

Lab. de Eletrônica de Potência, Acionamentos e Controle de Processos Industriais

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Associação Ampla entre CEFET-MG e UFSJ

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Av. Amazonas 7675, 30510-000 Belo Horizonte, MG Brasil

Fone: +55 (31) 3319-6838

sutavaresbr@yahoo.com.br



Estudo e Implementação de um Sistema de Controle de Tensão em uma Microrrede CC

Suzanne Emanuelle Tavares

Dissertação submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Modelagem e Controle de Sistemas.

Linha de Pesquisa: Sistemas de Controle.

Orientador: Prof. Marcelo Martins Stopa

Co-orientador: Prof. Alex-Sander Amável Luiz

Belo Horizonte

2018

T231e Tavares, Suzanne Emanuelle
Estudo e implementação de um sistema de controle de tensão em uma microrrede CC / Suzanne Emanuelle Tavares. – 2018.
xiii, 80 f.: il., gráfs, tabs., fotos.

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica em associação ampla entre a UFSJ e o CEFET-MG.

Orientador: Marcelo Martins Stopa.
Coorientador: Alex-Sander Amável.
Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

1. Geração distribuída de energia elétrica – Teses. 2. Microrredes (Redes de energia inteligentes) – Teses. 3. Sistemas de controle ajustável – Teses. 4. Análise de variância – Teses. I. Stopa, Marcelo Martins. II. Amável, Alex-Sander. III. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. IV. Universidade Federal de São João del-Rei. V. Título.

CDD 621.31

Dedicatória

“... tive toda sorte de privilégios. Tive a vantagem de viver numa casa em que as pessoas falavam sobre coisas interessantes, tive pais inteligentes e frequentei boas escolas. Duvido que pudesse ter sido criado por pais melhores que os meus. Isso foi de uma importância enorme. Meus pais não me deram dinheiro, e sinceramente eu não queria nenhum. Mas nasci no lugar e na hora certos...”

Warren Buffett

Agradecimentos

Este trabalho encerra um importante ciclo da minha vida.

À Deus por iluminar meu caminho e me dar forças para seguir sempre em frente. Obrigada por me permitir errar, aprender e crescer, por Seu infinito amor, pela Sua voz “invisível” que não me permitiu desistir.

Agradeço especialmente aos meus pais pelo amor incondicional que me concederam. Vocês dedicaram suas vidas por completo aos seus filhos e, por isso, são motivo de grande admiração por minha parte. Aos meus irmãos que estiveram sempre presentes e me deram apoio às decisões tomadas ao longo de minha vida.

Aos meus orientadores, Marcelo Martins Stopa e Alex-Sander Amável Luiz, pela oportunidade de trabalho conjunto e pelos ensinamentos. Sem a dedicação, competência e colaboração de vocês, esse trabalho não seria possível. Ao professor Fábio Jota, meus mais sinceros agradecimentos, por “plantar a semente” da microrrede e também ser responsável pelos frutos que agora colhemos.

Ao professor Márcio Matias Afonso pela ajuda incondicional em todos os momentos e por ter me aberto as portas do PPGEL.

Ao professor Júlio César Guerra Justino e aos colegas de laboratório Lucas Wolfgang e Matheus Resende pelo apoio e contribuições imprescindíveis na montagem experimental e esclarecimentos de dúvidas. Aos técnicos Elton, Márcio e Henrique pela disponibilidade e ajuda de sempre.

Aos amigos e colegas do PPGEL e LEACOPI, Talles, Vinícius, Izabel, Ramon, Waldri, Pedro, Gabriel e Tiago, pelas trocas e pelos momentos alegres e conversas descontraídas. Aos parceiros da UEM-SENAI/MG pelo apoio na reta final deste trabalho.

Aos amigos de Ouro Branco, BH, São João del-Rei, que de alguma forma estão envolvidos na minha vida e que me ajudaram a construí-la. Ao Márcio Jr. pela amizade verdadeira de tantos anos.

Epígrafe

“O que é sucesso?”

Rir muito e com frequência; ganhar o respeito de pessoas inteligentes e o afeto das crianças; merecer a consideração de críticos honestos e suportar a traição de falsos amigos; apreciar a beleza e encontrar o melhor nos outros; deixar o mundo um pouco melhor, seja por uma saudável criança, um canteiro de jardim ou redimida condição social; saber que ao menos uma vida respirou mais fácil porque você viveu.

Isso é ter sucesso!”

Ralph Waldo Emerson

Conteúdo

Resumo	xiii
Abstract	xv
Lista de Tabelas	xvii
Lista de Figuras	xxi
Lista de Abreviações	xxiii
1 Introdução	1
1.1 Objetivo	4
1.2 Contribuições do trabalho	5
1.3 Estrutura da dissertação	6
2 Geração Distribuída e Microrredes	7
2.1 Introdução	7
2.2 Geração Distribuída	7
2.2.1 Benefícios e Desafios da Geração Distribuída	10
2.3 Microrredes	12
2.3.1 Modos de Operação	14
2.3.2 Microrredes em Corrente Contínua	17
2.3.3 Conversores Estáticos de Potência	19

2.3.4	Modulação por Largura de Pulso	24
2.4	Controle de Microrredes CC	27
2.5	Conclusões do capítulo	28
3	Controlador Adaptativo Utilizado na Microrrede CC	29
3.1	Introdução	29
3.2	Controle Adaptativo	29
3.3	Estimação de Parâmetros	31
3.3.1	Modelo ARX	32
3.3.2	Mínimos Quadrados	33
3.4	Controlador de Variância Mínima Generalizado	35
3.5	Conclusões do capítulo	38
4	Modelagem da Microrrede Estudada e do Controlador Adap-	39
	tativo	
4.1	Introdução	39
4.2	Modelo Estudado	40
4.2.1	Modelagem em Tempo Discreto e Período de Amostragem	42
4.2.2	Controlador de Variância Mínima Generalizado	43
4.2.3	Escolha dos Polinômios P , Q e R	43
4.3	Conclusões do capítulo	45
5	Resultados de Simulação e Experimentais	47
5.1	Introdução	47
5.2	Resultados de Simulação	47
5.2.1	Cenário 1 - Variação de P	52
5.2.2	Cenário 2 - Variação de R	53
5.2.3	Cenário 3 - Variação de v_{ref}	55
5.3	Resultados Experimentais	56
5.3.1	Cenário 1 - Variação de v_{ref}	58

	xi
5.3.2 Cenário 2 - Variações de Carga e Fonte	61
5.4 Conclusões do capítulo	65
6 Conclusões	67
6.1 Considerações Finais	67
6.2 Pesquisas Futuras	68
Bibliografia	71

Resumo

Recentemente, muito se tem falado sobre as vantagens da inserção da Geração Distribuída (GD) no sistema de distribuição. Entretanto, em grande escala, sua aplicação apresenta alguns desafios tornando o sistema complicado de se controlar. Uma alternativa que tem sido apontada como solução para este problema é o conceito de Microrrede.

Microrrede é definida como agregação de cargas e fontes de baixa potência no fornecimento de energia, podendo operar de modo ilhado ou conectado à rede principal. Podem operar em corrente alternada (CA) ou em corrente contínua (CC). A utilização de CC em microrredes é crescente e apresenta vantagens na integração de cargas CC, armazenadores de energia e fontes para cogeração que necessitem de conversão eletrônica, podendo estas ser fontes de energia renováveis, além de não se fazer necessário o controle de frequência ou fase e potência reativa.

Porém, esta simplificação não isenta a microrrede de problemas de estabilidade, que estão relacionados com a necessidade de conversão de energia, a fim de alcançar níveis de tensão diferentes para os vários dispositivos da rede. Estes conversores introduzem efeitos desestabilizadores no sistema, levando a microrrede a exibir oscilações significativas na tensão do barramento CC. O controle do conversor é, portanto, a principal preocupação na operação de uma microrrede.

Este trabalho apresenta uma microrrede CC operando em modo ilhado. Um controlador é projetado com o objetivo de minimizar o transitório e estabilizar a tensão da rede diante a variação de cargas e entrada/saída de unidades geradoras. A análise é verificada através de simulações em *Matlab/SimulinkTM* e uma bancada experimental foi montada a fim de comprovar os resultados obtidos.

Palavras-chave: Geração distribuída, microrrede, controle adaptativo, controle de variância mínima.

Abstract

Recently, a lot have been talked about the advantages of the insertion of Distributed Generation (DG) in the distribution system. However, in a large scale, its application presents some challenges making the system difficult to control. An alternative that has been suggested as a solution to this problem is the concept of microgrid.

Microgrid is defined as aggregation of charges and sources of low power in the energy supply; it may operate in island mode or connected to the main power. It can operate with alternating current (AC) or with direct current (DC). The use of DC systems is increasing and presents advantages in integrating DC loads, energy and source storage for cogeneration and requires electronic conversion. These can be sources of renewable energy and additionally avoids the control of frequency or phase and reactive power.

However, this simplification doesn't eliminate stability problems in the microgrid, which are related to the need of energy conversion, in order to achieve different voltage levels for several power devices. These converters introduce a destabilizing effect on the system, leading the microgrid to show significant oscillations in the DC bus voltage. The converter control is, therefore, the primary concern in operating a microgrid.

This work presents a DC microgrid operating in island mode. Controllers are designed with the objective of minimizing the transient and stabilizes the power voltage under load variations and conection/disconnection of generating units. The analysis is verified by simulations in *Matlab/SimulinkTM* and an experimental bench was built in order to verify the obtained results.

Keywords: Distributed generation, microgrids, adaptive control, generalized minimum variance control.

Lista de Tabelas

2.1	Conversores CC-CC básicos.	21
5.1	Parâmetros do conversor.	48

Lista de Figuras

2.1	Conceito de uma microrrede	13
2.2	Microrrede CC e a modelagem utilizada	15
2.3	Conversor no ponto de carga, caracterizando uma CPL	20
2.4	Ilustração do fluxo de potência bidirecional	21
2.5	Topologia do conversor <i>boost</i> bidirecional	22
2.6	Etapas de funcionamento do conversor <i>boost</i> CC-CC bidirecional	23
2.7	Formas de ondas do conversor bidirecional <i>boost</i>	24
2.8	Técnica de modulação tipo PWM	25
2.9	Sinal de controle PWM	26
3.1	Procedimento para auxiliar na escolha do controlador.	30
3.2	Diagrama de blocos de um regulador auto-ajustável	31
3.3	Estrutura do Controlador de Variância Mínima Generalizado	37
4.1	Modelo simplificado da microrrede CC (Tahim et al., 2012a).	40
4.2	Circuito implementado da microrrede CC operando em modo ilhado	41
4.3	Diagrama esquemático do sistema de controle	44
5.1	Carga equivalente vista do CBC	49
5.2	Esquemático do circuito para simulação do conversor.	50
5.3	Esquemático de simulação do controle GMV.	51

5.4	Evolução temporal da tensão do barramento CC sob variações dos valores de λ	51
5.5	Resposta da tensão do barramento CC (v_C) e da corrente de entrada (i_L) da MR quando submetido à variação de carga P , para o controle GMV.	52
5.6	Detalhe da resposta da tensão do barramento CC (v_C) e da corrente de entrada (i_L) da MR quando submetido à variação de carga P , para o controle GMV.	53
5.7	Resposta da tensão do barramento CC (v_C) e da corrente de entrada (i_L) da MR quando submetido à variação de carga R , no segundo ensaio, para o controle GMV.	54
5.8	Resposta da tensão do barramento CC (v_C) e da corrente de entrada (i_L) da MR quando submetido à variação de <i>setpoint</i> v_{ref} , no terceiro ensaio, para o controle GMV.	56
5.9	Esquemático da montagem prática feita no LEACOPI.	57
5.10	Protótipo da microrrede CC proposta. (1) Fonte simétrica de 15V, (2) placa de alimentação, (3) placa de condicionamento de entradas analógicas, (4) placa mãe, (5) placa de saídas PWM, (6) <i>driver</i> de comando dos IGBTs e (7) placa para medição de tensão.	59
5.11	Protótipo da microrrede CC proposta - Completa.	60
5.12	Resposta da tensão do barramento CC (v_C) e da corrente de entrada (i_L) da MR quando submetido à variação de <i>setpoint</i> v_{ref} , no primeiro ensaio experimental, para o controle GMV. . .	60
5.13	Detalhes da resposta da tensão do barramento CC (v_C) e da corrente de entrada (i_L) da MR quando submetido à variação de <i>setpoint</i> v_{ref} , no primeiro ensaio experimental, para o controle GMV.	61

5.14	Resposta da tensão do barramento CC, (v_C), e da corrente de entrada (i_L) da MR quando submetido ao segundo cenário de testes experimentais, para o controle GMV.	63
5.15	Resposta da tensão do barramento CC (v_C) e da corrente de entrada (i_L) quando submetido à variações bruscas e consecutivas na tensão injetada pelo varivolt.	64
5.16	Resposta da tensão do barramento CC (v_C) e da corrente de entrada (i_L) da MR quando submetido à variação bruscas de carga (motor CC).	65

Lista de Abreviações

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica;
ARX	<i>Autoregressive with Exogenous Inputs</i> (Auto-Regressivo com Entrada Exógena);
CA	Corrente Alternada;
CBC	Conversor CC-CC Bidirecional;
CC	Corrente Contínua;
DAE	Dispositivos de Armazenamento de Energia;
DSP	<i>Digital Signal Processor</i> (Processador Digital de Sinais);
FER	Fontes de Energia Renovável;
GD	Geração Distribuída;
GEE	Gases de Efeito Estufa;
GMV	<i>Generalized Minimum Variance</i> (Variância Mínima Generalizado);
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> (Transistor Bipolar de Porta Isolada);
MQ	Mínimos Quadrados;
MQR	Mínimos Quadrados Recursivos;
MQRfe	Mínimos Quadrados Recursivos com Fator de Esquecimento;
MR	Microrrede;
PCH	Pequena Central Hidrelétrica;
PI	Proporcional-Integral;
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (Modulação por Largura de Pulso);

- RED Recursos Energéticos Distribuídos;
- REN Resolução Normativa;
- SMC *Sliding Mode Controller* (Controlador por Modos Deslizantes);
- STR *Self-Tuning Regulator* (Regulador Auto-Ajustável);

Introdução

“ A ciência nunca resolve um problema sem criar pelo menos outros dez.”

George Bernard Shaw¹

Novas tecnologias, incentivos econômicos e a cobrança da sociedade por um desenvolvimento mais sustentável estão modificando a concepção da geração e transmissão de energia elétrica. O contínuo aumento populacional, especialmente nos países em desenvolvimento, aumenta exponencialmente as exigências ao nível de energia e matérias-primas.

A grande maioria da demanda mundial de energia é suprida por combustíveis fósseis, uma situação que impede a futura expansão desse modelo de produção de energia devido às preocupações ambientais com as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e com o aquecimento global (Silva et al., 2013; Hirsch et al., 2018). Diante do contexto ambiental e energético vivido atualmente, com a escassez dos recursos energéticos e alterações das condições climáticas, torna-se urgente a adoção de estratégias adequadas que impeçam o iminente cenário de emergência econômico e social, já que o suprimento das necessidades básicas humanas estão cada dia mais dependentes da utilização de energia elétrica (Mangas, 2009).

¹Trecho do discurso intitulado *An appreciation*, de 28 de outubro de 1930, proferido em homenagem ao cientista Albert Einstein (Einstein, 2009, p. 33).

A participação dos recursos energéticos renováveis na rede elétrica vem crescendo rapidamente nos últimos anos. O aumento da inserção de recursos renováveis, conhecido por dinâmica rápida e comportamento intermitente na rede, impõe novos desafios para as concessionárias de energia elétrica. Dentre estes, pode-se apontar a necessidade de modernização dos processos de geração, transmissão e distribuição de energia, melhoria da eficiência da rede elétrica e desenvolvimento de novos mecanismos de controle e gestão de redes que estejam sintonizados com os novos requisitos deste novo paradigma do sistema energético (da Silva Bolzon, 2014).

No Brasil, a produção de energia elétrica a partir de Fontes de Energia Renovável (FER), é dominada pela componente hídrica sendo responsável pela restante produção outras fontes de origem renovável, como por exemplo, a energia eólica, energia solar, biomassa e biocombustíveis. Uma outra alternativa para produzir energia elétrica a partir de FER é a microgeração, conceito aplicado à Geração Distribuída (GD).

A grande inserção de GD caracteriza o sistema elétrico em um sistema menos centralizado e traz grandes benefícios para a rede central como a redução de custos com transmissão, pequenos investimentos das instalações e maior confiabilidade no fornecimento de energia (Boeke and Wendt, 2015).

Segundo Corrêa (2006) alguns pontos podem ser levantados para justificar os incentivos em pesquisas e no desenvolvimento de novas tecnologias em GD, como: *(i)* garantir a continuidade de suprimento da atual demanda energética por aumentar as opções de fontes primárias; *(ii)* auxiliar na prevenção de eventuais faltas de energia; *(iii)* permitir o acesso à energia para consumidores situados em pontos ainda não atendidos pelo sistema atual (normalmente em locais remotos e, atualmente, não viáveis economicamente); *(iv)* permitir, ainda, o aumento da oferta, com reduzido custo e com manutenção dos atuais níveis de confiabilidade e qualidade, para suprir a demanda reprimida.

Dentro do contexto da GD, surge o conceito de Microrredes (ou *Microgrids* - MR) que merece atenção especial em sistemas elétricos de potência. De acordo com Lasseter (2002), uma MR é um sistema elétrico composto de várias pequenas unidades geradoras com centenas de kW, ou menos, conectadas ao barramento de baixa tensão da rede central.

Estas pequenas redes permitem a integração de dispositivos de eletrônica

de potência e sistemas de controle aplicados à GD formando um sistema de potência de tamanho reduzido em que o mesmo trabalha com valores de potência e tensão também reduzidos (Lasseter, 2002; Smallwood, 2002; Venkataraman and Illindala, 2002; Papathanassiou, 2004). As MR possuem capacidade de gerenciamento, desconexão e sincronização com a rede elétrica local através de dispositivos de eletrônica de potência que possuem controle inteligente capaz de gerenciar o modo de operação da mesma (Cvetkovic, 2010).

As MRs operam como um sistema controlável composto por um conjunto de cargas e fontes de pequeno porte localizados estrategicamente em locais pré-definidos. Um determinado conjunto de cargas é alimentado por grupos geradores e este sistema fornece energia para sua área de atendimento tendo capacidade para armazenamento de energia em uma ou mais unidades, caso seja necessário. De acordo com o trabalho de Moreira et al. (2007), uma MR pode operar em dois modos diferentes: conectado ou ilhado.

Quando operada no modo ilhado, a MR ganha autonomia e, para possíveis interrupções de energia, este período de falta pode ser reduzido ao se explorar as fontes geradoras disponíveis. Logo, quando a rede estiver novamente disponível, a MR é conectada à ela o mais rápido possível (Lopes et al., 2006). Os conversores de potência são responsáveis por este interfaceamento entre o barramento principal, cargas e unidades geradoras.

De um modo geral, uma MR pode ser dividida em dois tipos: *(i)* Corrente Alternada (CA) e *(ii)* Corrente Contínua (CC).

Sistemas em CC podem ser projetados para suprir áreas rurais ou instalações de pequena escala. Algumas das vantagens dessa configuração em relação às MR em CA se deve ao fato de que não se faz necessário o controle de frequência, fase ou potência reativa (Torres et al., 2018; Kumar et al., 2017).

A fim de assegurar a estabilidade do sistema, o fluxo de potência dentro da MR CC deve ser equilibrado em todos os momentos para garantir que a tensão CC seja mantida. As fontes controláveis como elementos armazenadores de energia, conversores de potência conectados à rede, etc, devem possuir demandas variáveis para permitir o equilíbrio da potência no barramento. Para alcançar este objetivo, um esquema de compartilhamento de potência entre as fontes “controláveis” deve ser realizada (Chen and Xu, 2012).

Conversores de tensão são conectados ao barramento CC e são respon-

sáveis por assegurar esse controle. Podendo ser considerada como unidade controladora de carga de bateria e, conseqüentemente, controlador da tensão do barramento CC, os conversores são projetados a fim de balancear o fluxo de potência no sistema. O controle destes conversores monitoram as grandezas do sistema, como a tensão ou corrente, processa essas informações e gera sinais de controle que comandarão a comutação das chaves dos mesmos. Há, assim, a possibilidade de se usar a modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation* - PWM) para gerar as razões cíclicas de trabalho das chaves dos conversores.

Vários podem ser os métodos de controle associados aos conversores estáticos de potência (de Caux Henriques Damasceno, 2008; Algreer et al., 2011; de Carvalho Neto, 2012; Fadil et al., 2013). Controladores adaptativos e auto-ajustáveis desempenham um papel cada vez mais importante em conversores de potência chaveados pois conseguem se adequar às incertezas deste tipo de sistema, tais como mudanças imprevisíveis de carga ou nas condições ambientais que possam afetar o desempenho dos controladores clássicos. Estes controladores digitais oferecem uma solução de controle robusto e podem ajustar-se rapidamente às variações de parâmetros do sistema (Algreer et al., 2011).

A implantação de MR como uma tendência promissora, juntamente com o fato de que as atividades de pesquisa e desenvolvimento em MR ainda estarem em uma fase bastante incipiente foram pontos importantes que motivaram essa dissertação.

