UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

NUPEP - NÚCLEO DE PESQUISA EM ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

SISTEMAS DE CONTROLE DE INVERSORES PARA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E MICRORREDES: CONEXÃO À REDE ELÉTRICA, TRANSIÇÃO SUAVE E ILHAMENTO

MARCUS EVANDRO TEIXEIRA SOUZA JUNIOR

UBERLÂNDIA - MG

2025

MARCUS EVANDRO TEIXEIRA SOUZA JUNIOR

SISTEMAS DE CONTROLE DE INVERSORES PARA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E MICRORREDES: CONEXÃO À REDE ELÉTRICA, TRANSIÇÃO SUAVE E ILHAMENTO

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica – Eletrônica de Potência.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Carlos Gomes de Freitas.

Coorientador: Prof. Dr. Danillo Borges Rodrigues.

UBERLÂNDIA - MG

2025

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

S729
2025

Souza Junior, Marcus Evandro Teixeira, 1993-
Sistemas de controle de inversores para geração distribuída e microrredes [recurso eletrônico] : conexão à rede elétrica, transição suave e ilhamento / Marcus Evandro Teixeira Souza Junior. - 2025.

Orientador: Luiz Carlos Gomes de Freitas.
Coorientador: Danillo Borges Rodrigues.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Elétrica.
Modo de acesso: Internet.
DOI http://doi.org/10.14393/ufu.te.2025.515
Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica. I. Freitas, Luiz Carlos Gomes de,1976-, (Orient.). II. Rodrigues, Danillo Borges,1986-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDU: 621.3

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

FOLHA DE APROVAÇÃO

Marcus Evandro Teixeira Souza Junior

Sistemas de Controle de Inversores para Geração Distribuída e Microrredes: Conexão à Rede Elétrica, Transição Suave e Ilhamento

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica – Eletrônica de Potência.

Banca Examinadora

Titular: Prof. Dr. Luiz Carlos Gomes de Freitas (Orientador)

Insituição: Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

Titular: Prof. Dr. Ernane Antônio Alves Coelho

Insituição: Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

Titular: Prof. Dr. José Carlos de Oliveira

Insituição: Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

Titular: Prof. Dr. Marcelo Godoy Simões (Membro Externo)

Insituição: Universidade de Vaasa (UWASA), Finlândia

Titular: Prof. Dr. Tiago Davi Curi Busarello (Membro Externo)

Insituição: Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 3N - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
Telefone: (34) 3239-4707 - www.posgrad.feelt.ufu.br - copel@ufu.br

ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	Tese de Doutorado, 351, PPGEELT				
Data:	Dezenove de Agosto de Dois mil e vinte e cinco	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	16:30
Matrícula do Discente:	12023EEL011				
Nome do Discente:	Marcus Evandro Teixeira Souza Junior				
Título do Trabalho:	Sistemas de Controle de Inversores para Geração Distribuída e Microrredes: Conexão à Rede Elétrica, Transição Suave e Ilhamento				
Área de concentração:	Sistemas de Energia Elétrica				
Linha de pesquisa:	Sistemas Elétricos de Potência				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Coordenador do projeto: Luiz Carlos Gomes de Freitas . Título do projeto: Desenvolvimento de Conversores Estáticos Inteligentes para Conexão de Microrredes e Recursos Energéticos Distribuídos (REDs) ao Sistema Elétrico de Potência. Agência financiadora: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) - Auxílio financeiro / Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Bolsa / Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) - Auxílio financeiro. Número do processo na agência financiadora: Ed. CNPq/MCTI/FNDCT N 25/2022 - Processo 406881/2022-7; FAPEMIG - Processo APQ-04929-22. Vigência do projeto: 12/2022 - 12/2026.				

Reuniu-se no formato híbrido, no Anfiteatro do Bloco 1E, a Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta:

Doutores: Ernane Antônio Alves Coelho (UFU), José Carlos de Oliveira (UFU), Marcelo Godoy Simões (UWASA), Tiago Davi Curi Busarello (UFSC) e Luiz Carlos Gomes de Freitas, orientador do discente. O Prof. Tiago Davi Curi Busarello participou remotamente (online), enquanto os outros membros participaram presencialmente.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Prof. Dr. Luiz Carlos Gomes de Freitas, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir, o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o candidato:

APROVADO.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme, foi assinada pela Banca Examinadora.

Documento assinado eletronicamente por **Tiago Davi Curi Busarello**, **Usuário Externo**, em 19/08/2025, às 17:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **José Carlos de Oliveira**, **Professor(a) do Magistério Superior**, em 19/08/2025, às 18:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Godoy Simões**, **Usuário Externo**, em 20/08/2025, às 13:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **Luiz Carlos Gomes de Freitas**, **Professor(a) do Magistério Superior**, em 20/08/2025, às 13:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **Ernane Antonio Alves Coelho**, **Professor(a) do Magistério Superior**, em 21/08/2025, às 11:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6497986** e o código CRC **DB97F985**.

Referência: Processo nº 23117.047285/2025-05 SEI nº 6497986

A Gabriela.

A Cris e Marcus.

DECLARAÇÃO DE AUTORIA PRÓPRIA

Eu, **MARCUS EVANDRO TEIXEIRA SOUZA JUNIOR**, discente do curso de Doutorado do Programa de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, regularmente matriculado sob o número 12023EEL011, declaro que sou autor da tese de doutorado intitulada **SISTEMAS DE CONTROLE DE INVERSORES PARA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E MICRORREDES: CONEXÃO À REDE ELÉTRICA, TRANSIÇÃO SUAVE E ILHAMENTO**, desenvolvida durante o período de 14/09/2020 a 19/08/2025 sob a orientação do PROFESSOR LUIZ CARLOS GOMES DE FREITAS e COORIENTAÇÃO DO PROFESSOR DANILLO BORGES RODRIGUES, ora submetida à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Doutor em Ciências, e que a mesma foi por mim elaborada e integralmente redigida, não tendo sido copiado ou extraído, seja parcial ou integralmente, de forma ilícita de nenhuma fonte além daquelas públicas consultadas e corretamente referenciadas ao longo do trabalho ou daquelas cujos dados resultaram de investigações empíricas por mim realizadas para fins de produção deste trabalho.

Assim, firmo a presente declaração, demonstrando minha plena consciência dos seus efeitos civis, penais e administrativos, e assumindo total responsabilidade caso se configure o crime de plágio ou violação aos direitos autorais.

Desta forma, na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Uberlândia a publicar, durante tempo indeterminado, o texto integral da obra acima citada, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação do programa de pós-graduação supracitado e ou da produção cientifica brasileira, a partir desta data.

Por ser verdade, firmo a presente.

Uberlândia, 29 de Agosto de 2025.

Documento assinado digitalmente
gov.br
MARCUS EVANDRO TEIXEIRA SOUZA JUNIOR
Data: 29/08/2025 16:26:31-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

MARCUS EVANDRO TEIXEIRA SOUZA JUNIOR

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha esposa Gabriela, pelo amor, pela amizade, pelo apoio, pelas conversas, pelo companheirismo e por toda a felicidade. Agradeço por tudo.

Agradeço aos meus pais pelo amor, pelo apoio, pela confiança e pela amizade. Sou eternamente grato.

Agradeço à minha família, aos meus amigos e aos meus colegas que tanto contribuíram e continuam contribuindo com a minha vida pessoal e acadêmica.

Agradeço ao meu orientador Professor Luiz Carlos Gomes de Freitas pela confiança, pelos conselhos, pela dedicação, pelos ensinamentos e pela amizade desde a graduação até hoje, passando pelo trabalho de conclusão de curso, pelo mestrado e agora por este doutorado.

Agradeço ao meu coorientador Professor Danillo Borges Rodrigues pelos ensinamentos, pelas conversas, pela dedicação e pela amizade. Agradeço especialmente pela ajuda na elaboração dos códigos, nos projetos de controladores e nos resultados nas plataformas C-HIL.

Agradeço a todos os professores que passaram pela minha formação. Agradeço, especialmente pelo período da pós-graduação, aos Professores Ernane A. A. Coelho e Gustavo B. de Lima, que sempre me ajudaram e me ensinaram. Agradeço às instituições e seus membros que fizeram e fazem parte deste processo, principalmente ao NUPEP, à FEELT e à UFU.

Agradeço a todos os colegas de laboratório e da universidade pelas ajudas, boas conversas e amizades. Agradeço especialmente ao colega Henrique Tannús de Moura Carvalho, responsável maior pela montagem dos protótipos dos inversores junto ao Professor Ernane, pela ajuda nos resultados experimentais. Também agradeço especialmente ao colega Érico Chagas Guimarães pela ajuda nos resultados nas plataformas C-HIL.

Agradeço especialmente ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de doutorado e pela taxa de bancada (Processo 141192/2021-6) e pelo suporte financeiro. Agradeço igualmente ao CNPq (140796/2019-3, 303085/2022-3, 407403/2022-1 e 406881/2022-7), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) (TEC-PPM-00485-17, APQ-03554-16 e APQ-02208-24), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) (001 e 88887.923926/2023-00), ao PPGEELT e à UFU pelo apoio financeiro.

“We were making the future…

And hardly any of us troubled to think what future we were making.

And here it is!”

H. G. Wells

“Não é objetivo da ciência abrir uma porta para a sabedoria infinita,

mas estabelecer um limite para o erro infinito.”

Berltolt Brecht

Resumo

Esta tese de doutorado apresenta a análise e o desenvolvimento de sistemas de controle de inversores para geração distribuída e microrredes com modos de operação ilhado, transição suave e conectado à rede. Seu principal objetivo foi proporcionar uma técnica de controle inovadora elaborada em todas as suas partes, validada por diferentes testes e amparada por amplo arcabouço teórico, o que inclui a compreensão das ideias fundamentais, revisão extensa da literatura e entendimento de seus impactos em dimensões distintas. Seguindo esta metodologia, os conceitos essenciais envolvidos são explorados, assim como as características e os componentes de sistemas de geração distribuída e de microrredes. Breves explicações sobre a história, o desenvolvimento recente, o futuro e a situação brasileira destas tecnologias são dadas. Suas implicações para o sistema elétrico, a sociedade, a economia e o meio ambiente são discutidas. Em seguida, o modo ilhado é detalhado, com ênfase sobre os controladores internos e o método de controle *droop*. Na sequência, o modo conectado à rede e a transição suave são abordados. O estado da arte das estratégias de controle para estes casos é oferecido de maneira crítica e abrangente, além de benefícios, requisitos e elementos de operação, como sincronização ativa e chave estática de interconexão. O sistema de controle proposto é, então, contemplado em todos os seus pormenores. Com isso, são realizados projetos das estruturas físicas e dos controladores para avaliação da técnica. Simulações computacionais, em uma composição ideal, fornecem as primeiras evidências positivas de seu funcionamento para um único conversor. Para verificar efetivamente o método de controle, testes diversos em plataformas *Controller Hardware-In-the-Loop* foram tratados para uma microrrede completa. Mais uma vez, os resultados garantiram a operação do sistema. Por último, ensaios foram feitos para a montagem experimental de um inversor. Os resultados derradeiros dão a confirmação final da validade do sistema de controle conforme idealizado, planejado e proposto em todos os modos de operação. O trabalho, ao longo de todas as suas etapas, demonstra que a proposta inicial pode ser aplicada para as necessidades da Humanidade e para a proteção da Natureza. Conclusões finalizam o documento, indicando a continuidade futura da pesquisa.

Palavras-Chave: Geração Distribuída; Inversores; Microrredes; Modo Conectado à Rede; Modo Ilhado; Sistemas de Controle; Transição Suave.

Abstract

This doctorate thesis presents the analysis and development of inverters' control systems for distributed generation and microgrids with islanded, seamless transition and grid-connected operation modes. Its main objective was to provide an innovative control technique elaborated in all its parts, validated by different tests and supported by broad theoretical framework, which includes the knowledge of the fundamental ideas, extensive literature revision and understanding its impacts in distinct dimensions. Following this methodology, the essential concepts were explored, as well as the characteristics and the components of the distributed generation systems and the microgrids. Brief explanations about the history, the recent development, the future and the Brazilian situation of these technologies were given. Their implications to the power system, to the society, to the economy and to the environment were discussed. Then, the islanded mode was detailed, with emphasis over the inner control and to the droop control method. In sequence, the grid-connected mode and the seamless transition are approached. The state of the art of the control strategies for these cases is offered in a critical and comprehensive way, beyond the benefits, requirements and operation elements, such as active synchronization and statical transfer switch. The proposed control system is, then, considered in all its details. With this, physical structures and controllers design were made for the technique evaluation. Computational simulations, in an ideal composition, supply the first positive evidence of its operation for a single converter. To effectively verify the control method, various tests in Controller Hardware-In-the-Loop platforms were treated for a complete microgrid. Once more, the results guarantee the system operation. Lastly, essays were made for an inverter's experimental setup. The final results give the final confirmation of the idealized, designed and proposed control system validation in all the operation modes. The work, throughout its stages, demonstrates that the initial proposal can be applied for human necessities and for Nature protection. Conclusions finalize the document, indicating the future continuity of the research.

Keywords: Control Systems; Distributed Generation; Grid-Connected Mode; Islanded Mode; Microgrids; Inverters; Seamless Transition.

LISTA DE FIGURAS

Figura I.1 – Metodologia proposta e empregada na pesquisa de doutorado. 27
Figura 1.1 - Estrutura típica de uma microrrede CA. 44
Figura 2.1 - Controladores (a) P+Res Ideal e (b) P+Res Não-Ideal. 70
Figura 2.2 - Controle interno completo para unidades formadoras de rede com compensadores P+Res. 71
Figura 2.3 - Curvas características de *droop* $P-\omega$ e $Q-E$ 74
Figura 2.4 - Diagrama de blocos do método de controle *droop* convencional. 75
Figura 2.5 - Diagrama de cálculo de potências médias. 76
Figura 3.1 - Requisitos e etapas para conexão de sistemas de geração distribuída e microrredes a uma rede externa. 88
Figura 3.2 - Estrutura genérica de técnica PLL. 90
Figura 3.3 - Diagrama da técnica PLL Clássico. 90
Figura 3.4 - Diagrama da técnica SOGI-PLL. 91
Figura 3.5 - Chave estática de interconexão para sistemas de geração distribuída e microrredes. 93
Figura 3.6 - Chave estática de interconexão e transferência para sistemas de geração distribuída e microrredes. 93
Figura 4.1 - Processo de sincronização ativa e transição suave do sistema de controle do inversor de sistemas geração distribuída e de microrredes para conexão à rede. 110
Figura 4.2 - Curvas características de *droop* para sincronização ativa e transição suave do sistema de controle do inversor de sistemas de geração distribuída e de microrrede para conexão à rede. 111
Figura 4.3 - Modo conectado à rede com controle do fluxo de potência do sistema de controle do inversor de sistemas de geração distribuída e de microrrede para conexão à rede. 113
Figura 4.4 - Fluxograma do sistema de controle. 115
Figura 4.5 - Sistema de controle em microrrede. 116
Figura 5.1 - Estrutura física de potência completa do inversor com rede elétrica externa. 118
Figura 5.2 - Resposta em degrau em malha aberta para potência reativa em C-HIL. 123
Figura 5.3 - Diagrama de blocos do sistema de controle de potência reativa em malha fechada. 125
Figura 5.4 - Diagrama de Bode para o sistema compensado em malha aberta. 126
Figura 5.5 - Resposta ao degrau para malha fechada compensada da potência reativa em Octave. 126
Figura 5.6 - Resposta ao degrau para malha fechada compensada da potência reativa em C-HIL. 126
Figura 5.7 - Tensões e correntes em regime permanente na saída do inversor em modo ilhado em simulação computacional. 129
Figura 5.8 - Potências ativas e frequência em modo ilhado em simulação computacional. 130
Figura 5.9 - Potências reativas e amplitude de tensão em modo ilhado em simulação computacional. 130
Figura 5.10 - Potências aparentes em modo ilhado em simulação computacional. 130
Figura 5.11 - Sincronização ativa e transição suave para ângulos de fase distintos em 90° em simulação computacional. 131
Figura 5.12 - Sincronização ativa e transição suave para ângulos de fase distintos em 150° em simulação computacional. 131
Figura 5.13 - Sincronização ativa e transição suave para rede externa com $58\ Hz$ em simulação computacional. 132
Figura 5.14 - Sincronização ativa e transição suave para rede externa com $62\ Hz$ em simulação computacional. 132
Figura 5.15 - Sincronização ativa e transição suave para rede externa com amplitude de tensão de 90% do valor nominal em simulação computacional. 133
Figura 5.16 - Sincronização ativa e transição suave para rede externa com amplitude de tensão de 110% do valor nominal em simulação computacional. 133

Figura 5.17 - Potências ativas e frequências durante a sincronização ativa e transição suave para conexão em simulação computacional. 134
Figura 5.18 - Potências reativas e amplitudes de tensão durante a sincronização ativa e transição suave para conexão em simulação computacional. 134
Figura 5.19 - Tensões e correntes instantâneas durante a sincronização ativa e transição suave para conexão em simulação computacional. 135
Figura 5.20 - Potências ativas e frequências no modo conectado à rede para variações de carga em simulação computacional. 136
Figura 5.21 - Potências reativas e amplitudes de tensão no modo conectado à rede para variações de carga em simulação computacional. 136
Figura 5.22 - Controle do fluxo de potência ativa no modo conectado à rede para carga fixa em simulação computacional. 137
Figura 5.23 - Controle do fluxo de potência reativa no modo conectado à rede para carga fixa em simulação computacional. 138
Figura 5.24 - Potências ativas e frequências durante o retorno ao modo ilhado em simulação computacional. 138
Figura 5.25 - Potências reativas e amplitudes de tensão durante o retorno ao modo ilhado em simulação computacional. 139
Figura 5.26 – Tensões e correntes instantâneas durante o retorno ao modo ilhado em simulação computacional. 139
Figura 6.1 – Disposição da plataforma C-HIL: estrutura física em HIL e estratégia de controle em DSP. 141
Figura 6.2 – Esquemático simplificado da estrutura total de microrrede. 142
Figura 6.3 – Configuração real para testes e resultados de microrredes com sistema de controle em plataformas C-HIL. 142
Figura 6.4 – Tensões em regime permanente de microrrede, carga e rede para modo ilhado em C-HIL. 143
Figura 6.5 – Tensões em regime permanente de microrrede, carga e rede para modo conectado à rede em C-HIL. 143
Figura 6.6 – Correntes em regime permanente dos inversores e da microrrede para modo ilhado em C-HIL. 143
Figura 6.7 – Correntes em regime permanente dos inversores e da microrrede para modo conectado à rede em C-HIL. 144
Figura 6.8 – Correntes em regime permanente da microrrede, da carga e da rede externa para modo ilhado em C-HIL. 145
Figura 6.9 – Correntes em regime permanente da microrrede, da carga e da rede externa para modo conectado à rede em C-HIL. 145
Figura 6.10 – Sincronização ativa para rede com frequência de $58\ Hz$ em C-HIL. 145
Figura 6.11 – Sincronização ativa para rede com frequência de $62\ Hz$ em C-HIL. 146
Figura 6.12 – Correntes de microrrede, carga e rede na transição suave de modo ilhado para conectado à rede em C-HIL. 146
Figura 6.13 – Variações de carga no modo ilhado em C-HIL: (a) potências ativas; (b) frequências; (c) potências reativas; (d) amplitudes de tensão. 147
Figura 6.14 – Passagem de modo ilhado para conectado à rede em C-HIL: (a) potências ativas; (b) frequências; (c) potências reativas; (d) amplitudes de tensão. 148
Figura 6.15 – Variações de carga no modo conectado à rede em C-HIL: (a) potências ativas; (b) frequências; (c) potências reativas; (d) amplitudes de tensão. 149
Figura 6.16 – Variações de referências de potência ativa no modo conectado à rede em C-HIL: (a) potências ativas; (b) frequências. 149
Figura 6.17 – Variações de referências de potência reativa no modo conectado à rede em C-HIL: (a) potências reativas; (b) amplitudes de tensão. 150

Figura 6.18 – Retorno ao modo ilhado em C-HIL: (a) potências ativas; (b) frequências; (c) potências reativas; (d) amplitudes de tensão. 150
Figura 6.19 – Estrutura simplificada da configuração experimental. 152
Figura 6.20 – Montagem experimental completa. 152
Figura 6.21 – Tensões instantâneas em regime permanente do inversor e da rede externa no modo ilhado em configuração experimental. 153
Figura 6.22 – Tensões instantâneas em regime permanente do inversor e da rede externa no modo conectado à rede em configuração experimental. 153
Figura 6.23 – Correntes instantâneas em regime permanente do inversor, da rede externa e da carga local no modo ilhado em configuração experimental. 154
Figura 6.24 – Correntes instantâneas em regime permanente do inversor, da rede externa e da carga local no modo conectado à rede em configuração experimental. 154
Figura 6.25 – Sincronização ativa em configuração experimental: $vrede - vinv \rightarrow 0$ 155
Figura 6.26 – Correntes do inversor, da rede externa e da carga local na transição suave de modo ilhado para conectado à rede em configuração experimental. 155
Figura 6.27 – Variações de carga no modo ilhado em configuração experimental: (a) potências ativas; (b) frequências; (c) potências reativas; (d) amplitudes de tensão. 156
Figura 6.28 – Passagem de modo ilhado para conectado à rede em configuração experimental: (a) potências ativas; (b) frequências; (c) potências reativas; (d) amplitudes de tensão. 157
Figura 6.29 – Variações de carga no modo conectado à rede em configuração experimental: (a) potências ativas; (b) potências reativas. 157
Figura 6.30 – Variações de referências de potência ativa no modo conectado à rede em configuração experimental: (a) potências ativas; (b) potências reativas. 158
Figura 6.31 – Variações de referências de potência ativa no modo conectado à rede em configuração experimental: (a) potências reativas; (b) potências ativas. 158
Figura 6.32 – Retorno ao modo ilhado em configuração experimental: (a) potências ativas; (b) frequências; (c) potências reativas; (d) amplitudes de tensão. 159
Figura 6.33 – Tensões instantâneas do inversor com sistema de controle e inversor emulador da rede externa desconectados. 160
Figura 6.34 – Tensões instantâneas do inversor com sistema de controle e inversor emulador da rede externa e corrente intercambiada no modo conectado. 160

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Avaliação de desempenho dos principais grupos de técnicas de controle para inversores para conexão de sistemas de geração distribuída e de microrredes à rede..... 107
Tabela 5.1 – Parâmetros da estrutura física e de potência e do sistema de controle (Simulação computacional/C-HIL/Experimental). 127

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMI	*Advanced Metering Infrastructures*
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATSMC	*Adaptative Total Sliding-Mode Control*
BD	"Baseadas em *droop*"
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
C-HIL	*Controller Hardware-in-the-Loop*
CSI	*Current Source Inverter*
DF	Detector de Fase
DSM	*Demand Side Management*
DSP	*Digital Signal Processor*
DU	*Dispatch Unit*
EIA	*U.S. Energy Information Administration*
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ESMAP	*Energy Sector Management Assistance Program*
FA	Filtragem Adaptativa
FPB	Filtro Passa-Baixa
FV	Fotovoltaico
GD	Geração Distribuída
GPS	*Global Positioning Systems*
GSQ	Gerador de Sinal em Quadratura
HIL	*Hardware-in-the-Loop*
HVDC	*High-Voltage Direct Current*
ICA	*Intelligent Connection Agent*
IEA	*International Energy Agency*
IEC	*International Electrotechnical Commission*
IEEE	*Institute of Electrical and Electronics Engineers*
IGBT	*Insulated Gate Bipolar Transistor*
IPCC	*Intergovernmental Panel on Climate Change*

IRENA	*International Renewable Energy Agency*
LQR	*Linear Quadratic Regulator*
MME	Ministério de Minas e Energia
MOSFET	*Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistors*
NBR	Norma Brasileira
ND	"Não-baseadas em *droop*"
NPC	*Neutral Point Clamped*
NREL	*National Renewable Energy Laboratory*
OCT	Oscilador Controlado por Tensão
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
P+Res	Proporcional-Ressonante
PI	Proporcional-Integral
PLL	*Phase-Locked Loop*
PWM	*Pulse Width Modulation*
REN	Resolução Normativa
REN21	*Renewable Energy Policy Network for the 21st Century*
SCADA	*Supervisory Control and Data Acquisition*
SOGI	*Second-Order Generalized Integrator*
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
UNFCCC	Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
UPQC	*Unified Power Quality Conditioner*
UPS	*Uninterruptible Power Supply*
VSI	*Voltage Source Inverter*

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO 20

JUSTIFICATIVA 21
OBJETIVOS 24
METODOLOGIA 25
CONTRIBUIÇÃO 27
ESTRUTURA DA TESE 28

1 – GERAÇÃO DISTRIBUÍDA, MICRORREDES, INVERSORES E SISTEMAS DE CONTROLE 29

1.1 - DEFINIÇÕES 29
1.1.1 – Geração Distribuída 29
1.1.2 – Microrredes 31
1.1.3 – Inversores 33
1.1.4 – Sistemas de Controle 35
1.1.5 – Modos de Operação 37
1.2 – CONCEITOS E CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS 38
1.2.1 – Flexibilidade 38
1.2.2 – Confiabilidade 39
1.2.3 – Ligar-e-Usar e Par-a-Par 39
1.2.4 – Variável, Intermitente e Despachável 40
1.2.5 – Inteligência 42
1.2.6 – Simplicidade e Complexidade 42
1.3 – GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E MICRORREDES: SISTEMAS TECNOLÓGICOS E ARQUITETURAS 43
1.3.1 – Sistemas Tecnológicos 43
1.3.2 – Arquiteturas 46
1.4 – SISTEMAS DE CONTROLE DE INVERSORES PARA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E MICRORREDES 47
1.5 – HISTÓRIA, DESENVOLVIMENTO ATUAL E FUTURO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E DAS MICRORREDES 49
1.6 – BRASIL, GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E MICRORREDES 52
1.7 – SISTEMA ELÉTRICO, GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E MICRORREDES 54
1.8 – SOCIEDADE, ECONOMIA, GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E MICRORREDES 56
1.9 – MEIO AMBIENTE, GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E MICRORREDES 62

2 – MODO ILHADO 67

2.1 – REQUISITOS PARA OPERAÇÃO EM MODO ILHADO 68
2.2 – CONTROLES INTERNOS 69
2.3 – ESTRATÉGIAS DE CONTROLE PARA MODO ILHADO 71
2.5 – IMPEDÂNCIA VIRTUAL 78
2.6 – CONTROLE SECUNDÁRIO 79
2.7 – CONSIDERAÇÕES SOBRE O MODO ILHADO 80

3 – MODO CONECTADO À REDE E TRANSIÇÃO SUAVE 82

3.1 – BENEFÍCIOS DO MODO CONECTADO À REDE E DA TRANSIÇÃO SUAVE 83
3.2 – REQUISITOS PARA OPERAÇÃO EM MODO CONECTADO À REDE 85
3.3 – ELEMENTOS PARA OPERAÇÃO EM MODO CONECTADO À REDE 88
3.3.1 – Métodos de Controle para Sincronização 88
3.3.2 – Chave Estática de Interconexão 91
3.4 – REVISÃO DE SISTEMAS DE CONTROLE PARA MODO CONECTADO À REDE E TRANSIÇÃO SUAVE 93
3.4.1 – Sistemas de Controle Não-baseados em Droop (ND) 95
3.4.2 – Sistemas de Controle Baseados em Droop (BD) 96

3.4.3 – Discussão *103*

4 – SISTEMA DE CONTROLE PROPOSTO **108**

5 - PROJETOS E SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS **117**

5.1 – PROJETOS 117
5.1.1 – Projeto e Características da Estrutura Física ou de Potência *118*
5.1.2 – Projeto e Características do Sistema de Controle *120*
5.2 – SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS 127

6 - RESULTADOS EM PLATAFORMAS *CONTROLLER HARDWARE-IN-THE-LOOP* (C-HIL) E EXPERIMENTAIS **140**

6.1 – RESULTADOS EM PLATAFORMAS *CONTROLLER HARDWARE-IN-THE-LOOP* (C-HIL) 140
6.2 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS 151

CONCLUSÃO **161**

TRABALHOS FUTUROS 166
PUBLICAÇÕES E PRODUTOS 167

REFERÊNCIAS **168**

INTRODUÇÃO

Nesta tese de doutorado são analisados e propostos sistemas de controle de inversores para geração distribuída e microrredes elétricas com operações em modos de conexão à rede, transição suave e ilhamento.

Nos primórdios dos sistemas elétricos, tais tecnologias e técnicas inexistiam ou algumas delas eram, ao menos, bastante rudimentares. Elas surgiram, nas versões modernas que serão apresentadas neste trabalho, apenas na virada do século XX para o século XXI. De fato, do início da eletrificação, por volta dos anos 1880, até os anos 2000, poucas mudanças ocorreram na rede elétrica, em seus elementos e em seu funcionamento. Assim que ganharam suas formas fundamentais, elas se mantiveram em grande medida inabaladas por mais de uma centena de anos.

Assim, o sistema elétrico convencional, ainda empregado pela maioria da população mundial, foi erigido no começo do século XX. Sua estrutura, sua organização e sua operação foram replicadas pelos mais variados países e elas sofreram poucas alterações ao longo do tempo. Expandiram e engrandeceram, com efeito, mas raras foram as ocasiões em que se notou uma verdadeira inovação desde suas fundações. Neste sentido, podem ser citadas como exemplos de maior relevância apenas as tecnologias de transmissão em corrente contínua de alta tensão (HVDC – *High-Voltage Direct Current*) e da energia nuclear. Ambas se tornaram viáveis comercialmente nos anos 1950. Apesar do ineditismo das duas, elas, na realidade, pouco fizeram para abalar a maneira como se produzia, transmitia, distribuía e consumia energia elétrica. A primeira modificou, em um número diminuto de regiões, os aparatos para se transmitir eletricidade, aumentando as potências entregues e as distâncias das linhas. Deu continuidade, porém, ao modelo antecedente de transmissão. Já a última introduziu a fissão nuclear como processo primário para obtenção de energia. Não passou disso na área da geração. A menos de suas peculiaridades, as usinas nucleares são muito similares às termoelétricas tradicionais. Ocorria, deste modo, uma simples substituição, em alguns lugares, do carvão e do óleo pelo urânio. Em suma, é notório que, durante quase cem anos, a rede elétrica passou por reformas apenas, sem romper com seus alicerces.

Tal rigidez só tem sido superada nos últimos anos. A chegada de novas tecnologias e técnicas no setor de energia prenunciam uma verdadeira revolução no sistema elétrico. Revolução, e não evolução, porque não somente faz progressos, mas também coloca de cabeça para baixo toda a configuração estabelecida. Além da inserção de vários dispositivos antes

impensáveis, as maneiras como são realizadas a geração, a transmissão, a distribuição e a utilização da energia elétrica estão sendo radicalmente transformadas. Indo da produção de pequeno porte próxima ao consumo até o sistema de distribuição ativo, passando pelas cargas controláveis e pela proteção inteligente, as redes elétricas do futuro pouco lembrarão suas antepassadas. E, no âmago de todo este cataclismo elétrico, estão a geração distribuída e as microrredes, sistemas com vários atributos inerentemente antagônicos aos das redes elétricas preponderantes.

A geração distribuída e as microrredes subvertem os principais conceitos da arquitetura e do funcionamento dos sistemas elétricos tradicionais. A primeira surge como uma nova forma de se produzir energia elétrica em qualquer parte, coabitando vastamente com residências, comércios e indústrias, ideia decididamente esvaziada desde a afirmação das enormes usinas elétricas durante o período entreguerras no século XX. Já as últimas são constituídas por múltiplas unidades pequenas destes aparatos, muitas vezes renováveis, alguns variáveis e intermitentes; são permeadas por eletrônica de potência e imbuídas de métodos de controle inteligentes e automáticos; minimizam o espaço entre produção e consumo; podem trabalhar autonomamente; são altamente dinâmicas e flexíveis; são amplamente diversas em composição e construção; etc. A despeito disso, a geração distribuída e as microrredes formam a base das vindouras redes elétricas inteligentes, fase derradeira da próxima era do setor elétrico de potência. Trarão consigo enormes benefícios a este campo.

A ascensão da geração distribuída e das microrredes, no entanto, não se dá apenas pela vertente estritamente técnica. Suas características fazem-nas soluções igualmente relevantes para os problemas econômicos, sociais e ambientais atuais em torno do uso da energia elétrica. Se, de um lado, elas melhoram o desempenho, a eficiência e a qualidade da eletricidade entregue, de outro, poderão assegurar acesso a este produto a quem ainda não o tem, reduzir seu preço, abrir mercados, manter contínuo o fornecimento em circunstâncias críticas, mitigar as mudanças climáticas, cortar emissões de poluentes, dentre tantas outras vantagens.

Justificativa

Considerando os fatos previamente apresentados, fica clara a importância da geração distribuída e das microrredes para o bem da humanidade e da natureza. Abona-se, com isto, a necessidade premente do estudo e do desenvolvimento de tais tecnologias. Desta forma foi que se optou, dentre as inúmeras tendências, pela compreensão, elaboração e aplicação de estratégias de controle de inversores para seus distintos modos de operação, a saber: ilhamento,

transição suave e conexão à rede. Sendo assim, a presente pesquisa busca contribuir com avanços seus para que estes sistemas possam ser largamente integrados, melhorando a vida das pessoas e atuando na conservação e na preservação ambiental.

As justificativas para a escolha particular do tema podem ser detalhadas. Em primeiro lugar, é preciso ter em mente que os altos níveis de qualidade e de confiabilidade e de baixos preços da energia elétrica, por exemplo, criaram na sociedade uma exigência igualmente elevada sobre estes pontos. Desta forma, quaisquer modificações no sistema elétrico deverão tomar como ponto de partida características altamente positivas como as mencionadas.

Em segundo lugar, considera-se a abertura do mercado de eletricidade, que tem levado à expansão da adoção de fontes de energia de pequeno porte no lado do consumidor, seja qual ele for. Por um lado, tais atitudes delineiam o caminho agregador para a integração da geração distribuída, em especial energias renováveis, e das microrredes. Por outro, demonstram a falta de preparo da rede elétrica tradicional, que não foi aparelhada e organizada para estas novas tecnologias. É imprescindível que dispositivos e métodos inovadores sejam empregados para fazer frente aos problemas que surgem. Há a necessidade de técnicas para controle e gerenciamento flexíveis e automatizados devido à inserção de novas operações. Mais ainda considerando a descentralização e a redução de especialistas trabalhando diretamente no funcionamento destes sistemas elétricos.

Em terceiro lugar, aponta-se o predomínio de sistemas CA e de conversores estáticos como interface. Mesmo com o avanço de sistemas CC, quase toda a eletricidade produzida, transmitida, distribuída e consumida é CA. A impossibilidade de reestruturar a rede vigente na maior parte dos locais no curto prazo leva a aplicações CA ou que possam ser adaptadas para CA. Ao mesmo tempo, devido aos diversos recursos e às enormes vantagens, a eletrônica de potência tem dominado os meios de interface dos recursos energéticos distribuídos, incluindo geração distribuída e dispositivos de armazenamento, e, consequentemente, microrredes. Ela permeia intensamente todos estes campos. Na interseção, encontram-se os inversores, que convertem CC em CA. Com isso, fica evidente que estudos e desenvolvimentos devem ser dedicados a estes assuntos.

Considerando, como explicado, agora, a relevância dos métodos de controle para inversores aplicados em geração distribuída e microrredes CA (e híbridas), resta justificar a análise detalhada e a proposta para os denominados modos de operação: ilhado, transição suave e conectado à rede. É interessante notar que existe uma indefinição sobre a estratégia unificada

e abrangente a ser adotada nestes casos, havendo menor número de propostas na literatura em relação a outras técnicas consolidadas para inversores. Entende-se que é preciso apresentar uma solução neste sentido.

Na sequência, encontram-se os enormes benefícios de se trabalhar no modo ilhado. Estes coadunam com as exigências das pessoas sobre a energia elétrica, pois trata de minimizar o tempo e a frequência de interrupções, além de permitir maior autonomia dos agentes. No entanto, tal possibilidade praticamente inexiste em muitas áreas no setor elétrico por restrições técnicas. Permitir que ela ocorra corretamente é extremamente importante.

Todavia, mesmo que o ilhamento seja uma vantagem, é ainda mais importante possibilitar que a conexão com a rede possa ocorrer quando e como quiser, incluindo seus instrumentos próprios de operação, que multiplicam os benefícios. Este movimento e o seu oposto, o de retorno ao modo ilhado, devem acontecer sem que os atores locais percebam a mudança ou que aparelhos sejam danificados. É o que explica a transição ser suave e a sincronização ativa. Vale ressaltar que o modo conectado é relevante tendo em vista que a geração distribuída e as microrredes são implantadas em muitos pontos onde a rede elétrica já está presente e funcionando bem. É preciso aproveitar este cenário e incrementar os efeitos positivos com novas aplicações, pouco usuais até então, nomeadamente o controle do fluxo de potências, tornando viável importação e exportação de energia e outros recursos, tais como aprimoramento de qualidade da energia e aprovisionamento de serviços ancilares distribuídos.

Em suma, as justificativas pontuadas para esta pesquisa são:

- Benefícios sociais e ambientais de geração distribuída e microrredes;
- Modernização e transformação do sistema elétrico de potência e integração de novas tecnologias de produção, distribuição e consumo de eletricidade;
- Exigências das pessoas por melhores índices de qualidade do produto e do serviço de energia elétrica;
- Adoção massiva de fontes de pequeno porte no lado do consumo;
- Adequação da rede elétrica convencional para inteligente, principalmente com elaboração e aplicação de técnicas de controle inovadoras;
- Predomínio de sistemas CA e inversores;
- Falta de consenso sobre estratégias unificadas para os modos de operação;
- Vantagens inerentes ao modo ilhado;
- Vantagens inerentes ao modo conectado;

- Necessidade de transição suave e sincronização ativa entre modos;
- Gerenciamento avançado sobre o fluxo de potências na conexão.

Objetivos

Tendo como base as justificativas apresentadas, o objetivo central desta tese é propor e validar uma estratégia de controle de inversores para geração distribuída e microrredes que permita a operação nos modos ilhado e conectado à rede com transição suave entre eles.

Para se alcançar esta meta, outras são invariavelmente imperativas de se buscar. O primeiro objetivo específico é compreender de forma abrangente, pode se dizer até mesmo holística, os elementos do tema abarcado, sobretudo geração distribuída e microrredes. Por isso, estudam-se estes objetos não só em termos técnicos, mas também históricos, sociais, econômicos e ambientais. É primordial entender os aspectos de engenharia, pois este trabalho se trata de um exame de tecnologia. Porém, sendo produções humanas para seu proveito e dadas pelos meios materiais da natureza com impactos sobre ela, não pode ser passiva de uma análise meramente técnica. Deve ser investigada nos seus pormenores não técnicos, o que se tentou. Não cabe aqui um estudo minucioso e profundo nestas questões. Contudo, ele deve ser suficiente para estabelecer se a proposta é uma escolha e uma construção responsáveis diante da comunidade e do meio ambiente.

O segundo objetivo específico, depois de definido o assunto principal, é avaliar e discutir os modos de operação em conjunto com seus métodos de controle. Além das ideias básicas por trás de cada um, fundamentando a pesquisa, é preciso realizar uma revisão das estratégias existentes na literatura. Com isso, as vantagens e desvantagens de cada uma podem apontar os rumos a serem seguidos para a elaboração de um sistema de controle próprio que reúna o que há de melhor em cada uma.

Com uma compreensão geral do tema e uma abordagem detalhada das técnicas existentes, pode se passar ao terceiro e último objetivo específico. Trata-se da própria formulação de uma estratégia de controle, de sua verificação e de sua validação. Para tanto, os controladores são descritos e projetados. Em seguida, eles são testados em simulações computacionais, em plataformas *Controller Hardware-In-the-Loop* (C-HIL) e em protótipo experimental. O objetivo é alcançado na medida em que a operação da estrutura teórica desenvolvida é corroborada na sua integralidade pelos resultados obtidos e previstos. Assim, finalizam-se os objetivos.

Metodologia

Dadas as justificativas e definidos os objetivos, é importante traçar a metodologia por trás da investigação aqui tratada. Ela segue a configuração científica típica aplicada nas engenharias. Inicia-se pela escolha do objeto de pesquisa, processo subjetivo, mas que, como sugerido anteriormente, possui alicerces firmes sobre demandas tecnológicas, sociais, econômicas e ambientais. Diferentemente das ciências naturais e exatas, a engenharia é imbuída de particularidades e não se restringe às observações puramente objetivas. É tomada uma opção dentre várias possíveis e, a partir disso, delineia-se o procedimento de validação. O objeto de pesquisa é determinado *a priori* para os devidos fins desejados.

Escolhido o assunto, passa-se a um estudo geral seu, conforme já aclarado. Distintas fontes são consultadas para compreensão da geração distribuída, das microrredes, de inversores, de sistemas de controle e dos modos de operação sob uma visão ampla. As referências nas formas de artigos, livros, relatórios, notícias, sites da internet, entre outros, são lidas e são tomadas notas. Uma análise crítica é feita. Na sequência, afunila-se o exame, com estudo especializado das diversas estratégias de controle encontradas na literatura. É o momento de elucidação do estado da arte, sendo feita a revisão específica do tema chave da tese.

Com o arcabouço teórico, pode ser elaborada uma proposta própria de sistema de controle. Conforme se faz a revisão, os requisitos são esclarecidos, assim como os problemas a serem superados. Diante do exposto, uma solução é concebida. Ela deve dar conta das condições para todos os modos de operação dos inversores em geração distribuída e em microrredes. Mais do que isso, preferencialmente precisa trazer outros instrumentos que melhorem o funcionamento geral. As equações e as leis de controle são, então, definidas.

É feito um projeto tanto do modelo físico ou de potência, quanto do sistema de controle. Os primeiros testes, considerando a fase inicial do processo, visando reduzir custos, tempo e esforços, são todos concretizados em simulações computacionais simples. Até mesmo para reduzir peso computacional, nesta parte, alguns parâmetros e elementos reais são ignorados, tais como chaveamento do inversor. Tal decisão por idealidades não intervém negativamente numa primeira abordagem. Ressalta-se que o objeto principal é a estratégia de controle, por isso ela é priorizada em todos os procedimentos. É ela que deve ser verificada a fundo. A partir destes resultados, o projeto é aprimorado iterativamente até que se alcance a melhor arquitetura do sistema. Apesar da utilização de meios ideais, de forma a não haver conflitos com os

próximos testes, muitos dos valores e dos itens empregados nesta etapa são condizentes com as estruturas reais vindouras.

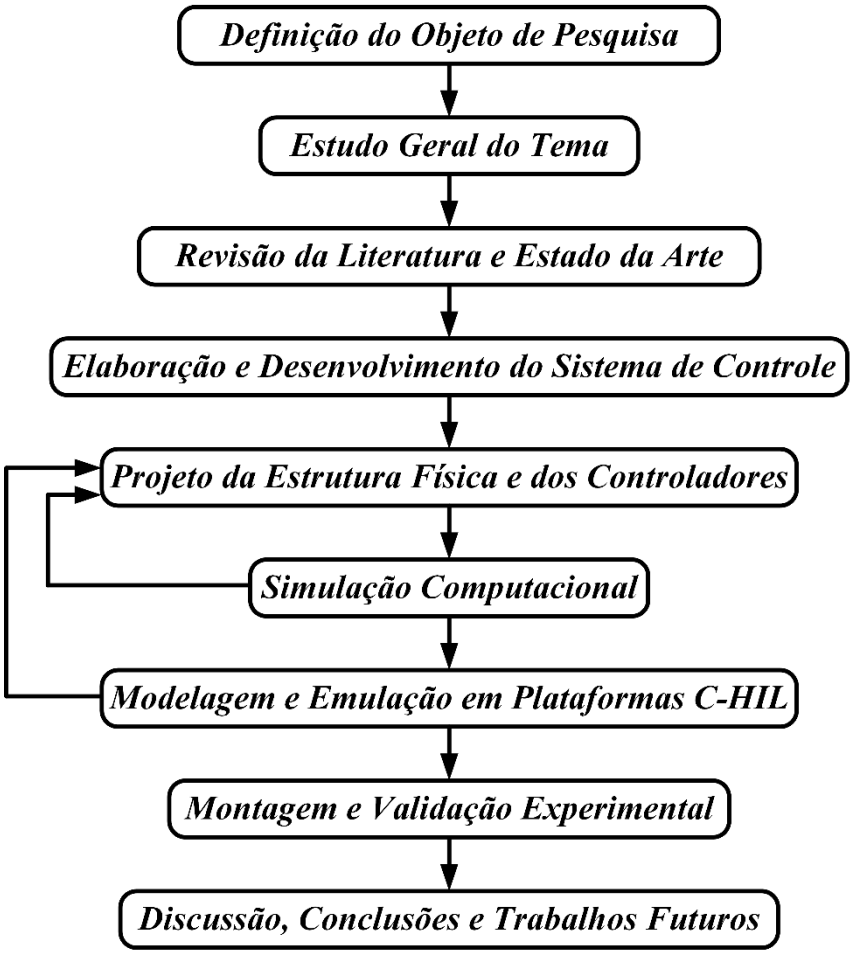
Um passo intermediário, mas crucial nesta metodologia, é a análise usando plataformas C-HIL. Aumenta-se a fidelidade dos testes com a realidade, pois o modelo investigado em tempo real agora abarca quase todas as não-idealidades. No entanto, não é necessária a montagem completa de protótipo físico com todas as suas dificuldades. Ainda mais considerando que o foco é a estratégia de controle, que pode ser inteiramente testada como na fase derradeira, uma vez que ela é implementada neste momento em código embutido em Processadores Digitais de Sinais (DSP – *Digital Signal Processor*), tal qual é integrada experimentalmente. Além do mais, esta ocasião não serve apenas como mera passagem da simulação computacional para a realização experimental. Testes impraticáveis ou inviáveis podem ser feitos com C-HIL. No caso, por restrições laboratoriais, o sistema de controle em microrrede completa é examinado neste processo e não no seguinte. Esta ocasião também serve para reajustes no projeto se necessário.

Por fim, chega-se à validação experimental. Após alcançar o projeto definitivo, a planta é erigida fisicamente. Isto quer dizer, uma unidade inversora com todas as suas conexões, possível ligação a uma rede externa de distribuição, cargas locais e sensores e medidores é montada. O sistema de controle, como antes, é inserido em DSP para ser integrado ao conversor, que corresponderá aos seus comandos, conforme delineado na proposta. O protótipo com a técnica é testado em vários cenários para garantir que aquilo que foi desenvolvido corresponde com a realidade operacional. A partir dos resultados, pode se dizer se o método idealizado é ou não factível, e, depois, discussões surgem para sugerirem a continuação do trabalho.

É preciso notar que esta tese é a sequência de alguns anos de pesquisa do autor. Ela se iniciou com o trabalho de conclusão de curso no fim da graduação, no qual foi feito um estudo aprofundado da geração distribuída e seus impactos no sistema elétrico, na sociedade e no meio ambiente. Na dissertação de mestrado, foi proposta uma primeira versão da estratégia de controle deste trabalho. Foi também neste período que se começaram os estudos sobre microrredes. A tese de doutorado, portanto, congrega estes esforços, agrega estes conhecimentos e vai além, concluindo este projeto contínuo. Quer, assim, oferecer uma contribuição no progresso responsável das tecnologias para transição energética, que observa valores humanos e ambientais.

Na Fig. I.1, um fluxograma resume a metodologia empregada neste trabalho.

Figura I.1 – Metodologia proposta e empregada na pesquisa de doutorado.



Fonte: Elaborada pelo autor

Contribuição

A principal contribuição desta tese de doutorado é o sistema de controle unificado proposto para operação de inversores com geração distribuída e microrredes em diferentes modos, ilhamento, transição suave e conexão à rede. No primeiro, é empregadA uma técnica consagrada em sua estrutura convencional, o método de controle *droop*, por razões detalhadas mais à frente no trabalho. Todavia, na transição suave com sincronização ativa e na conexão com a rede, buscou-se apresentar uma solução inovadora baseada nesta mesma técnica modificada. O conjunto completo da estratégia de controle é igualmente original. As suas características especiais com suas vantagens formam mais um subsídio para a comunidade.

São consideradas igualmente contribuições do presente trabalho o estudo amplo e profundo do tema, a revisão detalhada e crítica das técnicas de controle e as discussões abordadas. Como processo da pesquisa de doutorado, é importante ressaltar que parte do trabalho aqui apresentado já foi publicada em artigos.

Estrutura da Tese

A tese é constituída por 6 capítulo, além desta Introdução e da Conclusão. O primeiro capítulo apresenta o estudo geral, teórico e sistêmico do tema do trabalho. Geração distribuída, microrredes, inversores, sistemas de controle e os modos de operação são abordados em seus conceitos fundamentais, seus componentes e suas interações, ou seja, em termos técnicos. Seguem daí discussões históricas, sociais, econômicas e ambientais, além de um panorama atual, para o futuro e sobre o cenário específico brasileiro. O segundo capítulo trata do modo ilhado e suas técnicas de controle. São expostas condições e considerações. Na sequência, o modo conectado e a transição suave são exploradas no terceiro capítulo. Uma revisão profunda é feita sobre os métodos encontrados na literatura. Benefícios, requisitos e elementos também são apontados. O quarto capítulo traz o sistema de controle proposto em detalhes. O projeto do modelo físico e dos controladores é oferecido e o acompanham as simulações computacionais no quinto capítulo. No último, os resultados em C-HIL e da montagem experimental são discutidos, mostrando a validação da proposta. Conclusões e trabalhos futuros encerram o documento escrito da tese de doutorado.

1 – GERAÇÃO DISTRIBUÍDA, MICRORREDES, INVERSORES E SISTEMAS DE CONTROLE

Geração distribuída, microrredes, inversores e sistemas de controle são os objetos principais de investigação deste trabalho. Sendo assim, é importante compreendê-los em essência para dar sequência à exposição do desenvolvimento da pesquisa. Em vista disso, neste capítulo, são estabelecidas definições para cada um deles, além de serem apresentados conceitos e atributos basilares correlacionados. As estruturas tecnológicas também são discutidas com o mesmo intuito. Unindo os elementos, trata-se especificamente sobre os conversores estáticos atrelados à geração distribuída e às microrredes. Nesta linha, são apontadas estratégias de controle de inversores para estes dois sistemas sob uma abordagem genérica. Como qualquer dispositivo ou método em sistemas de energia não surge espontaneamente e sim historicamente, não é isolado do setor elétrico e impacta e é impactado pela sociedade, pela economia e pela natureza, estas dimensões são analisadas para a geração distribuída e para as microrredes. Tais perspectivas holísticas são consideradas fundamentais para melhor entendimento destes artefatos, mas, mais ainda, para suas aplicações, com compreensão de seus benefícios e de suas consequências.

1.1 - Definições

As definições que se seguem não são rigorosas ou austeras. Uma vez que a engenharia pode não ser considerada uma ciência exata ou natural, mas sim uma aplicação humana destas, ela está sujeita, dentro de seus limites, a escolhas e interpretações substancialmente subjetivas. Os conceitos expostos, no entanto, não são simplesmente uma opção pessoal. Eles estão baseados na melhor literatura, na concordância das comunidades científicas e profissionais e em amplo consenso. Há respaldo, portanto, para adotá-los, de acordo com as discussões que se seguem. Mesmo assim, existe divergência entre distintos grupos. Portanto, as definições são seguidas na medida em que são úteis e coerentes ao trabalho, identificando e orientando a análise. Uma vez fixadas, elas devem ser entendidas neste sentido.

1.1.1 – Geração Distribuída

Geração distribuída é o conjunto de todos os dispositivos individuais de produção de energia elétrica que podem ser mais fácil e rapidamente instalados em uma ampla gama de localizações geográficas e físicas, independentemente de fonte primária, de comportamento e de seus pontos de conexão no sistema elétrico, a saber lados da transmissão, da distribuição

ou do consumo, e de sua capacidade, estando distribuídos por toda a rede elétrica ou mesmo ilhados.

Uma discussão pormenorizada sobre o tema pode ser encontrada em (SOUZA JUNIOR, 2018) e, diante disso, não será delongada. Quando se fala em recursos energéticos distribuídos, estão sendo adicionados os dispositivos de armazenamento às tecnologias de geração distribuída.

Não se pode confundir as expressões "energia limpa", "energia verde", "energia alternativa" ou mesmo "energia renovável" com geração distribuída. As três primeiras são inadequadas em termos técnicos. A quarta exige explicação. Por um lado, a maioria das fontes renováveis se encaixa, de fato, na definição dada, mas não todas (por exemplo, energia maremotriz). Por outro lado, há tecnologias de geração distribuída que não são renováveis (por exemplo, pequenos geradores térmicos movidos a combustíveis fósseis).

As primeiras aparições do termo "geração distribuída" ocorreram, possivelmente, conforme conhecimento do autor, por volta dos anos 1970 (ERCTF, 1971), apesar da ideia moderna ter surgido e ser aplicada pouco antes nos anos 1960 (CHEN, 2003; FLYNN, 1961; LUECKEL, EKLUND, LAW, 1973; JEWELL, RAMAKUMAR, 1988). Desde então, as controvérsias sobre sua definição são significativas. Existem várias encontradas na literatura especializada. Alguns exemplos podem ser levantados, demonstrando a falta de unanimidade e justificando o desígnio pela acepção indicada.

A Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC – *International Electrotechnical Commission*) define geração distribuída como "a geração de energia elétrica por múltiplas fontes que são conectadas ao sistema de distribuição de energia" (IEC, 2009). Na norma 1547-2018 do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers*), trata-se de "fonte de potência elétrica não conectada diretamente ao sistema elétrico em massa" (recursos de geração, linhas de transmissão e interconexões) (IEEE 1547-2018, 2018). Em um relatório recente da Agência Internacional de Energia (IEA – *International Energy Agency*), a definição é: "recurso energético (de produção) de pequeno porte usualmente situado próximo do local de uso de eletricidade" (IEA, 2022a). A legislação brasileira mais recente, na forma da Lei Nº 14.300, de 6 de Janeiro de 2022, marco legal da geração distribuída (BRASIL, 2022), caracteriza microgeração e minigeração distribuídas. Na forma geral, o conceito é de "central geradora de energia elétrica renovável ou de cogeração qualificada [...] conectada na rede de distribuição de energia elétrica por meio de instalações de

unidades consumidoras", com no máximo 5 MW de potência instalada, em corrente alternada. A diferença está entre um limiar de 75 kW entre uma e outra, respectivamente.

Podem ser tomadas algumas publicações científicas. Para Ackermann, Andersson e Söder (2001), a geração distribuída é "a fonte de energia elétrica conectada diretamente à rede de distribuição ou no lado da medição do consumidor". Enquanto isso, para Bollen e Hassan (2011), ela "se refere às unidades de produção conectadas ao sistema de distribuição, assim como grandes unidades de produção baseadas em fontes de energia renovável". Para Jenkins, Ekanayake e Strbac (2010) geração distribuída é simplesmente a geração ligada à rede de distribuição. Esta é normalmente de pequeno porte pelo menor nível de tensão, mas os autores consideram igualmente instalações na dimensão de MW. Por fim, Dugan e McDermott (2002; 2001) classificam como geradores instalados pelas concessionárias ou pelo consumidor final no sistema de distribuição com no máximo 2 MW de capacidade instalada.

Fundamentalmente, a definição escolhida faz oposição às fontes "tradicionais" ou "convencionais" de energia elétrica, as usinas termoelétricas, hidroelétricas e nucleares. Estas são rigidamente centralizadas, distantes dos consumidores, de longa e difícil instalação individualizada, de capacidades enormes, dependentes do posicionamento físico e geográfico e inescapavelmente conectadas à rede de transmissão. Como será visto adiante, é uma consequência lógica que a geração distribuída seja o alicerce das microrredes, tornando as duas intimamente ligadas.

Para fins deste trabalho, delimitando aos casos estudados, será considerada geração distribuída aquela que segue a definição, mas que se restringe pela pequena e média capacidade de produção, não ligadas à transmissão. Também deve se destacar que, nos casos específicos da proposta, quando se falar em geração distribuída, a menos de algum apontamento, a tecnologia abordada é despachável, conceito detalhado a seguir. Já "sistema de geração distribuída" serve para enfatizar as fontes acopladas a cargas locais com modos ilhado e conectado disponíveis.

1.1.2 – Microrredes

Microrredes (ou minirredes) elétricas são sistemas elétricos de potência de tamanho reduzido em relação às redes elétricas tradicionais, mas completos, isto é, elas contêm necessariamente geração, distribuição e consumo de eletricidade em uma só entidade.

O termo "microrrede" ("*microgrid*") e sua definição dentro da área de sistemas elétricos de potência aparecem pela primeira vez em uma publicação, ao que as pesquisas do autor

indicam, em 1986, como um caso esporádico, em artigo sobre uma estação terrestre remota na Antártica, a INMARSAT (KUEFFNER, 1986). O que se pode chamar de renascimento das microrredes, agora em sua versão moderna, como será mostrado adiante no resumo histórico, ocorre somente no início dos anos 2000 através do conceito CERTS (*Consortium Electric Reliability Technology Solutions*) nos Estados Unidos da América em trabalhos de R. H. Lasseter *et al.* (2002a).

No entanto, assim como acontece com a geração distribuída, a terminologia aqui também é permeada por falta de consenso. Recorrendo mais uma vez ao IEC (2017), a definição de microrrede é dada como: "grupo de cargas e recursos energéticos distribuídos interconectados com fronteiras elétricas definidas formando um sistema elétrico local com níveis de tensão da distribuição, que age como entidade controlável e que pode operar ilhado". O mesmo relatório da IEA (2022a) citado previamente coloca microrrede como um "sistema localmente conectado que incorpora geração distribuída, demanda e armazenamento dentro de fronteiras elétricas claramente definidas". O IEEE, na norma 2030.7–2017 (IEEE 2030.7-2017, 2017), de forma bastante similar ao IEC, afirma que uma microrrede elétrica é definida como "um grupo de cargas e recursos energéticos distribuídos interconectados com fronteiras claramente definidas que age como uma entidade única controlável com respeito à rede e que pode conectar e desconectar da rede para operar nos modos conectado à rede e ilhado". A mesma legislação brasileira anteriormente mencionada (BRASIL, 2022) dá a seguinte definição:

> microrrede: integração de vários recursos de geração distribuída, armazenamento de energia elétrica e cargas em sistema de distribuição secundário capaz de operar conectado a uma rede principal de distribuição de energia elétrica e também de forma isolada, controlando os parâmetros de eletricidade e provendo condições para ações de recomposição e de autorrestabelecimento.

Em artigos e livros, distintas definições aparecem. Para Lasseter (2002b), microrredes são um "aglomerado de cargas e microfontes operando como um sistema único controlável que provê tanto potência, quanto calor à sua área local". O mesmo autor afirma que a microrrede é uma abordagem sistêmica, pela qual se enxergam unidades de geração e cargas associadas como um único subsistema (LASSETER, PIAGI, 2004). O conceito de Lopes, Moreira e Madureira (2006) é similar, destacando ser a microrrede uma rede de baixa tensão com geradores modulares. Para Hatziargyriou *et al.* (2007), uma microrrede é um aglomerado localmente controlado de recursos energéticos distribuídos que operam em tensões de até 69 kV, e que é vista pela rede como uma produtora ou uma carga única eletricamente e em mercados de energia. Eles apontam a possibilidade de operações conectada à distribuição e ilhada. Para

Katiraei *et al.* (2008), ela "envolve uma porção do sistema de distribuição que é localizado a jusante da subestação de distribuição e que inclui uma variedade de unidades de recursos energéticos distribuídos e diferentes tipos de usuários finais de eletricidade e/ou calor". Um último exemplo é o de Chowdhury, Chowdhury e Crossley (2009), que fornece a ideia de microrrede como uma rede de pequena escala de fornecimento de baixa tensão e cogeração projetada para suprir cargas elétricas e de calor para uma comunidade pequena. Eles colocam a microrrede como "essencialmente uma rede de distribuição ativa".

Apesar de suficiente, a definição oferecida é sucinta e direta. Há, contudo, mais aspectos que integralizam o conceito de microrredes, podendo expandi-la, incluindo características dadas pelas acepções apresentadas e outras. Desse modo, pode se dizer que elas são autônomas, controláveis, locais, pequenas e delimitadas. Ser autônoma significa que podem trabalhar continuamente sem depender de outros meios para sua operação normal, o que se deve à possibilidade de funcionar em ilhamento intencional, além de em conexão com uma rede externa quando esta estiver presente em suas fronteiras. O conjunto de elementos em uma microrrede é prioritariamente comandado e regulado em seu interior e, em função disso, é controlável (LASSETER, 2002b). A proximidade entre produção e consumidores somado ao gerenciamento próprio faz das microrredes sistemas locais. Elas são pequenas não só por suas extensões físicas, são igualmente pela capacidade, que não passa de algumas dezenas de MW em potência, e pelos níveis elétricos, que são de baixa e média tensão (HATZIARGYRIOU *et al.*, 2007). Consequentemente, as microrredes são delimitadas, já que não se expandem indistintamente, possuem número restrito de participantes e têm fronteiras elétricas claramente definidas (DOE-USA, 2012). Resta dizer que as microrredes são caracterizadas por terem ao menos duas unidades de geração em suas estruturas, o que as distingue dos pequenos sistemas elétricos isolados, que detêm uma única fonte e alimentam não mais que uma dezena de cargas. Adicionalmente, elas podem ser classificadas em sistemas CA, CC ou híbridos (CA e CC). Neste trabalho, são consideradas primordialmente as do primeiro tipo. Assim podem ser definidas as microrredes de maneira abrangente.

1.1.3 – Inversores

Inversores são dispositivos estáticos de eletrônica de potência que convertem entradas em corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA), podendo atuar na regulação da tensão, da corrente e, por conseguinte, da potência que eles estão fornecendo.

O inversor é um conversor CC-CA (HART, 2000; MOHAN, UNDELAND, ROBBINS, 2003; ERICKSON, MAKSIMOVIC, 2004). Formado por chaves semicondutoras (eletrônica) de potência controladas, ele permite que a saída CA tenha a magnitude (em tensão ou em corrente) e a frequência desejadas a partir de uma fonte CC ou retificador (conversor CA-CC) na entrada. A saída, por sua vez, pode ser fixa ou variável. Ele é um equipamento estático porque não possui partes móveis (AHMED, 2000).

Devido às suas diferentes composições, os inversores ganham várias classificações. Pelo número de fases, em geral, eles são considerados monofásicos ou trifásicos. Eles também se diferenciam pelos semicondutores empregados, tais como MOSFETs (*metal-oxide semiconductor field-effect transistors*) ou IGBTs (*insulated gate bipolar transistors*), e pela forma de onda da saída, que pode ser, por exemplo, quadrada ou senoidal. Neste último caso, incluem-se igualmente os princípios de comutação impostos: modulação por largura de pulso (PWM – *pulse width modulation*), podendo ser chaveamento unipolar, bipolar ou híbrido; múltiplos pulsos; deslocamento de fases; vetores espaciais; dentre outros métodos (RASHID, 2014). Quanto à entrada, o inversor pode ser fonte de tensão (VSI – *voltage source inverter*), se a tensão de entrada for mantida essencialmente constante independentemente da corrente de carga, ou fonte de corrente (CSI – *current source inverter*), quando a corrente de entrada é fixa (AHMED, 2000). As variadas formas de se construir e implementar um inversor ganham igualmente uma categoria chamada tipicamente de topologia. Ele pode ser de meia-ponte (*half-bridge*), ponte completa (*full-bridge*), NPC (*Neutral Point Clamped*), multinível e todas as variações destas. Existem ainda estruturas mais específicas, derivadas destas anteriores, que buscam maior eficiência e outros requisitos especiais, tais como H5, HERIC, REFU, etc. (TEODORESCU, LISERRE, RODRIGUEZ, 2011). Há ainda inversores de pulso ressonante. Contudo, estes vão além do escopo da pesquisa.

No presente trabalho, o interesse maior não é no desenvolvimento físico de inversores, mas sim em sua aplicação. A contribuição está voltada para a realização de sistemas de controle em conversores CC-CA. Por isso, o inversor adotado não possui nenhuma novidade e, com efeito, é um modelo consolidado. A escolha tem mais a ver com a própria utilização. Daqui em diante, reconhece-se que os inversores analisados com a estratégia proposta são trifásicos, VSI e de saída senoidal via chaveamento por PWM. A topologia é a de ponte completa e os dispositivos semicondutores são IGBTs. Casos contrários são notificados.

Pode se notar que há uma forte convergência de tecnologias e técnicas entre inversores, geração distribuída e microrredes. Por um lado, em oposição ao passado, onde predominavam

as termoelétricas, as hidroelétricas e as centrais nucleares e, desta forma, as máquinas rotativas como interface, atualmente os recursos energéticos distribuídos, compostos em grande parte por elementos com saída CC, têm ganhado cada vez mais espaço. Ademais, sendo quase a totalidade das redes elétricas em CA, os inversores são capitais para integrar estes sistemas. Mais do que proverem as adequações, eles podem aprimorar seus desempenhos (SOUZA JUNIOR, FREITAS, 2022a). Por outro lado, apesar da finalidade precípua do inversor ser a conversão da potência CC em CA, a eletrônica de potência não só une a eletrônica e a potência, como também o controle. Com isso, estes equipamentos podem incorporar funcionalidades que não se restringem à mera conversão. Podem ser desenvolvidos para que desempenhem operações das mais diversas. Com alta velocidade, versatilidade e eficiência, é através dos conversores CC-CA que se pode implementar os diferentes sistemas de controle. Eles podem embarcar instruções, expressões e algoritmos que levem à maximização da produção, à regulação de parâmetros elétricos, ao controle de velocidade em motores e geradores e ao gerenciamento de energia (KROPOSKI *et al.*, 2010).

1.1.4 – Sistemas de Controle

Sistemas de controle são conjuntos de elementos interligados elaborados para alcançar determinados resultados com desempenho desejado.

Um sistema de controle é invariavelmente formado por uma entrada, um processo e uma saída. O processo é o dispositivo, a planta ou o aparelho que será controlado. Um sinal é recebido e processado para outro ser entregue, que é o desejado. Forma-se uma relação entre a entrada e a saída, entre estímulo e resposta, entre causa e efeito (DORF, BISHOP, 2024; NISE, 2016; OGATA, 2010). Neste texto, para evitar repetições, serão considerados como sinônimos de “sistemas de controle” os termos ou expressões “técnicas de controle”, “estratégias de controle”, “métodos de controle” e “esquemas de controle”, sem fazer grandes distinções entre eles, exceto quando avisado.

Existem duas configurações principais para os sistemas de controle: malha aberta e malha fechada, com realimentação. Tipicamente entre a entrada, que normalmente é a inserção da resposta desejada, e a saída, resultado buscado, estão presentes um controlador e um atuador, além do processo ou da planta. Na arquitetura de malha aberta, a saída não é medida e não exerce qualquer influência sobre a entrada e o processamento é feito diretamente, seguindo a estrutura abordada. Em um sistema de controle de malha fechada, o sinal de saída ou a variável controlada é remetida à entrada, às vezes chamada referência, por meio de um sensor, procedimento este chamado de realimentação. Os dois sinais são comparados e o resultado é

levado ao controlador. Quando é efetivada uma diferença entre eles, chamada erro, a realimentação é dita negativa. Esta diferença é o meio de controle. A partir dele, o sistema consegue fazer correções, evitando efeitos de perturbação ou distúrbio, atenuando ruídos de medida e aumentando a precisão e a velocidade, benefícios importantes. Em malha aberta, isso não ocorre. Sua vantagem, porém, está na simplicidade e no menor custo (OGATA, 2010).

