Solid state transformers
EMS	Energy management system
ORD	Operador de rede de distribuição
VSI	Inversor de fonte de tensão
IC	Conversor de interligação
PV	fotovoltaico
MPPT	Maximum power point tracking



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Motivação

A crescente necessidade de descarbonização do setor energético tem levado a uma crescente integração de produção renovável, principalmente através da produção eólica, hídrica, fotovoltaica e de bioenergia [1]. O aumento da dependência de energia que tem ocorrido nas últimas décadas leva a ser necessário encontrar soluções de produção e distribuição de energia mais fiáveis e que garantam com sucesso a entrega de energia com qualidade aos clientes. Surge assim o conceito de micro-redes, que segundo [2], podem ser definidas por um sistema de distribuição de energia que interliga cargas, fontes de geração renovável ou não renovável e sistemas de armazenamento de energia, e que em caso de necessidade podem ser desacopladas da rede principal, funcionando em modo interligado com a rede principal ou em modo isolado.

As micro-redes têm várias vantagens que levam a que sejam cada vez mais incorporadas em redes principais de distribuição, nomeadamente:

- Capacidade de funcionar autonomamente da rede principal em caso de meteorologia extrema, ciber-ataques à rede de comunicação ou interrupções em cascata [3];
- Integração de energia renovável e com poucos impactos ambientais [3];
- Controlo de tensão, potência reativa e frequência [3];
- Diminuição de perdas nas linhas de transmissão [3].

As primeiras micro-redes foram implementadas em *campus* de universidades, devido à proximidade dos edifícios no campus, um consumo de energia diário bem definido e relativamente constante e o facto de muito destes campus terem historicamente uma planta que permite fornecer vapor para produzir calor, permitindo que esta central de vapor seja também utilizada para produção distribuída. Na universidade do Texas está presente uma das maiores micro-redes americanas que consegue fornecer ao campus todas as suas necessidades de potência, aquecimento e arrefecimento, enquanto a micro-rede da universidade da Califórnia- San Diego (UCSD) produz 92% da energia necessária para o funcionamento do campus [4].

A *Siemens campus microgrid* é uma micro-rede desenvolvida numa zona residencial de Viena, sendo composta por um parque solar de 1600 metros quadrados com uma potência de pico de 312 kWp, uma unidade de armazenamento de baterias com capacidade de 500 kWh, estações de carregamento de veículos elétricos e um sistema de controlo para a micro-rede. Com esta micro-rede foi possível otimizar a produção de eletricidade e aquecimento residencial em Floridsdorf [5].

Um dos setores que tem requerido cada vez mais energia é nos Data Center. Com grande parte das empresas a colocar os seus sistemas informáticos em *Data centres* é necessário aumentar a sua eficiência energética. Também desastres climáticos podem afetar a entrega de potência pela rede principal, o que pode levar a uma falha na alimentação desta data centres. Sendo assim, são utilizadas micro-redes para os alimentar, permitindo uma maior independência energética e uma redução no número de *blackouts* [6].

Outra utilização das micro-redes num futuro em curto prazo será em ambientes hospitalares. Devido ao elevado consumo de energia por parte de um hospital é criada uma exposição ainda maior ao risco de falhas na rede. Devido ao caráter crítico de instituições como hospitais, é necessário encontrar uma solução que garanta a continuidade no fornecimento de energia. As micro-redes são assim soluções ideais pois permitem alimentar hospitais em casos de falha na rede durante semanas, garantindo-lhes assim independência energética [7].

O aumento do número de cargas CC e de métodos de geração que produzem corrente DC levou a que estas micro-redes não pudessem ser apenas CA, havendo a necessidade de hibridização destas redes. As vantagens do uso de micro-redes híbridas são expostas no capítulo 2.5.

## 1.2 Objetivos da Dissertação

Esta dissertação tem como principal objetivo o estudo e simulação através de MatLab/Simulink de estratégias de controlo para estas micro-redes, com foco especial no conversor de interligação que liga os barramentos CA e CC da micro-rede híbrida.

Nesta dissertação foram propostas e alcançados vários objetivos como:

1. Caracterização das diferentes topologias da micro-rede, em particular as micro-redes híbridas CA/CC
2. Identificar as estratégias de controlo em modo interligado e isolado
3. Modelizar micro-redes CA, CC e CA/CC em MatLAB/Simulink, e estudar o impacto das diferentes estratégias de controlo nas micro-redes CA, CC e híbridas.

## 1.3 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação é composta por capítulos. Neste primeiro capítulo é exposta a motivação que levou à realização desta dissertação, os objetivos e a sua estrutura.

No segundo capítulo, ou estado de arte, é exposta informação sobre o tema em questão, neste caso, micro-redes híbridas. São abordados assim os componentes essenciais para o bom funcionamento da micro-rede, modos de operação existente, tipos e arquiteturas de micro-redes.

No terceiro capítulo são abordados os diferentes métodos de controlo de micro-redes. Numa fase inicial são abordadas as arquiteturas e hierarquias de controlo da micro-rede. Posteriormente são abordados pontos relevantes para o controlo de micro-redes CC, CA e híbridas.

No quarto capítulo são apresentados os modelos utilizados em MatLAB/Simulink bem como a sua formulação.

No quinto capítulo são apresentadas as simulações a realizar, bem como o resultado destas, com respetivas análises.

No sexto capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho realizado bem como possíveis trabalhos futuros e evoluções nesta área.



## Capítulo 2

# Revisão Bibliográfica

### 2.1 Definição de micro-redes

De acordo com [2] o conceito de micro-redes pode ser definido como um sistema de distribuição de energia que interliga cargas, Recursos Energéticos Distribuídos (RED) como produção baseadas em fontes renováveis ou de baixo carbono, sistemas de armazenamento de energia e ou outras cargas controláveis (como os veículos elétricos), podendo ser operadas de um modo controlado e coordenado estando conectadas à rede principal ou a funcionar em modo isolado.

De acordo com o departamento de energia do Estados Unidos da América e com o *Microgrid Exchange Group* [8], micro-redes são um conjunto de cargas interligadas e de grupos de unidades de geração distribuída com limites elétricos bem definidos que funcionam como apenas uma entidade no que diz respeito ao controlo pela rede. Pode conectar-se e desconectar-se da rede principal, podendo assim funcionar interligada ou isolada da rede.

Uma micro-rede é assim capaz de operar em modo isolado ou interligado à rede de distribuição, através de um ponto único de acoplamento (PCC - *Point of Common Coupling*) [9]. Em caso de falha da rede a montante, a rede tem capacidade de isolar-se automaticamente e operar em modo ilha ou isolado [10].

### 2.2 Componentes da micro-rede

#### 2.2.1 Geração

Os RED de geração normalmente utilizados em micro-redes variam entre painéis fotovoltaicos, geradores eólicos, células de produção de energia usando biogás, geradores a gás e *fuel cells* que apesar das muitas emissões para a atmosfera é necessário para compensar a procura de energia na micro-rede aquando funcionamento isolado se a produção nos RED de geração renováveis for insuficiente [11].

Os RED escolhidos para certa micro-rede dependem da aplicação, visto dependerem de muitos fatores como o modo de operação preferencial, da micro-rede, a arquitetura da mesma ou a disponibilidade do recurso [9].

Segundo [9], poderá haver a necessidade das RED escolhidas estarem ligadas a conversores CC-CA consoante a topologia da rede a alimentar (CA ou CC) ou o tipo de energia produzida por esse RED. O uso de energia fotovoltaica ou de *fuel cells* produz energia CC, o que pode levar à necessidade de existirem conversores de potência CC-CA que permitam a a conexão do RED à rede. Por outro lado, o RED seja eólico, é necessário a existência de um conversor de potência CA/CC caso as cargas a alimentar sejam CC, como por exemplo num sistema de armazenamento de energia. Também é necessário o uso de conversores de modo a tornar estes RED compatíveis com a rede, corrigindo a sua frequência, tensão nominal ou fator de potência.

Geradores com velocidade variável (ao contrário de alguns geradores convencionais que podem ser conectados diretamente à micro-rede operando a 50/60 Hz) como por exemplo turbinas eólicas e microturbinas de alta velocidade necessitam do uso de conversores CA/CA para a sua frequência e tensão ser adequada para a rede [9].

Os RED podem também ser categorizados através da sua possibilidade de despacho. Unidades que possam ser despachadas como *fuel cells* podem ser controladas. Por outro lado, unidades intermitentes como turbinas eólicas ou painéis solares não são despacháveis e são assim operados sempre para extraírem o máximo de potência possível [9].

Em [12] foram abordadas algumas tecnologias de geração utilizados em micro-redes. As micro-turbinas são compostas por um gerador e uma pequena turbina de gás, sendo capazes de produzir entre 30 a 100kW. No entanto são relativamente pouco eficientes, com apenas 20 a 30% de eficiência (no entanto o recurso à cogeração pode elevar esta eficiência para valores entre os 70 e 80%). O uso da cogeração permite assim às micro-turbinas produção de energia local a um preço competitivo comparado com o custo de produção sem o recurso à cogeração.

*Fuel cells* são outro método não totalmente renovável, dependendo do seu combustível, de produção de energia utilizado em micro-redes, tendo uma eficiência entre os 35 e os 55% (valores que podem ser aumentados com recurso à cogeração). No entanto para o uso de *fuel cells* é necessário o uso de compostos não renováveis como ácido fosfórico ou carbonato fundido.

O uso de painéis fotovoltaicos é um dos principais meios de produção de energia renovável numa micro-rede, pois ao contrário da produção eólica ou hídrica, permite, usando energia solar para produzir corrente CC. No entanto é uma fonte de energia bastante intermitente e que pode ocupar bastante espaço, visto o número de módulos PV a ser utilizado depender da intensidade da luminosidade. No entanto é um método de produção de energia fiável e sem emissões.

A geração eólica é outro método de produção de energia renovável numa micro-rede, sendo capaz de produzir entre 700kW e 1.5MW. No entanto é também um método bastante intermitente e dispendioso, sendo que a energia produzida em excesso tem de ser armazenada para uso posterior.

### 2.2.2 Sistemas de armazenamento de energia

O uso de sistemas de armazenamento de energia permite a integração da geração renovável, essencial ao conceito de micro-redes. Devido à sua intermitência, a presença de sistemas de armazenamento de energia permite que caso a produção de energia não seja suficiente para alimentar a rede não existam problemas devido à potência consumida ser superior à capacidade de fornecer

potência da micro-rede. Os sistemas de armazenamento de energia são responsáveis assim por responder a diferenças temporárias entre a capacidade de produção e o consumo, seja através do fornecimento ou da absorção de energia. São assim um dos elementos principais da micro-rede, conferindo controlabilidade à rede [9]. A presença destes sistemas torna assim o sistema mais facilmente despachável pois é retirada importância à intermitência dos RED renováveis [9].

Os sistemas de armazenamento de energia usados em micro-redes são, segundo [9], baterias (*Battery energy storage system*, BESS), supercondensadores, sistemas de ar comprimido (*Compressed air energy storage*, CAES), *flywheels* (armazenamento de energia através da energia cinética de rotação), sistemas térmicos, supercondutores (*Superconducting magnetic energy storage*, SMES), tecnologias *vehicle to grid* (V2G) e armazenamento através de energia térmica.

O desenvolvimento tecnológico nos sistemas de armazenamento de energia tem permitido aumentar a fiabilidade das micro-redes. De acordo com [12] baterias de lítio são o método tradicional de armazenamento de energia sendo que possuem diferentes tempos de vida e uma alta densidade de energia. Muitas destas baterias são atualmente recicláveis sendo possível reutilizar parte do lítio existente, reduzindo custos e a quantidade de matérias-primas usadas.

Os volantes de inércia (*Flywheels*) são sistemas que são capazes de transformar energia cinética rotativa armazenada em energia elétrica, usando circuitos magnéticos e eletrônica de potência avançada. A quantidade de potência armazenada é proporcional à velocidade de rotação, sendo que é extremamente dispendioso a manutenção de uma velocidade alta e por sua vez de armazenamento de energia. O custo de produção de um *flywheel* é também significativamente alto sendo que a energia pode ser descarregada a uma potência alta durante um curto período de tempo ou mais suavemente durante períodos mais extensos.

Os supercondutores são materiais que permitem a passagem de corrente elétrica sem que existam perdas. Sendo assim a energia elétrica é armazenada na forma de um campo magnético, criado pelo corrente que circula por estes supercondutores. No entanto estes materiais são caros, sendo que este método de armazenamento de energia é bastante dispendioso. Por último os supercondensadores são condensadores com uma capacidade muito elevada que armazenam energia sobre a forma de uma carga electrostática. O aumento da área da superfície dos elétrodos leva a um aumento da capacidade de armazenamento de energia.

### 2.2.3 Cargas

As cargas utilizadas podem ser CA ou CC, sendo esta a principal razão da utilização de micro-redes híbridas, de modo a diminuir a quantidade de conversões. Sistemas de refrigeração e de ar condicionado convencionais por exemplo são consideradas cargas CA enquanto carros elétricos e cargas eletrônicas são consideradas cargas CC. O aumento no uso de cargas CC levou a que as micro-redes CC e principalmente as micro-redes híbridas tenham sido cada vez mais investigadas e desenvolvidas ao longo da última década [13].

Um dos grandes problemas das micro-redes quando funcionam isoladamente acontece quando a produção de energia não é suficiente para alimentar toda a micro-rede. Nestes casos recorre-se aos sistemas de armazenamento de energia apresentados anteriormente. No entanto, caso estes

estejam descarregados tem de se recorrer ao *load shedding*, isto é apenas alimentar algumas cargas, consideradas críticas [14].

Para escolher que cargas podem ser desligadas, foram categorizadas em [15] em 3 categorias. As cargas críticas, como por exemplo hospitais não podem ser desligadas em qualquer momento. O segundo tipo de cargas são cargas que podem ser desligadas temporariamente de modo a reduzir picos, mas têm de voltar a ser ligadas passado pouco tempo, como por exemplo ar condicionados, ventilação ou aquecimento. Por último existem as cargas que só podem ser desligadas em casos de emergência para proteger a estabilidade da micro-rede e evitar apagões. Exemplos deste tipo de cargas são edifícios comerciais e residenciais.

## 2.3 Topologias de micro-redes

As micro-redes podem ser do tipo CA, CC ou híbridas CA/CC [16].

Devido à possibilidade do uso de transformadores, facilitando as alterações de tensões, ao menor custo de produção de energia CA em relação à energia CC e à capacidade de transmissão de maiores quantidades de energia grande parte das redes existentes atualmente são do tipo CA [13].

No entanto, com o aparecimento de cargas CC, devido às menores perdas nas linhas de transmissão neste tipo de rede e ao facto da produção de energia em alguns elementos de geração ser em CC, começou-se a identificar algumas vantagens para este uso de redes [13]. Surgem assim as redes híbridas que conjugam as vantagens das redes CA e CC [16].

### 2.3.1 Micro-redes CA

Em micro-redes CA, todas as cargas, sistemas de armazenamento de energia e RED's estão conectados a um barramento comum CA. Unidades de geração CC como *fuel cells* ou painéis solares, cargas CC e sistemas de armazenamento de energia estão conectados a este barramento através de conversores CC-CA [17]. Um exemplo de arquitetura para uma micro-rede CA é apresentado na figura 2.1.

### 2.3.2 Micro-redes CC

Existem 3 topologias de micro-redes CC, com um barramento CC comum, com vários barramentos CC ou com uma topologia reconfigurável [18].

O aumento do número de barramentos na micro-rede permite definir um maior número de níveis de tensão, aumentando a flexibilidade da rede. Também começam a ser estudadas micro-redes CC com topologia reconfigurável, muita vez através de um anel. Como as cargas podem ser alimentadas bidireccionalmente, em caso de falha na rede, o uso de interruptores eletrónicos inteligentes (*Intelligent electronic switches*) permite que a rede possa ser reconfigurada, aumentando a fiabilidade da rede [18].



Esta coordenação pode ser realizada através da ligação de um conversor à bateria, permitindo uma maior flexibilidade no controlo da micro-rede (figura 2.3) [18].

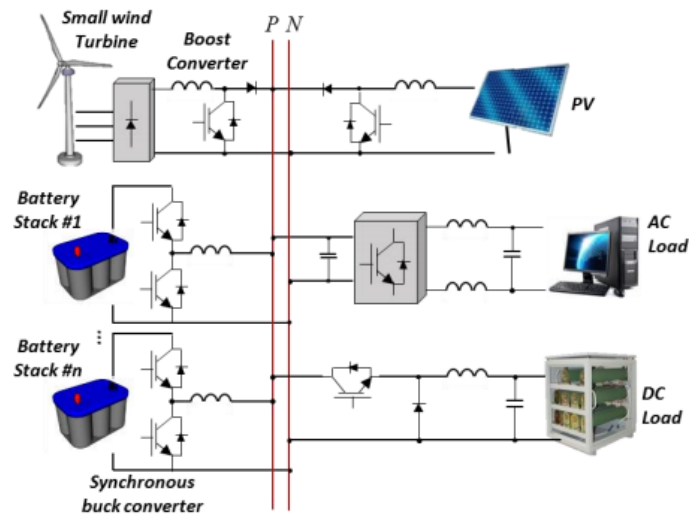


Figura 2.3: Arquitetura micro-rede CC com um barramento e sistema de armazenamento de energia ligados ao barramento comum através de um conversor [18]

O aumento do número de baterias usado pode aumentar também a fiabilidade da rede. No entanto isto levaria a problemas como a necessidade de um design cuidadoso do circuito e parâmetros de controlo, devido à redução da capacitância equivalente do barramento CC no caso de uso de múltiplas baterias. De modo a resolver este problema foi proposta uma topologia bipolar, apresentada na figura 2.4. Neste exemplo, o barramento pode operar a +170 V ou -170 V, sendo que os conversores CC-CC têm a possibilidade de escolherem se querem ser alimentados com 170 V, -170 V ou 340 V. Assim, a fiabilidade do sistema aumenta no caso de falha de uma linha, sendo possível a alimentação das cargas através da outra linha (figura 2.4) [18].

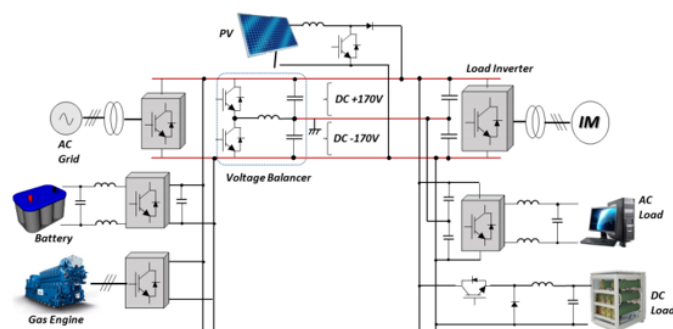


Figura 2.4: Arquitetura micro-rede CC bipolar com barramento comum [18]

### 2.3.3 Micro-redes híbridas CA/CC

As micro-redes híbridas CA/CC consistem em duas micro-redes, uma CA e uma CC, ligadas entre si através de um inversor (*interface converter* ou IC) que interliga as duas sub-redes e que

permite controlar o fluxo de potência entre as duas sub-redes [14].

A produção CC (como a produção solar), os veículos elétricos, as baterias e as cargas CC poderão ser interligadas à sub-rede CC, enquanto geradores de potência CA, *flywheels*, turbinas eólicas e cargas CA são conectadas ao barramento CA. Cargas CA com motores com controle de velocidade podem também ser ligadas ao barramento CC através do uso de um conversor CA/CC [13], como apresentado na figura 2.5.

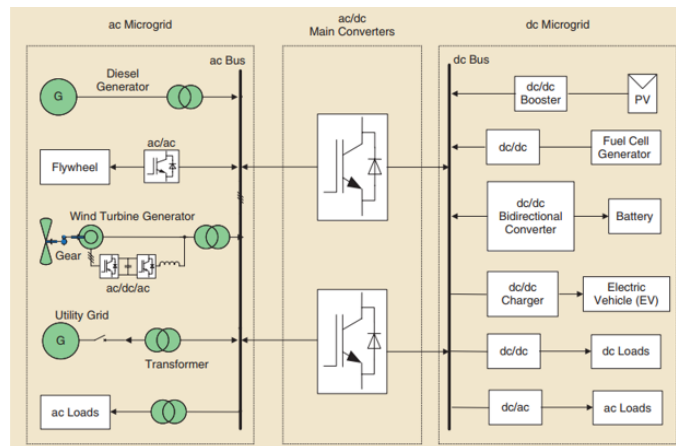


Figura 2.5: Arquitetura micro-rede híbrida CA/CC [13]

As micro-redes híbridas podem ser divididas entre micro-redes híbridas com CA acoplado ou com CA desacoplado. [19].

Nas micro-redes híbridas com CA acoplado, a sub-rede CA é interligada com a rede principal através de um transformador, enquanto as micro-redes híbridas com CA desacoplado possuem pelo menos uma etapa de conversão CA/CC e CC/CA, sendo que a sub-rede CA não está assim diretamente interligada com a rede principal.

### 2.3.3.1 Micro-redes híbrida com CA acoplado

Nas micro-redes híbridas com CA acoplado, a sub-rede CA está diretamente ligada à rede principal através de um transformador. Este tipo de micro-redes apresentam menor custo que as micro-redes híbridas com CA desacoplado, para além de permitir que a sub-rede CA esteja conectada diretamente à rede principal através de um transformador [19].

Existem dois tipos de micro-redes híbridas com CA acoplado, uma configuração parcialmente isolada e uma totalmente isolada [19].

No caso de micro-redes híbridas com CA acoplado parcialmente isolado, o conversor CA/CC está diretamente ligado à rede principal em vez de ser colocado após o transformador, permitindo que a potência nominal do transformador seja mais baixa que no caso seguinte, apesar de só existir isolamento galvânico no lado CA. Estas micro-redes necessitam de menos manutenção, têm um custo baixo, são fiáveis mas respondem com menos facilidade a uma falha e é mais difícil controlar o trânsito de potências entre o lado CA e o lado CC do que numa rede com CA desacoplado (figura 2.6) [19].

