

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a) o texto completo desta Tese será disponibilizado somente a partir de 04/09/2025.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Faculdade de Engenharia de Bauru

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA

MARCUS VINÍCIUS MAIA RODRIGUES

INVERSOR FONTE-Y MULTIFUNCIONAL APLICADO A
SISTEMAS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Bauru - SP

2023

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA**

MARCUS VINÍCIUS MAIA RODRIGUES

**INVERSOR FONTE-Y MULTIFUNCIONAL APLICADO A
SISTEMAS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

Tese apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Bauru – UNESP, como requisito parcial para a obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área do conhecimento: Automação

Prof. Dr. Flávio Alessandro Serrão Gonçalves
Orientador

Prof. Dr. Fernando Pinhabel Marafão
Coorientador

Bauru - SP

2023

R696i Rodrigues, Marcus Vinícius Maia
Inversor Fonte-Y multifuncional aplicado a sistemas de
geração distribuída / Marcus Vinícius Maia Rodrigues. -- Bauru,
2023
184 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Engenharia, Bauru
Orientador: Flávio Alessandro Serrão Gonçalves
Coorientador: Fernando Pinhabel Marafão

1. Conversores CC-CA Multifuncionais. 2. Inversor Fonte-Y.
3. Microgeração Distribuída. 4. Redes de Impedância. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da
Faculdade de Engenharia, Bauru. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE MARCUS VINÍCIUS MAIA RODRIGUES, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 04 dias do mês de setembro do ano de 2023, às 14:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de TESE DE DOUTORADO de MARCUS VINÍCIUS MAIA RODRIGUES, intitulada **INVERSOR FONTE-Y MULTIFUNCIONAL APLICADO A SISTEMAS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. FLÁVIO ALESSANDRO SERRÃO GONÇALVES (Orientador(a) - Participação Presencial) do(a) Departamento de Engenharia de Controle e Automacao / Instituto de Ciencia e Tecnologia UNESP Campus de Sorocaba, Prof. Dr. FABRÍCIO BRADASCHIA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Prof. Dr. AUGUSTO MATHEUS DOS SANTOS ALONSO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação / Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Prof. Dr. JAKSON PAULO BONALDO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia / Universidade Federal do Mato Grosso - UFMT, Prof. Dr. EDUARDO VERRI LIBERADO (Participação Presencial) do(a) Departamento de Engenharia de Controle e Automacao / Instituto de Ciência e Tecnologia - UNESP - Câmpus de Sorocaba. Após a exposição pelo doutorando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: A P R O V A D O . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. FLÁVIO ALESSANDRO SERRÃO GONÇALVES

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela minha vida, por minha família e amigos, e por me conceder graça de chegar até aqui.

A minha família, Karina e Isabela; meus pais, Marcos e Rosana; a minha irmã, Beatriz; a meus avós, Diógenes, Maria Luiza, Angelin e Josepha e a toda minha família, por sempre me apoiarem em qualquer momento e por contribuírem na formação dos meus valores pessoais.

Agradeço ao meu orientador, o Prof. Dr. Flávio Alessandro Serrão Gonçalves, por sua dedicação e orientação, por estar sempre presente na realização do trabalho, compartilhando seus conhecimentos acadêmicos e profissionais.

Aos amigos Rafael dos Santos, Luis de Oro, Felipe Paes e todos outros colegas do Grupo de Automação e Sistemas Integráveis (GASI) pela ótima convivência e por todos os conhecimentos transmitidos, em especial ao longo dos ensaios realizados no laboratório.

Por fim, a Universidade Estadual Paulista (UNESP), campus de Sorocaba e Bauru.