Os sistemas de controle são, assim, sistemas dinâmicos, isto é, respondem a sinais que podem mudar no tempo e, em suas ações, levam certo período para atingir o resultado esperado. A análise, determinação do desempenho das técnicas de controle, e o projeto, suas concepções e ajustes, devem ser, por essa razão, voltados para três objetivos fundamentais: produzir a resposta transitória desejada, reduzir os erros em regime permanente e alcançar a estabilidade (NISE, 2016). Quando um sistema de controle atua, ele vai idealmente de uma operação contínua e constante para outra. Esta resposta não é imediata. Ela leva um momento, mesmo que breve, para ser dada. Por isso, é conhecida como resposta transitória. Esta pode ser examinada e adaptada de acordo com os requisitos do projeto, de tal forma que não seja nem muito lenta, nem muito rápida para a planta, preservando sua capacidade de operação com velocidade adequada. Quando a resposta transitória desaparece, com a saída perdurando sobre um valor fixo, este é chamado de regime permanente ou estacionário. Nesta situação, para que seja garantido o correto e preciso funcionamento do controlador, atingindo o seu propósito, o erro, a diferença da entrada com a saída, incluindo os devidos ganhos, deve ser atenuado ou anulado. Por fim, o sistema de controle deve ser estável, ou seja, para uma entrada limitada, a resposta deve ser limitada. Caso contrário, ela pode crescer indefinidamente e causar problemas e danos ao processo (DORF, BISHOP, 2024).

A engenharia de controle busca resolver estas questões. Através de modelos teóricos que representam os sistemas físicos reais, os controladores são projetados e implementados com as características almejadas. De acordo com Dorf e Bishop (2024), o projeto deve seguir as seguintes etapas: identificação da necessidade, proposta de solução, comparação com soluções alternativas e decisão final. Os fatores a serem considerados são: tempo, especificações, complexidade, soluções de compromisso, desvios, riscos, análise, síntese e otimização.

Este trabalho apresenta aplicações de engenharia de controle em sistemas elétricos de potência. Mais especificamente, trata de estratégias para inversores em geração distribuída e microrredes. Os passos aqui descritos são, assim, considerados. Os esquemas são em malha fechada, com realimentação, devido às suas vantagens apontadas. Os objetivos, as etapas e os

fatores permeiam toda a pesquisa, a análise e o projeto para se atingir os resultados desejados, sobretudo os modos de operação a seguir descritos.

1.1.5 – Modos de Operação

Os três modos de operação considerados para sistemas de geração distribuída e para microrredes são: ilhado, conectado à rede ou paralelo à rede e transição suave.

Para os dois primeiros, existem ao menos duas acepções complementares, uma referente ao aprovisionamento de energia elétrica e outra aos parâmetros de funcionamento. Diz-se que a geração distribuída ou a microrrede está em estágio ilhado quando todas as suas cargas locais são supridas exclusivamente pelas unidades internas de produção e não há qualquer ligação física atuante que permita intercâmbio de potência com um sistema externo. Por esse motivo, às vezes se diz que esta operação é autônoma e é a única possível para sistemas totalmente isolados. Na conexão, o consumo local poderá ser abastecido eletricamente por uma rede vizinha adicionalmente à produção própria da geração distribuída ou da microrrede. Mais que isso, pode haver trocas de potência entre os dois sistemas, incluindo exportação de excedente. Na outra concepção, no modo ilhado, as referências de operação de tensão e de frequência são criadas e seguidas pelos controles particulares da geração distribuída ou da microrrede, sem atuação de meios externos. Em contrapartida, no modo conectado, estas referências são impostas pelo sistema elétrico interligado aos dispositivos (VILLENUEVE, 2004).

As transições que se faz entre estes dois modos é vista, às vezes, com tamanha importância que alguns consideram-nas como modos de operação especiais. O guia 1547.4-2011 do IEEE conta quatro condições de operação: “paralelo normal” (conectado à rede), “ilha” (ilhado), “reconexão” (de ilhado para conectado à rede) e “transição para ilha” (de conectado à rede para ilhado) (IEEE 1547.4-2011, 2011). Na última situação, as unidades de geração distribuída e seus conversores de interface precisam readaptar seus controles para criarem as referências e compartilharem as cargas do ilhamento (caso de microrrede). No caso contrário, o processo é mais complexo. De forma geral, a reconexão requer que a geração distribuída ou a microrrede, em outras palavras, os aparatos de produção e de controle, sincronize ativamente com a rede externa, ocorra o fechamento da chave de interconexão e o fluxo de potências entre os sistemas seja estabelecido e regulado. Se qualquer uma das duas práticas acontecer sem que a geração distribuída ou a micrrorrede com seus componentes e a rede sejam afetadas negativamente, fato primordialmente denotado por transitórios perniciosos, fala-se, então, em transição (ou transferência) suave. A norma 2030.7-2017 do IEEE diz que uma transição suave

é “a conexão e a desconexão de uma microrrede para e de uma rede maior sem transitórios de tensão e de frequência que excedam as especificações de projeto e os requerimentos de interconexão” (IEEE 2030.7-2017, 2017). Estende-se aqui este conceito para geração distribuída e são considerados os efeitos sobre a rede externa. Espera-se uma continuidade na entrega de energia elétrica aos usuários dos sistemas de geração distribuída ou da microrrede e do sistema elétrico sem efeitos nocivos pela simples permuta em modos de operação.

Como se apontou, na transição, a sincronização ativa é a primeira etapa. Dois sistemas elétricos CA estarão sincronizados quando as diferenças entre seus níveis de frequência, de fase e de magnitude de tensão, chamados critérios de sincronização, forem as mínimas possíveis ou preferencialmente nulas todo o tempo. A sincronização ser ativa significa que, durante seu acionamento, os controles monitoram e atuam automática e continuamente sobre os parâmetros para que os erros sejam corrigidos a todo instante e mantidos insignificantes (CHO *et al.*, 2011). Se todos os critérios forem atendidos, o sistema de geração distribuída ou a microrrede estará apta a ser interconectada com uma rede principal.

1.2 – Conceitos e Características Fundamentais

Nesta seção são estabelecidas ideias e propriedades fundamentais que delineiam o comportamento dos objetos de pesquisa e os qualifica, sobretudo sobre a operação e as estratégias de controle. Caracterizando-os e balizando-os desta forma, fica mais fácil realizar uma análise crítica sobre o desempenho dos sistemas e, principalmente, das propostas do trabalho. É importante observar que podem não se tratar, necessariamente, de concepções estritamente técnicas, mas de valor mais abrangente. Estes termos tornam a avaliação mais qualitativa do que quantitativa em determinada medida, o que, de primeira, parece prejudicial à análise objetiva. Traz, porém, como benefício a examinação de nuances que se escondem por trás de meras comparações numéricas.

1.2.1 – Flexibilidade

A flexibilidade é a primeira das propriedades que podem ser analisadas e ela pode ser vista em diferentes aspectos. Poder transitar entre os modos de operação é um dos que a descreve. Isso é ainda mais verdadeiro se a transferência puder ser feita em qualquer momento desejado em uma ação rápida sem ou com mínimo de impactos na geração distribuída ou na microrrede e na rede com pouca sensibilidade à troca de controladores. Um segundo ângulo da flexibilidade está na habilidade de recepção não prejudicial às modificações em cada modo de operação. No estado ilhado, significa que as cargas locais podem mudar o consumo sem que o

sistema seja afetado e que elas continuem sendo supridas. Na conexão, além desta mesma atuação, trata-se da adaptação às distintas condições externas, desde que não existam possibilidades de danos, e da facilidade em alterar o perfil da troca de energia elétrica entre a geração distribuída ou a microrrede, a carga local e a rede externa. No intercâmbio, a flexibilidade se reflete na capacidade de ocorrer a transição seguramente suave e a sincronização quaisquer que sejam os parâmetros vigentes, contanto que eles não ultrapassem limites de proteção e de segurança. Outras manifestações da flexibilidade no caso específico das microrredes são a admissão sem falhas das diferentes naturezas, das variações, das ligações e das retiradas recorrentes dos recursos energéticos internos e do consumo local e, como para a geração distribuída, a modificação constante do fluxo de potências com a rede principal diante de objetivos circunstanciais, podendo importar ou exportar eletricidade e prover serviços ancilares distribuídos (CHOWDHURY, CHOWDHURY, CROSSLEY, 2009).

1.2.2 – Confiabilidade

O segundo atributo, a confiabilidade, consiste basicamente na continuidade da alimentação das cargas locais, seja da geração distribuída ou da microrrede (PARHIZI *et al.*, 2015). O maior número de participantes deve ser atendido no máximo de tempo com os melhores níveis de qualidade da energia. No ilhamento, a confiabilidade é reduzida, uma vez que a perda de uma (ou a única) ou mais unidades de recurso distribuído ou a demanda de energia acima do disponível fazem com que algumas ou todas as cargas possam não ser satisfeitas. No modo conectado à rede, em condições normais, o consumo é sempre preservado em qualquer volume, pois o sistema elétrico externo funciona praticamente como uma fonte infinita, e compensa a ausência de produção ou o uso excedente de eletricidade com a geração distribuída ou dentro da microrrede. Poder transitar entre modos é, assim, crucial na confiabilidade.

1.2.3 – Ligar-e-Usar e Par-a-Par

Vinculadas à flexibilidade e à confiabilidade estão as características de “ligar-e-usar” (“*plug-and-play*”) e “par-a-par” (“*peer-to-peer*”) para microrredes de acordo com Lasseter e Piagi (2004). A primeira indica que a microrrede deve poder receber em sua estrutura qualquer dispositivo que for conectado em qualquer ponto sem mudanças nas estruturas dos controles e nas proteções gerais. Adicionalmente, a ligação de um novo elemento deve, preferencialmente, não estar vinculada à comunicação e a customizações de engenharia. Deste modo, ele poderia ser integrado à microrrede sem alterar substancialmente ou parar seu funcionamento e sem que

seja necessária uma espécie de autorização para entrada por parte dos outros componentes. A última denota a forte independência dos artefatos da microrrede. Ou seja, é mais prudente que se evite que toda a microrrede seja submetida a um controlador central ou um dispositivo crítico, pelos quais suas saídas deixariam todo o restante inoperante. Perder qualquer um não pode interferir no funcionamento geral e dos componentes remanescentes. Considerando $(N + 1)$ recursos energéticos distribuídos, a microrrede precisa continuar alimentando as cargas locais e mantendo os parâmetros elétricos normais mesmo diante da extração de um deles. Um sistema de geração distribuída ou a microrrede poderiam ser considerados como uma espécie de célula única com estes dois atributos em relação à rede interconectada. Elas devem ser capazes de se conectar em qualquer lugar do sistema elétrico externo em qualquer período, sem impactá-lo, e desconectar sem afetar toda a operação.

1.2.4 – Variável, Intermitente e Despachável

As próximas definições e discussões seguem Souza Junior (2018). Muito se confunde sobre a natureza e o comportamento das tecnologias de produção de energia elétrica. No entanto, é preciso descrever e entender bem estes aspectos, pois afetam diretamente a operação dos sistemas. Há três denominações distintas: variável, intermitente e despachável.

Variabilidade é a propensão incontrolável a alterações significativas em determinado tempo. No caso de unidades de geração distribuída, isso significa que a produção muda o valor de sua saída em períodos específicos involuntariamente. Os intervalos considerados comumente são curtos, menos que alguns meses e geralmente dados em dias, horas e minutos. Isso se deve ao fato de que mesmo grandes hidroelétricas geram mais ou menos dependendo da época devido aos momentos chuvosos ou de seca e estiagem, independentemente de ações humanas. As energias solar fotovoltaica e eólica são exemplos variáveis, porque possuem perfis de produção que não são constantes mesmo em termos de minutos.

Intermitência é a tendência a sofrer interrupções não programadas. Algumas tecnologias, por ações ambientais ou externas sem intervenção humana, chegam a anular ou ficar muito próximas de zerar suas gerações em repetidas ocasiões. Mais uma vez os sistemas fotovoltaicos e eólicos são bons exemplos. Chegada a noite ou uma sombra suficientemente grande, as células fotovoltaicas são incapazes de produzir eletricidade. As turbinas eólicas não giram sem ventos ou quando estes possuem baixas velocidades e a geração fica igualmente estagnada. Todavia, quando o sol brilha novamente sem bloqueios e o ar se move com força, ambas as tecnologias retomam a produção normalmente.

A variabilidade e a intermitência estão presentes em diversas tecnologias. Apesar das coincidências, renováveis não são sinônimos destas duas propriedades. Há casos em que não ocorrem justaposições, tais como as grandes hidroelétricas. O que se deve atentar é para o tempo meteorológico e o clima, a geografia e a posição física. São estes itens que devem ser levados em conta na instalação dos sistemas de geração distribuída e no planejamento da microrrede quando da possibilidade destas duas características.

Em engenharia elétrica, em oposição à variabilidade e à intermitência, encontra-se o conceito de despachável. Um sistema deste tipo pode fornecer, sob controle, potência elétrica de maneira relativamente contínua, sem sofrer paradas inesperadas, e fixa, com valores uniformes no tempo. Isso quer dizer que a tecnologia despachável pode disponibilizar energia elétrica tanto quanto desejado ou necessário dentro de seus limites nos curto e médio prazos. Para isso, ou sua fonte primária é praticamente inesgotável nestes períodos, ou ela é integrada a sistemas de armazenamento que possibilitem este comportamento. Microturbina a gás e células a combustível são despacháveis, conquanto estejam com seus respectivos combustíveis assegurados. As energias solar fotovoltaica e eólica não são despacháveis. Porém, se interligadas a sistemas de baterias de capacidade suficiente para manter o fornecimento por um tempo razoável, considera-se, aqui, que os conjuntos podem ser denotados despacháveis.

Tecnologias variáveis e intermitentes podem ocasionar diversos problemas e saber integrá-las é vital para uma boa operação dos sistemas elétricos, especialmente com geração distribuída e microrredes (BOLLEN, HASSAN, 2011). Estas condições estão diretamente relacionadas às outras propriedades apresentadas. Flutuações de tensão (*flicker*) e de potência, elevações e quedas na tensão e mesmo repercussões na frequência podem ocorrer sob variabilidade e intermitência dependendo dos níveis, podendo levar à redução ou ao corte de produção, chamado "*curtailment*" (ETHERDEN, 2014; ETHERDEN, BOLLEN, 2011; SHIVASHANKAR *et al.*, 2016). Talvez uma das piores consequências seja a falta de previsibilidade que, consequentemente, afeta flexibilidade, confiabilidade, ligar-e-usar e par-a-par. Mais acentuadamente se a geração distribuída ou a microrrede estiver ilhada. Nesta situação, além da qualidade da energia sofrer redução drástica, a própria operação pode se tornar insustentável, pois a carga poderá sofrer de oscilações elevadas em tensão, corrente e frequência, isso quando não faltar energia, e os próprios controladores podem falhar parcial ou completamente. Na conexão, parte do problema é absorvido pela rede, mas ainda assim outros persistem.

Por essas razões, verifica-se que a presença de tecnologias despacháveis em geração distribuída ou microrrede que operam nos três modos de operação é inevitável. Neste trabalho, como será visto adiante, as unidades analisadas são despacháveis e o sistema de controle depende disso. Isso não quer dizer que dispositivos variáveis e intermitentes fiquem inviáveis. Ao contrário, tendo um recurso energético despachável com estratégia de controle adequada, é possível integrar estas outras tecnologias mitigando ou extinguindo as intercorrências.

1.2.5 – Inteligência

Uma outra característica é a da inteligência (VASQUEZ *et al.*, 2010). A noção aqui não é exatamente a da inteligência artificial, mesmo que seu instrumental esteja incluído nela. O que se quer dizer com inteligência em geração distribuída e nas microrredes é um conjunto de funções e ações que elas exercem por meio de suas técnicas de controles e outros componentes de tal forma que seu funcionamento seja automatizado com supervisão própria e independente, baseando-se sobretudo em seus próprios mecanismos, dados e informações, conseguindo resolver problemas. Geração distribuída e microrredes inteligentes estão habilitadas, em diferentes maneiras, portanto, a tomar decisões sozinhas, analisar sua conjuntura e agir sobre ela. Esta propriedade é categórica, porque estes sistemas não poderão ser administrados, em sua maioria, por seres humanos diretamente. Nem participações externas ininterruptas ou periódicas, nem a atuação de membros internos, que podem ser leigos e não treinados, são viáveis. Os sistemas devem ser capazes de perceber autonomamente as alterações danosas e, se possível, saná-las (DOE-USA, 2008). No modo ilhado, a inteligência se reflete no compartilhamento de potências (em microrredes), criação de referências adequadas, condicionamento para as cargas e manutenção da operação com entrada e saída de componentes. Nas transições, incluem-se a detecção de ilhamento (programado ou não), o desenvolvimento completo de sincronização e a escolha pela reconexão com sua execução ou não. Já estando conectada à rede, os sistemas de gerenciamento da geração distribuída ou da microrrede inteligente devem orientar, sem ou em coordenação com operadores humanos, as atividades como a transferência de energia, a regulação dos parâmetros, a otimização de processos, a integração econômica, os recursos sociais e ambientais, etc. (MENG *et al.*, 2016).

1.2.6 – Simplicidade e Complexidade

A simplicidade e a complexidade aqui ponderadas dizem respeito mormente aos sistemas de controle. Estas propriedades são importantes para tomadas de decisão, redução de custos financeiros e operacionais e velocidade nos processos. A complexidade de um projeto

está relacionada à diversidade de partes intrincadas e ao alto grau de conhecimento necessário para atuação (DORF, BISHOP, 2024). Ela também se dá pela divisão excessiva em camadas, pelo número elevado de interações e fatores envolvidos e por expressões matemáticas e códigos herméticos, de difícil resolução e compreensão. Na contramão, está a simplicidade. A técnica deve ser de fácil aplicação, a partir de equações elementares e programas claros, com possibilidade de ser empregada em várias áreas sem especialização excessiva, permitindo reprodutibilidade, baixos preços e acesso imediato. A simplicidade é almejável do ponto de vista da utilização, do processamento e da eficiência.

1.3 – Geração Distribuída e Microrredes: Sistemas Tecnológicos e Arquiteturas

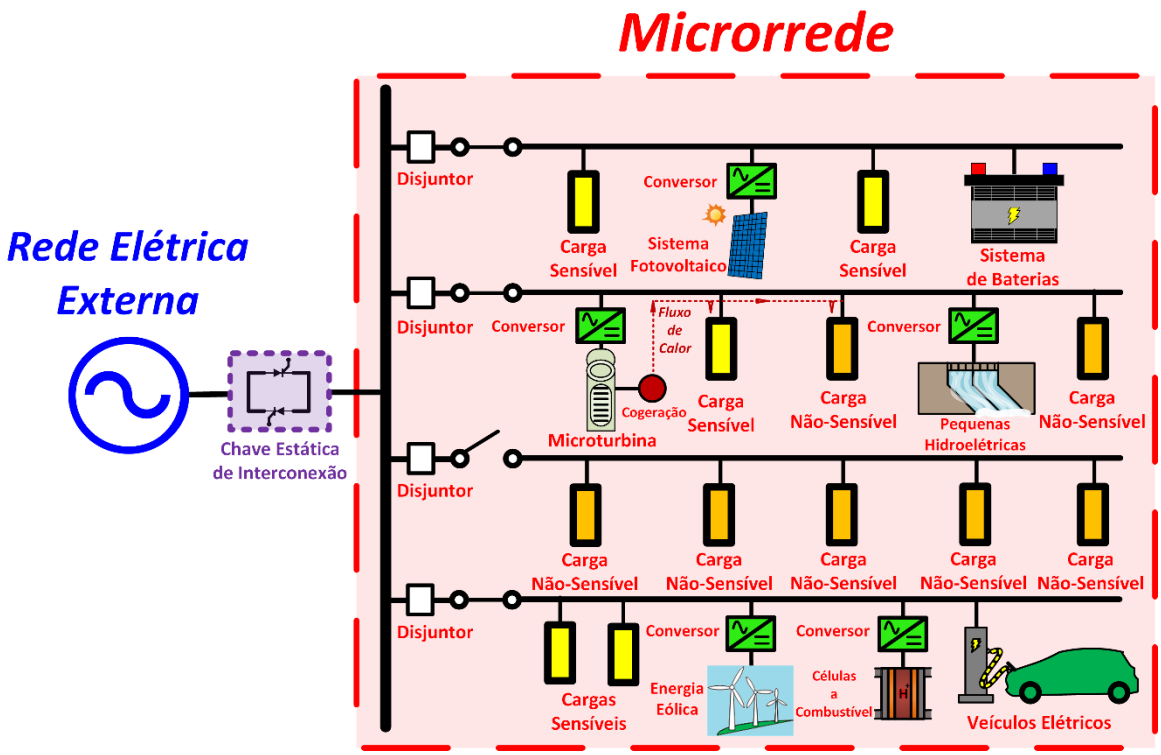
1.3.1 – Sistemas Tecnológicos

Como se observa, a geração distribuída e a microrrede estão inerentemente ligadas, não sendo possível dissociar a última da primeira, pois ela é sua base. Enfatiza-se: sem geração distribuída não há microrrede; ela é seu sistema tecnológico primordial. Não só, porém. Uma microrrede pode ter uma grande variedade de configurações. Todavia, seus componentes, com exceção da infraestrutura e da instalação elétrica intrínsecas (como cabos e possíveis linhas de comunicação), podem ser classificados em apenas seis categorias principais: além da geração distribuída, incluem-se dispositivos de armazenamento de energia, eletrônica de potência, cargas, proteção e cogeração. Uma estrutura típica pode ser vista na Figura 1.1. A seguir são apresentadas cada uma delas com mais detalhes.

Como as microrredes são sistemas elétricos completos, elas devem ser munidas de sua própria produção. As tecnologias de geração distribuída são as unidades que ocupam este posto, sendo elas de pequeno e médio portes (ACKERMANN, ANDERSSON, SÖDER, 2001; DUGAN, MCDERMOTT, 2002). O número é grande de opções encontradas no mercado e aplicáveis em microrredes, tais como sistemas fotovoltaicos, pequenas turbinas eólicas, células a combustível, pequenas hidroelétricas e pequenos geradores térmicos (em especial microturbinas) (JENKINS, EKANAYAKE, STRBAC, 2011; BOLLEN, HASSAN, 2011). São propriedades das diferentes fontes de geração distribuída: saídas CC ou CA, variáveis e/ou intermitentes ou despacháveis, renováveis ou não. A principal função delas é entregar potência ativa. Não obstante, com integração e implementação adequadas, as unidades de geração distribuída podem incorporar muitas outras vantagens. Com o fornecimento adicional de potência reativa e controle avançado, a microrrede e a rede que nela estiver conectada podem se beneficiar de aprimoramento da qualidade da energia, correção do fator de potência, redução

da distorção harmônica, provisão de serviços ancilares distribuídos, comércio de energia, entre outros (BARKER, MELLO, 2000; BOLLEN, YANG, HASSAN, 2008; PEPERMANS *et al.*, 2005; EL-KHATTAM, SALAMA, 2004).

Figura 1.1 - Estrutura típica de uma microrrede CA.



Fonte: Adaptada de (SOUZA JUNIOR, FREITAS, 2022b).

Os dispositivos de armazenamento de energia contribuem com o balanço energético e a postergação do consumo nas microrredes. Fazem algo similar com elementos de sistemas de geração distribuída individuais atrelados a cargas locais em ilhamento. Atuam também na mitigação dos efeitos de variabilidade e intermitência de algumas destas tecnologias e na estabilidade do sistema (MOHD *et al.*, 2008). O modo ilhado tem seus níveis de confiabilidade aumentados com a disponibilidade e gerenciamento da energia elétrica e o modo conectado ganha maior administração sobre a transferência com a rede, otimizando as oportunidades (KROPOSKI *et al.*, 2008). Assim como a geração distribuída, há grande variedade de dispositivos de armazenamento, podendo ser citados: as baterias, os supercapacitores, *flywheels*, ar comprimido e usinas hidroelétricas reversíveis ou de bombeamento (HADJIPASCHALIS, POULLIKKAS, EFTHIMIOU, 2009).

Já se falou sobre a eletrônica de potência com ênfase sobre os inversores. No geral, é ela interface de quase toda geração distribuída e quase todo armazenamento de energia. Isso

porque tais elementos têm saídas muito diversas e os conversores adéquam-nas para integrá-las às microrredes, às redes convencionais ou outros sistemas, mesmo na presença simultânea de máquinas elétricas rotativas. Devido às suas atribuições, permitem, além disso, melhorar desempenho, acrescentar funções e dar maior flexibilidade eficientemente (BLAABJERG, CHEN, KJAER, 2004; CARRASCO *et al.*, 2006). Seja inversor ou outro conversor, as estratégias de controle são embarcadas e executadas via eletrônica de potência (SOUZA JUNIOR, FREITAS, 2022a). Todos os processos de compartilhamento de carga, criação de referências, sincronização, transição suave, conexão e controle do fluxo de potências passam necessariamente pela condução dos conversores estáticos (COELHO, CORTIZO, GARCIA, 2002; DE BRABANDERE *et al.*, 2007a; ROCABERT *et al.*, 2012). É nítida a influência da eletrônica de potência na operação da geração distribuída e das microrredes.

O objetivo final de um sistema elétrico é abastecer seus consumidores com energia elétrica. Logo, a geração distribuída e as microrredes têm a mesma meta. Elas devem, normalmente, atender a todos os tipos de cargas elétricas que a elas se ligarem. Contudo, tecnologias inovadoras que são, possuem especificidades novas para este grupo. Uma é a diferenciação entre cargas sensíveis e não-sensíveis (KATIRAEI *et al.*, 2008). Como o ilhamento é limitado em termos energéticos, definem-se níveis de prioridade de alimentação das cargas. No primeiro caso, são aquelas em que o fornecimento não pode parar em qualquer circunstância, sendo críticas. Já no último, as cargas podem ser desligadas sem prejuízos maiores na ocorrência de diminuição de produção local ou interna. Recorrem-se a técnicas de redução de consumo e corte de cargas. No modo conectado, tais procedimentos são evitados com o complemento dado pela rede externa. Outro aspecto não usual das cargas unidas à geração distribuída e às microrredes é o maior controle sobre elas, com a aplicação de técnicas de gerenciamento do lado da demanda (DSM – *Demand Side Management*) (PARHIZI *et al.*, 2015). O consumo pode ser administrado em tempo real, além de ser monitorado, e incentivos podem ser dados para seu direcionamento.

Com a grande quantidade de mudanças que a geração distribuída e as microrredes trazem, os sistemas de proteção convencionais não são suficientes e, muitas vezes, não trabalham como deveriam. São exemplos de problemas para os dispositivos de proteção tradicionais: fluxo bidirecional de potência, níveis de curto-circuito limitados por inversores e diferentes modos de operação (CHOWDHURY, CHOWDHURY, CROSSLEY, 2009; LAAKSONEN, 2010; MEMON, KAUHANIEMI, 2015; BREARLEY, PRABU, 2017). Afora

as proteções internas da geração distribuída e da microrrede, que consideram suas próprias produções e cargas, os novos esquemas precisam considerar falhas com a rede e as transições.

Unida à produção, à distribuição e ao uso de eletricidade, pode ser atrelada a recuperação, a distribuição e o uso de calor por meio da técnica de cogeração, aumentando a eficiência da geração distribuída e da microrrede (BOLLEN, HASSAN, 2011; LASSETER, PIAGI, 2004). Para isso, o calor residual das fontes de energia elétrica, como pequenos geradores térmicos e células a combustível, pode ser reaproveitado nas proximidades, condição ideal nestes sistemas locais.

1.3.2 – Arquiteturas

Apesar de serem formadas essencialmente por meros seis componentes principais, uma das maiores transformações das microrredes é sua diversidade de arquitetura. A rede tradicional é extremamente rígida, com estruturas enormes, grandes usinas similares entre si e pouca ou nenhuma modularidade. As microrredes não estão sujeitas a estas configurações fixas. Pelo contrário, é provável que cada uma seja única em topologia e composição. Sem regras austeras de projeto, as microrredes serão elaboradas de acordo com as necessidades e desejos exclusivos de seus participantes. Elas serão construídas a partir de condições e particularidades locais, levando em conta não somente fatores técnicos, mas também sociais, ambientais, econômicos, geográficos, culturais, etc. Esta é uma modificação radical, uma revolução no setor de energia. O sistema elétrico será idealizado e organizado de baixo para cima e não o inverso, como convencionalmente se fez.

Esta diversidade de arquiteturas pode ser elucidada em alguns pontos. Primeiro, há muito mais escolhas de tecnologias de geração distribuída e de dispositivos de armazenamento do que havia antes (ELLABBAN, ABU-RUB, BLAABJERG, 2014; DIVYA, OESTERGAARD, 2009). Com fontes primárias de naturezas tão variadas e podendo ser instaladas em inúmeros tamanhos, capacidades e combinações, uma microrrede pode ser realizada considerando o que há de disponível na região e as condições financeiras e materiais de seus proprietários. Por suas características, a microrrede não precisa seguir fielmente seu planejamento por um amplo período, podendo ter ingresso e retirada de componentes e ser alterada ao longo do tempo, sendo um sistema altamente dinâmico na operação e fisicamente.

Tradicionalmente, o sistema elétrico de potência é reiteradamente em CA, as frequências são de $50\ Hz$ ou $60\ Hz$ e os níveis de tensão são padronizados, ocorrendo comumente de serem os mesmos em regiões distantes umas das outras no mundo. Nas microrredes, contando o que

já foi exposto mais as habilidades poderosas da eletrônica de potência de adaptação elétrica e os métodos de controle, existe uma ruptura nestas especificações elétricas intransigentes. Elas podem ter os mais variados níveis de tensão, frequência e potências instaladas e consumidas (desde que relativamente menor que a rede elétrica convencional) em estruturas radiais ou em malha. Podem ser CA, CC ou híbridas, monofásicas ou trifásicas (GUERRERO *et al.*, 2012b). Os parâmetros, quando no modo ilhado, podem ser especialmente designados para cada caso. Sendo assim, as microrredes poderão ter diferentes dimensões, topologias e arranjos. Há uma vasta versatilidade e flexibilidade. Deve se atentar, por isso, aos sistemas de controle a serem implementados. Isso exige uma abordagem universal, que seja compatível com as variadas tecnologias de geração distribuída e a diversidade das microrredes.

1.4 – Sistemas de Controle de Inversores para Geração Distribuída e Microrredes

O funcionamento da geração distribuída e das microrredes é muito mais complexo do que o dos sistemas tradicionais. Algumas das dificuldades podem ser mencionadas, justificando e ilustrando a relevância de boas práticas de controle: falta de supervisão humana direta, área reduzida de atuação, proximidade entre produção e consumo, fontes de naturezas distintas, intercâmbio entre modos de operação, compartilhamento automático de cargas entre conversores, maior suscetibilidade à instabilidade e fluxo de potência altamente variável, intermitente, volátil e bidirecional. Sobreponha-se a isso a simultaneidade de tarefas diferentes a serem cumpridas, a flexibilidade, a segurança e a confiabilidade. Compreender, elaborar e aplicar corretamente as estratégias de controle é crucial para a geração distribuída e as microrredes.

As técnicas de controle em microrredes são divididas em centralizadas e descentralizadas (ou distribuídas), sendo as principais variáveis de controle o nível de tensão, a frequência e as potências (correntes) (OLIVARES *et al.*, 2014). Ambas as classes podem ser mescladas, dependendo da configuração projetada. No controle totalmente centralizado, um único elemento, que pode ser uma unidade de geração distribuída, um dispositivo de armazenamento, uma carga ou um objeto independente, dará todos os comandos para o resto da microrrede, deliberando a partir de dados recebidos e guiando a operação. Fica claro que, para tal categoria, linhas de comunicação são imprescindíveis. Na classificação diametralmente oposta, cada entidade pertencente à microrrede decide por conta própria como agirá em cada momento baseando-se em medições locais, mas harmoniosamente, sem precisar trocar qualquer informação com os outros componentes, ou seja, com nenhuma comunicação. Alguns

diferenciam descentralizado, oposto ao centralizado, e distribuído, com mínima interação. Aqui, são considerados sinônimos. Por óbvio, um sistema de geração distribuída singular terá uma estratégia de controle própria, única e local, nem centralizada, nem descentralizada.

Tentando organizar e estruturar os controles das microrredes (em certa medida ações também aplicáveis à geração distribuída individual), propôs-se a perspectiva hierárquica, que separa em camadas cada parte dos controles (GUERRERO *et al.*, 2011). No nível zero ou interno, as malhas internas de controle de corrente e de tensão dos conversores são consideradas. O controle primário determina o controle fundamental da microrrede (geração distribuída) no modo ilhado, a criação de referências, o compartilhamento de potências e o paralelismo dos inversores. O controle secundário para uma microrrede CA opera na restauração dos parâmetros de tensão e de frequência pela correção de possíveis desvios. Por fim, o controle terciário trabalha na sincronização, na transição e no modo conectado à rede, além da ligação com outras unidades e microrredes, de fazer o controle do fluxo de potências, de congregar serviços ancilares distribuídos e de atuar na qualidade da energia e em aspectos sociais, econômicos e ambientais. Este último nível é o que mais interessa à presente pesquisa.

Especificamente sobre os inversores, podem ser distinguidas duas funções principais e uma adicional de controle para eles (ROCABERT *et al.*, 2012; KATIRAEI *et al.*, 2008). As primeiras são as de formadores de rede (*grid-forming*) ou de modo de controle de tensão (VCM – *voltage control mode*), unidades controladas em tensão, que têm como tarefa basilar gerar as referências de tensão e de frequência da geração distribuída ou da microrrede. Na sequência estão os seguidores de rede (*grid-following*) ou alimentadores de rede ou ainda de modo de controle de corrente (CCM – *current control mode*), unidades controladas em corrente, que usam (seguem) referências de tensão e de frequência advindas das unidades formadoras de rede ou da rede externa para injetar potência na microrrede ou no sistema interconectado. A adicional, pouco usual, é a de suporte de rede (*grid-supporting*), cujas saídas são controladas para manter a magnitude da tensão e a frequência na microrrede próximas de valores nominais, fazendo suas regulações. O estabelecimento do modo ilhado só ocorre se inversores formadores de rede forem empregados. No modo conectado, por sua vez, todos podem trabalhar como seguidores de rede, já que o sistema elétrico externo fornece as referências mandatórias. Tal observação se faz necessária tendo em vista que nos métodos de controle para transição suave e conexão à rede, as funções de controle influem na tática adotada. Existem propostas em que, para cada modo de operação, troca-se a função de controle do inversor. A estratégia de controle deste trabalho é fundamentada em unidades formadoras de rede.

Quando várias microrredes coexistirem e forem conectadas entre si nas futuras redes elétricas inteligentes, os controles deverão ter como propriedade o gerenciamento da troca de potência e informação entre elas (FARHANGI, 2009). Mercados de energia serão formados e a venda e a compra de excedentes poderão acontecer com as microrredes vizinhas. Todo este processo precisa ser confiável e seguro. A falha de uma microrrede não pode impactar as outras adjacentes, com perigo de um grande colapso.

1.5 – História, Desenvolvimento Atual e Futuro da Geração Distribuída e das Microrredes

Os primeiros sistemas elétricos de potência nasceram no fim do século XIX. Seus dispositivos de produção de energia elétrica podem ser considerados como geração distribuída "primitiva", apesar de não receberem na época esta alcunha. "Primitiva" aqui carrega o significado do dicionário, ou seja, é aquilo que é de "primeira origem", "dos primeiros tempos", "não derivado", "simples; rude" (FERREIRA, 2010); sobretudo em relação às suas novas versões, usadas hoje em dia. Em conjunto, por algumas de suas características, como porte reduzido, múltiplas unidades de produção e geração local próxima da carga, estes sistemas elétricos inaugurais completos também podem ser considerados como microrredes "primitivas". Os primeiros exemplos históricos evidenciam isso: iluminação elétrica em Paris, na França (1878) (BOWERS, 1982), sistema público de fornecimento de eletricidade de Godalming e Chesterfield, na Inglaterra (1881) (STRANGE, 1979), a Estação Pearl Street em Nova Iorque, Estados Unidos da América (1882) (HUGHES, 1983) e as instalações do setor elétrico de Berlim (1890), na Alemanha (KLINGENBERG, 1914). A geração distribuída e as microrredes modernas, em oposição às ditas "primitivas", ressurgem, no entanto, apenas no último quartil do século XX e início do século XXI. O progresso de uma levou à outra e seus caminhos se intersectam. Até então, consolidando-se por volta dos anos 1930, a evolução foi em sentido contrário, com aumento colossal das tecnologias de produção e da infraestrutura do setor elétrico em todas as direções.

Os motivos para o retorno da geração distribuída e das microrredes podem ser reunidos em três grupos: razões históricas, avanços científicos e tecnológicos e preocupações ambientais e sociais. Em primeiro lugar, alguns fatos históricos foram determinantes para a retomada da geração distribuída e das microrredes. A corrida espacial na Guerra Fria fez com que os Estados Unidos investissem pesadamente em fontes pequenas de eletricidade inovadoras para espaçonaves que foram adaptadas para o sistema elétrico terrestre, como as células a

combustível (LUECKEL, EKLUND, LAW, 1973) e os sistemas fotovoltaicos (JEWELL, RAMAKUMAR, 1988). A ideia de geração distribuída voltou, mesmo que discretamente, ao campo da energia. O que modificou mesmo o rumo do setor energético, entretanto, foram as crises de petróleo nos anos 1970 (HAMILTON, 2011). Vários países passaram a adotar tecnologias de produção de energia até ali alternativas, como as renováveis, e, no fim daquela década, o mesmo país norte-americano promulgou uma lei permitindo e encorajando a integração da geração distribuída na rede elétrica (GIDDENS, 2010; PURPA, 1978). No que diz respeito ao progresso tecnológico, são quatro as frentes. Como visto, a área de produção das microrredes é dominada pelas fontes de geração distribuída e energias renováveis, que se solidificaram e começaram a se expandir na esteira das crises do petróleo (SOUZA JUNIOR, 2018). Os semicondutores e os conversores da eletrônica de potência foram extremamente aprimorados na segunda metade do século XX (RASHID, 2014). Os sistemas UPS (*Uninterruptible Power Supply*), bastante pesquisados e desenvolvidos nos anos 1990, anteciparam os métodos de controle e os modos de operação (COELHO, 2000). É destaque ainda o avanço nas tecnologias de informação, comunicação, computação e automação. Pelo terceiro e último grupo de razões, houve um crescimento, ultimamente, da inquietação da comunidade global sobre os recursos sociais, econômicos e ambientais relacionados à energia elétrica. A exigência é maior, tendo vários imbróglios a serem resolvidos: acesso à eletricidade, redução de preços das tarifas, intensificação no uso de eletroeletrônicos, crise climática, poluição, desmatamento, entre tantos outros (FRIEDMAN, 2010). Estes são grandes incentivos para o sucesso amplo da geração distribuída e das microrredes modernas, vistas como plausíveis soluções convergentes de tantos problemas.

Tendo este pano de fundo, a geração distribuída pôde aflorar e se consolidar por todo o mundo, sobretudo no século XXI. Com seus vários benefícios, as investigações e os investimentos sobre estas tecnologias continuam intensos (SAXENA *et al.*, 2024). Considerando apenas a atualmente maior representante deste conjunto, a energia solar fotovoltaica, pode se notar que o crescimento é enorme e rápido. No ano 2000, sua capacidade global instalada era de $805\ MW$. Em 2010, ela já havia alcançado $38.795\ MW$, aumentando para $860.464\ MW$ em 2020 e chegando a $1.858.622\ MW$ em 2024. Em termos relativos ao total de renováveis no planeta, ela passou a representar de 0,1% em 2000 para quase 42% em 2024 num período de apenas 25 anos (IRENA, 2015; IRENA, 2025). Além das demandas ambientais e sociais, a tendência é que a expansão da geração distribuída continue, uma vez que os custos nivelados de energia de sistemas solares fotovoltaicos e eólicos ficaram menores

do que aqueles para os combustíveis fósseis recentemente (IRENA, 2024a). Com a forte e densa admissão da geração distribuída, o caminho natural parece ser a formação de microrredes e de forma ampla. Assim, as evoluções das duas tecnologias se cruzam e se confundem, tornando-as indissociáveis.

Por suas atribuições e disposições diversas, as microrredes se revelaram uma rica fonte de pesquisa, com tópicos abrangentes. Componentes, métodos de controle, gerenciamento de energia, técnicas de otimização, instrumentos de proteção, meios de comunicação, fatores econômicos são alguns deles (PARHIZI *et al.*, 2015). Também por sua diversidade, as microrredes encontram aplicações díspares: institucionais, escolares/universitários, da saúde, residenciais, comerciais, industriais, militares, comunitários, remotos e de concessionárias (HIRSCH, PARAG, GUERRERO, 2018). Pesquisas mais recentes contemplam até mesmo microrredes de bordo ou marítimas, com a eletrificação de embarcações, e microrredes espaciais, com sistemas elétricos para satélites e bases em outros planetas (GUERRERO *et al.*, 2016; LASHAB *et al.*, 2020).

Apesar da maioria estar em fase de testes, projetos de microrredes estão espalhados e em operação por todo o mundo. Pouco mais de um terço se concentra na região da Ásia-Pacifico e outro terço na América do Norte. Eles são seguidos, nesta ordem, por Oriente Médio e África, Europa e América Latina (HOLDMANN, ASMUS, 2019). Dados do início de 2022 mostram que a capacidade de potência instalada de microrredes em todo o planeta era de aproximadamente $5\,GW$, sendo o gasto com implementação atingido no mesmo período de cerca de 10 bilhões de dólares (GUIDEHOUSE, 2022a). Grande parte se dá em áreas remotas, sem nenhuma conexão com uma rede elétrica (*off-grid*). Em 2023, o número de pessoas que se beneficiava com microrredes solares deste tipo era de aproximadamente 5,8 milhões (IRENA, 2024b).

O que se prevê para os próximos anos é a adesão maciça das microrredes. Sendo um meio eficaz de integrar as unidades de geração distribuída e fontes renováveis, seu potencial é gigante. Elas devem seguir uma trajetória proporcional por esta dependência, podendo se supor uma tendência de crescimento rápido, pois as renováveis sozinhas tiveram um aumento total de capacidade instalada no mundo de $1{,}851\,TW$ para $4{,}448\,TW$ entre 2015 e 2024 (IRENA, 2025). Com efeito, prevê-se que microrredes que usam estas fontes passem de uma capacidade de $4{,}289\,GW$ em 2022 para $20{,}054\,GW$ em 2031 (GUIDEHOUSE, 2022b). As microrredes ainda facilitam a introdução de outras técnicas e tecnologias modernas do setor de energia, o

que estimula suas construções. Fora isso, podem ser contabilizados os alcances benéficos na sociedade e no meio ambiente, que reforçam a aceitação das microrredes.

Acredita-se, por isso, que as microrredes, conglomerando as tecnologias de geração distribuída, serão instaladas aos montes e terão múltiplas conexões entre si, principalmente nos meios urbanos, onde a população está mais concentrada. Elas terão características mais e mais avançadas, como maior autonomia, robustez e inteligência. Tal aglomeração de sistemas de geração distribuída e microrredes inteligentes dará formação às futuras redes elétricas inteligentes (FARHANGI, 2009). Esse modelo será o substituto do sistema elétrico tradicional, incorporando fortemente informação digital, controles dinâmicos, processos otimizados, autorrestauração, autorregulação, monitoramento em tempo real, recursos distribuídos de energia, comunicação veloz, entre outros (DOE-USA, 2008; AMIN, WOLLENBERG, 2005).

1.6 – Brasil, Geração Distribuída e Microrredes

No que diz respeito brevemente ao panorama brasileiro, a opinião pública é clara sobre a contínua expansão da geração distribuída e há sinais proeminentes para a futura adoção das microrredes em todo o território nacional. Uma pesquisa de 2020 no país mostra que, sobre a energia elétrica, 84% dos entrevistados achavam caro ou muito caro o seu preço, 63% trocariam a empresa de fornecimento e 90% gostariam de ter sua própria geração (IBOPE INTELIGÊNCIA, 2020). Estes dados revelam como é favorável o quadro geral para estas duas tecnologias entre os cidadãos brasileiros.

O progressivo uso de eletricidade e a composição da matriz energética brasileira também são cruciais aqui. De acordo com o Balanço Energético Nacional de 2024 (ano base 2023) da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), houve aumento de 4% no consumo final de eletricidade entre 2022 e 2023, enquanto 89,2% foi a participação das renováveis na matriz elétrica brasileira naquele último ano e 68%, indo de $18.423\ GWh$ para $30.950\ GWh$, foi o aumento da energia advinda da geração distribuída entre as fontes no mesmo período (EPE, 2024). Em 2024, a capacidade instalada de geração distribuída era de $36.169\ MW$ de potência, sendo 3.203.269 o número de sistemas, totalizando 4.800.361 consumidores, com investimentos acumulados em R$ 132,295 bilhões (EPE, 2025).

Devem ser mencionados ainda os programas de promoção de acesso à eletricidade de diferentes governos do Brasil, atuação suprapartidária, ao longo dos anos recentes, com ênfase muitas vezes em áreas remotas, como na Amazônia, sendo eles: “Programa Luz para o Campo” (2000), “Luz para Todos” (2003) e “Mais Luz para a Amazônia” (2020). Finalmente, vale

também destacar, sem entrar em detalhes, a legislação brasileira que trata de geração distribuída e de microrredes (direta ou indiretamente). A Resolução Normativa (REN) Nº 482 de 2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (ANEEL, 2012) foi a primeira a tratar sobre a integração da geração distribuída à rede de distribuição, entre outros tópicos, e permitir este tipo de conexão no sistema elétrico brasileiro, incluindo o sistema de compensação. A mesma foi alterada e atualizada pela REN Nº 687 de 2015 da ANEEL (ANEEL, 2015). Em 2017, novas alterações com a REN Nº 786 de 2017 da ANEEL (ANEEL, 2017). Já a REN Nº 1.000 de 2021 da ANEEL (ANEEL, 2021) estabeleceu as disposições sobre o serviço da distribuição. A Lei Nº 14.300, de 6 de Janeiro de 2022, por seu turno, instituiu o marco legal da geração distribuída (BRASIL, 2022). Note-se que as duas últimas tratam textualmente de microrredes. A regulamentação desta tecnologia, todavia, ainda se encontra ausente. Por fim, a REN Nº 1.059 de 2023 da ANEEL alterou e atualizou as regras para conexão, faturamento e compensação da geração distribuída, em conformidade com o marco legal (ANEEL, 2023).

A geração distribuída está consolidada no Brasil. Desde os primeiros estabelecimentos com conexão à rede em 2012 até os dias de hoje, o aumento, como os dados mostraram, é impressionante. É um desejo quase unânime de adesão a estes sistemas e o progresso regulatório e legislativo tem colaborado para o ingresso de mais unidades. A integração ainda é uma questão em aberto, com desafios pela frente. No entanto, sendo superados, a geração distribuída só tende a crescer no país. De fato, a previsão referência do Plano Decenal de Expansão de Energia 2034 do Ministério de Minas e Energia (MME) do Brasil com o EPE é que, em 2034, o número de adotantes de geração distribuída seja de 7,2 milhões, com potência instalada de $58{,}8\ GW$ e investimentos entre 2024 e 2034 de R$ 116,6 bilhões (MME, 2024).

Não se pode dizer, embora a expectativa seja auspiciosa em termos potenciais, que o Brasil, por sua vez, está preparado para as microrredes. Os sistemas em operação nas regiões remotas e em áreas rurais são do tipo isolado e nas cidades, em residências, comércios e indústrias, o que se encontra são instalações conectadas à rede de unidades singulares de geração distribuída funcionando com métodos de anti-ilhamento, mas nenhuma forma uma microrrede de fato, com múltiplas unidades de geração, controles avançados e possibilidade de trabalhar em modos ilhado e conectado à rede. Os projetos de microrredes modernas no Brasil permanecem concentrados nos meios acadêmicos e universitários, realizados predominantemente em laboratórios para pesquisas ou em estruturas experimentais (BELLIDO, 2018). Mais ainda, a legislação brasileira, exceto em casos essenciais e críticos como hospitais, ainda não permite a operação no modo ilhado. Há, com efeito, muitos entraves jurídicos, além

deste, relacionados às microrredes (MATEUS, 2024). Se se quer a aderência das microrredes no país, é preciso criar um ambiente suscetível, em que diretrizes sejam dadas, incentivos sejam fornecidos e as pessoas reconheçam e aceitem conscientemente estas tecnologias. O prognóstico positivo brasileiro esbarra, portanto, em desafios institucionais, regulamentares, financeiros e de conhecimento.

1.7 – Sistema Elétrico, Geração Distribuída e Microrredes

Os impactos da geração distribuída e das microrredes na rede elétrica convencional são e serão sentidos em todas as suas áreas. Para mencionar alguns. No lado da geração, serão dominantes as unidades de geração distribuída e as fontes renováveis no lugar das grandes e ambientalmente degradáveis usinas tradicionais (GUERRERO *et al.*, 2010). O sistema de distribuição passará a ser ativo e não mais passivo, ou seja, não será mais um mero desaguadouro de eletricidade de poucas manobras (DJAPIC *et al.*, 2007). Por fim, o consumo, facilitado pela aliança com a geração distribuída e pelas microrredes, adquirirá novos modelos de funcionamento como DSM, infraestruturas avançadas de medição (AMI – *advanced metering infrastructures*), controle direto de carga e veículos elétricos *plug-in* (IPAKCHI, ALBUYEH, 2009).

Os impactos técnicos da geração distribuída e das microrredes nos sistemas elétricos dependem de como são realizadas as conexões entre eles. Se feita de forma inadequada, com controles indevidos e sem planejamento apropriado, a rede elétrica tradicional pode afetar e ser afetada pelas duas tecnologias. Isso já é comum na integração de geração distribuída, oferecendo lições importantes aqui também para as microrredes (BOLLEN, HASSAN, 2011; BARKER, MELLO, 2000; BOLLEN, YANG, HASSAN, 2008). Da mesma forma que com a geração distribuída, porém, se a microrrede for bem estruturada, os benefícios praticamente eliminarão qualquer prejuízo. Tais impactos estão relacionados mormente ao fluxo de potências, à qualidade da energia e aos serviços ancilares que, por seu turno, estão interligados.

Com a inserção da geração distribuída e das microrredes, o fluxo de potências se altera intensamente na rede de distribuição onde elas são ligadas. Certas atribuições denotam isso claramente: maior dinâmica, bidirecionalidade e múltiplas pequenas unidades de produção atuando juntas. Adicionalmente, poderão ser feitas exportações e importações de energia ou nenhuma delas. No caso da microrrede, ora ela, como um todo, age como carga, ora ela é uma fonte para a rede externa (LASSETER *et al.*, 2002a). Surgem questões sobre este fluxo de potências, especialmente se ele for controlável. Por quem e como ele deve ser administrado,

por exemplo, se por um operador da distribuição, membros internos ou automaticamente. Normalmente, supõe-se que os dois últimos casos serão dominantes. Com isso, os proprietários de geração distribuída e os participantes das microrredes determinarão critérios técnicos, econômicos, sociais e ambientais próprios para o gerenciamento do fluxo de potências que precisarão estar em harmonia com a distribuição para evitar falhas (STADLER, 2016). Todas estas ações exigirão mudanças na regulamentação (MARNAY *et al.*, 2008). Outro ponto é que parte das tecnologias de geração distribuída (às vezes, múltiplas e concentradas em microrredes) podem ser variáveis e intermitentes, tendo produção flutuante e faltando previsibilidade. Conceitos como capacidade de hospedagem precisarão ser explorados para amenizar as oscilações (ETHERDEN *et al.*, 2015; ETHERDEN, BOLLEN, 2011). Diante de tudo isso, o sistema elétrico com profusão de sistemas de geração distribuída e microrredes estará sujeito a problemas inéditos sobre o fluxo de potências, exigindo-se o emprego de modificações e novas ferramentas de análise (LI *et al.*, 2017; ABDI, BEIGVAND, LA SCALA, 2017), bem como métodos aprimorados para planejamento e otimização (KEANE *et al.*, 2013; TIMBUS, LARSSON, YUEN, 2009).

A qualidade da energia, enquanto produto, se refere aos índices de desempenho dos parâmetros elétricos de um sistema, como tensão, corrente e frequência, ao longo do tempo. Busca-se reduzir ou eliminar desvios, cuja origem são diferentes fenômenos, daquilo que se tem como ideal (BOLLEN, 2002; DUGAN, MCGRANAGHAN, BEATY, 1996). Em sistemas de geração distribuída com carga local e microrredes ilhados, como ocorre autonomia completa, todo problema de qualidade é fruto dos componentes internos. Por serem estruturas pequenas e limitadas e que geram suas próprias referências e controlam todo o deslocamento das potências, elas são suscetíveis a maiores erros do que no modo conectado. As variações são maiores e a estabilidade fica mais ameaçada (BOLLEN *et al.*, 2009). Soma-se a isso a diversidade de fontes de geração distribuída e de arquiteturas de microrredes, que impede grandemente a proposição de uma orientação normativa universal para ilhamento. Na conexão, as características elétricas são impostas pela rede externa e a qualidade do sistema local será maior ou igual à dela, com menos variações. Se o sistema elétrico for robusto, ele servirá como forte apoio nessa direção. Se a transição for suave, os requisitos de qualidade serão cumpridos. Agora, no modo conectado, o impacto é mútuo entre os sistemas. Um pode emitir ao outro distorção harmônica, desequilíbrios, flutuações e trocas de reativos indesejados (MICALLEF, 2018). Os benefícios são, no entanto, também mútuos. Se métodos de controle adequados são aplicados, há a manutenção da qualidade da energia. Se técnicas especiais forem utilizadas, a qualidade geral

pode ser melhorada (FENG *et al.*, 2016). Sobre a qualidade da energia como serviço, um sistema de geração distribuída e uma microrrede são garantias da elevação da confiabilidade, em virtude da mudança de modos de operação e do ilhamento (BOLLEN, ZHONG, LIN, 2009). Se a transição é suave, esta troca pode ser feita em instantes e a qualquer momento, seja ela por precaução, seja ela por desejo, permitindo que os proprietários da geração distribuída local e os usuários das microrredes estejam continuamente recebendo eletricidade com menor ou nenhuma interrupção.

Serviços ancilares são aqueles, de controles de tensão e de frequência, que são oferecidos e fornecidos por integrantes de uma rede elétrica para seu operador, em oposição aos serviços de sistema (REBOURS *et al.*, 2007a, 2007b). Uma unidade de geração distribuída ou uma microrrede conectada pode prover e executar serviços ancilares. Isso através de controladores avançados e do gerenciamento do fluxo de potências entre os dois sistemas. A lista de serviços ancilares para geração distribuída e microrredes é extensa e inclui nivelamento de carga, suporte de potência reativa, reserva de potência, função de reserva e estabilização e suavização do fluxo de potência (SILVEIRA JUNIOR, 2021). É preciso criar incentivos para que os excedentes de energia de sistemas de geração distribuída e de microrredes sejam empregados na obtenção de serviços ancilares e não que eles sejam apenas comercializados de acordo com o mercado de eletricidade e entregues na forma de potência ativa, o que pode ser uma oportunidade perdida (PRODANOVIC, 2007).

1.8 – Sociedade, Economia, Geração Distribuída e Microrredes

A geração distribuída e as microrredes, como quaisquer outras tecnologias, impactam os meios sociais e econômicos em que estão envolvidas e são impactadas por eles. Muitas das vezes, os aparatos técnicos são tidos como objetos isolados ou, ao menos, como instrumentos alheios às consequências para a humanidade que não aquelas de suas funções básicas. Os engenheiros, os técnicos, os pesquisadores, os estudantes e os professores precisam ter consciência crítica sobre os elementos em questão. Devem estar cientes e serem responsáveis sobre os resultados obtidos do uso de um determinado dispositivo e não se restringirem às implicações puramente técnicas. O passado já deu lições em demasia sobre as aplicações indevidas e, reiteradamente, maléficas que as tecnologias podem proporcionar. Portanto, dá-se, neste trabalho, uma pequena contribuição sobre os efeitos que a geração distribuída e as microrredes têm sobre a sociedade e sobre a economia e vice-versa. Na seção seguinte, algo similar é realizado para o meio ambiente.

Uma forma interessante e unificadora de se compreender este envolvimento social e econômico da geração distribuída e das microrredes é sob o contexto do desenvolvimento sustentável. Originalmente, este é definido como o desenvolvimento que atende as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações de atenderem suas próprias necessidades (WCED, 1987). Tendo este conceito como premissa, as duas tecnologias precisam progredir buscando prosperidade econômica, erradicação da pobreza e da fome, redução das desigualdades, maior equidade, justiça social, saúde, bem-estar, geração de empregos, educação de qualidade, igualdade de gêneros, consumo e produção responsáveis e mínima degradação ambiental. Tais princípios podem nortear os projetos de geração distribuída e das microrredes. Eles são alguns dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) enunciados na Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU). De fato, tais sistemas são ideais, se bem utilizados, para se alcançar diretamente o ODS de número 7, sobre energia limpa e acessível, que visa "assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todas e todos" (ONU, 2015).

O primeiro dos problemas que a geração distribuída e as microrredes podem enfrentar é o da falta de acesso à eletricidade. A humanidade vive uma contradição em relação a isso, com grandes desigualdades. O consumo cresce avassaladora e continuamente em todo o globo, indo de $7.323\,TWh$ em 1980 para $27.081\,TWh$ em 2023 (valores líquidos), sendo que mais da metade se dava apenas nos 5 países mais ricos e $8.928\,TWh$ e $4.085\,TWh$ vinham somente da China e dos Estados Unidos da América, respectivamente (EIA-USA, 2025). Havia, porém, no mundo, em 2022, 685 milhões de pessoas que não tinham qualquer acesso à eletricidade, cerca de 9% da população do planeta (ESMAP, 2024). A instalação e implementação flexíveis de unidades de geração distribuída e de microrredes permitem que elas sejam difundidas muito mais rapidamente e com recursos financeiros menores entre estas pessoas que não tem a disponibilidade ou proximidade com as redes elétricas. A construção de grandes usinas e sistemas de transmissão é extremamente custosa e demora períodos enormes até o início das operações, fatores impeditivos para muita gente ter acesso à eletricidade. É previsto, contudo, que, com os preços caindo e investimentos sendo realizados sobre as tecnologias, as microrredes com geração distribuída, em um total de 210 mil unidades, poderão alcançar 490 milhões destas pessoas vulneráveis em áreas remotas de maneira mais barata e melhor custo-benefício até 2030 (ESMAP, 2019).

Não se pode pensar que as vantagens sociais e econômicas se restringem às pessoas de regiões sem energia elétrica. Elas aparecem igualmente para aqueles que já estão integrados às

redes de distribuição, como em centros urbanos. As tecnologias de geração distribuída e as microrredes podendo trabalhar no modo ilhado quando necessário ou mesmo desejado, tornando a se reconectarem quando convir, fazem os níveis de confiabilidade serem elevadíssimos. Assim, seus usuários poderão realizar suas atividades com praticamente nenhuma interrupção não programada de fornecimento de eletricidade. O mesmo se dá com a qualidade do produto, cujos índices podem ser aprimorados pelos dispositivos usados e pelas estratégias de controle. Isso resulta em menores danos aos equipamentos eletroeletrônicos dos membros dos sistemas de geração distribuída e da microrrede (HATZIARGYRIOU *et al.*, 2007). Além do mais, estas tecnologias, por integrarem diversos avanços no setor de energia, seja com técnicas modernas, seja com dispositivos inovadores, podem impulsionar maiores investimentos na rede elétrica, que se mantiveram constantes em torno de 300 bilhões de dólares anuais entre 2012 e 2021, melhorando seu desempenho, além de agilizar o processo de digitalização da infraestrutura energética (IEA, 2022b).

No campo econômico, para geração distribuída e microrredes conectadas ao sistema elétrico ou ligadas entre si, um ganho evidente é a criação de novos mercados de eletricidade. Como isso ocorre? A primeira já possui um sistema econômico conhecido e bastante empregado com a venda de energia no mercado livre, os leilões, a tarifação *net metering* (compensação, crédito pelo excedente, diferença da geração e do consumo), a tarifação *feed in* (pagamento em preço fixo, premiação pela potência injetada ou gerada por fonte alternativa), o pagamento por energia em tempo real, entre outras formas de comércio e trocas de energia elétrica produzida localmente (VILLALVA, GAZOLI, 2012). As microrredes, pelas especificidades e pela novidade, merecem um detalhamento e uma discussão maiores (válidas em parte também para sistemas de geração distribuída). Elas podem ser de propriedade de seus próprios membros, os consumidores finais ou uma cooperativa dos participantes, de operadores da distribuição, de produtores independentes de energia ou de fornecedores de energia em mercado livre (HIRSCH, PARAG, GUERRERO, 2018). Os direcionamentos econômicos da microrrede podem ser escolhidos, basicamente, entre dois: o máximo da energia elétrica produzida deve suprir a demanda interna, reduzindo os custos operacionais, ou pode haver participação no mercado aberto, negociando potências ativa e reativa pela rede externa visando maximização de lucros (TSIKALAKIS, HATZIARGYRIOU, 2011). Outros meios de comercialização via microrredes, no entanto, também podem ser mencionados. Um deles é o do DSM, pelo qual pode se ter controle direto da carga ou pelo preço em tempo real de energia, levando a ganhos econômicos para os consumidores que assim aderirem a este tipo de programa (PARHIZI *et al.*,

2015). Outro é igualmente inovador na dimensão das microrredes, adequado para geração distribuída, e envolve os sistemas de controle, que permitirão que o gerenciamento de potências trocadas com o sistema elétrico interconectado seja feito visando qualidade da energia e aprimoramento de desempenho geral, contando com provisão de serviços ancilares, tudo isso valorizado economicamente (HIRSCH, PARAG, GUERRERO, 2018). Quando muitas microrredes forem conectadas umas às outras, poderá acontecer a realização de mercados locais de energia nas vizinhanças (STADLER, 2016). Por último, podem ser consideradas externalidades, aspectos sociais e ambientais, internalizadas nos valores econômicos, como para redução da emissão de gases do efeito estufa.

Dentre as ações socioeconômicas contempladas pela geração distribuída e pelas microrredes está o combate ao desemprego. A diversidade de estruturas e componentes, além das múltiplas atividades relacionadas, com certeza agregará ainda mais empregos a estas tecnologias. Projeto, instalação, manutenção, supervisão, comércio e análise são algumas das áreas em que se pode trabalhar com microrredes, assim como acontece com geração distribuída. As fontes renováveis, parcela significativa da geração distribuída e integrantes das microrredes, dão bons sinais neste sentido. Em 2023, estavam empregadas 16,2 milhões de pessoas direta e indiretamente no setor de energias renováveis em todo o mundo, número que vem crescendo a cada ano (IRENA, OIT, 2024). A previsão é de que, somente nos Estados Unidos da América, serão criados quase 500 mil novos empregos (diretos, indiretos e induzidos) devido às microrredes até 2030 (GUIDEHOUSE, 2021).

Um ponto interessante de se discutir e entrando na arena política além da econômica, é a do poder de mercado. As redes de distribuição de energia elétrica formam monopólios naturais, quer dizer, uma única empresa detém todo um mercado por ofertar um bem ou serviço, no caso o suprimento de eletricidade, com preço menor que duas ou mais empresas (MANKIW, 2013). O consumidor claramente fica em desvantagem, pois não pode escolher seu fornecedor, não pode determinar sua fonte de energia e ainda precisa pagar um único preço que lhe é imposto e que pode ser elevado. As microrredes enfraquecem este poder. As tecnologias de geração distribuída já fazem isso, individualizando a detenção dos meios de produção de energia elétrica; as microrredes ampliam este propósito, socializando localmente a geração de energia elétrica. No máximo, os donos da produção estarão ligados intimamente àqueles que não possuem estes meios, dando maior autonomia social e econômica e poder de barganha aos usuários, com presumível redução dos preços.

Na esfera política, há várias questões a serem debatidas e observadas sobre a geração distribuída e as microrredes. Elas podem ser divididas, sem grande rigidez, em três abordagens: assimilação, papel do Estado e participação democrática e ativa. Pela primeira, as tecnologias devem ser conhecidas, precisam ser devidamente regulamentadas por leis e normas para adentrar o sistema elétrico ou serem instaladas em áreas remotas ou rurais e aceitas. A geração distribuída já está bem assentada nesses sentidos em grande parte do planeta e mesmo aqueles países com pouca adesão podem aprender rapidamente com as experiências de outros. Porém, poucas pessoas sabem ainda o que é uma microrrede elétrica. Pesquisa recente mostrou que, em outubro de 2021 nos Estados Unidos da América, 68% da população tinha pouca ou nenhuma familiaridade com o conceito de microrredes (LRP, 2021). É necessário dar mais informações sobre o assunto. Em termos legais, faltam orientações e regras que possam nortear os que querem trabalhar com microrredes, o que gera grandes incertezas, principalmente pelas novas funcionalidades destas tecnologias (MARNAY *et al.*, 2008). Enquanto existe um preparo razoável para a geração distribuída, as concessionárias e distribuidoras se opõem ou resistem à entrada de microrredes em seus sistemas temendo os efeitos vindouros. Ora, sua integração correta pode trazer benefícios para todos, além de que modernizarão a rede elétrica com poucos investimentos adicionais e poderão ser mais um espaço de atuação destas empresas (HIRSCH, PARAG, GUERRERO, 2018). Já os agentes privados citam como barreiras a instabilidade política, o acesso ao financiamento, falta de incentivos e políticas para as tecnologias renováveis e capacidade de pagamento dos consumidores (NREL, 2020).

Tendo um ambiente favorável, para além das atuações legislativa e jurídica garantidoras e propagação de conhecimento, o Estado pode ser fundamental na adoção, integração e expansão da geração distribuída e das microrredes. O Estado pode ser um agente extremamente inovador, investindo e tomando os maiores riscos para novas e radicais tecnologias que o setor privado evita com medo de falhar. O setor público não só é o maior financiador de pesquisa e desenvolvimento (P&D) em larga escala e que visa o longo prazo, como pode criar mercados novos e dinâmicos e não se restringir apenas a dar incentivos (MAZZUCATO, 2014). É o caso propício da geração distribuída e, sobretudo, das microrredes, que merecem atenção especial dos governos para estudos, subsídios, investimentos diretos, promoção e produção de informação. O Estado precisa, em linha com as ações sobre as mudanças climáticas, ser assegurador, buscar convergências políticas e econômicas e garantir transcendência política (GIDDENS, 2010). O que significa isso para a geração distribuída e as microrredes? Primeiro, os governos devem monitorar os objetivos públicos e tentar consolidá-los de maneiras

transparente e aceitável. Ou seja, se há vontade pela implementação das tecnologias, o Estado precisará auxiliar os grupos sociais envolvidos e certificar-se da conclusão de seus projetos. Segundo, devem ser compatibilizadas as ações com estes sistemas com outras das áreas políticas e econômicas sem relação direta, mas, por vezes, simbiótica. Por exemplo, microrredes formadas por unidades de geração distribuída como sistemas fotovoltaicos, energia eólica ou células a combustível reduzem drasticamente a poluição, o que leva à diminuição de várias doenças e melhora a saúde pública, ao mesmo tempo em que aprimoram atividades comerciais, sem contar a redução dos impactos climáticos. Finalmente, as políticas voltadas para o desenvolvimento da geração distribuída e de microrredes, se assim entendido pela população democraticamente, devem ser pauta definitiva da agenda pública, que independam de partidos ou governos no poder, permanecendo mesmo com mudanças na administração. O Estado ainda se revela importante nas políticas econômicas anticíclicas e estas tecnologias podem ajudar na retomada do crescimento. Em momentos de crise, os governos podem aumentar seus gastos para combater recessões e depressões econômicas. Dentre as políticas fiscais para superar a redução da demanda agregada, de linha keynesiana, estão as obras públicas e o investimento governamental em infraestrutura com seus fortes efeitos multiplicadores (KEYNES, 1983; KEYNES, 1978; SAMUELSON, NORDHAUS, 2012). Pela sua essência, o Estado poderia construir ou, ao menos, subsidiar intensamente microrredes com unidades de geração distribuída, o que reativaria o mercado de forma estável e geraria muitos empregos temporários e duradouros, alavancando a economia.