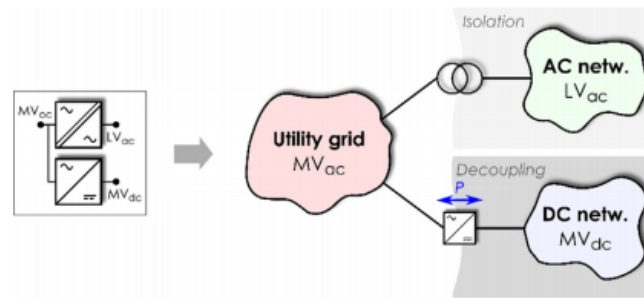


Figura 2.6: Arquitetura micro-rede híbrida com CA acoplado parcialmente isolado [19]

No caso de micro-redes híbridas com CA acoplado totalmente isolado, o transformador está localizado no ponto de conexão entre a rede principal e a micro-rede, permitindo assim isolamento galvânico a toda a micro-rede, reduzindo também o nível da tensão, permitindo que a micro-rede funcione também em BT. Tal como as micro-redes híbridas com CA isoladas parcialmente, o seu custo é relativamente baixo e necessitam de pouca manutenção, tendo, no entanto, o mesmo defeito em relação às micro-redes híbridas com CA desacoplado (figura 2.7) [19].

Este tipo de arquitetura de micro-redes híbridas é utilizada nas simulações apresentadas no capítulo 5.

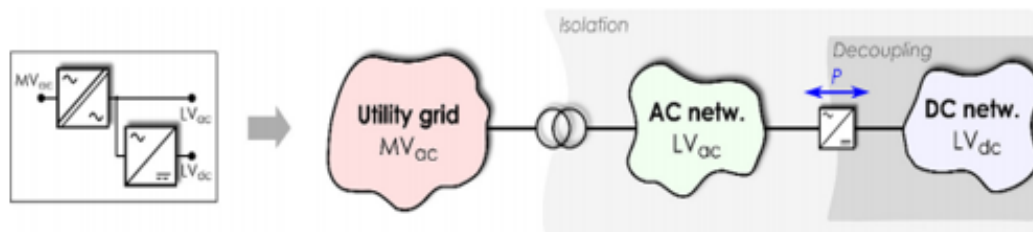


Figura 2.7: Arquitetura micro-rede híbrida com CA acoplado completamente isolado [19]

### 2.3.3.2 Micro-redes híbridas com CA desacoplado

Neste tipo de arquitetura, a sub-rede CA não está diretamente conectada com a rede principal, permitindo um melhor isolamento de defeitos e um controlo mais independente das duas sub-redes. Para o desenvolvimento deste tipo de arquitetura, são usados SST's (*Solid state transformers*), que permitem substituir os atuais transformadores, devido à sua capacidade de controlar o fluxo de potência [19].

Foram assim identificadas três configurações para micro-redes híbridas CA/CC com CA desacoplado, dependentes da localização do SST (*Solid state transformer* e dos estados da conversão [19].

Na configuração com CA desacoplada completamente isolado em duas etapas (figura 2.8), apresentada na figura abaixo, o transformador está localizado no *input* do SST. Esta configuração garante assim isolamento galvânico a toda a micro-rede. Nesta configuração existe maior controlo do trânsito de potências entre o lado CC e o lado CA e uma maior capacidade de resposta caso

exista um defeito. No entanto, o volume ocupado, o custo e a manutenção necessária é superior às configurações apresentadas anteriormente [19].

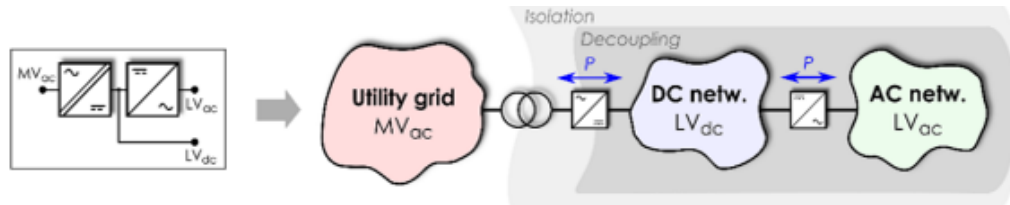


Figura 2.8: Arquitetura micro-rede híbrida com CA desacoplado completamente isolado em duas etapas [19]

Na configuração CA desacoplado parcialmente isolado em duas etapas, o transformador é colocado na sub-rede CA BT (LV<sub>ac</sub>), garantindo isolamento apenas do lado CA. Tal como na configuração anterior, o controlo do trânsito de potências entre o lado CC e o lado CA é mais acessível e existe uma maior capacidade de resposta no caso de existência de um defeito, sendo que o custo é superior em relação às configurações anteriores sendo necessário realizar mais manutenção nesta configuração do que nas configuração com CA acoplado (figura 2.9) [19].

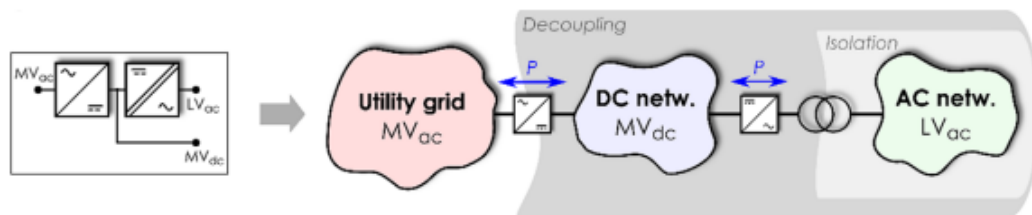


Figura 2.9: Arquitetura micro-rede híbrida com CA desacoplado parcialmente isolado em duas etapas [19]

Nesta última configuração, com CA desacoplado parcialmente isolado em três etapas (figura 2.10), é realizada uma conversão CC-CC, onde um transformador de alta frequência é instalado. Sendo assim, as sub-redes CA de BT e CC de BT estão galvanicamente isoladas, existindo também um barramento CC de MT, não isolado galvanicamente. O custo, volume ocupado e necessidade de manutenção são desvantagens deste tipo de arquitetura [19].

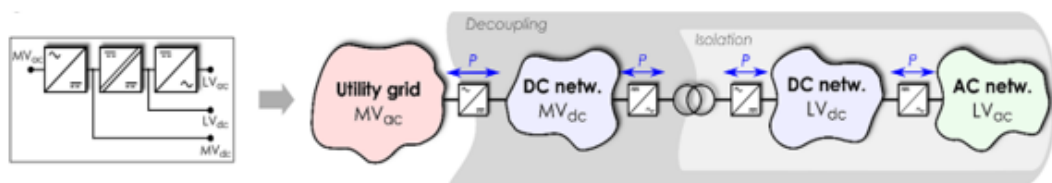


Figura 2.10: Arquitetura micro-rede híbrida com CA desacoplado parcialmente isolado em três etapas [19]

## 2.4 Análise crítica das diferentes topologias

As micro-redes CA são a configuração mais usada de micro-redes pois permite que as unidades de geração distribuídas existentes na rede principal sejam usadas na micro-rede com o mínimo de alterações possíveis. Para além disso existe um conjunto de proteções já foi desenvolvido para redes CA, ao contrário de redes CC [19].

No entanto o uso de micro-redes CA leva à necessidade da sincronização dos RED, para além da existência de circulação de potência reativa na rede, aumentando também as perdas de energia nos condutores. Também o aumento de cargas e de geradores CC leva à necessidade do aumento do uso de conversores, o que torna o controlo da micro-rede mais complexo [19].

O desenvolvimento de cargas, sistemas de armazenamento de energia e de geradores CC levou à necessidade de criação de algumas micro-redes CC. Esta topologia reduz o número de conversores utilizados na rede, anula a circulação de potência reativa e a necessidade de sincronização dos RED. No entanto, há ainda muitos poucos estudos sobre proteções para redes CC, o que reduz a fiabilidade da rede, para além de que esta topologia obriga a uma grande modificação da rede principal, visto esta ter sido desenvolvida para trabalhar em CA. Esta topologia torna também mais complexo o uso de transformadores e causa problemas devido à falta de normalização das tensões CC das cargas e dos inversores [19].

Na tabela 2.1 são apresentadas as vantagens e desvantagens das micro-redes CA e CC:

Tabela 2.1: Vantagens e desvantagens de micro-redes CA e CC

	Micro-rede CA	Micro-rede CC
Necessidades de alterações à topologia da rede	Poucas visto que grande parte da rede é já CA	Grande modificação da rede principal visto esta ser CA
Circulação de potência reativa na rede	Existe circulação de potência reativa	Não existe circulação de potência reativa
Necessidade de sincronização dos RED	É necessária sincronização dos RED	Não é necessária sincronização dos RED
Proteção da micro-rede	Vários estudos sobre a proteção de redes CA fazem com que a proteção não seja um problema	Apesar de começarem a existir alguns estudos sobre a proteção de micro redes CC, ainda é um assunto pouco desenvolvido
Uso de transformadores	Simple	Mais complexo
Número de conversões	Elevada número de conversões visto cada vez mais haver um maior número de cargas e fontes renováveis CC	Elevado número de conversões devido à existência de métodos de geração convencionais CA e cargas convencionais CA

A principal vantagem das micro-redes híbridas é serem capazes de juntar as vantagens das

micro-redes CA e CC, permitindo assim uma micro-rede com menores desvantagens. No entanto, esta topologia ainda foi pouco estudada, havendo ainda muitas questões sobre o seu funcionamento [19].

Esta topologia de micro-redes permite reduzir a quantidade de conversores de potência, reduzindo custos e perdas em conversão, devido à existência de um barramento CA e de um barramento CC. Sendo assim a fiabilidade da rede aumenta, visto que enquanto as turbinas eólicas estão ligadas ao lado CA, os painéis solares estão ligados ao lado CC, permitindo o trânsito de potência entre as duas sub-redes. Caso haja uma produção insuficiente de um dos lados devido à intermitência destas fontes, o controlo é mais fácil devido às das micro-redes poderem funcionar independentemente. É também permitido um melhor controlo dos harmónicos, visto que a injeção de harmónicos na rede CA devido à rede CC é facilmente controlável. O equipamento a utilizar é simplificado e é conseguido que a potência transmitida tenha uma maior qualidade e que exista compensação de potência reativa e correção do fator de potência. Devido à existência de mais geradores que usem combustível renovável e à existência de um barramento CA e CC, é reduzida a dependência em fuel cells, o que permite reduzir a emissão de gases tóxicos para a atmosfera [16].

No entanto ainda há muitos poucos estudos sobre este tipo de micro-redes, o que dificulta a sua implementação atualmente. Para além disso, há também poucos estudos e poucos mecanismos de proteção para redes CC, tornando mais comuns falhas na sub-rede CC e a fiabilidade da micro-rede é assim menor. O controlo do fluxo de potência é também mais complexo, no entanto com o aumento do número de conversores (reduzidos neste tipo de micro-redes), a complexidade do controlo também aumenta [19]. No entanto têm sido encontradas novas soluções para proteção das redes CC. Em [20] são apresentadas algumas soluções para a proteção de redes CC.

## 2.5 Conclusões

Neste capítulo foram apresentados diferentes pontos sobre micro-redes, como a sua definição, componentes e diferentes topologias.

No entanto, não foram apresentados os diferentes métodos de controlo para micro-redes CA, CC e híbridas, assunto central desta dissertação. O controlo de micro-redes vai ser abordado no capítulo 3.



## Capítulo 3

# Estratégia de controlo para micro-redes híbridas

### 3.1 Introdução

O controlo de micro-redes assegura a estabilidade, proteção, sincronismo e otimização da operação tendo em conta de vários objetivos como o custo da operação. É também responsável por restaurar o funcionamento de uma central elétrica que não estava a gerar energia (*black start*) [17].

Neste capítulo é identificada e caracterizada a arquitetura de controlo e as estratégias de controlo das micro-redes CA, CC e híbridas CA/CC.

### 3.2 Arquitetura de controlo de micro-redes

O controlo de micro-redes pode ser classificado como distribuído, descentralizado ou centralizado [21]. Tal como representado na Fig. 3.1, neste trabalho foi adotado um controlo hierárquico organizado em quatro camadas complementares, nomeadamente:

- O controlo de nível 0 tem a resposta mais rápida e é a hierarquia mais baixa de controlo. Esta camada consiste nas malhas de controlo interno, sendo responsável pelo controlo da tensão e corrente dos inversores. Este nível pode ser representado como uma fonte de tensão ou de corrente, como inversores de fonte de tensão (*Voltage Source Inverters* ou VSI) ou como inversores de fonte de corrente (*Current Source Inverters* ou CSI). O controlo dos VSI consiste em duas malhas de controlo: uma interna de corrente e uma externa de tensão, garantindo a referência de tensão da micro-rede. Os VSIs são assim responsáveis por assegurar a referência de tensão e frequência da micro-rede quando esta se encontra a operar em modo isolado, estando normalmente associados a uma unidade de armazenamento de energia para garantir também o seguimento de carga. . O controlo dos CSI consiste numa malha interna de corrente e requerem também uma malha de fase (*phase locked loop* ou

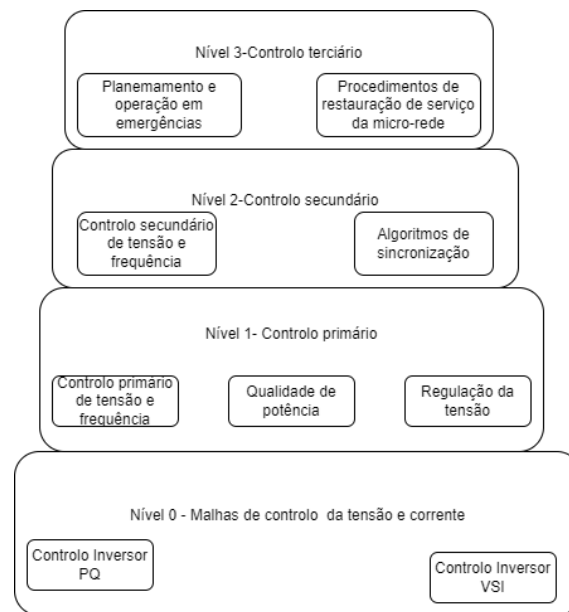


Figura 3.1: Hierarquia de controlo de micro-redes [22]

PLL em inglês) para garantir que sincronização com a rede. Os CSI estão normalmente associados aos RED de geração como pequenas turbinas eólicas ou a módulos PV ou ainda aos carregadores dos veículos elétricos. [21].

- O controlo primário mantém a estabilidade a nível da frequência [21], assegura a capacidade de manter o balanço entre a produção e a carga [22] e permite a partilha de potência entre fontes ligadas à mesma micro-rede. O controlo primário é implementado tipicamente a nível dos inversores através de coeficientes proporcionais (*droop control*) [21]. Este nível de controlo ajusta a frequência e a tensão de referência fornecidos pelas malhas de controlo interno de tensão e corrente correspondentes ao nível 0 da arquitetura de controlo. O seu funcionamento assemelha-se ao funcionamento de um gerador síncrono capaz de regular a frequência em função do balanço entre a carga e a produção [21]. O funcionamento do controlo primário para micro-redes CA e CC estão expostos no sub-capítulo 3.3 e 3.4. Nestes sub-capítulos será demonstrado que quando uma perturbação acontece, existirá uma alteração no trânsito de potências que levará a uma alteração ao nível da tensão ou frequência.
- O controlo secundário é responsável pela mitigação e regulação dos desvios de frequência e tensão introduzidos pelo controlo primário, garantindo que os valores de tensão e frequência na micro-rede estão entre os valores normais [21]. Esta camada é mais lenta que a camada primária e o seu controlo é realizado garantindo que as variações de tensão e frequência são reguladas para 0 quando existe uma alteração na produção ou consumo [22]. No controlo secundário centralizado a restauração da frequência e da tensão é realizado por um controlador PI, no entanto este método sofre de pouca flexibilidade e defeitos em pontos singulares. No controlo secundário descentralizado e distribuído, os controladores dos RED utilizam informações e estimações locais sobre os RED vizinhos de modo a restaurar os valores de

tensão e frequência. O controlo descentralizado é preferencialmente aplicável a micro-redes maiores. A grande diferença entre o controlo descentralizado e o controlo distribuído é que no controlo distribuído (tal como no controlo centralizado) existe uma rede de comunicação que permite alcançar os objetivos de controlo ao contrário do controlo descentralizado [21]. O funcionamento do controlo secundário para micro-redes CA e CC estão expostos no sub-capítulo 3.3 e 3.4.

- O controlo terciário é a hierarquia de controlo responsável por definir o trânsito de potência entre a micro-rede e a rede principal [22]. Este nível de controlo corresponde assim ao sistema de gestão de energia da micro-rede, sendo responsável pelo despacho das unidade de produção, armazenamento, controlo da carga para minimizar custo da operação, controlo e registo das perdas e comunica com o operador da rede de distribuição (ORD). Regula assim o trânsito de potência entre a rede principal e a micro-rede, tendo em conta os preços da energia, o estado de carregamento dos sistemas de armazenamento de energia, as previsões de produção nos RED e o consumo de energia nas cargas [21].

Como foi referido anteriormente, o controlo pode ser também centralizado, distribuído ou descentralizado:

- O controlo centralizado (figura 3.2) caracteriza-se por um controlador central que interage com todos os outros componentes. Destaca-se por oferecer ótimas soluções globais, no entanto requer uma elevada complexidade computacional e uma rede de comunicação que afeta a estabilidade [21].

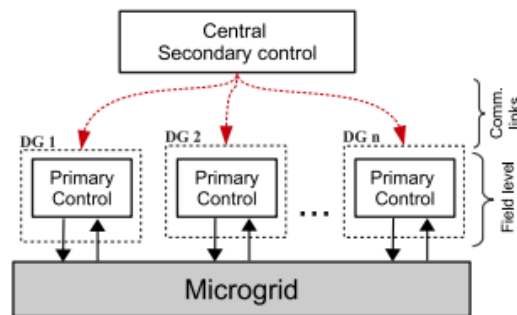


Figura 3.2: Controlo centralizado [21]

- No controlo distribuído (figura 3.3), os vários controladores partilham informação entre si, sendo que cada um tem conhecimento do comportamento dos outros. Possui assim uma rede de comunicação que afeta a estabilidade e pode oferecer soluções sub-ótimas, no entanto é fiável e requer menos carga computacional [21].
- O controlo descentralizado (figura 3.4) é caracterizado por controladores individuais que não partilham informação entre si independentemente. É o mais fiável dos três, não possui uma rede de comunicações e requer pouca carga computacional. No entanto este tipo de controlo não oferece solução globais ótimas [21].

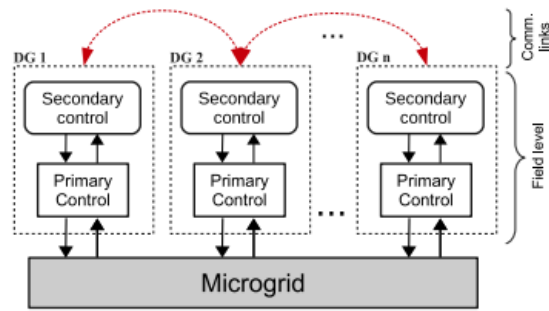


Figura 3.3: Controlo distribuído [21]

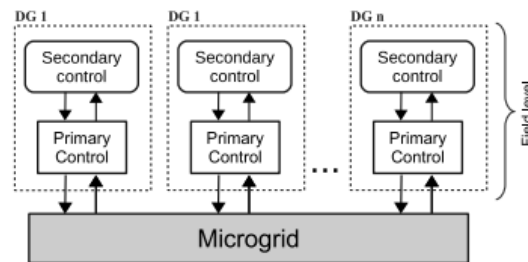


Figura 3.4: Controlo descentralizado [21]

Nesta tese foi adotado um controlo do tipo hierárquico que combina estratégias de controlo descentralizadas (baseadas em estratégias droop) e centralizadas (como no controlo de frequência no conversor de interligação).

### 3.3 Controlo de micro-redes CA

Tal como apresentado na secção 3.2, o controlo de micro-redes CA é caracterizado pelo controlo coordenado de dois tipos de inversores [17]:

- Os VSI são controlados com objetivo de alimentar as cargas com valores pré-definidos de tensão e frequência, sendo que dependendo desta carga, os valores de saída de potência reativa e ativa do VSI são definidos. O VSI simula uma máquina síncrona controlando a tensão e frequência do sistema CA, sendo implementado como uma fonte de tensão [17].
- Os inversores PQ são usados para fornecer um set-point de energia ativa e reativa. Estes inversores injetam na rede potência ativa e reativa. A potência reativa injetada é um valor pré-definido e definido localmente ou centralmente pelo controlador central da micro-rede, funcionando como uma fonte de corrente [17].

O controlo primário na micro-rede CA da frequência e tensão utilizado nesta dissertação é realizado através do controlo do *droop* (figura 3.5) da potência ativa ( $k_P$ ) e da potência reativa ( $k_Q$ ) (figura 3.6). Este controlo está representado nas equações (1) e (2) [23].

$$\omega = \omega_{ref} - k_P * (\Delta P) \quad (1)$$

$$V = V_{ref} - k_Q * (\Delta Q) \quad (2)$$

Em que  $\omega$  corresponde à frequência na micro-rede,  $\omega_{ref}$  corresponde à frequência de referência,  $\Delta P$  corresponde à diferença entre a potência da rede e a potência de referência da rede,  $V$  corresponde à tensão na rede,  $V_{ref}$  corresponde à tensão de referência na rede e  $\Delta Q$  corresponde à diferença entre a potência reativa na rede e a potência reativa de referência [24].