1.1 Objetivo

O objetivo geral desse trabalho é desenvolver uma MR CC operando em modo ilhado e projetar um controlador adaptativo, em particular, o Controlador de Variância Mínima Generalizado, com o objetivo de regular a tensão de saída desejada do conversor, assegurar a robustez sob variações de potência (fornecida e demandada) e carga, e minimizar a resposta transitória durante os eventos de variação de carga/fonte.

O controle da tensão das MR atua nos conversores e altera a largura de pulso do PWM usado para o chaveamento do semicondutor, a fim de evitar quedas de tensão no barramento de saída. A variação da tensão de saída

causada pela mudança da tensão de entrada ou da carga conectada à saída do conversor é muitas vezes indesejada. Mas, esse problema pode ser reduzido dinamicamente a níveis satisfatórios, dependendo da técnica utilizada, ao se aplicar as teorias de controle em malha fechada. O controlador é projetado com o objetivo de minimizar transitórios e estabilizar a tensão da rede diante de variações de cargas e entrada/saída de unidades geradoras. A proposta do projeto do controlador auto-sintonizável de Variância Mínima Generalizado se justifica pela possibilidade de estimar os coeficientes do modelo da microrrede estudada de forma contínua (*online*), diante todas as possíveis variações da planta.

Outro objetivo deste trabalho é aplicar o controlador proposto em uma plataforma experimental, e assim verificar sua eficácia na prática. A partir das simulações computacionais, embarcar o sistema de controle em um Processador Digital de Sinais (*Digital Signal Processor*, DSP), que faz parte da plataforma experimental utilizada, para analisar o desempenho do sistema em consonância com os resultados obtidos nas simulações.

1.2 Contribuições do trabalho

Dentre as principais contribuições deste trabalho, estão:

- O emprego da abordagem de controle adaptativo auto-sintonizável com a finalidade de controlar a tensão de uma microrrede CC, dado que este tipo de abordagem não é comum na literatura voltada para o tema.
- Montagem de bancada para testes de uma microrrede experimental que possibilitou a continuidade e o desenvolvimento de mais pesquisas no tema proposto.
- Aplicação do Software *Matlab/SimulinkTM* como ferramenta capaz de gerar os códigos necessários ao DSP a partir do sistema representado em diagrama de blocos, o que auxiliou no desenvolvimento de futuros trabalhos no âmbito do Laboratório de Eletrônica de Potência, Acionamentos e Controle de Processos Industriais (LEACOPI) do CEFET-MG, dado que esta é uma aplicação nova para o laboratório.

1.3 Estrutura da dissertação

Essa dissertação está organizada em seis capítulos conforme sumarizado a seguir:

No Capítulo 1 a importância da GD e MR é introduzida, apresentando a motivação e justificativa para o assunto em questão. O objetivo da dissertação é definido e sua estrutura apresentada.

O Capítulo 2 traz uma revisão teórica e bibliográfica referente à GD abordando seus conceitos, vantagens e desafios de sua utilização. Trata também do conceito de MR bem como a arquitetura básica desse tipo de rede, modos de operação e configuração.

No Capítulo 4 é descrita a MR proposta para esta dissertação. São descritos os elementos que a constituem e a modelagem matemática aplicada.

No Capítulo 3 é apresentado o problema de controle para aplicação em MR e o controle empregado no trabalho em questão. São apresentados os detalhes das estruturas do controlador proposto, bem como seu respectivo modelo matemático.

O Capítulo 5 contém a análise dos resultados obtidos com os testes de simulação do projeto de controle proposto e os resultados experimentais do sistema implementado em bancada.

As considerações finais sobre o trabalho e as propostas para pesquisas futuras são apresentadas no Capítulo 6.

Geração Distribuída e Microrredes

“Se você não pode explicar um problema de um modo simples, você ainda não o entendeu suficientemente bem.”

Albert Einstein¹

2.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados os conceitos e definições que são utilizados no decorrer da dissertação acerca do tema Geração Distribuída e suas implicações e aplicações no sistema de distribuição. Também serão discutidos alguns aspectos do conceito de Microrredes, sua arquitetura básica e modos de operação.

2.2 Geração Distribuída

Com mais de um século de existência, o sistema elétrico brasileiro vem sofrendo modificações significativas em sua concepção estrutural, tanto em termos de transmissão quanto de distribuição de energia. A princípio, usinas de grande porte foram projetadas e são responsáveis por produzir energia elétrica com o intuito de suprir a demanda de grandes centros de carga (ou centros de

¹(Collinson and Jay, 2012, p. 167).

consumo) a longas distâncias. Nesses grandes centros, não há a presença de fontes de energia e a mesma é distribuída aos consumidores em níveis diferentes de tensão. Este modelo de sistema possui uma topologia radial, o fluxo de potência é unidirecional e é conhecido por sua geração centralizada.

Nos últimos anos, alguns fatores mostram que esse paradigma está sendo alterado, e verifica-se a iminência de uma grande mudança nos conceitos existentes. Dois momentos importantes foram vividos pelo Brasil. Um deles foi a construção de um dos mais importantes sistemas HVDC (*High Voltage Direct Current*) do mundo, entre 1984 e 1987, conectando a usina de Itaipu ao interior de São Paulo através de uma linha de transmissão de aproximadamente 800 km (ABB, 2013a; Ferreira, 2015). Em 2013, outro passo foi dado com o elo HVDC Madeira de 600 kV, sendo, atualmente, a linha de transmissão CC mais longa do mundo, com 2.385 km de extensão (ABB, 2013b).

O consumo de eletricidade pode ser visto como um indicador do grau de desenvolvimento do país. Diante do atual panorama que o Brasil tem apresentado, com um crescimento da necessidade energética (Heldwein, 2009), é necessário garantir que as fontes de energia disponíveis sejam suficientes para que a demanda de energia necessária ao desenvolvimento seja garantida.

Além disso, a preocupação com as questões ambientais aliada às políticas de sustentabilidade, frente aos efeitos nocivos do aquecimento global, problemas como a redução das reservas de combustíveis fósseis, a escassez de recursos energéticos e o melhor aproveitamento dos recursos naturais disponíveis, e as limitações de ampliação das fontes hidrelétricas (principal fonte energética do país) levaram à busca por uma geração de energia elétrica através de fontes renováveis de energia e também por um processo de geração mais eficiente (Chowdhury et al., 2009). Galvin and Yeager (2009) consideram os sistemas elétricos atuais totalmente retrógrados e com potencial para causar grandes danos à sociedade, pois deixaram de incorporar muitos avanços tecnológicos que poderiam proporcionar níveis de confiabilidade e qualidade de suprimento mais adequados.

A GD é encarada como uma alternativa promissora para contornar esses problemas, sendo um complemento tático para o abastecimento energético do país, ao utilizar a geração em pequena escala próxima às unidades de consumo. A GD tem se mostrado de grande importância no cenário dos sistemas elétricos

a nível mundial devido à emissão reduzida de gases tóxicos, melhor eficiência do sistema de potência, confiabilidade e como solução para aliviar o conturbado sistema de transmissão e distribuição de energia que existe atualmente (Basak et al., 2012).

Neste trabalho, a GD será caracterizada por unidades geradores de baixa capacidade que estão conectadas à rede de distribuição, dispersos ao longo do sistema e localizadas próximas aos centros de consumo (Borbely and Kreider, 2001). A GD vem também como um meio de integrar fontes alternativas e renováveis de energia ao sistema elétrico e engloba um grande número de equipamentos e tecnologias, tais como pequenas centrais hidrelétricas (PCHs), células fotovoltaicas, geradores eólicos, pilhas de células de combustível, motores de combustão interna, térmicas a biomassa e outros (Lasseter and Piagi, 2004). Estas fontes podem alimentar diversas cargas de menor escala em comparação com o potencial energético de uma rede elétrica tradicional gerando menores impactos ambientais e em muitos casos com maior eficiência.

A inclusão de outras fontes geradoras nas redes de distribuição causa uma mudança significativa na estrutura dessas redes, deixando de apresentar comportamento passivo para ter um comportamento ativo. Nessa nova configuração o consumidor passa a decidir sobre o seu consumo, e é capaz de contribuir para o atendimento dos demais consumidores vendendo energia excedente ao sistema. Essas mudanças devem vir acompanhadas da incorporação de tecnologias de controle e supervisão e dispositivos que permitam essa interação.

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabeleceu, via resolução normativa (REN) nº 482 e atualizada em 24/11/2015 pela REN nº 687, as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída e estabelece critérios diferenciados para acesso ao sistema de distribuição para centrais geradoras classificadas como microgeração (potência instalada igual ou inferior a 75 kW) ou minigeração (potência instalada de 75 kW a 5 MW). O principal objetivo da REN é facilitar o uso de fontes de energia renováveis. Os consumidores que optarem pela microgeração, receberão descontos na conta de energia elétrica, proporcionais à geração produzida. Em caso do microgerador produzir mais energia que consumiu, o excedente pode ser acumulado em forma de créditos e descontado nos próximos meses, que terão a validade de 60 meses (dos Santos, 2014; de Oliveira, 2016; Moia, 2016). Alguns países,

como Itália, Alemanha e Espanha, o modelo de tarifação diferenciado incentiva e remunera o consumidor pelo excedente gerado, utilizando um valor superior ao atribuído à energia comercializada pela concessionária (de Oliveira, 2016).

Em uma perspectiva otimista, a GD possivelmente conduzirá a uma redução no domínio clássico do mercado de energia no Brasil. Isto contribuirá para reduções na tarifa, oferecendo uma alternativa paralela ao modelo de negócio até então constituído de monopólio regulado. O paradigma será quebrado de centralizado para distribuído, no qual diferentes entidades, não somente a concessionária, poderão suprir consumidores através de contratos próprios (Carneiro, 2017).

Ainda não está claro qual nível de GD é esperado, apropriado ou ideal nos sistemas de energia futuros. Muitos pesquisadores se concentraram em como integrar a GD em sistemas de eletricidade centralizados. Há uma lacuna na literatura em considerar o papel da GD dentro do contexto de todo o sistema elétrico e do setor energético como um todo e como ele pode impulsionar o desenvolvimento de um sistema elétrico para manter uma abordagem centralizada ou aumentar a descentralização (Mehigan et al., 2018).

O conceito de integração de recursos de energia distribuída para a formação dessas novas topologias será mais significativo no futuro próximo.

2.2.1 Benefícios e Desafios da Geração Distribuída

A medida em que o interesse pelo uso da GD cresce juntamente com a necessidade da inserção de fontes alternativas no sistema elétrico, aumentam os investimentos e pesquisas relacionadas ao assunto, tanto por parte das unidades de ensino quanto das empresas do setor e centros de pesquisa.

A GD engloba um grande número de equipamentos e tecnologias, e deriva de diversas fontes primárias de energia tanto renováveis quanto não-renováveis, não se vinculando a uma tecnologia específica. Esses equipamentos e fontes são chamados de Recursos Energéticos Distribuídos (RED) devido às suas características de pequenas fontes energéticas que podem atuar isoladamente e de forma descentralizada no sistema. Os RED associam as unidades de GD, dispositivos de armazenamento de energia e também as estratégias de gerenciamento, controle e supervisão das cargas (Lopes et al., 2007).

As alterações na rede elétrica nacional podem afetar positiva ou negativa-

mente o sistema de geração, transmissão e distribuição de energia como um todo. Uma discussão sobre a sua contribuição na diversificação da matriz energética vem sendo realizada, além de fatores como redução dos impactos ambientais e a melhora da confiabilidade e estabilidade do sistema. Grande parte dos REDs são oriundos de fontes de energia renováveis. A redução da poluição ambiental, com a redução da emissão de carbono, e a preocupação com os assuntos relacionados ao aquecimento global colocam a utilização de recursos renováveis em voga. Os impactos ambientais são diminuídos quando a necessidade da construção de grandes parques geradores e longas linhas de transmissão é reduzida. Essa redução também facilita a expansão das redes de transmissão e distribuição.

Silva et al. (2010) e Souza (2009) ressaltam outros pontos importantes como a redução do custo de transmissão, uma vez que aproxima o elemento gerador das cargas por ele alimentadas; possibilidade de se ter energia reserva; a geração em horários de pico alivia a concessionária e, considerando que o sistema é descentralizado, eventos como quedas e faltas de energia se tornam mais improváveis; maior confiabilidade no fornecimento de energia, tendo em vista a redução da distância entre a geração e o consumo de energia. Além disso, é fácil inferir que as perdas de energia, por efeito Joule, por exemplo, também serão menores, gerando a maior estabilidade e confiabilidade do sistema.

É necessário observar que, apesar das vantagens apresentadas para a utilização de GDs, alguns riscos estão intrínsecos ao seu uso. Willis and Scott (2000) destacam que a maioria desses equipamentos são relativamente novos, gerando certa insegurança quanto à durabilidade e eficiência (Souza, 2009). Outros pontos são apontados por Carneiro (2017) como o aumento da complexidade de operação da rede; a dificuldade na cobrança pelo uso do sistema elétrico; a eventual incidência de tributos; e a necessidade de alteração dos procedimentos das distribuidoras para operar, controlar e proteger as redes.

Deve-se ponderar, porém, que a aplicação indiscriminada de gerações individuais distribuídas pode causar tanto problemas quanto solucioná-los, uma vez que o controle de um grande número de REDs é ainda um grande desafio em termos de operação e controle seguro e eficiente da rede elétrica.

2.3 Microrredes

No centro desta grande transformação é apresentado o conceito de microrredes, que surgem como um meio de integrar GD na rede elétrica operando como uma célula, capaz de trabalhar de forma autônoma, contribuindo para o aumento da confiabilidade e qualidade da energia disponibilizada à carga (Barklund et al., 2008).

MRs podem ser descritas como um aglomerado de cargas, dispositivos de armazenamento e pequenos geradores (Barklund et al., 2008), capazes de operar, em determinadas circunstâncias, de forma isolada dos demais componentes do sistema, tornando-se redes autônomas. São entidades que coordenam os REDs de forma descentralizada, reduzindo a carga de controle da rede e consequentemente tornando o controle mais eficiente. Essas redes de baixa e média tensão são cogeneradoras de energia elétrica baseadas em fontes renováveis e atenderão pequenas comunidades ou cargas, como universidades, hospitais, pequenos bairros residenciais ou comerciais (Mendonça, 2011). A principal característica de uma MR é o controle local dos equipamentos à ela relacionados, como uma pequena célula de trabalho que pode ser exemplificada por uma estrutura semelhante a esboçada na Figura 2.1.

O conceito de MR é relativamente recente e ainda não foi totalmente explorado, sendo uma área com muitas lacunas a serem estudadas. A MR é essencialmente uma rede de distribuição ativa, uma vez que integra fontes GD e diferentes cargas, que funciona como uma miniatura do sistema elétrico nacional mas inserida no próprio sistema. Assim, as redes de distribuição de energia, até então de fluxo de potência unidirecional, tornam-se redes ativas com bidirecionalidade de fluxo.

As aplicações práticas desse novo modelo de gestão da rede estão sendo testadas em alguns países europeus, China, Japão e EUA. A presença de MR no Brasil é constituída de sistemas híbridos centralizados, em que a combinação de vários recursos naturais garante geração de energia constante possibilitando, assim, atendimento a comunidades remotas (Carneiro, 2017).

Essa revolução do sistema elétrico deve acarretar em uma melhoria na qualidade dos serviços e essa exigência de confiabilidade irá prevenir oscilações significativas no fornecimento que comprometeriam a vida útil de aparelhos

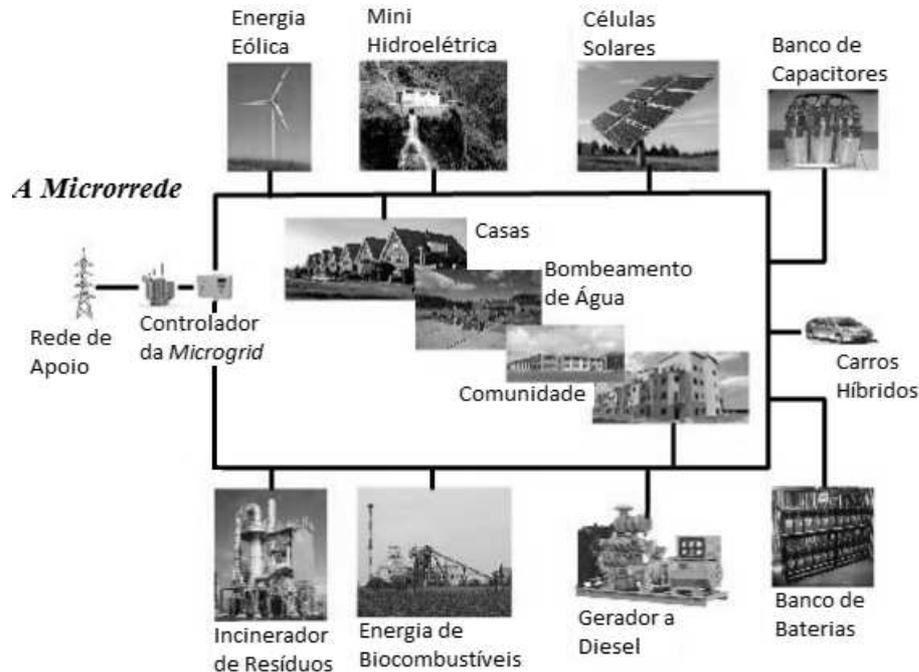


Figura 2.1: Conceito de uma microrrede.

Ilustração adaptada de Mirez (2012) que traduz o conceito principal de uma microrrede.

eletrônicos que tem se tornado cada vez mais sensíveis.

No que diz respeito à rede de distribuição, as MR são vistas como associações controladas operando como fonte ou carga simples, apresentando vantagens como: *(i)* redução de perdas no alimentador da rede de distribuição; *(ii)* melhor controle e gerenciamento de várias unidades de geração distribuída (Carneiro, 2017); *(iii)* aumento da confiabilidade do suprimento de energia (IEC, 2014); *(iv)* aumento da estabilidade do sistema (os mecanismos de armazenamento são ideais para evitar a ocorrência de distúrbios de tensão, além de favorecer a entrada de energia em qualidade satisfatória) (Mendonça, 2011); e *(v)* fornecimento de suporte de tensão (Mariam et al., 2013). Já do ponto de vista dos clientes, as MR proporcionam energia elétrica localmente de forma ininterrupta (sendo talvez esta sua característica mais atraente), podendo atender serviços auxiliares e cargas essenciais, promovendo satisfação no atendimento com melhoria na qualidade da energia (Carneiro, 2017).

Nesse contexto, as MRs se tornam alternativas tecnológicas importantes.

2.3.1 Modos de Operação

A filosofia das MRs apresenta grande desafio em sua implementação no que diz respeito à confiabilidade e baixa complexidade de projeto. Lasseter and Piagi (2004) propõem um modelo *peer-to-peer* para cada componente da MR. Este modelo assegura que nenhum elemento seja crítico para a operação da MR. Isso significa que a MR se mantém ativa mesmo com a perda de qualquer componente, tais como um conversor de potência, um dispositivo de armazenamento ou um gerador. Nenhum componente é fundamental para manter o sistema operacional (Tahim, 2015).

Outra propriedade que caracteriza a MR é sua capacidade de operar interligada à rede de distribuição e/ou de forma ilhada. As microfontes incorporadas pelas microrredes devem ter características *plug-and-play*, ou seja, estas unidades devem ser capazes de se conectarem em qualquer ponto do sistema elétrico, sem a necessidade de reprogramação dos controladores ou mesmo desligamento do sistema (Lasseter et al., 2002).

Um modelo *plug-and-play*, facilita a alocação de geradores próximos às cargas, permitindo portanto, a maior eficiência do sistema. Além de serem equipadas com componentes eletrônicos para realizar medições instantâneas e efetuar o controle de funcionamento durante a operação em sistema ilhado ou conectado à rede elétrica. Esta característica das fontes é essencial para que a MR transite entre os modos de operação.

Uma MR pode operar de dois modos: ilhada ou conectada à rede de distribuição.

Modo de Operação Conectado à Rede

Neste modo de funcionamento, conectada à rede, a MR está interligada com a rede de distribuição, à qual compra e vende energia e também fornece serviços auxiliares. Quando neste modo de operação, as microfontes da célula atuam como fontes de energia constantes, o que significa que elas são controladas para injetar potência na rede de acordo com a demanda (Pogaku et al., 2007).

Segundo Mendonça (2011), enquanto conectada ao sistema de energia principal, uma MR precisa executar certas funções que são assumidas pelo controlador, tais como: (i) monitoramento do sistema de entrega de energia, que é realizado através da coleta de dados da rede; (ii) compensação de reativo; (iii) estudo de estabilidade do sistema; (iv) sincronização da operação da MR com o sistema principal.

Modo de Operação Ilhado

No modo ilhado, a MR funciona de forma independente da rede de distribuição e utiliza recursos locais, regulando a potência e frequência para assegurar seu funcionamento e, no caso de necessidade, agendando ou abandonando cargas não prioritárias (Preto, 2012).

A Figura 2.2 retrata uma MR operando em modo ilhado.