A relevância política das microrredes com geração distribuída se dá pelo Estado, mas também pelo poder da comunidade em geral. Enquanto no passado os sistemas elétricos de potência eram desenhados de cima para baixo, das grandes usinas até os vários pequenos consumidores, com a geração distribuída e as microrredes o processo é revertido. Na rede elétrica tradicional, a distância dos componentes de produção e dos elementos de operação e controle, a falta de qualquer decisão sobre a construção e o funcionamento e o desconhecimento acerca da estrutura e das opções fizeram do setor de eletricidade algo não participativo. As microrredes democratizam o sistema elétrico ao se direcionarem naturalmente em sentindo inverso destas atribuições. Seus membros podem escolher como elas serão montadas e como elas trabalharão, quais fontes empregam e como seguirá o seu consumo. Cada mudança pode ser discutida livre e localmente, por todos os integrantes, independentemente das características pessoais de cada um. A geração distribuída e as microrredes são, além do mais, sistemas adequados às necessidades e às condições locais e às vontades de seus participantes. Com efeito,

elas podem ser entendidas como tecnologias apropriadas ou intermediárias. Em outras palavras, elas são tecnologias para desenvolvimento das massas pelas massas, nem primitivas, nem altamente complexas e caras, compatíveis com o ecossistema, de acessibilidade maior, sustentável e projetadas para servir o ser humano e não o contrário (SCHUMACHER, 1999).

Na Educação, a geração distribuída e as microrredes podem contribuir viabilizando o acesso à energia elétrica pelo corpo escolar e melhorando e modernizando a infraestrutura elétrica das instituições de ensino. Com eletricidade, especialmente em regiões isoladas, diversos recursos para os estudos e para o bem-estar de alunos, professores e trabalhadores da educação podem ficar disponíveis. Luz, água, refrigeração e outros aparelhos eletroeletrônicos complementam a vida escolar substancialmente, dando dignidade e novas oportunidades de conhecimento. Outro atributo que pode ser proporcionado pela energia elétrica advinda destas tecnologias é o acesso aos meios digitais, trazendo elementos contemporâneos para o aprendizado e permitindo a conexão e a integração dos alunos com o restante do mundo (IRENA, 2022b). Demonstrações destas já foram feitas em escolas urbanas com unidades de geração distribuída renováveis instaladas nos próprios edifícios. Testes de até uma semana inteira em modo ilhado levaram a resultados satisfatórios, com suprimento contínuo de energia elétrica (KROPOSKI *et al.*, 2008; KOJIMA, 2007). A maioria dos campi universitários têm configurações ideais para a implementação de microrredes e estas resolvem a maior parte dos problemas concernentes ao fornecimento e uso de eletricidade nestes lugares, evitando interrupções nas aulas e em outras atividades. A arquitetura dos edifícios e espaços públicos das universidades são favoráveis à instalação de tecnologias de geração distribuída apropriadas. As microrredes cortam gastos, são sustentáveis, eficientes e robustas. As faculdades também são benéficas ao próprio desenvolvimento da geração distribuída e das microrredes, pois podem funcionar como grandes laboratórios com vastos recursos intelectuais inseridos para pesquisa destas tecnologias e oportunidades para os estudantes (SHAHIDEHPOUR, KHODAYAR, 2013; WASHOM, 2013).

1.9 – Meio Ambiente, Geração Distribuída e Microrredes

Assim como ocorre com a sociedade e com a economia, o meio ambiente está diretamente vinculado ao uso da geração distribuída e das microrredes, com as condições de um afetando o outro, positiva ou negativamente. Os efeitos destas interações estão nas mudanças climáticas, na poluição em suas diferentes formas, no desmatamento, no descarte de materiais, na disponibilidade de recursos naturais escassos, entre outros. Esboça-se aqui um

pouco de como acontecem os impactos ambientais destas tecnologias e de como elas podem ser uma boa solução para muitos destes problemas.

O setor energético ainda é causador de vários danos ambientais. Em 2019, o setor de suprimento de energia foi responsável por cerca de 34% das emissões líquidas de gases do efeito estufa devido às atividades humanas (IPCC, 2022a). Especificamente, a geração global de eletricidade e de calor teve, em 2022, um número recorde nas suas emissões de CO_2, alcançando alarmantes $14{,}6\ Gt$, provocadas primordialmente pela intensificação no emprego de carvão (IEA, 2023). Sem dúvida, boa parcela da poluição atmosférica é consequência das termoelétricas. As centrais nucleares geram resíduos radioativos. As grandes hidroelétricas exigem alagamentos, desmatamento, destruição de habitat de animais, etc. Na transmissão e na distribuição do sistema elétrico tradicional, aquele de linhas quilométricas e cuja produção é muito distante dos aglomerados de consumo, a fraca eficiência é uma adversidade ambiental aguda. Nos Estados Unidos da América, por exemplo, entre 2018 e 2023, as perdas médias foram de 5% nestas áreas, o que corresponde a um grande desperdício de uma eletricidade gerada predominantemente por fontes nocivas para a natureza, sendo 60% da matriz formada por combustíveis fósseis, 19% por energia nuclear e apenas 21% por energia renovável (EIA-USA, 2023a, 2023b).

O mais grave dos problemas ambientais, não obstante, é o das mudanças climáticas. Nada é mais ameaçador à humanidade e a vários seres vivos e biomas dentro do sistema ecológico. Sua origem está principalmente no acúmulo atmosférico de gases do efeito estufa por emissões antropogênicas. O aquecimento global, ou seja, o aumento da temperatura média do planeta Terra para além de determinado padrão encontrado na era pré-industrial (1850), abala toda a dinâmica da natureza, rompendo alguns ciclos que mantêm seu equilíbrio profícuo e reforçando outros que a desestabiliza. Em termos mais específicos, o tempo e o clima ficarão muito mais quentes, os oceanos serão mais ácidos e subirão de nível, geleiras derreterão, a desertificação será expandida, animais serão extintos, etc. Tudo isso é seguido da evidente desolação de vários sistemas humanos, trazendo pobreza, fome, desigualdade, doenças, entre tantos outros riscos (IPCC, 2019). E pode se dizer que estes riscos e crises são iminentes, pois as mudanças climáticas alcançaram índices alarmantes e perigosos, chegando a superar anualmente em 2024 a meta limite de esforço de temperatura média de 1,5° C do Acordo de Paris, indo em direção ao máximo de 2° C (OMM, 2025; UNFCCC, 2015).

A geração distribuída e as microrredes podem ser aplicadas para atacar todos estes imbróglios. E como isso pode ser feito? Tendo em mente a abrangência e a universalidade ambientais das mudanças climáticas, cabe a compreensão por meio delas, já que acabam por incorporar a maioria das outras mazelas ambientais. A geração distribuída e as microrredes certamente são tecnologias e soluções de mitigação e adaptação. Isso significa que, por um lado, são opções e medidas que diminuem a emissão e melhoram a absorção de gases do efeito estufa, e, por outro lado, servem para ajustar sistemas humanos ao clima real ou esperado, visando reduzir danos ou explorar oportunidades benéficas (IPCC, 2022b). Tudo isso pode ser mais detalhado.

Sobre a mitigação, em primeiro lugar, os sistemas de geração distribuída e as microrredes são estruturas ideais para que se possa fazer a integração de fontes pequenas, de baixas emissão e poluição e que são renováveis, isto é, seus recursos podem ser repostos em um período de tempo por ciclos naturais que é relativamente pequeno diante das atividades humanas, substituindo combustíveis fósseis e atômicos, não-renováveis e extremamente lesivos à natureza (PHILIPPI JR, DOS REIS, 2016). A diversidade de tecnologias de geração distribuída e de armazenamento de energia permite amiúde optar por aquelas que sejam vantajosas não somente técnica, social e economicamente, mas também ambientalmente. Pequenos geradores a diesel podem ser facilmente preteridos e, no lugar deles, conta-se com sistemas fotovoltaicos, células a combustível, turbinas eólicas, pequenas hidroelétricas e bioenergia (BOYLE, 2012). Esta tem sido a tendência e as renováveis têm ganhado cada dia maior espaço, sendo que as energias fotovoltaica e eólica passaram dos 12% da eletricidade fornecida mundialmente em 2022 e todas as renováveis passaram a ocupar 30% da produção de energia elétrica global em 2023 (REN21, 2024; EMBER, 2024). Em segundo, dentro dos dispositivos de armazenamento de energia, a aplicação de baterias apropriadas, se considerado a análise do ciclo de vida do sistema de geração distribuída e da microrrede, faz com que maiores benefícios ambientais sejam extraídos (BAUMANN *et al.*, 2017). Ademais, dispõem-se, consoante às circunstâncias, de tecnologias que podem ser ainda menos nocivas, como os já mencionados *flywheels* e armazenamento por ar comprimido. Finalmente, destaca-se o aumento substancial de eficiência. Afinal, diminuir energia e, consequentemente, material usado, leva a uma queda nos danos ambientais. A proximidade mínima entre produção e carga é um ponto. Outro é a utilização massiva de eletrônica de potência. Os conversores estáticos transformam e controlam potência elétrica em taxas elevadíssimas de eficiência (LISERRE, SAUTER, HUNG, 2010). Por último, a cogeração, que recupera o calor residual da geração distribuída,

além de equipar a microrrede com este serviço, pode fazer saltar de 40% a eficiência térmica de uma unidade para até 70% a 90% (BOLLEN, HASSAN, 2011).

Com a diversidade de tecnologias e de arquiteturas, os sistemas de geração distribuída e as microrredes podem ser elaborados e construídos de acordo com a conjuntura geográfica, física e urbanística da região. Então, o projeto pode ser delineado visando o uso de recursos naturais disponíveis no local específico de instalação e com infraestruturas que aproveitem as condições particulares do lugar, o que pode abrandar drasticamente os efeitos negativos no meio ambiente. Isso em situações normais, mas mesmo em ocorrências críticas, como desastres naturais, que serão cada vez mais severos, intensos e frequentes com o agravamento das mudanças climáticas, os sistemas de geração distribuída e as microrredes mostram sua superioridade. Elas conseguem manter o suprimento de energia elétrica pelo modo ilhado, ao menos para consumidores essenciais (hospitais, serviços de segurança e empresas de água, por exemplo), evitando colapsos e interrupções (CHE, KHODAYAR, SHAHIDEHPOUR, 2014). Até nos eventos mais delicados, austeros e preocupantes, estas tecnologias demonstram resiliência e confiabilidade alta. Um caso prático evidencia isso. A microrrede Sendai no Japão passou por um momento destes durante os catastróficos terremotos de Tohoku e o tsunami no país em março de 2012. A destruição foi enorme na área, contudo, nos três dias seguidos em que quase todas as pessoas ficaram sem eletricidade em todo o país, a microrrede com suas unidades de geração distribuída, manteve o suprimento contínuo para seus consumidores até a reconexão com o sistema elétrico no retorno à normalidade (HIROSE, REILLY, IRIE, 2013). Por estas razões, a geração distribuída e as microrredes são sistemas tão poderosos em adaptação.

Como a microrrede com geração distribuída inerentemente extingue o sistema de transmissão, sua implantação restringe os impactos na natureza que ele pode causar. As linhas e as torres de transmissão e suas estruturas auxiliares, sobretudo as subestações, são instalações de grande porte, com atributos que podem afetar significativamente seu entorno, como abertura de faixas de passagem, montagens vigorosas, ocupação de áreas, introdução de obstáculos artificiais, entre outros. Por isso, suas construções e o uso delas têm resultados negativos no meio ambiente. Podem ser mencionados a erosão do solo, a complicação com recursos hídricos, as perdas na flora e na fauna, o desmatamento, a influência na rota de pássaros, os efeitos de campos eletromagnéticos e as interferências em áreas legalmente protegidas (DOS REIS, SANTOS, 2014). É assim que, com a aglutinação entre produção e carga, os sistemas de geração distribuída e as microrredes prescindem da transmissão e seus artefatos, o que se reflete na sua

menor utilização no sistema elétrico inteiro e no adiamento ou supressão de novos empreendimentos, atenuando seus danos no meio ambiente.

Poluição é toda e qualquer modificação indesejável na natureza provocada pelo ser humano que possa causar prejuízos (BRAGA *et al.*, 2005). A geração distribuída e as microrredes podem auxiliar no combate à poluição nos seus tipos distintos. Se se usar fontes que não emitem gases poluentes, a atmosfera poderá ser protegida e há um abrangente leque de unidades de geração distribuída e mesmo de armazenamento de energia que não o fazem. Também pela escolha das tecnologias de produção somada a um consumo consciente, as poluições do solo e hídrica são minimizadas. A poluição térmica é impedida pela cogeração, com reaproveitamento do calor. A radioativa é eliminada pelo simples não emprego de usinas nucleares. As poluições sonora e visual serão remediadas pela maior participação dos consumidores na geração de energia elétrica. Pela proximidade e intimidade que ganharão com as unidades produtoras, os proprietários destas e os membros da microrrede certamente optarão por tecnologias que não emitam ruídos e barulhos excessivos e que sejam esteticamente agradáveis para compor seus entornos.

Para terminar, na sequência da questão anterior, pode ser salientada a maior conscientização ambiental que os detentores de geração distribuída e os integrantes de uma microrrede terão. No sistema elétrico tradicional, a produção é muito distante de onde se consome a eletricidade e, deste modo, as pessoas não têm a devida compreensão dos efeitos nocivos que ela pode ter nas suas vidas. Com estes sistemas, os indivíduos estarão em contato muito maior e, convivendo diretamente com as fontes de energia elétrica, eles poderão designar melhor as tecnologias. A adoção de geração distribuída e de microrredes torna-se um processo ambientalmente pedagógico.

A geração distribuída e as microrredes poderão bem servir ou não na conservação, na proteção e na preservação do meio ambiente dependendo das escolhas feitas pelos agentes envolvidos. Um engenheiro é responsável por isso quando toma suas decisões de projeto e de execução e o mesmo se dá para os membros participantes dos processos. A simples adesão de uma ou outra fonte, de uma ou outra arquitetura, de um ou outro modo de funcionamento, é suficiente para determinar as consequências ambientais que a adoção da geração distribuída e das microrredes resultarão.

2 – MODO ILHADO

O modo ilhado com possibilidade de transição para modo conectado à rede é uma das maiores inovações no conceito das microrredes contemporâneas em relação aos sistemas elétricos de potência tradicionais. Tal condição pode ser integrada à geração distribuída, trazendo as mesmas adições. Quaisquer que sejam suas aplicações, estando em áreas completamente remotas ou dentro de centros urbanos de alta densidade populacional, passar a funcionar ilhado traz enormes benefícios. Para os que nunca tiveram acesso ou para aqueles em que ela é de fraco desempenho, estas tecnologias carregam consigo todas as vantagens de se usar a eletricidade de boa qualidade nas atividades diárias, pessoais, comerciais, industriais, etc. Aos que já se encontram ligados a uma rede de distribuição, aderir a sistemas de geração distribuída ou fazer parte de microrredes que podem entrar em ilhamento leva a melhor confiabilidade, flexibilidade, envolvimento inteligente e maior independência das concessionárias.

Apesar disso, mesmo as unidades de geração distribuída, quando conectadas sozinhas à rede, ainda não podem, em sua maioria, atuar em ilhamento intencional como as microrredes impreterivelmente devem fazer, por barreiras jurídico-legais, regulamentares ou técnicas. Na ocorrência de falhas ou interrupções totais do sistema elétrico, a geração distribuída é compelida a se desvincular e se desligar por completo por indicação da maioria das normas (IEEE 1547-2018, 2018; IEEE 929-2000, 2000; IEC 62116-2014, 2014; ABNT NBR 16149-2013, 2013). Tal procedimento é executado por várias questões, dentre as quais a segurança de pessoas e animais, uma vez que as fontes podem manter energizadas as linhas em que estão ligadas após a suspensão da rede e causar acidentes fatais. Sem estratégias de transferência, elas ainda podem sofrer de variações adversas de tensão e frequência, deterioração da qualidade da energia e religamento fora de fase. Por isso, até o momento, para geração distribuída, diferentemente das microrredes, empregam-se técnicas de anti-ilhamento, que descontinuam a operação dos inversores (RESENDE, 2022). No entanto, sem entraves e com as técnicas corretas, os sistemas de geração distribuída são capazes de agir com as mesmas habilidades das microrredes, trabalhando em todos os modos de operação e atrelando seus ganhos, incluindo em ilhamento.

Para compreender e desenvolver os modos conectado à rede e de transição suave é imprescindível estudar e analisar o modo ilhado. Sua operação, assim como suas técnicas de controle, formam a base para os outros dois. Sem ilhamento intencional, a microrrede moderna perde sua essência e a geração distribuída reduz imensamente seu potencial. Sendo assim, neste capítulo, dada a relevância e a necessidade de entendimento, o modo ilhado é examinado.

2.1 – Requisitos para Operação em Modo Ilhado

Para funcionamento seguro, confiável e eficiente do sistema de geração distribuída ou da microrrede em modo ilhado, alguns requisitos precisam ser obrigatoriamente preenchidos, enquanto outros são desejáveis. A criação de referências internas de tensão e de frequência é uma das primordiais. Isso garante operação estável, com qualidade e mínimos problemas em regime permanente. São as unidades formadoras de rede que propiciam este mecanismo. A fonte de geração distribuída ser despachável, ou ao menos uma na presença de múltiplas, com baixa ou nenhuma oscilação de saída, é um imperativo, porque, caso contrário, as referências refletiriam a produção variável e intermitente, provocando complicações na carga local ou na microrrede ilhada. Como boa parte da geração tem como interface conversores estáticos, trabalhar com o paralelismo deles é fundamental em microrredes. Mais ainda, a eletrônica de potência associada à geração distribuída e aos dispositivos de armazenamento deve ser capaz de compartilhar adequadamente as potências ativa e reativa fornecidas com as cargas locais (DE BRABANDERE *et al.*, 2007a).

Nos sistemas de geração distribuída ou nas microrredes ilhadas, o suprimento de energia elétrica é limitado pela capacidade de produção das fontes internas instaladas e do armazenamento disponível. Eles são, deste modo, muito sensíveis ao equilíbrio energético entre o consumo e o fornecimento. Para se evitar problemas de instabilidade e outros, este ponto deve ser observado com atenção. Outra condição a ser considerada é que os sistemas de controle sejam todos automatizados. Esta disposição se deve à falta de pessoal especializado supervisionando e agindo incessantemente sobre a geração distribuída ou a microrrede ilhada. Também é preferível que os componentes sejam dos tipos “ligar-e-usar” (“*plug-and-play*”) e “par-a-par” (“*peer-to-peer*”), que são atribuições inerentemente apropriadas ao ilhamento intencional.

Sobre a qualidade da energia, as exigências podem ser menores que para sistemas conectados à rede. Não que possam ser degradantes à carga local ou à microrrede e seus elementos, obviamente, mas uma maior flexibilidade quanto aos índices e níveis típicos da rede elétrica convencional é justificável. Não há normas específicas para o modo ilhado dos sistemas de geração distribuída e das microrredes e, tendo em vista a diversidade de tecnologias e de arquiteturas, incluindo a variedade de parâmetros elétricos que podem ter, as restrições são menores. Além disso, pela menor robustez dos poucos recursos e pela natureza de alguns controladores, desvios são mais comuns no ilhamento intencional. Os indicadores devem ser, portanto, um compromisso entre a rigidez quase absoluta da qualidade da energia das redes de

distribuição tradicionais e as maiores diferenças em relação aos padrões, desde que não deixe que equipamentos eletroeletrônicos, pessoas e animais sejam afetados negativamente (BOLLEN *et al.*, 2009). Por fim, para minimizar as linhas de comunicação e dar proteção individualizada, estratégias de controle descentralizado podem ser priorizadas no lugar do centralizado para modo ilhado no caso de microrredes. Como será apresentado adiante, estes requisitos são bastante distintos daqueles para operação em modo conectado à rede.

2.2 – Controles Internos

Antes de se discutir as técnicas de controle para ilhamento, é preciso analisar os controles internos ou de nível zero (como entendido na perspectiva hierárquica). Estes controles existem em conversores estáticos acoplados a unidades de geração distribuída independentemente da inserção ou não em microrredes. Sua função é regular a corrente e a tensão destas tecnologias, fazendo com que a operação das mesmas seja estável (TEODORESCU, LISERRE, RODRIGUEZ, 2011).

As unidades seguidoras ou alimentadoras de rede têm, usualmente, como estrutura de seus controles de nível zero uma malha interna rápida de corrente para regular a corrente injetada e outra externa que atua sobre a referência de corrente, através do barramento CC, para regular a potência entregue. Os conversores formadores de rede têm malhas cascateadas, uma interna de corrente e outra externa de tensão, regulando suas respectivas variáveis (ROCABERT *et al.*, 2012). Por ser este o caso principal dos inversores para sistemas de geração distribuída aqui abordados e microrredes CA ilhadas e pelo sistema de controle proposto se basear nestes últimos tipos de conversores, seus controladores internos são detalhados agora.

As técnicas de controle interno são categorizadas pelo sistema de coordenadas de referência no qual são aplicadas. Para referencial síncrono, cujas variáveis de controle, os sinais em *dq*, são CC, usa-se, normalmente, o controlador Proporcional-Integral (PI). Para referencial estacionário, onde os sinais $\alpha\beta$ são senoidais, a preferência é pelo Proporcional-Ressonante (P+Res). No referencial natural (*abc*), há um controlador para cada fase, podendo ser este um PI, P+Res, Histerese ou *Deadbeat* (BLAABJERG *et al.*, 2006). Para este trabalho, como são contemplados sistemas trifásicos e optou-se por referenciais estacionários em $\alpha\beta$, obtidos por meio de transformada de Clarke ($abc \rightarrow \alpha\beta$), adota-se o controlador P+Res para as malhas internas, tanto de corrente, quanto de tensão. Diferentemente dos controladores PI, que anulam o erro em regime permanente de sinais CC, os controladores P+Res são capazes de fazer o mesmo para sinais senoidais, sendo ideais para tecnologias CA (ZMOOD, HOLMES, 2003).

A parcela Proporcional do controlador P+Res é um ganho simples K_p, que influencia a dinâmica e a resposta transitória. Já o bloco Ressonante é uma estrutura do tipo *Second-Order Generalized Integrator* (SOGI). Ela faz com que seja dado um ganho infinito ou muito elevado sobre a frequência de operação (ω_{of}) do sistema em questão com suporte de uma constante de ressonância (K_i). A configuração ainda pode ser dividida em P+Res Ideal e P+Res Não-Ideal (TEODORESCU *et al.*, 2006; TEODORESCU, BLAABJERG, LISERRE, 2004; CHA, VU, KIM, 2009). O que as diferencia é a finitude do ganho da frequência e a largura de banda em torno dela. No primeiro caso, a frequência é fixa, com largura de banda estreita, quase nula, e ganho infinito sobre ela. A equação que rege o controlador P+Res Ideal é:

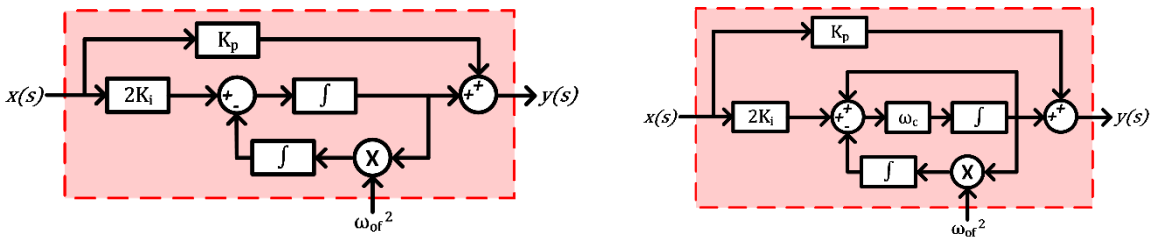
$$G_{P+Res_i}(s) = K_p + \frac{2K_i s}{s^2 + \omega_{of}^2} \tag{2.1}$$

No segundo, o ganho é finito, mas muito alto, de forma a garantir a correção do erro, porém, com uma largura de banda estreita que dá certa flexibilidade, reduzindo a sensibilidade, admitindo pequenas variações em torno da frequência de operação. Ela é determinada pela frequência de corte ω_c. É uma boa solução para sistemas ilhados, já que é comum que neles existam pequenos desvios sobre a frequência, seja pelos controladores, seja pela dinâmica. Logo, este será o escolhido para a proposta. A expressão do controlador P+Res Não-Ideal é:

$$G_{P+Res_{ni}}(s) = K_p + \frac{2K_i \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_{of}^2} \tag{2.2}$$

Os dois controladores, P+Res Ideal e P+Res Não-Ideal, são representados, respectivamente, nas Figuras 2.1 (a) e 2.1 (b) em forma de blocos com estrutura SOGI. Usualmente, a frequência ω_{of} é uma constante fixa e igual à nominal do sistema elétrico envolvido. No entanto, para aprimorar o controlador, ela pode ser o próprio sinal de operação ω. Para a estratégia de controle proposta, ela será retirada diretamente do método de controle *droop*.

Figura 2.1 - Controladores (a) P+Res Ideal e (b) P+Res Não-Ideal.



(a) (b)

Fonte: Elaborada pelo autor.

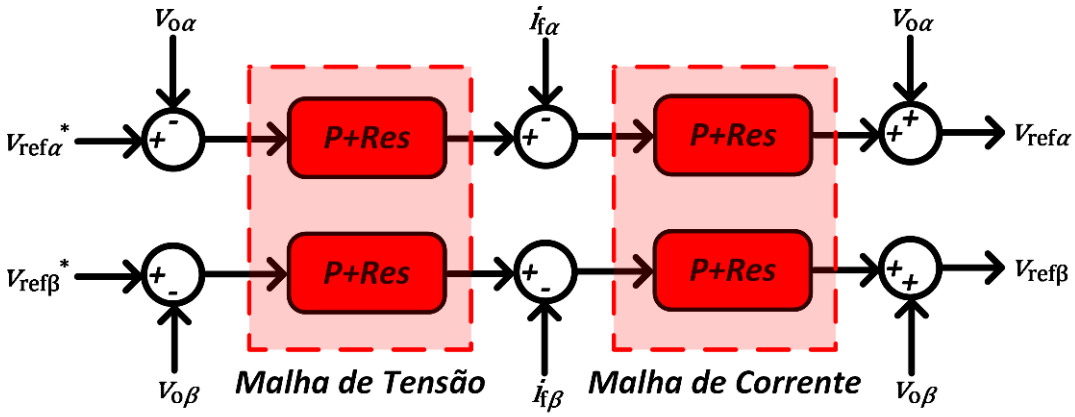
O controlador P+Res guarda ainda outra vantagem. Uma modificação em sua estrutura permite que se faça compensação harmônica para certas ordens (TEODORESCU *et al.*, 2006). Para cada uma, compensadores adicionais podem ser integrados, com ajuste sobre a respectiva frequência ressonante. As funções de transferência a serem incrementadas ao P+Res Ideal e ao P+Res Não-Ideal para compensação são, respectivamente, como a seguir, sendo que h é a ordem harmônica e K_{ih} o ganho ressonante de cada uma:

$$G_{Hi}(s) = \sum_h \frac{2K_{ih}s}{s^2 + \left(h\omega_{of}\right)^2} \tag{2.3}$$

$$G_{Hni}(s) = \sum_h \frac{2K_{ih}\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \left(h\omega_{of}\right)^2} \tag{2.4}$$

Com objetivo de aprimorar o controle interno, com vistas a amortecimento e melhor dinâmica, pode se recorrer a desacoplamentos e realimentações de corrente e de tensão (COELHO, 2000; RYAN, LORENZ, 1995). Com isso, o controle interno para unidades formadoras de rede, contendo malhas externa de tensão e interna de corrente formadas por controladores P+Res em referencial estacionário $\alpha\beta$, está completo e pode ser visto na Figura 2.2.

Figura 2.2 - Controle interno completo para unidades formadoras de rede com compensadores P+Res.



Fonte: Elaborada pelo autor.

2.3 – Estratégias de Controle para Modo Ilhado

As estratégias de controle para modo ilhado, hierarquicamente chamados de controles primários, são fundamentais para todo o funcionamento dos sistemas de geração distribuída e da microrrede, até mesmo para transição e conexão à rede. Quanto ao ilhamento em si, eles são designados em princípio para produzir referências de tensão e de frequência, habilitar a operação coordenada de múltiplas unidades de geração distribuída com seus conversores em

microrredes e gerenciar a energia trocada entre fontes e cargas locais. Podem ter funções adicionais que melhorem o desempenho dos sistemas, entretanto, são estas suas principais atribuições. Como existe um ciclo de operação nestas tecnologias, passando de modo ilhado para conectado à rede e inversamente, com transferência entre eles, não há como desvincular as técnicas de controle de cada etapa. Ainda que os métodos escolhidos para cada uma sejam distintos e avulsos, um pode afetar o outro. A troca de controladores influencia a transição. Por conseguinte, a despeito de não ser o foco do trabalho, faz-se necessário entender o controle primário de forma geral.

Por darem sequência ao desenvolvimento dos sistemas UPS e serem algo relativamente novo, as estratégias de controle de modo ilhado foram objeto de grande atenção da comunidade científica e muita pesquisa foi feita sobre o tema. Várias técnicas foram propostas na literatura procurando lograr as metas básicas do ilhamento e outras (HAN *et al.*, 2017). Apenas algumas delas serão revisadas aqui.

Em microrredes, elas podem ser centralizadas ou distribuídas. Como mencionado anteriormente, para a condição ilhada, por suas características, é mais propício usar as últimas. Todavia, a classificação sugerida tanto para microrredes, quanto para sistemas de geração distribuída, é entre técnicas aqui nomeadas em: "não-baseadas em *droop*" (ND) e "baseadas em *droop*" (BD). O mesmo vale para o modo conectado à rede. Isso se deve à grande quantidade de soluções que são fundamentadas no consagrado método de controle *droop*, chamadas BD, mais examinado à frente, sendo a proposta deste trabalho um deles. Algumas vezes, os autores fazem simples modificações nele para conseguir novas estratégias. O que justifica a divisão.

Entre as configurações ND, algumas merecem destaque e discussão. O controle totalmente centralizado é formado por um controlador central, elemento independente do sistema, que determina toda a operação da microrrede, enviando informações de comando e recebendo as de situação local dos componentes (TSIKALAKIS, HATZIARGYRIOU, 2011). É uma estratégia com alto grau de otimização, mas de baixíssima confiabilidade e forte dependência de linhas de comunicação rápidas em microrredes. Outro esquema de controle ND é o de "líder-seguidor"[1]. Nele, uma ou mais das unidades ocupam o papel de "líder", fornecendo as referências de tensão e de frequência aos dispositivos "seguidores", que apenas seguem as ordens e injetam potência na microrrede (LOPES, MOREIRA, MADUREIRA, 2006). A falha

[1] O termo comumente usado na literatura é "mestre-escravo" ("*master-slave"*). Por seu teor extremamente ofensivo, por vezes racista, discriminatório e anacrônico, optou-se por empregar a terminologia "líder-seguidor", sem perdas no conteúdo.

dos "líderes" incorre no colapso da operação da microrrede. Uma terceira e última opção apresentada das técnicas ND é a dos "sincronversores" ("*synchronverters*") (ZHONG, WEISS, 2010). Nela, o conjunto constituído do inversor, dos seus filtros e dos controles imita o comportamento dos geradores síncronos. As equações dinâmicas complexas destas máquinas são reproduzidas fielmente e a fonte primária é substituída pela potência trocada pelo barramento CC. O controle integra tensões e correntes medidas localmente com ângulos, torques, inércia, indutâncias mútuas e velocidade angular como variáveis virtuais. Alguns problemas desta solução são as não-linearidades e a fragilidade sobre a estabilidade.

2.1 – Método de Controle *Droop*

As relações de *droop* são tão antigas quanto a teoria de controle. No trabalho seminal de Maxwell (1868), primeiro a tratar com rigor matemático os reguladores de velocidade, a análise e o desenvolvimento de um sistema simples de controlador levavam a equações que igualam a velocidade (angular) real/atual da máquina, a qual deve ser mantida aproximadamente constante, ao seu valor nominal/ideal subtraído do torque/potência motriz multiplicada por uma constante. Se o torque de carga aumenta, a velocidade cai linearmente de forma lenta. Nos estudos e nas aplicações de sistemas elétricos, as características *droop* surgem desde seu início (começo do século XX). Elas aparecem no controle de máquinas elétricas, principalmente síncronas em operação paralela, desta vez relacionando potência ativa com frequência (carga e velocidade) e potência reativa com tensão (STEINMETZ, 1901; KUNDUR, 1994). Mais recentemente, por volta dos anos 1990, estes mesmos princípios de controle *droop* foram integrados a inversores para operação em paralelo de sistemas UPS distribuídos (COELHO, 2000). Pelas similaridades operacionais, logo que surgiram, as microrredes contemporâneas foram contempladas com estes controladores nos conversores de suas unidades de geração distribuída (LASSETER, 2002a, 2002b).

Assim, o método de controle *droop* se consolidou ao longo do tempo como uma das técnicas mais prolíficas para ilhamento dentro de microrredes e, adicionalmente, de sistemas de geração distribuída. Sua simplicidade e capacidade de realizar as funções fundamentais necessárias para operação em modo ilhado fizeram surgir várias outras estratégias que têm como ponto de partida seu arranjo básico (HAN *et al.*, 2017). O método, em sua configuração convencional, consegue produzir referências de frequência e de tensão e realizar a alimentação automática de cargas locais de acordo com a demanda, e, em configurações de microrredes, fazer o paralelismo dos inversores, compartilhar devidamente suas potências e efetivar unidades

formadoras de rede sem quaisquer comunicações, sendo um controle completamente descentralizado, tendo apenas medições locais e cálculos internos como seus apontadores.

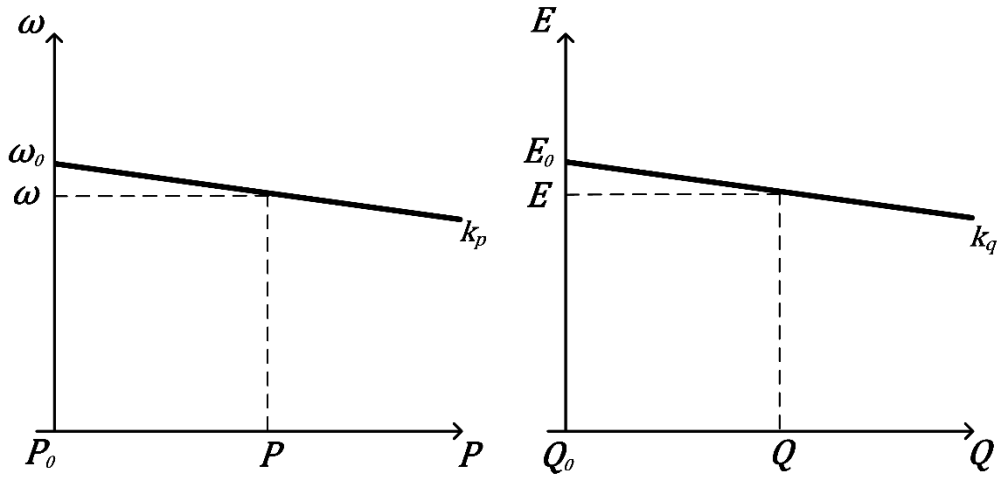
O princípio de funcionamento do método de controle *droop* convencional é emular, com um esquema simples, o comportamento de máquinas síncronas isoladas que podem trabalhar em situações de paralelismo na presença de múltiplas unidades, gerando referências de frequência ω e de tensão E que sejam funções das potências ativa P e reativa Q, respectivamente, com inclinações negativas às variações, cujos coeficientes de *droop* são, nesta sequência, k_p e k_q. As relações $P-\omega$ e $Q-E$ obtidas são expressas pelas seguintes equações:

$$\omega = \omega_0 - k_p(P - P_0) \tag{2.5}$$

$$E = E_0 - k_q(Q - Q_0) \tag{2.6}$$

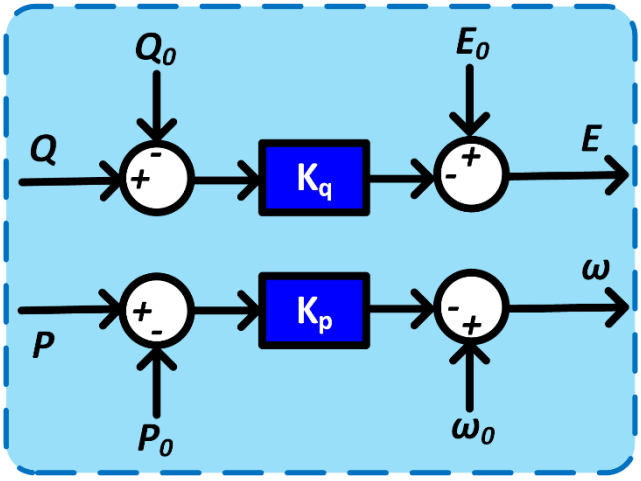
onde ω_0 e E_0 são a frequência e a tensão de equilíbrio, tomadas muitas vezes como os valores nominais ou ideais fixos de trabalho, e P_0 e Q_0 são as potências ativa e reativa de equilíbrio, escolhidas para definirem quando os dois primeiros parâmetros serão iguais aos de referência produzidos (COELHO, CORTIZO, GARCIA, 2002; KUNDUR, 1994; CHANDORKAR, DIVAN, ADAPA, 1993; TULADHAR *et al.*, 1997; HUA, LIAO, LIN, 2002). As curvas características de *droop* $P-\omega$ e $Q-E$ resultantes estão representadas na Figura 2.3 e o diagrama de blocos do controle na Figura 2.4.

Figura 2.3 - Curvas características de *droop* $P-\omega$ e $Q-E$.



Fonte: Adaptada de (SOUZA JUNIOR, FREITAS, 2022b).

Figura 2.4 - Diagrama de blocos do método de controle *droop* convencional.



Fonte: Adaptada de (SOUZA JUNIOR, FREITAS, 2022b).

As potências ativa P e reativa Q que integram as equações de *droop* são os valores médios na saída do inversor. Estes são calculados a partir da tensão instantânea v_o e da corrente instantânea i_o medidas localmente. No caso trifásico, tendo como referencial estacionário, é fácil obter as potências instantâneas p e q com a decomposição em sinais $\alpha\beta$ (e tais conveniências justificam em parte estas escolhas) com a potência aparente s resultante do produto de v_o e i_o^* conforme desenvolvido abaixo e fornecido pelas seguintes equações advindas da teoria *p-q* (AKAGI, WATANABE, AREDES, 2007; AKAGI, KANAZAWA, NABAE, 1984):

$$s = v_o i_o^* = (v_{o\alpha} + j v_{o\alpha})(i_{o\beta} - j i_{o\beta}) = \left(\underbrace{v_{o\alpha} i_{o\alpha} + v_{o\beta} i_{o\beta}}_{p}\right) + j\left(\underbrace{v_{o\beta} i_{o\alpha} - v_{o\alpha} i_{o\beta}}_{q}\right) \Rightarrow$$

$$p = v_{o\alpha} i_{o\alpha} + v_{o\beta} i_{o\beta} \tag{2.7}$$

$$q = v_{o\beta} i_{o\alpha} - v_{o\alpha} i_{o\beta} \tag{2.8}$$

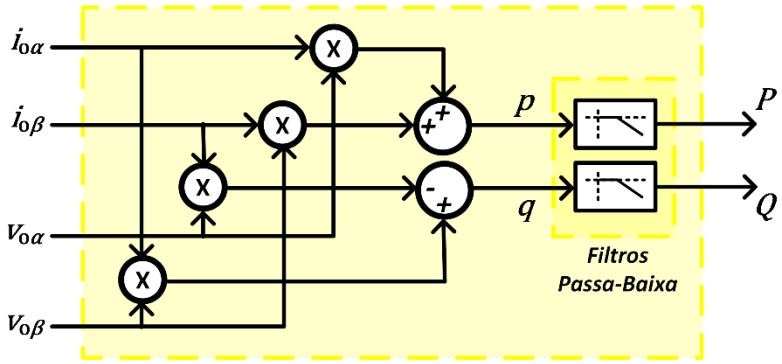
Para se chegar nas potências médias, filtro passa-baixa é empregado e aplicado em cada uma das instantâneas, com frequência de corte ω_f escolhida para ser de um décimo da nominal de operação da geração distribuída ou da microrrede, tendo-se assim:

$$P = \frac{\omega_f}{s + \omega_f} p \tag{2.9}$$

$$Q = \frac{\omega_f}{s + \omega_f} q \tag{2.10}$$

O diagrama final do cálculo de potências pode ser visto na Figura 2.5.

Figura 2.5 - Diagrama de cálculo de potências médias.



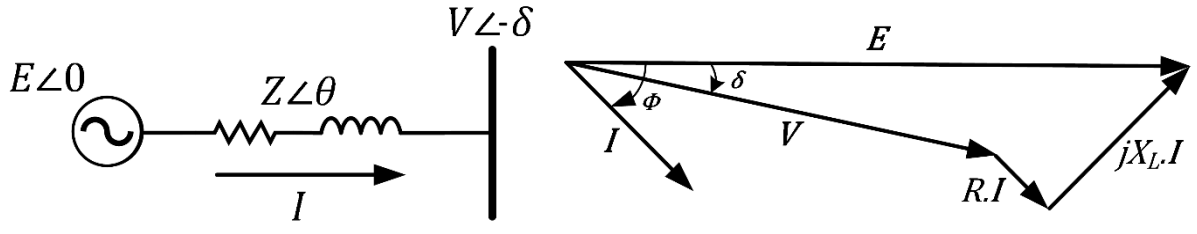
Fonte: Elaborada pelo autor.

Finalmente, tendo a frequência ω e a tensão E, gera-se, por controle, uma referência dada por:

$$v_{droop} = Esen(\omega t) \tag{2.11}$$

Ao se utilizar o método de controle *droop* convencional, deve-se ficar atento a alguns elementos. O primeiro deles é o de que a linha de saída seja predominantemente indutiva, ou seja, com relação $X_L \gg R$ (GUERRERO *et al.*, 2009). Se esta desigualdade não for satisfeita, a técnica pode não mais funcionar como descrita anteriormente, porque daí podem decorrer duas situações. Ou não haverá relação sem desacoplamentos entre os parâmetros como desejado, mantendo apenas características $P - \omega$ e $Q - E$, e pode se suceder instabilidade no sistema, ou as funções poderão ser trocadas, com relações dos tipos $P - E$ e $Q - \omega$ e de inclinação positiva surgindo (DE BRABANDERE *et al.*, 2007a). Esta questão pode ser analisada com mais profundidade considerando o circuito equivalente da Figura 2.6 (a), o diagrama fasorial da Figura 2.6 (b) e resolvendo as equações pertinentes exatamente conforme (SOUZA JUNIOR, 2020; GUERRERO *et al.*, 2009) e apoiado em (ELGERD, 1973). Considera-se, de forma simplificada, um conversor ligado a um barramento CA com uma impedância de linha $Z = R + jX_L$ e potência aparente $S = P + jQ$.

Figura 2.6 – Conversor conectado a um barramento CA: (a) circuito equivalente e (b) diagrama fasorial.



(a) (b)

Fonte: Adaptada de (SOUZA JUNIOR, 2020).

As potências ativa P e reativa Q entregues são, com tensão do conversor E e do barramento V e ângulo de fase δ, dadas por:

$$P = \frac{E}{R^2 + X_L^2}[R(E - V\cos\delta) + X_L V \operatorname{sen}\delta] \tag{2.12}$$

$$Q = \frac{E}{R^2 + X_L^2}[-RV\operatorname{sen}\delta + X_L(E - V\cos\delta)] \tag{2.13}$$

Caso $X_L \gg R$ e o ângulo de fase seja pequeno tal que $\operatorname{sen}\delta \approx \delta$ e $\cos\delta \approx 1$, o que se alcança é:

$$P \approx \frac{EV}{X_L}\delta \tag{2.14}$$

$$Q \approx \frac{V}{X_L}(E - V) \tag{2.15}$$

Reorganizando, fica claro que, com esta condição de linha predominantemente indutiva, o ângulo de fase δ, cujo controle está associado ao de frequência, se relaciona diretamente apenas com a potência ativa P e a tensão $(E - V)$ se relaciona diretamente somente com a potência reativa Q, princípios de boa operação do método de controle *droop*:

$$\delta \approx \left(\frac{X_L}{EV}\right)P \tag{2.16}$$

$$(E - V) \approx \left(\frac{X_L}{V}\right)Q \tag{2.17}$$

O segundo ponto é que a fonte primária precisa ser despachável, visto que o método de controle *droop* serve unidades formadoras de rede. O terceiro e último é a observação de que, pela forma em que o controle é desenhado, inevitavelmente pequenos desvios em frequência e em tensão acontecem para alterações nas potências produzidas conforme as curvas *droop*.

Para suplantar alguns dos problemas do método de controle *droop*, modificações foram sugeridas na literatura. Em (TULADHAR *et al.*, 2000), uma terceira equação que relaciona potência distorcida com frequência distorcida é acrescentada para mitigar os efeitos harmônicos locais. Já em (MOHAMED, EL-SAADANY, 2005), termos derivativos e adaptativos são adicionados às equações de *droop* convencionais para lidar com transitórios. Existem muitas outras propostas. Todavia, pela superioridade do método de controle *droop* convencional unida à sua simplicidade e tendo em conta a solução delineada para conexão à rede, este trabalho o

adota como controle primário ou primeiro estágio de modo ilhado da estratégia de controle apresentada.

2.5 – Impedância Virtual

Como se viu, para que o método de controle *droop* convencional funcione corretamente, as linhas devem ser preferencialmente indutivas. Entretanto, em redes cujo nível de tensão é baixo, como na distribuição e em microrredes, a relação X_L/R é tipicamente menor que 1 (KINDERMANN, 2010). A solução mais direta é instalar indutores na saída do inversor, contrapondo a característica resistiva. Tal resposta gera custos econômicos e físicos, além de perdas. Para evitar isso, foi proposta a impedância virtual, implementada dentro do controle primário (GUERRERO *et al.*, 2005). Com ela, um comportamento indutivo equivalente é alcançado com uma técnica de controle e não materialmente. Ao sinal de tensão de referência produzido pelo método de controle *droop*, a impedância virtual $Z_D(s)$ define uma queda de tensão com a corrente i_o que cria uma nova tensão de referência v_{mref} dada por:

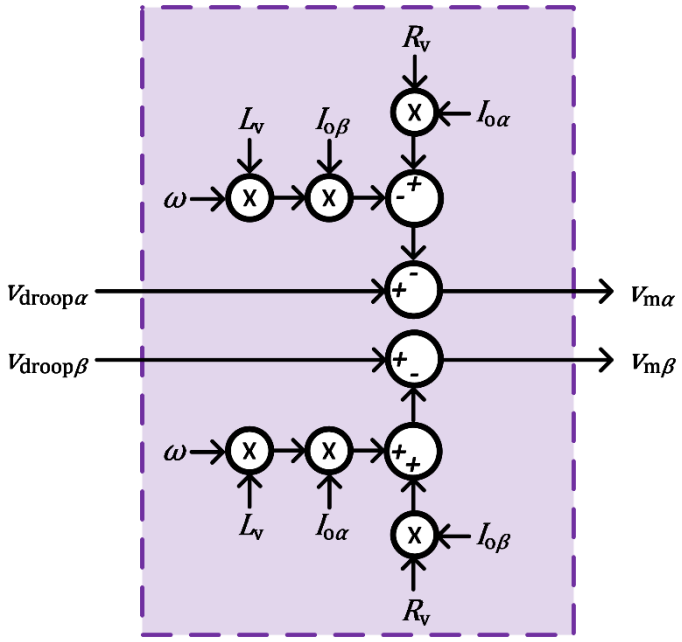
$$v_{mref} = v_{droop} - Z_D(s) i_o \tag{2.18}$$

A impedância virtual $Z_D(s)$ pode ser realizada de muitas maneiras e pode emular comportamentos puramente indutivos, resistivos ou uma mescla dos dois de acordo com os requisitos de projeto. Em sistemas monofásicos, a dificuldade de implementação decorre da necessidade de se usar derivadas para aquisição de indutores virtuais. Um filtro passa-alta pode substituir os termos diferenciais e obter resultados razoavelmente satisfatórios. No caso trifásico, como se tem facilmente sinais em quadratura, especialmente em referencial estacionário, a execução é baseada em matrizes e, com quedas de tensão $V_{Z\alpha}$ e $V_{Z\beta}$ e correntes de saída $I_{o\alpha}$ e $I_{o\beta}$ em $\alpha\beta$, com ω a frequência do método de controle *droop*, a equação que rege a impedância virtual pode ser implementada como (HE, LI, 2011):

$$\begin{bmatrix} V_{Z\alpha} \\ V_{Z\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_v & -\omega L_v \\ \omega L_v & R_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{o\alpha} \\ I_{o\beta} \end{bmatrix} \tag{2.19}$$

onde L_v é a indutância virtual e R_v a resistência virtual. A primeira preenche o requisito de trabalho do método de controle *droop* contornando o emprego de indutores físicos e a segunda melhora a dinâmica com aumento de amortecimento. As quedas de tensão encontradas são subtraídas da tensão de referência v_{droop} do gerador de sinal, criando uma nova referência v_{mref}. O diagrama de blocos deste controlador está ilustrado na Figura 2.7.

Figura 2.7 - Diagrama de blocos para impedância virtual.



Fonte: Elaborada pelo autor.

2.6 – Controle Secundário

Outra dificuldade ressaltada é a dos desvios na frequência e na tensão do sistema de geração distribuída e da microrrede quando ilhadas. O suprimento e o compartilhamento de cargas no método de controle *droop* está atrelado a estas variações. Apesar de serem geralmente pequenas para um bom projeto dos controladores, busca-se reduzi-los ao mínimo possível para garantir níveis altos de qualidade da energia e estabilidade no modo ilhado. Dentro da estrutura hierárquica, o controle secundário é responsável por restaurar os parâmetros de frequência e de tensão para valores próximos do que seria o nominal ou ideal em ilhamento, mantendo a alimentação e uma boa distribuição de potências (COELHO *et al.*, 2016). O controle secundário não é parte da estratégia de controle proposta por esta pesquisa e não será detalhado. Uma revisão sobre o assunto pode ser consultada em (CARVALHO, 2019). Porém, vale a pena fazer alguns breves comentários.

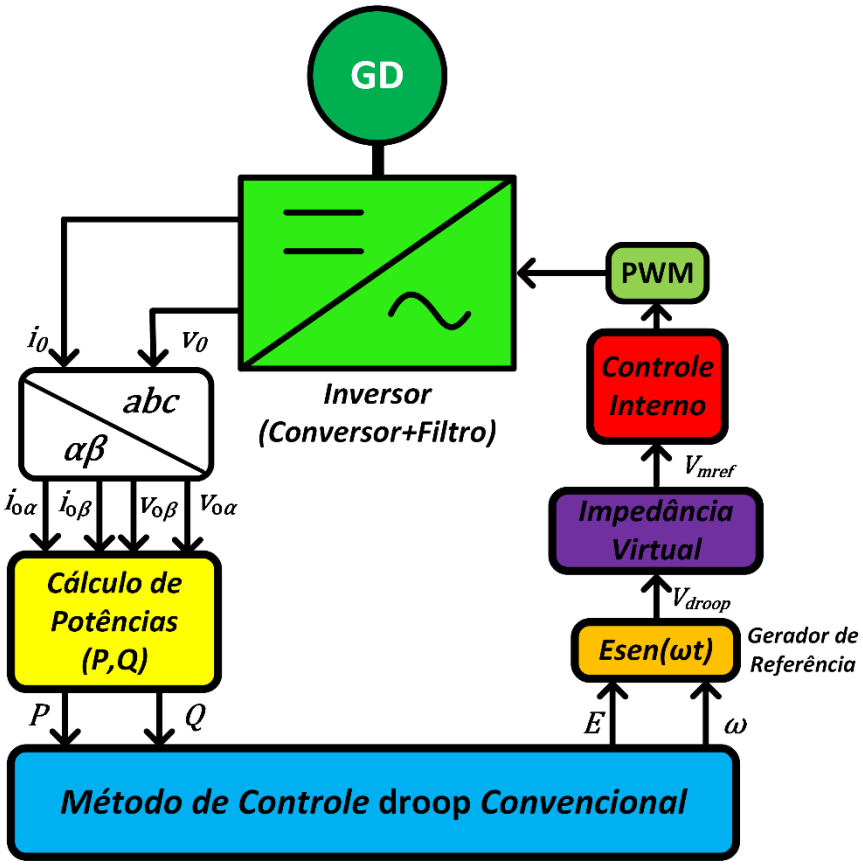
Em microrredes, diferentemente do controle primário, seja ele centralizado ou mais descentralizado, a comunicação passa a ser mandatória no secundário. As unidades precisam compartilhar informações de modo a estabelecerem níveis adequados de frequência e de tensão sem afetar a distribuição de potências. O que se tem feito é tentar reduzir as linhas de comunicação. Teoria dos grafos e técnica de consenso são usadas, dispensando que cada um dos conversores se comunique com todo o restante (CARVALHO *et al.*, 2018a, 2018b).

Algumas propostas na literatura unem o controle secundário à conexão à rede da microrrede. Estas são uma minoria e, assim, o controle secundário é tido apenas para modo ilhado.

2.7 – Considerações sobre o Modo Ilhado

O controle final e completo para modo ilhado, incluindo o bloco de modulação de largura de pulso (PWM) com inversor e geração distribuída (GD) é exibido na Figura 2.8, conforme utilizado no sistema de controle proposto.

Figura 2.8 - Sistema de controle completo para inversor com método de controle *droop* convencional.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Apesar das enormes vantagens e da inovação do modo ilhado, com independência dos sistemas externos e da alta confiabilidade, ele traz algumas desvantagens que são compensadas pela adesão da transição suave e do modo conectado à rede. Podem ser listadas algumas dessas desvantagens. Os desvios mencionados pioram os índices de qualidade da energia para as cargas locais dos sistemas de geração distribuída e para os consumidores de uma microrrede. A falta de indicadores e a maior flexibilidade torna mais sensível o sistema como um todo. Pelos controles ou pelo arranjo das tecnologias, a alimentação e o compartilhamento de cargas podem não ser precisos ou exatos como desejado. O suprimento pode ser insuficiente para alimentar

os usuários e ainda pode levar à instabilidade. Esquemas difíceis podem ser impostos, como corte de cargas e sobrecarregamento da geração. Perder unidades de produção torna a situação mais alarmante ainda, eventualmente desligando todo o sistema. Por outro lado, uma parcela do fornecimento disponível pode ficar parado quando a capacidade é maior que o consumo interno, representando um potencial desperdício e ineficiência. Pelo tamanho reduzido destes sistemas tecnológicos, há pouco espaço para manobras, correções e manutenção. O nível de curto-circuito é baixo, afetando a proteção. As referências de frequência e de tensão são de encargo exclusivo dos inversores internos, o que é um risco quando há problemas. A disponibilidade de transição suave e conexão à rede pode abrandar estes empecilhos, fazendo da geração distribuída e das microrredes sistemas ainda mais robustos, flexíveis, confiáveis, inteligentes e eficientes.

3 – MODO CONECTADO À REDE E TRANSIÇÃO SUAVE

Quando um sistema de distribuição está disponível nos arredores, uma unidade de geração distribuída ou uma microrrede poderá se conectar à rede. Elas só terão o máximo de seus potenciais alcançados se puderem fazer isso e transitarem livre e rapidamente para o modo ilhado, conforme será visto adiante. Apesar deste último ser um recurso disruptivo, ele restringe capacidades, pois é naturalmente limitado. Na conexão à rede, tendo suas exigências preenchidas, as tecnologias melhoram suas condições e do sistema externo, com aprimoramentos técnicos. Mais do que isso, conseguem executar novas funcionalidades que estão diretamente relacionadas às questões sociais, econômicas e ambientais de maneira positiva. Ademais, a despeito do grande apelo por sistemas de geração distribuída e microrredes em áreas remotas e rurais, muito de seus desenvolvimentos e de suas instalações ocorrem e ocorrerão dentro das cidades (HATZIARGYRIOU, 2014; FENG *et al.*, 2018; MENGELKAMP *et al.*, 2018; ZENG *et al.*, 2014). No Brasil, por exemplo, de toda a geração distribuída instalada em 2024, apenas 14% se encontrava no setor rural (com ou sem conexão à rede), enquanto todo o restante estava concentrado em meios urbanos, como residências, comércios, indústrias, instituições públicas e sistemas de iluminação pública (EPE, 2025).

Em contraste com o ilhamento, considerando os modos de operação, as pesquisas sobre o modo conectado à rede e transição suave têm sido menos intensas. Suas técnicas de controle são encontradas em menor número quando não se trata de sistemas exclusivamente conectados. Enquanto os sistemas de controle para modo ilhado são amplamente discutidos em vários artigos, os de modo conectado e de transição suave em conjunto são menos mencionados (PARHIZI *et al.*, 2015; GUERRERO *et al.*, 2012a, ISHAQ *et al.*, 2022). De fato, há muitos artigos de revisão tratando exclusivamente de microrredes ilhadas e seus controles (HAN *et al.*, 2017; ANDISHGAR, GHOLIPOUR, HOOSHMAND, 2017; MOHD *et al.*, 2010; HAN *et al.*, 2015). A única aparente exceção observada é (D'SILVA *et al.*, 2020), onde somente algumas poucas técnicas para transição suave são abordadas, sem tratar dos controles para conexão ou as considerações gerais para tanto.

É necessário elucidar todas estas matérias e progredir neste campo. Neste capítulo, além de se apresentar diversos aspectos importantes dos sistemas de geração distribuída e das microrredes conectados à rede, tais como benefícios, requisitos e elementos de suas operações, é oferecida uma revisão crítica e extensa sobre os métodos de controle localizados na literatura especializada. Feito isso, uma estratégia de controle para modos ilhado e conectado à rede com transição suave é proposta.

3.1 – Benefícios do Modo Conectado à Rede e da Transição Suave

Muitas das vantagens do modo conectado à rede são contrapontos às desvantagens inerentes ao modo ilhado. Tendo igualmente suas adversidades próprias, a possibilidade de trabalhar nas duas condições é o que torna efetivamente os sistemas de geração distribuída e a microrrede tecnologias elétricas excepcionais com maiores benefícios. A transferência entre modos é, portanto, essencial. Abaixo são vislumbrados alguns ganhos com a conexão à rede e a transição suave.

Quando uma geração distribuída ou uma microrrede e uma rede externa estão interligadas, muito do que se obtém de positivo para ambos é consequência da troca de potências ativa e reativa entre elas com controle sobre estes processos. Fatores técnicos, sociais, econômicos e ambientais estão atrelados a este vínculo energético. A começar pela qualidade da energia. A rede principal melhora os índices destes sistemas e vice-versa (BOLLEN *et al.*, 2009). No primeiro sentido, o sistema tecnológico seguirá o imposto em tensão e frequência de uma rede externa forte e rígida, que pode suprir as necessidades de potência ativa e/ou reativa em falta para manutenção interna de sua qualidade. No último sentido, o excedente pode ser gerenciado e aplicado no sistema elétrico interconectado para correção dos seus indicadores de qualidade, como com correção do fator de potência. Ainda nesta direção, evoca-se a provisão de vários serviços ancilares, podendo aprimorar o desempenho da rede externa substancialmente (SILVEIRA JUNIOR, 2021).

Pela conexão, as unidades de geração distribuída singulares ou internas da microrrede podem ter suas capacidades aproveitadas ao máximo. Se o consumo for baixo, a produção pode ser mantida em seu valor nominal, muitas vezes sua operação mais eficiente, exportando a potência residual. As fontes serão otimizadas (ABDI, BEIGVAND, LA SCALA, 2017; KEANE *et al.*, 2013). Em oposição, a rede externa pode ser considerada uma fonte ilimitada para o sistema local. Segue que, ao importar energia, o equilíbrio energético é assegurado. As cargas estarão alimentadas sempre que se estiver trabalhando interconectado, em situações normais, afastando o uso de táticas perniciosas, como reduções, rejeições e cortes. A importação também melhora as condições de armazenamento de energia interna, fazendo sua manutenção, permitindo com que os dispositivos fiquem disponíveis com toda sua capacidade para posterior utilização no modo ilhado.

Com transição suave, rápida e fácil, são adicionados como benefícios maiores robustez, flexibilidade e confiabilidade (MENG *et al.*, 2016). A transferência entre modos precisa ser

como desejada e não apenas para proteção e segurança. Isto unido ao controle do fluxo de potências permite que manobras sejam feitas em prol dos dois sistemas interligados. A própria manutenção do sistema local é privilegiada na conexão. Se um ou mais dispositivos de geração distribuída estão com defeitos ou se precisam passar por verificações, reparos e substituições, o suprimento temporário pode vir da rede externa. A interconexão e a transição garantem a continuidade do fornecimento de energia, em favor dos usuários, que verão menores tempo e frequência de interrupções, mesmo que o sistema de geração distribuída ou a microrrede sofra com alguma falha em sua produção.

Na economia, a conexão leva à criação de mercados inovadores de eletricidade. A exportação da potência ativa excedente da geração distribuída ou da microrrede pode gerar ganhos aos participantes, seja com venda, seja com obtenção de alguma forma de crédito, como já ocorre com a geração distribuída fixamente conectada atualmente, ou com outros mecanismos novos. A importação pode ser feita para suplementar a alimentação interna, com a possível compra de energia elétrica dos operadores externos. O comércio, porém, não se restringirá à potência ativa. Potência reativa, atuações na qualidade da energia e serviços ancilares podem ser considerados ativos econômicos importantes que podem ser negociados (CHOWDHURY, CHOWDHURY, CROSSLEY, 2009). As transações poderão ocorrer em tempo real, sob contratos planejados ou como estiver em acordo entre as partes, tecnologia local e rede externa. A programação e o uso adequado dos componentes podem levar à redução dos custos marginais, diminuindo o preço da energia paga (DE BRABANDERE *et al.*, 2007b). Horários de ponta, intermediário e fora de ponta e cálculos de perdas podem ser incorporados, otimizando a alocação dos recursos e a comercialização (MADUREIRA, LOPES, 2007). Se estratégias inteligentes de negócios forem aplicadas, todos poderão sair ganhando nestes mercados.

A conexão também pode reduzir impactos ambientais negativos. Além da otimização da potência entregue e dos ativos econômicos, a geração distribuída ou a microrrede com a rede elétrica em que está ligada pode minimizar os recursos naturais utilizados. A partir de informações trocadas entre os dois sistemas sobre emissões e poluição, os controladores podem atuar sobre as fontes locais para aumentar ou reduzir sua geração, dependendo se são menos ou mais prejudiciais para a natureza que seus correspondentes externos. A disponibilidade da matéria prima ou da fonte primária, sendo renovável ou não, são outros dados que podem ser tidos como parâmetros. Em sistemas de geração distribuída ou microrredes com pequenos geradores térmicos, a diesel, a gás natural e microturbinas, por exemplo, a queima de

combustível pode ser reduzida ou mesmo cortada de vez, com a energia faltante suplantada por importação de energia proveniente de usinas mais sustentáveis (HERNANDEZ-ARAMBURO, GREEN, MUGNIOT, 2005). Pela conexão e pelo gerenciamento, mais recursos são preservados e conservados, menor é a poluição em suas várias formas e a emissão de gases do efeito estufa pode ser mitigada, com preferência por tecnologias mais amigáveis ao meio ambiente.

3.2 – Requisitos para Operação em Modo Conectado à Rede

A conexão de sistemas de geração distribuída e de microrredes à rede elétrica congregada aos modos de operação ilhado e com transição suave é um procedimento mais complexo que a mera ligação permanente de unidades de geração distribuída. Assim como acontece com o modo ilhado, a operação no modo conectado tem suas exigências próprias. Não basta que uma chave se feche simplesmente entre a tecnologia local e o sistema elétrico a ser interconectado. Alguns requisitos precisam ser cumpridos. O processo segue uma sequência quase intransigente e ele é apresentado aqui dentro desta ordem típica.

No caso específico de uma microrrede, como ela é formada por múltiplas tecnologias de geração distribuída ligadas entre si em paralelo via conversores estáticos, a passagem para modo conectado exige uma adaptação ou troca coordenada e simultânea dos controladores dos componentes (MICALLEF *et al.*, 2015). Em um sistema singular, apenas ele próprio passa por processo similar. A alteração de modos de operação muda as condições de trabalho dos dispositivos e, por isso, eles precisam ser governados de forma distinta. Uma adequação deve ocorrer, outrossim, nos parâmetros de tensão e de frequência; antes criados internamente, estas referências passam a ser determinadas pela rede externa após a transição.

As próximas etapas são objetivos a serem alcançados, um a um, pelo sistema de geração distribuída ou pela microrrede para que se complete a conexão (HOU *et al.*, 2018, 2017). Para evitar falhas e agilizar a ação de passagem, os controles devem ser preferencialmente unificados para os dois modos de operação, tendo baixa complexidade e pouca reconfiguração. Para que se garanta o ajuste de referências, a sincronização ativa precisa ser feita. Para que a passagem de modo ilhado para conectado à rede (e inversamente) seja segura para pessoas e animais e os componentes não sejam danificados, o próximo passo é um artifício de transição suave. Com a chave de interconexão fechada, o fluxo de potências precisa ser ajustável às necessidades e desejos recíprocos dos participantes de todos os sistemas.

A sincronização é a técnica que visa minimizar ao máximo as diferenças dos critérios de sincronização, a saber, frequência, fase e magnitude de tensão, entre a tecnologia local e a rede interconectada. Ou seja, as fontes de geração distribuída devem ter suas saídas correspondendo fielmente aos parâmetros da rede de distribuição externa em amplitudes e no tempo (CHO *et al.*, 2011). O adjetivo "ativa" se refere à solução automatizada que corrige continuamente os erros por realimentação instantânea. Somente se forem satisfeitos os critérios é que se pode fazer geração distribuída ou microrrede e rede trabalharem em paralelo, sem que ocorram falhas de estabilidade ou de transitórios prejudiciais.

Estando sincronizados, a transição pode se suceder, levando à ligação de fato dos dois sistemas, indo do ilhamento à conexão. Para tanto, fatores específicos precisam ser atingidos para atuação da chave de interconexão (TANG *et al.*, 2015). Com efeito, não se quer que ela feche ou abra inapropriadamente, em momentos que não os corretos, ou que ela oscile entre os dois estados, sem se fixar no programado. Muito menos se espera que, tendo se fechado a chave, fenômenos temporários melindrosos incidam sobre o sistema local ou a rede externa. A transição suave impede estas adversidades. Ela abranda os transitórios de tensão, de frequência e de fase que a passagem é suscetível, rapidamente retornando à conjectura de sincronização. Para sobrecorrentes e correntes de *inrush*, idem. Mais ainda, para ser suave a transição, sem incorrer em problemas dinâmicos, os métodos de controle não podem ser modificados abruptamente.

Finalizadas a sincronização ativa e a transição suave, a chave está fechada e a geração distribuída ou a microrrede conectada à rede. Estando neste estado, os dois lados devem ser constantemente medidos e monitorados, verificando-se os critérios de sincronização e o fluxo de potências para se ter uma operação em conjunto segura e correta (KROPOSKI *et al.*, 2008). Integrando a rede de distribuição, como faz qualquer outro de seus dispositivos, é preciso seguir os índices e estar dentro das faixas de variação regionais de qualidade da energia, exceto quando prescrito para auxiliar e beneficiar mutuamente o desempenho de ambos os sistemas. Os controladores precisarão reconhecer qualquer distúrbio, com métodos de detecção de ilhamento para isolar a geração distribuída ou a microrrede.