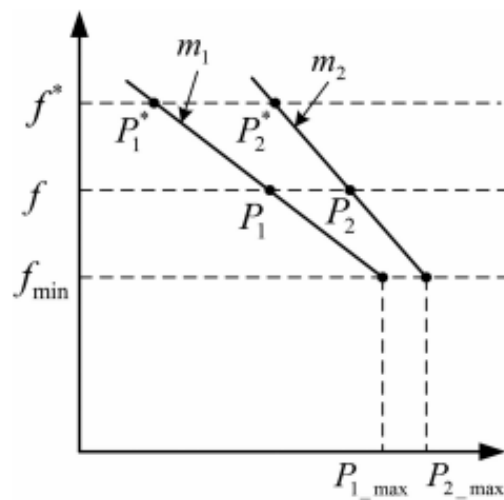


Figura 3.5: *Droop P-f* para micro-rede CA [24]

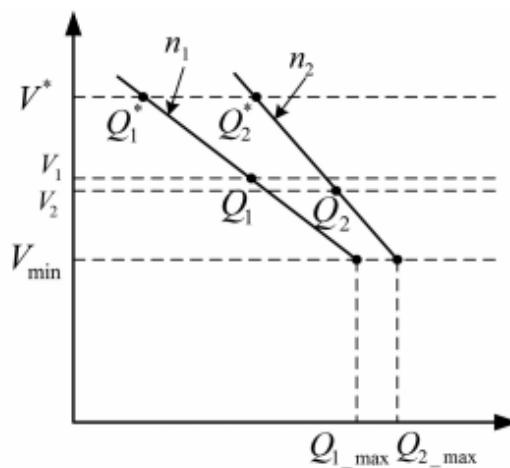


Figura 3.6: *Droop Q-V* para micro-rede CA [24]

O controlo secundário da rede CA tem como objetivo o controlo dos desvios na frequência e tensão da rede, regulando estes desvios para 0 sempre que existe alterações no valor das cargas ou da geração [23]. Sendo assim, o controlo secundário da rede CA através do cálculo do desvio

$\delta\omega$  e  $\delta V$  que são acrescentados ao controlo primários. As fórmulas que permitem a realização do controlo secundário são apresentadas nas equações (3) e (4) [24].

$$\omega = \omega_{ref} - k_p * (\Delta P) + \delta\omega \quad (3)$$

$$V = V_{ref} - k_Q * (\Delta Q) + \delta V \quad (4)$$

Em que  $\delta V$  e  $\delta\omega$  são calculados através das equações (5) e (6) [24]:

$$\delta V = k_{pV} * \Delta V + k_{iV} * (\int \Delta V dt) \quad (5)$$

$$\delta\omega = k_{p\omega} * \Delta\omega + k_{i\omega} * (\int \Delta\omega dt) \quad (6)$$

Em que  $k_{pV}, k_{p\omega}, k_{i\omega}, k_{iV}$  são os parâmetros de controlo secundário [24].

Em [25] são apresentados métodos para o controlo primário da micro-rede CA não baseados no *droop*, como a estratégia baseada no controlo de tensão e partilha de potência. Nesta estratégia é utilizado um controlador centralizado para o controlo da tensão na micro-rede CA e para a partilha de potência entre os RED do sistema. No entanto, esta estratégia pode causar a maior propagação de harmónicos no sistema, que implicaria o uso de controladores locais para ser mitigado. Esta propagação de harmónicos acontece pois a largura de banda da ligação do controlador central utilizado neste método de controlo é bastante reduzida.

Em [26] é apresentado o método *Master-Slave* para o controlo de micro-redes CA a funcionar em modo isolado. Neste método, um dos RED de geração funcionará como *Master controller*, funcionando em modo de controlo de tensão, fornecendo um valor de referência da tensão e frequência aos outros RED de geração que funcionam de modo a controlar a corrente. Quando ocorre uma perturbação ao nível de frequência ou tensão, o controlador central da micro-rede, definido como *Master controller*, define *set-points* de produção para os restantes RED de modo a corrigir estas perturbações.

No controlo *peer-to-peer*, todos os RED de geração tem o mesmo papel quando a micro-rede está em modo isolado, ao contrário do que acontece no método *Master-slave*. Usando funções de *droop*, todos os RED vão corrigir perturbações, alcançando um novo ponto de funcionamento da rede sempre que existe um regime transitório [26].

Em [26] é também referido um controlo chamado de *Multi-agent system* (MAS), em que cada RED de geração conseguirá comunicar com os RED vizinhos, como uma entidade autónoma, sendo capa de tomar decisões sobre a produção dependendo so estado do sistema, mesmo sem a existência de um comando externo.

### 3.3.1 Utilização de veículos elétricos para controlo local da frequência

Em [27] é apresentado uma estratégia de controlo para as micro-redes CA recorrendo a veículos elétricos (VE). Os VE funcionam como um sistema de armazenamento de energia com capacidade de funcionar como uma carga ou como um sistema de geração devido à sua flexibilidade. Os VE são responsáveis por oferecer suporte ao controlo primário.

O controlo de frequência realizado pelo VE é realizado através do uso do *droop* P-f, apresentado na figura 3.7 [27].

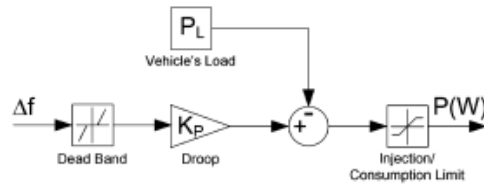


Figura 3.7: Suporte ao controlo primário de frequência utilizando veículos elétricos [27]

A curva de *droop* P-f, apresentada na figura 3.8, é caracterizada por uma banda morta de frequência, que evita que o VE responda a variações de frequência pequenas. No entanto, para valores de frequência fora da dead-band, o VE é responsável por injetar ou absorver potência ativa extra de modo a compensar a variação de frequência [27].

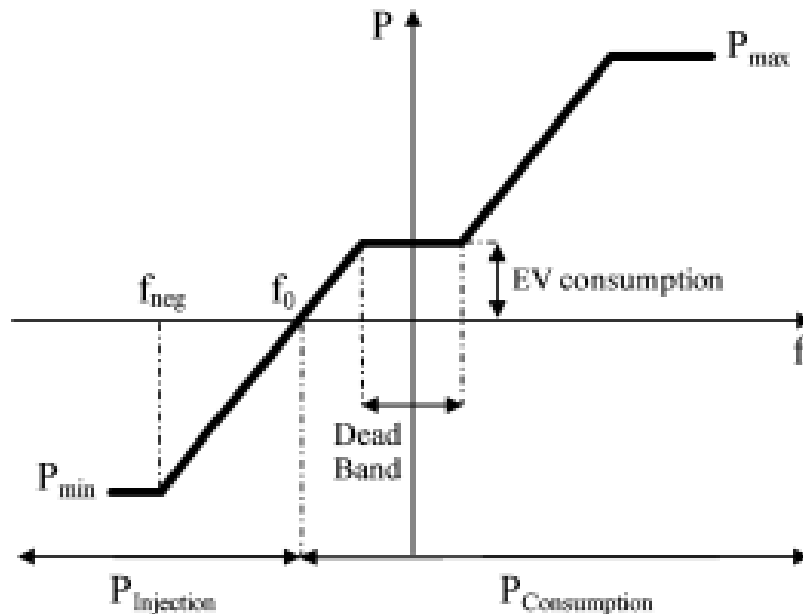


Figura 3.8: Curva do *Droop* para veículos elétricos [27]

### 3.4 Controlo de micro-redes CC

O controlo de micro-redes CC tem como objetivo de garantir uma suave transição entre modos de operação, regulação de tensão, partilha de corrente (*current sharing*), partilha de potência (*power sharing*), otimização da geração, maximização das potencialidades dos RED, despacho económico das cargas e redução nas perdas nas linhas de transmissão.

O controlo de micro-redes CC é realizado através do controlo de potência ativa e de tensão CC através conversores dos sistemas de armazenamento de e da produção. Para controlar a tensão na micro-rede CC a tensão pode ser mantida constante num RED (como numa bateria) sendo que as outras unidades serão responsáveis por ajustar a potência injetada ou realizando um controlo distribuído da tensão ( se houver mais que uma bateria no sistema [28]).

A estrutura de controlo de micro-redes CC é composta por níveis de controlo locais e coordenados [29].

- O controlo local de micro redes CC é caracterizado pelas funções de controlo interno de corrente e tensão e pelos métodos de controlo *droop*. O controlo interno de corrente e tensão, correspondentes ao nível 0 da arquitetura de controlo, são essenciais para garantir o bom funcionamento local mas também de modo a garantir a capacidade de comunicação entre diferentes RED da micro-rede CC [29].
- O controlo coordenado da micro-rede CC permite um controlo inteligente do sistema, coordenando os diferentes RED do sistema. Como já foi referido em 3.2, este controlo pode ser centralizado, descentralizado ou distribuído [29].

O controlo primário da rede CC é realizado de modo semelhante ao controlo primário da rede CA, apresentado em 3.3, sendo que desta vez é utilizado o *droop* P-V (figura 3.9) [23], como é na equação (7).

$$V = V_{ref} - k_p * (\Delta P) \quad (7)$$

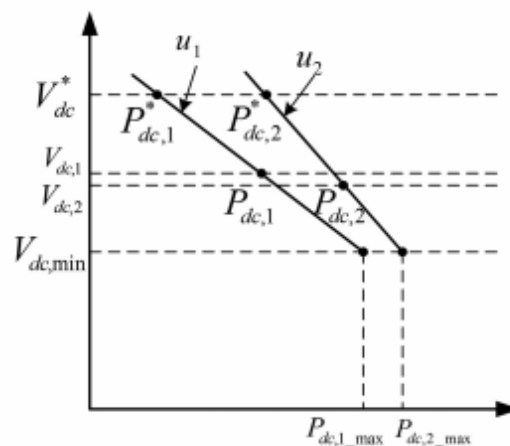


Figura 3.9: *Droop* P-V para micro-rede CC [24]

O controlo secundário da rede CC é também realizado da forma semelhante ao da rede CA [23], através da equação (8).

$$V = V_{ref} - k_p * (\Delta P) + \delta V \quad (8)$$

Em que  $\delta V$  é calculado através da equação (9) [23]:

$$\delta V = k_{pV} * \Delta V + k_{iV} * (\int \Delta V dt) \quad (9)$$

Em que  $k_{pV}$  e  $k_{iV}$  são os parâmetros de controlo secundário [23].

Em [26] e [30] foi proposto um modo de controlo baseado no controlo de tensão através de um único *feedback loop*, capaz de regular a *duty ratio* de um conversor de modo a ajustar a tensão CC para o valor desejado.

Em [26] e [31] foi apresentado um método de controlo baseado na histerese. Devido à sua capacidade rápida de resposta este método garante que a potência entregue às cargas e à rede possui grande qualidade.

### 3.4.1 Utilização de veículos elétricos para controlo local de tensão

Como apresentado em [22], a capacidade dos VE funcionarem como um ESS, devido à sua flexibilidade de funcionarem como um recurso de geração ou uma carga, bem como a sua capacidade de armazenamento de energia permitem que estes possam ser incorporados numa micro-rede de modo a suportarem o controlo da tensão do lado CC.

Ao contrário de [22], os VE serão responsáveis pelo suporte ao controlo primário da tensão CC (figura 3.10), através do uso do *droop* P-V.

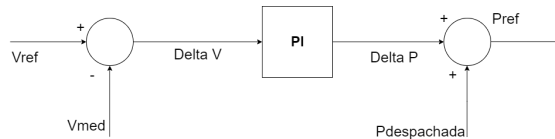


Figura 3.10: Suporte ao controlo primário de tensão utilizando veículos elétricos

A curva do *droop* P-V utilizada para a modelização dos VE no capítulo 4 é apresentada na figura 3.11. Entre os valores da *dead-band* de tensão, uma alteração de tensão não altera os valores de potência. No entanto, uma variação de tensão fora dos valores desta *dead-band* leva a um aumento ou diminuição de potência até ser atingindo o valor de potência máxima ou potência mínima do VE ( $P_{max}$  ou  $P_{min}$ ).

## 3.5 Estratégias de controlo para micro-redes híbridas

Como foi referido anteriormente, em micro-redes híbridas CA/CC múltiplos RED estão conectados ao barramento CC e ao barramento CA, sendo a coordenação entre estes 2 subsistemas necessária. A coordenação entre os dois subsistemas é assim realizada com recurso a um *interlinking converter* (IC) que garante um trânsito bidirecional de potência entre o lado CC e o lado CA [24].

O equilíbrio de potência entre o lado CA e CC (*power balancing*) da micro-rede é garantido através das equações (10) e (11) [32]:

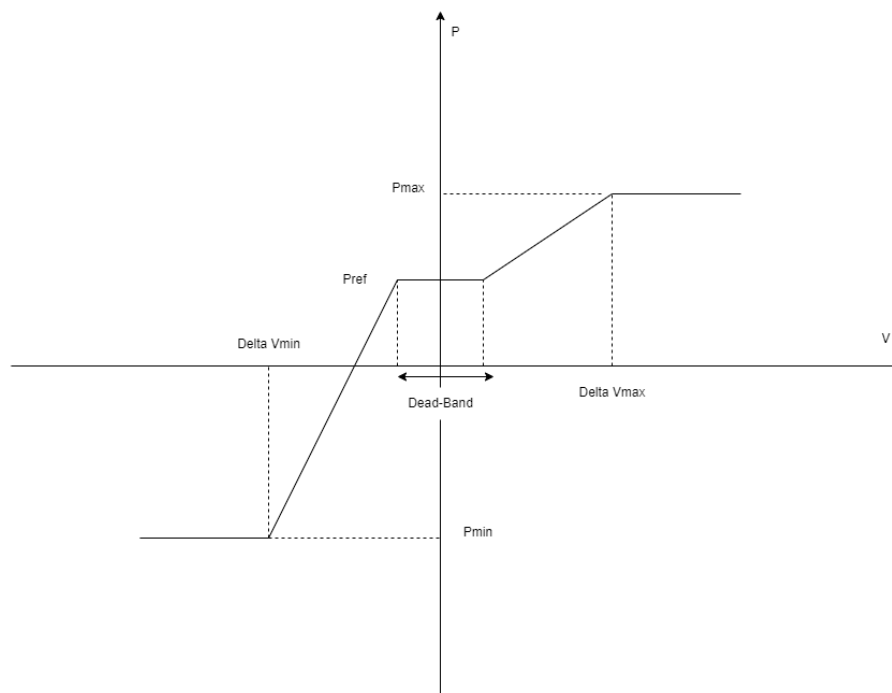


Figura 3.11: Curva do *Droop* para veículos elétricos

$$Q_{CAger} + Q_{RedePrincipal} = Q_{CargaCA} \quad (10)$$

$$P_{CCger} + P_{CAger} + P_{bat} + P_{RedePrincipal} = P_{CargaCC} + P_{CargaCA} \quad (11)$$

Em que  $P_{bat}$  é um valor positivo caso a bateria esteja a descarregar e um valor negativo caso a bateria esteja a carregar [32].

O *power balancing* é garantido pela rede principal de distribuição quando a micro-rede funciona em modo interligado.

A figura 3.12 apresenta as diferentes estratégias de controlo que podem ser adotadas na micro-rede híbrida CA/CC, baseado na revisão apresentada em [24].

As estratégias de controlo definidas em [24], na figura 3.12 e usadas nesta dissertação são diferentes dependendo do modo de operação da micro-rede. Caso a micro-rede esteja a funcionar interligada à rede principal, esta pode ser controlada despachando a potência de saída do IC ou não despachando a potência de saída do IC. Caso a micro-rede esteja a funcionar em modo isolado, o grande desafio do controlo é a regulação da tensão do lado CA e do lado CC e o controlo de frequência do lado CA, sendo que pode ser controlada diretamente a tensão CA ou CC da rede.

Em [33] foi apresentado um método controlo *Master-slave* semelhante ao apresentado em 3.3 para uma micro-rede híbrida. Quando a rede está a funcionar em modo interligado, o controlo local nos RED prevalece, no entanto, no caso de a micro-rede está a funcionar em modo isolado, existe um controlo centralizado através de um *master controller* que controla os diferentes RED de geração.

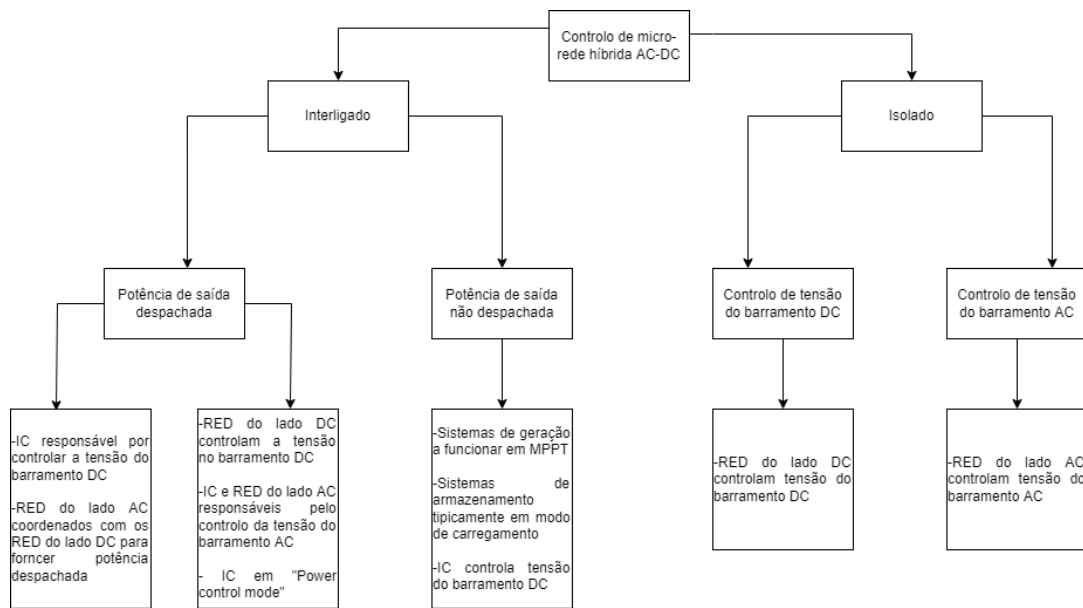


Figura 3.12: Controlo de micro-redes híbridas [24]

### 3.5.1 Estratégias de controlo para micro-redes híbridas a funcionar em modo interligado

De acordo com [24] existem 3 modos de controlo para a micro-rede híbrida a funcionar em modo interligado com a rede principal:

- Num primeiro caso é considerado que o IC funciona de modo a regular a tensão CC para o valor desejado (normalmente o valor de referência), através de um método de controlo *droop* P-V apresentado em 3.4. Neste modo de controlo, a tensão e a frequência no barramento CA são controlados através da rede principal [24]. Neste método de controlo, a potência de saída do IC é despachada.
- O segundo método de controlo considera que o IC é responsável pelo controlo da tensão do lado CA. Os RED do lado CC, nomeadamente os sistemas de armazenamento de energia e os recursos de geração distribuída são responsáveis pelo controlo da tensão CC para o valor de referência, através do controlo baseado no *droop* P-V apresentado em 3.4 [24]. Neste método de controlo, a potência de saída do IC é despachada.
- No terceiro modo de controlo, é considerado que a potência de saída do IC não é despachada e que o IC é responsável pelo controlo da tensão CC através do método de controlo *droop* apresentado em 3.4. Sendo assim, os recursos de geração distribuída da micro rede CA e CC trabalham em modo MPPT (*Maximum power point tracking*) [24].

### 3.5.2 Estratégias de controlo para micro-redes híbridas a funcionar em modo isolado

No modo de operação isolado é necessário que exista coordenação dos RED do lado CA, CC e do IC de modo a ser possível regular a tensão do lado CC e a tensão e frequência do lado CA, bem como o consumo e geração de energia. No modo de operação isolado, o IC é essencial no controlo da tensão, da frequência e na transferência de potência entre o lado CA e o lado CC da micro-rede [24].

O controlo de micro-redes híbridas a funcionar em modo isolado é, segundo [24], realizado através de 2 métodos diferentes.

- Neste primeiro modo de controlo, os recursos de geração distribuída do lado CC realizam o controlo da tensão do barramento CC através de métodos baseados no *droop* ou de *power balancing*. O IC é responsável pelo controlo da tensão do barramento CA juntamente com os recursos de geração distribuída do lado CA da micro-rede [24].
- No segundo modo de controlo acontece o contrário, sendo que os recursos de geração distribuída do lado CA são responsáveis, através de estratégias de controlo baseadas no *droop* pelo controlo da tensão do barramento CA, enquanto que o IC é responsável pelo controlo da tensão CC [24].

### 3.5.3 Estratégias de controlo para *interlink converters*

Numa micro-rede híbrida, o IC é responsável por conectar e controlar o fluxo de potência entre o lado CA e o lado CC da micro-rede, podendo também ser responsável pelo controlo de tensão o barramento CA ou CC [24].

Em [24] foi proposta uma estratégia de controlo para o IC quando a rede funciona em modo isolado. Valores da tensão CC e da frequência do lado CA em p.u. são medidos e a diferença entre estes valores e os valores de referência são utilizados para ajustar a fluxo de potência do IC entre o lado CA e o lado CC da micro-rede. Múltiplos IC podem ser utilizados em paralelo nesta situação de modo a aumentar a fiabilidade do método.

Em [34] foi apresentado um método de controlo não linear *disturbance-observer-based* (NDO) para uma micro-rede híbrida CA/CC. As perturbações de potência ativa numa micro-rede híbrida acontecem devido a uma alteração súbita da carga, a alterações da produção de potência em geradores distribuídos ou em sistemas de armazenamento de energia e a alterações da quantidade de potência ativa partilhada entre as sub-redes CA e CC, sendo que estas podem levar a que haja alterações de tensão no barramento CC e à respetiva atuação de proteções que compromete o funcionamento do sistema. Não são contabilizadas perturbações no fluxo de potência reativa pois esta não circula na sub-rede CC. O interface converter utilizado neste método é um inversor CA/CC bidirecional, usando controladores PI para o controlo da tensão e corrente. De modo a poder corresponder às flutuações de produção por parte dos painéis fotovoltaicos e as alterações de cargas na

sub-rede CC o sistema de armazenamento de energia é responsável por operar também ele como um elemento que permite fluxo bidirecional de potência.

Em [35] foi sugerido um modelo baseado no *droop* de duas etapas modificado para o controlo dos IC numa micro-rede híbrida. Quando a micro-rede funciona interligada com a rede principal, a sub-rede CA é controlada através da rede principal, sendo que o IC é responsável pela tensão da micro-rede CC. Quando a micro-rede híbrida funciona de maneira isolada com a rede principal, o interface converter é responsável controla o funcionamento da micro-rede através de um modelo *droop based*. A sub-rede CA é controlada através da característica (f-P), pois ao não haver nenhuma fonte dominante na sub-rede, a frequência varia consoante a potência ativa produzida. Sendo assim, a frequência na sub-rede CA pode ser controlada através do aumento de potência ativa produzida, que corresponde a uma diminuição da frequência do sistema. A tensão na sub-rede CA pode ser controlada através da característica (V-Q). A sub-rede CC pode ser controlada através da característica (Vdc-P). O controlo do interface converter tem de ter em conta que em certas situações o interface converter pode ser uma fonte para uma sub-rede e uma carga para outra. Como referência para o controlo de potência é utilizado o barramento de tensão CC do IC e a frequência da sub-rede CA.