RESUMO

Este trabalho apresenta a análise, o projeto e o desenvolvimento de conversores baseados no emprego da rede de impedância do tipo Fonte-Y, com o objetivo de utilização em sistemas de geração distribuída de energia elétrica em redes de baixa tensão, operando como formador de rede (modo ilhado) ou seguidor de rede (conectado à rede elétrica). Além disso, há a proposição de estratégias de controle, fundamentadas pela Teoria de Potência Conservativa, que viabilizam a operação de tais conversores como prestadores de serviços ancilares. Nesse contexto, esse trabalho contribui com o estado do conhecimento na temática de conversores empregando redes de impedância magneticamente acopladas da classe Fonte-Y, preenchendo lacunas ainda existentes na literatura, relacionadas com a determinação e o aprimoramento de limitações operacionais, metodologias de projeto do estágio de potência, metodologia de projeto dos controladores, e ainda a exploração considerando características operacionais relacionadas com o provimento de serviços ainda não demonstradas para esta topologia na literatura. Resultados experimentais e de simulação são apresentados para validação da análise teórica e das estratégias de controle propostas.

Palavras-chave: Conversores CC-CA Multifuncionais, Energias Renováveis, Inversor Fonte-Y, Inversor Quasi-Fonte-Y, Microgeração Distribuída, Redes de Impedância, Serviços Ancilares.

ABSTRACT

This work presents the analysis, design, and development of converters based on the use of the Y-Source impedance network, with the objective of using distributed generation systems of electric energy in low voltage grids, operating as a grid-forming inverter (island mode) or grid-following inverter (connected to the electricity grid). Furthermore, there is a proposition of control strategies, based on the Conservative Power Theory, which enables the operation of such converters as providers of ancillary services. In this context, this work contributes to the state of knowledge in the field of power electronics converters employing Y-source class magnetically coupled impedance networks, filling gaps and challenges that still exist in the literature, related to the performance and improvement of operational limitations, design methodologies of the power stage, controller design methodology, and even the exploration considering operational characteristics related to the provision of services not yet demonstrated for this topology in the literature. Experimental and simulation results are presented to validate the theoretical analysis and the proposed control strategies.

Keywords: Impedance source networks, Y-source inverter, Quasi-Y-source inverter, Multifunctional DC-AC converter, Ancillary Services, Distributed Microgeneration, Renewable Energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Configuração geral do conversor baseado em rede de impedância para conversão de energia.....	31
Figura 2 – Inversor Fonte-Z e circuitos equivalentes das etapas de operação. (a) Inversor trifásico Fonte-Z, (b) estado de shoot-through, (c) estado de non-shoot-through.....	32
Figura 3 – Topologias de conversores com redes de impedância. (a) Fonte Z bidirecional, (b) quasi-Fonte Z, (c) Fonte Z embarcado, (d) T (Trans) Fonte Z, (e) Fonte Γ , (f) Fonte Y	34
Figura 4 – Ganho de tensão ideal das redes de impedância em função do período de shoot-through considerando aplicação em conversor CC-CC/CC-CA.	36
Figura 5 – Inversor Fonte-Y.....	37
Figura 6 – Técnicas de modulação SPWM modificadas aplicadas a inversores rede de impedância: (a) Simple Boost Control, (b) Maximum Boost Control, (c) Maximum Constant Boost Control.....	38
Figura 7 - Topologias dos conversores que fazem a conexão do GD com a rede elétrica: (a) sistema tradicional de um estágio, (b) sistema de dois estágios, (c) sistema de um estágio empregando rede de impedância.	41
Figura 8 – Controle da tensão do link CC: (a) direto, (b) indireto através da tensão do capacitor, (c) indireto através da estimação de v_{Link}	43
Figura 9 - Esquema elétrico geral de controle para a conexão entre o gerador distribuído e a rede elétrica/carga utilizando conversor rede de impedância. ..	44
Figura 10 – Possível estratégia de controle para sistemas de GD com de redes de impedância utilizando referencial síncrono dq : (a) modo conectado à rede elétrica, (b) modo ilhado.....	48
Figura 11 – Possíveis estratégias de controle para sistemas de GD com conversores de redes de impedância utilizando referencial estacionário abc: (a) modo conectado à rede elétrica, (b) modo ilhado.	49
Figura 12 – Conversor Fonte Y e etapas de operação: (a) Diagrama esquemático do conversor CC-CA Fonte-Y simplificado para a modelagem do lado CC, (b) Estado de shoot-through,(c) Estado de non-shoot-through.....	54
Figura 13 - Formas de onda características do conversor CC-CA Y Fonte-Y simplificado para a modelagem do lado CC.	55
Figura 14 - Circuito equivalente do conversor CC-CA Fonte Y durante o estado de shoot-through.	57
Figura 15 - Circuito equivalente do conversor CC-CA Fonte Y durante o estado de non-shoot-through.	59
Figura 16 - Modelo de pequenos sinais do conversor CC-CA Fonte-Y.....	67
Figura 17 – Formas de onda de corrente e tensão nos elementos da rede de impedância Fonte-Y.	68
Figura 18 – Conversor genérico Fonte-Y com snubber do tipo L-C-D.	73