Quando a tecnologia local e a rede externa estão completamente interconectadas e em operação normal, o fluxo de potências entre elas precisa ser controlado (KATIRAEI, IRAVANI, 2006). Sem isso, de nada adiantaria a ligação entre os dois sistemas. Trocar potências ativa e reativa, quaisquer que sejam as razões para isso, é o objetivo fundamental da conexão. As motivações dependerão dos usuários e operadores de cada parte e a definição das

metas poderá ser acordada entre elas, mostrando, uma vez mais, o poder da diversidade e da particularidade dos sistemas de geração distribuída e das microrredes. Como mencionado e discutido anteriormente, esse gerenciamento pode englobar o que se pode chamar de funções adicionais de aprimoramento, que são as de qualidade da energia, de serviços ancilares, sociais, econômicas e ambientais.

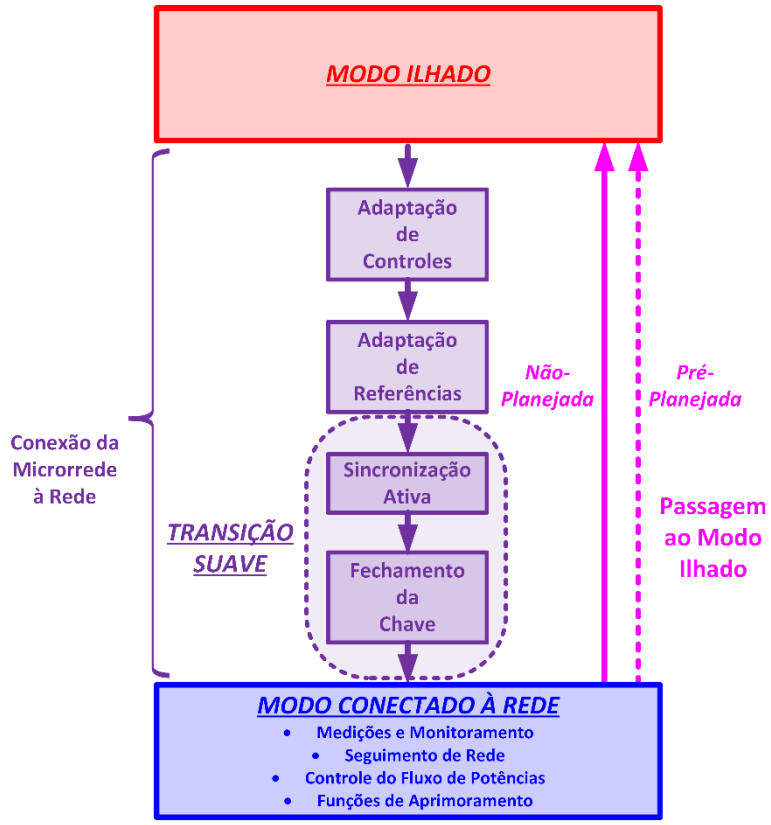
Para retornar ao modo ilhado, duas situações podem se desenrolar e a passagem será diferencialmente nomeada pré-planejada ou não-planejada (KATIRAEI, IRAVANI, LEHN, 2005). Se é do interesse dos usuários locais, dos operadores da distribuição ou de ambos, pode se programar o ilhamento ou ele pode ser feito instantaneamente pela atuação de algum participante. Neste caso, não há nada de grave para danificar componentes ou afetar a segurança dos sistemas. Baixos indicadores de qualidade da energia ou do serviço, interrupções de manobra e manutenção da rede externa, desacordo sobre as tarifas e sobre os níveis de poluição são exemplos de circunstâncias para passagem pré-planejada. A passagem não-planejada, por outro lado, acontecerá quando um desvio crítico ou uma falha não prevista e prejudicial for percebida em um dos dois lados. Limites devem ser estabelecidos para que não se tenha abertura da chave desnecessária ou repetitiva. Os apontadores do ilhamento não-planejado podem ser previamente designados pelos projetistas, desde que se resguarde a segurança de pessoas e animais e a proteção de equipamentos. Normas de qualidade da energia e de anti-ilhamento podem consubstanciar tais escolhas, indicando intensidade e duração dos fenômenos. Ressalta-se que a volta ao modo ilhado é mais simples e direta do que a conexão, bastando retomar a produção interna de referências com controles próprios e abertura da chave sem sincronização.

São estes os requisitos a serem abraçados para operação em modo conectado à rede e transições suaves de sistemas de geração distribuída e microrredes CA. O ciclo completo está esquematizado resumidamente na Figura 3.1.

Algumas observações devem ser feitas quanto ao modo conectado em contraste ao ilhado. Neste último, controles descentralizados e ausência de comunicação são grandes vantagens em se tratando de microrredes. Na conexão, isso não é mais necessariamente verdade. Um controlador central e linhas de comunicação trazem flexibilidade e otimização a esta condição de operação (KATIRAEI, IRAVANI, 2006). Um comando centralizado, com troca de informações com os componentes internos, facilita a coordenação e a administração da microrrede quando dados externos em tempo real estão envolvidos. O controlador central pode processar medições e determinar como cada unidade procederá diante da interconexão, com controle do fluxo de potências e das funções adicionais de aprimoramento. Pode ele também

controlar a chave entre os sistemas e dialogar com os operadores externos. Este mesmo comando ou controlador central estará, obviamente, no interior do sistema de geração distribuída singular.

Figura 3.1 - Requisitos e etapas para conexão de sistemas de geração distribuída e microrredes a uma rede externa.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3 – Elementos para Operação em Modo Conectado à Rede

Existem dois elementos imprescindíveis para que se faça a conexão da geração distribuída ou da microrrede à rede, ambos relativos à sincronização ativa e à transição suave. Um faz a ligação elétrica, virtual e temporal dos dois sistemas e o outro a física, material. O primeiro é o grupo de técnicas de controle para sincronização, enquanto o último é a chave estática de interconexão. Pela relevância deles e por terem atribuição crucial no método de controle proposto, eles serão explicitados resumidamente.

3.3.1 – Métodos de Controle para Sincronização

Já se explicou o que significa uma sincronização ativa. Mas quais são precisamente as abordagens possíveis? E quais são as melhores para os sistemas de geração distribuída e as microrredes? Pela experiência e semelhança, muitas destas estratégias são compartilhadas com as tecnologias de geração distribuída fixamente ligadas à rede, que fazem uso delas para suas

próprias conexões ao sistema elétrico. O básico delas é relatado a seguir e as integradas aos modos de operação na revisão. Há, contudo, diferenças a serem mais bem examinadas.

Em microrredes, a sincronização precisa ser coordenada entre múltiplas unidades de geração distribuída, processo mais complexo. Linhas de comunicação devem existir entre a rede e cada conversor para assegurar a minimização geral de diferenças de magnitude de tensão, de frequência e de fase. A informação deve ser passada rápida e corretamente para cada componente para se evitar erros que acarretem instabilidade ou desconexão. A diferença de tensão é um problema menor, pois ela existe naturalmente pelas distâncias entre os dispositivos e as quedas de potencial pelos cabos. A frequência, mesmo que não divirja pelos meios materiais, pode ser afetada pelos atrasos de tempo da comunicação (COELHO *et al.*, 2016). Ou as linhas de comunicação são de alta largura de banda, ou o controle precisa considerar estes possíveis desvios.

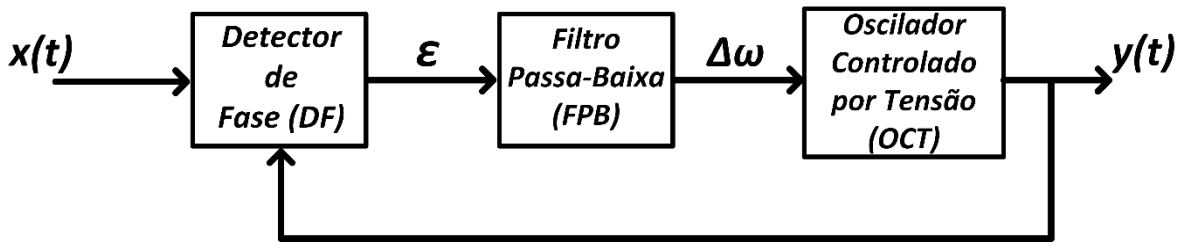
Diferentemente da fonte de geração distribuída permanentemente ligada à rede, o sistema de geração distribuída ou a microrrede não sai de um estado nulo e, sim, do modo ilhado, pelo qual já trabalha com determinadas tensão e frequência. Ora, sua sincronização precisa tomar as referências criadas com seus desvios e levá-las à igualdade com os parâmetros da rede, substituindo aqueles das unidades formadoras de rede pela imposta externamente. A sincronização rápida e correta impele a transição suave, atenuando instabilidades, transitórios críticos e distúrbios de qualidade (D'SILVA *et al.*, 2020). Relembrando que seu controle ainda deve estar ativo durante a conexão, atuando continuamente para que, mesmo após a transferência de modos, a sincronização se mantenha e ela sirva para monitoramento e medição.

Para tecnologias de geração distribuída fixamente conectadas à rede, são empregados costumeiramente três tipos de métodos de sincronização, que muitas vezes são contemporizados aos sistemas de geração distribuída e às microrredes: cruzamento de zero, filtragem de tensão da rede e *Phase-Locked Loop* (PLL) (BLAABJERG *et al.*, 2006). Especificamente para estes sistemas tecnológicos avançados, outros têm sido sugeridos na literatura. No entanto, grande parte incorpora as técnicas PLL ou variações suas. Por isso e por serem amplamente utilizadas na proposta apresentada, elas serão destrinchadas, incluindo algumas específicas como o PLL Clássico e o SOGI-PLL.

Uma técnica PLL é um sistema de controle com realimentação que gera um sinal de saída cuja fase tem erro nulo em relação à entrada, o sinal a ser sincronizado. Extrai-se frequência, fase e amplitude de tensão, conjugando em um único método sincronização,

medição e monitoramento. Uma estrutura genérica de PLL, vista na Figura 3.2, pode ser descrita pela sua entrada $x(t)$ e sua saída realimentada $y(t)$, que passam por um bloco Detector de Fase (DF), onde se obtém o erro ε. Este sinal, por sua vez, é processado por um bloco de Filtro Passa-Baixa (FPB), que pode ser um típico filtro passa-baixa e/ou um controlador PI. Dele se obtém a diferença de frequência $\Delta\omega$, que é usado para criar o sinal de saída pelo Oscilador Controlado por Tensão (OCT) (HSIEH, HUNG, 1996). Como a frequência se torna uma variável acessível pela técnica PLL, muito se pode fazer, como o monitoramento e a medição, além de ser um caminho para detecção de eventos adversos.

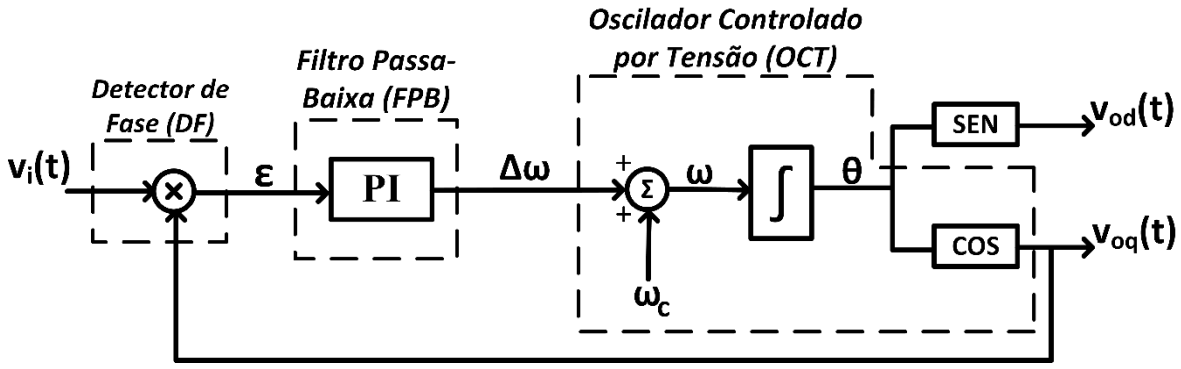
Figura 3.2 - Estrutura genérica de técnica PLL.



Fonte: Adaptada de (SOUZA JUNIOR et al., 2019).

O PLL Clássico ou Convencional é a estrutura mais simples destas técnicas e serve de referência para todo o restante do grupo. Muitas vezes, o que distingue um método de outro é seu DF. No caso do PLL Clássico, ele não passa do produto do sinal de entrada $v_i(t)$ pelo de saída realimentado $v_{oq}(t)$, conforme Figura 3.3 (HSIEH, HUNG, 1996). Sendo estes sinais duas ondas senoidais, com frequências típicas de $60\ Hz$ ou $50\ Hz$, a multiplicação fornece um meio de se descobrir o erro, mas que, ao mesmo tempo, gera um sinal com oscilações no dobro da frequência. No OCT, a frequência ω e a fase θ podem ser extraídas.

Figura 3.3 - Diagrama da técnica PLL Clássico.



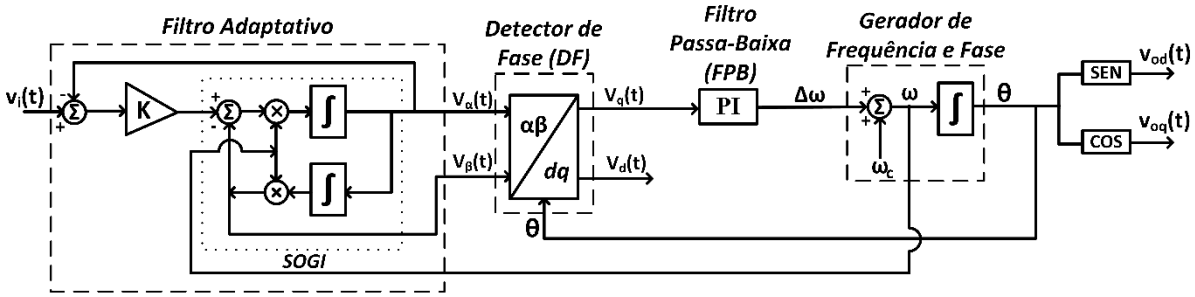
Fonte: Adaptada de (SOUZA JUNIOR et al., 2019).

A configuração do PLL Clássico vem sendo modificada e transformada para se criar outros métodos PLL. As várias soluções buscam acelerar a sincronização, eliminar as

ondulações, minimizar erros e trabalhar em redes distorcidas e desequilibradas (SOUZA JUNIOR *et al.*, 2019; FERREIRA, ARAÚJO, LOPES, 2011; GAO, BARNES, 2012; SILVA *et al.*, 2004; GOLESTAN *et al.*, 2012; KAURA, BLASKO, 1997; KARIMI-GHARTEMANI, IRAVANI, 2001). Basicamente eles são divididos em duas classificações de técnicas PLL: Gerador de Sinal em Quadratura (GSQ) e Filtragem Adaptativa (FA). No primeiro, um sinal em quadratura sobre o de entrada é produzido junto a uma transformada de Park ($\alpha\beta - dq$) como DF para resolver as dificuldades do PLL Clássico. No último, filtros especiais são aplicados para ajustar os parâmetros em tempo real.

Estudos comparativos mostram que as técnicas PLL FA têm desempenho superior com grandes vantagens, como alta precisão e exatidão (SOUZA JUNIOR *et al.*, 2019). Por sua concepção e suas características positivas, pode ser considerado uma boa escolha para sincronização ativa de sistemas de geração distribuída e microrredes. Especificamente, a de maior destaque é o método SOGI-PLL, cujo diagrama de blocos é visto na Figura 3.4 (CIOBOTARU, TEODORESCU, BLAABJERG, 2006). Nele, dois sinais em quadratura são gerados em um sistema ortogonal e a estrutura SOGI serve como filtro adaptativo da frequência realimentada. Os atrasos são reduzidos ao máximo. As oscilações são mínimas.

Figura 3.4 - Diagrama da técnica SOGI-PLL.



Fonte: Adaptada de (SOUZA JUNIOR et al., 2019).

3.3.2 – Chave Estática de Interconexão

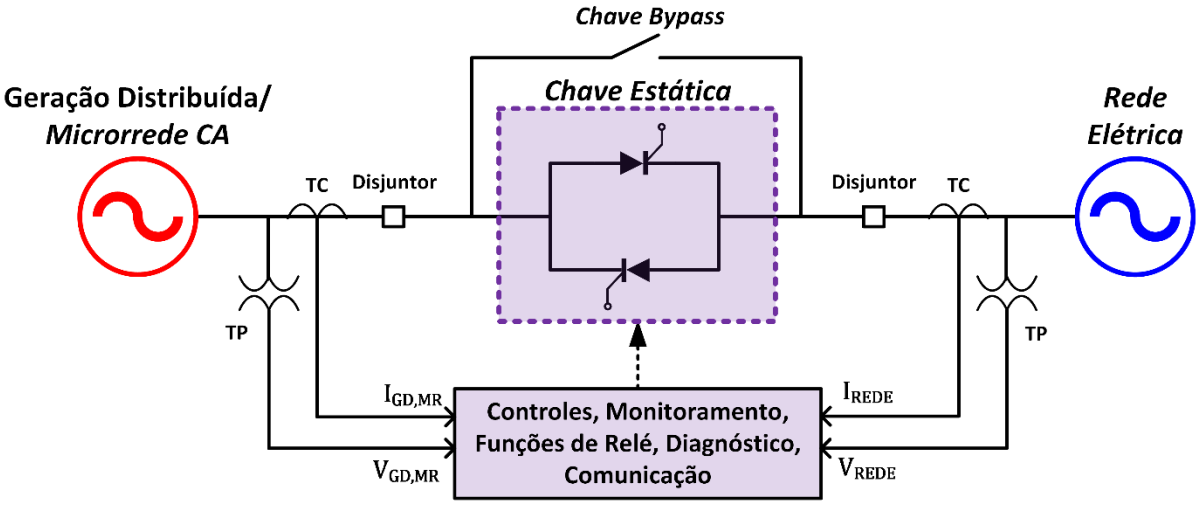
A chave de interconexão, abrindo e fechando, conecta ou desconecta concretamente o sistema de geração distribuída ou a microrrede a uma rede elétrica externa. Tradicionalmente se usa a versão mecânica para operações similares a esta. Contudo, há muitos benefícios no emprego das chaves estáticas para as necessidades destes sistemas tecnológicos avançados, tais como: velocidade altíssima de atuação (praticamente imediata), ausência de partes móveis e seus consequentes desgastes, maior vida útil, tamanho reduzido, leveza, baixo custo, fácil instalação, maior controle, entre outros (AHMED, 2000).

Quando não-planejada, a passagem ao modo ilhado precisa ser a mais rápida possível para se escapar dos danos causados pelas faltas ou mitigá-los. Na situação planejada, o requisito é menor, mas é vantajoso que o retorno se faça prontamente para se cumprir o programado. Numa reconexão, o fechamento imediato da chave é importante para que não se tenha erros na sincronização e transitórios elevados. As chaves mecânicas atuam em 20 a $100\,ms$. Já as chaves estáticas podem responder em um quarto de ciclo elétrico, se composta de tiristores, ou em $100\,\mu s$, se de componentes IGBT (KROPOSKI *et al.*, 2007). Nestas velocidades, torna-se imperceptível a transferência entre modos para tecnologias de geração distribuída e cargas. Somado a um controle eficiente, a transição se torna efetivamente suave. Os sistemas locais têm ganhos em flexibilidade e confiabilidade. A entrada ou saída do modo conectado se efetua em qualquer instante desejado e não apenas em momentos emergenciais ou críticos.

A chave estática a tiristores predomina as escolhas por suportar potências maiores, ser de menor custo e ser suficiente para as atividades nos sistemas de geração distribuída e nas microrredes. Em si, ela é formada apenas por dois tiristores em antiparalelo. A estrutura completa é, entretanto, maior e pode ser visualizada na Figura 3.5. Uma chave mecânica é acoplada à chave estática em paralelo (*bypass*) e disjuntores em série para proteção dos semicondutores e manutenção. Outros dispositivos são utilizados, como circuitos RC *snubber*, varistores e fusíveis de alta velocidade, para inibir sobretensões e sobrecorrentes internamente (MAO *et al.*, 2012). Além destes aparatos físicos centrais, a chave estática ainda incorpora elementos de medição, como transformadores de potencial (TP) e de corrente (TC) em ambos os lados. Um DSP integrado pode exercer funções de relé, comunicação, controle, monitoramento e diagnose pelo recebimento dos sinais de corrente e de tensão (KROPOSKI *et al.*, 2008). A análise interna feita pelos controladores precisa levar a uma boa governança da chave, pois, caso contrário, fechamentos e aberturas falsos ou desnecessários, repetidos e momentâneos podem ocorrer, o que constitui uma falha (KLAPP, VOLLKOMMER, 2007).

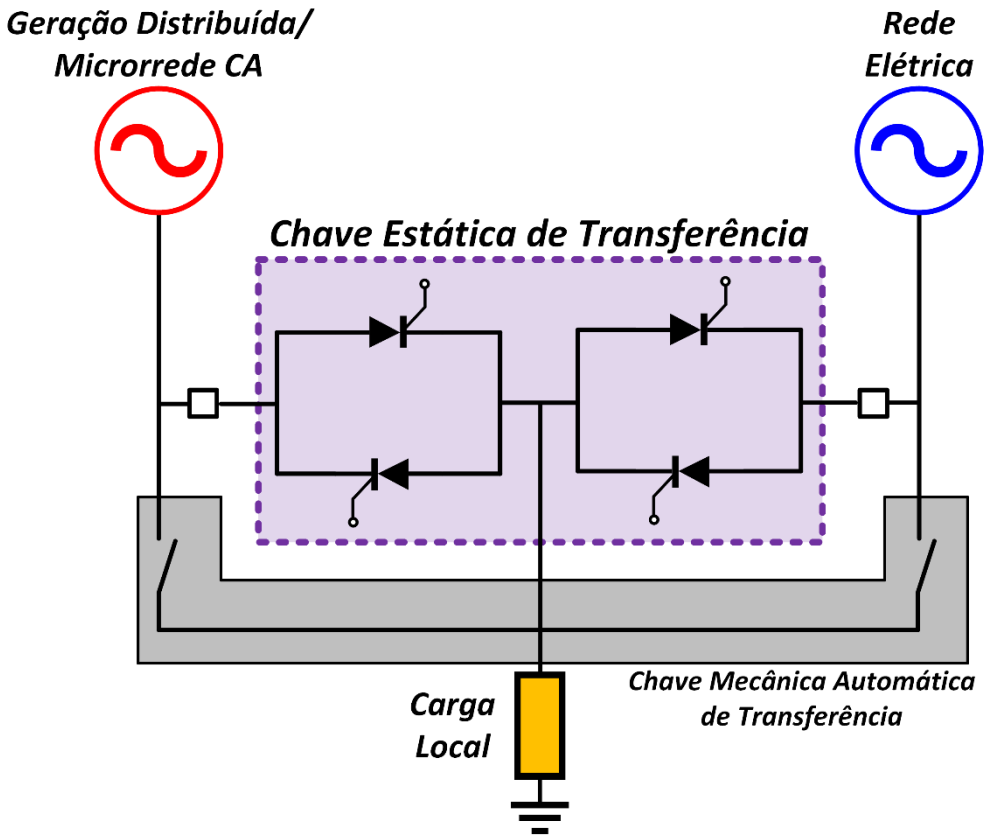
Um modelo alternativo pode ser usado dando ainda mais flexibilidade e confiabilidade. Esta chave estática é chamada de interconexão e transferência (SCHWARTZENBERG, DE DONCKER, 1995). Sua construção, mostrada na Figura 3.6, duplica a chave estática com mais um conjunto de tiristores em antiparalelo e altera as conexões com uma chave mecânica automática de transferência. Nesta configuração, em microrredes, é possível isolar separadamente as unidades de geração distribuída e a rede elétrica das cargas locais. Assim, se toda a produção interna parar, o consumo continua a ser alimentado via sistema elétrico externo. O restante da estrutura é igual à anterior.

Figura 3.5 - Chave estática de interconexão para sistemas de geração distribuída e microrredes.



Fonte: Adaptada de (SOUZA JUNIOR, FREITAS, 2022b; SOUZA JUNIOR, 2020).

Figura 3.6 - Chave estática de interconexão e transferência para sistemas de geração distribuída e microrredes.



Fonte: Adaptada de (SOUZA JUNIOR, FREITAS, 2022b; SOUZA JUNIOR, 2020).

3.4 – Revisão de Sistemas de Controle para Modo Conectado à Rede e Transição Suave

Cada etapa de operação de sistema de geração distribuída ou de uma microrrede é sustentada pela ação de um método de controle. Entendidas as outras características principais do modo conectado à rede e da transição suave, resta elucidar as técnicas de controle que os

amparam. Compreender as existentes e divulgadas na literatura amplia o conhecimento sobre o próprio funcionamento destas tecnologias. Estudá-las auxilia no desenvolvimento de novas estratégias, traçando-se os caminhos mais vantajosos. Por esses motivos, uma revisão sobre o tema é feita.

Uma pesquisa destas, exaustiva e crítica, contemplando desde artigos seminais até o que há de mais recente no estado da arte, foi realizada e publicada pelo autor (SOUZA JUNIOR, FREITAS, 2022b). No trabalho, cerca de 50 técnicas de controle para modo conectado à rede e transição suave foram examinadas profundamente. Este assunto é pouco explorado em relação ao modo ilhado dentro dos modos de operação, que possui vários artigos publicados, incluindo diversos de revisão (HAN *et al.*, 2017; ANDISHGAR, GHOLIPOUR, HOOSHMAND, 2017; MOHD *et al.*, 2010; HAN *et al.*, 2015). As razões notadas para tanto são históricas, de realidade da aplicação, de dificuldades operacionais e de possível oposição de distribuidoras. Não obstante, é pela execução de todos os estágios de operação dos sistemas de geração distribuída e das microrredes que se atingem todos os seus potenciais. Por já estar disponível a publicação contendo todos os detalhes, mas tendo em vista a relevância deste tópico, uma versão resumida desta revisão, com explicações mais diretas e breves, é apresentada neste documento.

Observa-se que a maioria das publicações encontradas sobre os três modos de operação, e não apenas a ligação permanente das unidades à rede elétrica, versa sobre microrredes. Por isso, as reflexões e as discussões são concentradas sobre estas tecnologias. Todavia, quase todas servem para sistemas de geração distribuída, com exceção das particularidades das microrredes, que são devidamente apontadas. Por exemplo, por apresentarem múltiplos conversores em paralelo trabalhando juntos, a coordenação é importante e, portanto, ressaltada. Outro caso é o de unidades dedicadas. É evidente que, em sistemas de geração distribuída, a tecnologia é totalmente dedicada, mas, em microrredes, podem ser designados componentes adicionais além das fontes com seus conversores somente para realizar a conexão, o controle de fluxo de potências, entre outras tarefas.

Como se fez para o modo ilhado, os métodos de controle de modo conectado à rede e de transição suave, contando a sincronização e o gerenciamento do fluxo de potências, serão divididos em “não-baseados em *droop*” (ND) e “baseados em *droop*” (BD). Esta, mais uma vez, não é uma classificação rigorosa e apenas visa organizar, para analisar melhor, as técnicas de acordo com a predominância em sua composição. Sublinha-se que os sistemas de controle BD são preeminentes dentre as soluções propostas, ocupando três quartos do total das estratégias investigadas.

3.4.1 – Sistemas de Controle Não-baseados em *Droop* (ND)

Ideias passadas do modo ilhado são retomadas. A abordagem "líder-seguidor" é usada em todos os modos de operação, com os "líderes" unidos a técnicas PLL governando a atuação das demais unidades, em (YANG *et al.*, 2011). Já em (ASHABANI, MOHAMED, 2012), "sincronversores" modificados são empregados, sem alteração de controles para os modos. Os problemas antigos são igualmente restabelecidos, como baixa confiabilidade, alta complexidade e instabilidade.

Controles para estruturas específicas foram sugeridas em (MISHRA, RAMASUBRAMANIAN, SEKHAR, 2013; SINGH, PATHAK, PANIGRAHI, 2017). Na primeira referência, a arquitetura é de um gerador a diesel com um sistema fotovoltaico como fontes. Na última, a configuração é de um arranjo fotovoltaico, turbina eólica, sistema de baterias e gerador a diesel. Para ambos, a metodologia de controle é completamente designada para as especificidades de cada configuração.

Inversores dedicados também foram propostos na literatura. Em (HARIRCHI *et al.*, 2015), um inversor de conexão à rede inteligente foi elaborado com um controlador unificado para se conseguir sincronização e transição suave. Nesta abordagem, cada microrrede precisaria de um conversor adicional e específico de interface com a rede externa. O sistema "Agente Inteligente de Conexão" (ICA – *Intelligent Connection Agent*) é desenvolvido em (ROCABERT *et al.*, 2011). Ele é composto por um inversor fonte de tensão agregado a uma chave controlada para conexão e desconexão no ponto de acoplamento. O restante da microrrede deve ser formado por inversores fonte de corrente e as cargas. Similarmente, a solução de nome "Condicionador Unificado de Qualidade da Energia" (UPQC - *Unified Power Quality Conditioner*) congrega um método de controle e um equipamento físico completo de interface com a rede fazendo as funções de conexão e transição para toda a microrrede (KHADEM; BASU; CONLON, 2014). A dependência de unidades exclusivas de interface é um problema grande de confiabilidade e flexibilidade, além de se ter custo elevado e capacidade limitada em microrredes.

Muitas outras técnicas fazem uso de controladores de tensão em modo ilhado e de corrente no modo conectado à rede ou formas parecidas. Em (YAO, XIAO, YAN, 2009), as referências são ajustadas e podem ser zeradas conforme o tipo de controle requerido nesse sentido. Para o método de (CHEN *et al.*, 2009), na conexão, controladores P+Res são usados e, no ilhamento, malhas duplas de tensão, presentes em ao menos uma unidade, permitem o

compartilhamento de carga. Em uma microrrede particular, a solução de (TALAPUR *et al.*, 2018) faz com que microrrede e rede troquem apenas potência ativa, restringindo o modo conectado, onde todas as unidades de geração distribuída trabalham como fontes de potência constante. O método de controle de (BALAGUER *et al.*, 2010) é feito para um único inversor visando aplicação em sistema de geração distribuída ou microrrede. Para cada modo, um controle se aplica. No modo conectado, de controle de corrente, a saída tem valor constante e, no modo ilhado, de controle de tensão, a regulação é fixada com compensadores PI mais compensação de corrente. Unidades adicionais funcionarão apenas em modo de controle de corrente. Na estratégia de (TRAN *et al.*, 2013), as referências de corrente são calculadas pelo erro entre as potências desejada e medida com PI no modo conectado. No oposto, a tensão da carga é diretamente controlada. Distingue-se dos outros pelos controladores terem saídas ligadas, evitando mudanças abruptas.

Esquemas mais elaborados a partir da configuração de controle de corrente para conexão e de tensão para ilhamento também foram apontados na literatura. Para o inversor de (WAI *et al.*, 2012), além de controles típicos de cada modo, incorpora-se um controle totalmente adaptativo de modo deslizante (ATSMC – *Adaptative Total Sliding-Mode Control*) para aprimoramento do desempenho. Em (LIU, LIU, 2013), uma técnica de controle indireto de corrente é oferecida. A corrente é controlada pela regulação da tensão do capacitor do inversor. Há malhas de tensão de capacitor, de corrente de rede e de PLL, além de limitadores. A carga local fica em paralelo com o filtro capacitivo. Diversamente, uma estratégia de controle unificada é elaborada em (DELGHAVI, YAZDANI, 2009, 2012). Não há modificações e ela independe do modo de operação. Sua estrutura se divide em quatro partes: corrente, amplitude, frequência e potência, cada uma regulando seus parâmetros próprios.

3.4.2 – Sistemas de Controle Baseados em *Droop* (BD)

Nos trabalhos (PIAGI, LASSETER, 2006; LASSETER, 2007), uma equação *droop* adicional é proposta, além das de $Q - E$ e $P - \omega$. A nova relação fluxo de alimentador e frequência, $F - \omega$, presente em tecnologias de geração distribuída selecionadas, de inclinação positiva, controla o fluxo do alimentador por deslocamentos horizontais para que a rede externa veja a microrrede como carga constante e o consumo interno seja suprido apenas pelas unidades de geração distribuída locais. A relação $Q - E$ em nada afeta o modo conectado, enquanto a $P - \omega$ é atuante nele, com controle do fluxo de potência ativa entre microrrede e rede por meio

de pequenas mudanças na frequência. Sincronização e transição não são comentadas. Controle de reativo na conexão idem.

Em (HERNANDEZ-ARAMBURO, GREEN, MUGNIOT, 2005), o método chamado de compartilhamento dinâmico de potência é similar ao anterior, com uso da característica $P - \omega$ com desvios em frequência para controle de potência ativa, dessa vez com uso de compensadores PI para tanto e aplicada também para transição. Os autores de (AHN *et al.*, 2010) reapresentam o controle $F - \omega$, mas somando a ele um controlador PI, limitadores e um algoritmo para modificar seus coeficientes, dando desvios como se faz com $P - \omega$. O controle de reativos mais uma vez não é contemplado. O problema deste e das demais estratégias é que agir sobre a frequência para indiretamente agir em potência pode resultar em instabilidade e erros.

Uma chave de interconexão inteligente é desenvolvida por (GUERRERO *et al.*, 2009) para realizar monitoramento e sincronização. No modo ilhado, o método de controle *droop* convencional é adotado. No modo conectado, ele é modificado com compensadores PI para controle do fluxo de potência com a rede externa via referências de equilíbrio nas equações de *droop*. A perspectiva hierárquica é tomada em (GUERRERO *et al.*, 2011; VASQUEZ *et al.*, 2010; GUERRERO *et al.*, 2012a), sendo nível primário formado por método de controle *droop* convencional e nível secundário responsável por restauração e compensação, via PI, de frequência e de tensão e sincronização, através de um PLL entre microrrede e rede externa com termo adicional $\Delta\omega$. O terciário comanda o fluxo de potências entre microrrede e rede externa por compensadores PI sobre erros de potências desejada e medida com atuação nas referências de equilíbrio, limitados, de frequência e tensão. Novamente, atuar sobre frequência e tensão para controle indireto de potências pode causar falhas. Adicionalmente, neste caso em particular, o gerenciamento do fluxo de potência com a rede é total e não individualizado por inversor, o que exclui suas especificidades.

Uma estrutura hierárquica de (HOU *et al.*, 2018, 2017) é adotada. O nível primário é o método de controle *droop* convencional. O secundário faz compensações de frequência e de tensão por consenso. O terciário, por fim, determina sinais de compensação de frequência $\Delta\omega^*$ e de tensão ΔE^* diferentes para cada situação, todos por controladores PI. Em ilhamento, eles servem para corrigir os desvios. Em sincronização ativa, ele corrige as diferenças existentes nos dois lados da chave de interconexão. No modo conectado, é a diferença entre potência desejada e medida que é corrigida para controle do fluxo de potências. Outra arquitetura hierárquica é

proposta em (MICALLEF *et al.*, 2015). No controle primário, há unificação para os dois modos de operação, com características *droop* $P-\theta$ e $Q-E$ modificadas para tanto com compensadores. O nível secundário restaura frequência e tensão e ajusta as condições para conexão. A sincronização é por redução de diferenças de ângulo de fase com auxílio de PLL.

Outras soluções distintas, mas ainda sob auspício do método de controle *droop* para ilhamento, foram sugeridas. Em (VASQUEZ *et al.*, 2009), a impedância da rede é estimada para adaptação dos parâmetros de *droop* para transição e controle do fluxo de potências. Erros estarão sempre presentes, de acordo com os autores, seja por atrasos, seja pela ação do sistema. No modo conectado de (JIN *et al.*, 2012), os inversores passam a atuar em controle fonte de corrente. A sincronização é feita em duas etapas sequenciais, uma de frequência e outra de fase, com adição de desvios neles por compensadores PI e PLL. Já em (RIZO *et al.*, 2012), um controlador de tensão adicional com PLL e integrado às relações *droop* permite a conexão. Em cada modo de operação, a referência deste controlador é adequada, vinda das equações *droop* ou de medições da rede.

Em (LEE, JIANG, CHENG, 2011, 2013), dois controladores são propostos, sendo um autônomo, por unidade de geração distribuída, e outro principal. O primeiro inclui controladores de tensão e de corrente, compartilhamento baseado em *droop* e sincronização. O último faz detecção, cálculos e medições de microrrede e rede externa, comunica com os componentes e comanda a sincronização (PLL) e a conexão. Compensadores PI atuam nas referências para cada etapa. Não se fala sobre o fluxo de potência entre os dois lados. A microrrede de (KANELLOS *et al.*, 2005) é específica, com arranjo fotovoltaico, turbina eólica e sistema de baterias. É este que emprega equações *droop* convencionais, enquanto os outros dois se valem de controladores próprios. Para conexão, os valores são adaptados e referências fixadas no método de controle *droop*. Além da particularidade de arquitetura, problemas de estabilidade estão presentes pelas oscilações naturais das fontes renováveis. Outro caso específico é realizado para sistemas UPS de configuração especial, tendo sistema de baterias, conversor CC-CC bidirecional e inversor bidirecional, com dois controladores principais em (ABUSARA, SHARKH, 2011; ABUSARA, GUERRERO, SHARKH, 2013). Um serve para controle da tensão do barramento CC e outro para fluxo de potência. Este último é o que interessa mais. No ilhamento, são as relações *droop* convencionais as aplicadas, enquanto na conexão, os coeficientes *droop* são substituídos por coeficientes de controladores PI (adição de termo integral) de *droop*, fazendo a saída ser igual à demanda de potência. A sincronização é por detecção de cruzamento de zero.

Os autores de (GAO, IRAVANI, 2008) propõem um novo conversor controlado por tensão, com controle de frequência e tensão em modo ilhado e de fluxo de potência na conexão, além de outras funções necessárias no restante da operação. No ilhamento, o controle se restringe às equações *droop* convencionais. Na condição inversa, a frequência é controlada pela adição de uma expressão com constante de inércia virtual e termo de amortecimento à relação $P - \omega$ e a tensão por inclusão de uma expressão integral da diferença de reativos de referência e de medição à característica $Q - E$. Limitadores e PLL são outros adicionais para se ter sincronização e transição suave.

Uma unidade dedicada reaparece em (ARAFAT, ELRAYYAH, SOZER, 2014), mas agora com o método de controle *droop* convencional envolvido. Todos os conversores, exceto a exclusiva "unidade de despacho" (DU – *Dispatch Unit*), usam a técnica sempre. A DU também a usa no ilhamento. Porém, na conexão um método de controle de corrente é aplicado. Na transição, a DU faz compensações nas potências, injetando ou absorvendo, para igualar os níveis de frequência e de tensão com a rede externa. Nada se fala sobre variações na microrrede, fluxo de potência com a rede e falhas externas. Em (JIA, LIU, LIU, 2012), as equações *droop* convencionais servem na transição suave, sem ser mencionado o controle do fluxo de potência. Além delas, um controlador de tensão e o método em si para transferência suave são elaborados. No processo de sincronização, as características *droop* são ajustadas. As potências de equilíbrio são controladas de forma a, indiretamente, corrigir frequência e tensão até que sejam as mesmas da rede externa.

O método de controle *droop* convencional é abandonado em (KIM *et al.*, 2011) e substituído por uma versão descentralizada e adaptativa, que não incorre em modificações para mudanças de modo de operação. A unidade de geração distribuída mais próxima do ponto de acoplamento recebe informações da rede externa, enquanto o resto monitora apenas o barramento local. A primeira ainda recebe dados de um método PLL e tem blocos de cálculo de potência. Na sincronização, ela muda seus parâmetros de tensão para que o barramento fique em igualdade com a rede e as outras tecnologias de geração distribuída seguem daí. As expressões adaptativas de *droop* são alteradas com ganhos derivativos e integrais.

Os autores de (KULKARNI, DOOLLA, FERNANDES, 2017) apresentam um controlador que usa equações *droop* convencionais em modo ilhado e injetam máxima potência no modo conectado. A transição é por PLL na reconexão e por distúrbios no ângulo de fase do controle *droop* na desconexão. Os sinais de controle são auxiliados por máquinas de estado. O

método de controle *droop* convencional é modificado em (MAJUMDER *et al.*, 2008). Os erros entre medições e referências passam por controladores de realimentação, um de saída de tensão para modo ilhado e outro de estado para modo conectado.

Além do método de controle *droop*, um bloco de modo de sustentação (*riding-through*) é adicionado para se ter transição suave em (HU *et al.*, 2011). Para mitigar transitórios, um controle de corrente zero é aplicado. Uma técnica PLL extrai o ângulo de fase para correção nas equações de *droop*. Uma indutância virtual suprime correntes de *inrush*. Já na conexão de fato, o controlador retorna ao método de controle *droop* convencional, o que pode causar problemas no controle do fluxo de potência. Também se valendo da solução convencional, os autores de (ISSA *et al.*, 2017a, 2017b) fazem um sistema de controle para transição suave. Para isso, a tensão do barramento CC é realimentada como parâmetro das equações *droop*. Um controlador supervisório e a chave comandam a operação e compensadores PI auxiliam na criação de referências para suprimento.

Funções de formadores de rede e de seguidores de rede são sintetizados no controlador proposto por (WANG *et al.*, 2015). Nas primeiras, o método de controle *droop* convencional serve ao modo ilhado. Nas últimas, a técnica é transformada para controlar indiretamente a potência desejada para troca com a rede externa por equações de referencial *dq* relacionadas às correntes. Na transição suave, o controlador multicamadas é modificado por técnicas de modelagem de planta inversa para se ter compensações de realimentação e derivativas, eliminando ruídos. Já em (KAHROBAEIAN, MOHAMED, 2012), toda a estratégia se funda nas equações *droop* convencionais, independentemente do modo de operação. Para potência ativa, a única alteração se dá na sincronização e na transição, nas quais os desvios com a rede de frequência e de fase (PLL) são inseridos. Para potência reativa, no modo conectado, para regulação da tensão, um controlador PI modifica o respectivo coeficiente *droop*.

Um grupo de estratégias de controle é apresentado em (ASHABANI, MOHAMED, 2014). Todos os modelos se baseiam invariavelmente no método de controle *droop*. As diferenças residem nos parâmetros das equações e nas relações desenvolvidas. Sobre potência ativa se usa frequência e/ou ângulo. No lado da tensão, existem os de controle de tensão constante no barramento e controle de corrente ou de tensão para potência reativa constante. Algumas equações *droop* substituem as potências por correntes em referencial *dq* seguindo a estrutura convencional. Observando as falhas do método de controle *droop* convencional no modo conectado, como flutuações, sensibilidade e imprecisões, os autores de (DENG *et al.*, 2016) propõem modificações direcionadas. Realimentação de frequência e tensão por meio de

PLL é proporcionado como útil para mitigar flutuações. A precisão de reativos se dá com controle de amplitude de tensão adicional.

Uma estrutura hierárquica em referencial estacionário é sugerida em (VASQUEZ *et al.*, 2013). O modo ilhado tem como controle primário as equações *droop* convencionais (com termos transitórios) e impedância virtual. O nível secundário restaura frequência e tensão. Destaque vai, contudo, para a sincronização, feita por uma técnica $\alpha\beta$-PLL, que provê uma frequência de sincronização ω_{sinc} para ajuste via controle secundário deste parâmetro. Este método toma as tensões da rede e da microrrede em $\alpha\beta$ e faz a subtração do produto cruzado destes termos (seu valor médio nulo indica o término da sincronização), com resultado passando por filtro passa-baixa e compensador PI para se ter ω_{sinc}. Nada é discutido sobre os processos após o fim da sincronização.

As equações *droop* convencionais são trocadas pelas de relações inversas de inclinação positiva $P - E$, com uma característica nova $E - E_{CC}$ (E_{CC} a tensão no barramento CC da unidade de geração distribuída), e $Q - \omega$ em (VANDOORN *et al.*, 2011, 2013). Esta estratégia vale para microrredes com linhas predominantemente resistivas. Para sincronização, usa-se apenas um PLL. De acordo com os autores, tendo um limitador sobre a tensão, a frequência converge para a da rede para conexão. Indutores virtuais são empregados em (GUO, SHA, LIAO, 2014) para que se faça transição suave. Projetados para melhorar resposta transitória e mitigar distúrbios, eles são a única adição ao método de controle *droop* convencional. A sincronização é realizada, mas os autores não explicam como. O modo conectado nem é discutido.

Em (MOHAMED, RADWAN, 2011), o método de controle *droop* adaptativo é retomado. Aproveita-se dos termos suplementares dele para se ter transição suave. Para evitar quaisquer distúrbios, controlador ressonante e controlador de chaveamento baseado em superfície deslizante fazem parte da estrutura proposta. Nada se comenta sobre controle do fluxo de potências. Em ilhamento, equações *droop* convencionais integram a técnica de (LI, VILATHGAMUWA, LOH, 2004). Para sincronização, os autores se aproveitam dos desvios típicos para correção até os valores da rede externa. Dois controladores PI são somados às malhas de potência que dão os erros de fase $\Delta\delta$ e de tensão ΔE, em consonância com a sincronização. No modo conectado, a relação tradicional $P - \omega$ basta. Para $Q - E$, não. Um compensador PI precisa ser incorporado de modo a se controlar a potência reativa.

A estratégia de (MEEGAHAPOLA *et al.*, 2014) envolve o método de controle *droop* convencional com uma microrrede de arquitetura específica com arranjo fotovoltaico e sistema de baterias. Baseado principalmente no equilíbrio energético, considerando as variações da fonte solar e do balanço de carregamento e descarga do armazenamento, os controladores de cada um são intercambiáveis entre equações *droop* e compensadores PI, a depender da capacidade instantânea. No modo conectado, as correntes também são controladas por referencial *dq* para se ter controle sobre o fluxo de potências. Em (CHO *et al.*, 2011), um controlador central toma decisões e age sobre as medições. Unidades despacháveis de geração distribuída operam sob equações *droop* no ilhamento. O controle de sincronização ativa é como um controle secundário hierárquico, corrigindo desvios de frequência, fase e amplitude de tensão pelas diferenças encontradas com a rede externa pelo controlador central e por meio de compensadores PI. No modo conectado, o fluxo de potência é gerenciado via controladores PI, idem.

Uma outra estratégia para sincronização ativa é proposta por (TANG *et al.*, 2015). Os controles são para sincronização ativa aprimorada fundamental e de distorção ativa simples. No modo ilhado, equações *droop* convencionais são usadas. O processo de sincronização ocorre como nível secundário. Um bloco de verificação de sincronização é construído com parâmetros de comparação para adequação principal e vetores de diferenças harmônicas para limitação da distorção. O procedimento todo é similar a um PLL com um controlador PI.

Em (SERBAN, 2018), um inversor líder baseado em armazenamento de energia via supercapacitor é empregado para administrar toda a operação da microrrede. O restante de inversores funciona como fontes de corrente, recebendo informações de frequência e tensão para correção de seus parâmetros. Para o inversor líder, são vários os controladores. Para geração de referência de tensão, o método de controle *droop* é usado. Para outras referências, controladores PI com compensadores harmônicos e malha de amortecimento ativo. No modo conectado, o controle de corrente é ativado com PLL e a potência é gerenciada por PI.

As mais diversas técnicas modernas têm sido incorporadas ao método de controle *droop* para realizar conexão à rede e transição suave. Teoria moderna de controles embasa a proposta de (LOU *et al.*, 2020), onde realimentação dinâmica com modelo de referência e observador de distúrbios são integrados. Ainda sob este campo, em (DAS, GURRALA, SHENOY, 2016), a estratégia inclui Regulador Linear Quadrático (LQR – *Linear Quadratic Regulator*) *bumpless* para transição suave e controlador de realimentação de estados para troca de controles na mudança de modos de operação, mesmo com referências distintas. Por fim, o método de

controle de (QIAN *et al.*, 2020) incorpora Sistemas de Posicionamento Global (GPS – *Global Positioning Systems*) para controle de frequência fixa, atuando sobre a sincronização da microrrede.

3.4.3 – Discussão

A revisão deixa claro quais são as dificuldades encontradas em projetar e aplicar uma estratégia de controle completa para conexão de sistema de geração distribuída ou uma microrrede a uma rede externa e fazer transições suaves entre estes sistemas. Ela fornece, ao mesmo tempo, direções para se chegar a operações aprimoradas. Apreendendo as vantagens e as desvantagens, soluções melhores podem ser elaboradas.

Ficou evidente como existe uma forte preferência pelo método de controle *droop*, o que justifica a classificação. Apesar do consenso sobre os vários benefícios absolutos da técnica em modo ilhado, sua forma convencional não tem desempenho similar no modo conectado e na transição sem modificações ou recursos adicionais, exibindo imprecisões e flutuações (DENG *et al.*, 2016). Muitos autores recorrem a ela no ilhamento, mas trazem alterações ou controladores suplementares nas outras condições.

O primeiro problema verificado em grande parte dos métodos de controle é o elevado nível de complexidade, sejam eles ND ou BD. Ele pode obstar a implementação e impactar a velocidade e a precisão dos processos. É o caso das técnicas e sistemas de controle modernos (DAS, GURRALA, SHENOY, 2016; QIAN *et al.*, 2020) e das estruturas hierárquicas (GUERRERO *et al.*, 2011; VASQUEZ *et al.*, 2010; GUERRERO *et al.*, 2012a), que são apenas alguns grupos. A aplicação de controladores PI é mais um ponto a se notar neste sentido. A correta calibração de seus parâmetros e a falta de adaptação às mudanças frequentes dos sistemas de geração distribuída e da microrrede, tecnologias locais altamente dinâmicas, podem incorrer em falhas.

Enquanto a complexidade pode talvez ser considerado um problema secundário, de menor importância, o segundo, da orientação dos controladores, é crucial. Usualmente, controle de tensão é empregado no modo ilhado e de corrente na conexão. Vários artigos relatam falhas neste procedimento. A troca, apesar de parecer um recurso natural diante das conjunturas, exibiu, em resultados, distúrbios internos, transitórios elevados e redução da confiabilidade (WANG *et al.*, 2015; KAHROBAEIAN, MOHAMED, 2012; SERBAN, 2018). Um sistema de controle unificado parece ser, assim, a melhor resposta.

Dois impasses de ordem prática surgem em algumas propostas. O primeiro é a apresentação de técnicas para fontes e arquiteturas específicas de sistemas de geração distribuída e de microrredes, como em (MISHRA, RAMASUBRAMANIAN, SEKHAR, 2013; SINGH, PATHAK, PANIGRAHI, 2017; YAO, XIAO, YAN, 2009; MEEGAHAPOLA *et al.*, 2014). Foi visto que a diversidade de estruturas é um enorme benefício. Depender do arranjo e da composição delas não só torna intensamente inexecutável as soluções, como se contrapõe à própria essência das tecnologias. Uma estratégia universal ou próxima disso é mais viável e necessária.

O segundo se dá ainda nas pesquisas. Para alguns, o método de controle foi inteiramente projetado ou somente testado com apenas um inversor e não múltiplos em paralelo como em uma microrrede, vide (LIU, LIU, 2013; RIZO *et al.*, 2012; HU *et al.*, 2011; VASQUEZ *et al.*, 2013). Os resultados podem ser distintos em cada situação e isso deve ser ponderado. Verificar e validar os controladores com mais de uma unidade de geração distribuída é relevante. No entanto, o alto custo e a complexidade na construção de uma microrrede em protótipo ou na realidade abonam essa avaliação parcial.

Em termos de confiabilidade, há quatro questões a serem levantadas. A primeira é a da adoção de dispositivos físicos dedicados para conexão e outras funções (HARIRCHI *et al.*, 2015; ROCABERT *et al.*, 2011; KHADEM; BASU; CONLON, 2014). Qualquer dano neles pode colapsar a geração distribuída e toda a microrrede. A segunda, das metodologias líder-seguidor, é uma circunstância com consequências parecidas (YANG *et al.*, 2011; CHEN *et al.*, 2009). A terceira está na presença de fontes de geração distribuída variáveis e intermitentes, como sistemas fotovoltaico e turbinas eólicas sem armazenamento (MEEGAHAPOLA *et al.*, 2014). As variações naturais de produção podem impactar negativamente a operação geral, em qualquer modo e na transição. A quarta e última é sobre o uso de linhas de comunicação e controladores centrais. A revisão indicou que, distintamente do modo ilhado, estes são itens fundamentais no modo conectado e para transição suave, garantindo continuidade no funcionamento da microrrede.

Sobre a sincronização, a revisão demonstrou que é uma ação indispensável e que soluções bem-sucedidas, precisas e rápidas asseguram os princípios para a transição suave. Os critérios de sincronização devem ser ponderados, pois no ilhamento pequenos desvios são comuns e diferenças mínimas podem auxiliar na transferência entre modos (CHO *et al.*, 2011; TANG *et al.*, 2015). Observa-se a predominância da técnica PLL, presente na maioria das propostas, com demonstração de superioridade sobre outras.

A transição entre os modos é um processo crítico, sensível a muitos problemas. Sincronização errônea, troca abrupta de controladores e fechamento ou abertura da chave de interconexão no instante incorreto podem romper com a transição, trazendo distúrbios e transitórios indesejados, além de problemas de estabilidade (MOHAMED, RADWAN, 2011). Mais, a técnica de controle deve distinguir passagens planejadas e não-planejadas sempre (KATIRAEI, IRAVANI, LEHN, 2005). A transição ser suave é condição capital do funcionamento dos sistemas de geração distribuída e das microrredes com segurança e proteção.

Quanto ao modo conectado à rede de fato, com controle de fluxo de potências, alguns atributos podem ser analisados. O primeiro é que algumas estratégias atuam indiretamente nas potências, como alterando sinais de frequência e de tensão (HOU *et al.*, 2018, 2017). Qualquer variação em um destes parâmetros leva a erros nos outros. O segundo, para microrredes, é que alguns métodos fazem o gerenciamento total, somado do fluxo de potências e não individualizado por recurso energético. Ora, se isso ocorrer, as particularidades das diversas fontes de geração distribuída e dispositivos de armazenamento não são considerados e o controle e a operação não serão otimizados. O terceiro e último é que o controle do fluxo de potência precisa integrar as funções adicionais de aprimoramento e não se restringir à importação e à exportação puramente de potência ativa (KAHROBAEIAN, MOHAMED, 2012).

Tendo realizadas esta revisão e esta discussão, a Tabela 3.1 organiza e sintetiza as técnicas de controle analisadas. Pelas características e estruturas semelhantes, foi possível agrupar os métodos, ainda dentro das categorias de ND e BD. Os critérios de avaliação apresentados são simplicidade, confiabilidade, flexibilidade, transição suave e controle do fluxo de potências na conexão, conforme se abordou ao longo do texto. Em resumo, relembra-se aqui cada um destes critérios. A simplicidade se refere à facilidade de implementação e a baixa complexidade de execução. A confiabilidade indica se a técnica mantém a operação com segurança e sem interrupções. A flexibilidade diz respeito à agilidade em fazer modificações no sistema e se adaptar para alterações impostas. O nível em que a transição é suave é um ponto já discutido. O mesmo foi feito para o controle do fluxo de potências com a rede durante a conexão. Para cada um destes parâmetros, os grupos foram conceituados, respectivamente em ordem crescente e positiva de avaliação de desempenho, em: fraco, regular, bom e excelente. Se dentro do primeiro caso, o conjunto de técnicas não cumpre nem minimamente os requisitos do critério, apresentando baixo desempenho. Se, ao contrário, a atuação for no mais alto grau, o grupo preenche todas as condições de trabalho necessárias com elevadíssima performance.

Após estas reflexões sobre todas as técnicas estudadas e avaliando os problemas encontrados, uma solução que consolide todos os benefícios na operação de sistemas de geração distribuída e de microrredes pode ser definida. Uma estratégia de controle para modo conectado e transição suave precisa ser simples, robusta, flexível, confiável e rápida. Também deve ser universal e unificada. Comunicação e controlador central podem ser incluídos em microrrede, sem que ela se sustente apenas com eles. A sincronização precisa ser ativa e automática com alta precisão, exatidão e velocidade. A transição, suave, com passagens planejadas e não-planejadas. A tecnologia local não pode depender de elementos dedicados exclusivos ou de estruturas líder-seguidor sem retaguardas. Ela também não pode ser impactada negativamente pela variabilidade e intermitência. O controlador precisa ser elaborado e testado para múltiplos inversores em paralelo, mas deve funcionar para unidades singulares e considerando suas particularidades. O fluxo de potências deve ser completamente controlado, mas individualizado por tecnologia de geração distribuída além da troca total no ponto de acoplamento e de assimilar funções para aprimoramento da qualidade da energia, provisão de serviços ancilares, aspectos sociais, econômicos e ambientais. Foram estes os requisitos e as características que embasaram o desenvolvimento do sistema de controle proposto neste trabalho, apresentado no próximo capítulo.

Tabela 3.1 – Avaliação de desempenho dos principais grupos de técnicas de controle para inversores para conexão de sistemas de geração distribuída e de microrredes à rede.

Categoria	Grupos de Técnicas de Controle	Simplicidade	Confiabilidade	Flexibilidade	Transição Suave	Controle do Fluxo de Potências na Conexão
ND	**Líder-Seguidor** (YANG *et al.*, 2011)	Bom	Fraco	Regular	Excelente	Bom
	Estruturas Específicas (MISHRA, RAMASUBRAMANIAN, SEKHAR, 2013; SINGH, PATHAK, PANIGRAHI, 2017)	Bom	Regular	Fraco	Bom	Bom
	Unidades Dedicadas (HARIRCHI *et al.*, 2015; ROCABERT *et al.*, 2011)	Excelente	Fraco	Regular	Excelente	Bom
	Troca de Controle (YAO, XIAO, YAN, 2009; CHEN *et al.*, 2009; TALUPAR *et al.*, 2018; BALAGUER *et al.*, 2010; TRAN *et al.*, 2013)	Bom	Bom	Bom	Regular	Excelente
BD	**Controle Dinâmico *Droop*** (HERNANDEZ-ARAMBURO, GREEN, MUGNIOT, 2005; PIAGI, LASSETER, 2006; LASSETER, 2007; AHN *et al.*, 2010)	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom
	Estruturas Hierárquicas (VASQUEZ *et al.*, 2010; GUERRERO *et al.*, 2011; GUERRERO *et al.*, 2009; GUERRERO *et al.*, 2012a; MICALLEF *et al.*, 2015; HOU *et al.*, 2018, 2017)	Regular	Excelente	Excelente	Excelente	Bom
	Estruturas Específicas (LEE, JIANG, CHENG, 2011, 2013; KANELLOS *et al.*, 2005; ABUSARA, SHARKH, 2011; ABUSARA, GUERRERO, SHARKH, 2013; MEEGAHAPOLA *et al.*, 2014)	Bom	Regular	Fraco	Bom	Bom
	Equações *Droop* Modificadas (ASHABANI, MOHAMED, 2014; DENG *et al.*, 2016, VANDOORN *et al.*, 2011, 2013; GUO, SHA, LIAO, 2014; MOHAMED, RADWAN, 2011; LI, VILATHGAMUWA, LOH, 2004)	Regular	Bom	Excelente	Bom	Bom
	Técnicas Modernas (LOU *et al.*, 2020; DAS, GURRALA, SHENOY, 2016; QIAN *et al.*, 2020)	Fraco	Bom	Bom	Bom	Regular

Fonte: Elaborada pelo autor.

4 – SISTEMA DE CONTROLE PROPOSTO

A revisão conseguiu identificar as vantagens e as desvantagens de cada controlador que se encontra no estado da arte sobre transição suave e conexão de sistemas de geração distribuída e de microrredes à rede. Pelas lições aprendidas, tentando extrair e abarcar as melhores características observadas e seguindo os requisitos para estas condições de operação, uma estratégia de controle própria é proposta. Designada para inversores integrados a sistemas de geração distribuída e microrredes CA trifásicos, ela é apresentada neste capítulo. O sistema de controle sugerido e examinado serve tanto para um único conversor, quanto para ser implantado em múltiplas unidades em paralelo em formação típica de microrredes. Entre uma e outra configuração, não é necessária qualquer alteração fundamental em sua estrutura de controle. Cada unidade embarca o controlador, tornando o esquema fortemente independente em arquiteturas de microrrede, com características "ligar-e-usar" ("*plug-and-play*") e "par-a-par" ("*peer-to-peer*"). Um controlador central apenas atuará para enviar e receber informações dos elementos locais e da rede externa para determinar as ações e manter a sincronização. Por isso, o foco das explicações está no caso unitário. Detalhes para o caso das microrredes são levantados ao longo do texto quando necessário maior esclarecimento nas especificidades.

A técnica de controle é para inversores formadores de rede e tecnologias de geração distribuída despacháveis (naturalmente despacháveis, como microturbinas com combustível continuamente disponível, ou, adaptadas para serem despacháveis, como sistemas fotovoltaicos com baterias). Os controladores internos são malhas externa de tensão e interna de corrente formadas por compensadores P+Res, além de desacoplamentos e realimentação.

Para o modo ilhado em si, não há novidades. Como muitas outras propostas da literatura, a aqui elaborada também incorpora o método de controle *droop* convencional, visto anteriormente. Esta escolha se deu pelos seus benefícios comprovados somados à simplicidade de execução e por sua constituição estar ligada à dos outros modos da técnica, o que conflui para um controlador unificado. A impedância virtual matricial da equação (2.13) é associada a esta mesma composição. As equações *droop* convencionais são relembradas:

$$\omega = \omega_0 - k_p(P - P_0) \tag{4.1}$$

$$E = E_0 - k_q(Q - Q_0) \tag{4.2}$$

Em se tratando de um único inversor, em um sistema de geração distribuída, será este próprio dispositivo que guardará a inteligência do sistema, incluindo monitoramento, cálculos, tomada de decisões, entre outros. Em uma microrrede, um controlador central precisará ser inserido para isso e para servir de agregador da comunicação entre as unidades de geração distribuída internas e a rede externa. Ele, contudo, não será um elemento suplementar de grande ocupação. Poderá ser um pequeno microcontrolador anexado a um dos componentes da microrrede, preferencialmente a chave de interconexão pelo posicionamento estratégico.

De qualquer maneira, medições contínuas devem ser feitas de ambos os lados da chave estática de interconexão, do inversor (ou microrrede) e do sistema elétrico externo. Para se iniciar o processo de conexão, um sinal de comando deve ser ativado, manual ou automaticamente conforme alguma forma de programação prévia. As decisões para tanto serão determinadas pelos proprietários do sistema de geração distribuída ou da microrrede. Antes de começar a sincronização e a transição, a rede externa é avaliada em termos de segurança, confiabilidade e qualidade da energia. Para tanto, os controladores, em algoritmos simples, analisam os parâmetros extraídos de magnitude de tensão e de frequência da rede e os comparam a limites mínimos e máximos ($\omega_{mín} < \omega_{rede} < \omega_{máx}$ e $E_{mín} < E_{rede} < E_{máx}$), que podem ser baseados em normas já existentes, e determinam se estão dentro de uma faixa aceitável. Se os critérios estabelecidos não forem preenchidos, então se mantém o modo ilhado e o processo de conexão nem mesmo se inicia.

Se o comando for acionado e a situação é favorável à conexão, a sincronização ativa e a transição suave podem ocorrer. A sincronização é efetivada se frequência, fase e magnitude de tensão dos dois sistemas forem iguais. Para anular as diferenças e realizar esta etapa, a estratégia de controle modifica modestamente as equações *droop* de sincronização ativa e transição suave com incrementos de frequência e de fase $\Delta\omega$ e de amplitude de tensão ΔE, substituindo ω_0 em (4.1) por $(\omega_0 + \Delta\omega)$ e E_0 em (4.2) por $(E_0 + \Delta E)$:

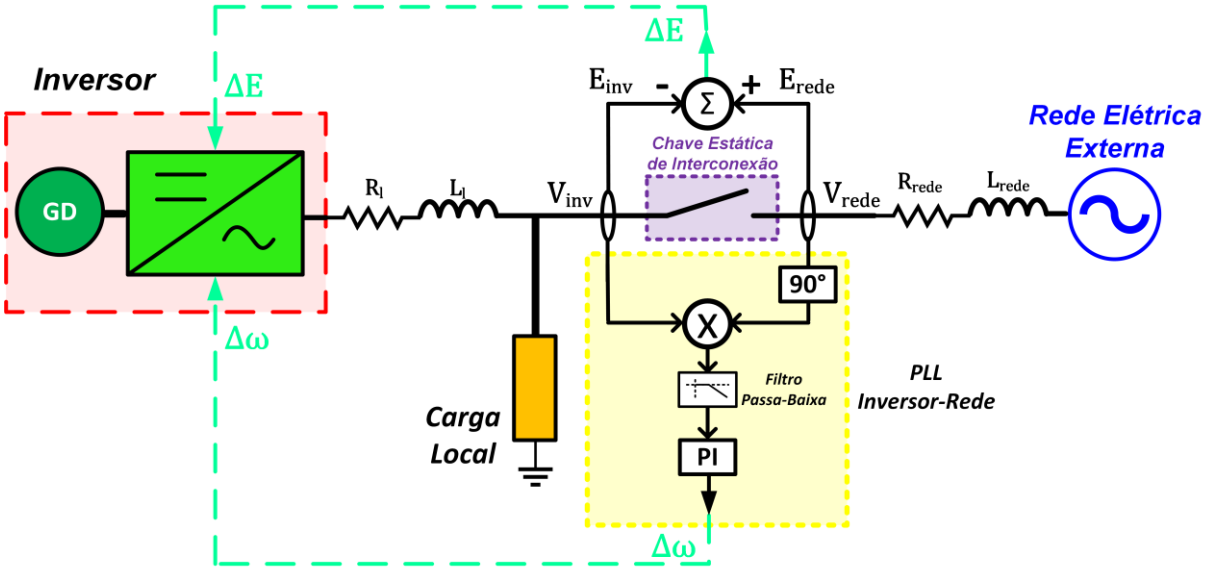
$$\omega = (\omega_0 + \Delta\omega) - k_p(P - P_0) \tag{4.3}$$

$$E = (E_0 + \Delta E) - k_q(Q - Q_0) \tag{4.4}$$

Para se obter estes sinais, as tensões do inversor (v_{inv}) ou do barramento da microrrede (v_{mr}) e da rede externa (v_{rede}) são medidas e utilizadas no método de controle. Apesar de se tratar de sistemas trifásicos, os sinais podem ser de uma única fase qualquer equivalente. Para frequência e fase, uma estrutura de técnica PLL entre inversor (microrrede) e rede é empregada

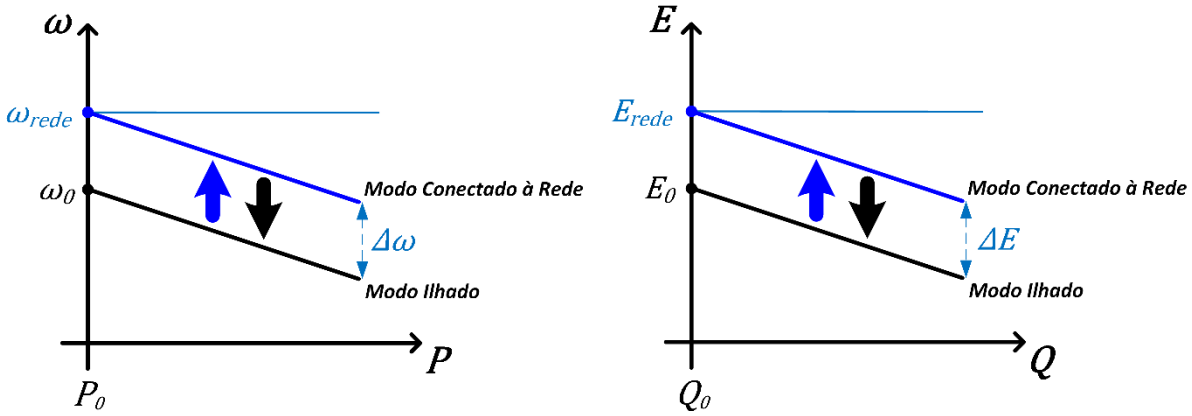
("PLL Inversor/Microrrede-Rede" ou "PLL de Conexão/Sincronização"). Sua configuração é similar à do PLL Clássico e como a sugerida em (GUERRERO *et al.*, 2011) e outros artigos. É feito o produto dos sinais instantâneos v_{inv} (ou v_{mr}) e da quadratura de v_{rede}. O resultado passa por um filtro passa-baixa e um compensador PI, chegando-se no incremento de diferença de frequências $\Delta\omega$ como desejado. Pela realimentação, a fase também é corrigida como acontece em um PLL comum. Para a amplitude da tensão, toma-se a diferença destes valores de cada lado, inversor (E_{inv}) ou microrrede (E_{mr}) e rede (E_{rede}), e o sinal resultante ΔE é empregado. A Figura 4.1 ilustra esta parte da estratégia de controle. Este procedimento pode ser explicado igualmente pelas curvas características de *droop*. O que se está fazendo é deslocá-las verticalmente até que se igualem em frequência, fase e amplitude de tensão os sinais do inversor com os da rede externa para as potências P_0 e Q_0, como pode ser visto na Figura 4.2. O êxito destas ações simples leva à transição suave. Para uma microrrede, a sincronização ativa e a transição suave detalhadas para um único inversor ocorrem para todos os conversores simultaneamente.