Em [36] foi proposto um método de controlo para uma micro-rede híbrida CA/CC no controlo do IC. Neste modelo as fontes CC e as fontes CA são agrupadas em duas fontes consolidadas conectadas ao conversor. As duas sub-redes partilham potência proporcionalmente e independentemente das variações das cargas através do IC. Este conversor pode ser conectado com um inversor CC-CA permitindo que os níveis de tensão nas sub-rede possam ser alterados. Um sistema de armazenamento de energia pode também ser acrescentado ao sistema, sendo que este só pode ser carregado quando houver excesso de produção e descarregado quando houver excesso de consumo. Neste método de controlo são utilizados quatro controladores PI, o primeiro com objetivo de igualar frequência e tensão, o segundo e terceiro com função de detetar a corrente CA e CC respetivamente e um quarto com para regular a tensão do condensador do barramento CC que surge após a adição do inversor CC-CA.

## 3.6 Conclusões

Neste capítulo foram expostas e analisadas algumas estratégias de controlo para micro-redes CC, CA e híbridas CA/CC.

Ass estratégias baseadas no controlo do *droop* expostas nas secções 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5 serão utilizadas para a modelização de componentes em MatLAB/Simulink, apresentado no capítulo 4 e serão testadas no capítulo 5.



## Capítulo 4

# Modelização de uma micro-rede híbrida CA/CC em MATLAB/Simulink

### 4.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os modelos utilizados em MatLAB/Simulink para a micro-rede CA, CC e conversor. Estes modelos têm como objetivo simular o comportamento dos componentes da micro-rede.

Os modelos adotados têm em conta os seguintes pressupostos:

- Foi considerado um sistema trifásico equilibrado na modelização da micro-rede CA;
- As fontes de geração renováveis, nomeadamente as fontes de geração PV, são modelizadas como fonte de produção constante;
- Baterias e módulos PV são consideradas fontes de corrente ideais;
- São adotados modelos RMS para os conversores, sendo modelizados como fontes de corrente ideais, não estando representadas as perdas e dinâmica associada à comutação;
- Não foram considerados filtros para a redução de harmónicos;
- No caso da rede CA, os conversores são representados por um modelo estático não tendo sido considerada a dinâmica do barramento CC dos conversores CC/CA
- São consideradas redes simples e com poucos componentes pois o principal objetivo desta dissertação era o estudo do conversor de interligação, de modo a reduzir o tempo das simulações;
- É considerado que os valores de frequência e tensão da rede estão dentro dos valores aceitáveis se se verificar que a frequência da rede está dentro de uma margem de 2% (1 Hz no caso da frequência nominal ser 50 Hz) do valor nominal e se a tensão estiver dentro de uma margem de 10% do valor da tensão de referência.

- No lado CA é considerada a tensão em p.u., sendo que a tensão base é de 380 V.

Para realizar esta modelização foi utilizada a plataforma MatLAB/Simulink, que permite implementar funções e equações matemáticas que permitem simular o comportamento de cada componente da micro-rede.

## 4.2 Modelização de micro-rede CC

### 4.2.1 Modelo PV

O modelo PV é modelizado como uma fonte de corrente com valor controlável através da relação entre a potência estipulada do painel solar e a tensão entre os terminais do painel solar [37], apresentada na equação (12). É necessária também a existência de um condensador devido à natureza CC do modelo.

$$I_{PV} = \frac{P_{PV}}{V_{CC_{PV}}} \quad (12)$$

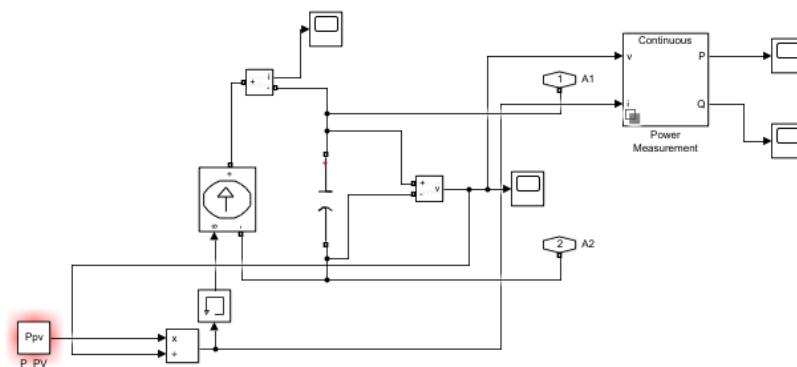


Figura 4.1: Modelo simulink de painel fotovoltaico

No modelo usado, representado na figura 4.1, é possível também identificar blocos para a medição de tensão, corrente e potência ativa. O bloco  $P_{PV}$  representa a potência produzida no módulo PV enquanto que  $I_{PV}$  representa a corrente nos terminais do módulo PV. A parametrização do condensador é apresentada no anexo D.

### 4.2.2 Modelo do sistema de armazenamento de energia

As baterias utilizadas na micro-rede CC são um dos principais elementos da micro-rede pois são o componente que permite que existam uma alimentação contínua da rede quando funciona em modo isolado quando o consumo de energia é superado pela produção.

A bateria foi modelizada como sendo uma fonte de corrente controlada através de um droop P-V. A fonte de corrente é variável e dependente da tensão nos terminais na bateria e a potência produzida pela bateria. As funções de controlo utilizadas na modelização da bateria estão apresentadas em (13) e (14) [37].

$$I_{BAT} = \frac{P_{BAT}}{V_{BAT}} \quad (13)$$

$$P_{BAT} = P_0 - k * (V_{BAT_{REF}} - V_{BAT}) \quad (14)$$

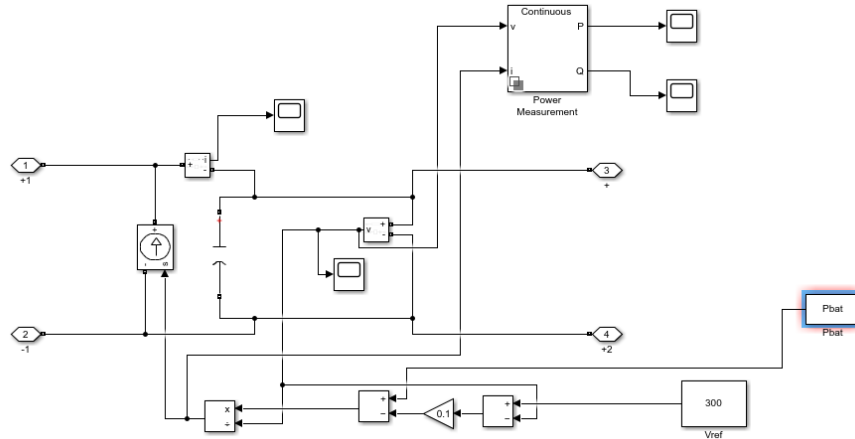


Figura 4.2: Modelo simulink do sistema de armazenamento de energia

No modelo representado na figura 4.2, foram acrescentados instrumentos de medição de potência ativa, tensão e intensidade de corrente. O bloco  $P_{BAT}$  corresponde à potência transmitida pela bateria, o bloco  $V_{BAT_{REF}}$  corresponde à tensão de referência de saída da bateria (neste caso 300V) e o bloco de ganho, representado por na fórmula 14 corresponde ao *droop* de controlo da potência de saída da bateria.

No caso de uma micro-rede híbrida em que o *Interlinking converter* (IC), como as estudadas em 5.4.2.2, o modelo utilizado para a bateria é semelhante ao utilizado no módulo PV, visto que o controlo da tensão CC é realizado no IC. Este controlo de tensão é abordado em 4.4.2.

A parametrização do condensador é apresentada no anexo D.

#### 4.2.2.1 Cálculo do droop usado na simulação da bateria

O *droop* P-V usado na modelização da bateria do lado CC permite controlar a tensão no barramento CC, através da expressão apresentada em 3.3 para o controlo primário (15).

$$V = V_{ref} - k_P * (\Delta P) \quad (15)$$

O *droop* P-V corresponde ao declive das retas apresentadas, podendo ser calculado utilizando os dois pontos extremos da reta (16).

$$k_P = \frac{V_{ref} - V_{min}}{P_{ref} - P_{min}} \quad (16)$$

Os valores de  $k_P$  podem ser assim alterados de modo a alterar a curva de controlo P-V. Um maior ganho significa que uma variação de P leva a uma maior variação de V, enquanto se o ganho for mais baixo, uma variação de P leva a uma menor variação de V.

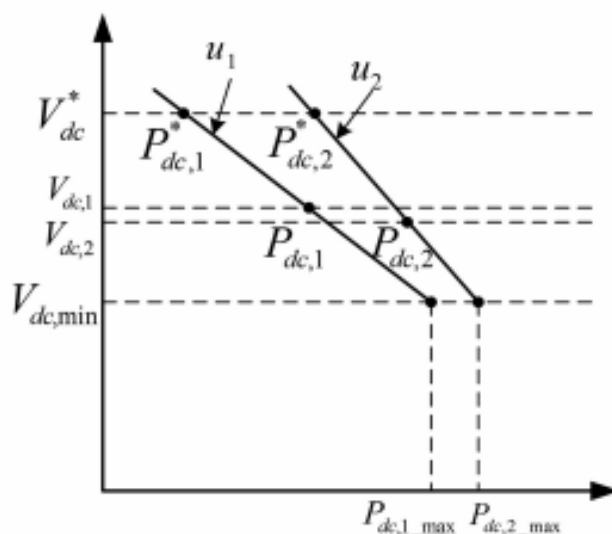


Figura 4.3: *Droop* P-V para micro-rede CC [24]

#### 4.2.3 Veículos elétricos para suporte ao controlo primário da tensão CC

Os veículos elétricos funcionam com uma característica proporcional P-V variável, podendo estar em modo de carregamento ou de descarregamento consoante a necessidade da rede. São também responsáveis pelo suporte ao controlo primário da tensão CC.

O *droop* P-V utilizado é representado pela figura 4.4.

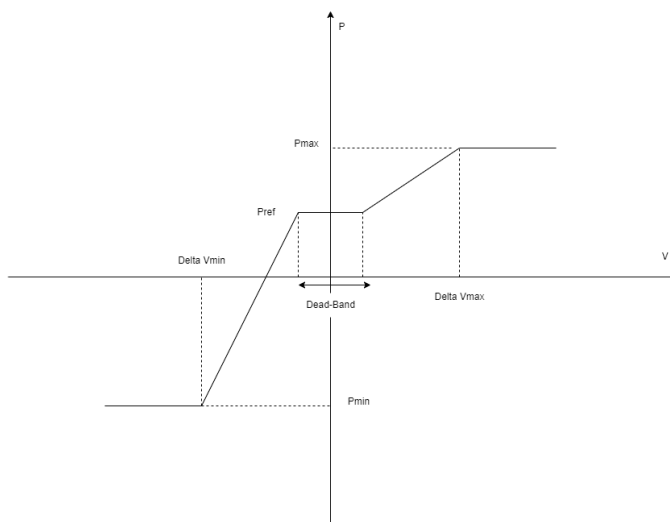


Figura 4.4: *Droop* P-V para suporte ao controlo primário da tensão CC

O *droop* P-V utilizado na modelização dos veículos elétricos corrige variações de tensão resultantes da variação da produção ou das cargas. Para isso é definida uma banda morta. Variações de tensão dentro desta *dead-band* não originam uma alteração de potência, sendo que neste pontos a tensão é mantida no valor de  $V_{ref}$ . Um aumento de potência para além da banda morta leva a um

aumento de tensão até  $V_{max}$ , enquanto uma diminuição de tensão leva a uma diminuição de tensão até  $V_{min}$ .

Os veículos elétricos são modelizados em MatLAB/Simulink como fontes de corrente, tal como o módulo PV e a bateria, como representado na figura 4.5.

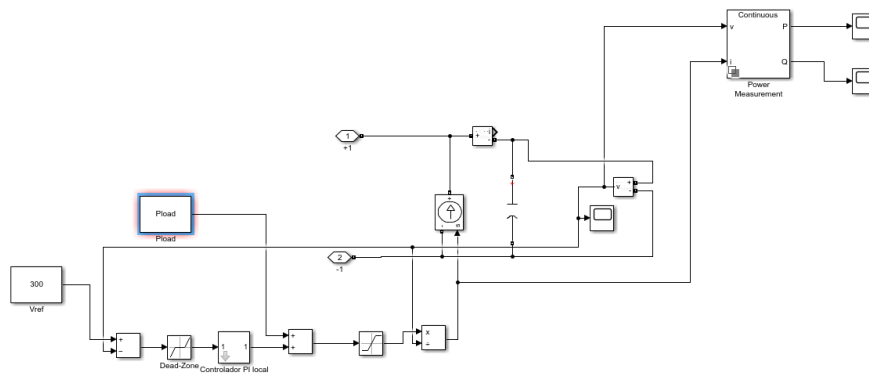


Figura 4.5: Modelo Simulink para VE para suporte ao controlo primário e com controlo secundário da tensão CC

A parametrização da curva do *droop* P-V e do condensador é apresentada no anexo D.

#### 4.2.4 Cargas

As cargas são representadas apenas por resistências devido a não haver circulação de potência reativa na rede. São também acrescentados instrumentos de medição de modo a perceber o funcionamento da tensão, corrente e potência ativa na carga.

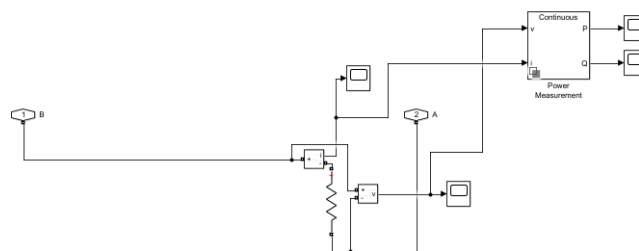


Figura 4.6: Modelo simulink das cargas CC

#### 4.2.5 Linhas

As linhas da rede CC são simples de modelizar, visto não existir relutância nem capacitância. Sendo assim o modelo aplicado nas linhas CC estão apresentadas na figura 4.6. As perdas de transmissão são representadas através das das resistências das linhas.

A parametrização das linhas CC são apresentadas no anexo D.

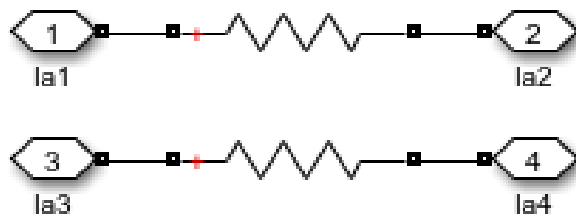


Figura 4.7: Modelo simulink das linhas CC

### 4.3 Modelização de micro-rede CA

#### 4.3.1 Voltage Source Inverter (VSI)

Os VSI são controlados com objetivo de alimentar as cargas com valores pré-definidos de tensão e frequência, sendo que o seu funcionamento pode ser modelizado em MatLab/Simulink recorrendo às suas funções de controlo. Como foi referido anteriormente, o VSI pode ser modelizado através do uso de uma máquina síncrona.

O modelo tem como objetivo representar as funções de controlo *droop* P-f e Q-V desacopladas, sendo para isso necessário que a reatância interna seja significativamente maior que a resistência interna [38].

De modo a poder descobrir a relação entre a variação de potência ativa e a variação de frequência é usada a relação conhecida no domínio de Laplace (17). Se for considerado uma ação direta de *feed-back* através de uma função *seep-droop*, obtemos a expressão em (18) [38].

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta P} = \frac{1}{2Hs} \quad (17)$$

$$\Delta\omega = \frac{1}{2Hs} (\Delta P - \frac{1}{R} \Delta\omega) \equiv \frac{\Delta\omega}{\Delta P} = \frac{1}{2Hs + \frac{1}{R}} \quad (18)$$

A razão entre a variação de frequência angular e de potência pode também ser representada através de uma função de transferência linear dependente do *droop* de potência ativa  $K_p$  e do atraso  $T_{dP}$ . Esta razão está demonstrada em (19) [38].

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta P} = \frac{K_p}{T_{dP}s + 1} \equiv \frac{1}{\frac{T_{dP}s}{k_p} + \frac{1}{k_p}} \quad (19)$$

Ao analisar (19) e (18) é possível perceber as relações (20) e (21) [38].

$$H = \frac{T_{dP}}{2k_p} \quad (20)$$

$$R = k_p \quad (21)$$

É preciso também determinar a característica de controlo Q-V em que V é a tensão interna da máquina e Q é a potência reativa na saída do VSI. Para isso recorre-se à função de transferência da máquina síncrona apresentada em 4.8, em que  $T_{dQ}$  representa o atraso de desacoplamento de potência reativa enquanto  $k_Q$  representa o *droop* de potência reativa [38].

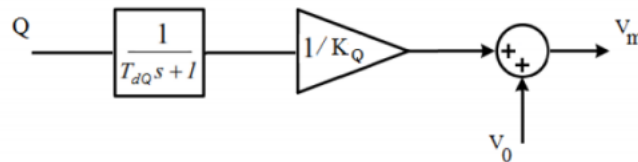


Figura 4.8: Função de transferência do VSI [38]

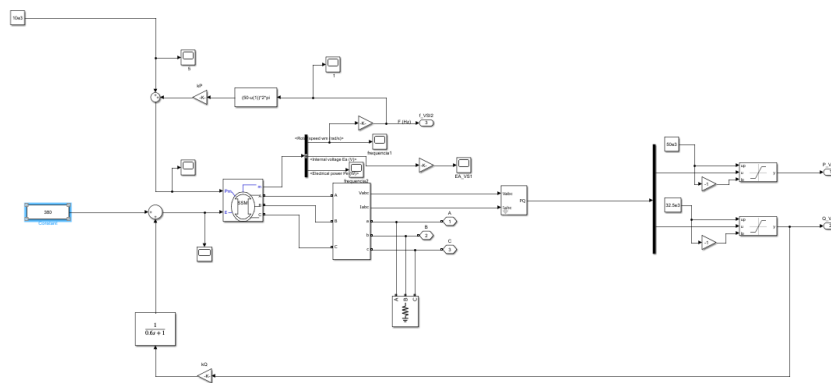


Figura 4.9: Modelo simulink do VSI

Foram feitas várias simulações de modo a descobrir os ganhos e atrasos adequados a cada situação, sendo que estes estão apresentados no Anexo D.

### 4.3.2 Inversores PQ

Inversores PQ têm como principal função injetar potência ativa e reativa na rede de modo a definir um *set-point* para o funcionamento dos painéis fotovoltaicos. A corrente do inversor é controlada em fase e magnitude de modo a atingir os *set points* definidos de potência ativa e reativa, sendo que a função correta do inversor depende da estabilidade da tensão e frequência [38].

A modelação do inversor PQ em MatLab/Simulink é conseguida ao implementar o bloco *Three-Phase Dynamic Load* com uma referência negativa PQ. De acordo com [?] geradores têm de possuir um modo de operação sensível à frequência (*Limited frequency sensitive mode*), isto é o gerador opera num modo em que tem de ser capaz de mudar a produção de potência ativa consoante certos valores de frequência (aumentando a potência quando a frequência é demasiado baixa e diminuindo a potência quando a frequência é demasiado alta) [38].

Os Inversores PQ são assim utilizados não só como inversores mas também como os RED de geração da micro-rede CA. O seu modelo está apresentado na figura 4.10.

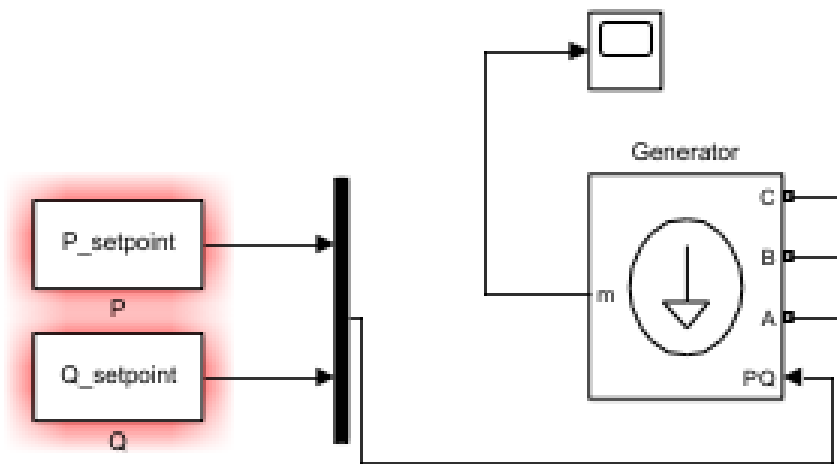


Figura 4.10: Modelo simulink do PQ Inverter

### 4.3.3 Veículos elétricos para suporte ao controlo primário de frequência

Tal como no caso dos veículos elétricos do lado CC, os veículos elétricos para suporte ao controlo primário de frequência funcionam como baterias com *droop* P-f variável, podendo estar em modo de carregamento ou descarregamento consoante a necessidade da rede. Para além de ajudar no controlo do *power balancing*, são também responsáveis pelo suporte ao controlo primário da frequência.

O *droop* P-f utilizado é representado pela figura 4.11 [27].

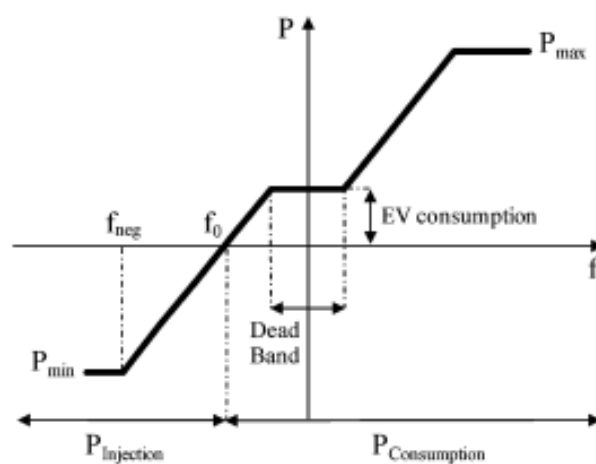


Figura 4.11: *Droop* P-f para suporte ao controlo primário da frequência [27]

Os veículos elétricos com *droop* P-f variável corrigem variações de frequência injetando ou absorvendo potência ativa na rede. Para uma certa variação de frequência, dentro da *dead-band*,

não existe trânsito de potência nos VE, no entanto fora dos valores da *dead-band* da frequência, o VE vai injetar e absorver potência da rede, de modo a ajudar no controlo da frequência. Esta estratégia de controlo é abordada em 3.3.1.

Os veículos elétricos são modelizados em MatLAB/Simulink através do uso do componente *Three Phase Dynamic load*, tal como o inversor PQ. O modelo utilizado é apresentado na figura 4.12.