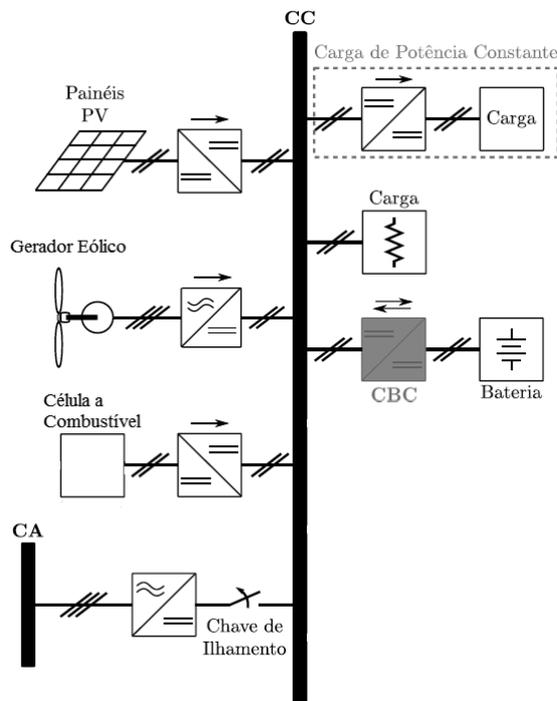


Figura 2.2: Microrrede CC e a modelagem utilizada (Tahim et al., 2012a).

O modo de operação rede ilhada, é também chamado de operação em modo de emergência. Apesar de o nome remeter a uma situação inesperada, a ope-

ração de forma isolada do sistema pode ocorrer de forma planejada ou forçada. Em qualquer uma das situações, a MR, neste modo de operação, deve ser capaz de alimentar as cargas que estão a ela associadas, especialmente as cargas prioritárias.

Segundo Ribeiro Lunardelli (2010), a qualidade do serviço e a integridade do sistema elétrico são pontos chave para garantir o bom funcionamento do sistema, sendo fatores condicionantes para aceitação da operação em modo ilhado. A habilidade de se isolar fontes e cargas juntas tem o potencial de prover maior confiabilidade em relação ao sistema elétrico como um todo (Lasseter and Piagi, 2004).

Ao contrário do que ocorre quando conectada na rede, uma MR operando em modo isolado por vezes terá uma ou mais fontes de energia que deverão ser controladas pelo ajuste de sua tensão e frequência de trabalho. Esta necessidade de controle, que é abrandada quando no modo de funcionamento conectado à rede, exige elementos de controle que cuidarão para que as cargas sejam completamente atendidas. Estes controladores impedirão que, distúrbios, causados por operação em baixas frequências da fonte por exemplo, impactem as cargas.

Um momento crítico da operação, em que se observa também a intervenção ativa dos controladores, se dá no momento da desconexão da MR do sistema de distribuição de energia. Se uma MR está partilhando potência, com ou da rede, logo antes da desconexão, o controle da célula deve atuar de forma a manter o balanço entre geração e consumo no modo ilhado, além de preservar a qualidade de energia adequada, considerando inclusive o fornecimento suficiente de potência reativa, para minimizar o efeito de afundamento de tensão (Basak et al., 2009).

Adicionalmente, as funções executadas pelo controlador mencionadas para o modo de operação conectado à rede, quando desacoplada do sistema principal, o controlador tem ainda a função de manter a operação das cargas prioritárias, administrar sistemas de armazenamento de energia e avaliar as possibilidades de reconexão com a rede.

Nas últimas décadas, a eletrônica de potência tem se desenvolvido muito rapidamente e, de forma complementar à chegada da GD, implica não só na mudança do paradigma do cenário da distribuição elétrica atual mas a operação

em CA também começa a ser questionada. Muitas empresas e pesquisadores tem voltado a atenção, atualmente, para a distribuição em CC por ser mais eficiente em alguns contextos (Tahim, 2015).

2.3.2 Microrredes em Corrente Contínua

Nos séculos passados, quando os primeiros inventos e implementações em produção e distribuição de energia elétrica surgiam, Thomas Edison defendia a teoria de que pequenos geradores de energia entregassem sua produção em CC. A CC funcionou bem com motores elétricos e lâmpadas da época. Mas a energia em CA, defendida por Nicola Tesla e George Westinghouse passou a dominar a geração e transmissão de energia elétrica quase que exclusivamente. Aspectos técnicos mostraram que que CA poderia ser transmitida de forma mais eficiente a longas distâncias e em alta tensão com correntes baixas. Altas tensões em CC podem ser transmitidas por longas distâncias eficientemente, no entanto, na época não existia tecnologia confiável e de baixo custo capaz de elevar e reduzir a tensão CC (Heldwein, 2009).

Mas à medida que as tecnologias em fontes renováveis, como a energia solar fotovoltaica e energia eólica se tornam mais atraentes, MR CC se tornaram uma alternativa interessante e viável. A maioria dos dispositivos que são usados nas residências são alimentados em CC, como computadores portáteis, celulares, luzes de LED e novas tecnologias como os veículos elétricos e híbridos, que utilizam baterias como fonte de energia. Nessa configuração há a possibilidade de armazenamento de excedente, onde a energia obtida através de painéis solares, geradores eólicos e outras fontes de energia podem ser vendidas posteriormente às companhias de energia. Se o intuito for diminuir a dependência do sistema principal, sistemas em CC podem alcançar esse objetivo com maior eficiência (Justo et al., 2013).

As tecnologias existentes na atualidade, com dispositivos eletrônicos de baixa potência, permitem que hoje sejam construídas redes CC conectando dispositivos e fontes geradoras CC. Isso ainda era inviável devido às perdas elétricas sofridas ao longo da linha de transmissão quando se pensava em transmitir energia CC em baixa tensão, ao contrário de fazê-lo em alta tensão CA, como é feito no sistema convencional. Além disso, a segurança é garantida, ao se reduzir os riscos com choques elétricos ao se transmitir em baixa tensão

CC. Em algumas aplicações, o sistema CC tem apresentado como uma solução mais eficiente do que a CA (Kakigano et al., 2006; Xu and Cheng, 2011; Salomonsson, 2008).

Outros fatores estão relacionados ao controle das microrredes. Em CC não se faz necessário o controle de frequência e a sincronização com a rede de distribuição; a compensação de potência reativa e componentes harmônicos; e nem tão pouco a correção de fator de potência. Considerando as perdas por conversão na geração e na demanda, estima-se que, em uma MR CC, tais perdas podem ser reduzidas de 32% para até 10% (Savage et al., 2010; Kumar et al., 2017). Por não haver efeito pelicular e fluxo de potência reativa em redes CC, em comparação com redes CA, as perdas nos condutores também são menores (Saeedifard, 2010).

A ausência de padrões e normatizações para as MR CC tem sido um empecilho para a área. A carência de equipamentos comercialmente disponíveis para operar em CC, o nível de tensão que o sistema de distribuição deve adotar, a implementação de dispositivos de proteção contra faltas e extinção de arcos elétricos e, obviamente, a indisponibilidade de produtos compatíveis são exemplos de entraves, os quais devem ser solucionados para tornar a distribuição em corrente contínua algo factível (Torres et al., 2018).

Dispositivos projetados para operar em CC já se encontram comercialmente disponíveis para o ramo de sistemas fotovoltaicos, como fusíveis, disjuntores e chaves seccionadoras. Até que se encontre um conjunto de regras que viabilizem a instalação, estudos são direcionados para mostrar as possibilidades existentes (Tan et al., 2014).

Mais e mais pessoas estão se voltando ao uso das energias renováveis. Poder gerar a própria energia sem custo ou com custo relativamente baixo e não agredir o meio ambiente, evitar faltas de energia e o aumento do custo da conta são alguns dos pontos favoráveis ao uso de energias renováveis.

Não há dúvida de que microrredes CC serão realidade em um futuro não tão distante. A intenção não é substituir o modelo CA atual, mas incluir os sistemas CC localmente de forma a melhorar a qualidade de energia, confiabilidade e eficiência.

2.3.3 Conversores Estáticos de Potência

A eletrônica de potência é a chave para a integração entre as novas fontes de energia, as fontes de armazenamento, os veículos elétricos e as MR e/ou as redes convencionais. O uso da eletrônica de potência, de tecnologias de comunicação e de automação serão as peças fundamentais para as soluções inovadoras para a modernização dos sistemas de potência, como as melhorias na confiabilidade e qualidade da energia (Moia, 2016).

Nas MRs, independentemente das filosofias e estruturas dos controladores, todas as ações de controle são realizadas por meio de conversores estáticos (Stramosk, 2014). O uso desses são de extrema importância em MRs CC devido a necessidade de conversão de energia a fim de alcançar níveis diferentes de tensão para permitir a integração de fontes, cargas e dispositivos armazenadores de energia, com diferentes comportamentos dinâmicos. Dessa forma, a arquitetura de MRs CC é formada pelo cascadeamento de conversores distribuídos pela rede responsáveis por interconectar partes do sistema com tensão diferentes (Kwasinski and Onwuchekwa, 2011).

Nos conversores CC-CC, os terminais de entrada recebem níveis de tensão ou de corrente contínua e, de acordo com as exigências desejadas para o sistema, ajustam para outros níveis a tensão e a corrente contínua nos terminais de saída. Nas MRs CC estes conversores fazem a ligação das unidades geradores de energia ao barramento de corrente contínua onde serão conectadas as cargas, adequando o nível de tensão gerado nos terminais dessas unidades ao nível de tensão desejado no barramento CC, impondo um padrão de tensão para os equipamentos que serão conectados a ele.

Outra função dos conversores operando em MRs diz respeito ao armazenamento de energia. Este armazenamento pode ser feito através de dispositivos como volantes de inércia, banco de capacitores ou banco de baterias e possibilita o estoque do excedente de energia gerado para posterior reutilização (Roseback, 2004). Assim, quando necessário, essa energia retorna ao sistema e os conversores são responsáveis por possibilitar o fluxo de potência tanto do barramento CC para o elemento armazenador quanto do elemento armazenador para o barramento CC.

Quando os conversores são utilizados para integração de cargas, isto é, quando são conversores no ponto de carga (CPC), tem-se uma combinação de

um conversor eletrônico de potência, regulando a tensão de saída mediante possíveis variações, e uma resistência de saída. Para um aumento da tensão de entrada do CPC, há uma redução da corrente e vice-versa, fazendo com que a potência seja sempre constante. Este conjunto de carga e conversor é caracterizado por uma carga de potência instantânea constante (CPL - *Constant Power Load*). Esta associação pode ser vista na Figura 2.3.

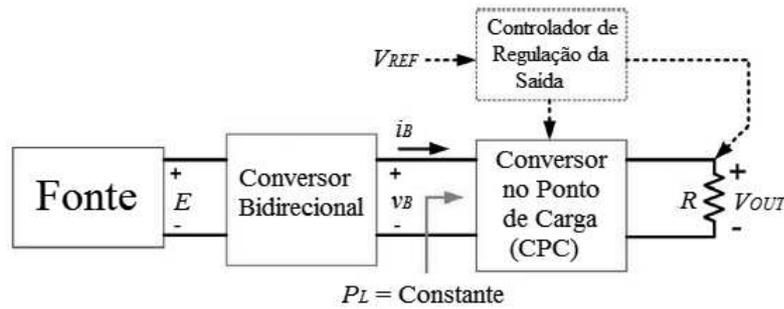


Figura 2.3: Conversor no ponto de carga, caracterizando uma CPL (Kwasinski and Onwuchekwa, 2011).

Trabalhos como os de Emadi et al. (2006); Kwasinski and Onwuchekwa (2010); Tahim et al. (2011, 2012b) tratam da análise da estabilidade de cargas que apresentam esse tipo de comportamento.

O conversor CC-CC, responsável pela carga e descarga dos elementos armazenadores, deve ter uma característica bidirecional em corrente, controlando o processo de carga e descarga da bateria dentro do sistema. A maioria dos conversores CC-CC bidirecionais (CBC) existentes se enquadram na estrutura do circuito genérico ilustrado na Figura 2.4.

Diferentes topologias de conversores podem ser utilizadas para cumprir este objetivo e a maior parte destes dispositivos está bem descrita na literatura. As topologias dos conversores CC-CC podem ser isoladas ou não-isoladas e elas se diferem pela utilização. As principais estruturas de conversores CC-CC, e seus respectivos ganhos estáticos em modo de condução contínua são apresentados na Tabela 2.1, em que d é a razão cíclica ($0 < d < 1$) (Ferreira, 2015).

Na MR e na maior parte dos casos, as tensões fornecidas pelas fontes e dispositivos armazenadores de energia são inferiores à tensão do barramento CC. Em termos de custo do conversor e proteção das fontes, a topologia ele-

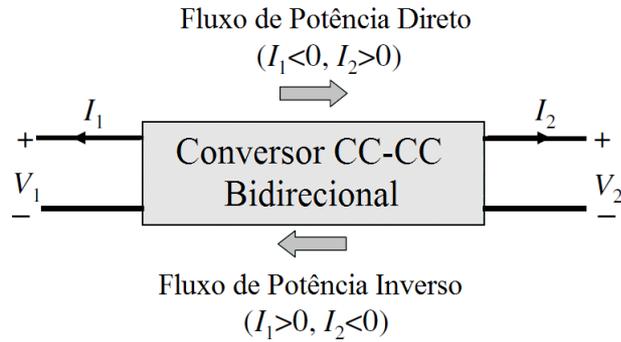


Figura 2.4: Ilustração do fluxo de potência bidirecional

Diagrama esquemático do direcionamento do fluxo de potência em conversores bidirecionais (Zhang, 2008).

Tabela 2.1: Conversores CC-CC básicos.

Conversor	Ganho Estático
<i>Buck</i>	d
<i>Boost</i>	$1/(1 - d)$
<i>Buck-Boost</i>	$d/(1 - d)$
Ćuk	$d/(1 - d)$
Sepic	$d/(1 - d)$
Zeta	$d/(1 - d)$

vadora de tensão bidirecional em corrente é mais apropriada, pois requer uma quantidade inferior de chaves e não permite a reversibilidade em tensão. Por esses motivos, a interconexão é feita através dessa topologia de conversores.

Conversor CC-CC *Boost* Bidirecional

O conversor empregado neste trabalho possui a topologia *boost* bidirecional e está representado na Figura 2.5. A bidirecionalidade deste conversor é garantida pela adição de um interruptor bidirecional em corrente que substitui um diodo da topologia original. Os interruptores são chaves estáticas (semicondutora) de potência representadas por S_1 e S_2 , e são compostas pela associação em anti-paralelo de um diodo e um transistor (usualmente IGBT). L é um

indutor para armazenamento de energia e C é um capacitor que atua como filtro de saída.

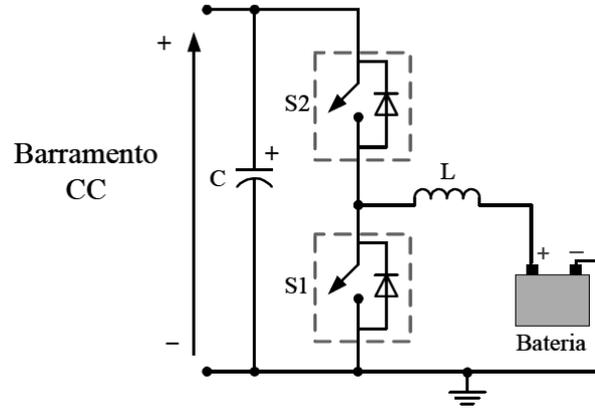


Figura 2.5: Topologia do conversor *boost* bidirecional (da Costa Padilha, 2011).

Uma análise simplificada das etapas de funcionamento deste conversor pode ser vista na Figura 2.6. Deve-se considerar que as tensões de entrada e saída e a razão cíclica permanecem invariantes no tempo. O conversor opera em modo de condução contínuo, já que as duas chaves empregadas no circuito, S_1 e S_2 , operam de forma complementar, ou seja, enquanto uma conduz a outra está em aberto e vice-versa (Cardoso, 2007).

Para esta análise, V_1 representa a tensão da bateria e V_2 é a tensão do barramento CC. Nas etapas representadas por E_1 e E_2 , o fluxo de potência circula no sentido de V_1 para V_2 . Já nas etapas E_3 e E_4 , ele acontece no sentido oposto, ou seja, de V_2 para V_1 .

Os três principais modos de funcionamento do conversor CC-CC *boost* bidirecional estão representados através das formas de onda mostradas na Figura 2.7 (Cardoso, 2007).

A Figura 2.7(a) retrata as curvas para o primeiro modo de operação, em que V_1 transfere energia a V_2 . Este fato é comprovado através da análise da corrente $i_L(t)$ que flui pelo indutor L . $i_L(t)$ apresenta valor médio positivo, que representa fluxo direto de potência pelo circuito. No sistema em estudo, esta condição de operação implica na descarga do elemento armazenador de energia,

ou seja, ele está fornecendo energia às cargas conectadas ao barramento CC.

Um segundo modo de operação está representado na Figura 2.7(b). Neste caso, dependendo do valor médio das correntes $i_L(t)$ e $i_o(t)$, V_1 ou V_2 pode fornecer energia ao sistema, havendo uma troca de energia entre essas duas fontes.

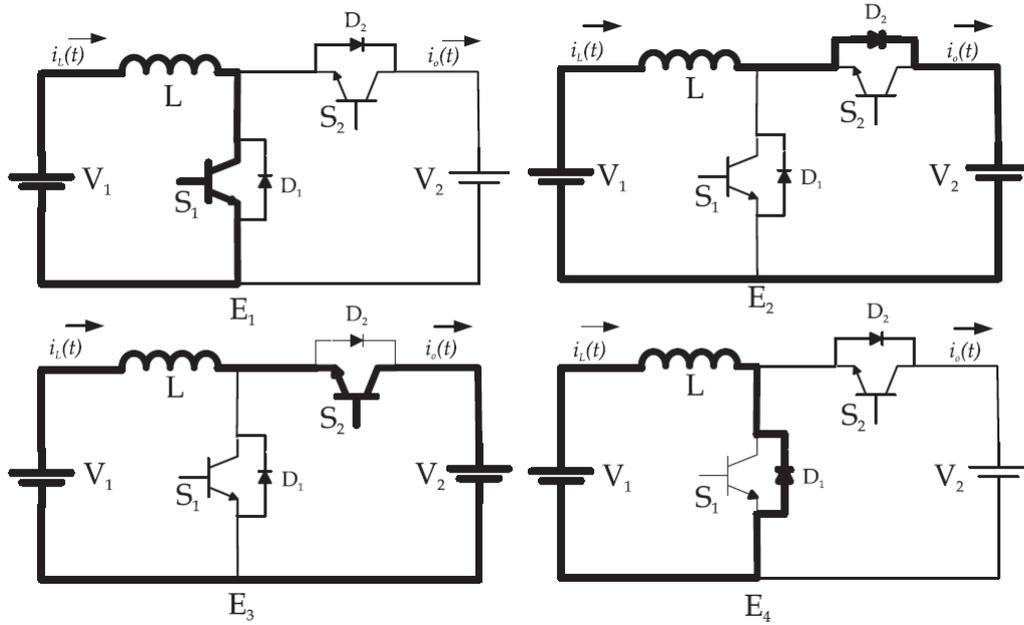


Figura 2.6: Etapas de funcionamento do conversor *boost* CC-CC bidirecional (Cardoso, 2007).

E, por fim, a Figura 2.7(c) apresenta as formas de onda referentes ao terceiro modo de operação. A energia do sistema é transferida da fonte de tensão V_2 para a fonte V_1 , em que o valor médio da corrente $i_L(t)$ é negativo. Nesta etapa, para o sistema em estudo, a bateria está sendo carregada com o excedente de energia produzido entregue ao barramento CC.

Para o modo de operação ilhado é necessário que a potência demandada pelas cargas seja suprida pelas fontes e dispositivos de armazenamento conectados ao barramento CC. O conversor CC-CC bidirecional é o responsável por realizar este balanceamento de potência gerada e demandada, fazendo também com que a tensão no barramento principal se mantenha dentro dos níveis desejados. Ao se deparar com uma situação onde a potência gerada é superior

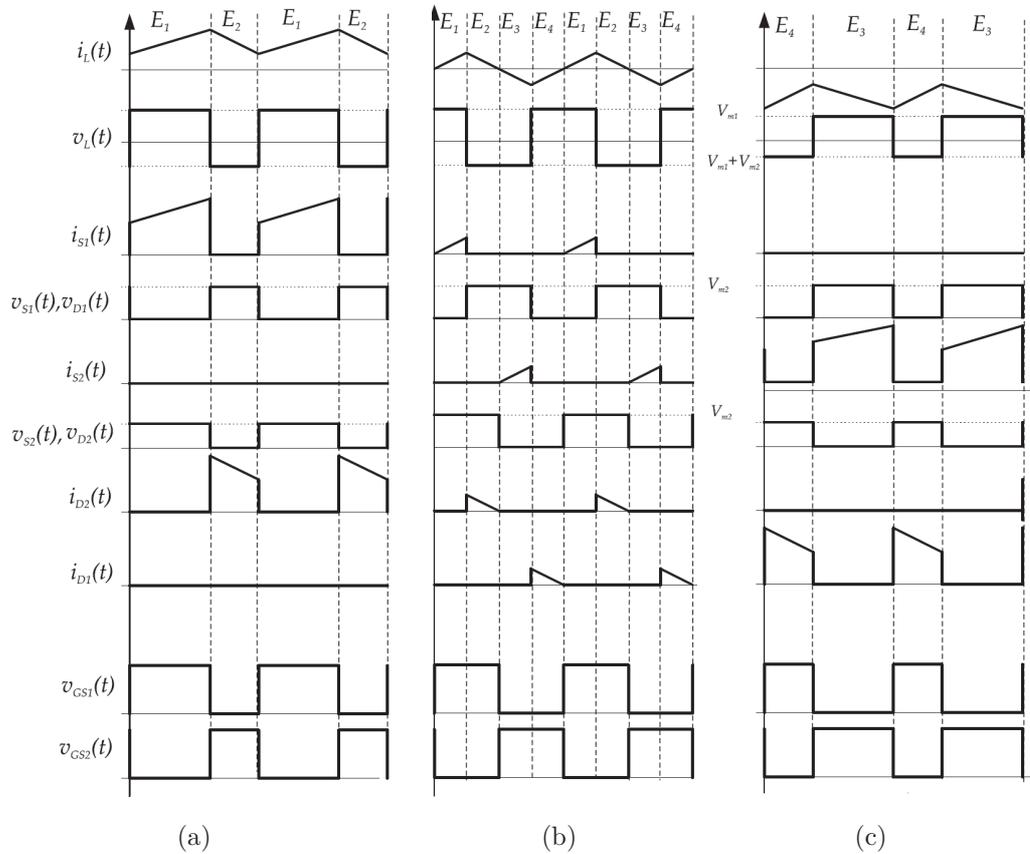


Figura 2.7: Traçado das formas de ondas do conversor bidirecional *boost* funcionando nos modos: (a) 1^a forma, (b) 2^a forma e (c) 3^a forma de funcionamento (Cardoso, 2007).

aquela demanda pelas cargas, o CBC transfere a energia excedente aos dispositivos de armazenamento de energia. Para o caso contrário, quando se tem uma demanda maior do que o que foi produzido, o CBC se torna responsável por injetar a energia armazenada de volta na rede.