Figura 4.1 - Processo de sincronização ativa e transição suave do sistema de controle do inversor de sistemas geração distribuída e de microrredes para conexão à rede.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 4.2 - Curvas características de *droop* para sincronização ativa e transição suave do sistema de controle do inversor de sistemas de geração distribuída e de microrrede para conexão à rede.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A fim de se garantir que no fechamento da chave a transição é suave e a sincronização foi finalizada, um algoritmo processa as informações de ambos os lados. Ele verifica se a frequência interna (ω) é igual à da rede externa (ω_{rede}) pela diferença, que deve ser muito pequena, próxima de zero ($|\omega_{rede} - \omega| < d\omega$, $d\omega \approx 0$) por um período de tempo razoável T_{sinc}. A anulação da diferença de fases é averiguada juntamente à de frequência, porque se trata de uma atuação de PLL, atracando as ondas em fase pela assimilação de $\Delta\omega$. A mesma ação se dá para as magnitudes de tensão, onde a diferença entre a interna (E) e externa (E_{rede}) precisa convergir para um valor próximo de nulo ($|E_{rede} - E| < dE$, $dE \approx 0$) pelo mesmo intervalo de tempo T_{sinc}. Estas comparações são suficientes para confirmar o término do processo. Assim, o projetista, por análise prévia, determinará que a chave poderá ser fechada se for alcançado um valor mínimo, extremamente pequeno, de redução da diferença de frequências e amplitudes de tensão. Porém, nota-se, durante este período, as ondas senoidais de tensão estarão se movendo relativamente entre si até o momento de sincronização efetiva. Mesmo antes de acabar, elas podem coincidir. Deve se assegurar que isso não ocorra instantaneamente apenas, mantendo os sinais definitivamente sincronizados. Por isso, adicionalmente, o termo T_{sinc} é determinado e acrescido ao algoritmo para que as duas ondas estejam realmente com mesmas frequência, fase e amplitude de tensão em todo o tempo.

Enfim se chega ao modo conectado à rede. Novamente, as equações *droop* são transformadas discretamente. As alterações singelas da estratégia originam a unificação do controlador, o que não exige trocas que poderiam levar a problemas durante a transição. As novas modificações permitem com que todo o fluxo de potências entre o inversor do sistema de geração distribuída e a rede externa seja controlado com alta eficiência e facilidade. Em uma

microrrede, cada unidade é gerenciada individualmente, considerando suas especificidades, e, simultaneamente, toda a potência intercambiada com o sistema elétrico, resultado final do cômputo da soma de cada um destes conversores com a carga local e a alimentação externa, é administrada. A frequência de equilíbrio com seu incremento $(\omega_0 + \Delta\omega)$ é substituída pela própria frequência da rede ω_{rede}, medida e fornecida continuamente por um bloco PLL dedicado (por suas vantagens, a técnica SOGI-PLL sobre v_{rede}), chamado "PLL Rede". De forma similar, a tensão de equilíbrio com seu incremento $(E_0 + \Delta E)$ é trocada pela amplitude de tensão da rede medida E_{rede}. Os incrementos são desativados. Com estes mecanismos, os inversores se ligam à rede firmemente. A qualidade da energia será prontamente aprimorada, tendo em vista os desvios no modo ilhado e que a rede externa é um sistema forte com normas rigorosas. As variações nestes parâmetros incorporados são continuamente observados e dão subsídio à detecção e retorno ao ilhamento, conforme critérios pré-estabelecidos.

O controle do fluxo de potências se faz com outras alterações, agora nas potências de equilíbrio P_0 e Q_0, que são substituídas pelas nomeadas potências de rede do inversor P_{irede} e Q^*_{irede}, respectivamente. Em uma configuração de microrrede, cada conversor x terá seus valores próprios, específicos P_{iredex} e Q_{iredex} (Q^*_{iredex}). Com isso, as equações *droop* de modo conectado à rede com controle do fluxo de potências serão dadas por:

$$\omega = \omega_{rede} - k_p(P - P_{irede}) \tag{4.5}$$

$$E = E_{rede} - k_q(Q - Q^*_{irede}) \tag{4.6}$$

$$Q^*_{irede} = K_{pQ}(Q_{irede} - Q) + K_{iQ}\int (Q_{irede} - Q)\,dt \tag{4.7}$$

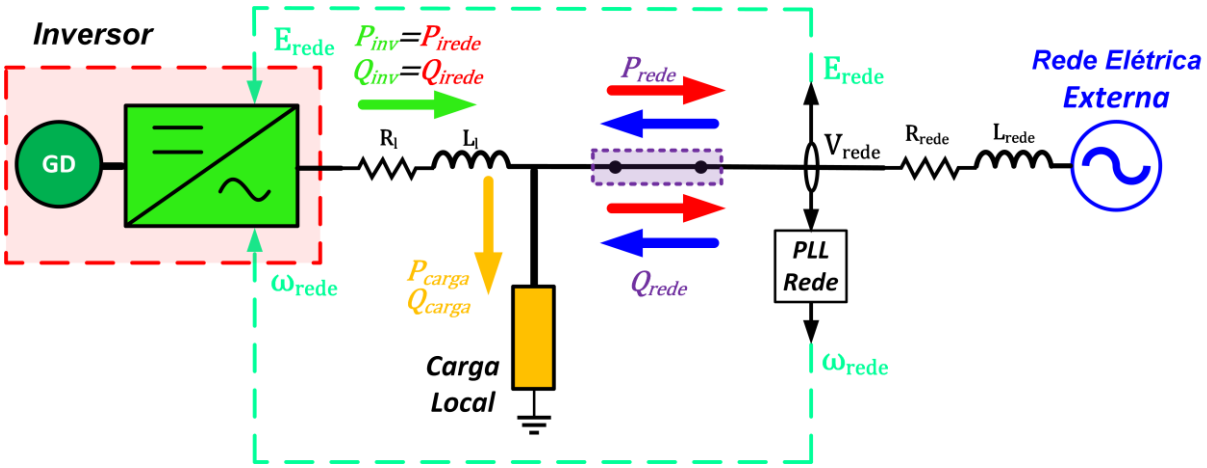
A estratégia de controle nesta etapa é representada na Figura 4.3. O termo P_{irede} é a potência ativa que se quer produzir na saída do inversor em seu valor numérico exato. Este método fácil de manipulação e gerenciamento ocorre pela observação de que a frequência é igual em todo ponto, ou seja, $\omega = \omega_{rede}$, fazendo com que se tenha, por manipulações algébricas da equação (4.5), a identidade $P = P_{irede}$. Diferentemente de muitas outras propostas, não há interferência sobre a frequência, o que poderia acarretar erros, nem outros níveis de controle.

Para potência reativa, a situação é mais complexa. As tensões não são iguais em todo ponto, nem em todo momento, com possíveis diferenças pequenas entre cada uma. O comportamento distinto não admite uma solução simples e direta como a da potência ativa com

valor numérico. Como se segue a amplitude de tensão da rede, a potência reativa até seria produzida com a quantidade $Q = Q_{irede}$ de imediato, mas mudanças neste sinal não serão refletidas na geração, faltando o controle desejado. Por estes motivos, aplicam-se as equações (4.6) e (4.7) com emprego de um controlador PI dado por Q^*_{irede}, de ganho proporcional K_{pQ} e ganho integral K_{iQ}, levado na relação *droop* de reativo. O valor desejado e que será efetivamente produzido pelo inversor, no entanto, é Q_{irede}.

É importante apenas salientar que as mudanças de P_{irede} e Q_{irede} não podem ser em degraus, abruptamente, pois se notou transitórios em simulações, mesmo que pequenos, indesejáveis. Controles em rampas rápidas evitam este imbróglio e pode se ter, ainda assim, atuações céleres.

Figura 4.3 - Modo conectado à rede com controle do fluxo de potência do sistema de controle do inversor de sistemas de geração distribuída e de microrrede para conexão à rede.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com o controle simples, flexível, confiável e total do fluxo de potências ativa e reativa dos inversores conectados à rede, todos os potenciais dos sistemas de geração distribuída e das microrredes podem se concretizar em ato. O gerenciamento inteligente extrapola a pura troca de energia elétrica e poderá introduzir funções adicionais de aprimoramento, como se comentou ao longo do texto, trazendo para o sistema elétrico e para o setor de energia em geral novos atributos que abrangem melhorias à qualidade da energia, em serviços ancilares, na sociedade, na economia e no meio ambiente.

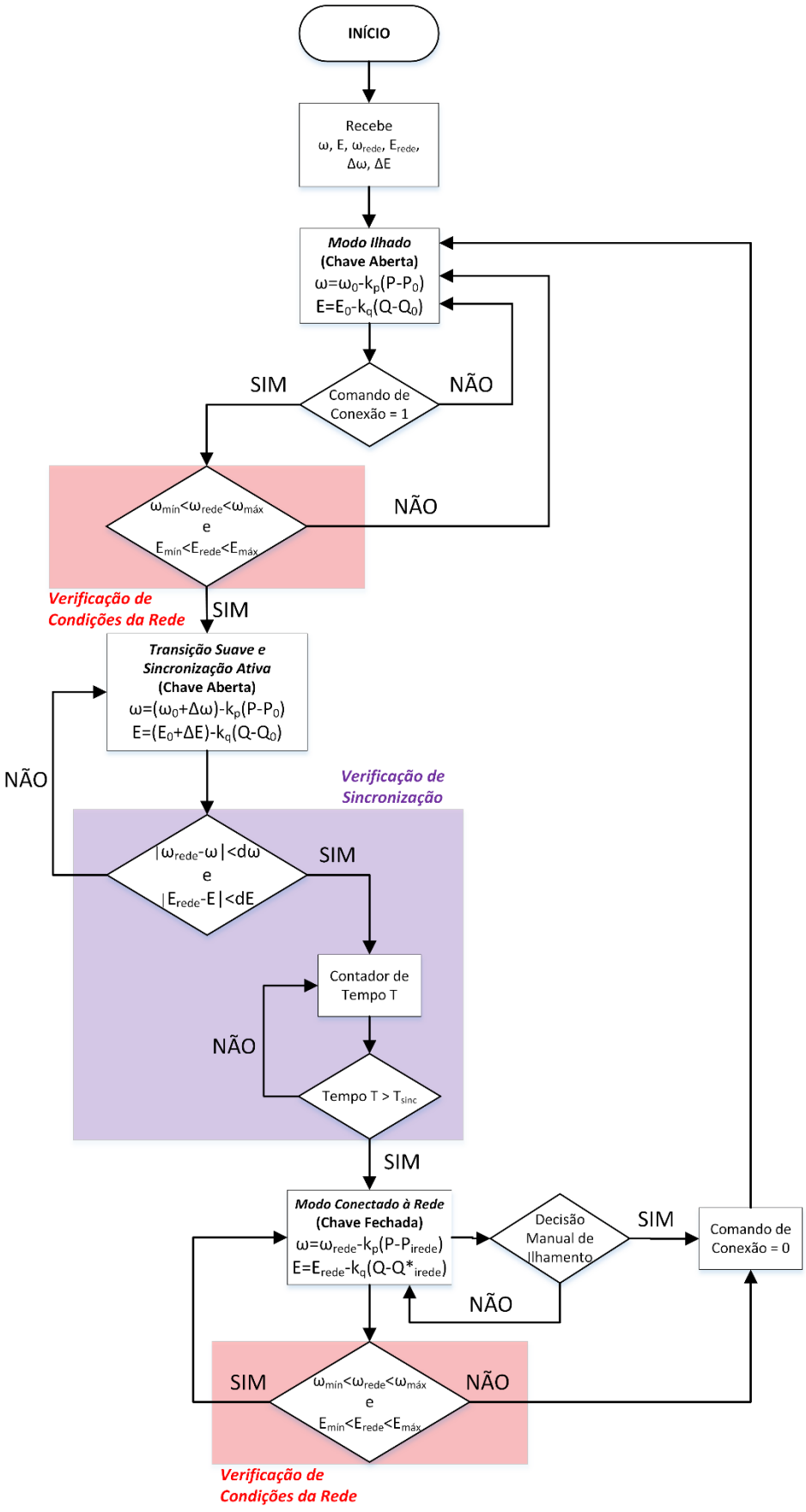
No retorno ao modo ilhado, no que se refere à estratégia de controle em si, a volta às equações *droop* convencionais originais basta depois da abertura da chave e da desativação do sinal de comando de conexão. Para passagens não-planejadas, a medição e o monitoramento contínuos dos dois lados fornecem constantemente dados para detectar as falhas ou distúrbios,

sejam internos ou externos. Um algoritmo é preparado para este fim. Nele estão definidos os limites de frequência, fase, amplitude de tensão e de corrente (ou outros ainda, como distorção e desequilíbrio), para determinados períodos de tempo, que devem ser obedecidos para se manter a conexão à rede. Para a passagem planejada, são os critérios anteriormente escolhidos programados ou uma ação manual que provocam o retorno ao ilhamento.

O fluxograma da Figura 4.4 dá a estrutura de algoritmo de todo o sistema de controle nos seus modos de operação e nas suas validações: ilhamento, conexão à rede, transição suave e verificações de condições de rede externa e de sincronização.

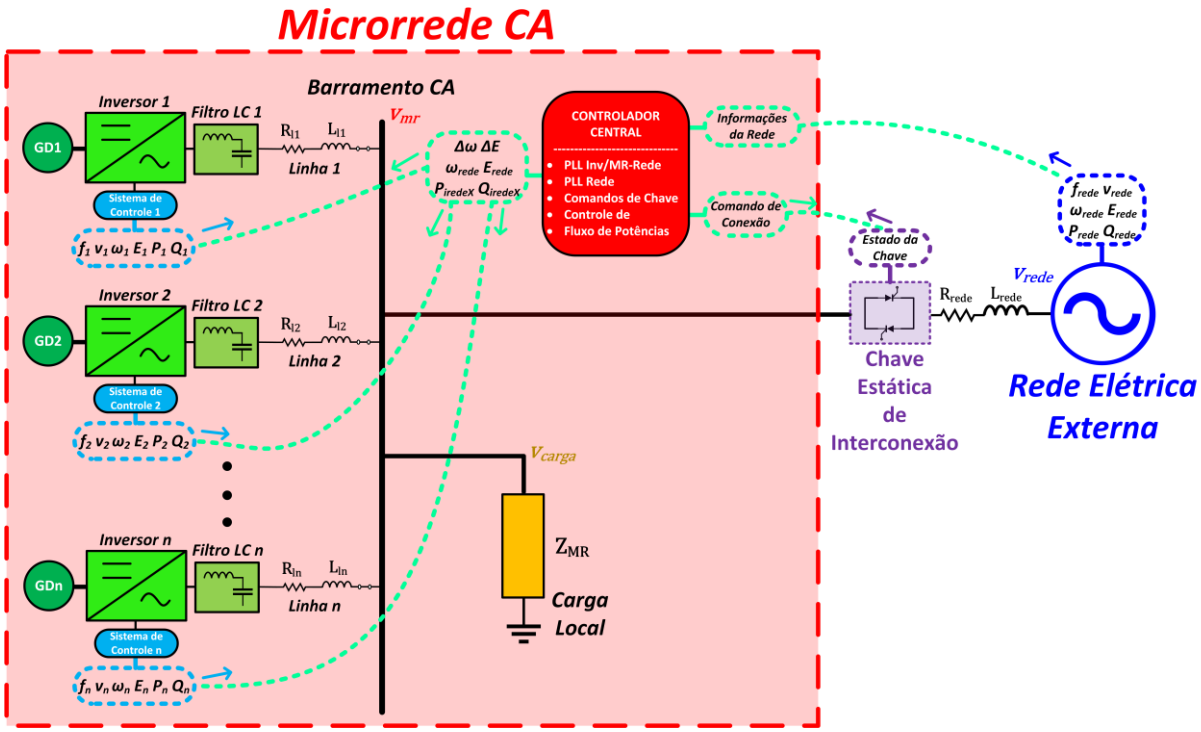
Em uma microrrede CA com n unidades de geração distribuída acopladas a n conversores, como apresentado na Figura 4.5, para cada inversor x serão integrados os controladores contendo as equações (4.1)-(4.7), internamente, possivelmente em seus respectivos componentes DSP e todo o restante da estrutura da técnica. As impedâncias de linha podem ser distintas e consideram-se, aqui, apenas arquiteturas radiais, barramento único de carga. A carga total, soma de todas as disponíveis, é aglomerada em sua forma equivalente. Cada conversor x proporciona seus próprios parâmetros por meio de medições locais, cálculos internos e referências geradas, a saber frequências e tensões e potências produzidas: $f_x, v_x, \omega_x, E_x, P_x, Q_x$. Estes sinais são enviados para um controlador central que, como foi dito, pode ser implementado em um DSP (ou outro microcontrolador) integrado à chave de interconexão, uma posição estratégica (exatamente entre sistema de geração distribuída/microrrede e rede externa), ou mesmo a um inversor, o que reduz a confiabilidade, mas que é uma possibilidade. Ele também recebe dados da rede elétrica externa por todo o tempo, como: $f_{rede}, v_{rede}, \omega_{rede}, E_{rede}, P_{rede}, Q_{rede}$, fornecidos por medições e monitoramento (incluindo o "PLL Rede"). É igualmente no controlador central que se dá o acionamento da chave e, por isso, ele atua sobre seu estado de acordo com a programação ou eventos determinados identificados, podendo abri-la ou fechá-la. Com todas essas informações, ele pode processar as informações e executar as técnicas "PLL Microrrede-Rede" e "PLL Rede", além do controle do fluxo de potências, sendo responsável pelo gerenciamento de todo o sistema. Para tanto, fornece para todos os inversores os parâmetros de operação de controle $\Delta\omega, \Delta E, \omega_{rede}, E_{rede}$ e a produção individual de cada unidade P_{iredex} e Q_{iredex}. Futuramente, será aqui no controlador central que serão inseridas as funções de aprimoramento de qualidade da energia, serviços ancilares, fatores econômicos, sociais e ambientais.

Figura 4.4 - Fluxograma do sistema de controle.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 4.5 - Sistema de controle em microrrede.



Fonte: Elaborada pelo autor.

5 - PROJETOS E SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Apresentado o sistema de controle em sua forma e conteúdo teóricos, resta verificar, validar e analisar seu funcionamento. Para tanto, na sequência da metodologia proposta, são realizados, neste capítulo, projetos da estrutura física e de potência e dos controladores. Os componentes e os parâmetros são descritos e calculados em detalhes. É importante ressaltar que esta concepção com seus elementos não é estabelecida arbitrariamente. Ela é, basicamente, a mesma para a simulação computacional, os testes em plataformas C-HIL e os resultados empíricos em protótipos, assim como os valores aplicados tanto na esfera digital, quanto no campo da prática, são, substancialmente, iguais ou muito próximos. Como é de se esperar, ligeiras mudanças, variações e adaptações ocorrem entre um e outro, mas nada que interfira nos procedimentos gerais e nos resultados finais. É claro, também, que apesar de se seguir a metodologia sucessivamente, seu processo evolutivo exige saltos e retornos para se consolidar. O que se quer dizer com isso é que, por exemplo, durante o projeto, simulações computacionais e testes em C-HIL foram ferramentas auxiliares, ou, para a constituição dos modelos virtuais, o material disponível experimental do protótipo foi consultado.

Além disso, ainda neste capítulo, de maneira a compreender e ajustar a estratégia de controle em um primeiro momento, simulações computacionais são preparadas e os resultados indicados. A montagem virtual é uma versão ideal, uma primeira aproximação da realidade. Isto serve para testes rápidos, mas fundamentais para o desenvolvimento da pesquisa. São feitos ensaios em diversos cenários para todos os modos de operação. Estas etapas serão progredidas nos sistemas C-HIL e na construção experimental para garantir categoricamente a operação do sistema de controle proposto conforme o pretendido.

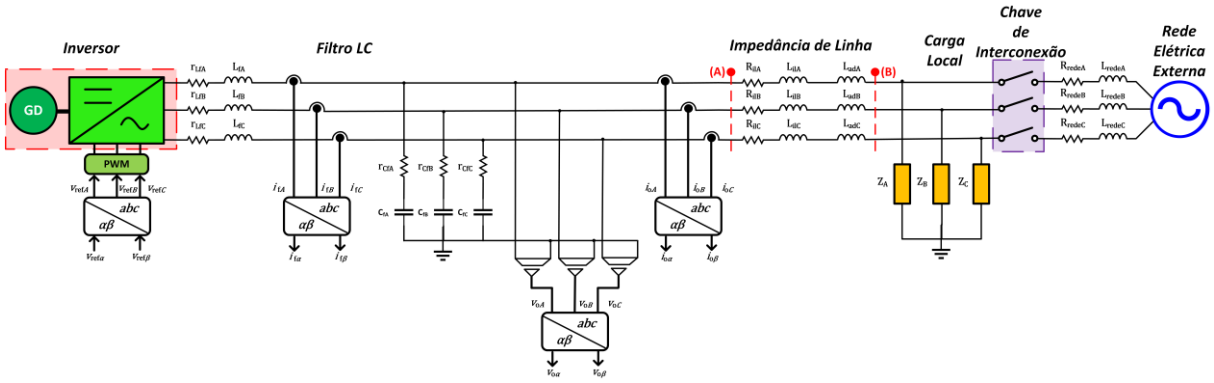
5.1 – Projetos

Os projetos são divididos em dois segmentos. Um deles é o físico ou de potência, no qual a disposição material é trabalhada, sendo descritos e calculados os arranjos dos inversores com seus elementos internos, das linhas, das cargas locais e da rede elétrica externa. O outro é o do sistema de controle em si. Nele, a disposição dos controladores, assim como a composição de seus ganhos, indicadores, blocos e valores são delineados.

5.1.1 – Projeto e Características da Estrutura Física ou de Potência

A estrutura física ou de potência básica (nomeada planta, em certa medida, para os controladores) é exibida na Figura 5.1 para um único inversor. A configuração é similar na presença de mais de uma unidade, exceto que ela será interconectada em um barramento CA único de microrrede, em arquitetura radial, tal como visto de maneira simplificada na Figura 4.5 do capítulo anterior. Deve se observar que, diante dos testes, verificou-se que na conformação singular, importou pouco a posição em que foi ligada a carga local, se antes da impedância de linha (A) ou depois (B), conforme Figura 5.1, isto é, mais distante ou próximo da rede externa, seja em modo ilhado ou conectado, observando-se a presença da impedância virtual nos controladores. Em microrredes, a carga local se encontra invariavelmente após as impedâncias de linha (B), ocorrência natural. Esta informação será relevante mais adiante, quando, devido às restrições construtivas do protótipo experimental, a carga local obrigatoriamente é instalada no ponto (A), enquanto em simulação e C-HIL, ela fica em (B).

Figura 5.1 - Estrutura física de potência completa do inversor com rede elétrica externa.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Em qualquer dos sistemas, incluindo a rede externa em condição normal de operação, os valores nominais são de $v_{rms} = v_{rede(rms)} = 127\ V$ em tensão eficaz de fase ($220\ V$ de linha) e $f = f_{rede} = 60\ Hz$ em frequência. Em simulação computacional e C-HIL, a rede é dotada de $R_{rede} = 0{,}2\ \Omega$ e $L_{rede} = 1\ \mu H$.

Os inversores aqui investigados são todos trifásicos e podem ter suas entradas ligadas a fontes de geração distribuída ou, como ocorre nos testes, a fontes CC para emulá-las. Quando múltiplos estão presentes, as estruturas internas deles são idênticas, nas partes físicas e de controle, a menos de pequenas particularidades apontadas. A frequência de chaveamento é de $f_{ch} = 15\ kHz$ nas plataformas C-HIL e $f_{ch} = 10\ kHz$ na montagem experimental por limitações práticas. A tensão CC de entrada é de $V_{CC} = 500\ V$. A capacidade, trifásica, de cada inversor é de $S_{nom} = 5{,}7\ kVA$, com $P_{nom} = 5\ kW$ e $Q_{nom} = 2{,}75\ kVAr$. A configuração

material completa do sistema, conforme ilustra a Figura 5.1, é formada por esta unidade conversora acoplada à sua tecnologia de geração distribuída ou fonte CC, seguida, em sua saída, de um filtro LC, da linha com sua impedância (e indutância adicional), da carga local, da chave estática de interconexão e da rede elétrica externa. Há aquisição de sinais de tensão e de corrente ao longo do sistema, transpostos em $\alpha\beta$.

O filtro LC tem seus valores definidos conforme a seguinte expressão da frequência de corte ω_{fLC} (f_{fLC}) (REZNIK *et al.*, 2013):

$$\omega_{fLC} = 2\pi f_{fLC} = \frac{1}{\sqrt{L_f C_f}} \tag{5.1}$$

onde L_f e C_f são sua indutância e sua capacitância, respectivamente, por fase. Para bom desempenho, a frequência de corte pode obedecer à desigualdade:

$$10f < f_{fLC} < \frac{f_{ch}}{10} \tag{5.2}$$

Escolhe-se $f_{fLC} = 700\ Hz$. Para determinar o filtro, opta-se por um dos componentes e outro é consequência da equação (5.1) e da frequência de corte. Então, faz-se $C_f = 33\ \mu F$, de forma que $L_f = 1{,}5665\ mH$. Na simulação computacional e em C-HIL, a resistência série do capacitor é considerada quase nula, $r_{C_f} = 1\ \mu\Omega$, enquanto a de indutância é de $r_{L_f} = 0{,}01\ \Omega$.

O próximo passo é a linha. Para continuar a tendência realista do projeto, baseando a elaboração e a construção em informações verdadeiras e não arbitrárias, sua impedância é estabelecida de acordo com dados de cabos de linhas de baixa tensão da Norma de Distribuição 2.7 (CEMIG, 2016) da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). Pela conjuntura, o cabo é o trifásico a 4 fios, cuja construção é $3 \times 1 \times 120 + 70\ mm^2$. Como será visto em seguida, na simulação computacional e na montagem experimental, apenas um inversor é analisado, emulando um sistema de geração distribuída, enquanto nas plataformas C-HIL, a configuração de microrredes também é testada, com dois inversores operando em paralelo. Há, portanto, distinções nas linhas. Para o inversor 1, $R_{l1} = 0{,}1\ \Omega$ e $L_{l1} = 1{,}5\ mH$ nas disposições computacional e experimental de inversor único e $R_{l1} = 0{,}2\ \Omega$ e $L_{l1} = 1\ mH$ em C-HIL na composição de microrrede. Já para o inversor 2, existente apenas em C-HIL com estrutura de microrrede, $R_{l2} = 0{,}4\ \Omega$ e $L_{l2} = 2\ mH$. Todos estes valores já incluem os indutores adicionais para que se satisfaça a condição $X_L \gg R_L$.

O consumo local (impedâncias constantes) foi concebido para variar entre a metade e o valor total nominal da saída do conversor. A potência aparente trifásica vai de $S_{cm} = 2{,}85\ kVA$ até $S_{ct} = 5{,}7\ kVA$, enquanto as potências trifásicas ativa e reativa alteram, respectivamente, de $P_{cm} = 2{,}5\ kW$ até $P_{ct} = 5\ kW$ e de $Q_{cm} = 1{,}375\ kVAr$ até $Q_{ct} = 2{,}75\ kVAr$. Isso, é claro, para tensão de fase de $127\ V$ e frequência de $60\ Hz$. Projetou-se duas cargas RL-série em paralelo, ambas ligadas em Y. Calculando, para cada uma se chegou em resistências de carga de $R_{c1} = R_{c2} = 15\ \Omega$ e indutâncias de carga de $L_{c1} = L_{c2} = 22\ mH$, aproximando.

A chave estática de interconexão é considerada ideal para o projeto. Isto é, não tem perdas e atua imediatamente. A rede elétrica externa é considerada igualmente ideal para o projeto, como um barramento infinito, podendo alimentar a carga na conexão indefinidamente e não sofrendo variações em seus parâmetros, sem distorção e sem desequilíbrio. Algumas não-idealidades e situações críticas aparecem conforme se avança na metodologia, indo da simulação computacional para C-HIL e experimental. De acordo com cada caso, tais dificuldades são levadas em conta. Em simulações e plataformas C-HIL, onde é possível manipular a rede, considerando situações típicas de distribuição, uma resistência série de linha por fase de $R_{rede} = 0{,}2\ \Omega$ é adicionada, assim como uma indutância de $L_{rede} = 5\ \mu H$.

Duas questões precisam ser elucidadas antes de se passar aos testes nas distintas instalações. A primeira é que a estrutura experimental, como era de se esperar, não coincide em exatidão ao planejado e ao simulado anteriormente. Por isso, espontaneamente surgem pequenas diferenças, sejam nos componentes, nos parâmetros ou nos resultados obtidos. A segunda, ainda concernente à realização prática, é que impactos físicos e ambientais ocorrem, tais como variações de temperatura nas linhas e nas cargas, afetando suas resistências e, sem qualquer controle, modificando seus valores anteriormente delineados. Tentando manter uma fidelidade entre os três processos de testes, buscou-se sempre aproximá-los no máximo que se pôde.

5.1.2 – Projeto e Características do Sistema de Controle

Os controladores internos são constituídos por malhas interna de corrente e externa de tensão. O referencial de controle é estacionário ($\alpha\beta$), com transformada de Clarke ($abc \rightarrow \alpha\beta$) e sua inversa ($\alpha\beta \rightarrow abc$) para os sinais de corrente e de tensão. Logo, a seleção mais adequada é pelo compensador P+Res para as duas malhas, como já se explicou. Especificamente, usa-se controlador P+Res Não-Ideal, ponderando as pequenas variações de frequência. O projeto para estes controladores está consolidado na literatura (ZMOOD, HOLMES, 2003; TEODORESCU

et al., 2006; TEODORESCU, BLAABJERG, LISERRE, 2004; CHA, VU, KIM, 2009) e segue os princípios discutidos anteriormente neste trabalho. Na determinação de seus parâmetros, cada bloco foi testado e comparado a referências em simulações computacionais e em C-HIL com ajustes contínuos para se alcançar seus ganhos finais. Para ambas as malhas, $\omega_{of} = 2\pi 60 = 377\ rad/s$, seguindo a frequência de operação. Já a frequência de corte é de $\omega_{ci} = 10\ rad/s$ para malha de corrente e $\omega_{cv} = 13\ rad/s$ para malha de tensão. Ainda seguindo esta ordem, os ganhos proporcionais são de $K_{pi} = 12$ e $K_{pv} = 0{,}1$, ao que as constantes de ressonância são de $K_{ii} = 10$ e $K_{iv} = 10$.

Para o método de controle *droop*, que rege o modo ilhado, a frequência de equilíbrio é de $60\ Hz$ ou $\omega_0 = 2\pi 60 = 377\ rad/s$ e a amplitude de tensão de equilíbrio é de $E_0 = \sqrt{2}(127 + 5) = 186{,}68\ V$, mais alta que a nominal para atenuar os efeitos de eventuais quedas de tensão. As potências de equilíbrio serão escolhidas aqui, normalmente, para serem iguais à metade das capacidades nominais dos inversores, ou seja, $P_0 = 2{,}5\ kW$ e $Q_0 = 1{,}375\ kVAr$. Isso quer dizer que, quando a produção for tal que $P = P_0$ ($Q = Q_0$), o que se tem é $\omega = \omega_0$ ($E = E_0$). Os coeficientes de *droop* k_p e k_q definem, respectivamente, a inclinação das curvas características $P - \omega$ e $Q - E$. Eles relacionam as variações de frequência $\delta\omega$ (δf) com as de potência ativa δP e as de magnitude de tensão δE com as de potência reativa δQ. Deve haver um compromisso entre desvios mínimos e boa dinâmica, com amortecimento adequado e estabilidade do sistema (COELHO, CORTIZO, GARCIA, 2002). O projeto destes parâmetros é dado, assim, por:

$$k_p = \frac{\delta\omega}{\delta P} \tag{5.3}$$

$$k_q = \frac{\delta E}{\delta Q} \tag{5.4}$$

Considerou-se uma variação de 0,2% para a frequência, $\delta f = 0{,}12\ Hz$, ou $\delta\omega = 2\pi(0{,}12) \cong 0{,}75\ rd/s$ para uma variação de potência ativa de $\delta P = 2{,}5\ kW$, resultando em $k_p = 0{,}0003\ rad/s/W$. Para a tensão, a variação é definida como $\delta E = 1\ V$ (0,56% de $180\ V$) para $\delta Q = 2\ kVAr$, o que dá $k_q = 0{,}0005\ V/VAr$. Os filtros passa-baixa que trazem a média das potências têm frequência de corte de $6\ Hz$, o que equivale a $\omega_f = 2\pi 6 = 37{,}7\ rad/s$.

A impedância virtual, além de aportar a predominância indutiva $X_L \gg R_L$, também desempenha um papel importante no aprimoramento do compartilhamento de potências

reativas pelos inversores no modo ilhado de microrredes. Com isso, a partir de testes em plataformas C-HIL, eles foram selecionados como sendo $L_{v1} = 5\ mH$ e $R_{v1} = 30\ m\Omega$ para o inversor 1 ou inversor único e $L_{v2} = 2{,}5\ mH$ e $R_{v2} = 15\ m\Omega$ para o inversor 2. Para se chegar nestes valores, primeiro se confirmou o princípio $X_L \gg R_L$. Em seguida e conclusivamente, eles foram sendo ajustados até que se alcançasse uma distribuição de potência reativa equalizada, uma vez que os dois inversores são praticamente idênticos em características.

Os controladores PI das estruturas PLL, tanto de sincronização ativa e transição suave ("PLL Inversor/Microrrede-Rede"), configuração de PLL Clássico, para obtenção de $\Delta\omega$, quanto de modo conectado ("PLL Rede"), dado por SOGI-PLL, são projetados sob os mesmos princípios conforme (TEODORESCU, LISERRE, RODRIGUEZ, 2011). Um controlador PI genérico de um sistema PLL tem a forma:

$$C_{PLL}(s) = K_{P_{PLL}} + \frac{K_{I_{PLL}}}{s} \tag{5.5}$$

onde, $K_{P_{PLL}}$ e $K_{I_{PLL}}$ são, respectivamente, seus ganhos proporcional e integral que, por sua vez, são calculados como:

$$K_{P_{PLL}} = \frac{9{,}2}{T_S V_{máx}} \tag{5.6}$$

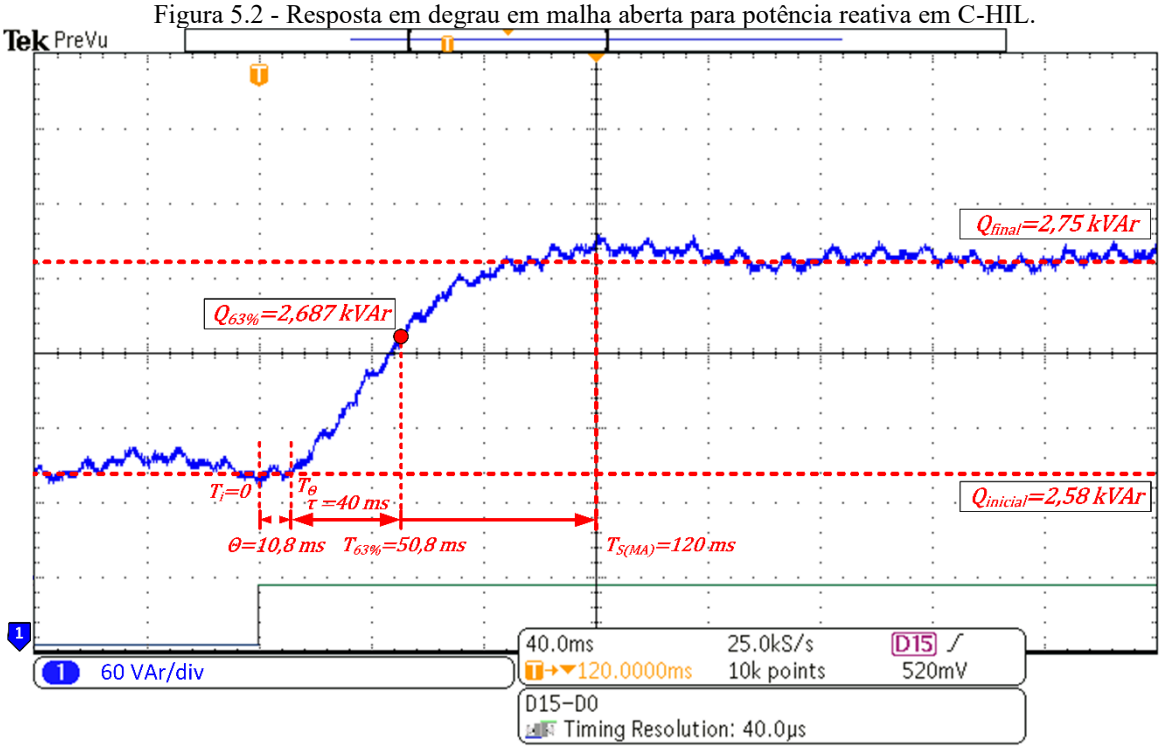
$$K_{I_{PLL}} = \frac{K_{P_{PLL}} V_{máx}}{2{,}3 T_s \zeta^2};\ T_{I_{PLL}} = \frac{K_{P_{PLL}}}{K_{I_{PLL}}} \tag{5.7}$$

em que T_s é o tempo de assentamento definido (em ms), $V_{máx}$ é o valor de pico do sinal de tensão de entrada do respectivo PLL e ζ é o fator amortecimento. Para o PLL de sincronização e transição, $T_s = 100\ ms$, $\zeta = 0{,}28$ e $V_{máx} = 180\ V$, o que resulta em $K_{P_{PLL_s}} \cong 0{,}0005$, $K_{I_{PLL_s}} \cong 0{,}005$ e $T_{I_{PLL_s}} = 0{,}1\ s$. Para o PLL de conexão, agora com $T_s = 10\ ms$, $\zeta = 0{,}625$ e $V_{máx} = 180\ V$, os valores são $K_{P_{PLL_{rede}}} \cong 0{,}005$, $K_{I_{PLLrede}} \cong 0{,}1$ e $T_{I_{PLL_{rede}}} = 0{,}05\ s$.

Para o projeto do compensador PI do controle de potência reativa é preciso primeiro determinar o modelo matemático aproximado do subsistema que relaciona a potência reativa de saída Q com a variável manipulada Q^*_{irede} das equações de controle para modo conectado (Equações 4.6 e 4.7). Para qualquer dos casos a seguir, considera-se $P = P_{irede} = 5\ kW$ e carga máxima. Operando com a malha aberta, ajustou-se a variável Q^*_{irede} até a potência reativa produzida pelo inversor no modo conectado resultar no valor da potência reativa exigida pela

carga. Assim, verificou-se que para uma potência reativa $Q = 2{,}75\ kVAr$, obteve-se $Q^*_{irede} = 9300$. Uma vez definido este ponto de operação, aplicou-se uma perturbação em degrau em Q^*_{irede} e verificou-se a resposta de potência reativa de saída Q. Para um degrau de Q^*_{irede} variando de $Q^*_{irede_{inicial}} = 8300$, correspondente a $Q_{inicial} = 2{,}58\ kVAr$, até $Q^*_{irede_{final}} = 9300$, de $Q_{final} = 2{,}75\ kVAr$, alcançou-se a resposta de Q por meio de plataforma C-HIL e exibida em osciloscópio, apresentada na Figura 5.2.

Figura 5.2 - Resposta em degrau em malha aberta para potência reativa em C-HIL.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com base nesta Figura 5.2, observa-se que o comportamento da resposta do sistema tem característica de modelo de segunda ordem. No entanto, pode se fazer uma aproximação de primeira ordem com incremento de um pequeno atraso, como realizado com ótimos resultados em (BARBOSA *et al.*, 2023). A Equação (5.8) representa a função de transferência resultante, em que a é a magnitude do polo de primeira ordem do sistema encontrada com a Equação (5.9), K é o ganho calculado pela Equação (5.10), e $e^{-\Theta s}$ é a transformada de Laplace do atraso de tempo Θ:

$$G_Q(s) = \frac{Q(s)}{Q^*_{irede}(s)} = K\left(\frac{a}{s+a}\right)e^{-\Theta s} \tag{5.8}$$

$$a = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{(T_{63\%} - T_\Theta)} \tag{5.9}$$

$$K = \frac{Q_{final} - Q_{inicial}}{Q^*_{irede_{final}} - Q^*_{irede_{inicial}}} \tag{5.10}$$

Para simplificar o processo, a transformada de Laplace do atraso de tempo pode ser estimada pela aproximação por séries de Taylor exponenciais de primeira ordem, que permite a aproximação da função de transferência $G_Q(s)$ dada por (OGATA, 2010):

$$G_Q(s) \cong K\left(\frac{a}{s+a}\right)\left(\frac{1}{1+\Theta s}\right) = \frac{K\left(\frac{a}{\Theta}\right)}{(s+a)\left(s+\frac{1}{\Theta}\right)} \tag{5.11}$$

Para determinação de a, é necessário encontrar a constante de tempo τ. Ela é definida pelos instantes $T_{63\%}$ e T_Θ. O último é observado através da resposta em degrau (Figura 5.2) como ponto final do atraso de tempo $T_\Theta = 10{,}8\ ms$. Já o primeiro ocorre quando a resposta ao degrau atinge 63% do valor em regime permanente ($Q_{63\%}$), cujo valor é determinado por:

$$Q_{63\%} = [0{,}63(Q_{final} - Q_{inicial})] + Q_{inicial} \tag{5.12}$$

O resultado é $Q_{63\%} \cong 2{,}687\ kVAr$ e, então, $T_{63\%} = 50{,}8\ ms$ na resposta. Consequentemente, a constante de tempo vale $\tau = 40\ ms$ e $a = 25$. Substituindo os devidos valores na Equação (5.10), o ganho é $K = 0{,}17$. Para instante inicial $T_i = 0\ s$, o atraso de tempo é igual a $\Theta = T_\Theta - T_i = 10{,}8\ ms$. A função de transferência final é definida por:

$$G_Q(s) = \frac{393{,}5185}{s^2 + 117{,}5926s + 2314{,}8148} \tag{5.13}$$

Tendo a função de transferência, passa-se ao projeto de fato do compensador PI da malha de controle de potência reativa. Visto que o sistema em malha aberta apresenta um tempo de acomodação ($T_{s(MA)}$) de aproximadamente $120\ ms$, sintonizou-se o controlador PI de modo que o sistema em malha fechada apresentasse um tempo de acomodação $T_{s(MF)}$ cerca de 5 vezes o valor de $T_{s(MA)}$. Como a malha de controle de potência reativa está em um nível mais externo do sistema, optou-se por deixá-la com uma resposta mais conservadora e com característica de primeira ordem em malha fechada.

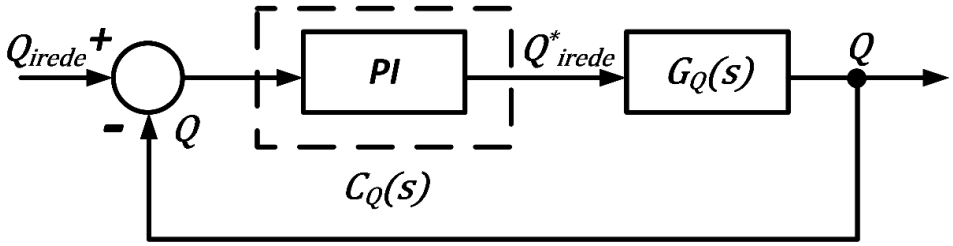
Utilizando o software Octave, o controlador PI com a função de transferência da Equação (5.14) foi estabelecido com ganho proporcional $K_{p_Q} = 5$ e ganho integral $K_{i_Q} = 50$. A função de transferência do sistema compensado em malha fechada é definida pela Equação

(5.15), obtida a partir da redução do diagrama de blocos aproximado do sistema operando em malha fechada, conforme Figura 5.3.

$$C_Q(s) = K_{p_Q} + \frac{K_{i_Q}}{s} = 5 + \frac{50}{s} \tag{5.14}$$

$$T_Q(S) = \frac{Q(s)}{Q_{irede}(s)} = \frac{C_Q(s)G_Q(s)}{1 + C_Q(s)G_Q(s)} = \frac{1968s + 19680}{s^3 + 117{,}6s^2 + 4282s + 19680} \tag{5.15}$$

Figura 5.3 - Diagrama de blocos do sistema de controle de potência reativa em malha fechada.



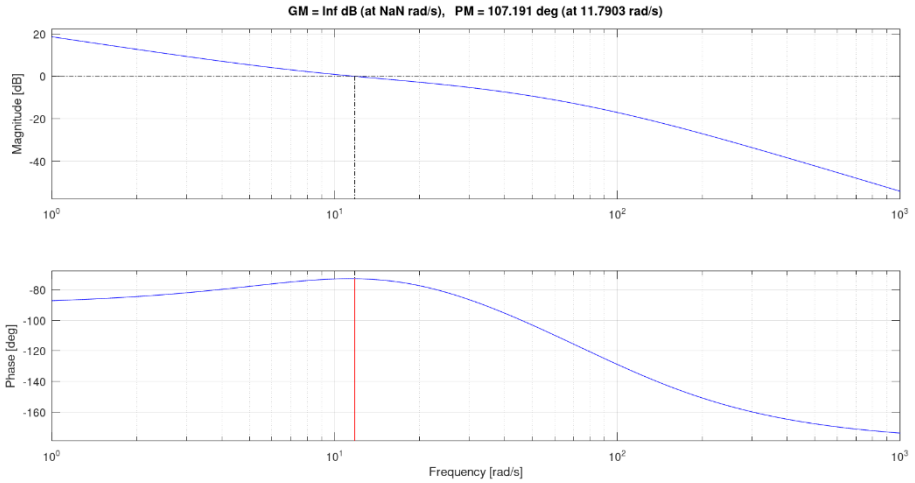
Fonte: Elaborada pelo autor.

Nas Figuras 5.4 e 5.5, obtidas por análise no software Octave, ilustram-se, respectivamente, o diagrama de Bode em malha aberta do sistema compensado e a resposta ao degrau na referência Q_{irede} variando de $2{,}58\ kVAr$ para $2{,}75\ kVAr$. Pode ser observado que o controlador PI projetado ajudou o sistema a apresentar uma margem de fase $107°$, garantindo uma resposta conservadora em malha fechada, o que evita aproximação à dinâmica de *droop*, o que não é conveniente, sem ultrapassagem e com um tempo de assentamento de aproximadamente $620\ ms$, como especificado no projeto. Além disso, um ganho infinito de margem foi estabelecido, dando estabilidade ao sistema.

Na Figura 5.6, a resposta em degrau do sistema em malha fechada operando em plataforma C-HIL é exibida por um osciloscópio para condições de perturbação similares em Q_{irede} àquelas analisadas no software Octave. Pode ser verificado que o sistema demonstrou ter uma resposta efetivamente conservadora, comprovando que o modelo aproximado de primeira ordem com atraso de tempo é válido, com o sistema também apresentando tempo de assentamento em malha fechada de aproximadamente $620\ ms$. É importante notar que o sistema operando em modelo C-HIL está sujeito a perturbações relacionadas às outras malhas de controle e que, por essa razão, a resposta da Figura 5.6 (experimental) apresenta uma pequena diferença em relação à resposta da Figura 5.5 (modelo aproximado e ideal).

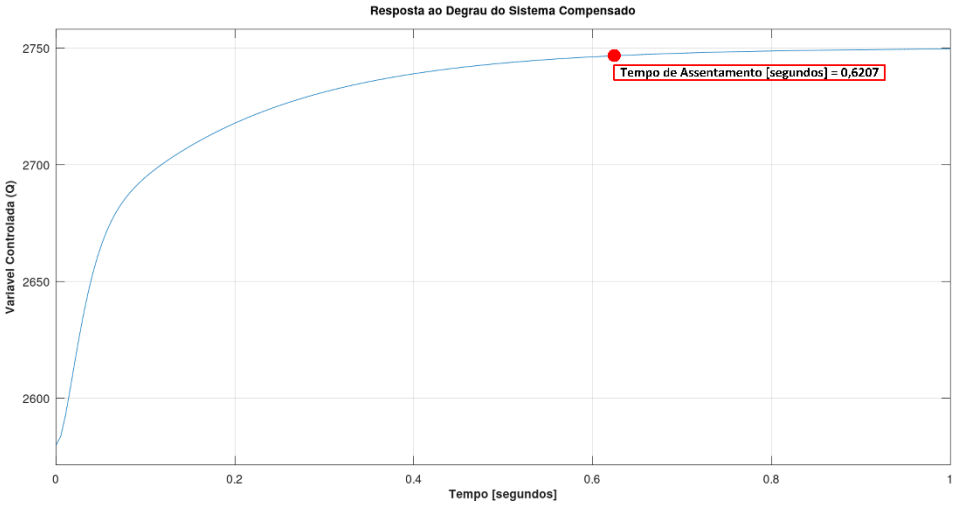
Após todos os projetos terem sido realizados, tanto em termos de modelo físico e de potência, quanto de controladores, os principais parâmetros resultantes e aplicados nos sistemas são resumidos na Tabela 5.1.

Figura 5.4 - Diagrama de Bode para o sistema compensado em malha aberta.



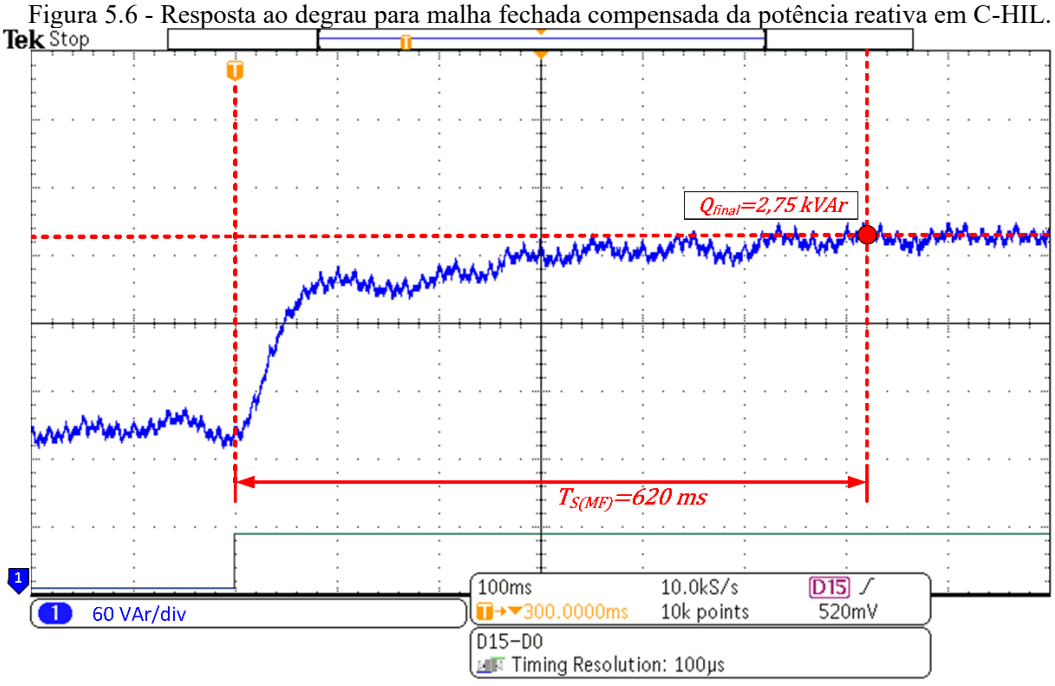
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 5.5 - Resposta ao degrau para malha fechada compensada da potência reativa em Octave.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 5.6 - Resposta ao degrau para malha fechada compensada da potência reativa em C-HIL.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 5.1 – Parâmetros da estrutura física e de potência e do sistema de controle (Simulação computacional/C-HIL/Experimental).

Parâmetro	Valor	Unidade
Frequência de chaveamento (f_{ch})	15 / 10	kHz
Tensão de entrada CC (V_{CC})	500	V
Filtro LC– Indutor ($L_{fA,B,C}$)	1,57	mH
Filtro LC – Capacitor ($C_{fA,B,C}$)	33	μF
Impedância de linha de saída do inversor – Resistor 1 C-HIL ($R_{l1A,B,C}$)	0,2	Ω
Impedância de linha de saída do inversor – Indutor 1 C-HIL ($L_{l1A,B,C}$)	1	mH
Impedância de linha de saída do inversor – Resistor 2 C-HIL ($R_{l2A,B,C}$)	0,4	Ω
Impedância de linha de saída do inversor – Indutor 2 C-HIL ($L_{l2A,B,C}$)	2	mH
Impedância de linha de saída do inversor – Resistor Exp. ($R_{leA,B,C}$)	0,1	Ω
Impedância de linha de saída do inversor – Indutor Exp. ($L_{leA,B,C}$)	1,5	mH
Carga RL Metade – Potência Ativa (P_{cm})	2,5	kW
Carga RL Metade – Potência Reativa (Q_{cm})	1,375	$kVAr$
Carga RL Total – Potência Ativa (P_{ct})	5	kW
Carga RL Total – Potência Reativa (Q_{ct})	2,75	$kVAr$
Rede – Tensão nominal ($v_{rede(rms)}$)	127	V
Rede – Frequência nominal (f_{rede})	60	Hz
Rede – Resistência de linha (R_{rede})	0,2	Ω
Rede – Indutância de linha (L_{rede})	1	μH
Ganho proporcional P+Res de corrente (K_{pi})	12	
Constante ressonante P+Res de corrente (K_{ii})	10	
Frequência de corte P+Res de corrente (ω_{ci})	10	rd/s
Ganho proporcional P+Res de tensão (K_{pv})	0,1	
Constante ressonante P+Res de tensão (K_{iv})	10	
Frequência de corte P+Res de tensão (ω_{cv})	13	rd/s
Frequência de corte do filtro de medição (ω_f)	2π6	rd/s
Droop – Valor de equilíbrio de frequência (ω_0)	2π60	rd/s
Droop – Valor de equilíbrio de tensão (E_0)	√2(127+5)	V
Droop – Coeficiente $P-\omega$ (k_p)	0,0003	$rd/s/W$
Droop – Coeficiente $Q-E$ (k_q)	0,0005	V/VAr
Droop – Potência ativa de equilíbrio (P_0)	2,5	kW
Droop – Potência reativa de equilíbrio (Q_0)	1,375	$kVAr$
Impedância virtual – Indutor 1, Exp. (L_{v1})	5	mH
Impedância virtual – Resistor 1, Exp. (R_{v1})	30	$m\Omega$
Impedância virtual – Indutor 2 (L_{v2})	2,5	mH
Impedância virtual – Resistor 2 (R_{v2})	15	$m\Omega$
PLL Inv./MR-Rede – Ganho proporcional ($K_{P_{PLLs}}$)	0,0005	
PLL Inv./MR-Rede – Ganho integral ($K_{I_{PLLs}}$)	0,005	
PLL Rede – Ganho proporcional ($K_{P_{PLLrede}}$)	0,005	
PLL Rede – Ganho integral ($K_{I_{PLLrede}}$)	0,1	
Controle reativo PI – Ganho proporcional (K_{pQ})	5	
Controle reativo PI – Ganho integral (K_{iQ})	50	

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.2 – Simulações Computacionais

Como primeiro passo na consolidação do sistema de controle proposto como objeto passível de aplicação e reprodução reais após os projetos serem devidamente descritos, simulações computacionais foram concretizadas. Seus testes servem para atestar seu

funcionamento essencial e averiguar todos os modos de operação, emitindo um sinal de prosseguimento para análises mais profundas com as modificações necessárias a partir de resultados obtidos por meio de plataformas C-HIL e, por fim, de montagem experimental. Optou-se por empregar o programa de computador PSIM para tanto, uma vez que este software disponibiliza a maior parte de ferramentas necessárias para a pesquisa vigente.

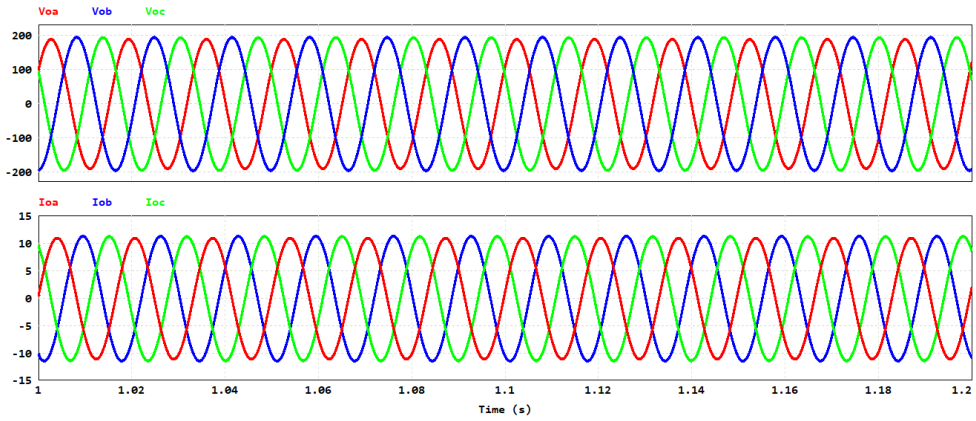
Alguns pontos precisam ser destacados antes de se passar aos resultados. O primeiro é que, de acordo com a metodologia proposta e considerando sua utilidade, as simulações computacionais têm a função primordial de dar um respaldo básico, rápido e de baixo custo. Com este fim, elas logram em permitir um exame primário que leva a ajustes e adaptações relevantes. Mais do que isso, os modelos virtuais admitem testes impraticáveis e mesmo impossíveis na realidade, os quais o controle deve estar preparado caso ocorram e que trazem respostas importantes para o avanço da investigação. O segundo ponto é que, diante destes pressupostos, na simulação computacional, é preciso enfatizar, a estrutura é ideal, uma primeira aproximação, no qual são ignorados determinados elementos, ocorrências e perdas. Neste sentido, como o escopo do trabalho está voltado primordialmente para o sistema de controle, a estrutura física é a mais simples possível, mas os controladores, em blocos ou linguagens de programação, são mais completos. De tal modo, um único inversor é avaliado; múltiplos na forma de uma microrrede são deixados para plataformas C-HIL, vistos no capítulo seguinte. É o terceiro ponto a se levantar. Este inversor unitário é simulado como uma fonte de tensão ideal, reproduzindo exatamente o sinal de referência proporcionado pelos controladores. Não há preocupação com sua topologia, seu chaveamento ou sua modulação por enquanto. Devido aos esquemas de controle, aos desacoplamentos e realimentações (COELHO, 2000; RYAN, LORENZ, 1995), essa suposição é válida. Efeitos e perdas dos semicondutores, dos filtros e de outros elementos físicos podem ser ignorados, sem prejuízo aos testes. O processamento computacional também diminui, o que facilita o desenvolvimento das simulações. O filtro LC, a impedância de linha, a carga e a rede externa são considerados por inteiro, mas a chave estática de interconexão não, sendo ideal. Assim, estes ensaios ficarão mais concentrados na estratégia de controle. Tendo um sistema ideal e indutância adicional de linha presente, a impedância virtual pôde e foi reduzida para $L_v = 1\ mH$, o restante se mantendo como no projeto, a menos das particularidades da simulação.

Portanto, visando avaliar, ao menos preliminarmente, as características da estratégia de controle proposta e verificar seu funcionamento, diferentes testes de simulação computacional foram organizados e realizados de acordo com os modos e as etapas de operação. Para cada um,

variações expressivas foram aplicadas e condições atípicas foram ensaiadas para se ter cenários críticos que comprovem o êxito do controlador. Potências, frequências, tensões e correntes são medidas no tempo e são elas as variáveis a exibir o comportamento do sistema. Apesar de preliminares, os resultados já dão bons indícios da robustez e da eficácia da técnica de controle.

Os primeiros dos testes são feitos no modo ilhado. O método de controle *droop*, juntamente à impedância virtual e aos controladores internos, dão suporte ao inversor nesta conjuntura. A Figura 5.7 exibe as tensões v_o e as correntes i_o trifásicas instantâneas de fase na saída do inversor para carga total. O início da simulação ($1\ s$) é excluído devido aos transitórios de simulação. Os efeitos dos controles interno e primário e da configuração em fonte de tensão ideal podem ser enxergados pelo baixíssimo conteúdo harmônico e pelo equilíbrio, com formas de onda com índices elevados de qualidade da energia.

Figura 5.7 - Tensões e correntes em regime permanente na saída do inversor em modo ilhado em simulação computacional.

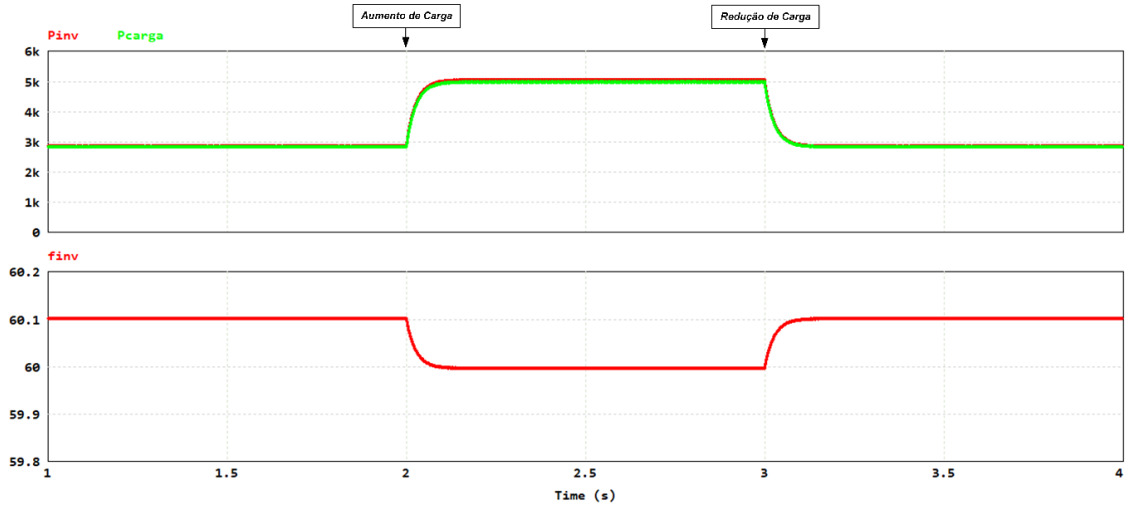


Fonte: Elaborada pelo autor.

É preciso conferir as referências geradas pelo método de controle *droop*, assim como o fornecimento e o suprimento de potências em modo ilhado. Os próximos testes fazem isso, variando a carga de sua metade para seu máximo e retornando ao estado inicial. Estas alternâncias ocorrem, respectivamente, nos instantes de $2\ s$ e $3\ s$. A Figura 5.8 mostra as potências ativas produzida pelo inversor P_{inv} e na carga P_{carga}, além da frequência do inversor f_{inv}.

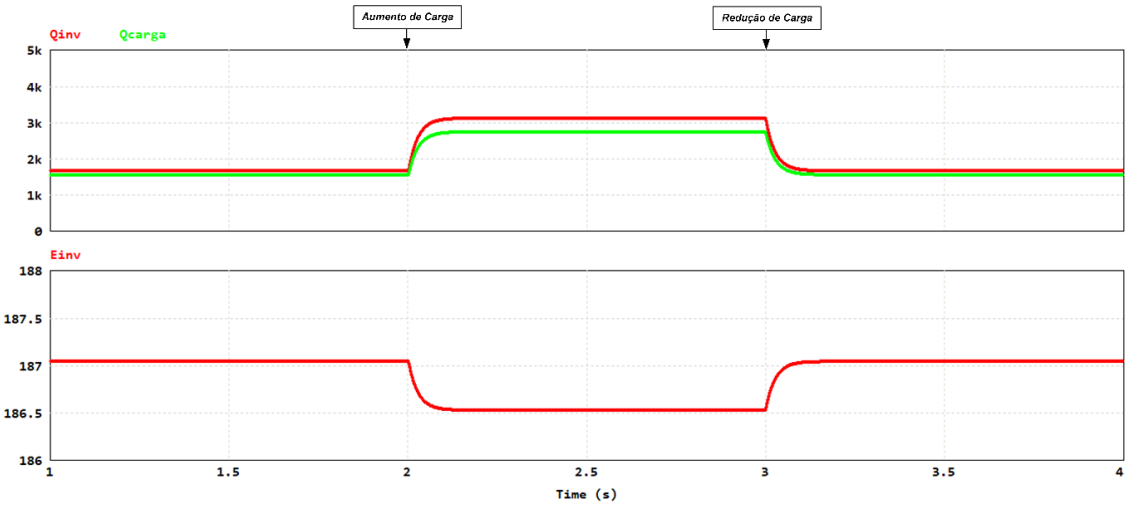
Já a Figura 5.9 oferece as potências reativas do inversor Q_{inv} e na carga Q_{carga}, com a amplitude da tensão do inversor E_{inv}. A Figura 5.10 ilustra a potência aparente do inversor S_{inv} e na carga S_{carga}. Como esperado, a técnica dá bons resultados e os parâmetros de referência acompanham as mudanças de geração de energia. Ensaios similares serão feitos no modo conectado à rede para efeitos de comparação.

Figura 5.8 - Potências ativas e frequência em modo ilhado em simulação computacional.



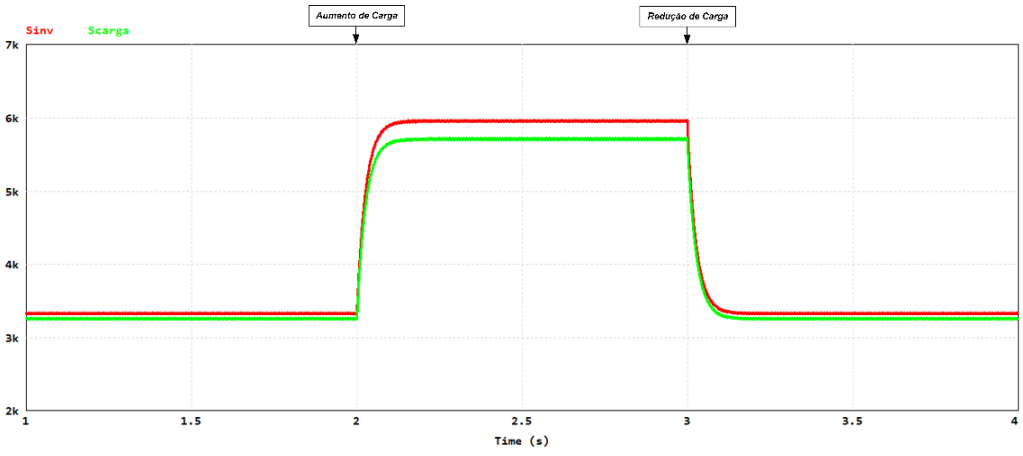
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 5.9 - Potências reativas e amplitude de tensão em modo ilhado em simulação computacional.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 5.10 - Potências aparentes em modo ilhado em simulação computacional.