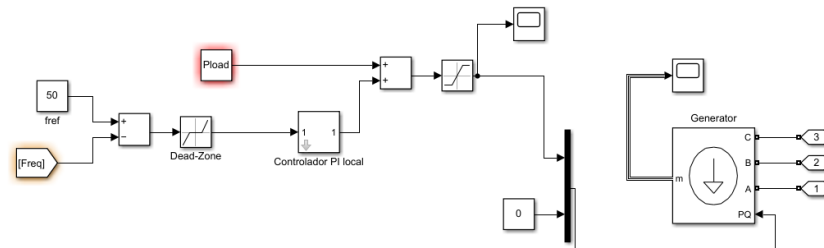


Figura 4.12: Modelo Simulink para VE para suporte de controlo primário de frequência e controlo secundário

A parametrização da curva do *droop* P-f utilizado nos VE com controlo secundário de frequência utilizados é apresentada no anexo D.

#### 4.3.4 Cargas

As cargas são representadas apenas por resistências ou por resistências e indutâncias (consoante se considere a existência ou não de potência reativa), sendo que a grande diferença em relação às cargas CC é que são apenas representadas cargas trifásicas. São também modelizadas com interruptores, de modo a ser possível desligá-las ou ligá-las a qualquer momento, estando também ligadas à terra. O exemplo de uma carga CA utilizada é apresentado na figura 4.13.

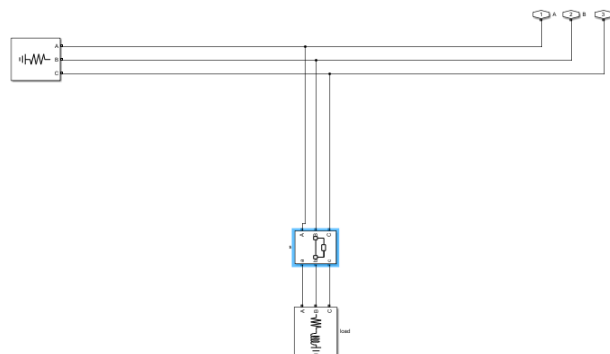


Figura 4.13: Modelo simulink das cargas CA

### 4.3.5 Linhas

As linhas usadas na micro-rede CA são trifásicas (ao contrário das linhas do modelo CC), sendo representadas não só por uma resistência mas também por uma indutância, o que leva a que a impedância da linha seja superior.

A parametrização das linhas CA utilizadas é apresentada no anexo D.

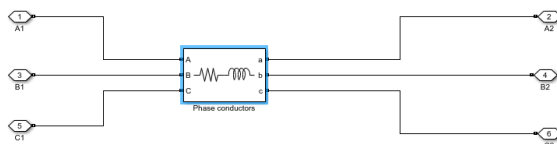


Figura 4.14: Modelo Simulink de linhas CA

## 4.4 Modelização do *Interlinking converter*

O *Interlinking converter* (IC) tem como principal função a transferência de potência entre o lado CA e o lado CC da micro-rede, sendo que tem de ser modelizado de modo a permitir um fluxo bidirecional de potência, consoante as necessidades da rede.

O IC é modelizado como sendo uma fonte de corrente do lado CC, através da equação (22), em que  $P_{CA-CC}$  representa a potência transferida entre o lado CA da micro-rede e o lado CC da micro-rede e  $V_{IC}$  representa a tensão CC do lado CC da micro-rede, que pode ser controlada na bateria ou no IC. A transferência de potência para o lado CA é garantida através do uso do bloco *Three phase dynamic load*, semelhante ao utilizado em 4.3.2.

$$I_{IC} = \frac{P_{CA-CC}}{V_{IC}} \quad (22)$$

O IC pode ser também responsável pelo controlo da tensão CC e da tensão CA e frequência caso a micro-rede esteja a funcionar em modo isolado. A modelização dos diferentes IC utilizados nas simulações é apresentada nos capítulos 4.4.1, 4.4.2, 4.4.3 e 4.4.4.

### 4.4.1 Modelização do IC apenas responsável por trânsito de potência entre o lado CA e CC com a potência de saída a ser despachada

O primeiro IC a ser modelizado é responsável apenas pelo *Power balancing da rede*, transferido uma quantidade de potência despachada e constante entre o lado CA e o lado CC da rede híbrida. Neste caso, o controlo da tensão CC é realizado pela bateria enquanto a tensão CA e a frequência são controladas pela rede principal quando este funciona em modo interligado e pelos RED do lado CA quando esta funciona em modo isolado.

O modelo utilizado para a representação deste IC é apresentado na figura 4.15.

Este modelo de IC é apenas utilizado na simulação 8, apresentada em 5.4.3.1.

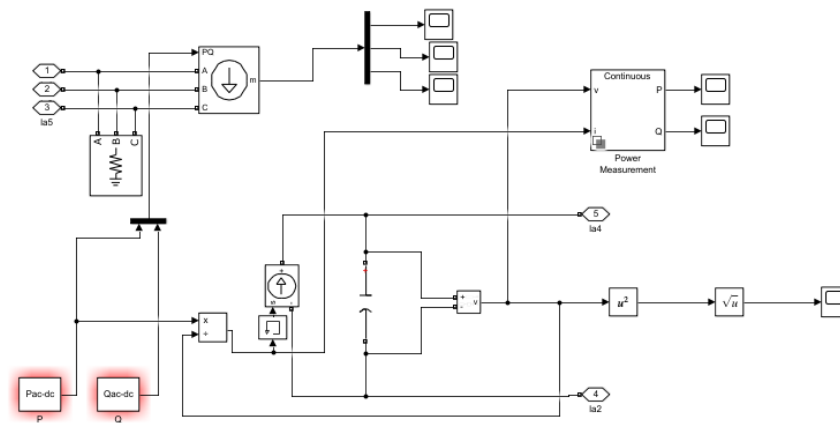


Figura 4.15: Modelo Simulink do IC

#### 4.4.2 Modelização do IC responsável pelo controlo da tensão CC

O IC pode também ser responsável pelo controlo primário da tensão CC, através de estratégias de controlo baseadas no *droop*, como foi realizado em 4.2.2 para modelar os sistemas de armazenamento de energia, através da equação (23).

$$P = P_{CA-CC} + k * (V_{CCREF} - V_{CC}) \quad (23)$$

Em que  $P_{CA-CC}$  representa a potência a ser transferida entre o lado CA e o lado CC antes da correção da tensão CC,  $V_{CCREF}$  representa a tensão CC de referência,  $V_{CC}$  representa a tensão CC medida nos terminais do IC e  $k$  representa o *droop* do conversor.

Ao contrário do caso apresentado em 4.4.1, os sistemas de armazenamento de energia utilizados não serão responsáveis pelo controlo da tensão CC, sendo utilizados modelos semelhantes aos dos módulos PV.

O modelo de IC utilizado para controlo de tensão CC é apresentado na figura 4.16.

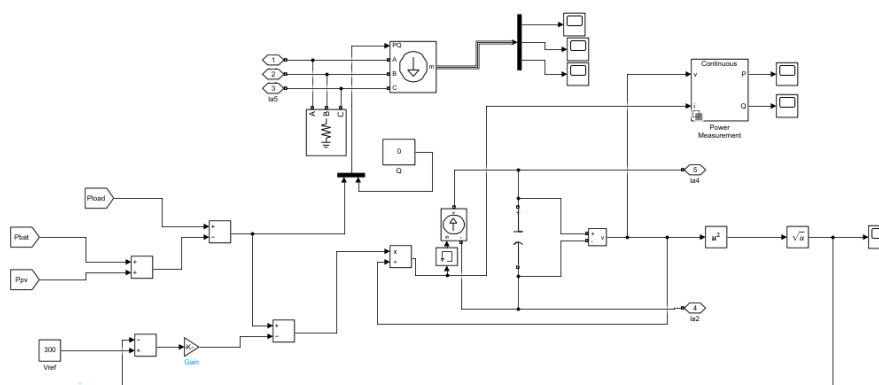


Figura 4.16: Modelo Simulink do IC

Este modelo de IC é utilizado na simulação 9 e na simulação 11

#### 4.4.3 Modelização do IC responsável pelo controlo da tensão CA

O IC pode também ser responsável pelo controlo da tensão CA. Neste caso, o IC controla a tensão através do *droop* Q-V, apresentado em 3.3. Este IC é também responsável pelo controlo de trânsito de potências entre o lado CA e o lado CC da rede.

O controlo de tensão CA no IC é realizado através da equação 24, sendo calculado o valor de  $\Delta Q$  responsável pelo controlo da tensão CA. O total de potência reativa transferida entre o lado CA e CC é o resultado da soma entre  $\Delta Q$  e de  $Q_{CA-CC}$  (equação 25).

$$V = V_{ref} - k_Q * (\Delta Q) + \Delta V \quad (24)$$

$$Q = \Delta Q + Q_{CA-CC} \quad (25)$$

Em que  $V_{ref}$  representa a tensão CA de referência, V representa a tensão CA medida nos terminais do IC e  $k_Q$  que representa o *droop* do conversor.

O modelo de IC utilizado para controlo de tensão CA é apresentado na figura 4.17.

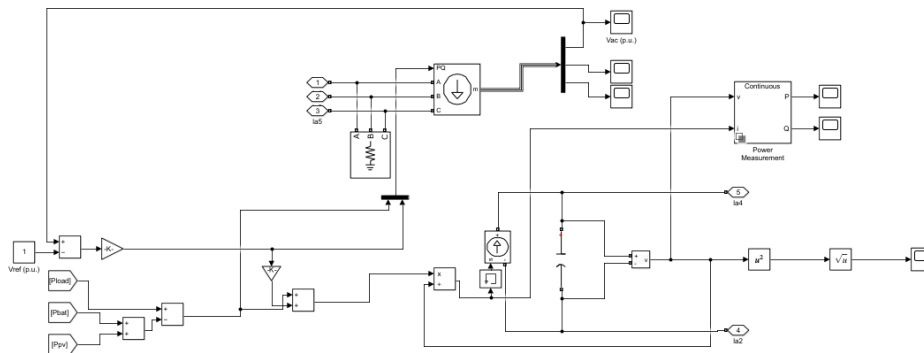


Figura 4.17: Modelo Simulink do IC

Este modelo de IC é utilizado na simulação 10 e na simulação 12.

#### 4.4.4 Modelização do IC responsável pelo controlo de frequência

O último IC a ser modelizado é responsável pela ajuda do controlo de frequência da rede CA quando esta funciona em modo isolado, através do método de controlo baseado no *droop* P-f, apresentado em 3.3. Tal como os 3 IC modelizados anteriormente é também responsável pelo controlo do fluxo de potência entre os dois lados da micro-rede.

O controlo de frequência no IC é realizado através do uso da equação 26, em que é calculado o valor de  $\Delta P$  responsável pelo controlo de frequência através da função de controlo baseado no *droop* P-f. Este valor de  $\Delta P$  terá depois de ser somado ao valor de  $P_{CA-CC}$ , como apresentado na equação 27.

$$\omega = \omega_{ref} - k_P * (\Delta P) \equiv \Delta P = \frac{\omega - \omega_{ref}}{-k_P} \quad (26)$$

$$P = P_{CA-CC} + \Delta P \quad (27)$$

O modelo de IC utilizado para controlo da frequência na rede é apresentado na figura 4.18.

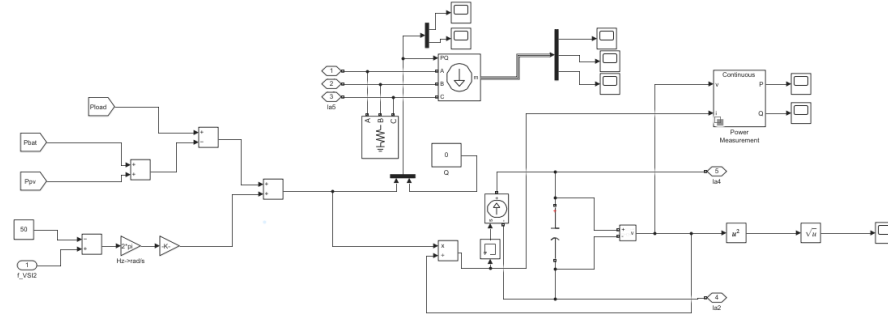


Figura 4.18: Modelo Simulink do IC

## 4.5 Conclusões

Neste capítulo foram apresentados os modelos utilizados em MatLAB/Simulink que foram utilizados para simular o comportamento e o funcionamento da micro-rede CC, CA e híbrida CA/CC no capítulo 5.

Os parâmetros utilizados para as simulações vão ser apresentados no capítulo 5.



# Capítulo 5

## Simulação e resultados

### 5.1 Introdução

Para simular o funcionamento da micro-rede híbrida foi primeiro analisado o funcionamento das micro-redes CC e CA. Posteriormente foram testados diferentes métodos de controlo através de alterações na modelização do conversor para a micro-rede híbrida em modo isolado e em modo interligado.

Neste capítulo será primeiro exposto os objetivos das simulações, os casos que serão simulados, o cenário de teste para a simulação da micro-rede CC, as simulações e uma análise aos seus resultados. Após isso será realizado o mesmo processo para as micro-redes CA e por fim para as micro-redes híbridas.

### 5.2 Simulação de micro-rede CC

A simulação da micro-rede CC em diferentes cenários foi realizada de modo a perceber o funcionamento da micro-rede. Foi analisado assim:

- Testar a capacidade de resposta da bateria para controlo primário da  $V_{CC}$ ;
- Testar a partilha de potência entre duas baterias com *droops diferentes* com controlo P-V;
- Avaliar a contribuição dos VE para a regulação da tensão CC.

Na simulação 1 foi considerado que a micro-rede CC possui apenas um módulo PV, uma bateria e uma carga. A micro-rede utilizada nesta simulação foi apresentada na figura 5.1.

Na simulação 2 foi considerado que a micro-rede CC possui apenas um módulo PV, duas baterias e uma carga. A micro-rede utilizada nesta simulação foi apresentada na figura 5.2.

Na simulação 3 e 4 foi considerado que a micro-rede CC possui apenas um módulo PV, uma bateria, um VE e uma carga. A micro-rede utilizada nesta simulação foi apresentada na figura 5.3.

O controlo da tensão na micro-rede CC é realizado através de métodos baseados no *droop* P-V, sendo que o controlo é realizado na bateria. O *droop* utilizado nas simulações 1, 2, 3 e 4 são apresentados na tabela 5.1.

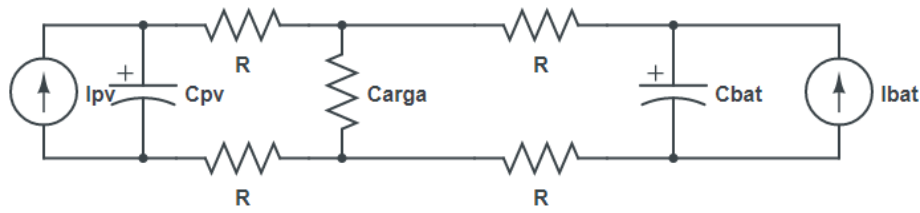


Figura 5.1: Circuito CC utilizado na simulação 1

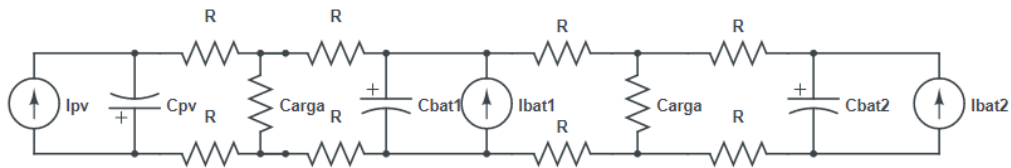


Figura 5.2: Circuito CC utilizado na simulação 2

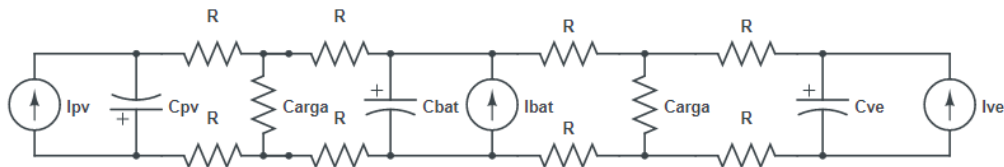


Figura 5.3: Circuito CC utilizado nas simulações 3 e 4

Tabela 5.1: *Droops* nas baterias

Simulação	Componente	Valor
$Sim_1$	Bateria	0.1
$Sim_2$	Bateria 1	0.1
$Sim_2$	Bateria 2	0.001
$Sim_3$	Bateria	0.1
$Sim_4$	Bateria	0.1

## 5.2.1 Cenários de teste e parametrização

### 5.2.1.1 Cenário de teste para simulação 1

A micro-rede CC simulada no primeiro caso é constituída apenas por um módulo PV, uma bateria e uma carga e esta simulação tem como objetivo perceber como é que o sistema reage a uma variação de carga. No anexo A é apresentada a rede utilizada e o modelo de MatLAB/Simulink utilizado.

A simulação 1 considera que existe uma alteração no valor de potência consumida pela carga aos 5 segundos. Os dados utilizados na simulação estão apresentados na tabela 5.2.

Tabela 5.2: Parâmetros para simulação 1

Modelo	Variável	$Sim_1$
Módulo PV	$P_{PV}$	5 kW
Bateria	$P_{RefBat}$	5 kW
Bateria	$V_{RefBat}$	300V
Carga antes dos 5 segundos	$P_{Carga}$	10 kW
Carga antes dos 5 segundos	$P_{Carga}$	12.5 kW

### 5.2.1.2 Cenário de teste para simulação 2

Na simulação 2 é considerado que 2 baterias com *droops* diferentes têm de partilhar potência para compensar a diferença de potência consumida na carga e produzida no módulo PV, sendo que o objetivo é analisar de que modo é que as baterias com *droops* diferentes partilham potência quando cada uma tem de fornecer mais que a sua potência de referência ( $P_{RefBat}$ ). No anexo A é apresentado o modelo de MatLAB/Simulink utilizado.

Os dados utilizados na simulação estão apresentados na tabela 5.3.

Tabela 5.3: Parâmetros para simulação 2

Modelo	Variável	$Sim_2$
Módulo PV	$P_{PV}$	5 kW
Bateria 1	$P_{RefBat1}$	5 kW
Bateria 1	$V_{RefBat}$	300V
Bateria 2	$P_{RefBat2}$	5 kW
Bateria 2	$V_{RefBat}$	300V
Carga	$P_{Carga}$	20 kW

### 5.2.1.3 Cenário de teste para simulação 3 e 4

A micro-rede CC simulada no terceiro e quarto caso possui um VE, com função de dar suporte para a realização do controlo primário de tensão. Estas duas simulações têm como objetivo perceber estudar a contribuição do VE pode ajudar no controlo de tensão da micro-rede CC. No anexo A é apresentada a rede utilizada e o modelo de MatLAB/Simulink utilizado.

Na simulação 3 é considerado que o VE ajuda a controlar a tensão da micro-rede sendo que a sua potência de referência, da bateria e do VE são suficientes para corresponder às necessidades da carga.

Os dados utilizados na simulação estão apresentados na tabela 5.4. A parametrização da curva de *droop* dos veículos elétricos é apresentada no anexo D.

Na simulação 4 é considerado que a o módulo PV e a potência de referência da bateria e do VE são insuficientes para alimentar a carga, sendo que o objetivo desta simulação é perceber de que modo é que o VE e a bateria podem partilhar potência nesta situação.

Tabela 5.4: Parâmetros para simulação 3

Modelo	Variável	$Sim_4$
Módulo PV	$P_{PV}$	5 kW
Bateria	$P_{RefBat}$	5 kW
Bateria	$V_{RefBat}$	300V
VE	$V_{RefBat}$	300V
VE	$P_{RefBat}$	5 kW
Carga	$P_{Carga}$	15 kW

Tabela 5.5: Parâmetros para simulação 3

Tabela 5.6: Parâmetros para simulação 4

Modelo	Variável	$Sim_4$
Módulo PV	$P_{PV}$	5 kW
Bateria	$P_{RefBat}$	5 kW
Bateria	$V_{RefBat}$	300V
VE	$V_{RefBat}$	300V
VE	$P_{RefVE}$	5 kW
Carga	$P_{Carga}$	20 kW

## 5.2.2 Simulações da micro-rede CC

### 5.2.2.1 Simulação 1

Como foi referido em 5.2.1.1, na simulação 1 foi considerado um cenário em que existe uma variação de carga, através de um aumento de  $P_{carga}$ . O objetivo desta simulação é perceber de que modo uma variação na potência consumida da carga altera a tensão e potência fornecida pelo módulo PV e pela bateria.

Foram obtidos gráficos relativos à potência e tensão no módulo PV, bateria e na carga e são apresentados na figura 5.4 e 5.5.

Na figura 5.4 verificamos uma diminuição no módulo da tensão, esperado com a variação da carga. Na figura 5.5 é verificado um aumento de potência na carga, compensada com um aumento de potência na bateria como seria de esperar.

### 5.2.2.2 Simulação 2

Na simulação 2 é testado uma micro-rede com 2 baterias, responsáveis pelo controlo da tensão, com *droops* diferentes, como é referido em 5.2.1.2, de modo a poder analisar de que maneira a variação do *droop* altera o comportamento do sistema. Foi considerado um caso em que  $P_{carga}$  é superior à soma de  $P_{RefBat1}$ ,  $P_{RefBat2}$  e  $P_{PV}$  de modo a analisar a partilha de potência entre as duas baterias com *droops* diferentes.

Na figura 5.6 foi apresentado o gráfico da potência fornecida em cada uma das baterias.