Figura 19 - Configuração do inversor Fonte-Y proposto para aplicações em geração distribuída.....	76
Figura 20 – Carga Z_L responsável pelo consumo de corrente harmônica e reativa.	76
Figura 21 - Curva característica de condução IC vs VCE do transistor IGBT IRG4PF50WD.	81
Figura 22 - Curva característica de condução IF vs VF do diodo intrínseco ao IGBT IRG4PF50WD.	81
Figura 23 - Curva característica de condução IF vs VF do diodo GC2X5MPS12.	82
Figura 24 - Curva característica de perda de energia do semicondutor IRG4PF50WD IGBT.	85
Figura 25 - Curvas de densidade de perda do material do núcleo MMTS60T13325 em função da densidade de potência de fluxo.....	88
Figura 26 – Snubber RC utilizado no diodo.....	89
Figura 27 - Perdas no Snubber RC do diodo em função da variação de tensão no link CC.....	90
Figura 28 - Curvas características do inversor Fonte-Y com o circuito ideal (sem considerar a contabilização de perdas) e não ideal (contabilizando as perdas em todos os elementos).	92
Figura 29 - Modelo linear (circuito médio) do lado CC do inversor Fonte-Y implementado em Simulink.....	95
Figura 30 - Resposta em frequência do modelo de pequenos sinais de $GvINvC(s)$, $GvINiLM(s)$ e $GvINiN1(s)$ e da simulação do circuito médio do lado CC do inversor Fonte-Y.	95
Figura 31 - Resposta em frequência do modelo de pequenos sinais de $Gd0vC(s)$, $Gd0iLM(s)$ e $Gd0iN1(s)$ e da simulação do circuito médio do lado CC do inversor Fonte-Y.....	96
Figura 32 - Resposta em frequência do modelo de pequenos sinais de $GiloadvC(s)$, $GiloadiLM(s)$ e $GiloadiN1(s)$ e da simulação do circuito médio do lado CC do inversor Fonte-Y.....	96
Figura 33 - Resposta dinâmica ao degrau das funções de transferência $Gd0vC(s)$, $Gd0iLM(s)$ e $Gd0iN1(s)$ e do circuito chaveado.....	97
Figura 34 - Resposta dinâmica ao degrau das funções de transferência $GvINvC(s)$, $GvINiLM(s)$ e $GvINiN1(s)$ e do circuito chaveado.....	98
Figura 35 - Resposta dinâmica ao degrau das funções de transferência $GiloadvC(s)$, $GiloadiLM(s)$ e $GiloadiN1(s)$ e do circuito chaveado.....	98
Figura 36 - Diagramas de polos e zeros para $Gd0vC(s)$ com variações dos parâmetros: (a) LM , (b) C , (c) $D0$ e (d) RL_Base	100
Figura 37 - Circuito equivalente monofásico do YSI: (a) no modo seguidor de rede e (b) formador de rede.	101
Figura 38 – Procedimento para escolha do fator K	107