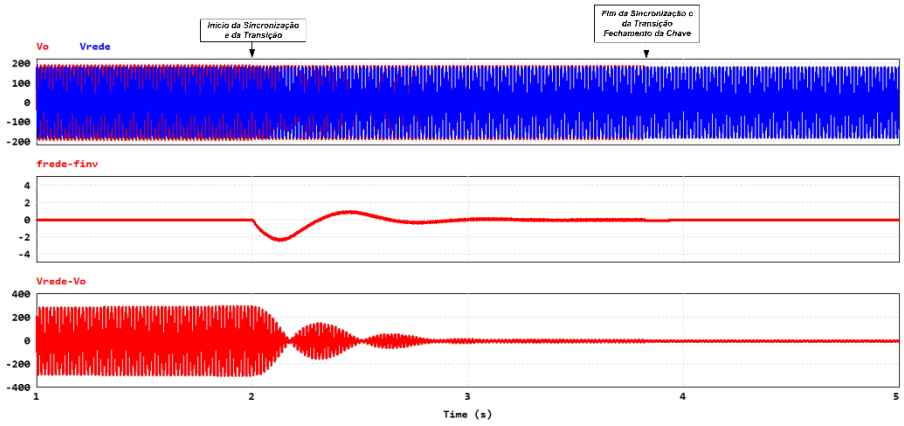


Fonte: Elaborada pelo autor.

Os processos de sincronização ativa e transição suave formam o segundo grupo de testes. Para verificar o sucesso da estratégia de controle, a rede elétrica, que idealmente se encontraria com tensão de fase de $127\ V$ e frequência de $60\ Hz$, estará com estes valores e o de fase relativa ao inversor distintos. Empregar estas diferenças entre o inversor e a rede externa permite que a sincronização seja observada mais claramente. Os parâmetros que estarão nos resultados são as tensões de fase A do inversor v_o e da rede v_{rede}, assim como as diferenças de frequência $f_{rede} - f_{inv}$ e de tensão $v_{rede} - v_o$ entre os dois sistemas. Se a primeira for nula, a sincronização em frequência foi bem sucedida, e se a segunda também o for, amplitude de tensão e fase serão iguais. O comando de conexão é acionado em $2\ s$ com o inversor em modo ilhado e $T_{sinc} = 1\ s$. A carga durante todo o período destes ensaios será a total.

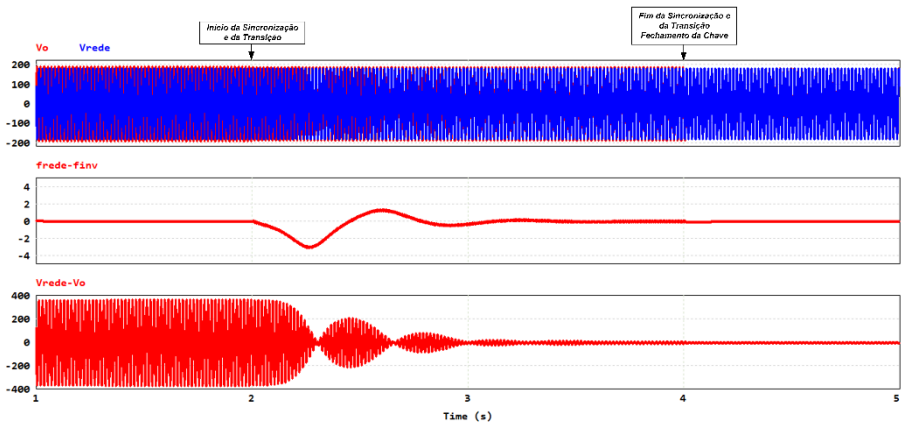
Cada variável é modificada em cada teste mantendo as outras duas inalteradas em seus valores nominais. Nos primeiros testes, os ângulos de fase serão diferentes. Em um, visto na Figura 5.11, a diferença é de 90º, enquanto no outro, aquele da Figura 5.12, ela é de 150º.

Figura 5.11 - Sincronização ativa e transição suave para ângulos de fase distintos em 90° em simulação computacional.



Fonte: Elaborada pelo autor.

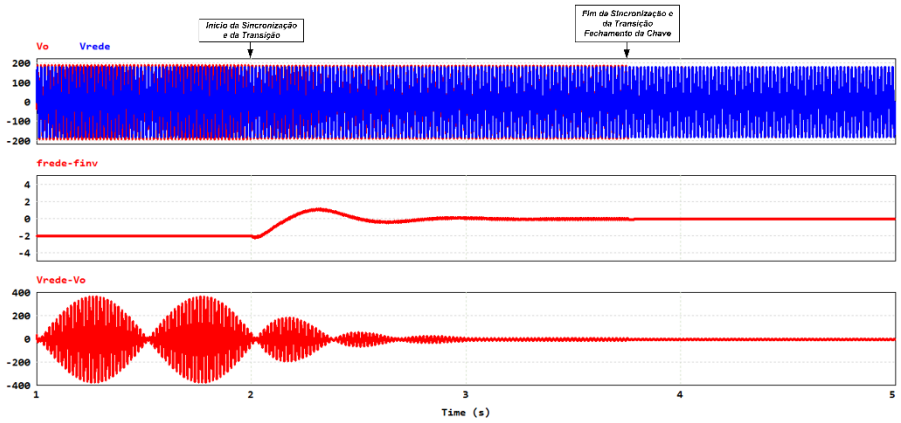
Figura 5.12 - Sincronização ativa e transição suave para ângulos de fase distintos em 150° em simulação computacional.



Fonte: Elaborada pelo autor.

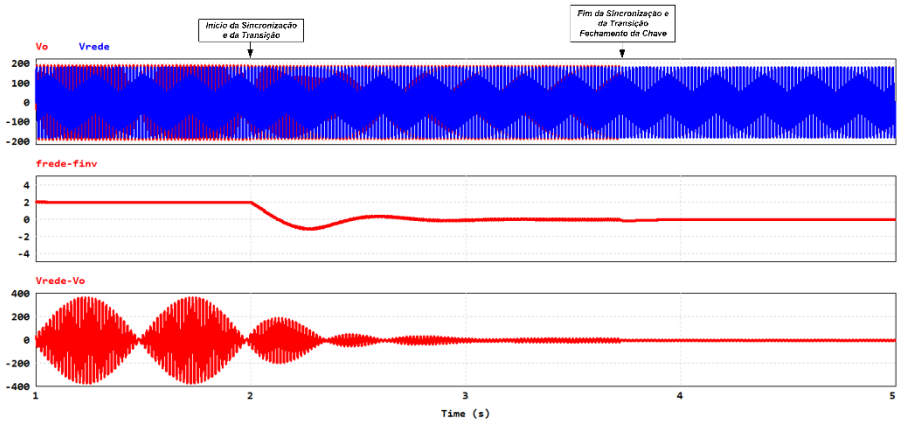
Em seguida, as fases são retomadas com diferença nula e é realizado o teste para frequências distintas. A desigualdade é de 2 Hz para cima ou para baixo sobre a frequência do inversor em modo ilhado, de aproximadamente 60 Hz. Na Figura 5.13, a rede externa está em 58 Hz, enquanto na Figura 5.14, ela trabalha em 62 Hz.

Figura 5.13 - Sincronização ativa e transição suave para rede externa com 58 Hz em simulação computacional.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 5.14 - Sincronização ativa e transição suave para rede externa com 62 Hz em simulação computacional.



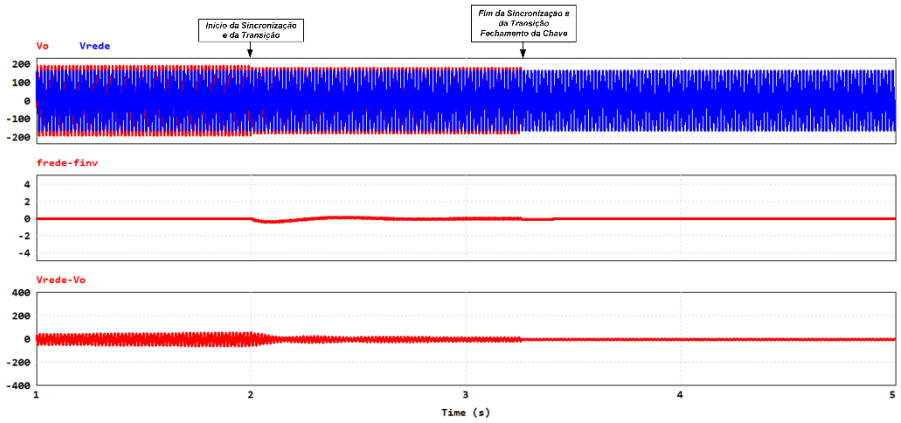
Fonte: Elaborada pelo autor.

Amplitudes de tensão díspares também foram avaliadas. Para tanto, a frequência foi mantida em 60 Hz e a diferença de fase em 0°, mas a magnitude da tensão do sistema elétrico foi estabelecida em 10% abaixo (Figura 5.15) e 10% acima (Figura 5.16) do valor nominal.

De forma geral, o que se observa é que os processos de sincronização ativa e transição suave, mesmo em condições tão adversas e anormais, conseguem cumprir suas funções e permitem a conexão do inversor de geração distribuída ou de microrrede a uma rede externa. Os critérios de sincronização são cumpridos, anulando as diferenças existentes e possibilitando o fechamento da chave entre os sistemas, ao igualar a saída do conversor com os parâmetros

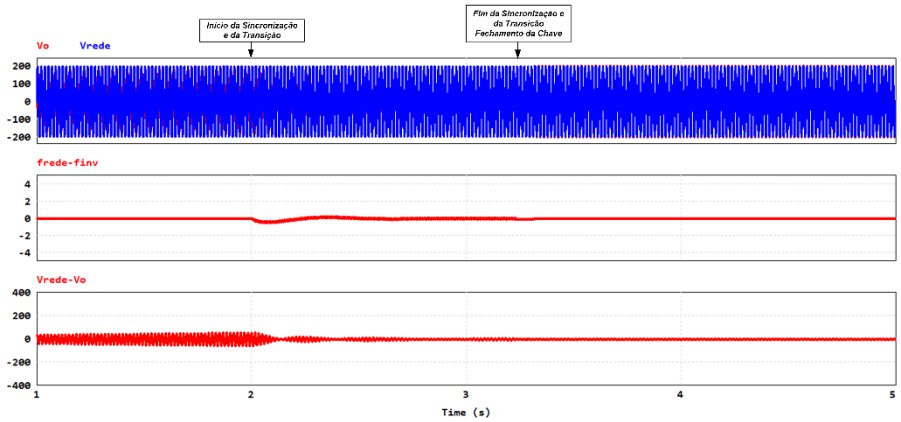
externos no tempo. O período completo para efetivar a ação é pequeno, sendo que nenhuma das situações, mesmo as mais intensas, duraram mais que 2 s (ressaltando que $T_{sinc} = 1\ s$).

Figura 5.15 - Sincronização ativa e transição suave para rede externa com amplitude de tensão de 90% do valor nominal em simulação computacional.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 5.16 - Sincronização ativa e transição suave para rede externa com amplitude de tensão de 110% do valor nominal em simulação computacional.



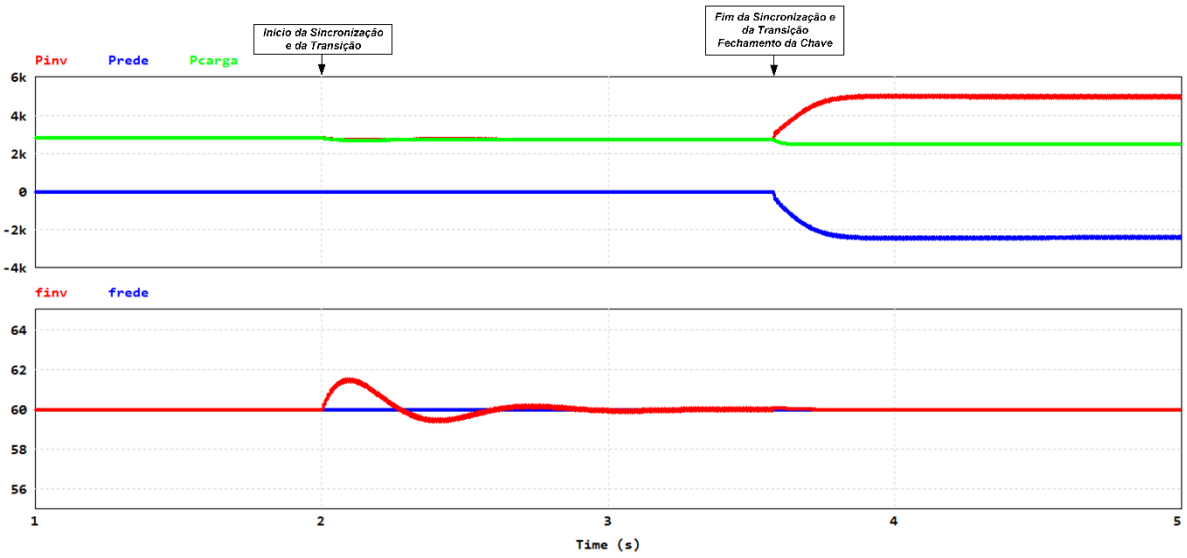
Fonte: Elaborada pelo autor.

A passagem do modo ilhado para modo conectado à rede precisa ser igualmente analisada sob termos de potências, frequências, tensões e correntes no tempo. Resultados para isso são expostos. Neste caso, a rede externa foi definida como estando com valores nominais, isto é, 127 V de tensão, 60 Hz de frequência, mas diferença de fase de 45°. A carga foi escolhida para ser apenas a metade da instalada, em torno de $P_{carga} = 2{,}5\ kW$ e $Q_{carga} = 1{,}375\ kVAr$. Tal opção se deve às próximas verificações de variações de consumo. A carga total nos testes anteriores foi tomada para examinar cenários mais problemáticos.

A Figura 5.17 mostra as potências ativas do inversor P_{inv}, da rede P_{rede} e na carga P_{carga}, além das frequências do conversor f_{inv} e do sistema elétrico externo f_{rede}. Já a Figura 5.18 apresenta os semelhantes no lado reativo, isto é, as potências reativas do inversor Q_{inv}, da

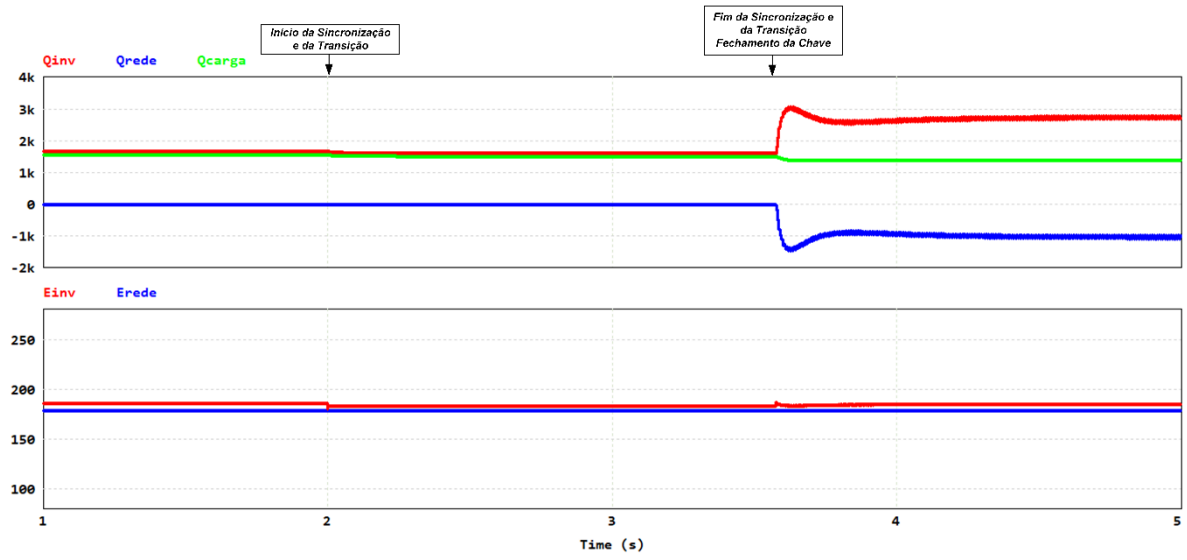
rede Q_{rede} e na carga Q_{carga} e das amplitudes de tensão do conversor E_{inv} e do sistema adjacente E_{rede}. Aplica-se, na conexão, $P_{irede} = P_o = 5\ kW$ e $Q_{irede} = Q_o = 2{,}75\ kVAr$.

Figura 5.17 - Potências ativas e frequências durante a sincronização ativa e transição suave para conexão em simulação computacional.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 5.18 - Potências reativas e amplitudes de tensão durante a sincronização ativa e transição suave para conexão em simulação computacional.

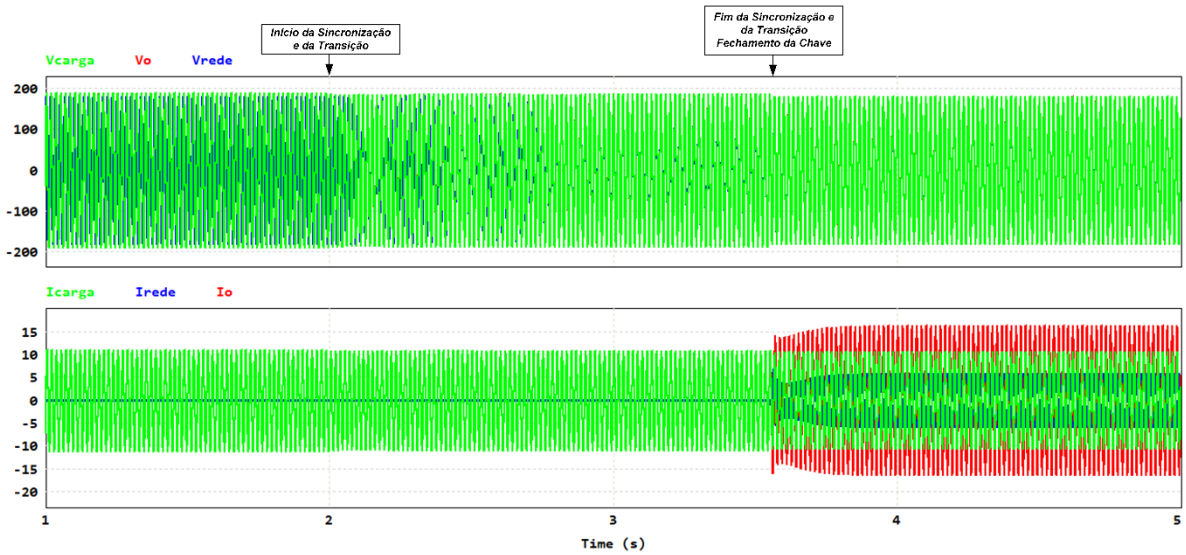


Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 5.19 ilustra tensões e correntes instantâneas da fase A do inversor, da rede e da carga, respectivamente, v_o, v_{rede} e v_{carga} e i_o, i_{rede} e i_{carga} para o mesmo processo. Os resultados evidenciam a sincronização efetivada e a transição suave, praticamente sem transitórios indesejados. No fechamento da chave de interconexão, os sistemas começam a trabalhar juntos, em cooperação, com troca de energia entre eles. A frequência e a magnitude

de tensão do inversor variam rápida e minimamente para concretizar a sincronização e levar à conexão. No controlador, a potência ativa foi designada para se manter em $P_{irede} = P_o = 5\,kW$, assim como a potência reativa, com $Q_{irede} = Q_o = 2{,}75\,kVAr$. Diferentemente do modo ilhado, no qual se segue a carga, agora o inversor produz estes valores indicados. As consequências são como planejadas. As diferenças entre a produção do inversor e a carga são exportadas para a rede externa, evidenciando a capacidade da estratégia de controle. Os próximos testes são elaborados já para a operação em modo conectado à rede em andamento. Nele fica mais claro o funcionamento do método de controle nestas ocasiões.

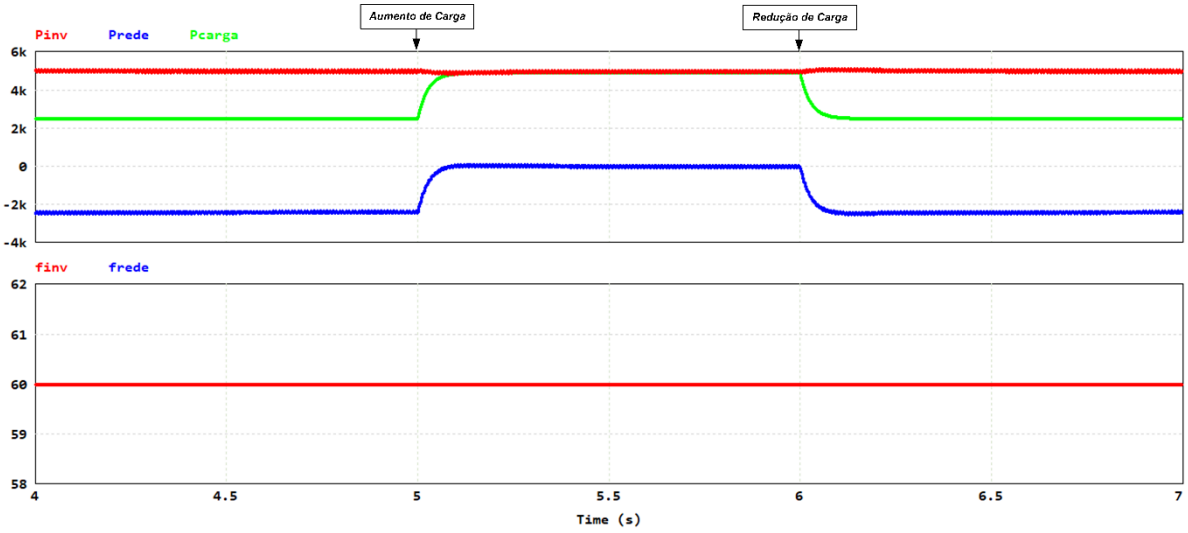
Figura 5.19 - Tensões e correntes instantâneas durante a sincronização ativa e transição suave para conexão em simulação computacional.



Fonte: Elaborada pelo autor.

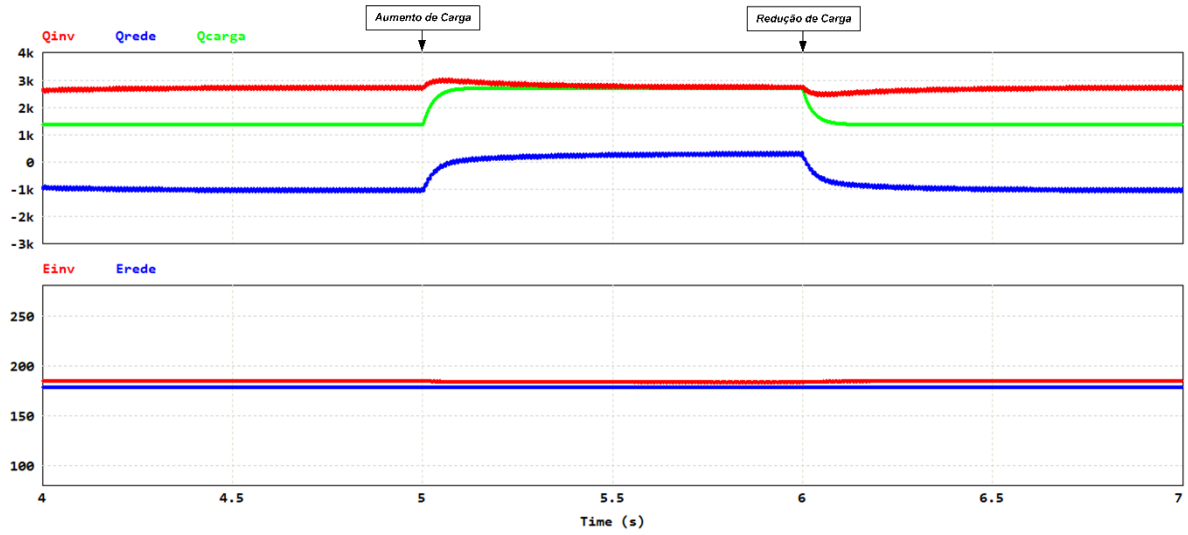
O terceiro conjunto de ensaios aborda o inversor já conectado à rede e trabalhando normalmente. As condições da rede externa continuam sendo as últimas. São simuladas variações de carga, idênticas às feitas para ilhamento, indo da metade para o total e voltando para a condição inicial, nos respectivos instantes de 5 s e 6 s. Desta vez, a estratégia de controle determina potências de rede fixas em $P_{irede} = 5\,kW$ e $Q_{irede} = 2{,}75\,kVAr$. Para potências ativas e frequências, a Figura 5.20 comprova que, estando a produção do inversor igualada ao consumo em sua totalidade, a rede externa para de trocar energia com o sistema local. O mesmo se dá para as potências reativas e amplitudes de tensão da Figura 5.21. No retorno à metade da carga, o excedente do conversor é enviado para o sistema elétrico principal, voltando a trabalhar como exportador para a rede elétrica externa. Note-se que frequência e magnitude de tensão não são afetadas.

Figura 5.20 - Potências ativas e frequências no modo conectado à rede para variações de carga em simulação computacional.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 5.21 - Potências reativas e amplitudes de tensão no modo conectado à rede para variações de carga em simulação computacional.

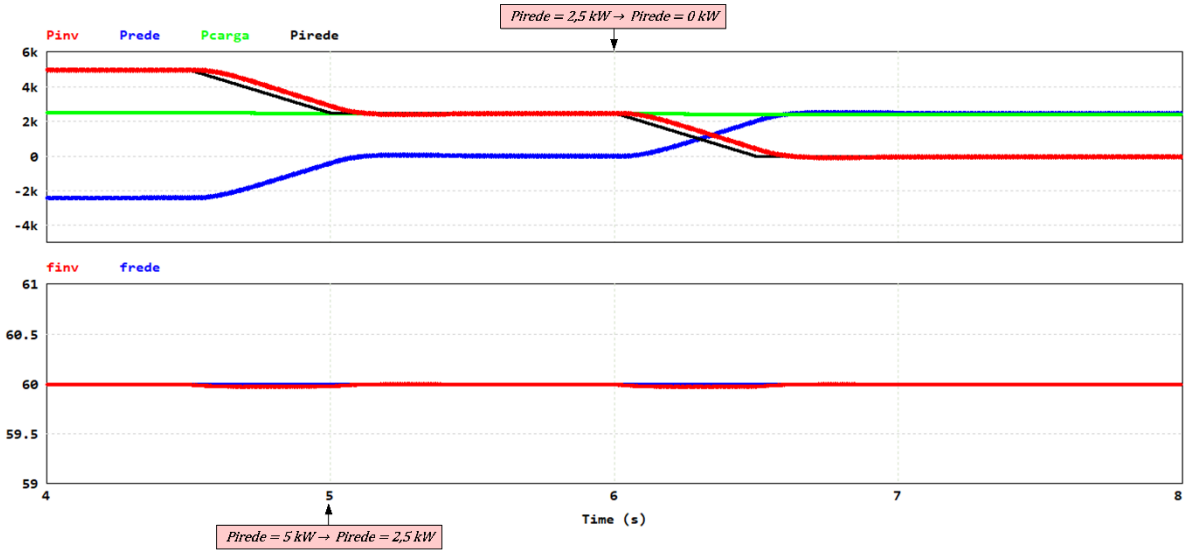


Fonte: Elaborada pelo autor.

Resta testar o gerenciamento do fluxo de potências ativa e reativa, realizado pela técnica de controle proposta. Primeiro para o caso da potência ativa. A carga foi mantida inalterada em sua metade de $P_{carga} = 2{,}5\ kW$ e a potência reativa foi fixada. A potência ativa de rede do inversor, por sua vez, foi administrada em 3 níveis. Inicia-se com $P_{irede} = 5\ kW$, passa-se a $P_{irede} = 2{,}5\ kW$ e finaliza-se com $P_{irede} = 0\ kW$. No primeiro, há exportação diante do excedente. No segundo, iguala-se geração e consumo e a rede externa não recebe, nem transporta energia. No terceiro e último, ocorre importação pela ausência de produção do inversor. Os resultados estão na Figura 5.22, assim como a referência P_{irede}. Desvios transitórios da frequência são vistos, mas tão pequenos que podem ser ignorados e não

impactam negativamente qualquer sistema. Alerta-se para a troca lenta e não instantânea, imediata, da produção de potência ativa. Se fosse mais devagar, tais variações de frequências seriam quase nulas. Existe um compromisso entre velocidade de atuação e estabilidade da frequência.

Figura 5.22 - Controle do fluxo de potência ativa no modo conectado à rede para carga fixa em simulação computacional.



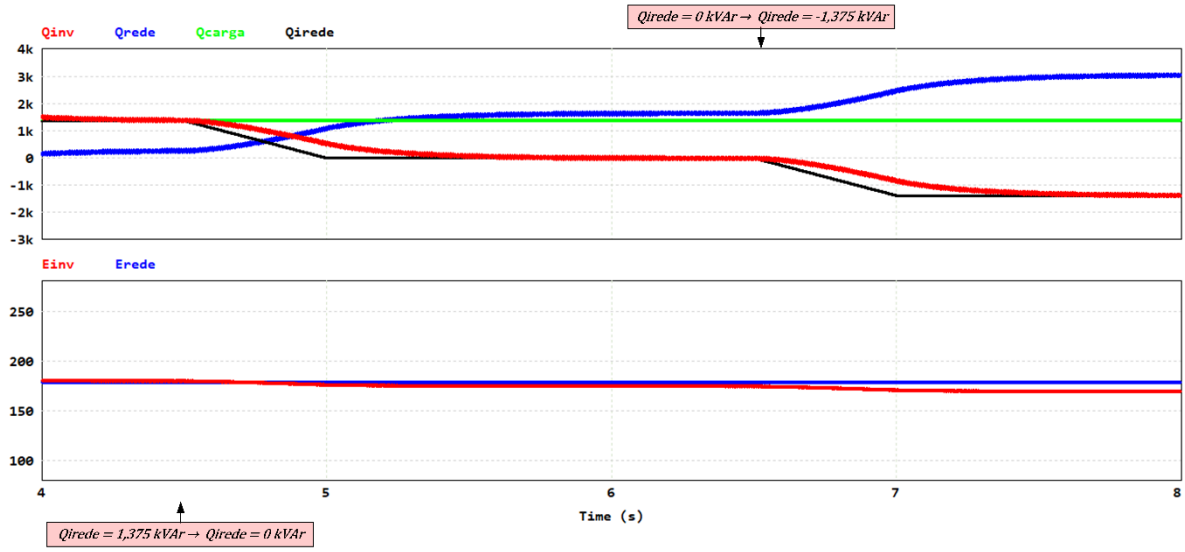
Fonte: Elaborada pelo autor.

Para mostrar o controle da potência reativa, algo similar foi feito. Como antes, a carga é a mesma em todo os momentos do teste em $Q_{carga} = 1{,}375\ kVAr$ e a potência ativa não muda. Atua-se apenas na potência reativa de saída do inversor através da referência que vai de $Q_{irede} = 1{,}375\ kVAr$ para $Q_{irede} = 0\ kVAr$ e, por último, $Q_{irede} = -1{,}375\ kVAr$. Esta referência, Q_{irede}, é visível juntamente com os resultados na Figura 5.23.

Por fim, faz-se o retorno ao modo ilhado. Aqui, somente a passagem planejada é demonstrada. Nela, o comando de desconexão é acionado em $5{,}5\ s$. A carga ainda é a metade do total, mas as referências P_{irede} e Q_{irede} estão nos seus máximos. Sem sincronização, o ilhamento intencional passa pela simples volta ao método de controle *droop* convencional. Não há quaisquer problemas e a operação continua normalmente após a abertura da chave, vista nas Figuras 5.24 e 5.25, onde potências ativas e frequências e potências reativas e magnitudes de tensão são exibidas, respectivamente. O inversor assume completamente a carga sem a rede externa interconectada. A frequência e a amplitude de tensão seguem o comportamento ditado pelas características *droop*. A Figura 5.26 mostra as tensões e correntes instantâneas para este retorno ao modo ilhado, evidenciando uma transição suave também neste caso.

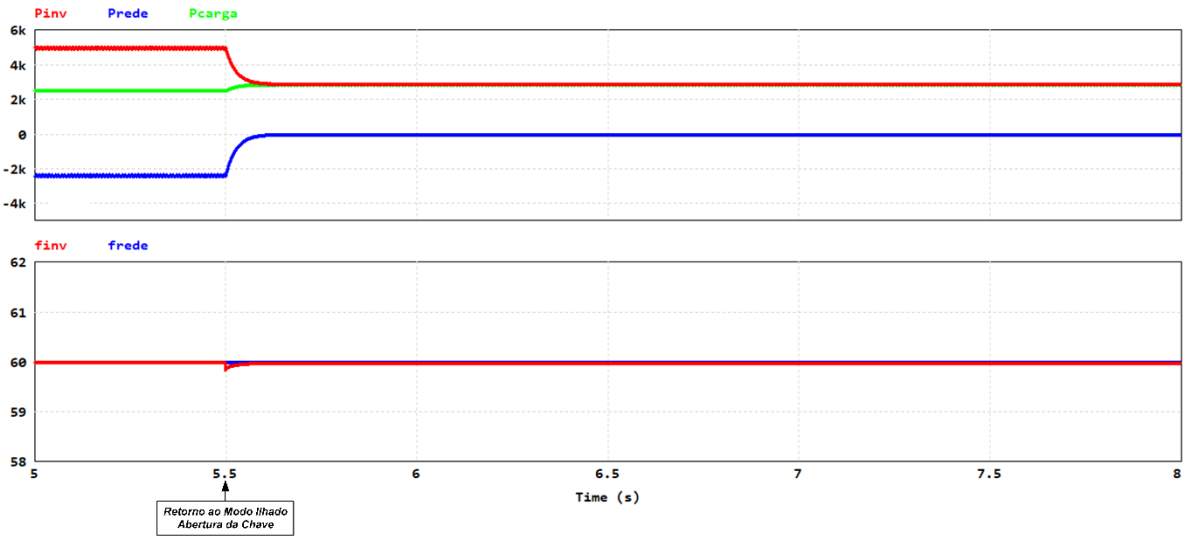
Os resultados preliminares indicam que a estratégia de controle proposta é factível. Todos os processos básicos foram verificados e o sistema de controle foi testado em situações críticas. Os principais parâmetros puderam ser analisados minuciosamente para todos os modos de operação. No entanto, a simulação computacional é elaborada em uma concepção singular e ideal. No próximo capítulo, através de plataformas C-HIL e testes experimentais, a técnica é validada verdadeiramente, tanto em microrrede, como em sistema de geração distribuída com inversor único.

Figura 5.23 - Controle do fluxo de potência reativa no modo conectado à rede para carga fixa em simulação computacional.



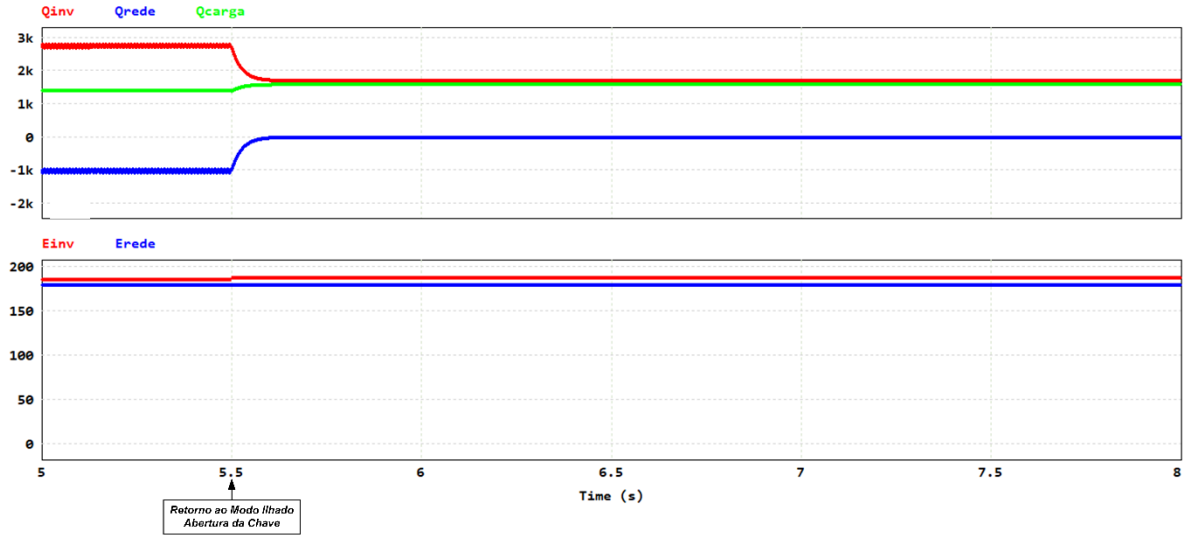
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 5.24 - Potências ativas e frequências durante o retorno ao modo ilhado em simulação computacional.



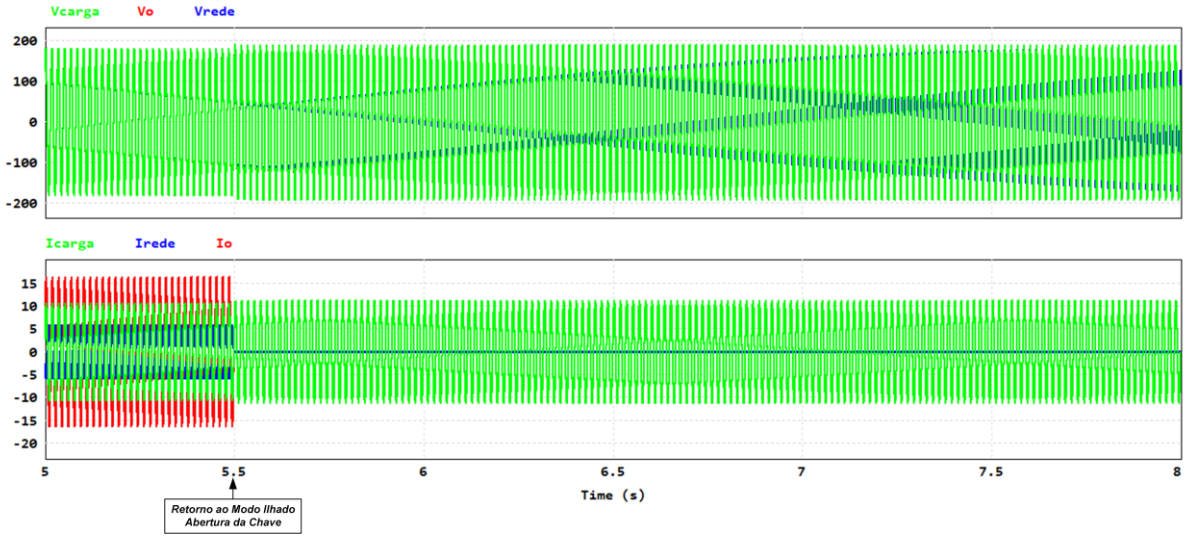
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 5.25 - Potências reativas e amplitudes de tensão durante o retorno ao modo ilhado em simulação computacional.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 5.26 – Tensões e correntes instantâneas durante o retorno ao modo ilhado em simulação computacional.



Fonte: Elaborada pelo autor.

6 - RESULTADOS EM PLATAFORMAS *CONTROLLER HARDWARE-IN-THE-LOOP* (C-HIL) E EXPERIMENTAIS

A modelagem e os resultados das simulações computacionais indicaram que a proposta de sistema de controle é viável. Todavia, para reclamar sua validade efetiva, tais construções e testes ainda não são suficientes. Assim, continuando o procedimento investigativo colocado, neste capítulo são apresentados resultados para plataformas C-HIL e para ensaios experimentais, nesta ordem. Os primeiros servem como etapa intermediária, trazendo estruturas mais fidedignas à realidade e incorporando a estratégia de controle embarcada em microcontrolador, exatamente como é aplicada na concretização empírica. Os últimos dão a palavra final sobre a contribuição, pois a técnica é examinada no ambiente material completo, mesmo que em forma de protótipo.

Pelas limitações práticas, o uso dos dispositivos C-HIL tem outro propósito para além dos testes corriqueiros. O emprego destes sistemas serve também para, por um lado, passar a estratégia por condições inviáveis no modelo experimental, mas com não-idealidades distintas da simulação computacional simples, importantes para análise, e, por outro lado, avaliar a técnica na configuração de microrrede, com mais de um inversor trabalhando em paralelo. Esta disposição não foi possível de ser observada na montagem experimental por diferentes motivos para esta tese, tais como disponibilidade de tempo, restrições práticas, etc. Não obstante isso, acredita-se que, por sua capacidade altamente realista em emular os sistemas materiais integrando não-idealidades, resultados em tempo real e controladores práticos, os produtos obtidos são suficientes para respaldar a proposta em microrredes com fortes indícios de ser replicáveis com sucesso em modelos experimentais. Por essa razão, evitando repetições e reduzindo espaços, apesar de terem ocorridos testes com inversor individual, os resultados em C-HIL mostrados são apenas para dois inversores em arquitetura de microrrede.

Como consequência do que foi exposto, os ensaios empíricos foram todos feitos somente em composição de inversor único, como um sistema de geração distribuída. Apesar disso, todo o restante da estrutura está presente: carga local, rede externa de distribuição e chave estática de interconexão. Os parâmetros são aqueles informados anteriormente.

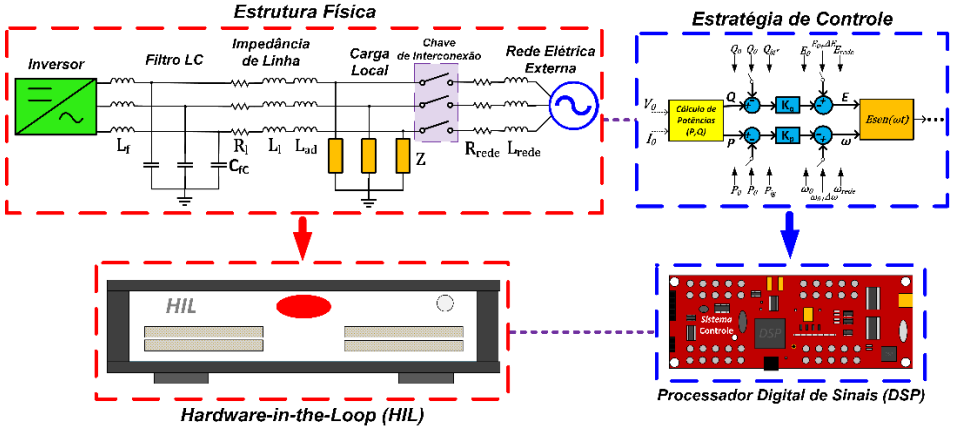
6.1 – Resultados em Plataformas *Controller Hardware-In-the-Loop* (C-HIL)

Antes de se passar aos resultados, é preciso explicar no que consiste uma plataforma C-HIL precisamente e como é a organização utilizada neste trabalho. Um sistema C-HIL é formado por um estágio HIL, um dispositivo físico que pode emular em tempo real modelos de

potência realísticos, e por um microcontrolador integrado a ele embarcando o algoritmo final de determinada técnica de controle. Atualmente, tanto na literatura especializada, quanto na indústria, é bastante comum usar estas tecnologias em seus processos para modelar, testar e verificar uma determinada solução, pois requer poucos recursos, reduz custos e permite várias análises distintas, repetitivas e complexas em um ambiente seguro. A estrutura física é instantaneamente avaliada e os sinais de entrada e de saída podem ser proporcionalmente observados com osciloscópios e outros instrumentos de medida, exibindo um comportamento que é de alta fidelidade com o sistema prático (BUSARELLO, SIMÕES, LAAKSONEN, 2024).

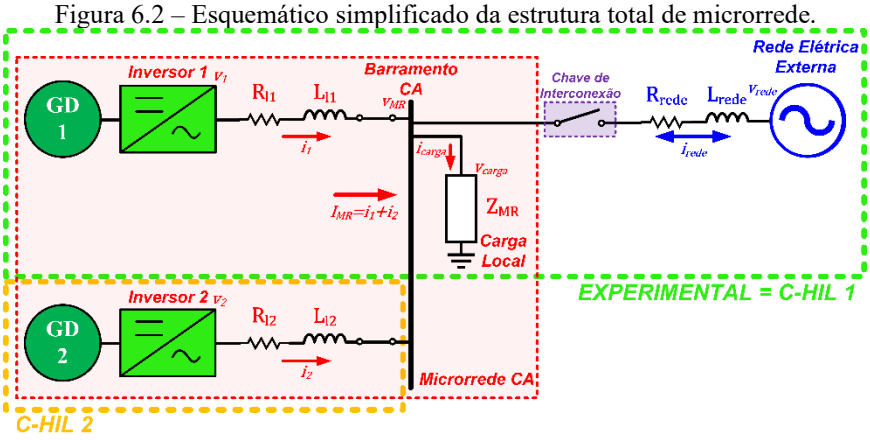
Na pesquisa, todas as partes de potência foram inteiramente replicadas em modelos nos dispositivos HIL, mais especificamente em plataformas Typhoon HIL 404. O sistema de controle, essencialmente o mesmo do experimental, por sua vez, foi implementado em unidades DSP, aqui do tipo Texas Instruments (TI) DSP LAUNCHXL-F28379D. Os dois elementos foram integrados através de interfaces HIL TI Launchpad. A configuração final de microrrede é composta por dois inversores em paralelo. Portanto, para cada um foi montada uma plataforma C-HIL completa, conforme a Figura 6.1, e as duas ligadas entre si. A um dos inversores, chamado inversor 1 para o C-HIL 1, é atribuído o controlador central e, em seu dispositivo HIL está todo o restante do circuito: carga local, chave estática de interconexão e rede externa. O experimental tem organização igual a esta do C-HIL 1. O equipamento C-HIL 2 com o inversor 2 é formado apenas por ele próprio e sua linha. A comunicação entre eles é feita internamente, por meio dos computadores que integram ambos com aplicação do software PC Typhoon HIL Control Center. O sistema total em esquemático pode ser visto na Figura 6.2. A montagem real, contando com o osciloscópio e mostrando a plataforma de código do sistema de controle no programa PC TI Code Composer C2000, é exibida na Figura 6.3.

Figura 6.1 – Disposição da plataforma C-HIL: estrutura física em HIL e estratégia de controle em DSP.



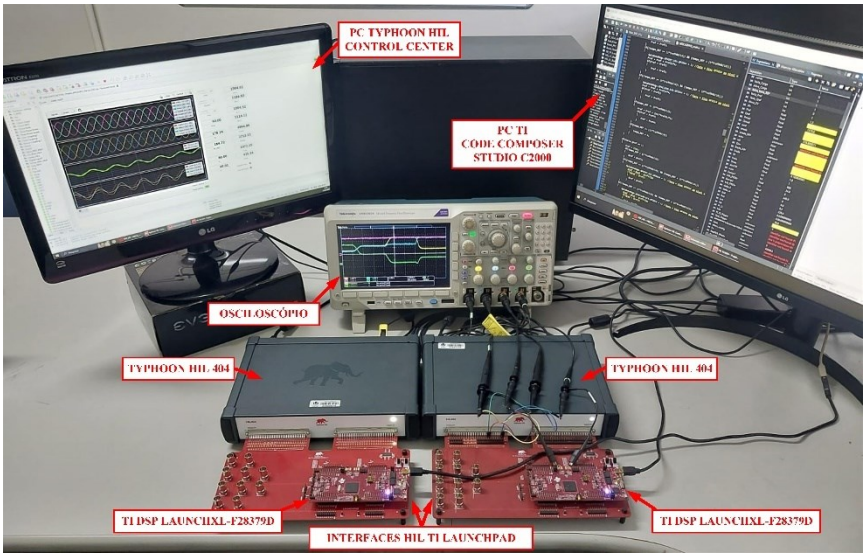
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 6.2 – Esquemático simplificado da estrutura total de microrrede.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 6.3 – Configuração real para testes e resultados de microrredes com sistema de controle em plataformas C-HIL.



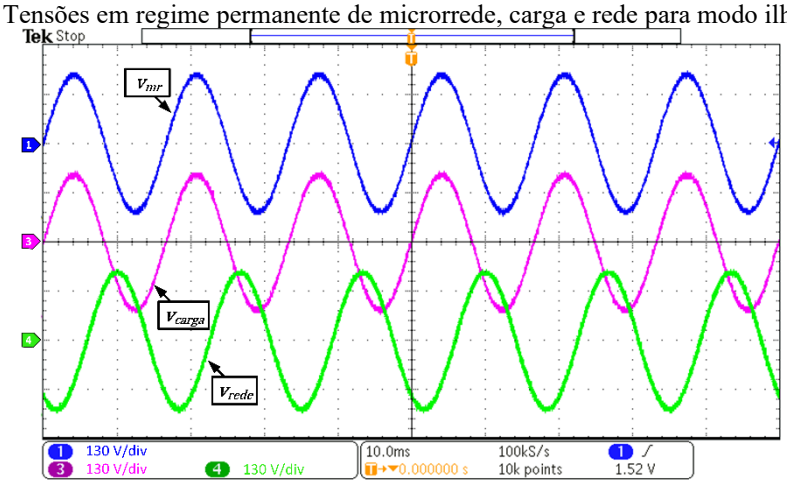
Fonte: Elaborada pelo autor.

Os primeiros testes confirmam o bom desempenho em regime permanente para qualquer modo de operação, considerando uma rede externa ideal, sem distorção harmônica ou desequilíbrios. Os dois inversores da microrrede produzem sinais senoidais trifásicos de tensão v_{mr} no barramento CA com aproximadamente 60 Hz de frequência e 180 V de magnitude em todas as situações. Além dela, as tensões de carga v_{carga} e da rede externa v_{rede} são mostradas nas Figuras 6.4 e 6.5 em, respectivamente, modos ilhado e conectado à rede. A carga se encontra na metade de seu consumo e as referências de potência na metade de suas capacidades. Quando interconectada à distribuição, todas as tensões estão sincronizadas. Todos os sinais exibidos daqui para frente são da fase A.

Os sinais de corrente dos inversores e da microrrede são apresentados nas Figuras 6.6 e 6.7 para condições de ilhamento e conexão, nesta ordem. As formas de onda têm elevados níveis de qualidade de energia, com baixa distorção harmônica para rede em circunstância nominal.

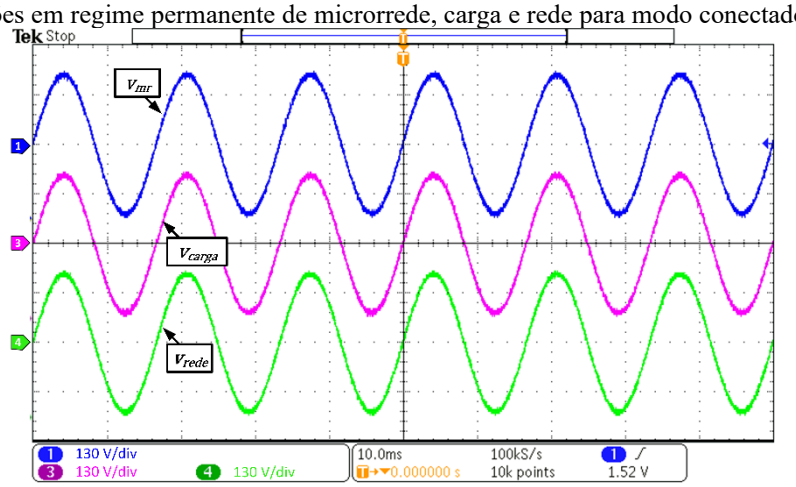
A corrente da microrrede i_{mr} é a soma daquelas dos inversores i_1 e i_2. A produção e, respectivamente as correntes, são maiores no modo conectado, já que as referências são ativadas e seguidas.

Figura 6.4 – Tensões em regime permanente de microrrede, carga e rede para modo ilhado em C-HIL.



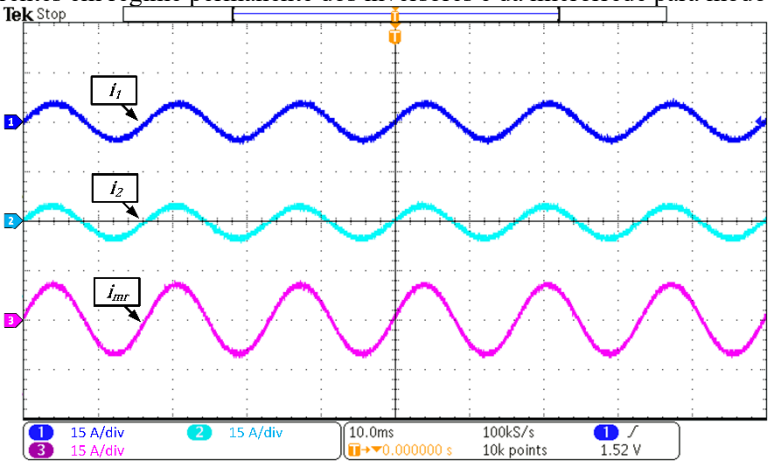
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 6.5 – Tensões em regime permanente de microrrede, carga e rede para modo conectado à rede em C-HIL.



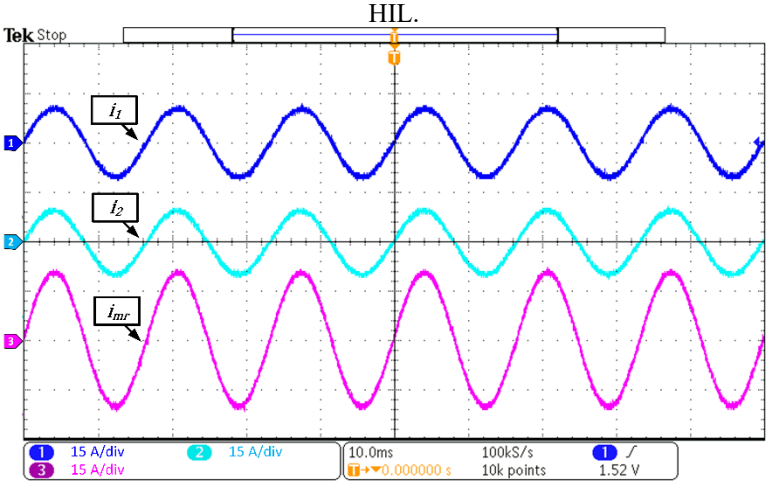
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 6.6 – Correntes em regime permanente dos inversores e da microrrede para modo ilhado em C-HIL.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 6.7 – Correntes em regime permanente dos inversores e da microrrede para modo conectado à rede em C-HIL.



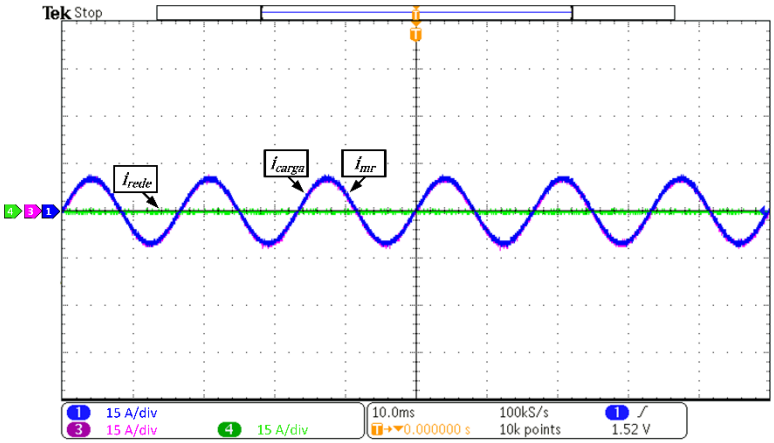
Fonte: Elaborada pelo autor.

As correntes de microrrede i_{mr}, de carga i_{carga} e de i_{rede} são apresentadas juntas nas Figuras 6.8 e 6.9 para modos ilhado e conectado à rede, respectivamente. No primeiro caso, a contribuição da rede é nula (chave aberta), enquanto a produção da microrrede é igual ao consumo local, dado que o método de controle *droop* faz com que os conversores somente executem e compartilhem a demanda necessária de potência. No último caso, a soma das correntes dos inversores, seguindo as referências de potência nos controladores, é o dobro dos requisitos de carga, e, então, a corrente excedente é exportada para a rede externa.

Diferentes testes foram realizados para investigar, avaliar e provar a efetividade da técnica de controle proposta fornecendo sincronização ativa e transição suave. Para garantir um processo de sincronização altamente confiável e flexível, os parâmetros da rede foram modificados para condições extremamente críticas de 58 Hz e 62 Hz em frequência no modelo C-HIL. Ao analisar o sistema de controle nestas conjunturas anormais de rede e a correspondente sincronização bem-sucedida, é possível assegurar com mais confiança que ele vai funcionar satisfatoriamente sob a situação nominal de 60 Hz. Os respectivos resultados são evidenciados nas Figuras 6.10 e 6.11, onde as diferenças de frequência $f_{rede} - f_{mr}$ e de tensões instantâneas $v_{rede} - v_{mr}$ são destacadas. Um comando manual foi acionado para conexão. É importante notar e lembrar que um algoritmo foi elaborado e atua para garantir que a sincronização é completada com sucesso e que uma transição suave ocorra. Desta feita, a chave estática de interconexão fecha somente se as diferenças de frequência, consequentemente de fase pela estrutura PLL aplicada, é muito próxima de zero e o tempo definido como $T_{sinc} = 1\ s$ é ultrapassado depois das formas de onda se mantiverem fixamente coincidentes, para se ter certeza de que elas não se sobrepuseram apenas instantaneamente. Mesmo com estes

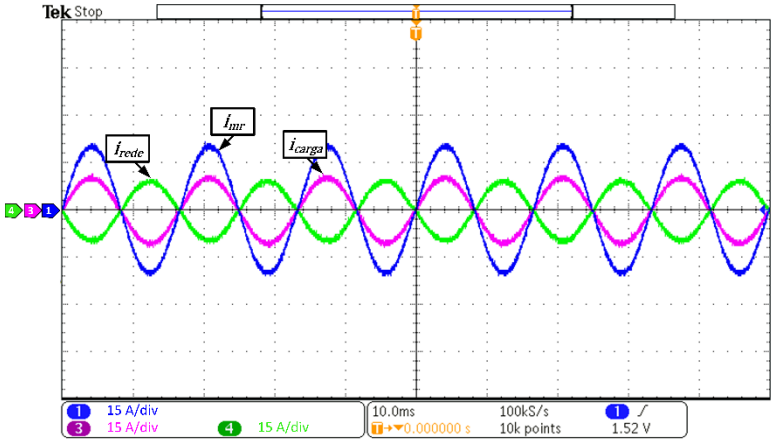
procedimentos, a sincronização é extremamente rápida, finalizando em menos de $2\,s$ da ativação do comando de conexão até o fechamento da chave. Neste momento, $(f_{rede} - f_{mr}) = 0$ e $(v_{rede} - v_{mr}) \cong 0$, microrrede e rede estão sincronizadas e podem ser interconectadas.

Figura 6.8 – Correntes em regime permanente da microrrede, da carga e da rede externa para modo ilhado em C-HIL.



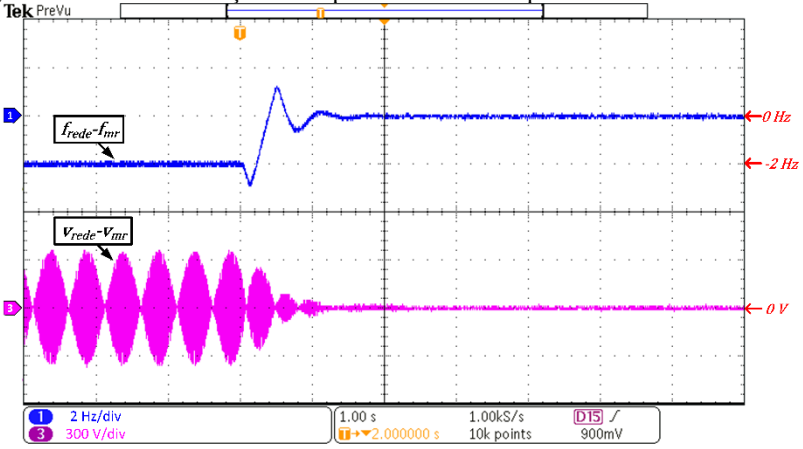
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 6.9 – Correntes em regime permanente da microrrede, da carga e da rede externa para modo conectado à rede em C-HIL.



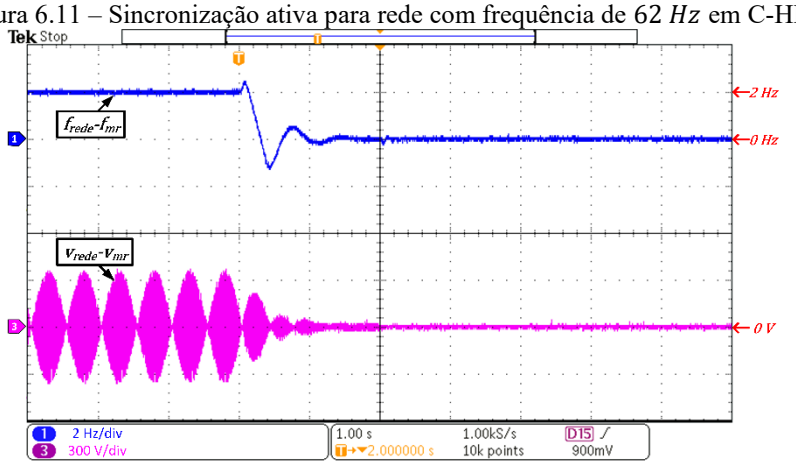
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 6.10 – Sincronização ativa para rede com frequência de 58 Hz em C-HIL.



Fonte: Elaborada pelo autor.

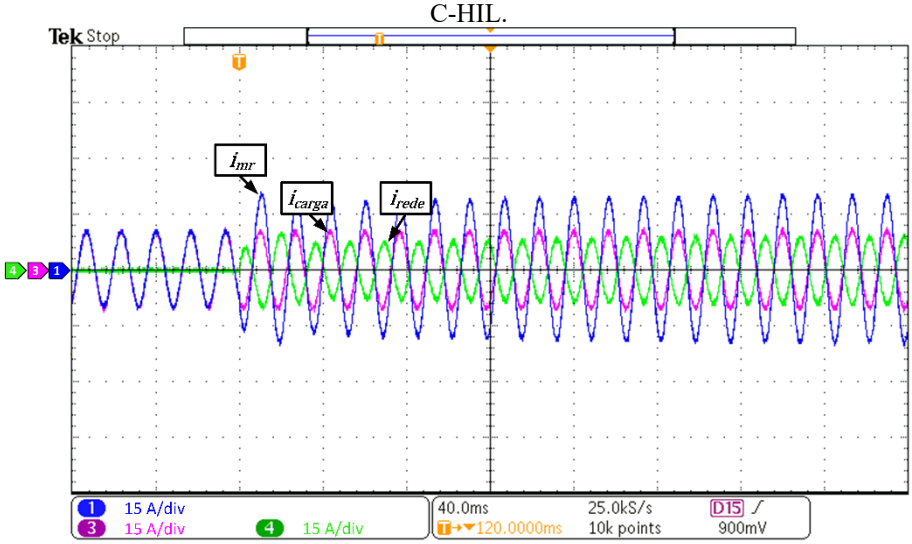
Figura 6.11 – Sincronização ativa para rede com frequência de 62 Hz em C-HIL.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Após a sincronização ativa ser verificada, o próximo passo natural é observar se a transição do modo ilhado para o conectado à rede acontece de uma maneira suave. A rede é retomada aos seus típicos 60 Hz e a transição suave é devidamente demonstrada pela Figura 6.12, novamente com as correntes i_{mr}, i_{rede} e i_{carga}. Como desejado, os transientes são muito pequenos e rápidos, mesmo com os valores de potência nas saídas dos inversores aumentando de acordo com as referências planejadas. Eles duram menos de 30 ms do fechamento da chave até o regime permanente e para todas as correntes o alcance máximo é de 1,1 pu dos seus respectivos valores nominais. A carga não sofre nem mesmo um transitório significativo e o consumidor local não notaria qualquer alteração no seu padrão de uso de eletricidade. Comparado a outras técnicas encontradas na literatura, estes resultados evidenciam um bom desempenho.

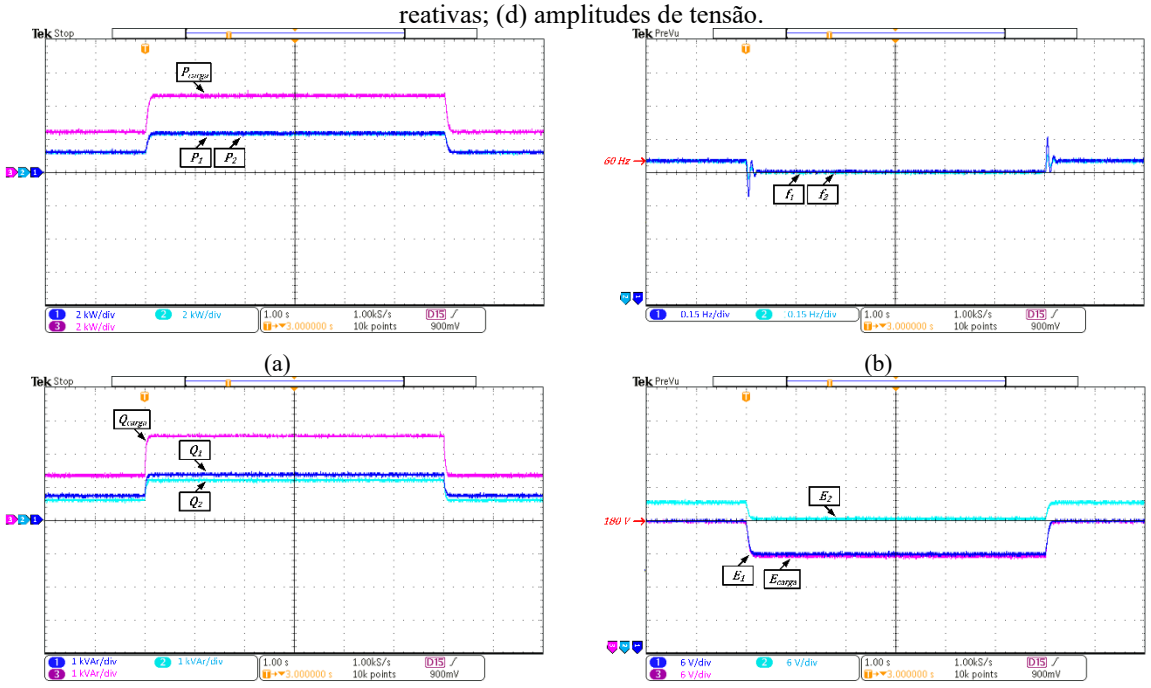
Figura 6.12 – Correntes de microrrede, carga e rede na transição suave de modo ilhado para conectado à rede em C-HIL.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os próximos resultados apresentados exibem o sistema sob situações dinâmicas distintas, provando que a estratégia de controle preenche todos os requisitos operacionais propostos. Os seguintes sinais são mostrados para todos os casos: potência ativa P_x, frequência f_x, potência reativa Q_x e amplitude de tensão E_x, nesta ordem, onde os subscritos x se referem a 1 para o inversor 1, 2 para o inversor 2, mr para microrrede, $rede$ para a rede externa e $carga$ para o consumo local. Na Figura 6.13, a microrrede está no modo ilhado. A carga varia da metade para seu máximo e retorna ao ponto inicial. As constantes de equilíbrio das potências são $P_0 = 2{,}5\ kW$ e $Q_0 = 1{,}375\ kVAr$. De acordo com o método de controle *droop*, as saídas dos inversores seguem as mudanças correspondentes de cargas, compartilhando suas produções, enquanto a frequência e a magnitude de tensão são alteradas em concordância com as equações. Não há comunicação entre os conversores e a operação é automática.