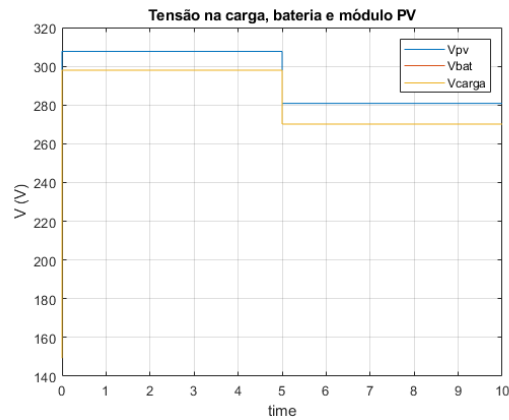


Figura 5.4: Tensão no módulo PV, bateria e carga - Simulação 1

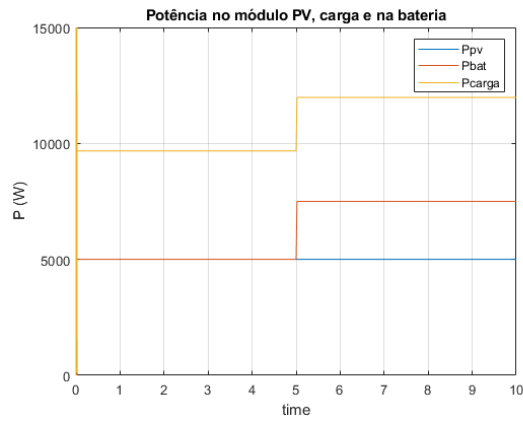


Figura 5.5: Potência no módulo PV, bateria e carga - Simulação 1

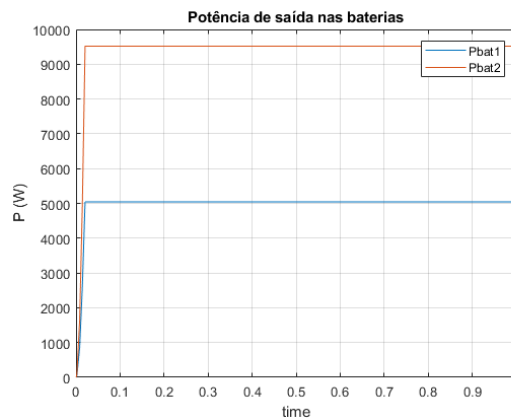


Figura 5.6: Potência fornecida pelas baterias - Simulação 2

Como se pode verificar pela figura 5.6, a bateria 2, com um *droop* menor, tem maior participação na compensação de potência, fornecendo quase 10 kW. Sendo assim, podemos concluir que para o controle de tensão CC, um *droop* menor corresponde a uma maior compensação de tensão. Esta relação pode ser também verificada através da equação (7), apresentada no capítulo 3.4.

### 5.2.2.3 Simulação 3

Na simulação 3 foi testado o desempenho da micro-rede CC com um VE a suportar o controlo primário da tensão CC. Nesta simulação é esperado que o VE ajude a regular a tensão entre os valores normalizados (270 a 330V).

Tendo em conta que a potência de carregamento de referência do VE é 5 kW (anexo D), será de esperar que este consiga fornecer à rede a diferença entre a potência consumida pela carga e a potência fornecida pela bateria e pelo PV.

Nas figuras 5.7, 5.8 e 5.9 são apresentados gráficos sobre a tensão na carga com e sem o VE, no VE e a potência transmitida pelos VE.

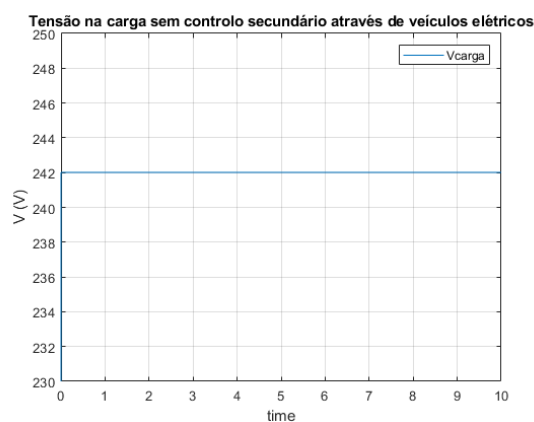


Figura 5.7: Tensão na carga sem existência de veículos elétricos - Simulação 3

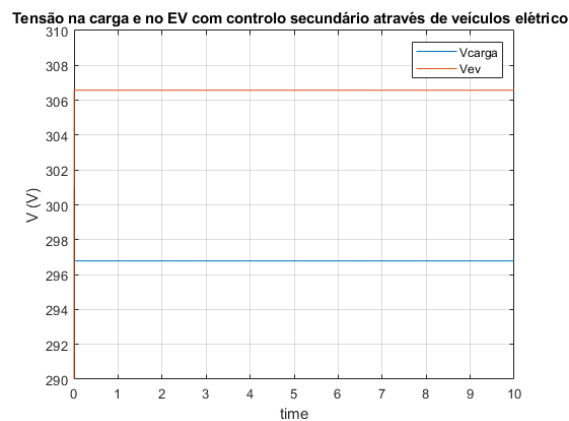


Figura 5.8: Tensão na carga e no VE com existência de veículos elétricos - Simulação 3

Na figura 5.8 e 5.9 foram apresentados gráficos da tensão na carga e no VE com e sem a participação do VE. É possível verificar que com a participação do VE, a tensão na carga é mais próxima do valor de  $V_{ref}$  (300V) do que sem o VE sem que haja alteração da potência de carregamento de referência do VE.

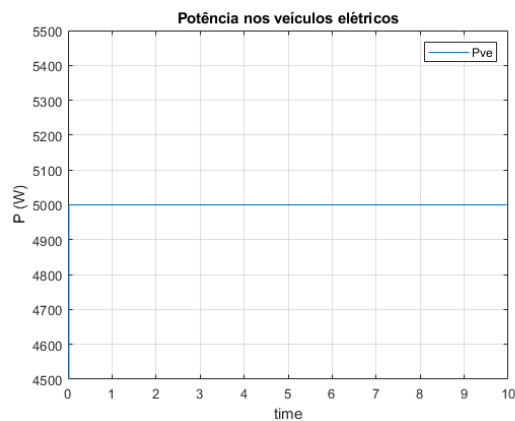


Figura 5.9: Potência transmitida pelos VE - Simulação 3

#### 5.2.2.4 Simulação 4

Na simulação 4 foi considerado um cenário em que a potência de referência do carregamento do VE não é suficiente para fornecer a potência em falta na rede (10 kW). O objetivo desta simulação é testar como é que os VE partilham potência com a bateria de modo a alimentar a rede.

Nas figuras 5.10 e 5.11 são apresentados os gráficos da potência fornecida pelo VE e pela bateria e tensão no VE.

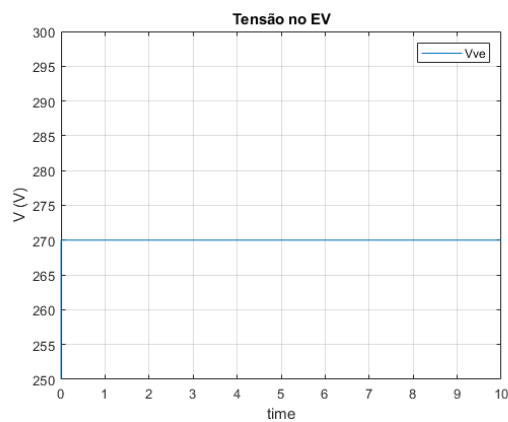


Figura 5.10: Tensão no VE - Simulação 4

Como se pode verificar pelas figuras 5.10 e 5.11, o VE controla a tensão até esta entrar nos valores da banda morta da parameterização da curva de *droop* do VE. Sendo assim, a tensão CC é controlada pelo VE.

Considerando que o *droop* da bateria é alterado para 0.001, são analisados os gráficos da tensão no VE e da potência fornecida pelo VE e pela bateria (apresentados nas figuras 5.12 e 5.13).

Nas figuras 5.12 e 5.13, a tensão CC é controlada pela bateria, sendo que esta impõe um tensão dentro do valor da banda morta do VE. Devido a isto, o VE não absorve mais potência da rede para além dos 5 kW que absorve quando a tensão da rede está entre os 270 e os 330V (10% da tensão nominal).

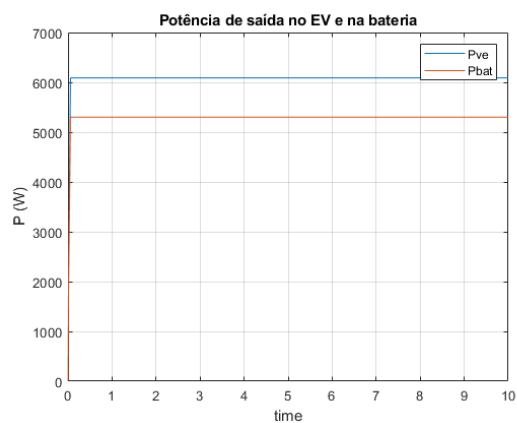


Figura 5.11: Potência transmitida pelos VE e pela bateria - Simulação 4

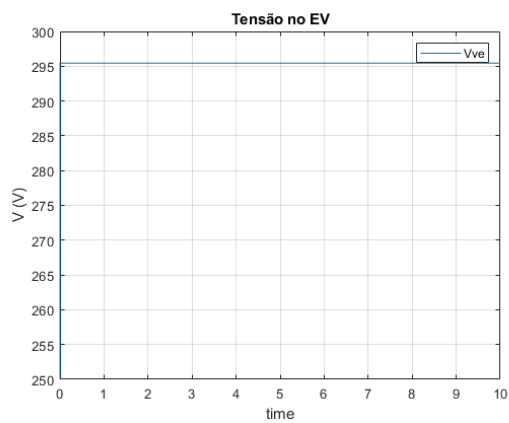


Figura 5.12: Tensão no VE - Simulação 4

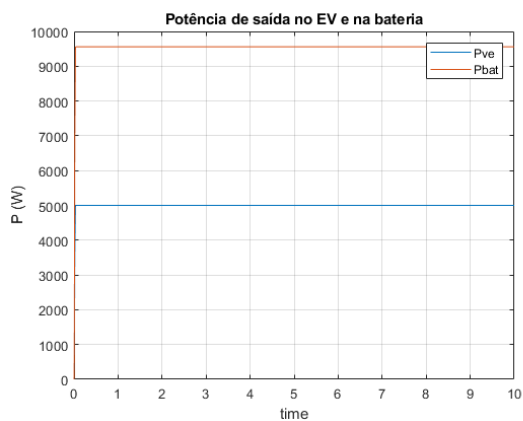


Figura 5.13: Potência transmitida pelos VE e pela bateria - Simulação 4

### 5.3 Simulação de micro-rede CA

Para simular o funcionamento da micro-rede CA, interligada com a rede principal, foi desenhada uma rede simples com 3 barramentos, 3 cargas, 1 VSI e um PQ *inverter*. O diagrama

unifilar da rede utilizada é apresentado na figura 5.14 e o modelo de Matlab/Simulink utilizado é apresentado no anexo B. Os parâmetros das linhas está descritos no anexo D.

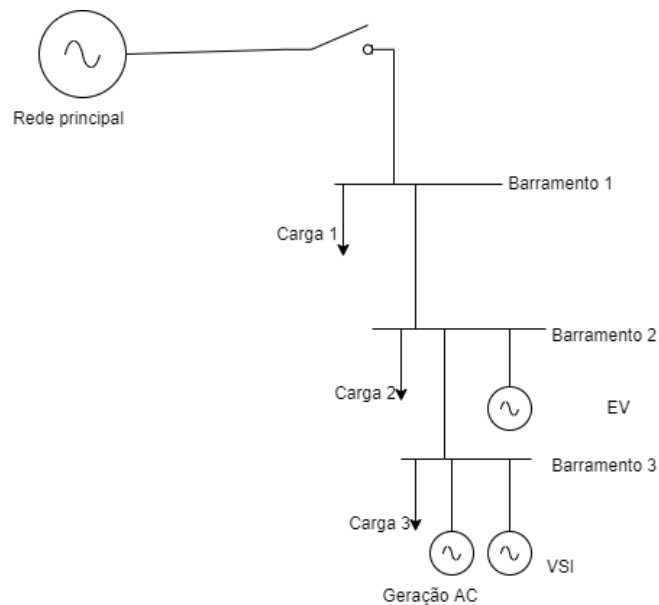


Figura 5.14: Diagrama unifilar da micro-rede CA

O objetivo das simulações da micro-rede CA são os seguintes:

- Perceber como uma variação de carga altera o funcionamento do sistema CA;
- Perceber as diferenças de funcionamento entre o modo de operação isolado e o modo de operação interligado com a rede principal;
- Entender de que modo um VE pode suportar o controle primário de frequência.

A tabela 5.7 apresenta as cargas utilizadas nas simulações da micro-rede CA. Foi considerado que todas as cargas possuem um fator de potência de 0,8. São considerados valores da tensão em p.u., sendo o valor da tensão base 380 V.

Tabela 5.7: Parâmetros das cargas utilizadas na simulação CA

Carga	P (W)	Q (VAR)
Carga do barramento 1	10000	7500
Carga do barramento 2	20000	15000
Carga do barramento 3	40000	30000

### 5.3.1 Cenários de teste e parametrização

#### 5.3.1.1 Cenário de teste para simulação 5

Na simulação 5 é considerado que a micro-rede CA está a funcionar em modo interligado com a rede principal. Aos 25 segundos de simulação a carga do barramento 3 é desligada.

Os dados utilizados na simulação estão apresentados na tabela 5.8.

Tabela 5.8: Parâmetros para simulação 5

Modelo	Variável	<i>Sim</i> <sub>5</sub>
Geração aos 0 segundos	$P_{ger}$	30 kW
Geração aos 0 segundos	$Q_{ger}$	20 kVAR
Carga antes dos 25 segundos	$P_{Carga}$	70 kW
Carga depois dos 25 segundos	$P_{Carga}$	30 kW
Carga antes dos 25 segundos	$Q_{Carga}$	52,5 kVAR
Carga depois dos 25 segundos	$Q_{Carga}$	30 kVAR

### 5.3.1.2 Cenário de teste para simulação 6

Na simulação 6 foi testado o comportamento da micro-rede CA quando o seu modo de operação transita de interligado para isolado aos 25 segundos, com as 3 cargas em funcionamento.

Os dados utilizados na simulação estão apresentados na tabela 5.9.

Tabela 5.9: Parâmetros para simulação 6

Modelo	Variável	<i>Sim</i> <sub>6</sub>
Geração aos 0 segundos	$P_{ger}$	40 kW
Geração aos 0 segundos	$Q_{ger}$	30 kVAR
Carga	$P_{Carga}$	70 kW
Carga	$Q_{Carga}$	52,5 kVAR

### 5.3.1.3 Cenário de teste para simulação 7

Na simulação 7 foi testado o comportamento da micro-rede CA quando o seu modo de operação transita de interligado para isolado com a existência de um VE para suportar o controle primário da frequência .

Os dados utilizados na simulação estão apresentados na tabela 5.10.

Tabela 5.10: Parâmetros para simulação 7

Modelo	Variável	<i>Sim</i> <sub>7</sub>
Geração aos 0 segundos	$P_{ger}$	40 kW
Geração aos 0 segundos	$Q_{ger}$	30 kVAR
Carga	$P_{Carga}$	70 kW
Carga	$Q_{Carga}$	52,5 kVAR

### 5.3.2 Simulações da micro-rede CA

#### 5.3.2.1 Simulação 5

Como foi referido em 5.3.1.1, a carga do barramento 3 é desligada aos 25 segundos de simulação. Neste caso, a rede funciona sempre em modo interligado com a rede principal. O objetivo desta simulação é perceber de que modo a tensão varia com uma diminuição de carga.

Na figura 5.15 é apresentado o gráfico da tensão medida no barramento 3.

Na figura 5.15 é possível verificar que a tensão no barramento 3, onde a carga é desligada, aumenta com a redução de  $P_{Carga}$  e de  $Q_{Carga}$ , como seria de esperar. A tensão é muito próxima de 1 p.u. durante a simulação.

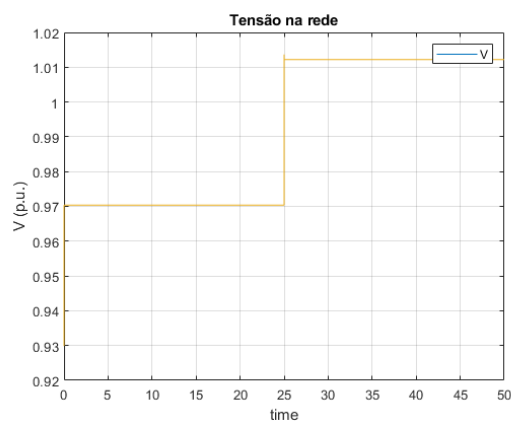


Figura 5.15: Tensão no barramento 3 da micro-rede CA - Simulação 5

#### 5.3.2.2 Simulação 6

Tal como foi apresentado em 5.3.1.2, a micro-rede é desligada da rede principal aos 25 segundos. A partir dos 25 segundos a micro-rede CA será responsável por alimentar sozinha as cargas do micro-rede. O objetivo desta simulação é perceber como a micro-rede responde à transição entre o modo de operação interligado com a rede principal e o modo de operação isolado.

Na figura 5.16 a 5.18 são apresentados gráficos sobre a frequência da rede, imposta pelo VSI, da tensão na rede e da potência ativa transferida pelo VSI.

Como se pode verificar pela figura 5.17 a frequência diminui quando a micro-rede passa a funcionar isolado, pois a partir deste momento a potência consumida na carga vai ser superior à potência gerada na micro-rede.

Em relação ao VSI, será de esperar que controle a frequência quando a rede funciona em modo isolado. Sendo assim, até aos 25 segundos, a figura 5.18 representa a potência nominal da máquina síncrona, visto ter sido modelizado para apenas suportar o controlo de frequência quando  $\Delta f$  é diferente de 0. A partir dos 25 segundos o VSI é responsável pelo controlo de frequência, tendo de compensar o excesso de carga existente no sistema. O valor de  $\Delta P$ , injetado na rede para controlar a frequência é representado pela potência de saída do VSI.

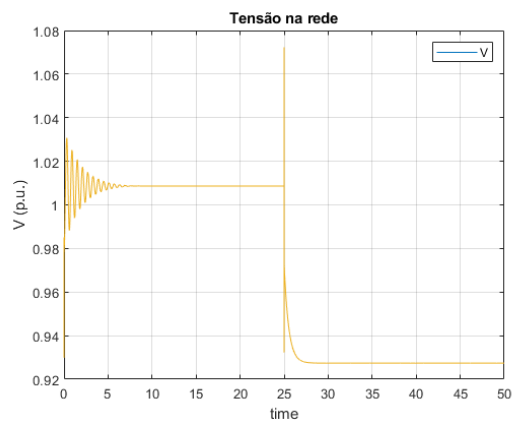


Figura 5.16: Tensão no barramento 3 da micro-rede CA - Simulação 6

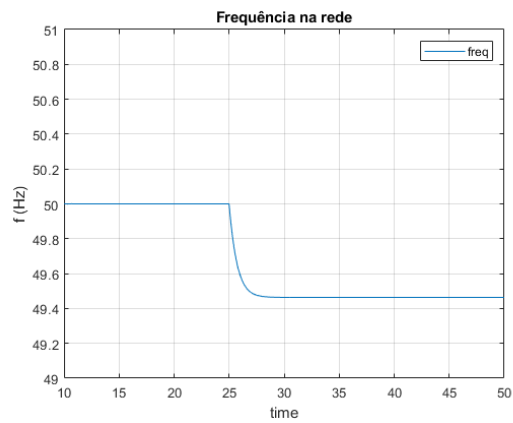


Figura 5.17: Frequência da rede - Simulação 6

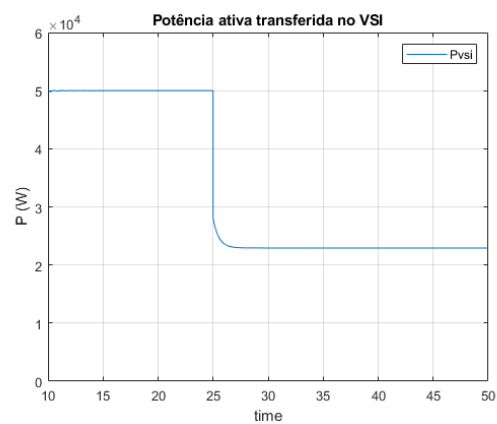


Figura 5.18: Potência transferida pelo VSI - Simulação 6

### 5.3.2.3 Simulação 7

Tal como foi apresentado em 5.3.1.3, a rede passa a trabalhar em modo isolado aos 25 segundos. Neste cenário são implementados VE que suportam o controlo primário de frequência.

Na figura 5.19 é apresentado o gráfico da frequência da rede, imposta pelo VSI.

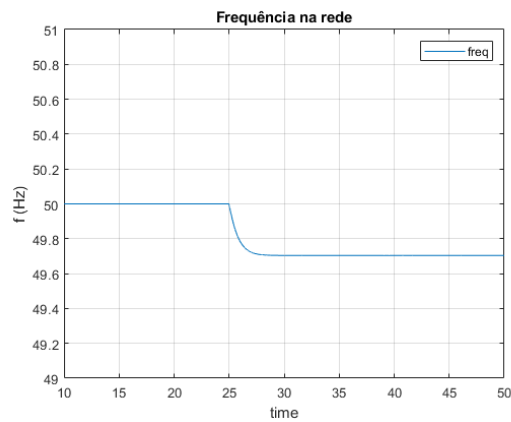


Figura 5.19: Frequência da rede - Simulação 7

Como se pode verificar em 5.19, tal como acontece na simulação 6, existe uma diminuição de frequência quando a micro-rede começa a funcionar em modo isolado. No entanto, comparando com a figura 5.17, sem o VE, é possível verificar que a frequência da rede na simulação está mais próxima de 50 Hz do que na simulação 6, podendo-se concluir que os veículos elétricos ajudam no controlo dos desvios de frequência.

## 5.4 Simulação de micro-rede híbrida CA/CC

Para as simulações do controlo da micro-rede híbridas foi utilizada uma micro-rede CA com uma carga, um módulo de geração local e um VSI bem como uma micro-rede CC com uma bateria, uma carga e um módulo PV, interligadas por um IC. O diagrama unifilar da rede utilizada é apresentado na figura 5.20 e o modelo utilizado em MatLAB/Simulink é apresentado no anexo C.