2.3.4 Modulação por Largura de Pulso

Comumente utilizada para este fim, a técnica de controle PWM (*Pulse Wide Modulation*) modula o sinal de controle em largura de pulsos, permitindo que ocorra o chaveamento de S_1 e S_2 em alta frequência. O sinal de controle é a razão cíclica (ciclo de trabalho - *duty cycle*) do conversor e a sua variação controle o tempo de condução das chaves estáticas, controlando, assim, a tensão

de saída do sistema.

O sinal PWM é uma onda de período fixo (frequência constante) e largura de pulso variável, e essa variação da largura de pulso controla a intensidade do sinal de saída. Este sinal é resultado da comparação entre dois sinais de tensão: (i) um sinal modulante (V_{mod}) de baixa frequência, também chamado de sinal de referência, cuja amplitude define a largura do pulso na saída; (ii) um sinal portador, de alta frequência, que define a frequência de chaveamento do conversor.

A Figura 2.8 apresenta um esquema da construção do sinal PWM e sua aplicação na chave estática de potência.

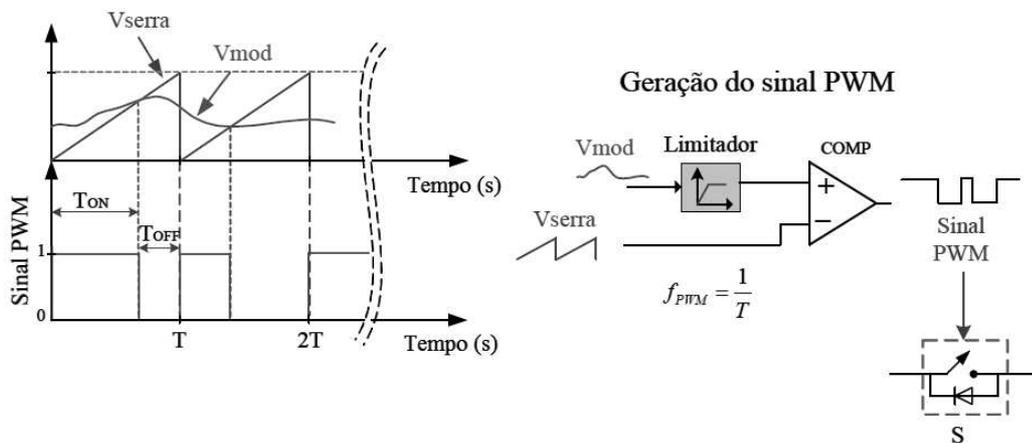


Figura 2.8: Técnica de modulação tipo PWM. Adaptado de (da Costa Padilha, 2011).

Razão Cíclica e o Sinal PWM

Na modulação PWM, o sinal modulante deve ser imagem da tensão desejada na saída. Dessa forma, para o sistema em estudo, foi utilizado um sinal contínuo. Em conversores CC-CC, é utilizado um sinal dente-de-serra como sinal portador. Utilizou-se, também, um circuito limitador para garantir que a amplitude do sinal modulante não ultrapasse o valor máximo do sinal da portadora, fazendo com que a razão cíclica estivesse sempre compreendida entre 0 a 100%.

O sinal de saída do sistema de controle proposto foi utilizado como sinal

modulante, neste trabalho. A Figura 2.9 mostra o efeito da variação da razão cíclica do conversor no sinal PWM resultante. Quanto maior a amplitude do sinal de referência, maior será o tempo de condução das chaves estáticas, e vice-versa.

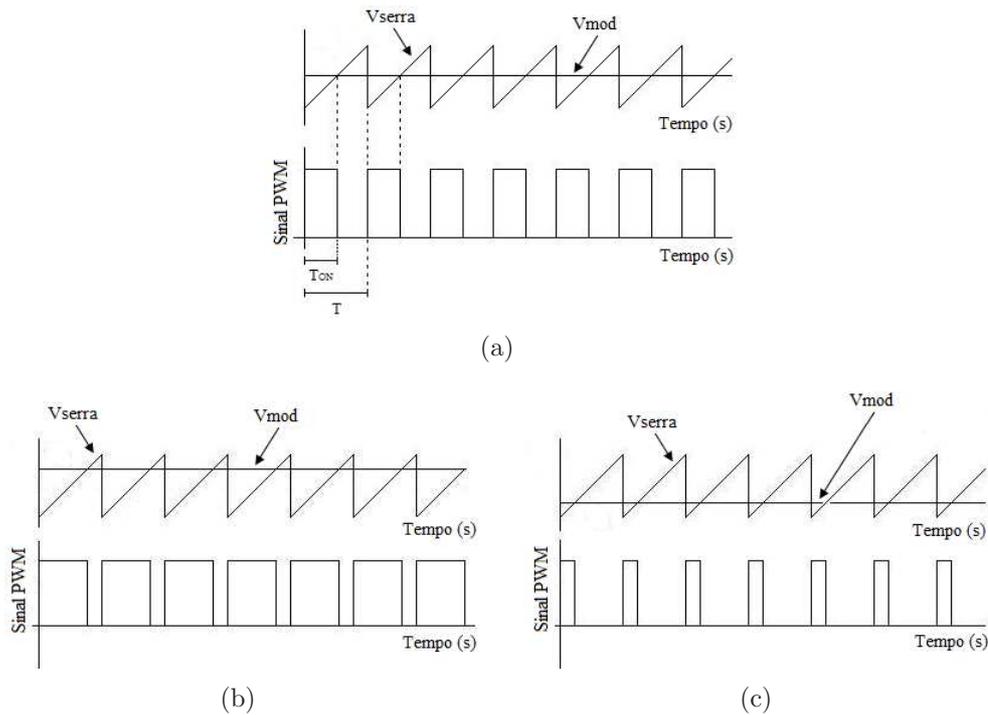


Figura 2.9: Sinal de controle PWM.

Sinal PWM para diferentes valores de razão cíclica: (a) V_{mod} é igual ao valor médio de V_{serra} e $T_{ON} = T_{OFF}$, (b) V_{mod} é maior do que o valor médio de V_{serra} e $T_{ON} > T_{OFF}$, e (c) V_{mod} é menor do que o valor médio de V_{serra} e $T_{ON} < T_{OFF}$.

Neste trabalho, o sinal de referência é o sinal de controle e razão cíclica do sinal PWM, e é definido por:

$$d = \frac{T_{ON}}{T} \times 100\% \quad (2.1)$$

2.4 Controle de Microrredes CC

Deve-se ponderar que a aplicação indiscriminada de gerações individuais distribuídas pode causar tanto problemas quanto solucioná-los, uma vez que o controle de um grande número de REDs é ainda um grande desafio em termos de operação e controle seguro e eficiente da rede elétrica.

Diferentes conversores de energia (entre as fontes/cargas e o barramento CC) estão envolvidos quando o assunto é MR CC. Conversores estáticos são diretamente utilizados e tem a principal função de regular a operação do sistema.

O controle da tensão das MR atua nos conversores e alteram a largura de pulso do PWM usado para o chaveamento do semicondutor, a fim de evitar quedas de tensão no barramento de saída. A variação da tensão de saída causada pela mudança da tensão de entrada ou da carga conectada à saída do conversor é muitas vezes indesejada. Mas, esse problema pode ser reduzido dinamicamente a níveis satisfatórios, dependendo da técnica utilizada, ao se aplicar as teorias de controle em malha fechada.

Alguns métodos de regulação de tensão do barramento CC podem ser encontrados na literatura (Stramosk, 2014; Tahim, 2015; Ferreira, 2015; Schonberger, 2006; Zhang, 2011; Kakigano, 2010; Chen, 2013; Nasir et al., 2019; Guerrero et al., 2018; Han et al., 2018).

O controle adaptativo permite a variação dos parâmetros do controlador, no decorrer do tempo, fazendo com que este se adeque às variações do sistema, sejam elas causadas por ruídos ou por não-linearidade natural do mesmo. Existem incertezas e não-linearidades relativas a variação de carga no barramento CC e essas mudanças provocam alteração da tensão do barramento de acordo com a potência fornecida pelas cargas.

O intuito de usar este tipo de controle é: (a) regular a tensão de saída desejada do conversor, (b) assegurar a robustez sob variações de potência (fornecida e demandada) e de carga, e (c) minimizar a resposta transitória durante os eventos de variação de carga. Para isso, considera-se que a capacidade instalada do DAE é suficiente para controlar a tensão dos barramentos durante o ilhamento. Em tal situação, o CBC injeta ou extrai potência da MR com o objetivo de manter a tensão regulada.

2.5 Conclusões do capítulo

O presente capítulo teve como objetivo familiarizar o leitor com alguns princípios básicos relacionados ao conceito de GD. Foram abordados os conceitos relacionados ao termo GD e inserida a ideia das microrredes e o contexto necessário para a implementação do controlador adaptativo, tema principal deste trabalho e que será abordado nos próximos capítulos.

Controlador Adaptativo Utilizado na Microrrede CC

“O estudante deve entender o problema. Mas não basta que ele o entenda. É necessário que ele deseje sua solução.”

George Pólya¹

3.1 Introdução

A principal preocupação na operação de uma microrrede CC é o controle do conversor a ela conectado, que gerencia o fluxo de potência do sistema, e controla a tensão do barramento principal. Optou-se pelo uso de controladores auto-sintonizáveis e estes necessitam de uma forma de identificação do modelo do processo. Neste capítulo são apresentadas as premissas e equações básicas do estimador recursivo utilizado, bem como do controlador auto-sintonizável de Variância Mínima Generalizado.

3.2 Controle Adaptativo

Tolerâncias de componentes, alterações imprevisíveis de cargas, mudanças nas condições ambientais, e os efeitos do envelhecimento do sistema podem afetar o desempenho do controlador. Por estas razões, controladores adaptativos

¹(Polya, 1957, p. 6).

e auto-ajustáveis estão desempenhando um papel cada vez mais importante, podendo ajustar-se rapidamente a variações de parâmetros da MR.

Um controlador adaptativo é um controlador que pode modificar seu comportamento em resposta a mudanças na dinâmica do processo e a perturbações. Segundo Aström and Wittenmark (1995) um controlador adaptativo é um controlador com parâmetros ajustáveis que apresenta um mecanismo para ajuste dos parâmetros. Além de apresentar comportamento não-linear, o controlador adaptativo é um pouco mais complicado de ser implementado em comparação com o controlador de ganhos fixos. Por esse motivo se faz necessária uma investigação *a priori* do problema de controle, como esquematizado no procedimento da Figura 3.1.

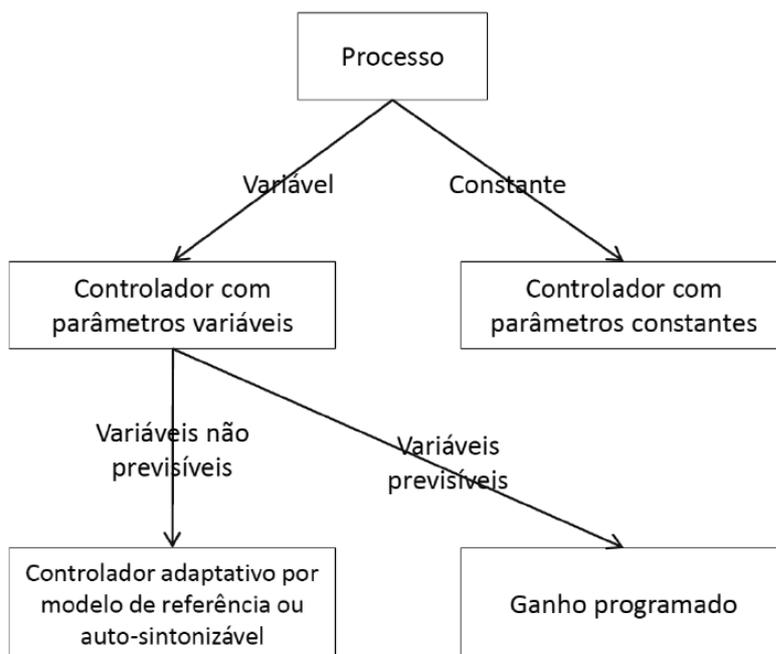


Figura 3.1: Procedimento para auxiliar na escolha do controlador.

Em controladores convencionais (não adaptativos), os parâmetros do controlador são computados a partir dos parâmetros da planta. Se os parâmetros da planta não são conhecidos, é intuitivo substituí-los pelas suas estimativas determinadas por algum estimador (*online*) de parâmetros. Uma das concepções de controladores que combina um esquema de identificação *online* de parâmetros e um controlador convencional é a denominada auto-ajustável (*Self-Tuning*

Regulator - STR). Um esquema deste tipo de controle é retratado na Figura 3.2.

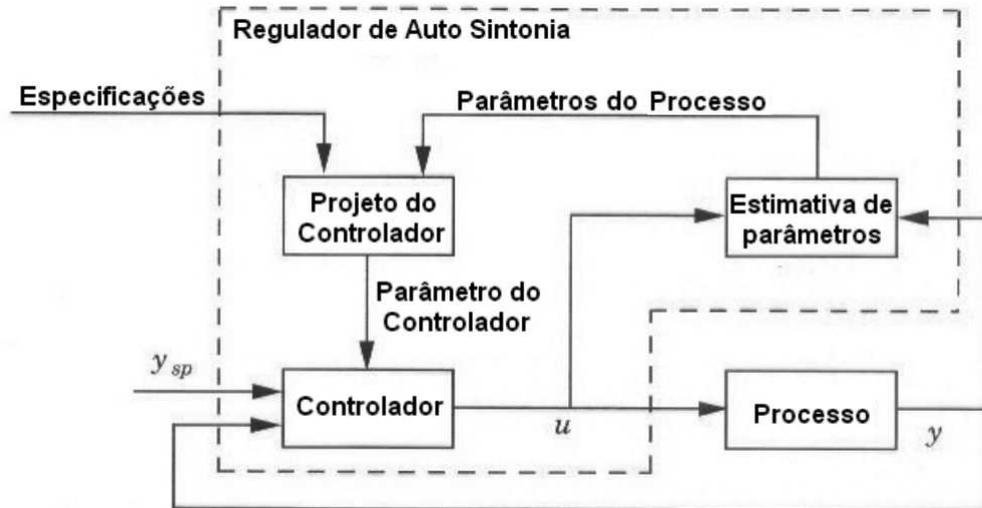


Figura 3.2: Diagrama de blocos de um regulador auto-ajustável. Adaptado de (Antunes, 2008).

Os parâmetros do controlador são ajustados por um estimador de parâmetros recursivo e um cálculo de projeto. O modelo do processo e o projeto de controle são atualizados a cada período de amostragem. Para implementar um controlador STR é necessário, além do estimador *on-line*, uma técnica de controle.

3.3 Estimação de Parâmetros

A etapa da estimação de parâmetros do sistema é responsável pela identificação dos parâmetros que descrevem o comportamento da planta estudada.

Se os parâmetros são fixos para todo o tempo, a sua determinação é mais fácil, especialmente quando o sistema é linear e estável. Contudo, em muitas aplicações, a estrutura do modelo da planta pode ser conhecida, mas seus parâmetros podem ser desconhecidos e mudar com o tempo devido a mudanças nas condições de operação, envelhecimento dos equipamentos, aquecimento, falhas, dentre outros.

Os esquemas de estimação adequados para usar neste caso são aqueles que

fornece estimativas frequentes dos parâmetros.

3.3.1 Modelo ARX

O modelo do tipo ARX (Auto-Regressivo com Entrada Exógena) será utilizado na implementação da estimação dos parâmetros *on-line* do algoritmo de controle adaptativo, através do método dos Mínimos Quadrados Recursivos com fator de esquecimento.

Um modelo ARX possui a estrutura representada pela Equação 3.1:

$$A(z^{-1})y(t) = z^{-d}B(z^{-1})u(t) \quad (3.1)$$

em que A e B são polinômios em z , e este é tido como operador de atraso, $y(t)$ é a saída do sistema, $u(t)$ é o sinal de controle, equivalente ao sinal de entrada da planta, e d é o tempo de atraso por amostras do sistema. Foram considerados como saída e entrada da planta a tensão de saída do conversor bidirecional (tensão do barramento CC) e a razão cíclica (ou ciclo de trabalho) deste mesmo conversor, respectivamente.

Os polinômios $A(z^{-1})$ e $B(z^{-1})$ possuem o formato das Equações 3.2 e 3.3:

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_nz^{-n} \quad (3.2)$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_mz^{-m-d} \quad (3.3)$$

em que n e m representam, respectivamente, o número de pólos e zeros que definirão a ordem do modelo do sistema e, conseqüentemente, o número de parâmetros que deverão ser estimados para o controle. Vale ressaltar a dificuldade na escolha da ordem adequada para a representação do sistema.

Alguns critérios podem ser utilizados para definir a ordem do modelo, como apresentados nos trabalhos de Schwarz (1978); Akaike (1969). Porém, neste trabalho, a ordem do modelo foi escolhida através de testes iniciais experimentando modelos mais simples de ordem reduzida, aumentando a mesma até obter um modelo que conseguisse representar as características principais deste sistema.

3.3.2 Mínimos Quadrados

Existem diversos algoritmos destinados a estimação de parâmetros, dentre eles o método dos Mínimos Quadrados (MQ), adotado neste trabalho. Este estimador sugere que o valor mais provável das grandezas desconhecidas é a que minimiza a soma dos quadrados da diferença entre os valores atualmente observados e os valores calculados. É o método mais utilizado, devido a sua simplicidade e eficiência. Algumas variações do método podem ser encontradas em Aguirre (2007).

Quando os dados de entrada e saída do processo são coletados e disponibilizados antes que se proceda a estimação, a mesma é denominada *offline*. Algumas vezes é necessário que o processo de identificação seja realizado com os dados a serem recolhidos a cada iteração, ou seja, a estimação é iterativa, para cada intervalo de tempo ocorre uma nova estimação. Nestes casos ela ocorre em tempo real e é dita recursiva ou estimação *online*. Estes métodos recursivos são utilizados quando se deseja monitorar os parâmetros da planta a cada instante, como é o caso dos controladores auto-sintonizáveis.

Mínimos Quadrados Recursivos

Segundo Aström and Wittenmark (2008), a determinação recursiva (ou *online*) dos parâmetros de um modelo é um quesito chave em controle adaptativo. Ela permite o rastreamento de parâmetros variantes para este tipo de controle fazendo com que o modelo do sistema seja atualizado a cada período de amostragem quando novas medidas são disponibilizadas. Isso permite que o controlador se adeque às novas características do processo a ser controlado e seja sintonizado novamente caso existam variações na dinâmica do processo.

As Equações 3.4, 3.5 e 3.6 descrevem um algoritmo recursivo,

$$K(k) = \frac{P(k-1)\psi(k)}{\psi^T(k)P(k-1)\psi(k) + 1} \quad (3.4)$$

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + K(k)[y(k) - \psi^T(k)\hat{\theta}(k-1)] \quad (3.5)$$

$$P(k) = P(k-1) - K(k)\hat{\theta}(k-1)P(k-1) \quad (3.6)$$

em que:

- k representa o número de amostras (instante de amostragem);
- $\hat{\theta}(k) = \{-a_1 \quad -a_2 \quad \cdots \quad b_0 \quad b_1 \quad \cdots\}^T$ representa o vetor de parâmetros estimados;
- $\psi(k) = \{-y(k-1) \quad -y(k-2) \quad \cdots \quad -u(k-d) \quad -u(k-d-1) \quad \cdots\}$ representa o vetor de regressores;
- d representa o atraso em número de amostras;
- $y(k)$ representa o vetor de dados de saída;
- $K(k)$ representa o ganho do estimador, e
- $P(k)$ representa a matriz de covariância dos parâmetros.