Figura 39 - Tensão de link CC mínima exigida para que o sistema opere adequadamente.	108
Figura 40 – Curvas de GV (a), $d0$ (b), η (c) e $vD - max$ (d) do conversor em função da variação de vIN e de K	109
Figura 41 - Configuração conversor Fonte-Y proposto para aplicações em GD.	113
Figura 42 – Circuito equivalente do conversor proposto.	114
Figura 43 – Modulador por largura de pulso: (a) portadora para o controle CA, (b) portadora para o controle CC.....	115
Figura 44 - Controle do inversor Fonte-Y operando no modo formador de rede.	118
Figura 45 – Diagrama de blocos do controle CC no modo formador de rede.	119
Figura 46 - Resposta em frequência da função de transferência em malha aberta (do sistema compensado e não compensado) do controle CC no modo formador de rede.	119
Figura 47 - Diagrama de blocos do controle CA no modo formador de rede.	120
Figura 48 – Diagrama de blocos da malha interna do controle CA no modo formador de rede.....	121
Figura 49 - Resposta em frequência da função de transferência em malha aberta do laço interno (do sistema compensado e não compensado) do controle CA no modo formador de rede.....	122
Figura 50 - Diagrama de blocos do controle da tensão do lado CA no modo formador de rede.....	123
Figura 51 - Resposta em frequência da função de transferência em malha aberta do laço externo (do sistema compensado e não compensado) do controle CA no modo formador de rede.....	124
Figura 52 - Controle do inversor Fonte-Y operando no modo seguidor de rede.	125
Figura 53 - Diagrama de blocos do controle CA no modo seguidor de rede.	126
Figura 54 - Resposta em frequência da função de transferência em malha aberta (do sistema compensado e não compensado) do controle CA no modo seguidor de rede.	127
Figura 55 - Organização dos componentes do protótipo. Legenda: (1) Sensores Hall de corrente e tensão. (2) Placa de condicionamento de sinais. (3) Processador digital de sinais. (4) Placa level shifter e lógica OR. (5) Drivers. (6) Fonte CC. (7) Rede de impedância Fonte-Y. (8) Ponte inversora trifásica. (9) Filtro LC. (10) Resistores limitadores de corrente. (11), (12), (14) e (16) Seccionadores. (13) Rede elétrica trifásica. (15) Carga linear. (17) Carga não linear.	130
Figura 56 - Protótipo construído. (1) Ponte inversora trifásica. (2) Rede de impedância Fonte-Y. (3) Sensores de tensão. (4) Placa de condicionamento de sinais. (5) DSP. (6) Disjuntores. (7) Capacitores CA. (8) Sensores de corrente. (9) Snubber LCD.	131
Figura 57 - Vista da área de trabalho.	131
Figura 58 – LaunchPad F28379D.	132

Figura 59 - Resultado experimental do conversor, operando como formador de rede, durante um degrau de carga resistiva.	133
Figura 60 - Resultado de simulação do conversor, operando como formador de rede, durante um degrau de carga resistiva.	134
Figura 61 - Resultado experimental do conversor, operando como formador de rede, durante um degrau de carga resistiva.	134
Figura 62 - Resultado de simulação do conversor, operando como formador de rede, durante um degrau de carga resistiva.	135
Figura 63 - Detalhes das formas de onda de tensão e corrente para o resultado experimental do conversor, operando como formador de rede.	135
Figura 64 – Detalhes das formas de onda de tensão e corrente durante simulação do conversor, operando como formador de rede.	136
Figura 65 - Resultado experimental do conversor, operando como formador de rede, durante um degrau de carga não linear.	137
Figura 66 - Resultado de simulação do conversor, operando como formador de rede, durante um degrau de carga não linear.	137
Figura 67 - Resultado experimental do conversor, operando como formador de rede, durante um degrau de carga não linear.	138
Figura 68 - Resultado de simulação do conversor, operando como formador de rede, durante um degrau de carga não linear.	138
Figura 69 - Resultado experimental do conversor, operando como formador de rede, durante um degrau de vIN	139
Figura 70 - Simulação do conversor, operando como formador de rede, durante um degrau de vIN	140
Figura 71 - Resultado experimental do conversor, operando como formador de rede, durante um degrau de vIN	140
Figura 72 - Simulação do conversor, operando como formador de rede, durante um degrau de vIN	141
Figura 73 - Resultado experimental do conversor, operando como seguidor de rede, durante um degrau de potência ativa.	142
Figura 74 - Resultado de simulação do conversor, operando como seguidor de rede, durante um degrau de potência ativa.	142
Figura 75 - Resultado experimental do conversor, operando como seguidor de rede, durante um degrau de potência ativa.	143
Figura 76 - Resultado de simulação do conversor, operando como seguidor de rede, durante um degrau de potência ativa.	143
Figura 77 - Resultado experimental do conversor, operando como seguidor de rede, durante um degrau de potência ativa.	144
Figura 78 - Resultado de simulação do conversor, operando como seguidor de rede, durante um degrau de potência ativa.	144
Figura 79 - Resultado experimental do conversor, operando como seguidor de rede, durante um degrau de potência ativa.	145