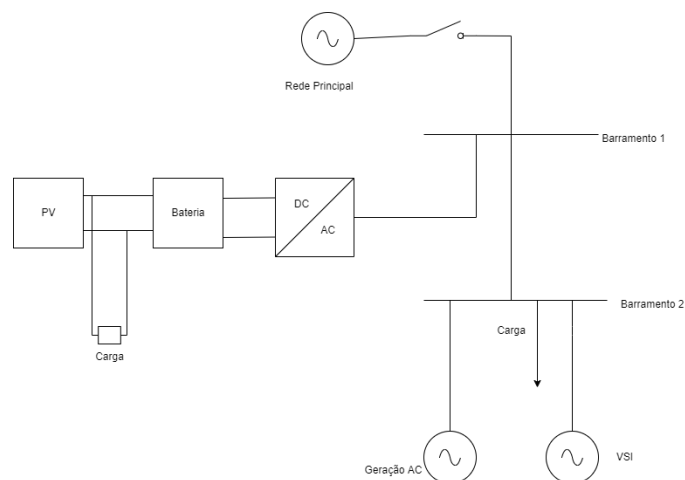


Figura 5.20: Diagrama unifilar da micro-rede híbrida CA/CC utilizado

O comportamento do IC foi testado através de simulações no modo de operação interligado e isolado, com potência de saída do IC a ser despachada ou não sendo despachada e com potência a ser transferida do lado CA para o lado CC e com potência a ser transferida do lado CC para o lado CA.

A simulação da micro-rede híbrida CA/CC tem como objetivos:

- Entender de que modo o IC pode controlar a tensão CC;
- Entender de que modo o IC pode controlar a tensão CA;
- Entender de que modo o IC pode controlar a frequência;

### 5.4.1 Cenários de teste para o modo de operação interligado

#### 5.4.1.1 Cenário de teste para simulação 8

Na simulação 8 foi considerado que o IC tem um trânsito de potências constante e definido, transferindo potência do lado CA da micro-rede para o lado CC. O conversor é responsável pela transferência de potência ativa entre as duas micro-redes, sendo responsável pelo balanço de potência entre o lado CA e CC da micro-rede.

Neste caso, o conversor foi inicialmente modelizado para transferir potência ativa constante entre o lado CA e o lado CC da micro-rede. A tensão do barramento CC é controlada pela bateria do lado CC e a tensão e frequência do barramento CA é controlado pelos RED de geração do barramento CA, pelo VSI e pela rede principal.

Os dados utilizados na simulação estão apresentados na tabela 51 e o IC utilizado é apresentado em 4.4.1.

Tabela 5.11: Parâmetros para simulação 8

Modelo	Variável	$Sim_8$
Módulo PV	$P_{PV}$	5 kW
Bateria	$P_{Bat}$	5 kW
Bateria	$V_{RefBat}$	300V
Bateria	$k_{Bat}$	0.1
Geração CA	$P_{gerCA}$	30 kW
Geração CA	$Q_{gerCA}$	10 kVAR
Carga CC	$P_{CargaDc}$	20 kW
Carga CA	$P_{CargaAc}$	40 kW
Carga CA	$Q_{CargaAc}$	30 kVAR
Conversor	$P_{CA-CC}$	10 kW

#### 5.4.1.2 Cenário de teste para simulação 9

Na simulação 9 foi considerado que o IC é responsável pelo controle da tensão do barramento CC para além de controlar o fluxo de potência entre as duas micro-redes.

Os dados utilizados na simulação 9 estão apresentados na tabela 5.12 e o modelo do IC utilizado é apresentado em 4.4.2.

Tabela 5.12: Parâmetros para simulação 9

Modelo	Variável	$Sim_9$
Módulo PV	$P_{PV}$	5 kW
Geração CA aos 0 segundos	$P_{gerCA}$	30 kW
Geração CA aos 0 segundos	$Q_{gerCA}$	10 kVAR
Carga CC	$P_{CargaDc}$	20 kW
Carga CA	$P_{CargaAc}$	40 kW
Carga CA	$Q_{CargaAc}$	30 kVAR
Conversor	$V_{RefIC}$	300V
Conversor	$k_{IC}$	0.1

### 5.4.1.3 Cenário de teste para simulação 10

Na simulação 10 foi considerado que o IC é responsável pelo controlo da tensão do barramento CA. Nesta simulação é considerado que o IC irá transferir potência do lado CC para o lado CA da micro-rede. Aos 5 segundos de simulação existe uma alteração no consumo da carga CA, passando a consumir o dobro da potência ativa e reativa.

Os dados utilizados na simulação estão apresentados na tabela 5.13.

Tabela 5.13: Parâmetros para simulação 10

Modelo	Variável	$Sim_{10}$
Módulo PV	$P_{PV}$	5 kW
Geração CA	$P_{gerCA}$	30 kW
Geração CA	$Q_{gerCA}$	10 kVAR
Carga CC	$P_{CargaDc}$	10 kW
Carga CA até aos 10 segundos	$P_{CargaAc}$	40 kW
Carga CA até aos 10 segundos	$Q_{CargaAc}$	30 kVAR
Carga CA após os 10 segundos	$P_{CargaAc}$	80 kW
Carga CA após os 10 segundos	$Q_{CargaAc}$	60 kVAR
Conversor	$V_{RefIC}$	1 p.u.
Conversor	$k_{IC}$	0.0001

De modo a garantir que o lado CA recebe potência reativa do lado CC da rede, é considerado que o IC usado nesta simulação tem um fator de potência de 0,8.

## 5.4.2 Cenário de teste para modo de Operação isolado

### 5.4.2.1 Cenário de teste para simulação 11

Na simulação 11 foi considerado um cenário semelhante ao considerado na simulação 8, com o IC a ser responsável pelo controlo da tensão CC, no entanto foi considerado que a rede passa a

funcionar em modo isolado aos 15 segundos de simulação.

Os parâmetros utilizados na simulação 11 são apresentados na tabela 5.14.

Tabela 5.14: Parâmetros para simulação 11

Modelo	Variável	$Sim_{11}$
Módulo PV	$P_{PV}$	5 kW
Geração CA aos 0 segundos	$P_{gerCA}$	50 kW
Geração CA aos 0 segundos	$Q_{gerCA}$	30 kVAR
Carga CC	$P_{CargaDc}$	20 kW
Carga CA	$P_{CargaAc}$	40 kW
Carga CA	$Q_{CargaAc}$	30 kVAR
Conversor	$V_{RefIC}$	300V
Conversor	$k_{IC}$	0.1

#### 5.4.2.2 Cenário de teste para simulação 12

Para a simulação número 12 foi considerado que o IC é responsável pelo controlo da tensão CA, sendo que a micro-rede começa a funcionar em modo isolado a partir dos 15 segundos de simulação.

Os parâmetros utilizados na simulação 12 são apresentados na tabela 5.15.

Tabela 5.15: Parâmetros para simulação 12

Modelo	Variável	$Sim_{12}$
Módulo PV	$P_{PV}$	5 kW
Geração CA aos 0 segundos	$P_{gerCA}$	30 kW
Geração CA aos 0 segundos	$Q_{gerCA}$	10 kVAR
Carga CC	$P_{CargaDc}$	10 kW
Carga CA	$P_{CargaAc}$	40 kW
Carga CA	$Q_{CargaAc}$	30 kVAR
Conversor	$V_{RefIC}$	1 p.u.
Conversor	$k_{IC}$	0.0001

#### 5.4.2.3 Cenário de teste para simulação 13

Para a simulação número 13 foi considerado que o IC é responsável pelo controlo da frequência, sendo que a micro-rede começa a funcionar em modo isolado a partir dos 15 segundos de simulação.

Os parâmetros utilizados na simulação 13 são apresentados na tabela 5.16.

Tabela 5.16: Parâmetros para simulação 13

Modelo	Variável	$Sim_{13}$
Módulo PV	$P_{PV}$	5 kW
Geração CA aos 0 segundos	$P_{gerCA}$	30 kW
Geração CA aos 0 segundos	$Q_{gerCA}$	30 kVAR
Carga CC	$P_{CargaDc}$	10 kW
Carga CA	$P_{CargaAc}$	40 kW
Carga CA	$Q_{CargaAc}$	30 kVAR
Conversor	$f_{RefIC}$	50 Hz
Conversor	$k_{IC}$	$1 * 10^{-5}$

### 5.4.3 Simulações das micro-redes híbridas em modo interligado

#### 5.4.3.1 Simulação 8

Na simulação 8 foi considerado que a potência de saída do IC é despachada, sendo que existe fluxo de potência do lado CA para o lado CC da rede. Não havendo alterações a nível da carga é de esperar que a bateria do lado CC consiga realizar o controlo da tensão CC e que o VSI seja capaz de controlar a frequência e a tensão do lado CA da rede.

Foram obtidos dados sobre a frequência na rede, a tensão CC e a potência ativa transferida pela rede principal e pelo IC e a potência reativa transferida pela rede principal e apresentados em gráficos da figura 5.21 a 5.24. Estes gráficos serão usados como termo de comparação para as simulações 9 e 10.

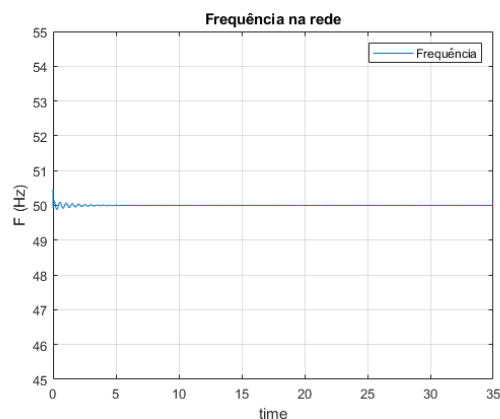


Figura 5.21: Frequência da rede CA - Simulação 8

Como se pode verificar pela figura 5.22 e 5.23, a rede principal transfere potência para a micro-rede, de modo a garantir que o balanço entre a geração e o consumo, referido em 3.5 (equações 10 e 11) é garantido ao longo da simulação. A rede principal é também responsável pela estabilidade da frequência durante a simulação.

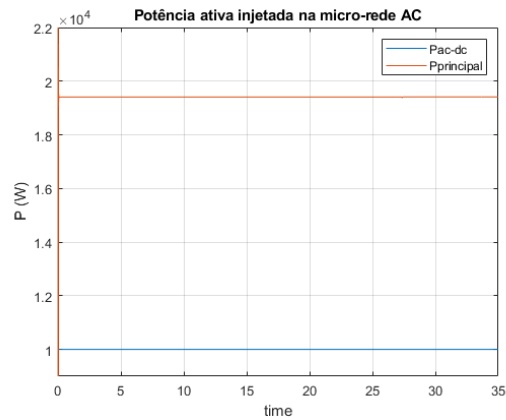


Figura 5.22: Potência ativa transferida no IC e fornecida pela rede principal - Simulação 8

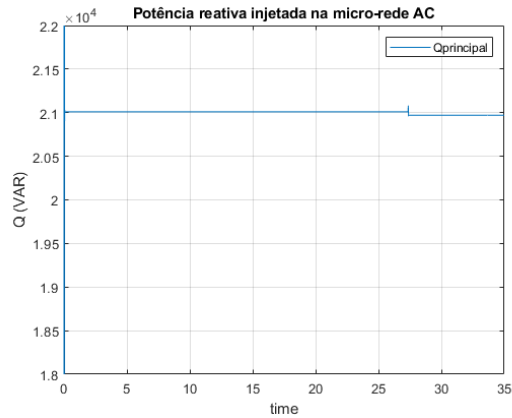


Figura 5.23: Potência reativa fornecida pela rede principal - Simulação 8

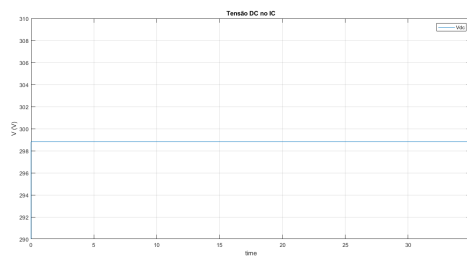


Figura 5.24: Tensão CC no IC - Simulação 8

### 5.4.3.2 Simulação 9

Na simulação 9 foi considerado que o IC é responsável pelo controle da tensão CC para além de garantir o fluxo de potência entre o lado CA e o lado CC.

Foram obtidos dados sobre o fluxo de potência ativa entre o lado CA e o lado CC da rede e sobre a tensão CC e CA, sendo apresentados nas figuras 5.25, 5.26 e 5.27.

O IC controla a tensão CC através do mesmo método que a bateria na simulação 8, logo seria de esperar que o gráfico da tensão CC, apresentado em 5.26 fosse semelhante ao gráfico da tensão

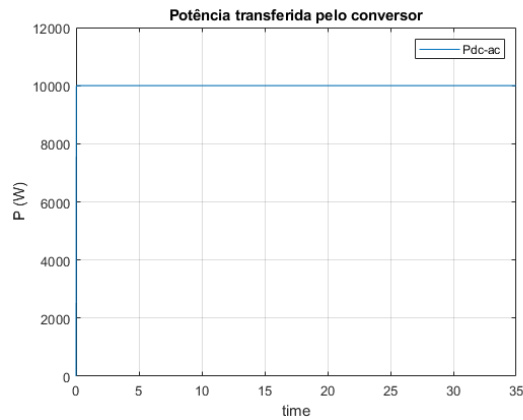


Figura 5.25: Potência ativa transferida no IC - Simulação 9

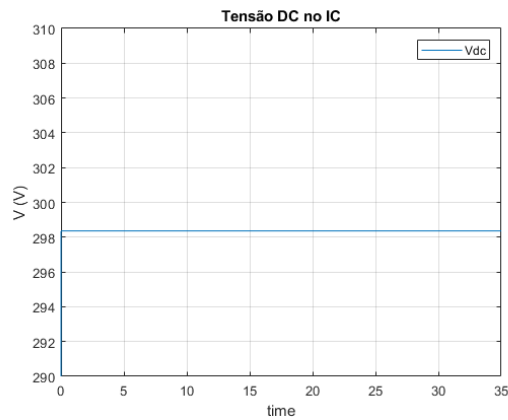


Figura 5.26: Tensão CC no IC - Simulação 9

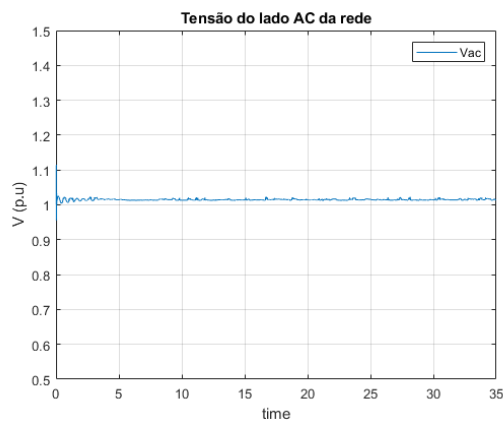


Figura 5.27: Tensão CA no IC - Simulação 9

CC apresentado na simulação 8.

Como se pode verificar pela figura 5.25, o IC transfere a mesma potência entre o lado CA e o lado CC que transfere na simulação 8, pois apesar de nesta simulação a potência de saída do IC não ser despachada, a situação é semelhante.

### 5.4.3.3 Simulação 10

Na décima simulação foi modelizado um IC responsável pelo controlo da tensão do lado CA, tendo em conta que existe uma variação no valor da carga aos 5 segundos.

Na figuras 5.28 é apresentado o gráfico da tensão CA na rede.

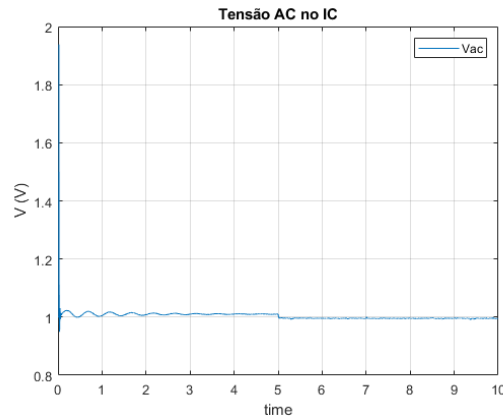


Figura 5.28: Tensão CA no IC - Simulação 10

Analisando a figura 5.28 é possível verificar que o IC juntamente com a rede principal conseguem controlar a tensão AC independentemente de ter existido uma alteração de carga.

## 5.4.4 Simulações das micro-redes híbridas em modo isolado

### 5.4.4.1 Simulação 11

Na simulação 11 foi utilizado o mesmo IC utilizado na simulação 9, responsável pelo controlo da tensão CC e pelo controlo de fluxo de potência entre o lado CA e o lado CC. A rede passa a funcionar em modo ilha aos 15 segundos de simulação.

Nas figuras 5.29 a 5.32 são apresentados gráficos da frequência na rede, tensão CA e CC e do fluxo de potência ativa transferida entre o lado CA e CC da rede. O gráfico da frequência na rede e da tensão Ac no IC serão usados como métodos de comparação para a simulação 12 e 13.

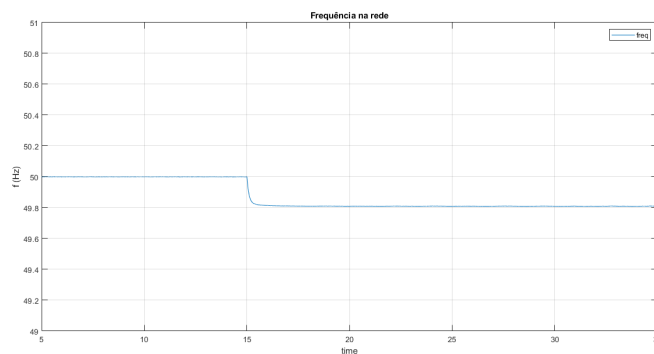


Figura 5.29: Frequência da rede - Simulação 11

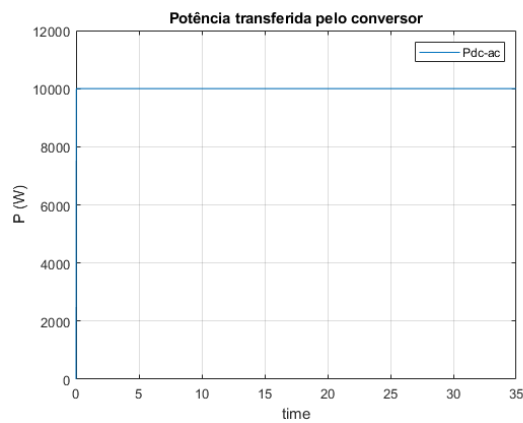


Figura 5.30: Potência ativa transferida no IC - Simulação 11

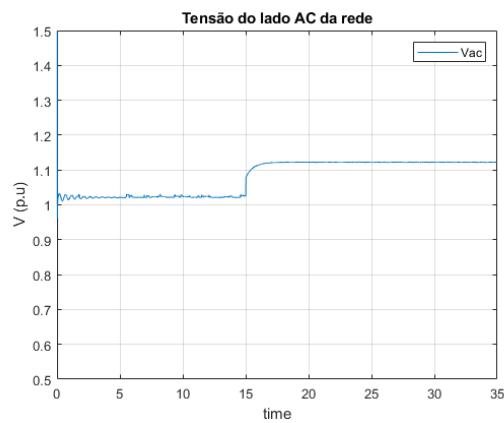


Figura 5.31: Tensão CA no IC - Simulação 11

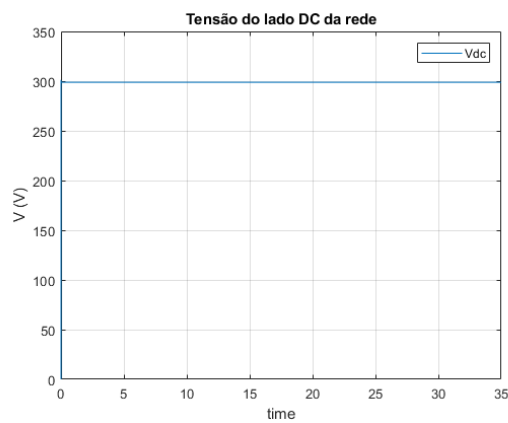


Figura 5.32: Tensão CC no IC - Simulação 11

Tal como era esperado, pode-se observar na figura 5.29 e na figura 5.31 que o IC modelizado para esta simulação nao possui nenhum mecanismo para regular a tensão CA ou a frequência. Estes gráficos serão utilizados nas simulações 12 e 13 como método de comparação

É possível concluir através das figuras 5.30 e 5.32 que o facto da rede transitar para o modo de funcionamento isolado não influencia o controlo da tensão CC no IC.

#### 5.4.4.2 Simulação 12

O IC utilizado na simulação 12 é igual ao utilizado na simulação 10, sendo assim responsável pelo controlo da tensão CA, no entanto, tal como na simulação 11, a micro-rede é desacoplada da rede principal aos 15 segundos de simulação.

Na figura 5.33 é apresentado o gráfico que representa a tensão CA na rede.

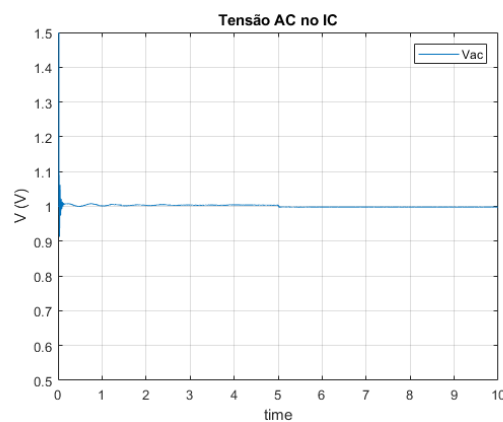


Figura 5.33: Tensão CA no IC - Simulação 12

Como se pode verificar pela figura 5.33, a tensão CA é controlada pelo IC. Comparando com a figura 5.31, obtida numa simulação em que o IC não controla a tensão AC, podemos verificar que os desvios e tensão em relação à tensão de referência (1 p.u.) são menores quando há controlo da tensão CA no IC.

#### 5.4.4.3 Simulação 13

Para a simulação 13 foi modelizado um IC com capacidade de ajudar na regulação da frequência da rede, para além de garantir o fluxo de potências entre o lado CA e o lado CC da micro-rede.

Nesta simulação foram obtidos gráficos do fluxo de potência ativa entre o lado CC e o lado CA da rede, bem como da frequência da rede, sendo que estes são apresentados em 5.34 e 5.35.

Como se pode verificar na figura 5.34, o IC regula a frequência de modo a aproximar esta do valor de referência (50 Hz). Seria possível aproximar ainda mais a frequência deste valor, no entanto isso iria requerer que fosse ainda transferida mais potência do lado CC para o lado CA da rede e, como se pode verificar em 5.35, o IC já transfere um valor próximo de 40 kW quando a rede funciona em modo isolado, o que já coloca os sistemas de armazenamento de energia, nomeadamente baterias, a terem de descarregar grande parte da sua capacidade.