Após calcular o valor predito da saída, calcula-se o ganho $K(k)$, atualiza a estimativa $\hat{\theta}(k)$, e atualiza a matriz de covariância $P(k)$. Incrementa e retorna todo o procedimento.

A versão recursiva do método dos MQ permite obter uma estimativa do valor dos parâmetros do sistema tendo por base o valor anterior, que é corrigido através de um termo proporcional ao erro, interpretado como o erro de estimativa do sinal $y(k)$. O vector $K(k)$ pode ser interpretado como um conjunto de pesos que indica de que modo deve ser corrigida a estimativa efetuada na iteração anterior.

A medida da qualidade do estimador reflete-se na matriz $P(k)$, a magnitude dos elementos da diagonal dessa matriz estão relacionados com a variabilidade dos correspondentes elementos em $\hat{\theta}(k)$. Se o elemento é pequeno, significa que a estimativa é adequada (baixa variância), por outro lado, se o elemento é grande, significa que a estimativa é inadequada (alta variância).

Mínimos Quadrados Recursivos com Fator de Esquecimento

Se o sistema a ser identificado variar no tempo é necessário fornecer ao algoritmo de MQ uma capacidade de ponderação diferenciada para as observações,

dando-se uma maior importância às últimas medidas, uma vez que elas contêm informações mais atualizadas e precisam ter maior influência na estimação dos parâmetros.

Dessa forma, para evitar que dados muito antigos impeçam que a informação introduzida por novas medidas provoque a devida correção dos parâmetros, um fator de esquecimento (β) é usado. A escolha desse valor corresponde a um compromisso entre a capacidade do estimador seguir variações rápidas e a qualidade das estimativas a longo prazo (Antunes, 2008).

As Equações 3.7, 3.8 e 3.9 descrevem o algoritmo.

$$K(k) = \frac{P(k-1)\psi(k)}{\psi^T(k)P(k-1)\psi(k) + \beta} \quad (3.7)$$

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + K(k)[y(k) - \psi^T(k)\hat{\theta}(k-1)] \quad (3.8)$$

$$P(k) = \frac{1}{\beta} \left(P(k-1) - \frac{P(k-1)\psi(k)\psi^T(k)P(k-1)}{\psi^T(k)P(k-1)\psi(k) + \beta} \right) \quad (3.9)$$

Se os valores para os quais os parâmetros estimados convergem forem considerados valores médios dos mesmos, é possível estabelecer um modelo discreto médio para a MR em estudo, podendo obter os polinômios $A(z^{-1})$ e $B(z^{-1})$.

3.4 Controlador de Variância Mínima Generalizado

O Controlador de Variância Mínima Generalizado (GMV) define um controlador geral a partir de ideias de controle preditivo e modelo de referência e, dessa forma, tem-se uma variedade de critérios para projeto em malha fechada (Jota, 2004). A ação de controle é exercida com o objetivo de minimizar uma função de custo (J) que representa a variância de uma função auxiliar (Φ) em cada instante de amostragem k (Jota, 1987), dada pelas Equações 3.10 e 3.11:

$$J = E \{ \Phi^2(k + d/k) \} \quad (3.10)$$

$$\Phi(k) = P(z^{-1})y(k) + Q(z^{-1})u(k-d) - R(z^{-1})w(k-d) \quad (3.11)$$

em que:

- E representa a esperança matemática;
- Φ representa a função de saída auxiliar;
- y representa a variável a ser controlada no processo;
- u representa a variável manipulada;
- d representa o atraso pelo número de amostras;
- w representa o sinal de referência ou *set-point*;
- z^{-1} é o operador de atraso, e
- $P(z^{-1})$, $Q(z^{-1})$ e $R(z^{-1})$ são funções de transferência escolhidas pelo usuário.

O projeto do controlador consiste na determinação dos polinômios $P(z^{-1})$, $Q(z^{-1})$ e $R(z^{-1})$ que irão ponderar os sinais de saída, controle e referência, respectivamente, de acordo com os critérios de desempenho estabelecidos. A Figura 3.3 apresenta a estrutura desse controlador.

A partir dos valores de entrada e saída passados, deve-se prever a saída futura do sistema. A Equação 3.12 é chamada Equação Diofantina e descreve o sistema:

$$\frac{CP_n}{AP_d} = E + z^{-d} \frac{F}{AP_d} \quad (3.12)$$

em que:

- $E(z^{-1}) = 1 + e_1z^{-1} + \dots + e_{d-1}z^{-(d-1)}$;
- $F(z^{-1}) = 1 + f_0z^{-1} + \dots + f_{n-1}z^{-(n-1)}$.

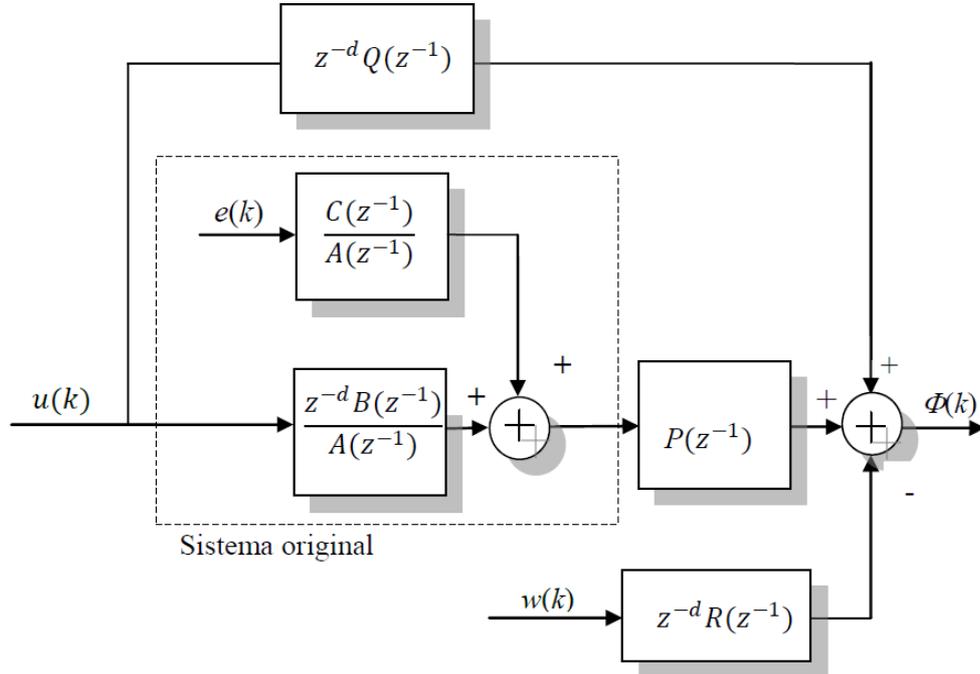


Figura 3.3: Estrutura do Controlador de Variância Mínima Generalizado (de Carvalho, 2009).

Os polinômios A e C , que neste caso assumem valor unitário por se tratar de um modelo ARX, foram determinados na seção 3.3.1. Os termos P_n e P_d representam os polinômios do numerador e denominador da função de transferência P .

Através do cálculo da identidade de diofantina, Equação 3.12, obtém-se os coeficientes dos polinômios E e F . Após as manipulações matemáticas necessárias, chega-se à lei de controle definida pela Equação 3.13.

$$u(k) = \frac{C \cdot R \cdot w(k) - \frac{F}{P_d} \cdot y(k)}{E \cdot B + C \cdot Q} \quad (3.13)$$

Sendo os polinômios que compõem o modelo da planta participantes da lei de controle, a estimação *online* auxilia na adaptação necessária do sinal de controle de forma que o mesmo acompanhe possíveis variações.

3.5 Conclusões do capítulo

No presente capítulo foi apresentada a estratégia de controle de variância mínima generalizada. Detalhes de implementação prática do sistema de controle e as peculiaridades do algoritmo serão descritas no próximo capítulo, bem como os resultados simulados do algoritmo de controle que foi proposto para a planta piloto.

Modelagem da Microrrede Estudada e do Controlador Adaptativo

“Um sistema complexo funcional é obtido invariavelmente a partir de um sistema mais simples que já funciona. Da mesma forma, também podemos assumir que o inverso seja verdadeiro: um sistema complexo projetado a partir de rascunhos nunca funcionará. É necessário começar de novo, trabalhando num sistema mais simples, colocando-o para funcionar para só então evoluí-lo.”

John Gall¹

4.1 Introdução

Neste capítulo será apresentada a modelagem da microrrede utilizada no trabalho. O controle do conversor é feito de maneira que a tensão de saída possa ser controlada, em função da variação da razão cíclica do semicondutor de potência do conversor. O sinal do tipo PWM, comumente utilizado para esse fim, define a abertura e fechamento das chaves e o sistema de controle

¹(Gall, 1977, p. 71).

apresentado no Capítulo 3 é responsável por ajustar o ciclo de trabalho para a saída desejada.

4.2 Modelo Estudado

A MR considerada neste trabalho é composta por: (i) uma bateria (V_{in}), tratada como fonte de tensão CC ideal, que irá armazenar a energia excedente no circuito ou fornecer energia caso necessário; (ii) um conversor CC-CC bidirecional (CBC), responsável pelo controle do fluxo de potência do sistema; (iii) um resistor (R) que representa cargas ligadas diretamente ao barramento; (iv) conversores no ponto de carga (CPC), modelados como cargas de potência constante ($CPLs$), representadas por P_L ; e (v) fontes (solar, eólica, célula combustível, etc.) conectadas ao barramento CC, por meio de conversores unidirecionais, modeladas como fontes de potência (P_S) (Tahim et al., 2012a).

O modelo simplificado da MR pode ser visto na Figura 4.1. Para o modelo simplificado, considerou-se que as potências geradas e demandas foram modeladas como uma única fonte de potência em que $P = P_S + P_L$, dado $P_S \leq 0$ e $P_L > 0$.

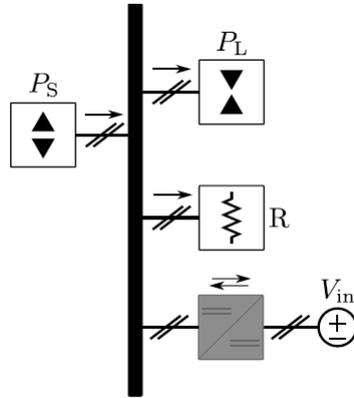


Figura 4.1: Modelo simplificado da microrrede CC (Tahim et al., 2012a).

O circuito da Figura 4.2 mostra a implementação prática para a MR proposta e representada nos esquemas anteriores.

A corrente no barramento CC (i_{bus}) e a carga equivalente (R_{eq}) para este circuito estão representadas através das Equações 4.1 e 4.2,

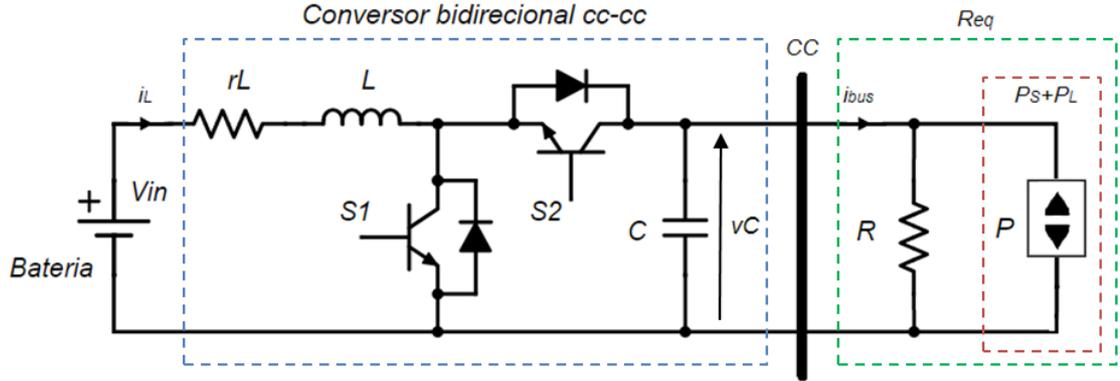


Figura 4.2: Circuito implementado da microrrede CC operando em modo ilhado (Tahim et al., 2012a).

$$i_{bus} = \frac{v_C}{R} + \frac{P}{v_C} \quad (4.1)$$

$$R_{eq} = \frac{v_C}{i_{bus}} \quad (4.2)$$

em que v_C é a tensão de saída do conversor *boost* e é equivalente à tensão do barramento CC.

A partir da análise das tensões e correntes do circuito apresentado na Figura 4.2 é possível extrair as equações dinâmicas que relacionam os estados do sistema. Para tal, foi necessário a seguinte consideração: as chaves estáticas S_1 e S_2 são complementares. Isso quer dizer que apenas um sinal de controle é calculado para as duas chaves e enquanto S_2 conduz, S_1 está em bloqueio, e vice-versa.

As Equações 4.3 e 4.4 representam o pressuposto acima e representam a dinâmica da MR em estudo.

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} (V_{in} - r_L i_L - u v_C) \quad (4.3)$$

$$\frac{dv_C}{dt} = \frac{1}{C} \left(ui_L - \frac{v_C}{R} - \frac{P}{v_C} \right) \quad (4.4)$$

A variável v_C corresponde à tensão sobre o elemento capacitivo e também representa a tensão no barramento CC; i_L é a corrente sobre o indutor L ; V_{in} representa o elemento armazenador de energia (bateria); R é o somatório de todas as cargas resistivas que estão conectadas diretamente ao barramento principal; r_L é a resistência série equivalente do indutor; P é a diferença entre as potências gerada e demanda; e $u = 1$ representa a condição de condução da chave S_2 e, para $u = 0$, a chave S_1 está em condução.

4.2.1 Modelagem em Tempo Discreto e Período de Amostragem

Conversores no ponto de carga agem como cargas de potência constante e introduzem um efeito desestabilizador na MR CC (Kwasinski and Onwuchekwa, 2011) e este efeito precisa ser controlado.

Para o sistema de controle projetado é necessário a obtenção do modelo da planta em tempo discreto. Sistemas discretos possuem uma maior flexibilidade para a implementação de algoritmos de controle.

A obtenção do modelo discreto foi baseada na análise das variáveis de entrada e saída da planta em questão e posterior identificação do sistema através da estimação recursiva de seus parâmetros, que permite uma atualização contínua dos mesmos diante variações na dinâmica da planta.

Diante disso, as seguintes variáveis foram consideradas: $d(t)$ é a razão cíclica, valor CC usado para gerar o sinal PWM que comanda a abertura e fechamento das chaves do conversor, e foi considerada como entrada do sistema; v_C , que é a tensão do barramento CC, foi coletada como saída para o sistema.

Um passo importante na determinação do modelo discreto de um sistema e que merece atenção especial é a escolha da taxa ou período de amostragem (T_s).

Para definir o período de amostragem utilizado no modelo discreto da MR foi feito um teste preliminar que consistiu em aplicar um sinal degrau na entrada do sistema.

Em um dos critérios propostos por Seborg et al. (1989), $T_s \leq 0,1\tau$, em que τ é a constante de tempo dominante do sistema. Assim, definiu-se um $T_s = 10^{-4}s$, valor menor do que o necessário mas esta superamostragem garante uma taxa eficiente sob variações do sinal de controle.

Caso o Teorema da Amostragem não seja satisfeito, surge o fenômeno conhecido como falseamento da informação, *aliasing*, que consiste no aparecimento de baixas frequências falsas no sinal amostrado. Estas frequências são repetições de outras mais altas, estas sim contidas no sinal real, e trazem problemas ao sistema de controle.

Através de testes para resposta a diferentes entradas ao degrau constatou-se que para $d \rightarrow 1$ a tensão v_C aumenta, e para $d \rightarrow 0$ esta tensão de saída apresenta comportamento contrário.

Depois da escolha do período de amostragem para a malha de controle da MR prosseguiu para a determinação do modelo utilizado na pesquisa.

A MR proposta apresenta comportamento característico de um sistema de segunda ordem. Apesar de modelos com ordem superior serem mais representativos e descreverem melhor as características do sistema, a aproximação de segunda ordem foi escolhida e definida com a seguinte estrutura:

$$y(k) = -a_1y(k-1) - a_2y(k-2) + b_0u(k-1) + b_1u(k-2). \quad (4.5)$$

Este modelo será usado nos próximos passos deste trabalho, assim como na formulação e projeto do controlador adaptativo, priorizando a simplicidade nas representações.

4.2.2 Controlador de Variância Mínima Generalizado

Para a MR estudada, o sistema de controle deve seguir o esquema da Figura 4.3.

4.2.3 Escolha dos Polinômios P , Q e R

As funções de transferência P , Q e R possuem influência direta na resposta em malha fechada do sistema controlado, por isso, devem ser escolhidos de

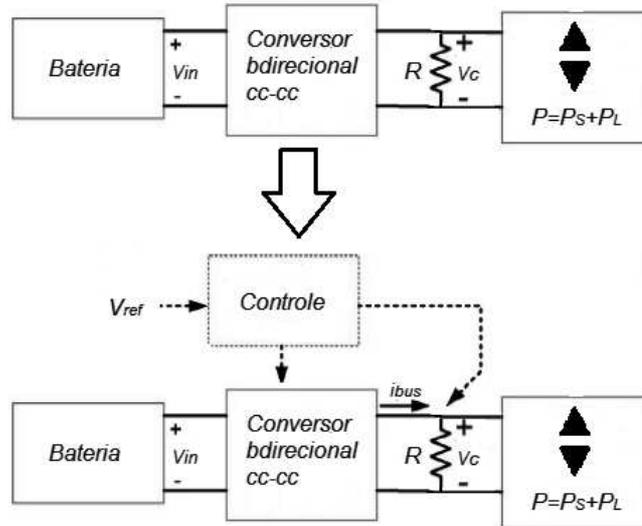


Figura 4.3: Diagrama esquemático do sistema de controle. Adaptado de Kwasiński and Onwuchekwa (2011).

forma a assegurar o desempenho e a estabilidade do sistema.

O polinômio $P(z^{-1})$ interfere no posicionamento dos pólos de malha fechada. Ele é escolhido a partir de um modelo do comportamento desejado do sistema em malha fechada ($M(s)$), que depois é discretizado, ou seja, $M(z^{-1}) = Z(M(s))$ (Jota, 2004). Desta forma, P é definido como segue na Equação 4.6:

$$P(z^{-1}) = \frac{1}{M(z^{-1})} \quad (4.6)$$

O polinômio $Q(z^{-1})$ pondera o sinal de controle, impedindo que essa variável aumente indefinidamente, reduzindo a variação desse sinal. Ele assume uma estrutural incremental, agindo como um integrador no sistema e está representado na Equação 4.7.

$$Q(z^{-1}) = \lambda(1 - z^{-1}) \quad (4.7)$$

Estando este valor compreendido entre 0 e 1, quando próximo de 0, temos uma redução exponencial da variância do sinal de controle ($u(k)$), tornando o mesmo pouco ativo e aumentando a variância do sinal de saída em torno

do valor de referência. Para valores de λ mais próximos de 1, tem-se pouca redução da variância do sinal de controle, deixando-o mais livre para atuar sobre o sinal de saída e reduzindo, assim, a variância do mesmo em torno do *setpoint*.

O polinômio $R(z^{-1})$ atua como um filtro para o sinal de referência usado na realimentação, e o mesmo foi definido como $R = r_0$.

Pela correta sintonia dos polinômios P e Q pode-se reduzir a sobrelevação da resposta transitória do sistema.

4.3 Conclusões do capítulo

Neste capítulo foram apresentados os modelos matemáticos de tempo contínuo e discreto representativos da MR proposta nesta dissertação. Os critérios para a escolha do período de amostragem para a malha e a implementação do modelo ARX foram apresentados.

O modelo desenvolvido nesse capítulo será posteriormente utilizado para a análise e ajuste do controlador adaptativo.

Resultados de Simulação e Experimentais

“Todo o argumento permite sempre a discussão de duas teses contrárias, inclusive este de que a tese favorável e contrária são igualmente defensáveis.”

Protágoras de Abdera

5.1 Introdução

Neste capítulo, os resultados provenientes de simulações realizadas no *software* Matlab/Simulink e de uma montagem experimental são apresentados e discutidos.

Os resultados obtidos provêm da aplicação da técnica de controle adaptativo apresentada no Capítulo 3.

5.2 Resultados de Simulação

Para os testes de simulação e experimentais, a MR foi elaborada partir da proposta de um conversor *boost* bidirecional de $2,5kW$. Para tal, levou-se em consideração os dados da Tabela 5.1.

De acordo com Mohan et al. (2002),

Tabela 5.1: Parâmetros do conversor.

Parâmetro	Valor
Tensão no barramento CC (v_C)	48V
Tensão na bateria (V_{in})	24V
Frequência de chaveamento (f_{sw})	10kHz
Período de chaveamento (T_{sw})	0,0001s
Frequência de amostragem (f_a)	10kHz
Ondulação da tensão de saída (ΔV_o)	2,5%

$$L = \frac{T_{sw} \cdot V_o}{2 \cdot I_o} \cdot d \cdot (1 - d)^2 \quad (5.1)$$

$$L = 0,09mH$$

$$C = \frac{I_o \cdot d \cdot T_{sw}}{\Delta V_o} \quad (5.2)$$

$$C = 1,085mF$$

em que V_o é a tensão de saída do conversor, $d = 0,5$ e I_o é a corrente de saída do conversor.