Figura 6.13 – Variações de carga no modo ilhado em C-HIL: (a) potências ativas; (b) frequências; (c) potências reativas; (d) amplitudes de tensão.



(a) (b)

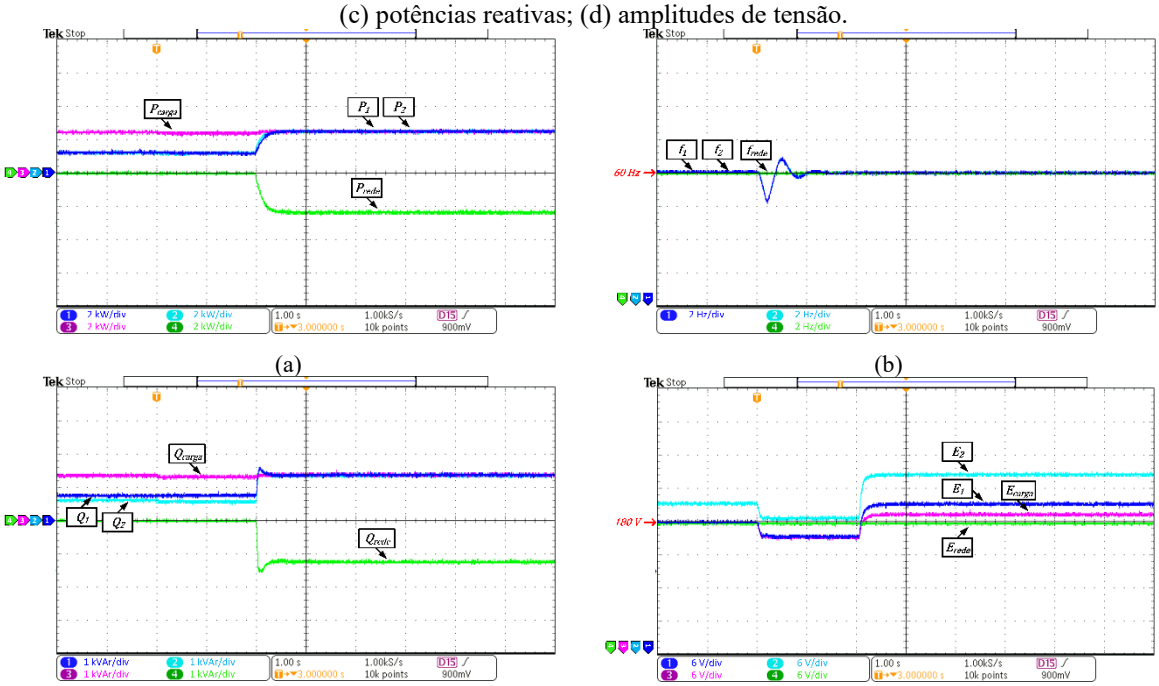
(c) (d)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os próximos resultados, da Figura 6.14, são para o momento de conexão. A microrrede é sincronizada ativamente com a rede externa, a transição suava ocorre, a chave fecha e os dois sistemas começam a interagir com possíveis trocas de potências. A carga está em sua metade e as referências de potência são estabelecidas em $P_{irede} = 2{,}5\ kW$ e $Q_{irede} = 1{,}375\ kVAr$. Deve ser mencionado que quando $P_{rede}, Q_{rede} < 0$, potência é exportada para a rede, e, caso contrário, $P_{rede}, Q_{rede} > 0$, potência é importada da mesma. Para ambas, potências ativa e reativa, como as referências são iguais aos valores da carga, a soma, que era equivalente no

modo ilhado, é maior quando no modo conectado à rede. Assim, a potência excedente é injetada na rede externa. A frequência da microrrede varia ligeiramente pelo processo de sincronização via PLL. Depois de finalizado, é constantemente 60 Hz. As amplitudes de tensão são um pouco diferentes devido às quedas de tensão no sistema e controles. Mais uma vez, como mencionado, este é um desempenho de alta qualidade, cumprindo com a estratégia proposta.

Figura 6.14 – Passagem de modo ilhado para conectado à rede em C-HIL: (a) potências ativas; (b) frequências; (c) potências reativas; (d) amplitudes de tensão.



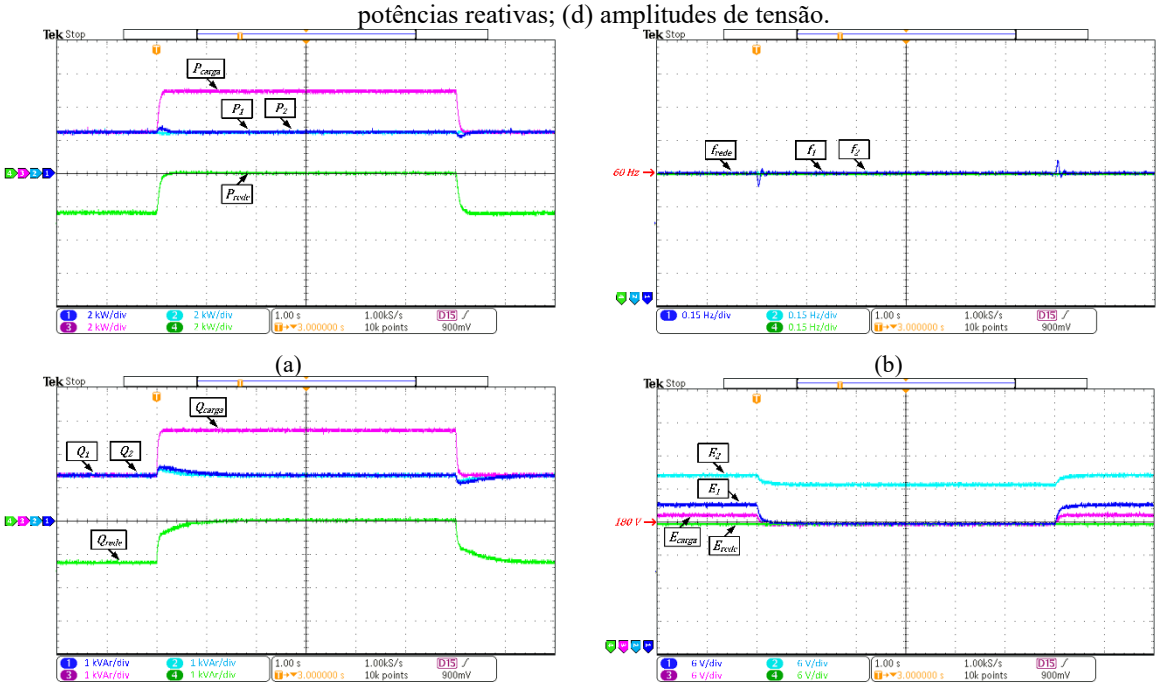
Fonte: Elaborada pelo autor.

Já conectado, o sistema de controle foi testado em dois casos. No primeiro, Figura 6.15, a carga sofre exatamente a mesma variação que na condição ilhada da Figura 6.13. Aqui, as potências de saída são individual e totalmente controladas pelos inversores e são igualmente estabelecidas em $P_1 = P_2 = P_{irede} = 2{,}5\ kW$ e $Q_1 = Q_2 = Q_{irede} = 1{,}375\ kVAr$ independetemente da carga local ou da rede externa. Quando o consumo aumenta, a geração dos inversores é suficiente para supri-lo, e o sistema elétrico externo para de receber energia da microrrede neste intervalo. A frequência é fixada em 60 Hz, enquanto as tensões mudam para compensar qualquer queda de tensão.

No outro caso, a carga é fixada, e as referências de potências são modificadas como desejado. As potências ativa e reativa são alteradas separadamente e não simultaneamente aqui, com a outra sempre se mantendo constante nestes testes. Os inversores são controlados individualmente, com referências distintas. O consumo é constante em carga máxima para o resultado de potência ativa e na metade para resultado de potência reativa. Tais condições são

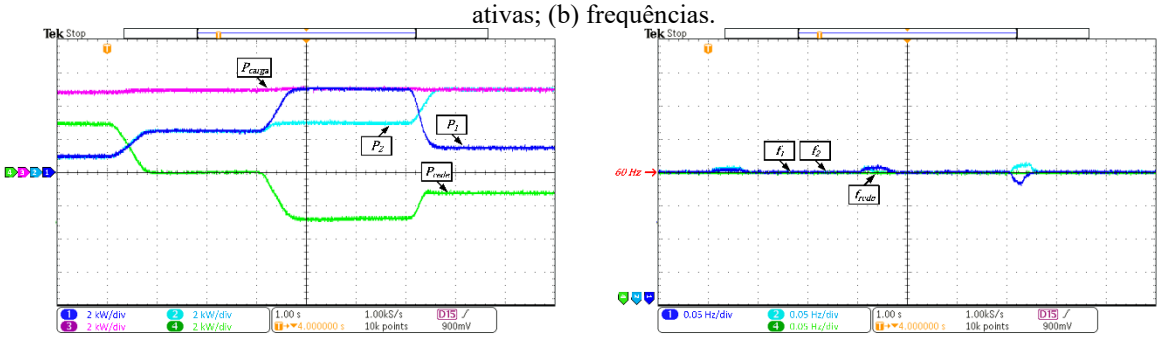
arbitrárias; outras poderiam ter sido escolhidas e os resultados seriam igualmente satisfatórios. A mudança de referência é feita gradualmente, em um comportamento de rampa, e não em ações de degrau, para evitar quaisquer transitórios indesejáveis possíveis. Na Figura 6.16, a potência ativa é manipulada. Para o inversor, a sequência de mudanças é $P_{irede1} = 1 \rightarrow 2{,}5 \rightarrow 5 \rightarrow 1{,}5\ kW$, e para o inversor 2, ela é $P_{irede2} = 1 \rightarrow 2{,}5 \rightarrow 3{,}5 \rightarrow 5\ kW$.

Figura 6.15 – Variações de carga no modo conectado à rede em C-HIL: (a) potências ativas; (b) frequências; (c) potências reativas; (d) amplitudes de tensão.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 6.16 – Variações de referências de potência ativa no modo conectado à rede em C-HIL: (a) potências ativas; (b) frequências.



Fonte: Elaborada pelo autor.

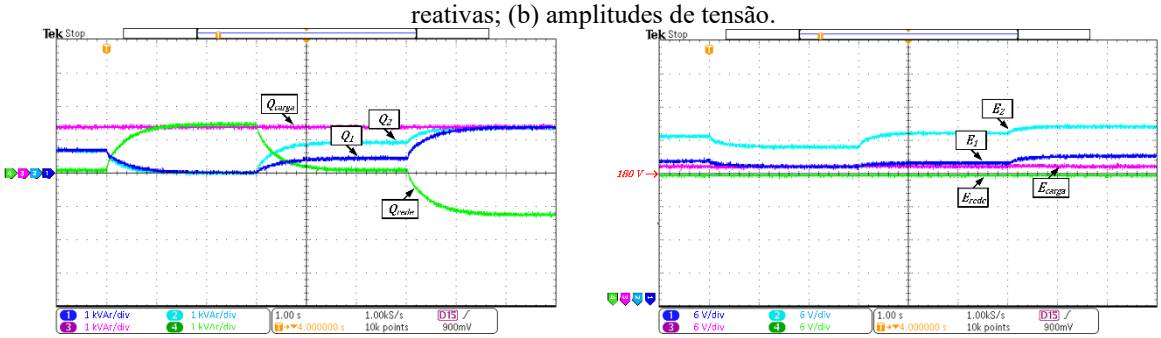
Na Figura 6.17, a potência reativa agora é a gerenciada. Os processos são $Q_{irede1} = 0{,}6875 \rightarrow 0 \rightarrow 0{,}45 \rightarrow 1{,}375\ kVAr$ para o inversor 1 e $Q_{irede2} = 0{,}6875 \rightarrow 0 \rightarrow 0{,}925 \rightarrow 1{,}375$ para o inversor 2.

A rede passa de importação para exportação, vice-versa e troca nula, de acordo com a relação entre as saídas dos inversores e da carga local, garantindo que o consumo sempre seja

satisfeito. A frequência se mantém no valor de 60 Hz todo o tempo, com desvios muito pequenos e instantâneos nas mudanças. As amplitudes de tensão se movem de acordo com as necessidades do sistema, mas nunca alcançando valores distantes do nominal.

Os últimos resultados em C-HIL são para o retorno ao modo ilhado. O comando de desconexão é ativado manualmente, quando preferido. A condição de carga na metade e de referências com metade de suas capacidades são consideradas. Como apresentado na Figura 6.18, esta passagem do modo conectado à rede para ilhado é suave. Assim que o processo começa e a chave é aberta, o método de controle *droop* é adotado novamente automaticamente pela técnica de controle. Os inversores mais uma vez compartilham suas potências ativa e reativa para alimentar a carga local. As referências de frequência e de tensão são criadas pelas características *droop*, como esperado.

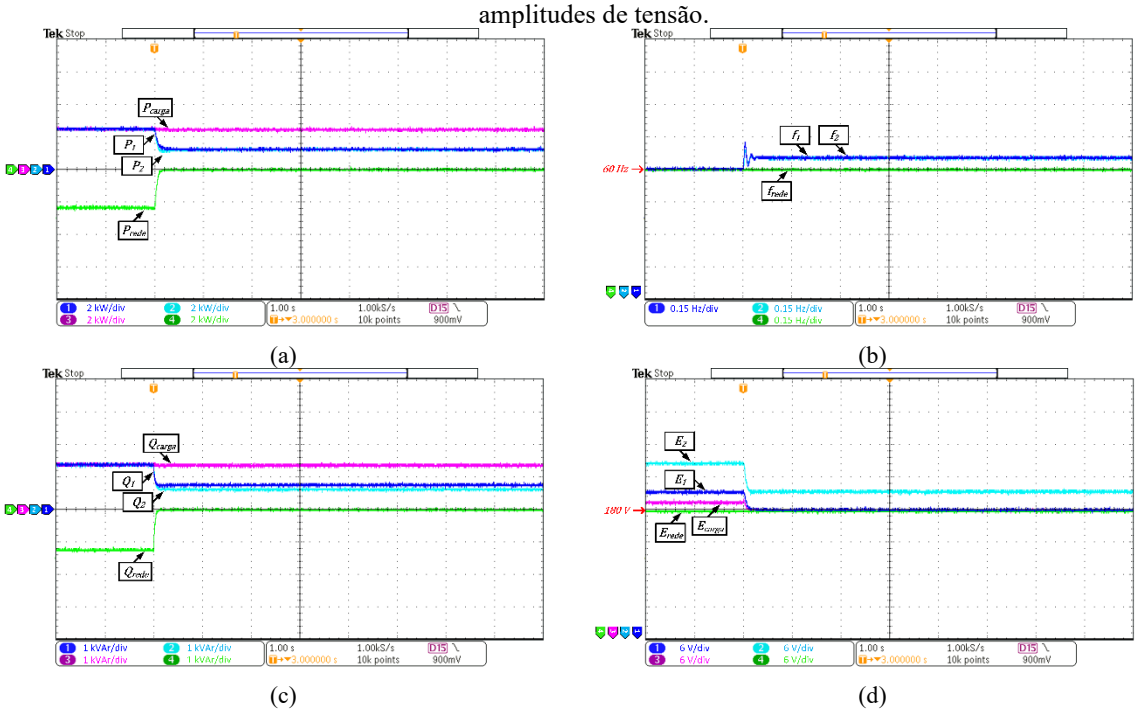
Figura 6.17 – Variações de referências de potência reativa no modo conectado à rede em C-HIL: (a) potências reativas; (b) amplitudes de tensão.



(a) (b)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 6.18 – Retorno ao modo ilhado em C-HIL: (a) potências ativas; (b) frequências; (c) potências reativas; (d) amplitudes de tensão.



(a) (b)

(c) (d)

Fonte: Elaborada pelo autor.

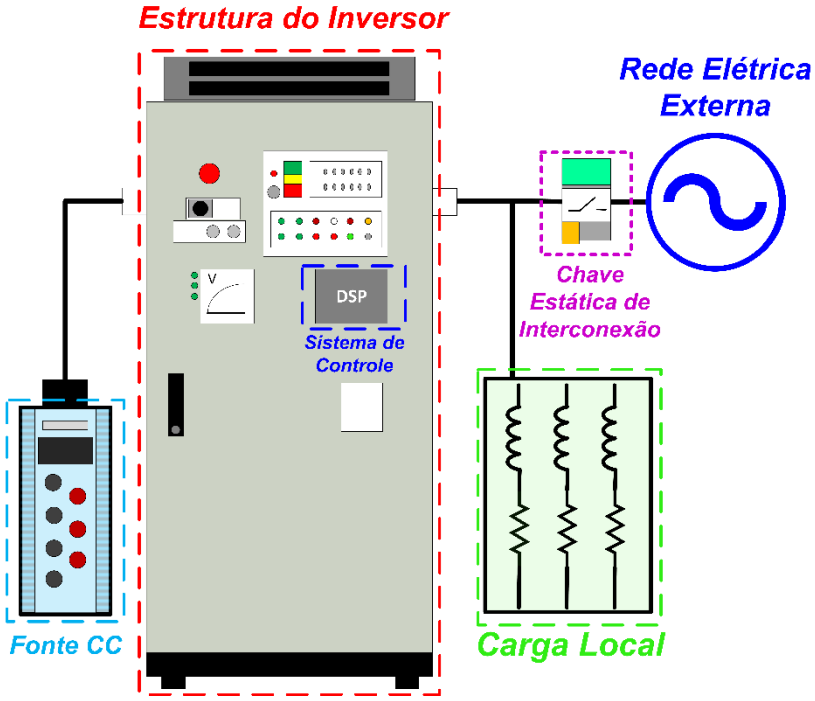
6.2 – Resultados Experimentais

A estrutura física utilizada nos testes experimentais no laboratório possui uma composição semelhante à de um único C-HIL (C-HIL 1, inversor 1). É, como comentado anteriormente, uma montagem de sistema de geração distribuída. Consiste em um inversor trifásico, tendo, em seu interior, filtro LC e impedância de linha, com entrada atrelada a uma fonte CC emulando a fonte despachável, unidade DSP contendo o código da técnica de controle, saída ligada à carga CA local e chave estática de interconexão para acesso à rede de distribuição externa. A estrutura pode ser vista na Figura 6.19. Os parâmetros são aqueles de projeto, exceto quando mencionado. Relembrando um destes pontos, que já deve ser ressaltado, é que se trata de abordagem experimental e, com isso, efeitos ambientais e incontroláveis surgem espontaneamente. Um deles, por exemplo, é que as cargas, por serem materiais reais, são passíveis de esquentarem, o que modifica os valores de resistência e, assim, das potências das cargas. De qualquer maneira, foi feito grande esforço para que todos se mantivessem muito próximos daqueles de projeto e encontrados nos modelos de simulação computacional e em plataformas C-HIL, mantendo coerência e possibilitando as devidas comparações.

A configuração pode ser especificada e o conjunto completo pode ser visto na foto da Figura 6.20. O conversor é formado por módulos Semitrans® M IGBT SKM 50GB 123 D em um "*Teaching System*" da Semikron, topologia ponte completa, com tempo morto de $3{,}25\ \mu s$, agregados em um gabinete único junto ao filtro LC e às impedâncias de linha, além de sensores de corrente e de tensão e outros elementos inerentes à montagem. O microcontrolador, acoplado ao gabinete e ligado a um computador, é uma unidade TI DSP TMS320F28335, em que, como em C-HIL, é implementado o algoritmo da estratégia de controle. O código, em linguagem C, é o mesmo das plataformas C-HIL com a respectiva adaptação para o modelo de DSP. O suprimento do inversor é em $500\ V$, podendo alcançar $520\ V$, a capacitância do barramento é de $2200\ \mu F$ e sua capacidade continua sendo a de projeto, assim como suas outras partes. A maior diferença se dá na frequência de chaveamento, que, por limitações práticas, repete-se, é de $f_{ch} = 10\ kHz$. A taxa de amostragem é, como consequência, de $20\ kHz$. O funcionamento é completamente gerenciado através do computador com a interface TI Code Composer C2000. A carga local foi construída no laboratório. A chave estática de interconexão, entre a saída do inversor e o acesso à rede externa, é formada por quatro relés de estado sólido CA monofásicos modelos GQ-90-48-D-1-1 da Gefran s.p.a., um para cada fase mais o neutro. A corrente eficaz suportada é de até $90\ A$, a tensão nominal é de até $600\ V$ CA e a repetitiva é de até $1600\ V$ de pico por unidade. Os sinais de comando de abertura e fechamento são enviados diretamente do

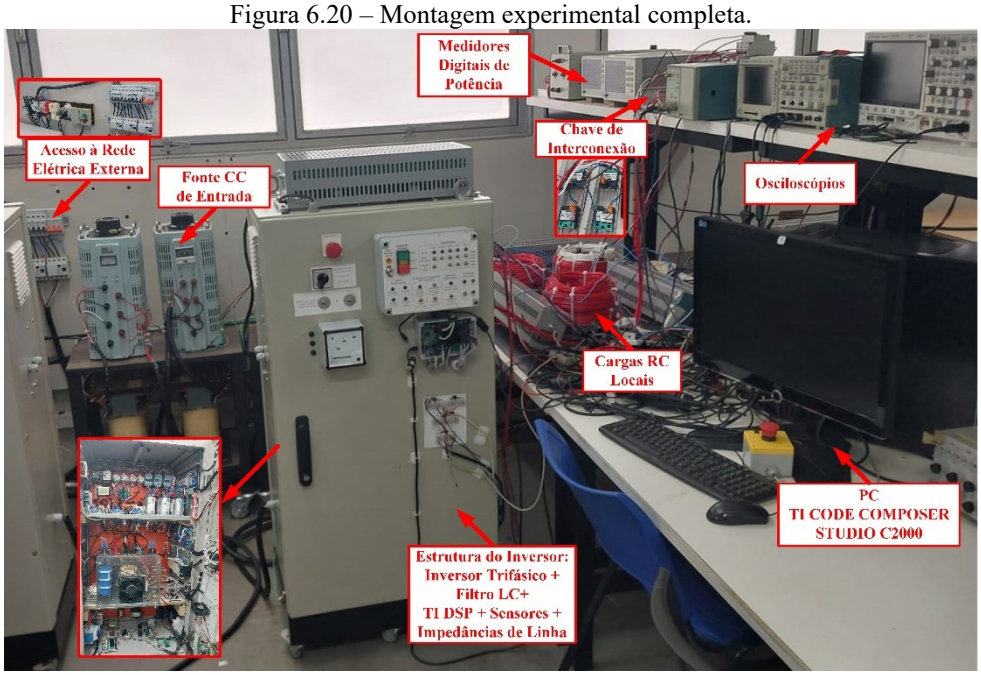
DSP até cada um deles simultaneamente. Osciloscópios, analisadores de potência, instrumentos de medição e um computador servem para obter os resultados e valores de operação. As potências, as frequências e as magnitudes de tensão foram obtidas como pontos de dados virtuais e os gráficos exibidos foram gerados por meio do software Octave. Os testes foram todos realizados em janelas de 6 segundos, dando 5000 pontos para cada um no processo de aquisição. As tensões e as correntes foram capturadas pelos osciloscópios.

Figura 6.19 – Estrutura simplificada da configuração experimental.



Fonte: Elaborada pelo autor.

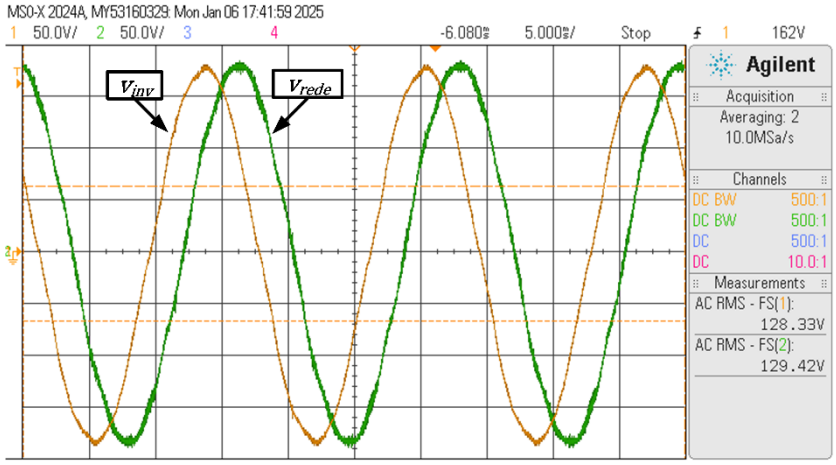
Figura 6.20 – Montagem experimental completa.



Fonte: Elaborada pelo autor.

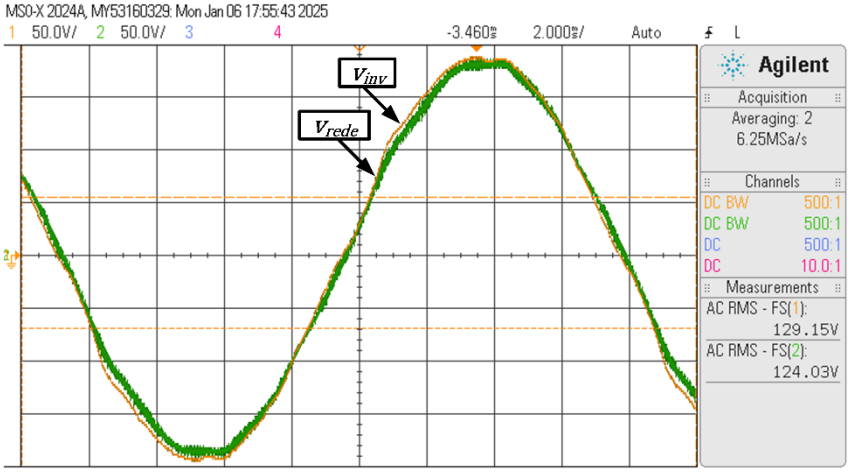
Passa-se, agora, aos resultados experimentais. Na Figura 6.21, as tensões instantâneas do inversor v_{inv} e da rede v_{rede} em regime permanente são apresentadas em modo ilhado. Neste e no próximo caso, a carga RL local está em sua metade. Na Figura 6.22, os mesmos sinais são mostrados, mas em modo conectado à rede. Pode se observar que a tensão do inversor é senoidal com aproximadamente 60 Hz de frequência e amplitude de tensão de 180 V como desejado. No modo conectado, os dois sinais estão perfeitamente sincronizados. Outro ponto de interesse para se notar é que a tensão de distribuição real não é ideal como antes, e distorções de fundo existem, o que afeta as correntes na conexão. Como será visto adiante, esta é a única diferença significativa em relação aos resultados em plataformas C-HIL.

Figura 6.21 – Tensões instantâneas em regime permanente do inversor e da rede externa no modo ilhado em configuração experimental.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 6.22 – Tensões instantâneas em regime permanente do inversor e da rede externa no modo conectado à rede em configuração experimental.

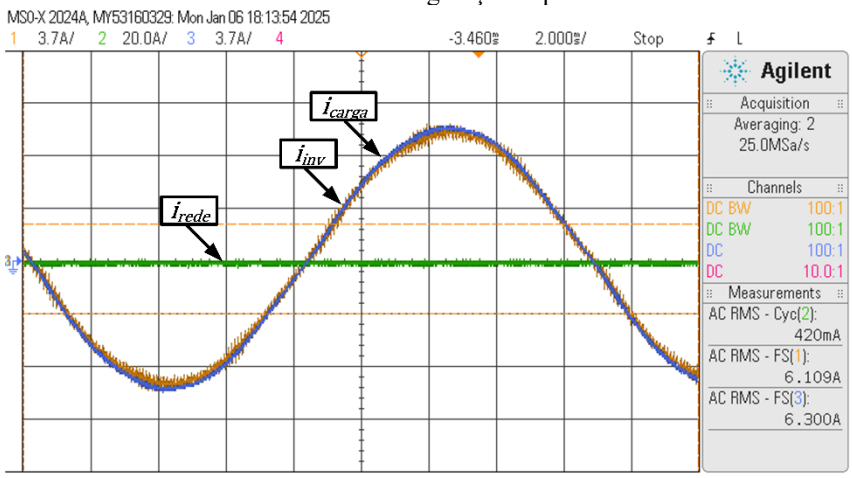


Fonte: Elaborada pelo autor.

As Figuras 6.23 e 6.24 exibem as correntes instantâneas do inversor i_{inv}, da rede externa i_{rede} e da carga local i_{carga} nos modos ilhado e conectado à rede, respectivamente. Na condição ilhada, o consumo todo é realizado através do conversor com o método de controle *droop* e o

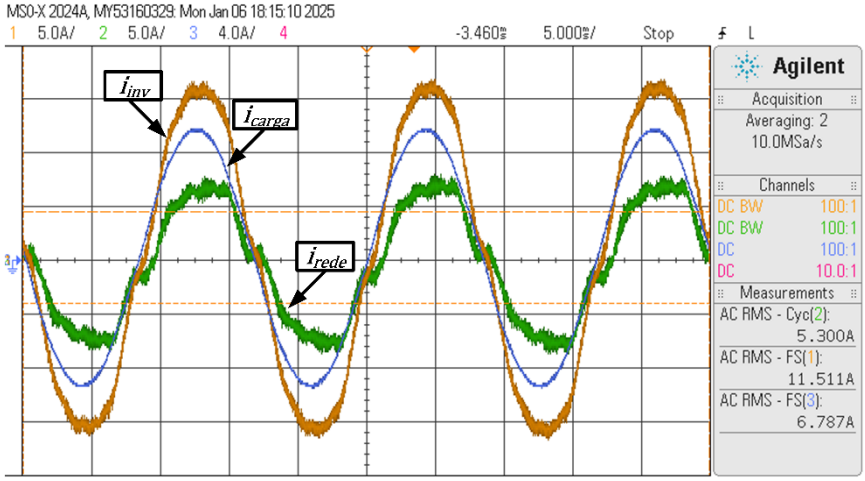
sistema de distribuição tem corrente trocada nula (chave aberta). Por outro lado, na conexão (chave fechada), as referências de potência do inversor são ativadas em $P_{irede} = 4\,kW$ e $Q_{irede} = 1{,}375\,kVAr$ e os valores produzidos são maiores do que a demanda. Assim, a corrente que é injetada na rede externa é a diferença entre a saída do conversor e a absorção da carga como pode se observar. Mais uma vez, como a rede não é ideal e possui conteúdo harmônico no sinal de tensão, sua corrente também tem forma de onda distorcida. Respostas para esta dificuldade, porém, não faziam parte do escopo da estratégia de controle proposta. Trabalhos futuros podem incorporar soluções aos controladores que mitiguem a distorção apresentada mesmo em redes de distribuição de fraca qualidade da energia. Os resultados em C-HIL já apontam que este problema não aparece quando se está interconectado a um sistema elétrico externo próximo do ideal. Isso, porém, não afeta o desempenho previsto da proposta.

Figura 6.23 – Correntes instantâneas em regime permanente do inversor, da rede externa e da carga local no modo ilhado em configuração experimental.



Fonte: Elaborada pelo autor.

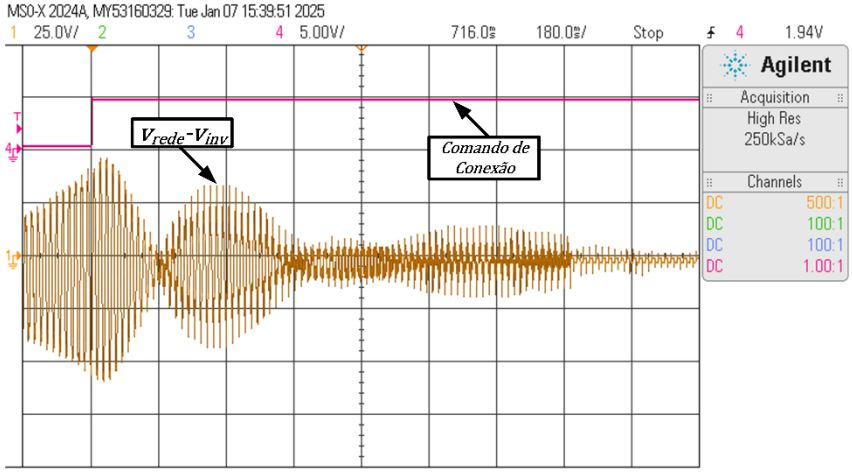
Figura 6.24 – Correntes instantâneas em regime permanente do inversor, da rede externa e da carga local no modo conectado à rede em configuração experimental.



Fonte: Elaborada pelo autor.

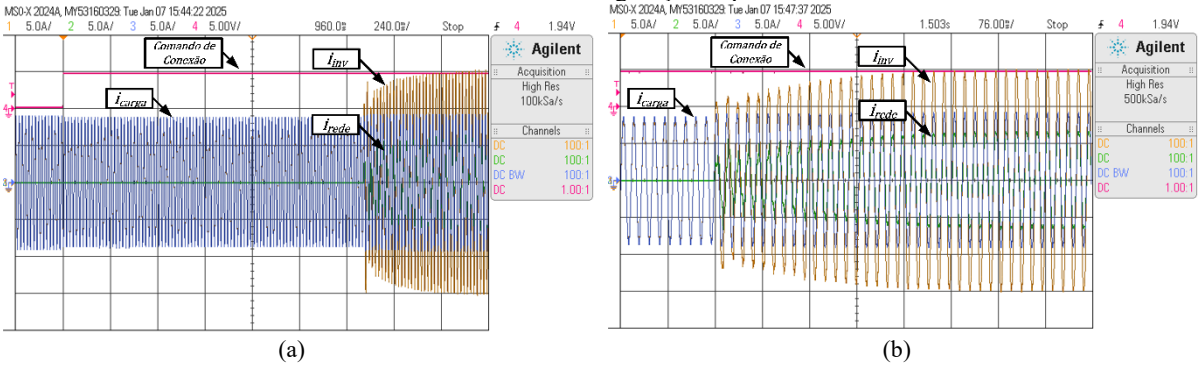
Os próximos resultados apresentam as formas de onda para sincronização ativa e transição suave, passagem do modo ilhado para o conectado à rede. Na Figura 6.25, o comando de conexão é exibido com a diferença instantânea de tensão $(v_{rede} - v_{inv})$. Este valor vai rapidamente a zero após o sinal de transição ser ativado, com as diferenças de fase, frequência e amplitude de tensão desaparecendo, confirmando que os dois sistemas estão sincronizados. Na Figura 6.26, além do comando de conexão, as correntes instantâneas v_{inv}, i_{rede} e i_{carga} são exibidas. Inicialmente, a corrente da rede é zero e a da carga é igual à do inversor. Após a sincronização finalizar, a chave é fechada e os controladores para operação em modo conectado são ligados. A corrente do inversor aumenta devido à modificação pelas referências, e a diferença com a carga é visível através da corrente da rede. Como esperado, ocorre efetivamente uma transição suave com transientes pequenos, praticamente nulos. O resultado confirma o sucesso do sistema de controle neste momento operacional.

Figura 6.25 – Sincronização ativa em configuração experimental: $(v_{rede} - v_{inv}) \rightarrow 0$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 6.26 – Correntes do inversor, da rede externa e da carga local na transição suave de modo ilhado para conectado à rede em configuração experimental.



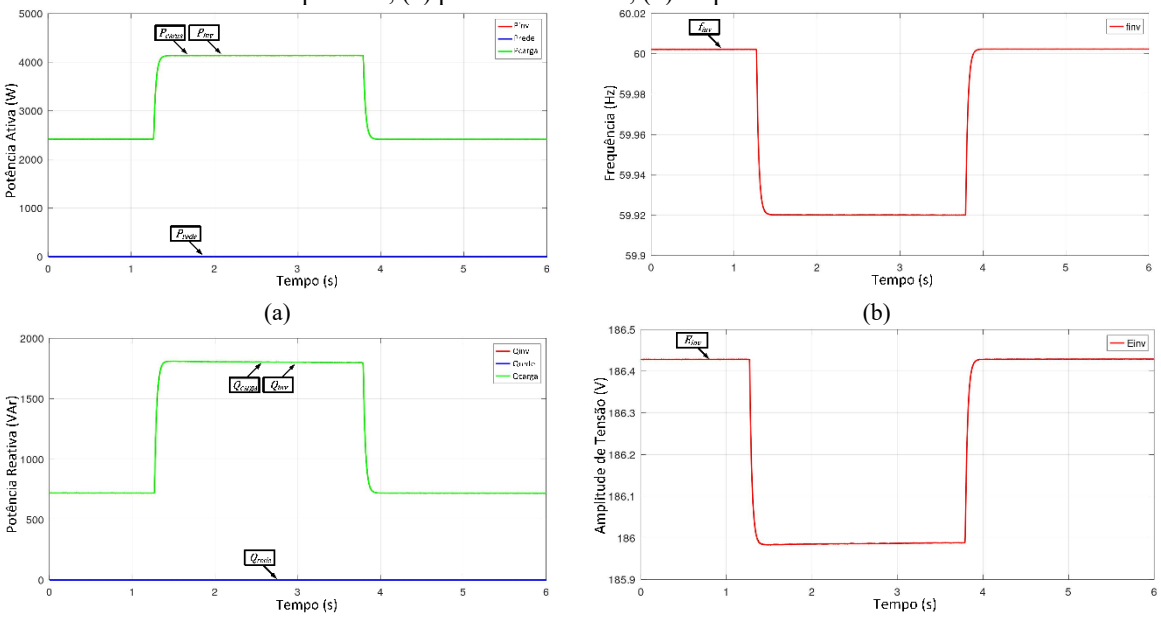
(a) (b)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados seguintes são para potências ativas P_x, potências reativas Q_x, frequências f_x e amplitudes de tensão E_x, onde, novamente, x pode ser inv para inversor, $carga$ para a

carga local e $rede$ para rede externa. Os primeiros testes da Figura 6.27 foram para variações de carga em modo ilhado. O consumo está na metade da carga RL inicialmente e no fim, aumentando temporariamente para o seu total. Os valores de equilíbrio de potência são $P_0 = 2{,}5\ kW$ e $Q_0 = 1{,}375\ kVAr$. Como planejado previamente, a contribuição em potência do inversor segue as mudanças da demanda. Devido à ação do método de controle *droop*, a frequência e magnitude de tensão variam em um comportamento oposto, reduzindo seus valores quando a carga aumenta os seus.

Figura 6.27 – Variações de carga no modo ilhado em configuração experimental: (a) potências ativas; (b) frequências; (c) potências reativas; (d) amplitudes de tensão.

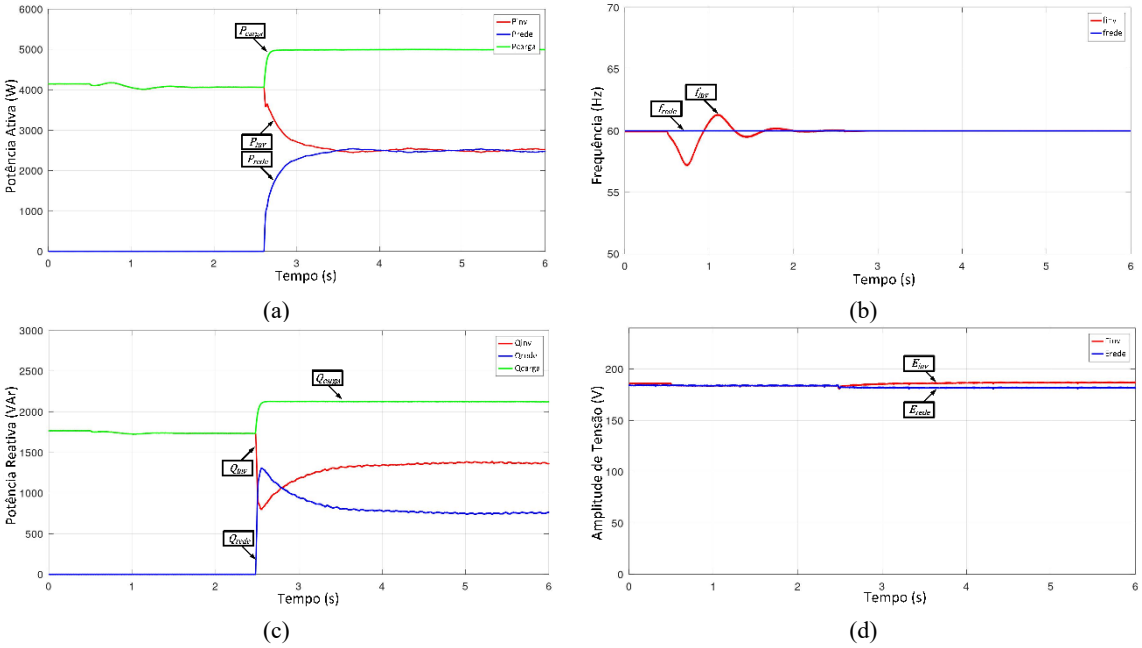


Fonte: Elaborada pelo autor.

As operações de sincronização ativa e de transição suave, passagem de modo ilhado para conectado, também foram avaliadas em termos de potência, frequência e magnitude de tensão, como visto na Figura 6.28. A carga RL total é a presente, e as referências são $P_{irede} = 2{,}5\ kW$ e $Q_{irede} = 1{,}375\ kVAr$. Bom desempenho é observado e todo o processo acontece, mais uma vez, em menos de 2 segundos (aqui também $T_{sinc} = 1\ s$), com o comando de conexão ativado em $t = 0{,}5\ s$.

A variação de carga também foi testada no modo conectado, como mostrado na Figura 6.29 para as potências ativas e reativas. As referências de potências foram fixadas em $P_{irede} = 2{,}5\ kW$ e $Q_{irede} = 1{,}375\ kVAr$. Diferentemente da situação ilhada, onde o inversor precisava adequar sua saída, aqui ele não a muda. A nova demanda é automaticamente suplantada pelo sistema de distribuição, que começa não trocando potência e retorna a este estado depois da carga local voltar à posição de metade de seu valor, passando por importação.

Figura 6.28 – Passagem de modo ilhado para conectado à rede em configuração experimental: (a) potências ativas; (b) frequências; (c) potências reativas; (d) amplitudes de tensão.

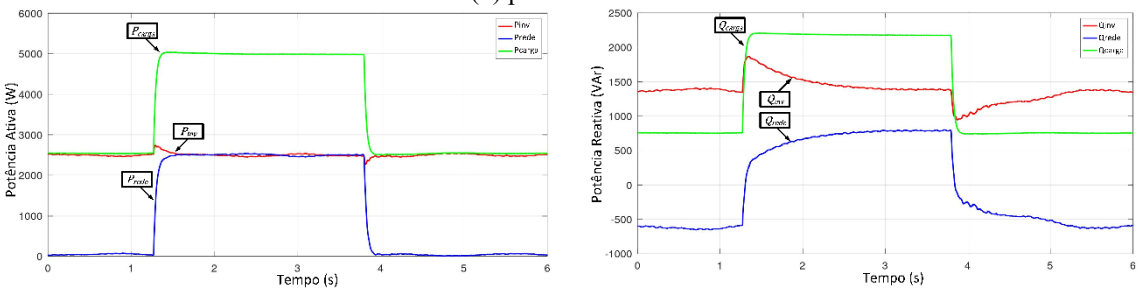


(a) (b)

(c) (d)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 6.29 – Variações de carga no modo conectado à rede em configuração experimental: (a) potências ativas; (b) potências reativas.



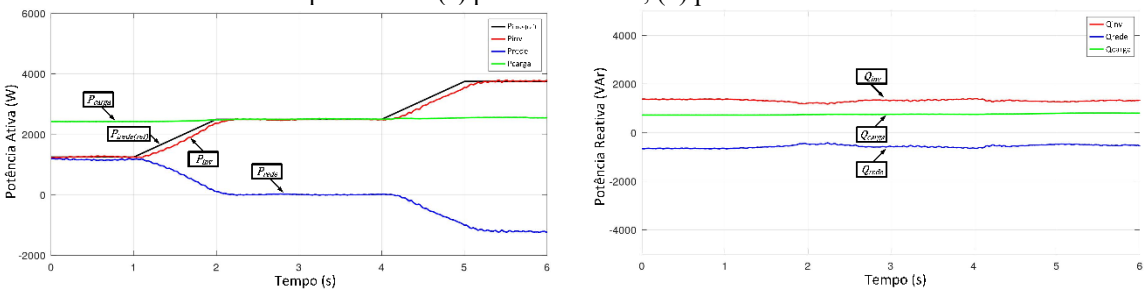
(a) (b)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os próximos testes são para as variações das referências de potência. Primeiro para a potência ativa na Figura 6.30 e depois para a reativa na Figura 6.31. Em cada caso, a outra referência é fixada, $Q_{irede} = 1{,}375\ kVAr$ e $P_{irede} = 2{,}5\ kW$, respectivamente. A carga RL está na metade. Diferentemente dos resultados em C-HIL, aqui são exibidas apenas as potências para cada teste, para mostrar seus comportamentos nestas situações. Como era de se esperar, apenas a potência em que se atua muda de fato seus valores e a outra se mantém praticamente constante. As mudanças são nestas sequências: $P = P_{irede} = 0{,}5P_{ct} \rightarrow 1P_{ct} \rightarrow 1{,}5P_{ct}$ e $Q = Q_{irede} = 0{,}5Q_{ct} \rightarrow 1Q_{ct} \rightarrow 1{,}5Q_{ct}$. Lembrando que P_{ct} e Q_{ct} se referem a potências de carga total. Elas não variam instantaneamente, mas em rampas de $1\ s$ para garantir que o sistema não seja afetado dinamicamente. Assim, a frequência e a magnitude de tensão não variam abruptamente e ficam nas vizinhanças de seus valores nominais, como nos testes em C-HIL. As referências de potência também são exibidas nos resultados. Eles demonstram que o

sistema de controle alcança concretamente seus objetivos com as potências produzidas seguindo muito de perto as referências, demonstrando que é possível gerenciar totalmente a energia do inversor, do sistema de distribuição e da carga local em conjunto no modo conectado à rede, com condições de importação e exportação disponíveis como desejado.

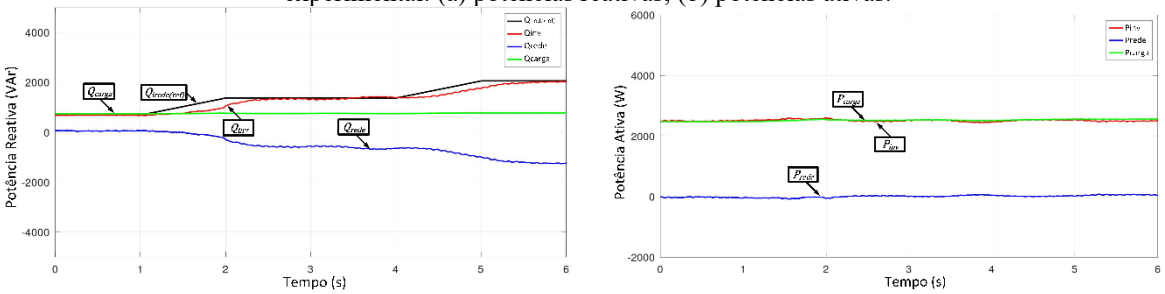
Figura 6.30 – Variações de referências de potência ativa no modo conectado à rede em configuração experimental: (a) potências ativas; (b) potências reativas.



(a) (b)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 6.31 – Variações de referências de potência ativa no modo conectado à rede em configuração experimental: (a) potências reativas; (b) potências ativas.



(a) (b)

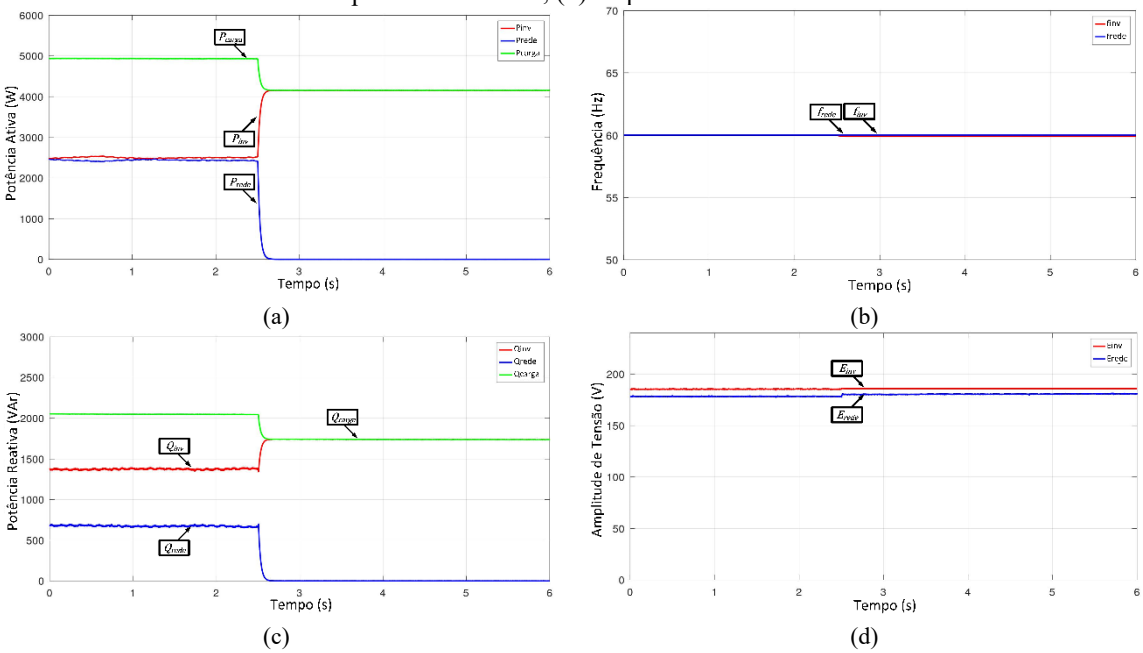
Fonte: Elaborada pelo autor.

O retorno ao modo ilhado é dado na Figura 6.32. É acionado o comando para a desconexão manualmente no instante de $2{,}5\ s$. Como antes, a transição é quase imperceptível para a carga e o sistema continua a trabalhar com alto desempenho. Os controladores mudam da técnica de conexão para o método de controle *droop* e o inversor supre novamente toda a carga. Com isso, completam-se todas as etapas básicas de testes possíveis para o sistema de controle. Essencialmente, não há mais testes para demonstrar a factibilidade da proposta. Os resultados experimentais concluem a metodologia e validam a contribuição.

Apesar disso, como foi indicado, apenas nos testes experimentais surgiu o problema da distorção harmônica nas correntes no modo conectado e o que se argumentou foi que a rede externa, não sendo ideal, provocou estes resultados. Para não ficar apenas em termos retóricos, tal hipótese foi colocada à prova. A primeira modificação para verificação foi nos parâmetros dos controles internos. Note-se: apenas nos valores e não na estrutura dos controles. Este seria um processo simples para tentar reduzir o conteúdo harmônico. No entanto, as várias alterações,

como se observou, não surtiram os efeitos desejados. As referências foram fixadas nos testes seguintes em $P = P_{irede} = 4{,}5\ kW$ e $Q = Q_{irede} = 1{,}375\ kVAr$. Na melhor situação encontrada, os indicadores de distorção harmônica total de corrente passaram, dos valores originais para os alterados, de 4,7% para 3,75% sem carga, de 9,6% para 9,12% em carga na metade e de 11% para 30% na carga total. Ou seja, ou nada foi significativamente aprimorado, ou chegou a piorar gravemente. Portanto, o projeto dos controladores internos foi o melhor possível e não seria sua modificação a solução.

Figura 6.32 – Retorno ao modo ilhado em configuração experimental: (a) potências ativas; (b) frequências; (c) potências reativas; (d) amplitudes de tensão.

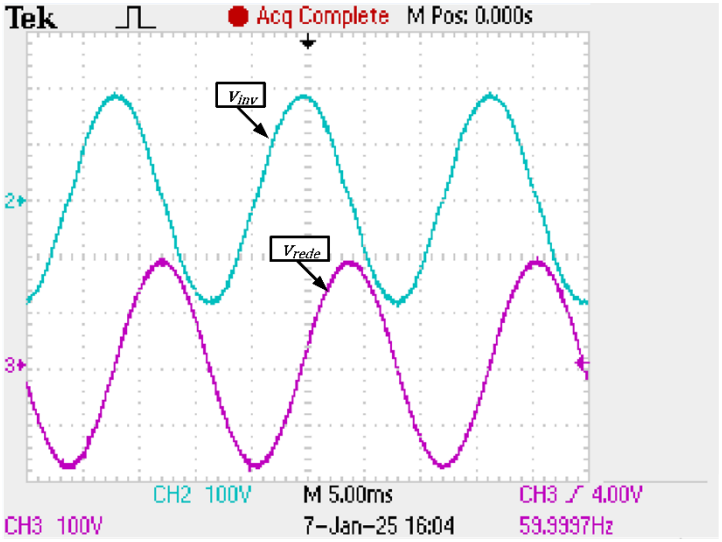


Fonte: Elaborada pelo autor.

Retomando o argumento inicial, para avaliar a estratégia de controle proposta com uma rede externa praticamente ideal, usou-se outra estrutura inversora idêntica à aplicada nos testes para emular este sistema elétrico com baixíssimo conteúdo harmônico prévio. Reduziu-se a referência para $P = P_{irede} = 4\ kW$ e a carga definida foi a em metade. Com as duas unidades desconectadas entre si, a distorção de tensão para o inversor com o sistema de controle foi de 1,8% e para o inversor-rede externa foi de 0,306%, muito próxima do ideal. As duas tensões instantâneas, do inversor com os controladores (v_{inv}) e o emulador (v_{rede}) podem ser vistas na Figura 6.33. Ao conectar os dois, os respectivos valores passaram a ser de 2,03% para o inversor com controle e 1,49% para o inversor-rede externa. A distorção da corrente trocada entre sistemas (i_{rede}), a injetada pelo inversor, que é a que mais interessa, fica em 4,31%. As formas de onda deste caso são vistas na Figura 6.34. Destaca-se que a rede elétrica externa é representada por um mero inversor emulador e não por um sistema elétrico forte, nos moldes

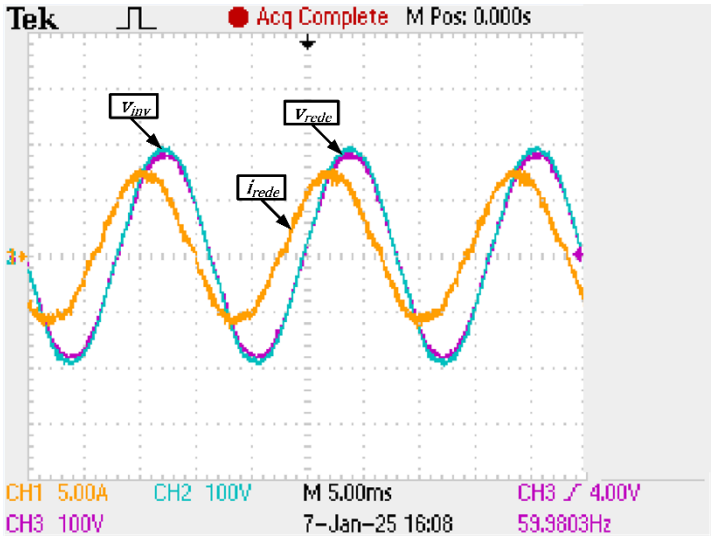
de um barramento infinito ideal. Tem-se, assim, um forte indício da dependência da distorção prévia da rede externa sobre a distorção da corrente intercambiada. Como, contudo, este não era um problema postulado na pesquisa, ele pode ser explorado em trabalhos futuros com mais testes e análises de forma a aprimorar a solução oferecida pelo sistema de controle proposto.

Figura 6.33 – Tensões instantâneas do inversor com sistema de controle e inversor emulador da rede externa desconectados.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 6.34 – Tensões instantâneas do inversor com sistema de controle e inversor emulador da rede externa e corrente intercambiada no modo conectado.



Fonte: Elaborada pelo autor.

CONCLUSÃO

A eletricidade é fundamental na vida humana atualmente. Ela permeia as mais diversas atividades e é difícil encontrar setores em que ela não esteja presente. São vários os benefícios que as pessoas aproveitam com a dominação e a utilização da energia elétrica. Todavia, como quaisquer outras técnicas e tecnologias, surgem impactos negativos também. Com isso, desenvolver soluções e inovações é a tarefa primordial de um engenheiro e pesquisador. Esta, porém, não basta. Ela deve ser realizada com responsabilidade e ética para com a sociedade e o meio ambiente. E foram estes os princípios adotados neste trabalho de doutorado.

Dentre as várias escolhas possíveis para objeto de estudo, optou-se pela análise, elaboração e aplicação de sistemas de controle de inversores para geração distribuída e microrredes. Esta preferência, pois toda pesquisa é dotada de subjetividade no momento mesmo de decisão sobre sua orientação, é, de um lado, circunstancial, pela formação, mas, por outro lado, é baseada nas necessidades humanas e naturais do momento e do futuro. Tais técnicas e tecnologias se inserem neste contexto e buscou-se uma contribuição neste sentido.

Como foi visto, a geração distribuída, as microrredes e a eletrônica de potência formam um conjunto avançado de sistemas elétricos, que despontaram na virada do último milênio e ditam o caminho do setor de energia. A integração deste grupo, no entanto, não é simples, nem imediata. Ela exige novos métodos e componentes para que se alcance o máximo de suas vantagens sem que incorram em maiores dificuldades. Os sistemas de controle são parte crítica deste processo, pois permitem sua concretização, se bem orientada.

Uma técnica de controle foi, então, proposta para efetuar os três modos de operação de sistemas de geração distribuída e microrredes por meio de inversores: ilhamento, transição suave e conexão à rede elétrica. O que se quer é facilitar e acelerar a adesão a tecnologias para a transição energética e a mitigação e a adaptação às mudanças climáticas, problemas centrais hoje em dia e que estão intimamente associados à engenharia elétrica. Os efeitos desejados, contudo, não são apenas estes principais. Maiores confiabilidade e flexibilidade, melhores índices de qualidade da energia, menores preços, novos mercados e redução de outros impactos ambientais são algumas das outras consequências visadas.

Tendo isso em mente, a metodologia proposta neste doutorado, declarada na introdução deste texto, foi seguida e ela se mostrou bem-sucedida em cada uma de suas etapas. Assim, o objetivo principal, a contribuição deste trabalho, que era o desenvolvimento de um sistema de controle de inversores para geração distribuída e microrredes foi alcançado. Não só isso, ele foi

determinado por uma profunda compreensão de seus conceitos, um amplo estado da arte e uma forte análise social, econômica, histórica e ambiental. A técnica de controle se mostrou viável diante de projetos, simulação computacional, testes em plataformas C-HIL e ensaios experimentais. As conclusões detalhadas podem ser dadas por capítulo desta tese e isto é feito a seguir.

Antes de se conceber a estrutura dos controladores, foram feitos estudos gerais e análises críticas sobre os diversos aspectos que circundam o tema no primeiro capítulo. As definições de cada termo fundamental do trabalho foram fornecidas logo de início com discussões pertinentes. Apesar das discordâncias na comunidade científica e profissional, encontrou-se conceitos congruentes, sintéticos e abrangentes, úteis e adotados no desenvolvimento da pesquisa. Além dos primordiais, outras características consideradas importantes foram tratadas. Elas serviram não apenas para entender o funcionamento dos sistemas, como também para avaliá-los quantitativa e qualitativamente. As estruturas tecnológicas aderentes à geração distribuída e às microrredes foram delineadas, procedimento indispensável para a construção do método de controle.

O primeiro capítulo ainda foi dotado de conteúdo histórico e investigação das situações atual e futura das tecnologias. A apreciação do passado deu lições relevantes. Ele mostrou que o desenvolvimento tecnológico exige planejamento e não pode entregar soluções apenas de curto prazo e imediatas e que velhos conceitos podem retornar mesmo com avanços. Ele também indicou que diversos fatores influem no progresso tecnológico além do desenvolvimento em si, tais como processos políticos, geopolíticos, econômicos, ambientais, etc. Os resultados recentes dão conta que a geração distribuída é amplamente aceita nas diferentes sociedades e que as microrredes podem seguir uma trajetória similar, se os esforços certos forem feitos. No futuro, as redes elétricas inteligentes, uma inovadora concepção do sistema elétrico, tendem a abarcar geração distribuída, microrredes e eletrônica de potência atuando simultaneamente para otimizar a operação geral. Como no resto do mundo, é positiva a posição brasileira para a expansão destas tecnologias e, em certa medida, é vantajosa devido ao forte apreço público unido às condições naturais do país. Faltam, entretanto, além da aderência tecnológica, atuação política, regulamentações, normas e instrumentos legais para tanto.

Por fim, o capítulo inicial ofereceu subsídios sobre a integração ao sistema elétrico e a fatores sociais, econômicos e ambientais que envolvem a geração distribuída e as microrredes.

O que se aprende é que, a partir de estratégias e elementos adequados, é possível melhorar a qualidade de energia de todos os sistemas elétricos somada ao provimento de serviços ancilares. Incentivo, outrossim, são indispensáveis. Da mesma forma, com soluções apropriadas, estas tecnologias podem fornecer inúmeros benefícios enumerados ao longo do texto para as pessoas e para a natureza, tais como: acesso à eletricidade, menores preços e custos, comércios inovadores de energia, combate ao desemprego, democratização, redução nas emissões de gases do efeito estufa, diminuição na poluição, uso massivo de fontes renováveis, proteção contra desastres naturais, etc.

O segundo capítulo abordou especificamente o modo ilhado de operação. Seus requisitos foram destrinchados. Depois disso, cada uma de suas partes foi tratada. A primeira sendo a de controles internos. Pela estratégia proposta, os controladores do tipo P+Res se mostraram superiores e foram detalhados. Para efetivo funcionamento do ilhamento, algumas técnicas encontradas na literatura foram discutidas. O método de controle *droop* foi considerado o mais vantajoso, por suas características poderosas como a simplicidade, a geração adequada das referências, o compartilhamento de potências na presença de múltiplas unidades e a ausência de comunicação. Por estes motivos, ele foi adotado em sua forma convencional. Na sequência, ele foi explicado junto à impedância virtual, também parte do sistema de controle proposto. Algumas considerações foram feitas e indicam que o ilhamento é insuficiente e que somente com a transição suave e a conexão à rede a geração distribuída e as microrredes podem ter todos os seus potenciais explorados.

No terceiro capítulo, foi a vez do modo conectado à rede e a transição suave serem aproximados. Os benefícios foram listados, assim como os requisitos especiais. Dessa forma, fecha-se o ciclo dos modos de operação. Dois elementos essenciais para a conexão de geração distribuída e microrredes a uma rede externa foram abordados: as técnicas de sincronização, especialmente as estruturas PLL, apontadas como as melhores na categoria, e as chaves estáticas de interconexão. Para elaborar o sistema de controle, uma extensa revisão foi feita sobre as técnicas encontradas na literatura. Isto permitiu discutir e saber as vantagens e desvantagens de cada uma, oferecendo o percurso para idealização de uma solução própria.

O quarto capítulo é o mais breve de todos, mas também, talvez, o mais importante, pois é nele que se apresentou a proposta de sistema de controle da pesquisa de doutorado. Cada modo de operação foi tratado. Diante do que foi estudado e examinado, uma técnica simples, flexível, confiável e inteligente foi concebida. No modo ilhado, o método de controle *droop*

convencional foi adotado. Na sincronização ativa e na transição suave, incrementos são integrados às equações de *droop* através de um "PLL Inversor/Microrrede-Rede", fazendo a operação ser rápida, flexível e com mínimo de transientes. O modo conectado é sustentado pela sincronização contínua e monitoramento constante com a rede por um PLL Rede e gerenciamento do fluxo de potências ativa e reativa, com possibilidade de importação, exportação ou troca nula. O sistema de controle funciona para geração distribuída individual e microrredes completas. O retorno ao ilhamento é direto e de alta velocidade.

O quinto capítulo trouxe o projeto da estrutura física e dos controladores. Cada parcela de todo o sistema foi feita com análises e cálculos minuciosos. O processo, observa-se, é iterativo e os resultados seguintes, de simulação computacional e em plataformas C-HIL, permitiram fazer reajustes sempre que preciso. Os resultados virtuais, inclusive, foram o próximo passo, na ordem da metodologia. Já na simulação, os testes indicaram que a proposta era factível em todos os modos de operação, mesmo em casos críticos. Apesar das idealidades, estes primeiros dados fomentaram a continuação.

O sexto e último capítulo validou de vez a proposta com testes em plataformas C-HIL e ensaios experimentais. Nos primeiros, a operação em formação de microrrede com dois inversores foi avaliada. Com modelos fiéis à realidade e já empregando unidades DSP, as simulações em tempo real deram resultados frutíferos, confirmando mais uma vez que a técnica funciona e pode ser implementada na prática. Os testes derradeiros em condições empíricas deram a certeza sobre isso. Em uma montagem real de conversor único, vários resultados foram obtidos e corroboraram o sistema de controle proposto de inversores para geração distribuída e microrredes nos modos de operação: ilhado, transição suave e conectado à rede.

Os resultados de simulação computacional, em estruturas C-HIL e em modelo experimental foram congruentes, mostrando que os projetos, trabalhados em detalhes tanto na esfera física quanto na dos controladores, foram extremamente satisfatórios. Por isso, os testes indicaram uma forte similaridade, independentemente da plataforma analisada, com poucas diferenças. Consequentemente, pode se discutir de maneira geral as observações obtidas ao longo da pesquisa.

Antes deve se ressaltar que os controles internos, realizados com P+Res, permitiram sinais trifásicos de saída senoidais com distorção e desequilíbrio mínimos, seguindo a referência conforme previsto para os inversores. No modo ilhado, conforme a dinâmica do método de controle *droop* convencional com impedância virtual, a mudança de carga faz com que os

conversores atuem de forma a seguirem o consumo em potências automática e rapidamente sem comunicação na presença de múltiplas unidades, com pequenos desvios em frequência e amplitude de tensão. Diferentes testes confirmaram o desempenho positivo da sincronização ativa por meio do "PLL Inversor/Microrrede-Rede" ou "PLL de Conexão/Sincronização". Mesmo em situações críticas, com diferenças significativas entre os inversores e a rede elétrica de ângulo de fase (150º), de frequência de rede ($2\ Hz$) e de amplitude de tensão (10%), o sistema local foi capaz de se adaptar ao imposto externamente fazendo com que $(f_{rede} - f_{inv/mr}) \rightarrow 0$ e $(v_{rede} - v_{o/mr}) \rightarrow 0$ em alta velocidade e precisão. A simulação computacional e as plataformas C-HIL foram essenciais para averiguar estes casos, pois, obviamente, não se tem qualquer acesso aos parâmetros da distribuição nos testes experimentais, sendo estes dados reais e contingentes.

Na sequência, pôde se avaliar a transição, indo do ilhamento à conexão. Em todos os testes, ela se revelou efetivamente suave, como almejado. Isto é, transitórios elétricos dinâmicos, como variações abruptas indesejadas de tensão, corrente e frequência, foram imperceptíveis. Os usuários não perceberiam qualquer alteração em seus consumos de eletricidade na troca de modos de operação. Mesmo com a escolha de um período de sincronização de $T_{sinc} = 1\ s$, todo o procedimento leva menos que $2\ s$ para todas as situações observadas. A chave estática de interconexão é fundamental aqui, demonstrando sua superioridade sobre as mecânicas. Ela fecha instantânea e inabalavelmente.