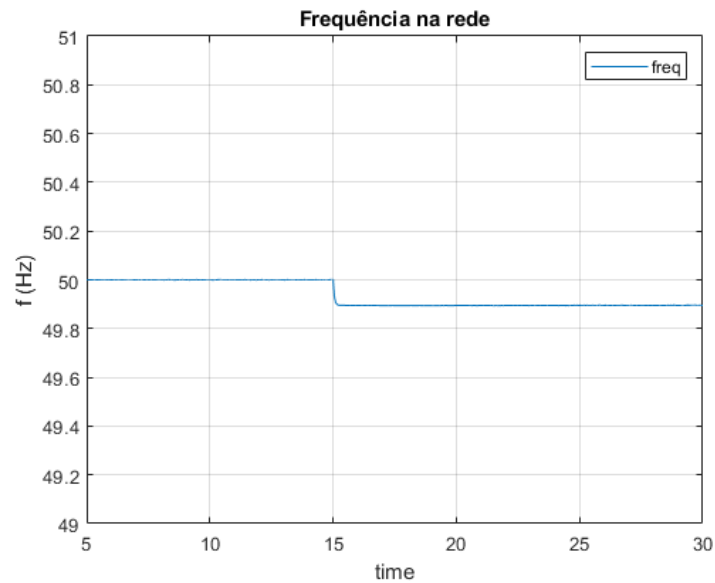


Figura 5.34: Frequência da rede - Simulação 13

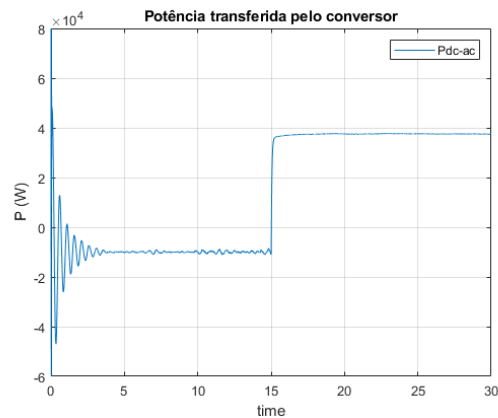


Figura 5.35: Potência ativa transferida no IC - Simulação 13

## 5.5 Conclusões

A simulação e análise de diferentes tipos de micro-rede (CC, CA e híbrida) e de diferentes tipos de inversores no caso específico da micro-rede híbrida permitiu que fossem obtidas as seguintes conclusões:

- Um aumento do consumo da carga nas micro-redes CC e CA leva a uma diminuição no módulo da tensão na rede. Uma diminuição no valor do consumo da carga tem como resposta um aumento da tensão na rede.
- Quando a micro-rede CC possui 2 baterias, a bateria com maior capacidade (representada pela bateria com menor *droop*) terá mais responsabilidade no controlo da tensão CC, fornecendo mais potência à rede.

- A rede principal controla a frequência da micro-rede CA ou híbrida quando esta funciona em modo interligado com a rede principal.
- A micro-rede transitar entre modo de operação, de interligado para isolado, leva a que a frequência na rede diminua.
- O VSI apenas ajuda a controlar a frequência da rede quando esta está isolada da rede principal. A potência de saída do VSI em modo interligado representa a potência nominal da máquina síncrona que o ajuda a modelizar.
- A existência de VEs no lado CC e no lado CA da rede suportam o controlo primário da tensão do lado CC e da frequência.
- A tensão CC da micro-rede híbrida não é afetada por esta estar a funcionar em modo interligado ou isolado.
- O controlo da frequência no IC pode ser realizado através de um método de controlo baseado no *droop*. Uma diminuição no *droop* P-f origina uma maior capacidade de controlo de frequência. No entanto esta correção acontece devido a uma maior transferência de potência do lado CC para o lado CA, o que pode não ser possível consoante o estado de carregamento das baterias.
- O controlo de tensão CA é realizado pela rede principal quando esta funciona em modo interligado. No entanto, quando funciona em modo isolado, o IC pode controlar a tensão CA através de um método de controlo baseado no *droop*. Uma diminuição no *droop* Q-V origina uma maior capacidade de controlo da tensão CA, no entanto um *droop* superior significa também que existe mais potência a ser transferida do lado CC para o lado CA, o que pode colocar a bateria sobre stress.

## Capítulo 6

# Conclusões e Trabalho Futuro

### 6.1 Sumário

Nos primeiros três capítulos desta dissertação foi apresentado um contexto teórico e global para contextualizar o trabalho realizado nos capítulos seguintes. No capítulo 1 foram propostos objetivos que serão analisados em 6.2. No capítulo 2 foi abordada a composição e as diferentes topologias de micro-redes existentes, de modo a contextualizar o trabalho. O capítulo 3 foi mais explorado, sendo que foram abordadas algumas estratégias de controle para as micro-redes CC, CA e híbridas.

O capítulo 4 é um dos principais capítulos desta dissertação, visto terem sido expostos os modelos usados em MatLAB/Simulink desenvolvidos e analisados na obtenção de resultados, bem como uma explicação de cada modelo.

No capítulo 5 foram apresentadas os testes a realizar durante esta dissertação e são expostos os resultados obtidos com estes testes. Foram realizados testes para diferentes situações no caso da micro rede CC e da micro-rede CA e foram testados diferentes conversores de interligação no caso das micro-redes híbridas CA/CC. No final do capítulo 5 foram apresentadas algumas conclusões obtidas através da análise dos resultados de cada cenário.

Nos testes realizados para a micro-rede CC, foi testado o comportamento da tensão CC quando existe variação da carga, a partilha de potência entre duas baterias com diferentes capacidades de controle e de que modo a existência de veículos elétricos pode suportar o controle da tensão CC.

Nos testes realizados para a micro rede CA foi testado o comportamento da frequência quando existe uma variação de carga e quando existe uma transição do modo de operação, bem como a capacidade dos veículos elétricos de suportarem o controle primário de frequência.

Os testes realizados para a micro-rede híbrida CC/CA tiveram como objetivo perceber de que modo o IC pode controlar a tensão CC, CA e a frequência da micro-rede.

## 6.2 Satisfação dos Objectivos

No capítulo 1.2 foram propostos objetivos a alcançar com a realização desta dissertação. Foi assim alcançado o principal objetivo, isto é, o estudo e simulação de micro-rede híbridas CA/CC com recurso a MatLAB/Simulink.

Foram também alcançados objetivos secundários como a caracterização das diferentes topologias de micro-rede ( capítulo 2.3), identificação de estratégias de controlo para micro-redes (capítulo 3) e modelização de micro-redes CA, CC e CA/CC em MatLAB/Simulink (capítulo 4) e estudo do impacto de diferentes estratégias de controlo nas micro-redes (capítulo 5).

## 6.3 Trabalho Futuro

O estudo de micro-redes híbridas é essencial para o futuro do desenvolvimento das redes de distribuição. Na última década o estudo do controlo de micro-redes híbridas tem sido aprofundado com diversos estudos e artigos, no entanto o controlo destas micro-redes ainda está bastante sub-desenvolvido quando comparado com as micro-redes CA. Esta dissertação oferece diretrizes para futuro trabalhos na área de controlo de micro-redes híbridas CA/CC, nomeadamente:

- A contextualização apresentada no capítulo 2 e 3 poderá ajudar novos estudos e dissertações a entender as diferentes topologias, vantagens e métodos de controlo de micro-rede híbridas;
- As simulações podem ajudar a perceber o comportamento da frequência e tensão CA e CC da micro-rede híbrida dependendo do controlo escolhido no IC;
- A modelização de componentes em MatLAB/Simulink que permitem simular o comportamento de uma rede real;
- A influência do valor do *droop* na potência de cada componente no controlo da frequência ou tensão.

Esta dissertação pode, no futuro, ser melhorada, através da:

- Representação a dinâmica do barramento CC dos conversores;
- Inclusão de estratégias adicionais no IC de modo a melhorar a qualidade de onda;
- Inclusão de controlo secundário no IC;
- Teste em ambiente laboratorial de uma micro-rede híbrida.

## Anexo A

# Micro-rede CC

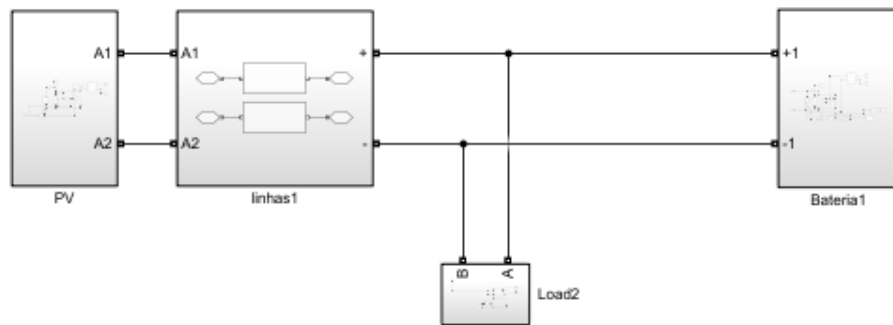


Figura A.1: Modelo MatLab/simulink utilizado na simulação 1

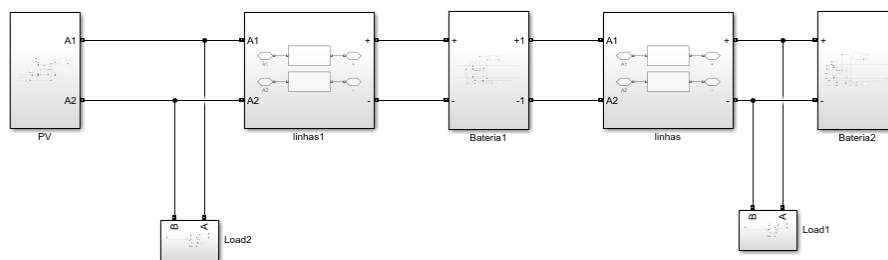


Figura A.2: Modelo MatLab/simulink utilizado na simulação 2

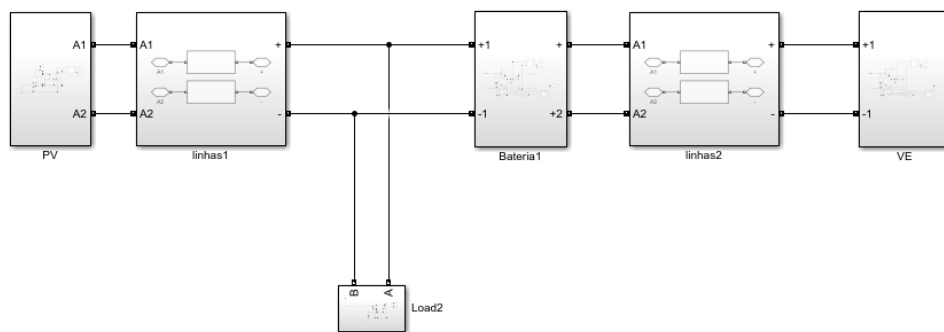


Figura A.3: Modelo MatLab/simulink utilizado nas simulações 3 e 4

## Anexo B

# Micro-rede CA

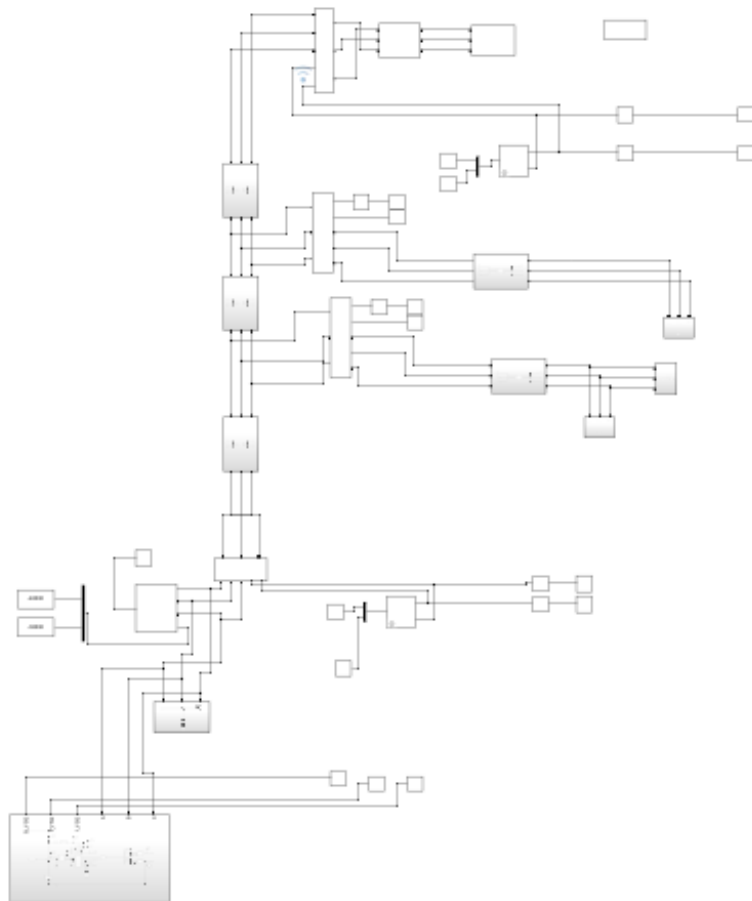


Figura B.1: Modelo MatLab/simulink para micro-rede CA



## Anexo C

# Micro-rede híbrida

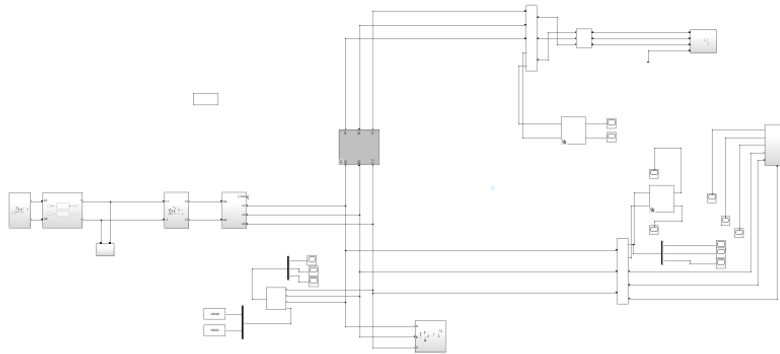


Figura C.1: Modelo MatLab/simulink para micro-rede híbrida CA/CC



## Anexo D

# Parameterização extra

Tabela D.1: Parâmetros utilizados na simulação CC

Elemento	Valor
Condensadores	$5\mu F$
Linhas DC	$0.3\ \Omega$

Tabela D.2: Parâmetros das linhas CA

	R ( $\Omega$ )	X ( $\Omega$ )
Linhas AC	0.03	0.013

Tabela D.3: Ganhos VSI

Ganhos VSI	Valor
$K_p$	0.0002
$K_q$	0.001
$T_{dP}$	0.5
$T_{dQ}$	0.6

Tabela D.4: Curva característica para EV do lado CC

Parametro	Valor
<i>Dead-band</i>	[270;330] V
$P_{mx}$	60000 W
$P_{min}$	-60000 W
$P_{carregamento}$	5000 W
k	0.1

Tabela D.5: *Droops* nas baterias para simulações CC

Simulação	Componente	Valor
$Sim_1$	Bateria	0.1
$Sim_2$	Bateria 1	0.1
$Sim_2$	Bateria 2	0.001
$Sim_3$	Bateria	0.1
$Sim_4$	Bateria	0.1

Tabela D.6: Curva característica para VE do lado CA

Parametro	Valor
$Dead-band$	[49;51] Hz
$P_{mx}$	60000 W
$P_{min}$	-60000 W
$P_{carregamento}$	5000 W
k	0.1

# Referências

- [1] APREN. Balanço da produção de eletricidade de portugal continental em 2022. <https://www.apren.pt/pt/energias-renovaveis/producao,>
- [2] C. Abbey R. Iravani G. Joos P. Lombardi P. Mancarella C. Marnay, S. Chatzivasileiadis e J. von Apen. Microgrid evolution roadmap. Em *2015 International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST)*, páginas 139–144, 2015. doi:10.1109/SEDST.2015.7315197.
- [3] J. Guerrero A. Hirscha, Y. Paraga. “microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 90, páginas 402–411, July 2018.
- [4] Microgrids Knowledge. "the rise of clean energy microgrid". *Microgrids knowledge report*, 2017.
- [5] Siemens. Siemens campus microgrid. <https://new.siemens.com/at/en/company/topic-areas/siemens-campus-microgrid.html>.
- [6] B. Kleyman. "microgrids: data center energy delivery for a digital economy". *Microgrid Knowledge Report*, November 2021.
- [7] B. Lee. "hospitals need more than backup". *Mesa Solutions white paper*, 2021.
- [8] M. A. Smith D. T. Ton. "the us department of energy’s microgrid initiative". *The electricity journal*, páginas 84–94, Septeber 2012.
- [9] A. H. Etemadi C. A. Cañizares R. Iravani M. Kazerani A. H. Hajimiragha O. Gomis-Bellmunt M. Saedifard R. Palma-Behnke G. A. Jiménez-Estévez D. E. Olivares, A. Mehrizi-Sani e N. D. Hatziaargyriou. Trends in microgrid control. 5(4):1905–1919, 2014. doi:10.1109/TSG.2013.2295514.
- [10] H. Nikkhajoei e R. H. Lasseter. "microgrid protection". *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, páginas 1–6, 2007.
- [11] Brian Ponstein. “an introduction to microgrids ;combining multiple power sources for maximum efficiency uptime”. June 2021.
- [12] B. Su X. Liu. "microgrids - an integration of renewable energy technologies". *Technical Session 3 Protection, Control, Communication and Automation of Distribution Network*, páginas pp. 1–7, 2008.
- [13] X. Liu P. Wang, L. Goel e F. H. Choo. "harmonizing ac and dc: A hybrid ac/dc future grid solution". *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 11, no. 3, páginas 76–83, May-June 2013.

- [14] R. Mahmud e A. Nejadpak. "distributed cooperative control of hybrid ac/dc microgrid". *2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, páginas pp. 2950–2955, 2019.
- [15] B. Moran. "microgrid load management and control strategies". *2016 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (TD)*, páginas pp. 1–4, 2016.
- [16] R. A. Kaushik e N. M. Pindoriya. "a hybrid ac-dc microgrid: Opportunities key issues in implementation". *2014 International Conference on Green Computing Communication and Electrical Engineering (ICGCCEE)*, páginas 1–6, 2014.
- [17] C. L. Moreira J. A. P. Lopes e A. G. Madureira. "defining control strategies for microgrids islanded operation". *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, no. 2, páginas 916–924, May 2006.
- [18] J. C. Vasquez T. Dragicevic, X. Lu e J. M. Guerrero. "dc microgrids—part ii: A review of power architectures, applications and standardization issues". *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 5, páginas pp. 3528–3549, May 2016.
- [19] E. Unamuno e J. A. Barrena. "hybrid ac/dc microgrids—part i: Review and classification of topologies". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 52.
- [20] A. Hajizadeh N. Bayati e M. Soltani. "protection in dc microgrids: a comparative review". *IET Smart grid*, vol. 1, issue 3, páginas pp. 66–75, September 2018.
- [21] D. T. Lagos A. Vasilakis, I. Zafeiratou e N. D. Hatziargyriou. "the evolution of research in microgrids control". *IEEE Open Access journal of power and energy*, vol. 7, páginas pp. 331–343, 2020.
- [22] C. S. T. Gouveia. "experimental validation of microgrids: Exploiting the role of plug-in electric vehicles, active load control and micro-generation units ". May 2015.
- [23] J. Matas L. G. de Vicuña J. M. Guerrero, J. C. Vasquez e M. Castilla. "hierarchical control of droop-controlled ac and dc microgrids—a general approach toward standardization". *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, VOL. 58, páginas pp. 158–172, January 2011.
- [24] F. Nejabaykah e Y. W. Lei. "overview of power management strategies of hybrid ac/dc microgrids". *IEEE transactions on power electronics*, vol. 30, no. 12, páginas pp. 7072–7089, December 2015.
- [25] S. Bayhan A. Mohammed, S. S. Refaat e H. Abu-Rub. "ac microgrid control and management strategies: Evaluation and review ". *IEEE POWER ELECTRONICS MAGAZINE*, Vol. 6, Issue 2, páginas pp. 18–31, June 2019.
- [26] Y. Zhou e C. Ngai-Man Ho. "a review on microgrid architectures and control methods". *IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference*, páginas pp. 3149–3156, 2016.
- [27] F. J. Soares J. A. P. Lopes e P. M. R. Almeida. "integration of electric vehicles in the electric power system". *Proceedings of the IEEE* vol. 99, No 1, páginas 168–183, January 2011.
- [28] M. Mithun K. Bharath e P. Kanakasabapathy. "a review on dc microgrid control techniques, applications and trends". *International journal of renewable energy research*, 2019.

- [29] J. C. Vasquez T. Dragicevic, X. Lu e J. M. Guerrero. "dc microgrids–part i: A review of power architectures, applications and standardization issues". *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 5pp. 3528-3549, páginas pp. 3528–3549, May 2016.
- [30] Y. Miura H. Kakigano e T. Ise. "low voltage bipolar type dc microgrid for super high quality distribution ". *EEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 12, páginas pp. 3066–3075, December 2010.
- [31] V. S. P. Cheung C. Ngai-Man Ho e H. Shu-Hung Chung. "constant-frequency hysteresis current control of grid-connected vsi without bandwidth control ". *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, November 2009.
- [32] R. A. Kaushik e N. M. Pindoriya. "a hybrid ac-dc microgrid: Opportunities key issues in implementation ". *2014 International Conference on Green Computing Communication and Electrical Engineering (ICGCCEE)*, páginas pp. 1–6, 2014.
- [33] T. Caldognetto e P. Tenti. "microgrids operation based on master-slave cooperative control". *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, December 2014.
- [34] L. Guo . Wang, X. Li e Y. W. Li. "a nonlinear-disturbance-observer-based dc-bus voltage control for a hybrid ac/dc microgrid". ,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 11, página pp. 6162–6177, 2014.
- [35] N. Eghtedarpour e E. Farjah. "power control and management in a hybrid ac/dc microgrid". *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 3, páginas pp. 1494–1505, May 2014.
- [36] P. C. Loh, D. Li, Y. K. Chai, e F. Blaabjerg. "autonomous control of interlinking converter with energy storage in hybrid ac–dc microgrid". *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, VOL. 49, NO. 3, páginas pp. 1374–1382,, May 2013.
- [37] V. Miranda G. Tovar, C. Moreira. "hybrid ac/dc microgrids for rural electrification". páginas pp. 1–90, July 2020.
- [38] V. Miranda M. Campos. "dalila: Design architectures in a living lab". páginas pp. 1–125, July 2019.