Assim, estabeleceu-se os valores de cada componente do conversor. Foram usados um indutor $L = 100\mu H/70A$, $r_L = 0,2\Omega$ e uma associação de três capacitores em série com $C = 2200\mu F/450V$ cada, resultando em $C = 0,7mF$, aproximadamente, o que limita a ondulação da tensão de saída (ΔV_o) entre 2,5% e 5%. Para a frequência de chaveamento, foi respeitado o limite de atuação das chaves e definiu-se um valor abaixo da máxima frequência permitida.

Para prover a análise dos resultados do comportamento da microrrede CC perante a implementação do controle de variância mínima generalizada, alguns ensaios foram realizados. Os ensaios foram realizados com o sistema atuando nas mesmas condições de operação descritas nos ensaios utilizados para a modelagem.

Testes preliminares foram realizados a fim de avaliar o comportamento da

MR implementada. A partir do circuito da Figura 4.2 e, de acordo com as Equações 4.1 e 4.2, foram obtidas as curvas características $i - v$ da carga equivalente.

A Figura 5.1 ilustra o comportamento da tensão e corrente da carga sob variações nos níveis de potência e carga resistiva.

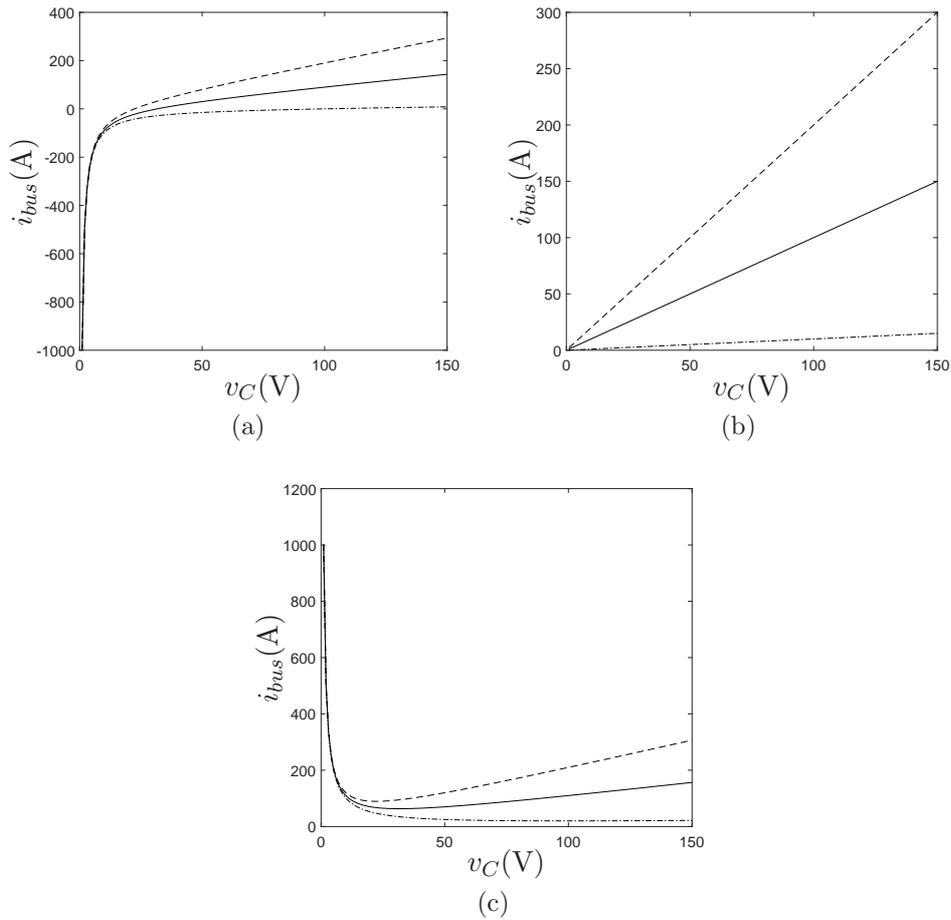


Figura 5.1: Carga equivalente vista do CBC.

Característica $i - v$ da carga equivalente vista do barramento CC para potência constante e carga resistiva variável, em que $(--)$ $R = 0,5\Omega$, $(-)$ $R = 1\Omega$ e $(-.)$ $R = 10\Omega$: (a) $P = -1000W$, (b) $P = 0W$ e (c) $P = 1000W$.

Portanto, pode-se observar que, quando $P \leq 0$, ou seja, $|P_S| \geq |P_L|$, a resistência incremental é positiva, $dv_{bus}/di_{bus} > 0$, o que significa que a corrente

i_{bus} será aumentada à medida que a tensão do barramento CC v_C aumentar. Para $P > 0$ ($|P_S| < |P_L|$) a resistência incremental é negativa, $dv_{bus}/di_{bus} < 0$, para uma faixa de tensão, o que pode levar o sistema à instabilidade durante perturbações de corrente e tensão (Emadi et al., 2006). Do ponto de vista de controle, a situação é crítica quando a potência disponível das fontes não é suficiente para suprir a demanda das CPLs.

Os resultados de simulação foram obtidos a partir do *Toolbox SimPowerSystems* do *Matlab/SimulinkTM*, a fim de validar o desempenho do controlador proposto sob variações de cargas e unidades geradoras de energia.

O diagrama de simulação é apresentado na Figura 5.2, em que o conversor no ponto de carga é substituído por uma fonte de corrente equivalente ($i = P/v_C$). Para tal, considerou-se uma configuração de carga $R = 10\Omega$.

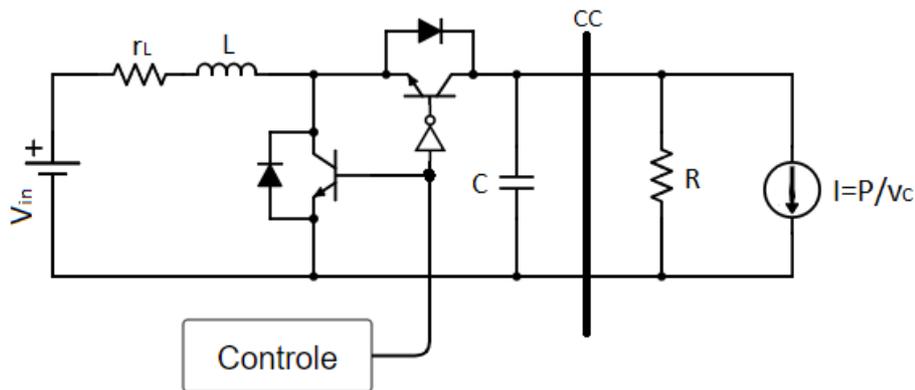


Figura 5.2: Esquemático do circuito para simulação do conversor.

Alguns cenários de simulação e experimentação prática foram realizados, buscando explorar diferentes variações de parâmetros, mudanças de carga e fenômenos dinâmicos relevantes.

Nos testes realizados para este trabalho, o processo de inicialização (*start-up*) do sistema não foi tratado e considerou-se que o sistema está inicialmente estável, com a carga da bateria suprindo a carga resistiva empregada.

Na Figura 5.3, ilustra-se o esquemático utilizado para simulação do conversor com o controlador GMV.

Para o controle GMV, controlador adaptativo proposto, faz-se ainda necessária a escolha adequada do polinômio $Q(z^{-1})$. A Figura 5.4 retrata a resposta

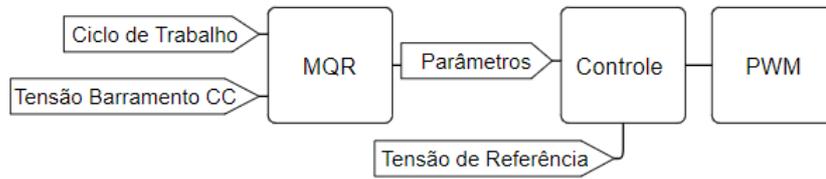


Figura 5.3: Esquemático de simulação do controle GMV.

temporal da tensão do barramento CC para diferentes valores de λ testados.

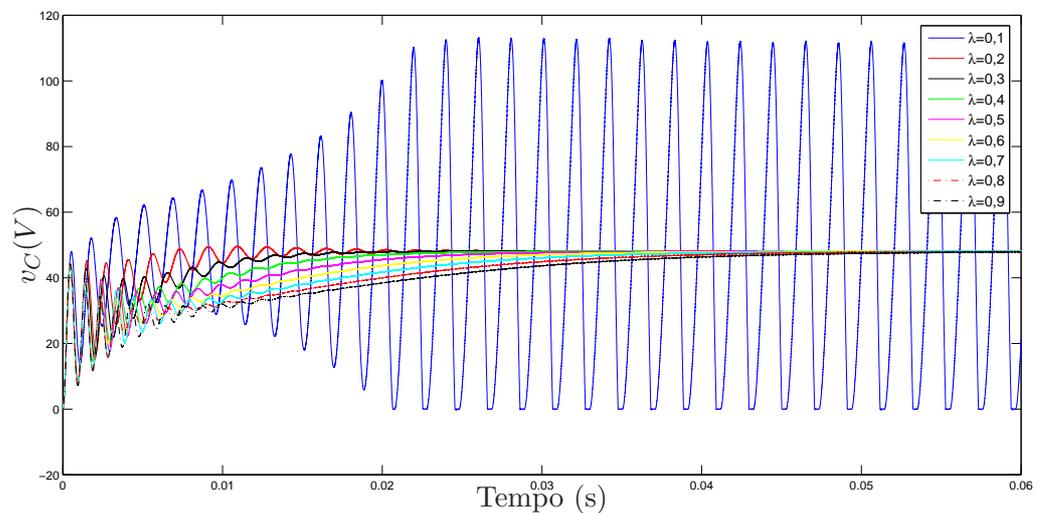


Figura 5.4: Evolução temporal da tensão do barramento CC sob variações dos valores de λ .

Neste trabalho, optou-se por empregar no controlador $\lambda = 0,5$, que apresentou uma boa relação de compromisso entre estabilidade e minimização do transitório.

Nos testes e ensaios feitos para a validação do controlador se atentou para a importância de impor ao sistema situações em que a demanda de carga (resistiva e de potência constante) fosse maior e menor do que a potência disponível na microrrede. Esta imposição possibilita a avaliação do conversor bidirecional quanto a capacidade de realizar o balanço do fluxo de potência, com a ajuda da bateria, e sempre buscando manter a tensão do barramento

CC constante, foco do trabalho.

5.2.1 Cenário 1 - Variação de P

No primeiro ensaio, a tensão de referência atribuída foi de $v_{ref} = 48V$, e a configuração de carga resistiva constante e de $R = 10\Omega$, além de variações de P . Sendo $P = P_S + P_L$, quatro condições de variação de potência P foram impostas:

1. em $t_1 = 0,1s$, P varia de $0W$ para $-200W$;
2. em $t_2 = 0,2s$, P varia de $-200W$ para $100W$;
3. em $t_3 = 0,3s$, P varia de $100W$ para $-400W$;
4. em $t_4 = 0,4s$, P varia de $-400W$ para $-100W$.

Os valores atribuídos para as variação de potência na rede foram definidos de forma que pudesse ser observada a bidirecionalidade do fluxo de potência, através da mudança de sentido da corrente de entrada do conversor, i_L .

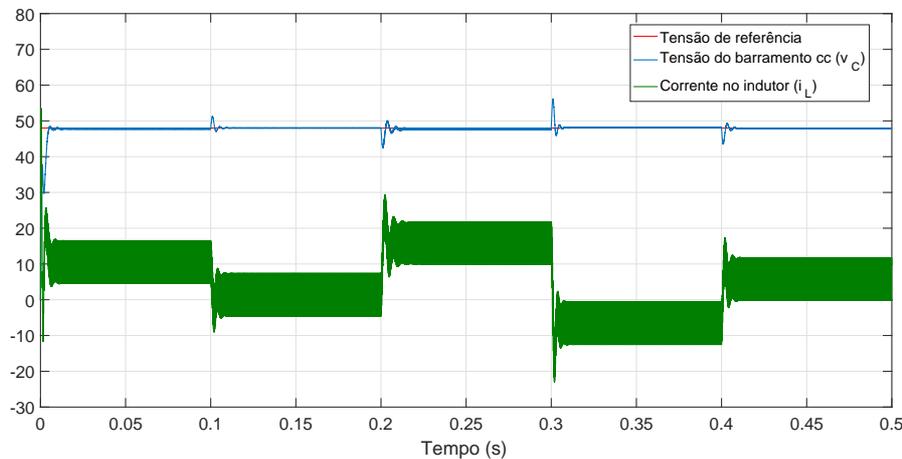


Figura 5.5: Resposta da tensão do barramento CC (v_C) e da corrente de entrada (i_L) da MR quando submetido à variação de carga P , para o controle GMV.

O gráfico da Figura 5.5 apresenta as respostas da tensão do barramento CC (tensão, v_C , sobre o capacitor), na saída do conversor bidirecional, e corrente

sobre o indutor de entrada, i_L , para a tensão de referência considerada neste primeiro cenário para o controlador GMV.

O controle foi capaz de regular a tensão do barramento CC e estabilizar sobre o valor da tensão de referência, $48V$. Os picos das oscilações de tensão se mantiveram entre 10 e 15% do valor de referência, nas suas maiores amplitudes, ou seja, um sobressinal máximo em $55V$.

Na Figura 5.6, foi feita uma aproximação nas curvas de resposta para que pudessem ser observadas as oscilações de alta frequência apresentadas na corrente do indutor. Essas oscilações são inerentes à frequência de chaveamento, em $10KHz$. Este comportamento será observado nas curvas de resposta da corrente i_L , em todos os demais ensaios de simulação apresentados. Pode-se observar também que a tensão v_C se estabiliza em $6ms$.

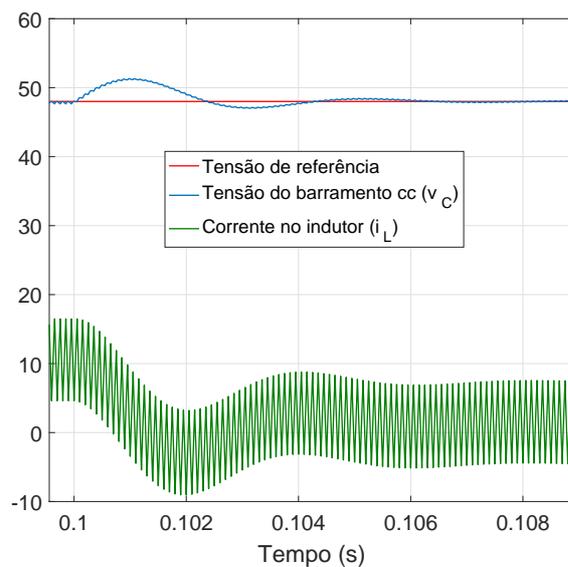


Figura 5.6: Detalhe da resposta da tensão do barramento CC (v_C) e da corrente de entrada (i_L) da MR quando submetido à variação de carga P , para o controle GMV.

5.2.2 Cenário 2 - Variação de R

Para o segundo ensaio proposto foram consideradas fixas as cargas de potência constante (CPL), ou seja, $P = -200W$, e variou-se as cargas puramente

resistivas da rede, representadas pela resistência R . Assim, duas condições de variação de cargas foram impostas:

1. em $t_1 = 0,1s$, P varia de $0W$ para $-200W$ e R se mantém fixo em 8Ω ;
2. em $t_2 = 0,2s$, P se mantém constante ($P = -200W$) e R varia de 8Ω para 40Ω .

A Figura 5.7 apresenta o resultado para este novo cenário quando é aplicado à MR CC o controle adaptativo GMV.

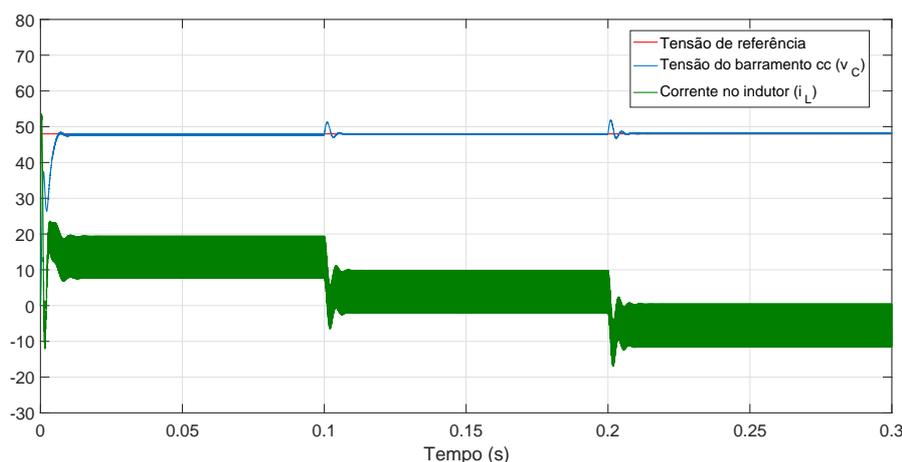


Figura 5.7: Resposta da tensão do barramento CC (v_C) e da corrente de entrada (i_L) da MR quando submetido à variação de carga R , no segundo ensaio, para o controle GMV.

Os picos das oscilações de tensão apresentaram um sobressinal máximo em $51,85V$ e a tensão v_C demora em média $9ms$ para entrar em regime permanente a cada perturbação no sistema.

Novamente, o controle adaptativo, investigado nesta dissertação apresentou habilidade em regular a tensão do barramento de distribuição CC. A curva da tensão apresentou oscilações de baixa amplitude, entrando em regime rapidamente.

5.2.3 Cenário 3 - Variação de v_{ref}

Nos dois primeiros experimentos, uma referência fixa é utilizada e perturbações de carga são aplicadas no processo de modo a verificar a capacidade dos algoritmos de controle para rejeição de perturbações.

O terceiro e último ensaio, experimento servo, o processo é submetido a mudanças na referência para avaliar a capacidade de rastreamento. Neste teste, o *setpoint* é modificado em função do tempo e a variável controlada deve seguir cada novo valor de referência. Apesar da MR CC operar com tensão fixa na prática, este teste tem a finalidade de avaliar as habilidades do método de controle em convergir para a estabilidade a cada valor de referência imposto.

Nesse terceiro teste, mantiveram-se constantes as cargas puramente resistivas, ou seja, $R = 10\Omega$, e as cargas de potência constante, $P = -200W$. Aplicou-se a seguinte variação no sinal de referência, v_{ref} :

1. em $t_1 = 0,05s$, P varia de $0W$ para $-200W$ e v_{ref} se mantém constante em $48V$;
2. em $t_2 = 0,1s$, P se mantém constante ($P = -200W$) e v_{ref} varia de $48V$ para $35V$;
3. em $t_3 = 0,2s$, v_{ref} varia de $35V$ para $55V$;
4. em $t_4 = 0,3s$, v_{ref} retorna ao valor inicial e varia de $55V$ para $48V$.

Neste ensaio são empregados degraus (negativo e positivo) com variação de *setpoint*.

A Figura 5.8 apresenta os resultados para essas novas condições estabelecidas quando é implementado o método de controle adaptativo.

Os picos das oscilações de tensão apresentaram um sobressinal máximo de $57,88V$ quando $v_{ref} = 55V$, ou seja, aproximadamente 5% do valor de referência. A tensão v_C requer em média $17ms$ para estabilidade nesta mesma condição do sistema.

Observa-se que, para o controle adaptativo estudado neste trabalho, o sistema mantém uma convergência para o *setpoint* apesar das variações impostas na planta pela inserção e retirada de unidades de consumo e de geração de energia na rede.

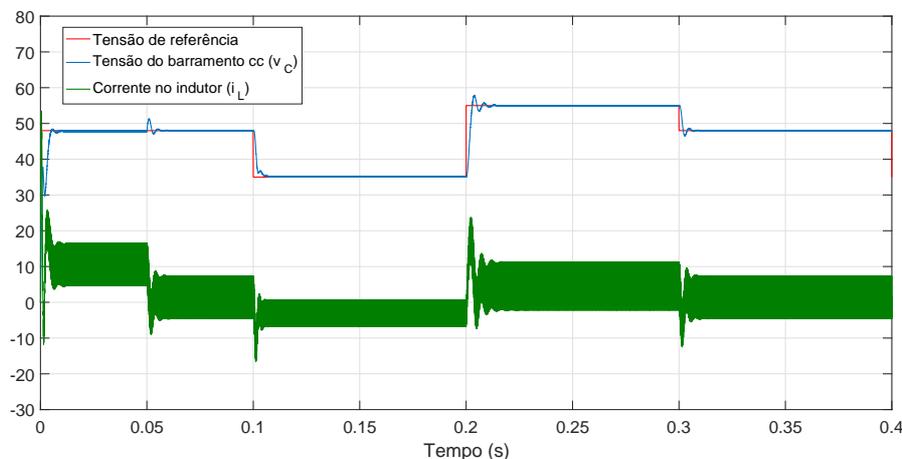


Figura 5.8: Resposta da tensão do barramento CC (v_C) e da corrente de entrada (i_L) da MR quando submetido à variação de *setpoint* v_{ref} , no terceiro ensaio, para o controle GMV.