Já no modo conectado, os inversores passam a seguir a rede externa através do "PLL Rede". A escolha do SOGI-PLL para tanto se demonstra importante, pois além de atuar ativamente para manter os sistemas atracados com alta precisão, ele permite monitoramento e medições constantes. As referências de potência são modificadas de acordo com o previsto e a produção passa a ser totalmente controlada por conversor individualmente. Isso determina se há importação, exportação ou estagnação do fluxo de potências com o sistema elétrico externo. Como agora os inversores não são mais orientados pelo método de controle *droop* convencional e sim pelo sistema de controle proposto, mudanças de carga não afetam a geração das unidades e a diferença entre a produção local e as exigências da carga é diretamente suprida pela rede externa. Depois, com a carga fixa, validou-se o controle do fluxo de potências. A potência ativa foi controlada conforme a referência para cada inversor, sem efeitos sobre outros parâmetros. O mesmo se dá para a potência reativa. Em uma microrrede, a soma das produções individuais subtraída da carga revela a troca com a rede elétrica adjacente. Por fim, o retorno ao modo ilhado é feito imediatamente como esperado. Os controladores retomam as características *droop*

convencionais sem transitórios danosos e os inversores voltam a assumir as cargas locais. Nos testes experimentais, onde as idealidades inexistem, a distorção prévia da rede externa foi refletida em distorções nas correntes. Tal efeito praticamente desaparece quando uma rede com baixo conteúdo harmônico é a interconectada, o que foi verificado por testes com um inversor emulando este sistema. De qualquer modo, recomenda-se avanços nesse sentido na continuação, assim como a adição de funções de aprimoramento discutidas ao longo do texto, o que maximizará os benefícios do sistema de controle proposto.

Como se afirmou, a pesquisa de doutorado conseguiu cumprir suas metas. Uma contribuição foi oferecida e espera-se que ela seja útil, mas, mais do que isso, que ela possa, mesmo que de forma pequena, melhorar a vida das pessoas e as condições do meio ambiente. Futuramente, pode se progredir com suas ideias, colocando na prática suas intenções.

Trabalhos Futuros

Os bons resultados da pesquisa suscitam, como é de costume, novas questões, abordagens e ainda outras propostas que podem ser elaboradas e trabalhadas posteriormente. Algumas são de caráter de aperfeiçoamento e de aprofundamento apenas, outras tratam-se de verdadeiras novidades. Seguem, listadas, sugestões para o prosseguimento do trabalho:

- Refinamento dos controladores no modo ilhado, com método de controle *droop* avançado e controle secundário implementados;
- Introdução de técnicas de aprimoramento de qualidade da energia e provisão de serviços ancilares em sistemas de geração distribuída e microrredes;
- Adição efetiva de funções sociais, econômicas e ambientais à estratégia de controle;
- Aplicação da técnica de controle em microrredes híbridas e múltiplas microrredes conectadas entre si;
- Avaliação do sistema de controle com cargas distintas, incluindo não-lineares;
- Exame da estratégia de controle em diferentes topologias e arquiteturas de sistemas de geração distribuída e microrredes;
- Integração de fontes variáveis e intermitentes aos sistemas;
- Resolução dos problemas, através dos controladores, de sistemas com elevadas distorções harmônicas, desequilíbrios, entre outros aperfeiçoamentos de parâmetros;
- Verificação e tratamento das dificuldades e das soluções para a comunicação dentro da estratégia de controle em microrredes;

- Concepção de novas estruturas PLL tanto para sincronização ativa e transição suave, quanto para modo conectado;
- Análise dinâmica e de estabilidade;
- Modelagem matemática avançada e análise no espaço de estados e de pequenos sinais;
- Testes experimentais com múltiplas unidades inversoras em paralelo;
- Elaboração de sistemas de gerenciamento, interfaces homem-máquina e supervisórios (SCADA - *Supervisory Control and Data Acquisition*) para integrar à estratégia de controle em geração distribuída e microrredes;
- Maiores análises sociais, econômicas e ambientais detalhadas e críticas do assunto;
- Abordagem histórica aprofundada do tema de investigação.

Publicações e Produtos

A pesquisa de doutorado, desde seu início até o momento da defesa, rendeu as seguintes publicações associadas ao trabalho, todas em periódicos, um nacional e outros dois internacionais, nesta ordem cronológica, e, adicionalmente, um registro de software da técnica de controle:

- **M. E. T. Souza Junior** e L. C. G. Freitas. **Microrredes: Estado da Arte, Desafios e Tendências para Geração, Distribuição e Uso Sustentável de Energia Elétrica.** *Brazilian Applied Science Review*, vol. 4, no. 6, p. 3888-3906, Dezembro 2020, doi: 10.34115/basrv4n6-045;
- **M. E. T. Souza Junior** e L. C. G. Freitas. **Power Electronics for Modern Sustainable Power Systems: Distributed Generation, Microgrids and Smart Grids—A Review.** *Sustainability*, vol. 14, no. 6, p. 3597, Março 2022, doi: 10.3390/su14063597;
- **M. E. T. Souza Junior** e L. C. G. Freitas. **Grid-Connected and Seamless Transition Modes for Microgrids: An Overview of Control Methods, Operation Elements, and General Requirements.** IEEE Access, vol. 10, p. 97802-97834, Setembro 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3206362;
- **M. E. T. Souza Junior**, D. B. Rodrigues, E. C. Guimarães e L. C. G. Freitas. **CITINV.** 2023. Programa de Computador. Número do Registro: **BR512024002424-7**, Data de Registro: 10/12/2023, Instituição de Registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial.

REFERÊNCIAS

ABDI, Hamdi; BEIGVAND, Soheil Derafshi; LA SCALA, Massimo. A review of optimal power flow studies applied to smart grids and microgrids. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 71, p. 742-766, 2017. doi: 10.1016/j.rser.2016.12.102.

ABUSARA, M. A.; SHARKH, S. M. Control of line interactive UPS systems in a Microgrid. In: **2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics**. IEEE, 2011. p. 1433-1440. doi: 10.1109/ISIE.2011.5984371.

ABUSARA, Mohammad A.; GUERRERO, Josep M.; SHARKH, Suleiman M. Line-interactive UPS for microgrids. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 61, n. 3, p. 1292-1300, 2013. doi: 10.1109/TIE.2013.2262763.

ACKERMANN, Thomas; ANDERSSON, Göran; SÖDER, Lennart. Distributed generation: a definition. **Electric Power Systems Research**, v. 57, n. 3, p. 195-204, 2001. doi: 10.1016/S0378-7796(01)00101-8.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução normativa N° 482, de 17 de abril de 2012.** Brasília, DF, Brasil: ANEEL, 2012. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução normativa N° 687, de 24 de novembro de 2015.** Brasília, DF, Brasil: ANEEL, 2015. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução normativa N° 786, de 17 de outubro de 2017.** Brasília, DF, Brasil: ANEEL, 2017. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2017786.pdf. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução normativa N° 1.000, de 7 de dezembro de 2021.** Brasília, DF, Brasil: ANEEL, 2021. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.html. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução normativa N° 1.059, de 7 de fevereiro de 2023.** Brasília, DF, Brasil: ANEEL, 2023. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20231059.pdf. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

AHMED, A. **Eletrônica de potência**. Tradução: Bazán Tecnologia e Linguística; Revisão técnica: J. A. Martino. São Paulo, Brasil: Pearson Prentice Hall, 2000.

AHN, Seon-Ju et al. Power-sharing method of multiple distributed generators considering control modes and configurations of a microgrid. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 25, n. 3, p. 2007-2016, 2010. doi: 10.1109/TPWRD.2010.2047736.

AKAGI, H.; WATANABE, E. H.; AREDES, M. **Power theory and application to power conditioning.** Hoboken, Estados Unidos da América: John Wiley and Sons, Inc., 2007.

AKAGI, Hirofumi; KANAZAWA, Yoshihira; NABAE, Akira. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components. **IEEE Transactions on industry applications**, n. 3, p. 625-630, 1984. doi: 10.1109/TIA.1984.4504460.

AMIN, S. Massoud; WOLLENBERG, Bruce F. Toward a smart grid: power delivery for the 21st century. **IEEE power and energy magazine**, v. 3, n. 5, p. 34-41, 2005. doi: 10.1109/MPAE.2005.1507024.

ANDISHGAR, Mohammad Hadi; GHOLIPOUR, Eskandar; HOOSHMAND, Rahmat-allah. An overview of control approaches of inverter-based microgrids in islanding mode of operation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 1043-1060, 2017. doi: 10.1016/j.rser.2017.05.267.

ARAFAT, Md Nayeem; ELRAYYAH, Ali; SOZER, Yilmaz. An effective smooth transition control strategy using droop-based synchronization for parallel inverters. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 51, n. 3, p. 2443-2454, 2014. doi: 10.1109/TIA.2014.2369826.

ASHABANI, Seyed Mahdi; MOHAMED, Yasser Abdel-Rady I. A flexible control strategy for grid-connected and islanded microgrids with enhanced stability using nonlinear microgrid stabilizer. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 3, n. 3, p. 1291-1301, 2012. doi: 10.1109/TSG.2012.2202131.

ASHABANI, Seyed Mahdi; MOHAMED, Yasser Abdel-rady I. New family of microgrid control and management strategies in smart distribution grids—analysis, comparison and testing. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 29, n. 5, p. 2257-2269, 2014. doi: 10.1109/TPWRS.2014.2306016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 16149-2013:** Sistemas fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição. São Paulo, Brasil: ABNT, 2013.

BALAGUER, Irvin J. et al. Control for grid-connected and intentional islanding operations of distributed power generation. **IEEE transactions on industrial electronics**, v. 58, n. 1, p. 147-157, 2010. doi: 10.1109/TIE.2010.2049709.

BARBOSA, Vitor Fonseca et al. Three-Phase Hybrid Rectifier for HVDC Distribution System in More Electric Aircrafts. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 39, n. 1, p. 1422-1432, 2023.

BARKER, Philip P.; DE MELLO, Robert W. Determining the impact of distributed generation on power systems. I. Radial distribution systems. In: **2000 Power Engineering Society Summer Meeting (Cat. No. 00CH37134)**. IEEE, 2000. p. 1645-1656. doi: 10.1109/PESS.2000.868775.

BAUMANN, Manuel et al. Environmental impacts of different battery technologies in renewable hybrid micro-grids. In: **2017 IEEE PES innovative smart grid technologies conference Europe (ISGT-Europe)**. IEEE, 2017. p. 1-6. doi: 10.1109/ISGTEurope.2017.8260137.

BELLIDO, Marlon Max Huamaní. **Microrredes elétricas:** Uma proposta de implementação no Brasil. 2018. 196 f. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2018. Disponível em: http://hdl.handle.net/11422/12277. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

BLAABJERG, Frede et al. Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems. **IEEE Transactions on industrial electronics**, v. 53, n. 5, p. 1398-1409, 2006. doi: 10.1109/TIE.2006.881997.

BLAABJERG, Frede; CHEN, Zhe; KJAER, Soeren Baekhoej. Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems. **IEEE transactions on power electronics**, v. 19, n. 5, p. 1184-1194, 2004. doi: 10.1109/TPEL.2004.833453.

BOLLEN, M. H. J. **Understanding power quality problems:** Voltage sags and interruptions. Piscataway, Estados Unidos da América: IEEE Press, 2002.

BOLLEN, M. H. J.; YANG, Yongtao; HASSAN, Fainan. Integration of distributed generation in the power system-a power quality approach. In: **2008 13th international conference on harmonics and quality of power**. IEEE, 2008. p. 1-8. doi: 10.1109/ICHQP.2008.4668746.

BOLLEN, Math et al. Performance indicators for microgrids during grid-connected and island operation. In: **2009 IEEE Bucharest PowerTech**. IEEE, 2009. p. 1-6. doi: 10.1109/PTC.2009.5282118.

BOLLEN, Math H. J.; HASSAN, Fainan. **Integration of distributed generation in the power system**. Hoboken, Estados Unidos da América: John wiley & sons, 2011.

BOLLEN, Math; ZHONG, Jin; LIN, Yufeng. Performance indices and objectives for microgrids. In: **CIRED 2009-20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution-Part 1**. IET, 2009. p. 1-4.

BOWERS, B. **A history of electric light and power.** Londres, Inglaterra: Peter Peregrinus Ltd., 1982.

BOYLE, G. (ed.). **Renewable energy:** Power for a sustainable future. 3 ed. Oxford, Inglaterra: Oxford University Press, 2012.

BRAGA, B. et al. **Introdução à engenharia Ambiental.** São Paulo, Brasil: Pearson Prentice Hall, 2005.

BRASIL. **Lei Nº 14.300, de 6 de Janeiro de 2022:** Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS); altera as Leis nºs 10.848, de 15 de março de 2004, e 9.427, de 26 de dezembro de 1996; e dá outras providências. Brasília, DF, Brasil: Diário Oficial da União, 2022.

BREARLEY, Belwin J.; PRABU, R. Raja. A review on issues and approaches for microgrid protection. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 67, p. 988-997, 2017. doi: 10.1016/j.rser.2016.09.047.

BUSARELLO, T. D. C., SIMÕES, M. G., LAAKSONEN, Hardware-In-the-Loop technology and applications in power electronics; SIMÕES, M. G., BUSARELLO, T. D. C. (ed.). **Power electronic converters and systems.** Volume 2: Applications. 2. ed. Londres, Inglaterra: IET, 2024. P. 1-19. Disponível em: https://digital-library.theiet.org/content/books/po/pbpo241g. doi: 10.1049/PBPO241G.

CARRASCO, Juan Manuel et al. Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: A survey. **IEEE Transactions on industrial electronics**, v. 53, n. 4, p. 1002-1016, 2006. doi: 10.1109/TIE.2006.878356.

CARVALHO, H. T. M. **Controle de microrredes CA:** Estudo de regulação de frequência e tensões. 2019. 130 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, 2019. Disponível em: https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/24331. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

CARVALHO, H. T. M. et al. Controle secundário distribuído em microrredes: Análise da distribuição de potência entre unidades geradoras de capacidades diferentes. In: **XVI Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica (CEEL)**. CEEL, 2018b. p. 1-6.

CARVALHO, H. T. M. et al. Controle secundário distribuído para regulação de tensão e frequência de microrredes em operação ilhada. In: **2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON).** INDUSCON, 2018a, p. 1-8.

CHA, Hanju; VU, Trung-Kien; KIM, Jae-Eon. Design and control of Proportional-Resonant controller based Photovoltaic power conditioning system. In: **2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition**. IEEE, 2009. p. 2198-2205. doi: 10.1109/ECCE.2009.5316374.

CHANDORKAR, Mukul C.; DIVAN, Deepakraj M.; ADAPA, Rambabu. Control of parallel connected inverters in standalone AC supply systems. **IEEE transactions on industry applications**, v. 29, n. 1, p. 136-143, 1993 (2002). doi: 10.1109/28.195899.

CHE, Liang; KHODAYAR, Mohammad; SHAHIDEHPOUR, Mohammad. Only connect: Microgrids for distribution system restoration. **IEEE power and energy magazine**, v. 12, n. 1, p. 70-81, 2013. doi: 10.1109/MPE.2013.2286317.

CHEN, Chien-Liang et al. Design of parallel inverters for smooth mode transfer microgrid applications. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 25, n. 1, p. 6-15, 2009. doi: 10.1109/TPEL.2009.2025864.

CHEN, Eric. **History, Chapter 2**. Em G. Hoogers (ed.). **Fuel cell technology handbook.** Boca Raton, Estados Unidos da América: CRC Press, 2003.

CHO, Changhee et al. Active synchronizing control of a microgrid. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 26, n. 12, p. 3707-3719, 2011. doi: 10.1109/TPEL.2011.2162532.

CHOWDHURY, S.; CHOWDHURY, S. P.; CROSSLEY, P. **Microgrids and active distribution networks.** Londres, Reino Unido: IET, 2009.

CIOBOTARU, Mihai; TEODORESCU, Remus; BLAABJERG, Frede. A new single-phase PLL structure based on second order generalized integrator. In: **2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference**. IEEE, 2006. p. 1-6. doi: 10.1109/pesc.2006.1711988.

COELHO, E. A. A. et al. Small-signal analysis of the microgrid secondary control considering a communication time delay. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 63, n. 10, p. 6257-6269, 2016. doi: 10.1109/TIE.2016.2581155.

COELHO, Ernane Antônio Alves. **Técnicas de controle aplicadas ao paralelismo de inversores.** 2000. 143 f. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2000. Disponível em: https://www.ppgee.ufmg.br/defesas/868D.PDF. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

COELHO, Ernane Antonio Alves; CORTIZO, Porfirio Cabaleiro; GARCIA, Pedro Francisco Donoso. Small-signal stability for parallel-connected inverters in stand-alone AC supply systems. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 38, n. 2, p. 533-542, 2002. doi: 10.1109/28.993176.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS (CEMIG). **Norma técnica ND-2.7:** Instalações básicas de rede de distribuição aéreas isoladas. Belo Horizonte, Brasil: CEMIG, 2016. Disponível em: https://www.cemig.com.br/wp-content/uploads/2022/03/nd_2_7-1.pdf. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

CONFERÊNCIA DAS PARTES DA CONVENÇÃO-QUADRO DAS NAÇÕES SOBRE MUNDANÇA DO CLIMA (UNFCCC). **Adoção do Acordo de Paris sobre o Clima.** Paris, França: ONU-UNFCCC, 2015. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/88191-acordo-de-paris-sobre-o-clima. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

DAS, Dibakar; GURRALA, Gurunath; SHENOY, U. Jayachandra. Linear quadratic regulator-based bumpless transfer in microgrids. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 9, n. 1, p. 416-425, 2016. doi: 10.1109/TSG.2016.2580159.

DE BRABANDERE, Karel et al. A voltage and frequency droop control method for parallel inverters. **IEEE Transactions on power electronics**, v. 22, n. 4, p. 1107-1115, 2007. doi: 10.1109/TPEL.2007.900456.

DE BRABANDERE, Karel et al. Control of microgrids. In: **2007 IEEE power engineering society general meeting**. IEEE, 2007. p. 1-7. doi: 10.1109/PES.2007.386042.

DELGHAVI, Mohammad B.; YAZDANI, Amirnaser. A control strategy for islanded operation of a distributed resource (DR) unit. In: **2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting**. IEEE, 2009. p. 1-8. doi: 10.1109/PES.2009.5275592.

DELGHAVI, Mohammad B.; YAZDANI, Amirnaser. A unified control strategy for electronically interfaced distributed energy resources. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 27, n. 2, p. 803-812, 2012. doi: 10.1109/TPWRD.2011.2181430.

DENG, Yan et al. Enhanced power flow control for grid-connected droop-controlled inverters with improved stability. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 64, n. 7, p. 5919-5929, 2016. doi: 10.1109/TIE.2016.2606081.

DIVYA, Kurthakoti C.; ØSTERGAARD, Jacob. Battery energy storage technology for power systems—An overview. **Electric power systems research**, v. 79, n. 4, p. 511-520, 2009. doi: 10.1016/j.epsr.2008.09.017.

DJAPIC, Predrag et al. Taking an active approach. **IEEE Power and Energy Magazine**, v. 5, n. 4, p. 68-77, 2007. doi: 10.1109/MPAE.2007.376582.

DORF, Richard C.; BISHOP, Robert H. **Sistemas de controle moderno.** Tradução e revisão técnica: Rubens J. M. Afonso. 14 ed. Rio de Janeiro, Brasil: LTC, 2024.

DOS REIS, L. B.; SANTOS, E. C. **Energia elétrica e sustentabilidade:** Aspectos tecnológicos, socioambientais e legais. 2 ed. Barueri, Brasil: Editora Manole, 2014.

D'SILVA, Silvanus et al. Towards grid of microgrids: Seamless transition between grid-connected and islanded modes of operation. **IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society**, v. 1, p. 66-81, 2020. doi: 10.1109/OJIES.2020.2988618.

DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; BEATY, H. W. **Electric power systems quality.** Nova Iorque, Estados Unidos da América: McGraww-Hill, 1996.

DUGAN, Roger C.; MCDERMOTT, Thomas E. Distributed generation. **IEEE Industry Applications Magazine**, v. 8, n. 2, p. 19-25, 2002. doi: 10.1109/2943.985677.

DUGAN, Roger C.; MCDERMOTT, Thomas E. Operating conflicts for distributed generation on distribution systems. In: **2001 Rural Electric Power Conference. Papers Presented at the 45th Annual Conference (Cat. No. 01CH37214)**. IEEE, 2001. p. A3/1-A3/6. doi: 10.1109/REPCON.2001.949511.

ELECTRIC RESEARCH COUNCIL TASK FORCE (ERCTF). **Report of the R&D goals task force to the electric research council:** Electric utilities industry research and development goals through the year 2000. Estados Unidos da América: ERC Pub., 1971. 186p.

ELGERD, O. I. **Electric energy systems theory:** An introduction. Nova Iorque, Estados Unidos da América: McGraw-Hill Book Company, 1973.

EL-KHATTAM, Walid; SALAMA, Magdy MA. Distributed generation technologies, definitions and benefits. **Electric power systems research**, v. 71, n. 2, p. 119-128, 2004. doi: 10.1016/j.epsr.2004.01.006.

ELLABBAN, Omar; ABU-RUB, Haitham; BLAABJERG, Frede. Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 39, p. 748-764, 2014. doi: 10.1016/j.rser.2014.07.113.

EMBER. **Global electricity review 2024.** Londres, Inglaterra: EMBER, 2024. Disponível em: https://ember-energy.org/latest-insights/global-electricity-review-2024/. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanço energético nacional 2024.** Rio de Janeiro, Brasil: EPE, 2024. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2024. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Painel de dados de micro e minigeração distribuída (PDGD).** Rio de Janeiro, Brasil: EPE, 2025. Disponível em: https://dashboard.epe.gov.br/apps/pdgd/. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

ENERGY SECTOR MANAGEMENT ASSISTANCE PROGRAM (ESMAP), IEA, IRENA, UNSD, Banco Mundial, OMS. **Tracking SDG 7:** The energy progress report 2024 – Executive summary. Washington, DC, Estados Unidos da América: Banco Mundial, 2024. Disponível em: https://trackingsdg7.esmap.org/. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

ENERGY SECTOR MANAGEMENT ASSISTANCE PROGRAM (ESMAP). **Mini grids for half a billion people:** Market outlook and handbook for decision makers – Executive summary. Washington, D.C., Estados Unidos da América: Banco Mundial, 2019. Disponível em: https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/31926. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

ERICKSON, R. W.; MAKSIMOVIC. **Fundamentals of power electronics.** Nova Iorque, Estados Unidos da América: Kluwer academic publishers, 2004.

ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA, DEPARTAMENTO DE ENERGIA (DOE-USA). **Summary report:** 2012 DOE microgrid workshop. Estados Unidos da América: DOE, 2012. Disponível em: https://www.energy.gov/oe/articles/2012-doe-microgrid-workshop-summary-report-september-2012. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA, DEPARTAMENTO DE ENERGIA (DOE-USA). **The Smart Grid:** An introduction. Estados Unidos da América: DOE, 2008. Disponível em: https://www.energy.gov/oe/smart-grid-primer-smart-grid-books. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA. **Public utility regulatory policies act of 1978 (PURPA).** 95th Congress, H.R. 4018 November 9, 1978. Washington, D.C., Estados Unidos da América, 1978. Disponível em: https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/STATUTE-92/pdf/STATUTE-92-Pg3117.pdf. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

ETHERDEN, Nicholas et al. The transparent hosting-capacity approach–overview, applications and developments. In: **International Conference and Exhibition on Electricity Distribution: 15/06/2015-18/06/2015**. Lyon, França: 2015. doi: 10.1109/PTC.2011.6019292.

ETHERDEN, Nicholas. **Increasing the hosting capacity of distributed energy resources using storage and communication**. Tese de Doutorado. Universidade Técnica de Luleå, Luleå, Suécia, 2014.

ETHERDEN, Nicholas; BOLLEN, Math H. J. Increasing the hosting capacity of distribution networks by curtailment of renewable energy resources. In: **2011 IEEE Trondheim PowerTech**. IEEE, 2011. p. 1-7. doi: 10.1109/PTC.2011.6019292.

FARHANGI, Hassan. The path of the smart grid. **IEEE power and energy magazine**, v. 8, n. 1, p. 18-28, 2009. doi: 10.1109/MPE.2009.934876.

FENG, Wei et al. A review of microgrid development in the United States–A decade of progress on policies, demonstrations, controls, and software tools. **Applied energy**, v. 228, p. 1656-1668, 2018. doi: 10.1016/j.apenergy.2018.06.096.

FENG, Wei et al. Active power quality improvement strategy for grid-connected microgrid based on hierarchical control. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 9, n. 4, p. 3486-3495, 2016. doi: 10.1109/TSG.2016.2633298.

FERREIRA, Aurélio B. de H. **Míni Aurélio:** O dicionário da língua portuguesa. Coordenação de edição: Marina B. Ferreira. 8 ed. Curitiba, Brasil: Positivo, 2010.

FERREIRA, R. J.; ARAÚJO, R. Esteves; LOPES, JA Peças. A comparative analysis and implementation of various PLL techniques applied to single-phase grids. In: **Proceedings of the 2011 3rd International Youth Conference on Energetics (IYCE)**. IEEE, 2011. p. 1-8.

FLYNN, J. D. Fuel cells and their effects on utilities. **Electrical Engineering**, v. 80, n. 11, p. 828-831, 1961. doi: 10.1109/EE.1961.6433507.

FRIEDMAN, Thomas L. **Quente, plano e lotado:** Os desafios e oportunidades de um novo mundo. Tradução: Cristina Cavalcanti e Paulo Afonso, Rio de Janeiro, Brasil: Objetiva, 2010.

GAO, Fang; IRAVANI, M. Reza. A control strategy for a distributed generation unit in grid-connected and autonomous modes of operation. **IEEE Transactions on power delivery**, v. 23, n. 2, p. 850-859, 2008. doi: 10.1109/TPWRD.2007.915950.

GAO, Siyu; BARNES, Mike. Phase-locked loop for AC systems: Analyses and comparisons. In: **6th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2012)**. Stevenage UK: IET, 2012. p. A21. doi: 10.1049/cp.2012.0199.

GIDDENS, A. **A política da mudança climática.** Tradução: V. Ribeiro; Revisão técnica: A. Piani; Apresentação à edição brasileira: S. B. Vianna. Rio de Janeiro, Brasil: Zahar, 2010.

GOLESTAN, Saeed et al. Dynamics assessment of advanced single-phase PLL structures. **IEEE transactions on industrial electronics**, v. 60, n. 6, p. 2167-2177, 2012. doi: 10.1109/TIE.2012.2193863.

GUERRERO, Josep M. et al. Advanced control architectures for intelligent microgrids—Part II: Power quality, energy storage, and AC/DC microgrids. **IEEE Transactions on industrial electronics**, v. 60, n. 4, p. 1263-1270, 2012b. doi: 10.1109/TIE.2012.2196889.

GUERRERO, Josep M. et al. Advanced control architectures for intelligent microgrids—Part I: Decentralized and hierarchical control. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 60, n. 4, p. 1254-1262, 2012a. doi: 10.1109/TIE.2012.2194969.

GUERRERO, Josep M. et al. Control strategy for flexible microgrid based on parallel line-interactive UPS systems. **IEEE Transactions on industrial Electronics**, v. 56, n. 3, p. 726-736, 2009. doi: 10.1109/TIE.2008.2009274.

GUERRERO, Josep M. et al. Distributed generation: Toward a new energy paradigm. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, v. 4, n. 1, p. 52-64, 2010. doi: 10.1109/MIE.2010.935862.

GUERRERO, Josep M. et al. Output impedance design of parallel-connected UPS inverters with wireless load-sharing control. **IEEE Transactions on industrial electronics**, v. 52, n. 4, p. 1126-1135, 2005. doi: 10.1109/TIE.2005.851634.

GUERRERO, Josep M. et al. Shipboard microgrids: Maritime islanded power systems technologies. In: **PCIM Asia 2016; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management**. VDE, 2016. p. 1-8.

GUIDEHOUSE INSIGHTS. **Clean energy microgrids market forecast:** Global clean energy microgrid deployment forecasts: 2022-2031 – Executive summary. Falls Church, Estados Unidos da América: Guidehouse Inc., 2022b.

GUIDEHOUSE INSIGHTS. **Market data - microgrid markets:** Market drivers, barriers, business models, and key market segment forecasts – Executive summary. Falls Church, Estados Unidos da América: Guidehouse Inc., 2022a.

GUIDEHOUSE INSIGHTS. **The renewable energy economic benefits of microgrids**. Falls Church, Estados Unidos da América: Guidehouse Inc., 2021. Disponível em: https://www.microgridknowledge.com/home/whitepaper/11434553/think-microgrid-the-renewable-energy-economic-benefits-of-microgrids. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

GUO, Zhiqiang; SHA, Deshang; LIAO, Xiaozhong. Voltage magnitude and frequency control of three-phase voltage source inverter for seamless transfer. **IET Power Electronics**, v. 7, n. 1, p. 200-208, 2014. doi: 10.1049/iet-pel.2012.0723.

HADJIPASCHALIS, Ioannis; POULLIKKAS, Andreas; EFTHIMIOU, Venizelos. Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 13, n. 6-7, p. 1513-1522, 2009. doi: 10.1016/j.rser.2008.09.028.

HAMILTON, James D. Historical oil shocks. In: **Routledge handbook of major events in economic history**. Routledge, 2013. p. 239-265.

HAN, Hua et al. Review of power sharing control strategies for islanding operation of AC microgrids. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 7, n. 1, p. 200-215, 2015. doi: 10.1109/TSG.2015.2434849.

HAN, Yang et al. Review of active and reactive power sharing strategies in hierarchical controlled microgrids. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 32, n. 3, p. 2427-2451, 2016. doi: 10.1109/TPEL.2016.2569597.

HARIRCHI, Farnaz et al. Designing smart inverter with unified controller and smooth transition between grid-connected and islanding modes for microgrid application. In: **2015 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting**. IEEE, 2015. p. 1-7. doi: 10.1109/IAS.2015.7356800.

HART, D. W. **Eletrônica de potência:** Análise e projetos de circuitos. Tradução: R. Abdo; Revisão técnica: A. Pertence Jr. Porto Alegre, Brasil: AMGH, 2012.

HATZIARGYRIOU, N. **Microgrids:** Architectures and control. Hoboken, Estados Unidos da América: Wiley, 2014.

HATZIARGYRIOU, Nikos et al. Microgrids. **IEEE power and energy magazine**, v. 5, n. 4, p. 78-94, 2007. doi: 10.1109/MPAE.2007.376583.

HE, Jinwei; LI, Yun Wei. Analysis, design, and implementation of virtual impedance for power electronics interfaced distributed generation. **IEEE Transactions on industry Applications**, v. 47, n. 6, p. 2525-2538, 2011. doi: 10.1109/TIA.2011.2168592.

HERNANDEZ-ARAMBURO, Carlos A.; GREEN, Tim C.; MUGNIOT, Nicolas. Fuel consumption minimization of a microgrid. **IEEE transactions on industry applications**, v. 41, n. 3, p. 673-681, 2005. doi: 10.1109/TIA.2005.847277.

HIROSE, Keiichi; REILLY, J.; IRIE, H. The sendai microgrid operational experience in the aftermath of the tohoku earthquake: a case study. **New Energy and Industrial Technology Development Organization**, v. 308, p. 1-6, 2013.

HIRSCH, Adam; PARAG, Yael; GUERRERO, Josep. Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues. **Renewable and sustainable Energy reviews**, v. 90, p. 402-411, 2018. doi: 10.1016/j.rser.2018.03.040.

HOLDMANN, G.; ASMUS, P. **Microgrid innovation in the circumpolar arctic:** Lessons for developing world markets. Navigant Research, 2019.

HOU, Xiaochao et al. A unified distributed control for grid-connected and islanded modes in multi-bus AC microgrid. In: **IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**. IEEE, 2017. p. 2377-2382. doi: 10.1109/IECON.2017.8216400.

HOU, Xiaochao et al. Distributed hierarchical control of AC microgrid operating in grid-connected, islanded and their transition modes. **IEEE Access**, v. 6, p. 77388-77401, 2018. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2882678.

HSIEH, Guan-Chyun; HUNG, James C. Phase-locked loop techniques. A survey. **IEEE Transactions on industrial electronics**, v. 43, n. 6, p. 609-615, 1996. doi: 10.1109/41.544547.

HU, S. et al. Droop-controlled inverters with seamless transition between islanding and grid-connected operations. In: **2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition.** IEEE, 2011. P. 2196-2201. doi: 10.1109/ECCE.2011.6064059.

HUA, Chih-Chiang; LIAO, Kuo-An; LIN, Jong-Rong. Parallel operation of inverters for distributed photovoltaic power supply system. In: **2002 IEEE 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Proceedings (Cat. No. 02CH37289)**. IEEE, 2002. p. 1979-1983. doi: 10.1109/PSEC.2002.1023104.

HUGHES, T. P. **Networks of Power:** Electrification in Western Society, 1880-1930. Baltimore, Estados Unidos da América: John Hopkins University Press, 1983.

IBOPE INTELIGÊNCIA; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS COMERCIALIZADORES DE ENERGIA (ABRACEEL). **Pesquisa de Opinião Pública: Energia Elétrica.** 2020. Disponível em: https://abraceel.com.br/biblioteca/apresentacoes/2020/08/pesquisa-ibope-abraceel-2020/. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). **IEEE Std 1547™-2018:** IEEE Standard for interconnection and interoperability of distributed energy resources with associated electric power systems interfaces. Nova Iorque, Estados Unidos da América: IEEE, 2018.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). **IEEE Std 2030.7™-2017:** IEEE standard for the specification of microgrid controllers. Nova Iorque, Estados Unidos da América: IEEE, 2017.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). **IEEE Std 1547.4™-2011:** IEEE guide for design, operation, and integration of distributed resource island systems with electric power systems. Nova Iorque, Estados Unidos da América: IEEE, 2011.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). **IEEE Std 929™-2000:** IEEE Recommended practice for utility interface of photovoltaic (PV) systems. Nova Iorque, Estados Unidos da América: IEEE, 2000.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **IEC 60050 – International electrotechnical vocabulary (Electropedia):** Embedded generation. Disponível em: https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=617-04-09. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **IEC 60050 – International electrotechnical vocabulary (Electropedia):** Microgrid. Disponível em: https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=617-04-22. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **IEC 62116-2014:** IEC Utility-interconnected photovoltaic inverters – Test procedure for islanding preventing measures. Genebra, Suíça: IEC, 2014.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **CO2 emissions in 2022.** Paris, França: IEA, 2023. Disponível em: https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Unlocking the potential of distributed energy resources:** Power system opportunities and best practices. França: IEA, 2022a. 116p. Disponível em: https://www.iea.org/reports/unlocking-the-potential-of-distributed-energy-resources. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **World energy outlook 2022.** Paris, França: IEA, 2022b. Disponível em: https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Off-grid renewable energy statistics 2024.** Abu Dhabi, Emirados Árabes Unidos: IRENA, 2024b. Disponível em: https://www.irena.org/Publications/2024/Dec/Off-grid-Renewable-Energy-Statistics-2024. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Off-grid renewable energy solutions and their role in the energy access nexus:** Key takeaways from the 5th IOREC. Abu Dhabi, Emirados Árabes Unidos: IRENA, 2022b. Disponível em:

https://iorec.irena.org/-/media/IOREC/2021-edition/IRENA_IOREC_outcomes_report_2022.pdf. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Renewable energy capacity statistics 2015.** Abu Dhabi, Emirados Árabes Unidos: IRENA, 2015. Disponível em: https://www.irena.org/Publications/2015/Jun/Renewable-Energy-Capacity-Statistics-2015. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Renewable energy capacity statistics 2025.** Abu Dhabi, Emirados Árabes Unidos: IRENA, 2025. Disponível em: https://www.irena.org/Publications/2025/Mar/Renewable-capacity-statistics-2025. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Renewable power generation costs in 2023.** Abu Dhabi, Emirados Árabes Unidos: IRENA, 2024a. Disponível em: https://www.irena.org/Publications/2024/Sep/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2023. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA); ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DO TRABALHO (OIT). **Renewable energy and jobs – Annual review 2024.** Abu Dhabi, Emirados Árabes Unidos: IRENA, 2024. Disponível em: https://www.irena.org/Publications/2024/Oct/Renewable-energy-and-jobs-Annual-review-2024. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

IPAKCHI, Ali; ALBUYEH, Farrokh. Grid of the future. **IEEE power and energy magazine**, v. 7, n. 2, p. 52-62, 2009. doi: 10.1109/MPE.2008.931384.

ISHAQ, Saima et al. A review on recent developments in control and optimization of micro grids. **Energy Reports**, v. 8, p. 4085-4103, 2022. doi: 10.1016/j.egyr.2022.01.080.

ISSA, Walid et al. Smooth mode transfer in AC microgrids during unintentional islanding. **Energy Procedia**, v. 134, p. 12-20, 2017a. doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.592.

ISSA, Walid R. et al. Control strategy for uninterrupted microgrid mode transfer during unintentional islanding scenarios. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 65, n. 6, p. 4831-4839, 2017b. doi: 10.1109/TIE.2017.2772199.

JENKINS, N.; EKANAYAKE, J.; STRBAC, G. **Distributed generation.** Londres, Inglaterra: IET, 2010.

JEWELL, Ward T.; RAMAKUMAR, R. The history of utility-interactive photovoltaic generation. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 3, n. 3, p. 583-588, 1988. doi: 10.1109/60.8071.

JIA, Yaoqin; LIU, Dingkun; LIU, Jia. A novel seamless transfer method for a microgrid based on droop characteristic adjustment. In: **Proceedings of The 7th International Power Electronics and Motion Control Conference**. IEEE, 2012. p. 362-367. doi: 10.1109/IPEMC.2012.6258878.

JIN, Cheng et al. A seamless transfer strategy of islanded and grid-connected mode switching for microgrid based on droop control. In: **2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)**. IEEE, 2012. p. 969-973. doi: 10.1109/ECCE.2012.6342714.

KAHROBAEIAN, Alireza; MOHAMED, Yasser Abdel-Rady I. Interactive distributed generation interface for flexible micro-grid operation in smart distribution systems. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, v. 3, n. 2, p. 295-305, 2012. doi: 10.1109/TSTE.2011.2178045.

KANELLOS, F. D. et al. Micro-grid simulation during grid-connected and islanded modes of operation. In: **International Conference on Power Systems Transients**. 2005.

KARIMI-GHARTEMANI, M.; IRAVANI, M. R. A new phase-locked loop (PLL) system. In: **Proceedings of the 44th IEEE 2001 Midwest Symposium on Circuits and Systems. MWSCAS 2001 (Cat. No. 01CH37257)**. IEEE, 2001. p. 421-424. doi: 10.1109/MWSCAS.2001.986202.

KATIRAEI, Farid et al. Microgrids management. **IEEE power and energy magazine**, v. 6, n. 3, p. 54-65, 2008. doi: 10.1109/MPE.2008.918702.

KATIRAEI, Farid; IRAVANI, Mohammad Reza. Power management strategies for a microgrid with multiple distributed generation units. **IEEE transactions on power systems**, v. 21, n. 4, p. 1821-1831, 2006. doi: 10.1109/TPWRS.2006.879260.

KATIRAEI, Faridaddin; IRAVANI, Mohammad Reza; LEHN, Peter W. Micro-grid autonomous operation during and subsequent to islanding process. **IEEE Transactions on power delivery**, v. 20, n. 1, p. 248-257, 2005. doi: 10.1109/TPWRD.2004.835051.

KAURA, Vikram; BLASKO, Vladimir. Operation of a phase locked loop system under distorted utility conditions. **IEEE Transactions on Industry applications**, v. 33, n. 1, p. 58-63, 1997. doi: 10.1109/28.567077.

KEANE, Andrew et al. State-of-the-art techniques and challenges ahead for distributed generation planning and optimization. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 28, n. 2, p. 1493-1502, 2012. doi: 10.1109/TPWRS.2012.2214406.

KEYNES, John Maynard. **Economia (grandes cientistas sociais; 6).** Organização: T. Szmrecsányi; Tradução: M. M. Leite. São Paulo, Brasil: Ática, 1978.

KEYNES, John Maynard. **Teoria geral do emprego, do juro e da moeda; Inflação e deflação.** Apresentação: A. M. da Silva; Tradução: M. R. da Cruz. São Paulo, Brasil: Abril Cultural, 1983.

KHADEM, Shafiuzzaman K.; BASU, Malabika; CONLON, Michael F. Intelligent islanding and seamless reconnection technique for microgrid with UPQC. **IEEE Journal of Emerging and selected topics in Power Electronics**, v. 3, n. 2, p. 483-492, 2014. doi: 10.1109/JESTPE.2014.2326983.

KIM, Jaehong et al. Mode adaptive droop control with virtual output impedances for an inverter-based flexible AC microgrid. **IEEE Transactions on power electronics**, v. 26, n. 3, p. 689-701, 2010. doi: 10.1109/TPEL.2010.2091685.

KINDERMANN, G. **Curto-circuito.** 5 ed. Florianópolis, Brasil: Edição do autor, 2010.

KLAPP, David; VOLLKOMMER, Harry T. Application of an intelligent static switch to the point of common coupling to satisfy IEEE 1547 compliance. In: **2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting**. IEEE, 2007. p. 1-4. doi: 10.1109/PES.2007.385815.

KLINGENBERG, Georg. Electricity supply of large cities. **Journal of the Institution of Electrical Engineers**, v. 52, n. 225, p. 123-141, 1914. doi: 10.1049/jiee-1.1914.0002 .

KOJIMA, Yasuhiro et al. A demonstration project in hachinohe: Microgrid with private distribution line. In: **2007 IEEE International Conference on System of Systems Engineering**. IEEE, 2007. p. 1-6. doi: 10.1109/SYSOSE.2007.4304276.

KROPOSKI, Ben et al. Development of a high-speed static switch for distributed energy and microgrid applications. In: **2007 Power Conversion Conference-Nagoya**. IEEE, 2007. p. 1418-1423. doi: 10.1109/PCCON.2007.373150.

KROPOSKI, Benjamin et al. Benefits of power electronic interfaces for distributed energy systems. **IEEE transactions on energy conversion**, v. 25, n. 3, p. 901-908, 2010. doi: 10.1109/TEC.2010.2053975.

KROPOSKI, Benjamin et al. Making microgrids work. **IEEE power and energy magazine**, v. 6, n. 3, p. 40-53, 2008. doi: 10.1109/MPE.2008.918718.

KUEFFNER, John H. Wind hybrid power system for antarctica inmarsat link. In: **INTELEC'86-International Telecommunications Energy Conference**. IEEE, 1986. p. 297-298. doi: 10.1109/INTLEC.1986.4794440.

KULKARNI, Onkar Vitthal; DOOLLA, Suryanarayana; FERNANDES, B. G. Mode transition control strategy for multiple inverter-based distributed generators operating in grid-connected and standalone mode. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 53, n. 6, p. 5927-5939, 2017. doi: 10.1109/TIA.2017.2743682.

KUNDUR, P. S. **Power system stability and control.** Nova Iorque, Estados Unidos da América: McGraw-Hill, 1994.

LAAKSONEN, Hannu Jaakko. Protection principles for future microgrids. **IEEE Transactions on power electronics**, v. 25, n. 12, p. 2910-2918, 2010. doi: 10.1109/TPEL.2010.2066990.

LAKE RESEARCH PARTNERS (LRP); CIVIL SOCIETY INSTITUTE. **Microgrids 2021.** Washington, D.C., Estados Unidos da América: Civil Society Institute, 2021. Disponível em: https://www.civilsocietyinstitute.org/Microgrids/LRPMicrogrids.pdf. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

LASHAB, Abderezak et al. Space microgrids: New concepts on electric power systems for satellites. **IEEE Electrification Magazine**, v. 8, n. 4, p. 8-19, 2020. doi: 10.1109/MELE.2020.3026436.

LASSETER, Robert et al. **Integration of distributed energy resources:** The CERTS microgrid concept. Berkeley, Estados Unidos da América: Consortium Electric Reliability Technology Solutions, 2002a.

LASSETER, Robert H. Microgrids and distributed generation. **Journal of Energy Engineering**, v. 133, n. 3, p. 144-149, 2007. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9402(2007)133:3(144).

LASSETER, Robert H. Microgrids. In: **2002 IEEE power engineering society winter meeting. Conference proceedings (Cat. No. 02CH37309)**. IEEE, 2002b. p. 305-308. doi: 10.1109/PESW.2002.985003.

LASSETER, Robert H.; PIAGI, P. Microgrid: a conceptual solution. In: **2004 IEEE 35th annual power electronics specialists conference (IEEE Cat. No. 04CH37551)**. IEEE, 2004. p. 4285-4290. doi: 10.1109/PESC.2004.1354758.

LEE, Chia-Tse; JIANG, Ruei-Pei; CHENG, Po-Tai. A grid synchronization method for droop-controlled distributed energy resource converters. In: **2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition.** IEEE, 2011. p. 743-749. doi: 10.1109/ECCE.2011.6063844.

LEE, Chia-Tse; JIANG, Ruei-Pei; CHENG, Po-Tai. A grid synchronization method for droop-controlled distributed energy resource converters. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 49, n. 2, p. 954-962, 2013. doi: 10.1109/TIA.2013.2242816.

LI, Chendan et al. Power flow analysis for low-voltage AC and DC microgrids considering droop control and virtual impedance. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 8, n. 6, p. 2754-2764, 2016. doi: 10.1109/TSG.2016.2537402.

LI, Yunwei; VILATHGAMUWA, D. Mahinda; LOH, Poh Chiang. Design, analysis, and real-time testing of a controller for multibus microgrid system. **IEEE Transactions on power electronics**, v. 19, n. 5, p. 1195-1204, 2004. doi: 10.1109/TPEL.2004.833456.

LISERRE, Marco; SAUTER, Thilo; HUNG, John Y. Future energy systems: Integrating renewable energy sources into the smart power grid through industrial electronics. **IEEE industrial electronics magazine**, v. 4, n. 1, p. 18-37, 2010. doi: 10.1109/MIE.2010.935861.

LIU, Zeng; LIU, Jinjun. Indirect current control based seamless transfer of three-phase inverter in distributed generation. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 29, n. 7, p. 3368-3383, 2013. doi: 10.1109/TPEL.2013.2282319.

LOPES, JA Peças; MOREIRA, Carlos L.; MADUREIRA, A. G. Defining control strategies for microgrids islanded operation. **IEEE Transactions on power systems**, v. 21, n. 2, p. 916-924, 2006. doi: 10.1109/TPWRS.2006.873018.

LOU, Guannan et al. A novel control strategy for the seamless transfer of microgrids based on disturbance observer. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 118, p. 105804, 2020. doi: 10.1016/j.ijepes.2019.105804.

LUECKEL, W. J.; EKLUND, L. G.; LAW, S. H. Fuel cells for dispresed power generation. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, n. 1, p. 230-236, 1973. doi: 10.1109/TPAS.1973.293617.

MADUREIRA, André Guimarães; LOPES, João Peças. Voltage and reactive power control in MV networks integrating microgrids. In: **Proc. 2007, Int. Conf. Renewable Energies and Pow. Quality (ICREPQ).** ICREPQ, 2007. p. 1-5.

MAJUMDER, Ritwik et al. Control of parallel converters for load sharing with seamless transfer between grid connected and islanded modes. In: **2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century**. IEEE, 2008. p. 1-7. doi: 10.1109/PES.2008.4596111.

MANKIW, N. Gregory. **Introdução à economia.** Tradução: Allan V. Hastings, Elisete P. e Lima, Ez2 Translate; Revisão Técnica: Manuel J. N. Pinto. 6 ed. São Paulo, Brasil: Cengage Learning, 2015.

MAO, Meiqin et al. An intelligent static switch based on embedded system and its control method for a microgrid. In: **IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies**. IEEE, 2012. p. 1-6. doi: 10.1109/ISGT-Asia.2012.6303306.

MARNAY, Chris et al. Policymaking for microgrids. **IEEE Power and Energy Magazine**, v. 6, n. 3, p. 66-77, 2008. doi: 10.1109/MPE.2008.918715.

MATEUS, Felipe. Microrredes de energia: o desafio regulatório. **Jornal da UNICAMP,** Campinas, Brasil, ed. 706, 27 mai.-09 jun. 2024. Disponível em: https://jornal.unicamp.br/edicao/706/microrredes-de-energia-o-desafio-regulatorio/. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

MAXWELL, James Clerk. I. On governors. **Proceedings of the Royal Society of London**, n. 16, p. 270-283, 1868. doi: 10.1098/rspl.1867.0055.

MAZZUCATO, M. **O estado empreendedor:** Desmascarando o mito do setor público vs. setor privado. Tradução: E. Serapicos. São Paulo, Brasil: Portfolio-Penguin, 2014.

MEEGAHAPOLA, Lasantha Gunaruwan et al. Microgrids of commercial buildings: Strategies to manage mode transfer from grid connected to islanded mode. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, v. 5, n. 4, p. 1337-1347, 2014. doi: 10.1109/TSTE.2014.2305657.

MEMON, Aushiq Ali; KAUHANIEMI, Kimmo. A critical review of AC Microgrid protection issues and available solutions. **Electric Power Systems Research**, v. 129, p. 23-31, 2015. doi: 10.1016/j.epsr.2015.07.006.

MENG, Lexuan et al. Microgrid supervisory controllers and energy management systems: A literature review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 60, p. 1263-1273, 2016. doi: 10.1016/j.rser.2016.03.003.

MENGELKAMP, Esther et al. Designing microgrid energy markets: A case study: The Brooklyn Microgrid. **Applied energy**, v. 210, p. 870-880, 2018. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.06.054.

MICALLEF, Alexander et al. Single-phase microgrid with seamless transition capabilities between modes of operation. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 6, n. 6, p. 2736-2745, 2015. doi: 10.1109/TSG.2015.2444912.

MICALLEF, Alexander. Review of the current challenges and methods to mitigate power quality issues in single-phase microgrids. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 13, n. 11, p. 2044-2054, 2019. doi: 10.1049/iet-gtd.2018.6020.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME), EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2034.** Brasília, DF, Brasil: MME, EPE, 2024. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2034. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

MISHRA, Shivakant; RAMASUBRAMANIAN, D.; SEKHAR, P. C. A seamless control methodology for a grid connected and isolated PV-diesel microgrid. **IEEE transactions on power systems**, v. 28, n. 4, p. 4393-4404, 2013. doi: 10.1109/TPWRS.2013.2261098.

MOHAMED, Yasser Abdel-Rady I.; RADWAN, Amr A. Hierarchical control system for robust microgrid operation and seamless mode transfer in active distribution systems. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 2, n. 2, p. 352-362, 2011. doi: 10.1109/TSG.2011.2136362.

MOHAMED, Yasser Abdel-Rady Ibrahim; EL-SAADANY, Ehab F. Adaptive decentralized droop controller to preserve power sharing stability of paralleled inverters in distributed generation microgrids. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 23, n. 6, p. 2806-2816, 2008. doi: 10.1109/TPEL.2008.2005100.

MOHAN, N.; UNDELAND, T. M.; ROBBINS, W. P. **Power electronics:** Converters, applications, and design. Hoboken, Estados Unidos da América: John wiley & sons, 2003.

MOHD, Alaa et al. Challenges in integrating distributed energy storage systems into future smart grid. In: **2008 IEEE international symposium on industrial electronics**. IEEE, 2008. p. 1627-1632. doi: 10.1109/ISIE.2008.4676896.

MOHD, Alaa et al. Review of control techniques for inverters parallel operation. **Electric Power Systems Research**, v. 80, n. 12, p. 1477-1487, 2010. doi: 10.1016/j.epsr.2010.06.009.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATOY (NREL), USAID. **Microgrids in emerging markets - Private sector perspectives.** Golden, Estados Unidos da América: NREL, 2020. Disponível em: https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/76841.pdf. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

NISE, Norman S. **Engenharia de sistemas de controle.** Tradução e revisão técnica: Jackson P. Matsuura. 6 ed. Rio de Janeiro, Brasil: LTC, 2016.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno.** Tradução: Heloísa C. de Souza; Revisão técnica: Eduardo A. Tannuri. 5 ed. São Paulo, Brasil: Pearson Prentice Hall, 2010.

OLIVARES, Daniel E. et al. Trends in microgrid control. **IEEE Transactions on smart grid**, v. 5, n. 4, p. 1905-1919, 2014. doi: 10.1109/TSG.2013.2295514.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Transformando nosso mundo:** A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. 2015. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustentavel. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL (OMM). **State of the global climate 2024.** Genebra, Suíça: OMM, 2025. Disponível em: https://library.wmo.int/idurl/4/69455. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇA DO CLIMA (IPCC). **Climate change 2022:** Mitigation of climate change – Summary for policymakers; The working group III (WG III) contribution to the IPCC's sixth assessment report (AR6). Genebra, Suíça: Organização Meteorológica Mundial, 2022a. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇA DO CLIMA (IPCC). **Climate Change 2022:** Impacts, Adaptation and Vulnerability – Annex II: Glossary; The Working Group II (WG II) Contribution to the IPCC's Sixth Assessment Report (AR6). Genebra, Suíça: Organização Meteorológica Mundial, 2022b. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇA DO CLIMA (IPCC). **Global warming of 1.5°C, an IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty - Summary for policymakers**. Genebra, Suíça: Organização Meteorológica Mundial, 2019. Disponível em: https://www.ipcc.ch/sr15/. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

PARHIZI, Sina et al. State of the art in research on microgrids: A review. **IEEE access**, v. 3, p. 890-925, 2015. doi: 10.1109/ACCESS.2015.2443119.

PEPERMANS, Guido et al. Distributed generation: definition, benefits and issues. **Energy policy**, v. 33, n. 6, p. 787-798, 2005. doi: 10.1016/j.enpol.2003.10.004.

PHILIPPI JR, A.; DOS REIS, L. B. (ed.). **Energia e sustentabilidade.** Barueri, Brasil: Editora Manole, 2016.

PIAGI, Paolo; LASSETER, Robert H. Autonomous control of microgrids. In: **2006 IEEE power engineering society general meeting**. IEEE, 2006. p. 8 pp. doi: 10.1109/PES.2006.1708993.

PRODANOVIC, Milan et al. Harmonic and reactive power compensation as ancillary services in inverter-based distributed generation. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 1, n. 3, p. 432-438, 2007. doi: 10.1049/iet-gtd:20060064.

QIAN, Haiya et al. Control and synchronization of a fixed-frequency control method in microgrid based on global positioning system. **Energy Reports**, v. 6, p. 978-984, 2020. doi: https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.11.089.

RASHID, M. H. **Eletrônica de potência:** Dispositivos, circuitos e aplicações. Tradução: L. Abramowicz. Revisão técnica: C. M. de O. Stein. 4. ed. São Paulo, Brasil: 2014.

REBOURS, Yann G. et al. A survey of frequency and voltage control ancillary services—Part I: Technical features. **IEEE Transactions on power systems**, v. 22, n. 1, p. 350-357, 2007a. doi: 10.1109/TPWRS.2006.888963.

REBOURS, Yann G. et al. A survey of frequency and voltage control ancillary services—Part II: Economic features. **IEEE Transactions on power systems**, v. 22, n. 1, p. 358-366, 2007b. doi: 10.1109/TPWRS.2006.888965.

RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21st CENTURY (REN21). **Renewables 2024 global status report:** Renewable energy data in perspective. Paris, França: REN21 Secretariat, 2024. Disponível em: https://www.ren21.net/gsr-2024. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

RESENDE, Ênio Costa; DE MOURA CARVALHO, Henrique Tannús; FREITAS, Luiz Carlos Gomes. Implementation and critical analysis of the active phase jump with positive feedback anti-islanding algorithm. **Energies**, v. 15, n. 13, p. 4609, 2022. doi: 10.3390/en15134609.

REZNIK, Aleksandr et al. LCL filter design and performance analysis for grid-interconnected systems**. IEEE transactions on industry applications**, v. 50, n. 2, p. 1225-1232, 2013. doi: 10.1109/TIA.2013.2274612.

RIZO, Mario et al. A synchronization technique for microgrid reclosing after islanding operation. In: **IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society**. IEEE, 2012. p. 5596-5601. doi: 10.1109/IECON.2012.6389010.

ROCABERT, Joan et al. Control of power converters in AC microgrids. **IEEE transactions on power electronics**, v. 27, n. 11, p. 4734-4749, 2012. doi: 10.1109/TPEL.2012.2199334.

ROCABERT, Joan et al. Intelligent connection agent for three-phase grid-connected microgrids. **IEEE Transactions on power electronics**, v. 26, n. 10, p. 2993-3005, 2011. doi: 10.1109/TPEL.2011.2116126.

RYAN, Michael J.; LORENZ, Robert D. A high performance sine wave inverter controller with capacitor current feedback and "back-emf" decoupling. In: **Proceedings of PESC'95-Power Electronics Specialist Conference**. IEEE, 1995. p. 507-513. doi: 10.1109/PESC.1995.474857.

SAMUELSON, Paul A.; NORDHAUS, William D. **Economia.** Tradução: E. Fontainha, J. P. Gomes; Revisão técnica: E. H. Matsumara. 19 ed. Porto Alegre, Brasil: AMGH, 2012.

SAXENA, Vivek et al. Navigating the complexities of distributed generation: Integration, challenges, and solutions. **Energy Reports**, v. 12, p. 3302-3322, 2024. doi: 10.1016/j.egyr.2024.09.017.

SCHUMACHER, E. F. **Small is beautiful:** A study of economics as if people mattered. Vancouver, Canadá: Hartley and Marks, 1999.

SCHWARTZENBERG, J. W.; DE DONCKER, R. W. 15 kV medium voltage static transfer switch. In: **IAS'95. Conference Record of the 1995 IEEE Industry Applications Conference Thirtieth IAS Annual Meeting**. IEEE, 1995. p. 2515-2520. doi: 10.1109/IAS.1995.530623.

SERBAN, Ioan. A control strategy for microgrids: Seamless transfer based on a leading inverter with supercapacitor energy storage system. **Applied Energy**, v. 221, p. 490-507, 2018. doi: 10.1016/j.apenergy.2018.03.122.

SHAHIDEHPOUR, Mohammad; KHODAYAR, Mohammad. Cutting campus energy costs with hierarchical control: The economical and reliable operation of a microgrid. **IEEE Electrification Magazine**, v. 1, n. 1, p. 40-56, 2013. doi: 10.1109/MELE.2013.2273994.

SHIVASHANKAR, S. et al. Mitigating methods of power fluctuation of photovoltaic (PV) sources–A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 59, p. 1170-1184, 2016. doi: 10.1016/j.rser.2016.01.059.

SILVA, Sidelmo M. et al. Performance evaluation of PLL algorithms for single-phase grid-connected systems. In: **Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting.** IEEE, 2004. p. 2259-2263. doi: 10.1109/IAS.2004.1348790.

SILVEIRA JUNIOR, Jose Ronaldo et al. Multifunctional dispatchable microgrids. **Applied Energy**, v. 282, p. 116165, 2021. doi: 10.1016/j.apenergy.2020.116165.

SINGH, Bhim; PATHAK, Geeta; PANIGRAHI, Bijaya Ketan. Seamless transfer of renewable-based microgrid between utility grid and diesel generator. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 33, n. 10, p. 8427-8437, 2017. doi: 10.1109/TPEL.2017.2778104.

SOUZA JUNIOR, M. E. T. **Estudo e desenvolvimento de métodos de controle para microrredes CA ilhadas e conectadas à rede elétrica.** 2020. 139 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, 2020. Disponível em: https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/29730. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

SOUZA JUNIOR, Marcus ET et al. Computational implementation and comparative analysis of phase-locked loop (PLL) methods under different power quality disturbances. In: **2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference-Latin America (ISGT Latin America)**. IEEE, 2019. p. 1-6. doi: 10.1109/ISGT-LA.2019.8894920.

SOUZA JUNIOR, Marcus Evandro Teixeira. **Reflexões acerca da geração distribuída e suas implicações no sistema elétrico, na sociedade e no meio ambiente.** 2018. 209 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. Disponível em: https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/22352. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

SOUZA JUNIOR, Marcus Evandro Teixeira; FREITAS, Luiz Carlos Gomes. Power electronics for modern sustainable power systems: Distributed generation, microgrids and smart grids—A review. **Sustainability**, v. 14, n. 6, p. 3597, 2022a. doi: 10.3390/su14063597.

SOUZA JUNIOR, Marcus Evandro Teixeira; FREITAS, Luiz Carlos Gomes. Grid-connected and seamless transition modes for microgrids: an overview of control methods, operation elements, and general requirements. **IEEE Access**, v. 10, p. 97802-97834, 2022b. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3206362.

STADLER, Michael et al. Value streams in microgrids: A literature review. **Applied Energy**, v. 162, p. 980-989, 2016. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.10.081.

STEINMETZ, Charles P. Speed Regulation of Prime Movers and Parallel Operation of Alternators. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, v. 18, p. 741-744, 1901. doi: 10.1109/T-AIEE.1901.4764200.

STRANGE, Patrick. Early electricity supply in Britain: Chesterfield and Godalming. In: **Proceedings of the Institution of Electrical Engineers**. IEE, 1979. p. 863-868. doi: 10.1049/piee.1979.0265.

TALAPUR, Girish G. et al. A reliable microgrid with seamless transition between grid connected and islanded mode for residential community with enhanced power quality. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 54, n. 5, p. 5246-5255, 2018. doi: 10.1109/TIA.2018.2808482.

TANG, Fen et al. Distributed active synchronization strategy for microgrid seamless reconnection to the grid under unbalance and harmonic distortion. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 6, n. 6, p. 2757-2769, 2015. doi: 10.1109/TSG.2015.2406668.

TEODORESCU, R.; LISERRE, M.; RODRIGUEZ, P. **Grid converters for photovoltaic and wind power systems.** Hoboken, Estados Unidos da América: Wiley-IEEE press, 2011.

TEODORESCU, Remus et al. Proportional-resonant controllers and filters for grid-connected voltage-source converters. **IEE Proceedings-Electric Power Applications**, v. 153, n. 5, p. 750-762, 2006. doi: 10.1049/ip-epa:20060008.

TEODORESCU, Remus; BLAABJERG, Frede; LISERRE, Marco. Proportional-resonant controllers. A new breed of controllers suitable for grid-connected voltage-source converters. **Proc. Optim**, v. 3, p. 9-14, 2004.

TIMBUS, Adrian; LARSSON, Mats; YUEN, Cherry. Active management of distributed energy resources using standardized communications and modern information technologies. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 56, n. 10, p. 4029-4037, 2009. doi: 10.1109/TIE.2009.2017123.

TRAN, Thanh-Vu et al. PLL-based seamless transfer control between grid-connected and islanding modes in grid-connected inverters. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 29, n. 10, p. 5218-5228, 2013. doi: 10.1109/TPEL.2013.2290059.

TSIKALAKIS, Antonis G.; HATZIARGYRIOU, Nikos D. Centralized control for optimizing microgrids operation. In: **2011 IEEE power and energy society general meeting**. IEEE, 2011. p. 1-8. doi: 10.1109/PES.2011.6039737.

TULADHAR, Anil et al. Control of parallel inverters in distributed AC power systems with consideration of line impedance effect. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 36, n. 1, p. 131-138, 2000. doi: 10.1109/28.821807.

TULADHAR, Anil et al. Parallel operation of single phase inverter modules with no control interconnections. In: **Proceedings of APEC 97-Applied Power Electronics Conference**. IEEE, 1997. p. 94-100. doi: 10.1109/APEC.1997.581439.

U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (EIA-USA). **Electricity consumption data.** Washington, D.C., Estados Unidos da América: EIA, 2025. Disponível em: https://www.eia.gov/international/data/world/electricity/electricity-consumption. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (EIA-USA). **How much electricity is lost in electricity transmission and distribution in the United States?** Washington, D.C.,

Estados Unidos da América: EIA, 2023a. Disponível em: https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=105&t=3. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (EIA-USA). **What is U.S. electricity generation by energy source?** Washington, D.C., Estados Unidos da América: EIA, 2023b. Disponível em: https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=427&t=3. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

VANDOORN, Tine L. et al. A control strategy for islanded microgrids with dc-link voltage control. **IEEE Transactions on power delivery**, v. 26, n. 2, p. 703-713, 2011. doi: 10.1109/TPWRD.2010.2095044.

VANDOORN, Tine L. et al. Transition from islanded to grid-connected mode of microgrids with voltage-based droop control. **IEEE transactions on power systems**, v. 28, n. 3, p. 2545-2553, 2013. doi: 10.1109/TPWRS.2012.2226481.

VASQUEZ, Juan C. et al. Adaptive droop control applied to voltage-source inverters operating in grid-connected and islanded modes. **IEEE transactions on industrial electronics**, v. 56, n. 10, p. 4088-4096, 2009. doi: 10.1109/TIE.2009.2027921.

VASQUEZ, Juan C. et al. Hierarchical control of intelligent microgrids. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, v. 4, n. 4, p. 23-29, 2010. doi: 10.1109/MIE.2010.938720.

VASQUEZ, Juan C. et al. Modeling, analysis, and design of stationary-reference-frame droop-controlled parallel three-phase voltage source inverters. **IEEE Transactions on industrial electronics**, v. 60, n. 4, p. 1271-1280, 2013. doi: 10.1109/TIE.2012.2194951.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI. **Energia solar fotovoltaica:** Conceitos e aplicações. São Paulo, Brasil: Érica, 2012.

VILLENUEVE, P. L. Concerns generated by islanding [electric power generation]. **IEEE Power and Energy Magazine**, v. 2, n. 3, p. 49-53, 2004. doi: 10.1109/MPAE.2004.1293600.

WAI, Rong-Jong et al. Design of high-performance stand-alone and grid-connected inverter for distributed generation applications. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 60, n. 4, p. 1542-1555, 2012. doi: 10.1109/TIE.2012.2216232.

WANG, Jing et al. Design of a generalized control algorithm for parallel inverters for smooth microgrid transition operation. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 62, n. 8, p. 4900-4914, 2015. doi: 10.1109/TIE.2015.2404317.

WASHOM, Byron et al. Ivory tower of power: Microgrid implementation at the University of California, San Diego. **IEEE power and energy magazine**, v. 11, n. 4, p. 28-32, 2013. doi: 10.1109/MPE.2013.2258278.

WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT (WCED). **World commission on environment and development:** Our common future. 1987. Disponível em: http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf. Acesso em: 06 de jun. de 2025.

YANG, M. J. et al. Research of seamless transfer control strategy of microgrid system. In: **8th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia**. IEEE, 2011. p. 2059-2066. doi: 10.1109/ICPE.2011.5944504.

YAO, Zhilei; XIAO, Lan; YAN, Yangguang. Seamless transfer of single-phase grid-interactive inverters between grid-connected and stand-alone modes. **IEEE transactions on power electronics**, v. 25, n. 6, p. 1597-1603, 2009. doi: 10.1109/TPEL.2009.2039357.

ZENG, Zheng et al. Policies and demonstrations of micro-grids in China: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 29, p. 701-718, 2014. doi: 10.1016/j.rser.2013.09.015.

ZHONG, Qing-Chang; WEISS, George. Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators. **IEEE transactions on industrial electronics**, v. 58, n. 4, p. 1259-1267, 2010. doi: 10.1109/TIE.2010.2048839.

ZMOOD, Daniel Nahum; HOLMES, Donald Grahame. Stationary frame current regulation of PWM inverters with zero steady-state error. **IEEE Transactions on power electronics**, v. 18, n. 3, p. 814-822, 2003. doi: 10.1109/TPEL.2003.810852.