A partir dos gráficos dos resultados dos três cenários, pode-se analisar o comportamento do fluxo de potência na rede, a qual relaciona o processo de carga e descarga da bateria do circuito. Para valores da corrente i_L positivos, tem-se a descarga da bateria e, para valores da corrente i_L negativos tem-se, então, o processo de carregamento da mesma.

5.3 Resultados Experimentais

As seções anteriores apresentaram um estudo teórico e de simulação sobre o controle de microrredes. Nesta seção serão apresentados alguns resultados experimentais desse estudo. As simulações computacionais e o experimento estão sob condições de teste semelhantes.

Para a realização dos testes experimentais, um protótipo de uma MR CC foi construída em bancada de ensaios no Laboratório de Eletrônica de Potência, Acionamentos e Controle de Processos Industriais (LEACOPI) do CEFET-MG, no campus II. A Figura 5.9 apresenta um diagrama esquemático da montagem realizada.

A microrrede é constituída por um conversor CC-CC bidirecional, um banco de baterias e um controlador digital de sinais. O sistema de aquisição é formado

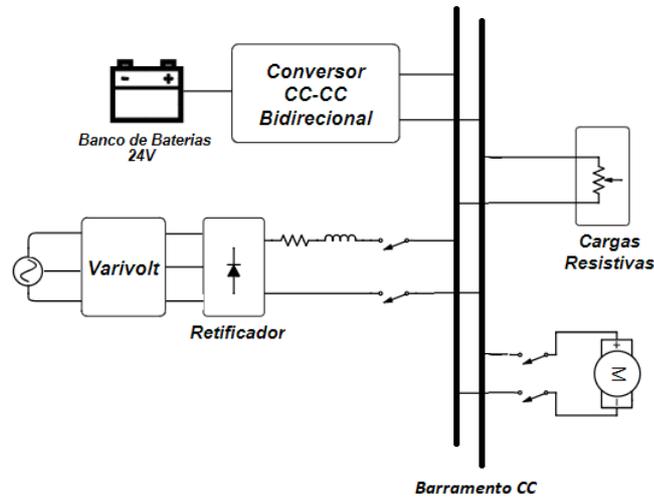


Figura 5.9: Esquemático da montagem prática feita no LEACOPI.

por sensores de tensão e corrente (*LV-25P* e *LAH-125P* da *LEM components*). O processamento é realizado pelo controlador digital de sinais, TMS320F28335, da *Texas Instruments*. Todos os testes foram realizados com cargas resistivas sempre conectadas, dispostas em banco de cinco resistores de potência. Cada resistor que compõe o banco tem uma resistência total de 100Ω , previamente ajustadas em 40Ω cada.

O conversor CC-CC bidirecional é responsável por controlar o fluxo de potência da rede e é composto por um módulo *SEMIKRON SKM100GB12T4* formado por dois IGBTs em meia ponte, responsável pelo chaveamento do conversor, um indutor de $100\mu H/70A$ e três capacitores associados em série de $2200\mu F/450V$ cada, como calculado no Capítulo 4.

O banco de baterias, elementos armazenadores de energia, é composto por 10 baterias *Herbo*, de $12V/60Ah$ cada associadas em série e paralelo, a fim de obter $24V$ no banco completo.

Já para o controle do conversor, empregou-se o DSP TMS320F28335 da *Texas Instruments* combinado com o “Kit TUPÃ”, conjunto de placas com circuitos eletrônicos desenvolvido pelo Laboratório de Conversão e Controle de Energia da UFMG. Esse Kit é composto por circuitos eletrônicos de condicionamento de sinais que realizam a interface do DSP com os sensores e os drives.

Os drivers de comando dos IGBTs também são da marca *SEMIKRON*, do modelo *SKPC SKYPER 32/2* e *Skyper 32 R*.

As Figuras 5.10 e 5.11 apresentam o aparato experimental da microrrede com todos os sistemas interligados para a obtenção dos resultados experimentais. A placa de alimentação é projetada para atender a distribuição de alimentação dos módulos do Sistema TUPÃ e os níveis de tensão de alimentação de entrada são de $+15V$, $-15V$ e GND. A placa condicionamento de entradas analógicas é projetada para fazer o condicionamento dos sinais dos sensores às especificações das entradas analógicas do DSP e aos requisitos do sistema. A placa mãe funciona como uma interface entre o kit DSP *eZdspTMF28335* e os módulos funcionais do Sistema TUPÃ através das conexões e pinos disponíveis. O circuito da placa de saídas PWM possui a finalidade de condicionar e disponibilizar as saídas PWM do DSP. Sensores de tensão *LV25-P* são responsáveis por manter o balanceamento da tensão no barramento CC e permitem fechar a malha de controle do conversor.

A utilização da plataforma *Embedded Target* do *Matlab/SimulinkTM* possibilitou a geração automática dos códigos em *C* para os controladores implementados.

Os testes práticos realizados serão apresentados nas próximas seções.

5.3.1 Cenário 1 - Variação de v_{ref}

O primeiro teste experimental aplicado à MR CC foi semelhante ao da Seção 5.2.3. Mantiveram-se constantes as cargas puramente resistivas, $R = 8\Omega$, conectadas aos demais componentes descritos anteriormente. Aplicou-se a seguinte variação no sinal de referência, v_{ref} :

1. em t_1 , v_{ref} varia de $48V$ para $35V$;
2. em t_2 , v_{ref} varia de $35V$ para $55V$;
3. em t_3 , v_{ref} retorna ao valor inicial e varia de $55V$ para $48V$.

A variação dos valores de tensão de referência foi realizada via *software* e esta foi aplicada a cada $10s$, aproximadamente.

A Figura 5.12 apresenta a resposta da MR CC, no que diz respeito à tensão do barramento CC e corrente de entrada do conversor, à variação da tensão

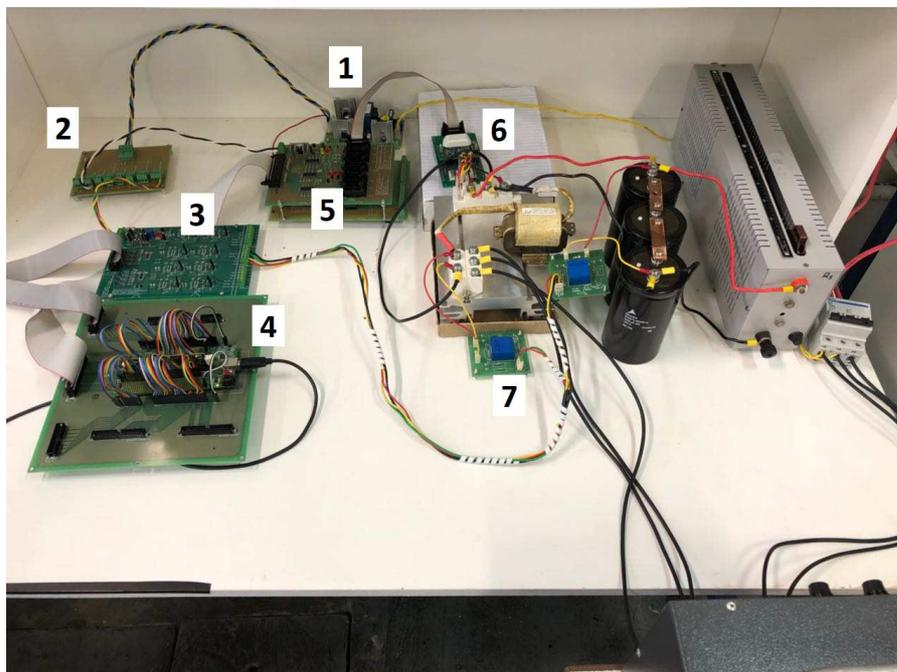


Figura 5.10: Protótipo da microrrede CC proposta. (1) Fonte simétrica de 15V, (2) placa de alimentação, (3) placa de condicionamento de entradas analógicas, (4) placa mãe, (5) placa de saídas PWM, (6) *driver* de comando dos IGBTs e (7) placa para medição de tensão.

de referência da rede, sob a influência do controlador de variância mínima generalizado.

Nas Figuras 5.13(a) e 5.13(b), foram feitas aproximações nas curvas de respostas para uma melhor visualização do transitório de resposta da rede para o teste aplicado.

O controlador GMV apresentou habilidade no rastreamento de referência, sem apresentar oscilações significativas na resposta transitória e tempo de estabilização relativamente pequeno, da ordem de $50ms$.

As oscilações de alta frequência na corrente do indutor foram atenuadas e ocultadas devido à baixa taxa de amostragem do osciloscópio utilizado. Para sinais de variação rápida (de alta frequência) e dependendo da frequência de amostragem máxima de cada osciloscópio, este poderá não adquirir o número suficiente de amostras. Quanto maior a frequência máxima de amostragem

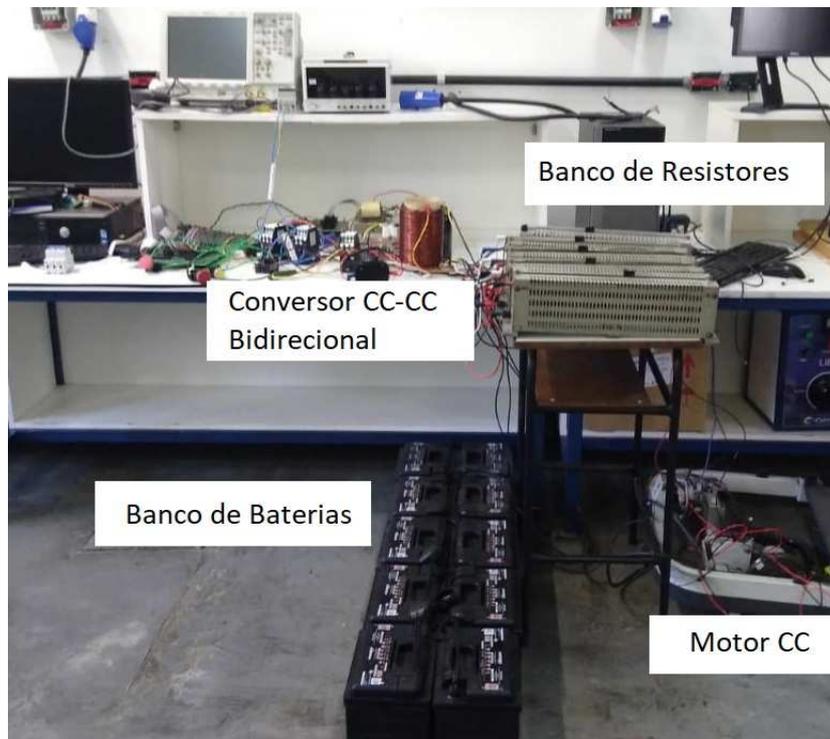


Figura 5.11: Protótipo da microrrede CC proposta - Completa.

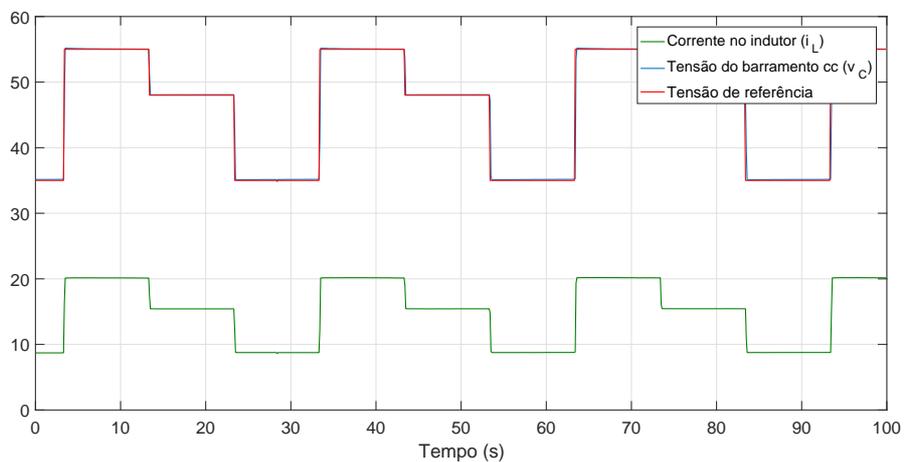


Figura 5.12: Resposta da tensão do barramento CC (v_C) e da corrente de entrada (i_L) da MR quando submetido à variação de *setpoint* v_{ref} , no primeiro ensaio experimental, para o controle GMV.

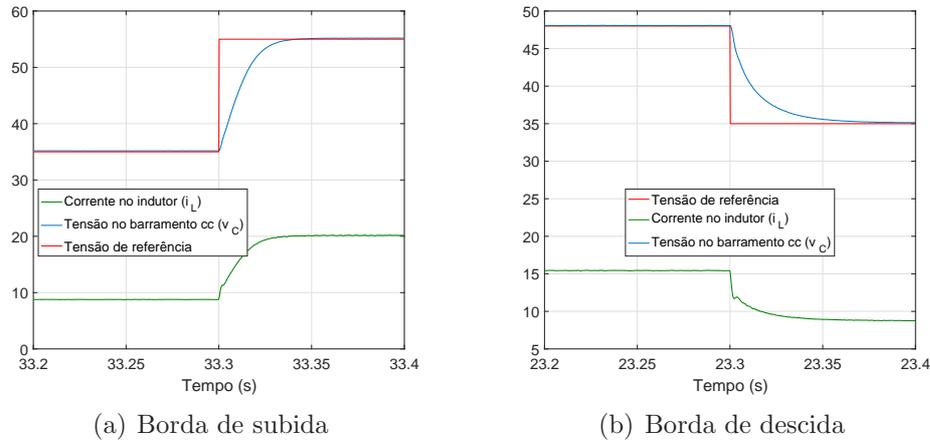


Figura 5.13: Detalhes da resposta da tensão do barramento CC (v_C) e da corrente de entrada (i_L) da MR quando submetido à variação de *setpoint* v_{ref} , no primeiro ensaio experimental, para o controle GMV.

de um osciloscópio, maior a exatidão com que ele representa os detalhes de um sinal com variações rápidas. Outro aspecto importante é que a frequência de amostragem vai impor um dado limite na frequência dos sinais em análise. O Teorema de Nyquist diz que para reconstruir corretamente um sinal, este deve ser amostrado a uma frequência pelo menos dupla da sua maior componente frequencial. Contudo, este teorema assume um comprimento de registro infinito e um sinal puramente repetitivo. Dado que os osciloscópios têm um comprimento de registro limitado e mesmo os sinais periódicos apresentam sempre pequenas variações (ruído, picos), a amostragem a apenas uma frequência dupla da maior componente frequencial de um sinal não é suficiente. Na prática, a frequência de amostragem deve ser pelo menos 5 vezes superior à maior componente frequencial do sinal em análise.

5.3.2 Cenário 2 - Variações de Carga e Fonte

Os testes realizados para este segundo cenário tem o intuito de avaliar a habilidade do controlador adaptativo proposto para regular a tensão (v_C) no barramento quando o sistema sofre variações de cargas e unidades de geração. Para isso, foram feitas variações nas cargas puramente resistivas, utilizou-se

um variador de tensão (“varivolt”) para simular uma unidade geradora e um motor CC como carga variável.

O varivolt foi conectado à rede através de um retificador trifásico com pontes a diodo (*SEMIKRON SKD62*) em série com um conjunto *RL* ($R = 1\Omega$ e $L = 0,9mH$). O motor CC de ímãs permanentes tem as seguintes especificações: $6000RPM$, $14A$, $120V_{DC}$. Cada elemento é conectado e retirado da rede com o auxílio de contatores.

A inicialização da MR é feita com a mesma conectada ao banco de baterias ($24V$) e às cargas puramente resistivas que, a princípio apresentam $R = 40\Omega$. O seguinte ensaio foi realizado:

1. em t_1 , o motor CC é inserido na rede;
2. em t_2 , a carga resistiva varia de $R = 40\Omega$ para $R = 8\Omega$;
3. em t_3 , o varivolt é então inserido na rede com saída CC ajustada em $60V$;
4. em t_4 , o motor é retirado da rede;
5. em t_5 , o varivolt é retirado da rede;
6. em t_6 , a carga resistiva varia de $R = 8\Omega$ para $R = 40\Omega$;
7. em t_7 , a carga resistiva varia de $R = 40\Omega$ para $R = 8\Omega$ novamente.

A Figura 5.14 apresenta as respostas de tensão no barramento CC, v_C , e corrente de entrada do conversor, i_L , para estes procedimentos aplicados quando o controle GMV é implementado na MR CC.

No instante de partida da carga (motor), a tensão atingiu o maior pico, entre $42,6V$ e $53,8V$, e se deve à alta exigência de corrente no momento da partida. Porém, representou uma variação de 12% da referência imposta e o transitório é extinto em apenas $0,7s$. Para as demais perturbações realizadas na planta, considerando $v_{ref} = 48V$, os sobressinais máximo e mínimo foram de $48,9V$ e $47,4V$, respectivamente, menor que 2% de variação da tensão de referência admitida.

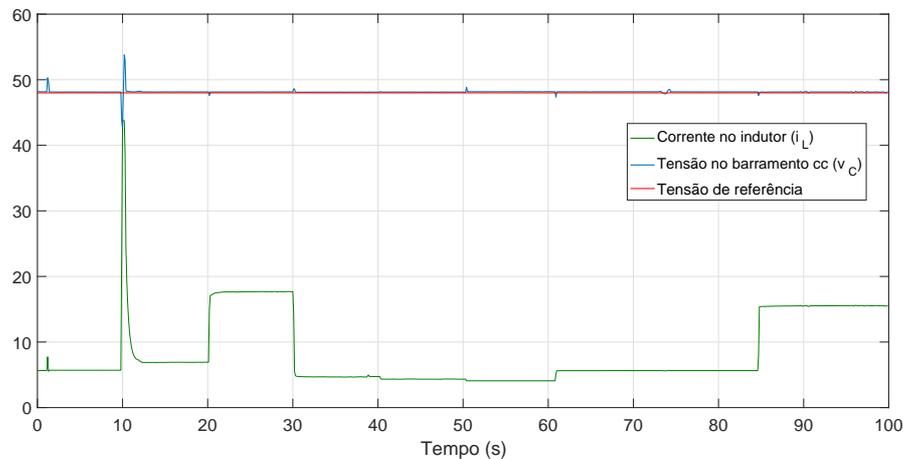


Figura 5.14: Resposta da tensão do barramento CC, (v_C), e da corrente de entrada (i_L) da MR quando submetido ao segundo cenário de testes experimentais, para o controle GMV.

Analisando as respostas do controlador para este teste mais completo, pode-se observar que o controlador adaptativo GMV, proposto neste trabalho, apresentou, para os ajustes realizados, habilidade para regular a tensão do barramento da MR CC quando a mesma sofre variações de cargas e unidades geradoras.

Um último teste foi realizado a partir da situação proposta anteriormente. Considerando a situação em que a MR está operando de forma completa, ou seja, com elementos armazenadores de energia (banco de baterias), cargas (resistivas e motor CC) e unidades de geração (varivolt) conectadas a ela, foram efetuadas bruscas variações tanto na tensão injetada pelo varivolt quanto na carga representada pelo motor. A tensão CC na saída do retificador, conectado ao varivolt, foi mantida entre 60V e 35V. A variação imposta ao motor foi realizada aumentando e diminuindo a carga mecânica sobre o eixo.

A Figura 5.15 apresenta o resultado deste novo teste para as variações aplicadas à tensão do varivolt, no controlador GMV.

O elevado pico de tensão e corrente observado no gráfico, em $t = 22,7s$, se dá ao momento de partida do motor, como foi retratado anteriormente. A partir de $t = 49,7s$, foram impostas as variações de tensão injetada no sistema. Nesta condição, as maiores variações apresentadas pelo transitório,

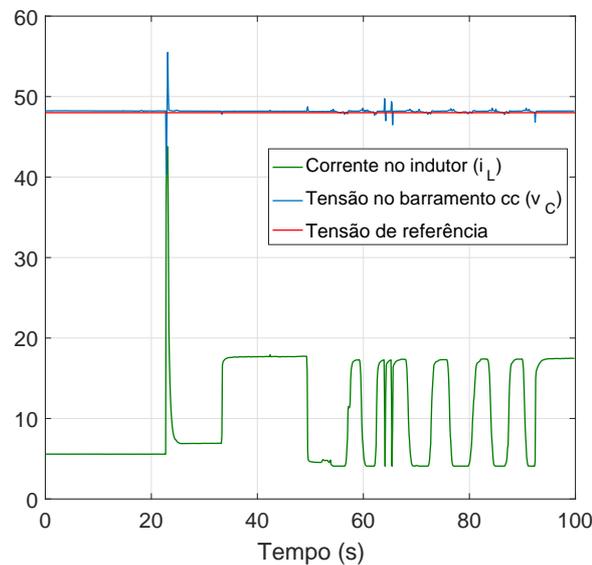


Figura 5.15: Resposta da tensão do barramento CC (v_C) e da corrente de entrada (i_L) quando submetido à variações bruscas e consecutivas na tensão injetada pelo varivolt.

considerando novamente $v_{ref} = 48V$, foram máxima de $49,8V$ e mínima de $46,5V$, mais ou menos 3% da tensão de referência. O sistema retornou ao regime permanente em $0,5s$.

Já a Figura 5.16 apresenta o resultado deste novo teste para as variações aplicadas à carga do motor CC, para o controlador GMV. O teste foi aplicado em continuidade ao apresentado anteriormente.

Observando a resposta da MR às variações de carga impostas, pode-se observar variações pouco significativas na tensão do barramento CC. Estas variações representam menos de 1% da tensão de referência considerada. Neste teste, a cada perturbação, o sistema permanece em regime transitório por $2,7s$.

Novamente, o controlador adaptativo proposto apresentou resultados satisfatórios para a rejeição às perturbações impostas à MR CC.

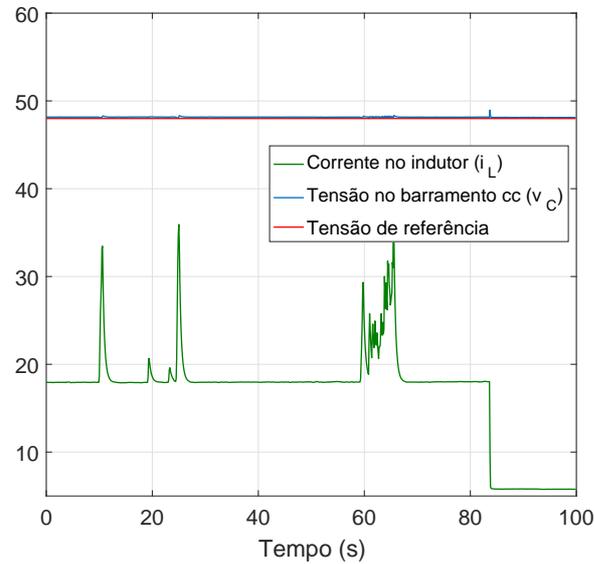


Figura 5.16: Resposta da tensão do barramento CC (v_C) e da corrente de entrada (i_L) da MR quando submetido à variação bruscas de carga (motor CC).

5.4 Conclusões do capítulo

Neste capítulo, foi analisado o desempenho do controlador adaptativo de variância mínima generalizado na regulação da tensão em uma microrrede CC operando de modo ilhado.

Justifica-se o uso de controladores adaptativos auto-ajustáveis para o caso estudado devido ao comportamento apresentado pela planta em questão. Para o controle de variância mínima generalizado, os parâmetros do sistema estimados em tempo real, utilizaram o fator de esquecimento, para garantir avaliação contínua da sua dinâmica não-linear.

Os resultados dos ensaios realizados revelam que o sistema de controle projetado para a aplicação no sistema da microrrede em corrente contínua atingiu os objetivos propostos. O controlador de variância mínima generalizado obteve um bom desempenho geral e atendeu aos critérios estabelecidos, rejeitando os distúrbios e seguindo o perfil de referência de tensão.

Dinâmicas não modeladas ou consideradas no protótipo experimental justificam algumas diferenças apresentadas entre os resultados simulados e os

resultados experimentais.

Conclusões

“O caminho da ciência e dos saberes é o caminho da multiplicidade. [...] Não há fim para as coisas que podem ser conhecidas e sabidas. O mundo dos saberes é um mundo de somas sem fim.”

Rubem Alves¹

6.1 Considerações Finais

Microrredes em corrente contínua se apresentam como uma solução para determinadas aplicações de distribuição de energia em que se exige expansão modular, eficiência, além de possibilitar a inserção e interação de fontes alternativas de energia tanto em voga nos tempos atuais. Redes em corrente contínua apresentam pontos positivos quando se pensa em controle de frequência, fase ou potência reativa.

Para equilibrar o fluxo de potência dentro de tais redes e assegurar a estabilidade do sistema, garantindo a manutenção dos níveis de tensão CC dentro do limite estabelecido, conversores de tensão foram conectados ao barramento CC e um sistema de controle foi aplicado na comutação das chaves dos mesmos. Os conversores de potência chaveados conseguem se adequar às incertezas deste tipo de sistema, tais como mudanças imprevisíveis de carga ou nas condições ambientais que possam afetar os níveis de tensão pré-definidos.

Essa adequação é possível graças a interação do sistema de controle junto à rede. Controladores clássicos teriam seu desempenho prejudicado devido às

¹(Alves, 1998, p. 11).

constantes variações nas condições de operação do sistema. Este fato motivou o projeto de um controlador auto-sintonizável com estimação *online* de parâmetros, no caso, o Controlador de Variância Mínima Generalizado.

O critério proposto pode alcançar resultados satisfatórios para a aplicação e casos estudados neste trabalho. O controle foi capaz de regular a tensão do barramento utilizando as baterias para extrair ou injetar energia de maneira a manter o balanço entre a demanda e a energia disponível na microrrede. Foi obtido um sistema de controle válido em toda a faixa de operação do conversor.

Resultados de simulação e experimentais validam o controlador proposto sob variações das cargas e fontes disponíveis em uma microrrede CC.

6.2 Pesquisas Futuras

Ao longo do trabalho realizado, algumas possibilidades de investigação foram levantadas, mas não investigadas. Entre elas, pode-se destacar:

1. Inclusão e testes com cargas cujos modelos refletem comportamentos diferentes, como cargas de corrente constante. Cargas de potência constante não variam com a tensão, a potência continua fixa independente do valor da tensão da barra. Esta hipótese é válida para estudos com um horizonte de tempo muito grande (o nível da tensão é restabelecido aos níveis normais pela ação dos controles automáticos). Nas cargas de impedância constante, a carga é representada por uma impedância conectada na barra, isto produz uma variação da potência proporcional ao quadrado da tensão. Para as cargas de corrente constante o módulo da corrente não varia com a tensão, isto produz uma variação da potência linearmente com a tensão.
2. Uso de modelos de cargas e fontes reais e variáveis no tempo, como motores, painéis fotovoltaicos, geradores eólicos, etc. Modelos reais também podem apresentar um comportamento de potência variável e influenciada por fatores externos, como é o caso da geração de energia através de painéis fotovoltaicos, onde a energia gerada é consequência da variação de temperatura e irradiação solar. Esta inserção é um passo importante para a implementação experimental do conteúdo.

3. Ensaios com outros métodos de controle, adaptativo ou não-linear, que sejam adequados ao caso estudado.

Referências Bibliográficas

- ABB (2013a). Introducing hvdc. Technical report, <http://www.abb.com/abblibrary/DownloadCenter>.
- ABB (2013b). Rio madeira - the longest transmission link in the world. Technical report, <http://new.abb.com/systems/hvdc/references/rio-madeira>.
- Aguirre, L. A. (2007). *Introdução à identificação de sistemas - Técnicas Lineares e Não-Lineares aplicadas a sistemas reais*. Editora UFMG - 3ª edição.
- Akaike, H. (1969). Fitting autoregressive models for prediction. *Annals of Institute of Statistical Mathematics*, pages 243 – 247.
- Algreer, M., Armstrong, M., and Giaouris, D. (2011). Adaptive pd+i control of a switch-mode dc-dc power converter using a recursive fir predictor. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 47(5):2135 – 2144.
- Alves, R. (1998). *Concerto para Corpo e Alma*. Papirus.
- Antunes, A. L. L. (2008). Algoritmos de controlo distribuído em sistemas baseados em microprocessadores. Master's thesis, Universidade de Aveiro - Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática.
- Aström, k. J. and Wittenmark, B. (1995). *Adaptive Control*. Addison-Wesley Publishing Company.
- Aström, k. J. and Wittenmark, B. (2008). *Adaptive Control*. Dover Publications, Mineola, N.Y. Reprint of book previously published by Addison-Wesley.
- Barklund, E., Pogaku, N., Prodanovic, M., Hernandez-Aramburo, C., and Green, T. C. (2008). Energy management in autonomous microgrid using

- stability-constrained droop control of inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 23(5):2346–2352.
- Basak, P., Chowdhury, S., nee Dey, S. H., and Chowdhury, S. P. (2012). A literature review on integration of distributed energy resources in the perspective of control, protection and stability of microgrid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16:5545–5556.
- Basak, P., Saha, A. K., Chowdhury, S., and Chowdhury, S. P. (2009). Microgrid: Control techniques and modeling. *Proceedings of the 44th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, pages 1–5.
- Boeke, U. and Wendt, M. (2015). Dc power grids for buildings. *Proc. IEEE 1st Int. Conf. DC Microgrids (ICDCM), Atlanta, GA, USA*, pages 210–214.
- Borbely, A. and Kreider, J. F. (2001). *Distributes Generation: The Power Paradigm for the New Millennium*. CRC Press.
- Cardoso, R. L. (2007). Conversores cc- cas bidirecionais isolados em alta frequência. Master’s thesis, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Carneiro, A. V. (2017). Projeto, desenvolvimento e implementação de microrrede em campus universitário com tecnologia solar fotovoltaica e de armazenamento. Master’s thesis, Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de PósGraduação em Engenharia Elétrica.
- Chen, D. and Xu, L. (2012). Autonomous dc voltage control of a dc microgrid with multiple slack terminals. *IEEE Transactions on Power Systems*, 27(4):1897 – 1905.
- Chen, Y.-K. e. a. (2013). Design and implementation of energy management system with fuzzy control for dc microgrid system. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(4):1563–1570.
- Chowdhury, S. P., Crossley, P., and Chowdhury, S. (2009). Microgrids and active distribution networks. *Institution of Engineering and Technology (Renewable Energy Series)*, page 329 p.

- Collinson, S. and Jay, M. (2012). *From Complexity to Simplicity: Unleash Your Organisation's Potential*. Palgrave Macmillan.
- Corrêa, J. M. (2006). Desenvolvimento e implementação de uma micro-rede avançada de alta frequência para integração de fontes alternativas de energia. Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Maria.
- Cvetkovic, I. (2010). Modeling, analysis and design of renewable energy nanogrid. Master's thesis, Dissertation of Master of Sciences, Virginia Tech, EUA.
- da Costa Padilha, F. J. (2011). *Topologias de Conversores CC-CC Não Isolados com Saídas Simétricas para Sistemas Fotovoltáicos*. PhD thesis, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- da Silva Bolzon, A. (2014). Estudo e implementação de um conversor bidirecional cc-ca monofásico de dois estágios como interface entre uma nanorrede e a rede elétrica. Master's thesis, Universidade Federal de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
- de Carvalho, J. S. F. (2009). Controle adaptativo aplicado em um robô manipulador de dois graus de liberdade planar. Master's thesis, Universidade Federal da Paraíba.
- de Carvalho Neto, J. T. (2012). Controle robusto aplicado a conversor buck-boost em sistemas fotovoltaicos. Master's thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação.
- de Caux Henriques Damasceno, A. (2008). Controle preditivo de corrente aplicado a um controlador de carga de baterias baseado em conversor cc-cc bidirecional. Master's thesis, Universidade Federal de Juiz de Fora.
- de Oliveira, T. R. (2016). *Distribuição local de energia em corrente contínua: estudo, desenvolvimento e implementação de um protótipo de nanorrede c.c. dedicado aos setores residencial e comercial*. PhD thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

- dos Santos, H. A. (2014). Projeto de conversor cc-ca monofásico controlado para interligação de barramentos cc e ca de uma microrrede. Master's thesis, Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
- Einstein, A. (2009). *Einstein on Cosmic Religion and Other Opinions and Aphorisms*. Dover Publications.
- Emadi, A., Khaligh, A., Rivetta, C. H., and Williamson, G. A. (2006). Constant power loads and negative impedance instability in automotive systems: Definition, modeling, stability, and control of power electronic converters and motor drives. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 55(4):1112–1125.
- Fadil, H. E., Giri, F., and Guerrero, J. M. (2013). Adaptive sliding mode control of interleaved parallel boost converter for fuel cell energy generation system. *Mathematics and Computers in Simulation*, 91:193–210.
- Ferreira, R. A. F. (2015). *Controle de Microrredes CC Baseado em Droop Adaptativo de Tensão - Simulação em Tempo Real com Control-Hardware-in-Loop*. PhD thesis, Universidade Federal de Juiz de Fora, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
- Gall, J. (1977). *Systemantics: How Systems Work and Especially How They Fail*. Quadrangle.
- Galvin, R. and Yeager, K. (2009). *Perfect Power: How the Microgrid Revolution Will Unleash Cleaner, Greener, and More Abundant Energy*. McGraw-Hill, New York.
- Guerrero, J. M., Jin, Z., and Li, M. (2018). An alternative realization of droop control and virtual impedance for paralleled converters in dc microgrid. *Proceedings of 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*.
- Han, R., Meng, L., Guerrero, J. M., and Quintero, J. C. V. (2018). Distributed nonlinear control with event-triggered communication to achieve current-sharing and voltage regulation in dc microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*.

- Heldwein, M. L. (2009). Microredes em corrente contínua: Qualidade de fornecimento e eficiência em futuras redes de distribuição. *Universidade Federal de Santa Catarina*.
- Hirsch, A., Parag, Y., and Guerrero, J. M. (2018). Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- IEC (2014). Microgrids for disaster preparedness and recovery-with electricity continuity plans and systems. *White paper, Geneva, Switzerland*.
- Jota, F. G. (1987). *The Application of Self-tuning Control Techniques to a Multivariable Process*. PhD thesis, Universidade de Oxford.
- Jota, F. G. (2004). Controle adaptativo e robusto. Technical report, Notas de aula - Universidade Federal de Minas Gerais.
- Justo, J. J., Mwasilu, F., Lee, J., and Jung, J.-W. (2013). Ac-microgrids versus dc-microgrids with distributed energy resources: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24:387–405.
- Kakigano, H., Miura, Y., Ise, T., and Uchida, R. (2006). Dc micro-grid for super high quality distribution - system configuration and control of distributed generations and energy storage devices. *Power Electronics Specialists Conference*, pages 1–7.
- Kakigano, H. e. a. (2010). Distribution voltage control for dc microgrid by converters of energy storage considering the stored energy. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, pages 2851–2856.
- Kumar, D., Zare, F., and Ghosh, A. (2017). Dc microgrid technology: System architectures, ac grid interfaces, grounding schemes, power quality, communication networks, applications and standardizations aspects. *IEEE Access*.
- Kwasinski, A. and Onwuchekwa, C. N. (2010). Effects of instantaneous constant-power loads on dc micro-grids for sustainable power systems. *International Power Electronics Conference*, pages 862–869.

- Kwasinski, A. and Onwuchekwa, C. N. (2011). Dynamic behavior and stabilization of dc microgrids with instantaneous constant-power loads. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(3):822–834.
- Lasseter, R. H. (2002). Microgrids. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, 1:305–308.
- Lasseter, R. H., Akhil, A., Marnay, C., Stephens, J., Dagle, J., Guttromson, R., Meliopoulos, A., Yinger, R., and Eto, J. (2002). The certs microgrid concept. *White paper for Transmission Reliability Program, Office of Power Technologies, US Department of Energy, Washington, DC*.
- Lasseter, R. H. and Piagi, P. (2004). Microgrid: A conceptual solution. *PESC 2004 Aachen*, pages 1–6.
- Lopes, J. A. P., Moreira, C. L., and Madureira, A. G. (2006). Defining control strategies for microgrids islanded operation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 21(2):916–924.
- Lopes, J. P., Hatziargyriou, N., Mutale, J., Djapic, P., and Jenkins, N. (2007). Integrating distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities. *Electric Power Systems Research*, 77:1189–1203.
- Mangas, R. F. G. D. (2009). Redes de distribuição de energia com microgeração - avaliação do impacto de diferentes condições de licenciamento. Master's thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Mariam, L., Basu, M., and Conlon, M. F. (2013). A review of existing microgrid architectures. *Journal of Engineering, Hindawi Publishing Corporation*.
- Mehigan, L., Deane, J. P., Gallachóir, B. P. ., and Bertsch, V. (2018). A review of the role of distributed generation (dg) in future electricity systems. *Energy*, 163:822–836.
- Mendonça, L. P. (2011). Introdução à microrredes e seus desafios. Master's thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

- Mirez, J. (2012). Estudio y simulación de la interconexión entre dos microredes de corriente continua de bajo voltaje. In *XIX Congreso Nacional de Estudiantes de Ingeniería Mecánica Eléctrica y Ramas Afines - CONEIMERA 2012*, Huancayo, Peru.
- Mohan, N., Undeland, T. M., and Robbins, W. P. (2002). *Power Electronics: Converters, Applications and Design*. Wiley.
- Moia, J. (2016). Sistema de conversão estática ca-cc bidirecional aplicado à microrredes cc bipolares. Master's thesis, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Moreira, C. L., Resende, F. O., and Peças Lopes, J. A. (2007). Using low voltage microgrids for service restoration. *IEEE Transactions on Power Systems*, 22(1):395 – 403.
- Nasir, M., Jin, Z., Khan, H., Zaffar, N., Quintero, J. C. V., and Guerrero, J. M. (2019). A decentralized control architecture applied to dc nanogrid clusters for rural electrification in developing regions. *IEEE Transactions on Power Electronics*.
- Papathanassiou, S. (2004). Operation of a prototype microgrid system based on micro-sources equipped with fast-acting power electronics interfaces. *Proceedings of the 31th Power Electronics Specialist Conference*, pages 2521–2526.
- Pogaku, N., Prodanovic, M., and Green, T. C. (2007). Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 22(2):613–625.
- Polya, G. (1957). *How to Solve it - A New Aspect of Mathematical Method*. Princeton University Press, second edition edition.
- Preto, V. M. M. (2012). Redes de distribuição ativas. Dissertação de mestrado., Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

- Ribeiro Lunardelli, M. (2010). Estratégia de reposição de serviço utilizando micro-redes. Master's thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Rosemback, R. H. (2004). Conversor cc-cc bidirecional buck-boost atuando como controlador de carga de baterias em um sistema fotovoltaico. Master's thesis, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora.
- Saeedifard, M. e. a. (2010). Dc power systems: Challenges and opportunities. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pages 1–7.
- Salomonsson, D. (2008). *Modeling, control and protection of low-voltage DC microgrids*. PhD thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Suécia.
- Savage, P., Nordhaus, R. R., and Jamieson, S. P. (2010). Dc microgrids: Benefits and barriers. *From Silos to Systems: Issues in Clean Energy and Climate Change*, pages 51–66.
- Schonberger, J. K. (2006). *Distributed Control of a Nanogrid Using DC Bus Signalling*. PhD thesis, University of Canterbury.
- Schwarz, G. (1978). Estimating the dimension of a model. *The Annual of Statistics*, 6(2):461 – 464.
- Seborg, D. E., Edgar, T. F., and Mellichamp, D. A. (1989). *Process Dynamics and Control*. John Wiley & Sons.
- Silva, F. L., Fardin, J. F., and Rey, J. P. (2010). Conexão de uma microrrede à rede de distribuição de energia elétrica: Um estudo de caso. *XVIII Congresso Brasileiro de Automática*, pages 75–80.
- Silva, W. W. A. G., Donoso-Garcia, P. F., Jr., S. I. S., Oliveira, T. R., Santos, C. H. G., and Bolzon, A. S. (2013). Study of the application of bidirectional dual active bridge converters in dc nanogrid energy storage systems. *2013 Brazilian Power Electronics Conference*.
- Smallwood, C. L. (2002). Distributed generation in autonomous and non-autonomous microgrids. *Proceedings of the IEEE 46th Annual Electric Power Conference*.

- Souza, A. R. R. (2009). Conexão de geração distribuída em redes de distribuição. Master's thesis, Universidade Federal do Paraná.
- Stramosk, V. (2014). Controle não-linear de conversores de eletrônica de potência interconectados em microrredes de corrente contínua. Master's thesis, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Tahim, A. P. N. (2015). *Controle de Microrredes de Distribuição de Energia Elétrica em Corrente Contínua*. PhD thesis, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Tahim, A. P. N., Pagano, D. J., Heldwein, M. L., and Ponce, E. (2011). Control of interconnected power electronic converters in dc distribution systems. *XI Brazilian Power Electronics Conference (COBEP 2011)*.
- Tahim, A. P. N., Pagano, D. J., Lago, J., and Heldwein, M. L. (2012a). Controle não-linear de um conversor bidirecional associado a baterias para regulação de tensão em uma microrrede cc. *XIX Congresso Brasileiro de Automática (CBA 2012)*, pages 1–7.
- Tahim, A. P. N., Pagano, D. J., and Ponce, E. (2012b). Nonlinear control of dc-dc bidirectional converters in stand-alone dc microgrids. *51st IEEE Conference on Decision and Control*.
- Tan, K., Huang, A. Q., and Martin, A. (2014). Development of solid state arc-free socket for dc distribution system. *Applied Power Electronics Conference and Exposition*.
- Torres, P. F., de Arimatéia Alves Vieira Filho, J., Williamson, S., Junior, V. L. C., Pinho, J. T., Galhardo, M. A. B., and Macêdo, W. N. (2018). Concepção de estrutura laboratorial para realização de estudos em microrrede em corrente contínua de baixa tensão. *VII Congresso Brasileiro de Energia Solar*, pages 1–10.
- Venkataramanan, G. and Illindala, M. (2002). Microgrids and sensitive loads. *Proceedings of the 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, 1:315–322.

- Willis, H. L. and Scott, W. G. (2000). *Distributed Power Generation: Planning and Evaluation*. CRC Press.
- Xu, C. and Cheng, K. (2011). A survey of distributed power system - ac versus dc distributed power system. *Power Electronics Systems and Applications (PESA)*, pages 1–12.
- Zhang, J. (2008). Bidirectional dc-dc power converter: Design optimization, modeling and control. Master's thesis, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Zhang, L. e. a. (2011). Power control of dc microgrid using dc bus signalling. *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2011 Twenty-Sixth Annual IEEE*, pages 1926–1932.