Figura 80 - Resultado de simulação do conversor, operando como seguidor de rede, durante um degrau de potência ativa.....	145
Figura 81 - Resultado experimental do conversor, operando como seguidor de rede, durante um degrau de v_{IN}	146
Figura 82 - Resultado de simulação do conversor, operando como seguidor de rede, durante um degrau de v_{IN}	147
Figura 83 - Resultado experimental do conversor, operando como seguidor de rede, durante um degrau de v_{IN}	147
Figura 84 - Resultado de simulação do conversor, operando como seguidor de rede, durante um degrau de v_{IN}	148
Figura 85 - Resultado experimental do conversor, operando como seguidor de rede, durante um degrau de v_{IN}	148
Figura 86 - Resultado de simulação do conversor, operando como seguidor de rede, durante um degrau de v_{IN}	149
Figura 87 - Resultado experimental do conversor operando como seguidor de rede e realizando a compensação da corrente <i>void</i> da carga Z_L conectada ao PAC.....	150
Figura 88 - Resultado de simulação do conversor operando como seguidor de rede e realizando a compensação da corrente void da carga Z_L conectada ao PAC.	151
Figura 89 - Resultado experimental do conversor operando como seguidor de rede e realizando a compensação da corrente void da carga Z_L conectada ao PAC.	151
Figura 90 - Resultado de simulação do conversor operando como seguidor de rede e realizando a compensação da corrente void da carga Z_L conectada ao PAC.....	152
Figura 91 - Resultado experimental do conversor operando como seguidor de rede e realizando a compensação da corrente reativa da carga Z_L conectada ao PAC.....	153
Figura 92 - Resultado de simulação do conversor operando como seguidor de rede e realizando a compensação da corrente reativa da carga Z_L conectada ao PAC.....	153
Figura 93 - Resultado experimental do conversor operando como seguidor de rede e realizando a compensação da corrente reativa da carga Z_L conectada ao PAC.....	154
Figura 94 - Resultado de simulação do conversor operando como seguidor de rede e realizando a compensação da corrente reativa da carga Z_L conectada ao PAC.....	154
Figura 95 - Resultado experimental do conversor operando como seguidor de rede e realizando a compensação total dos distúrbios gerados pela carga Z_L conectada ao PAC.	155
Figura 96 - Resultado de simulação do conversor operando como seguidor de rede e realizando a compensação total dos distúrbios gerados pela carga Z_L conectada ao PAC.	156
Figura 97 - Resultado experimental do conversor operando como seguidor de	

rede e realizando a compensação total dos distúrbios gerados pela carga Z_L conectada ao PAC.	156
Figura 98 - Resultado de simulação do conversor operando como seguidor de rede e realizando a compensação total dos distúrbios gerados pela carga Z_L conectada ao PAC.	157
Figura 99 - Resultado de simulação do conversor durante variação de v_{Link} para o Cenário 1.....	159
Figura 100 - Capacidade máxima do conversor operando como seguidor de rede para a compensação de corrente reativa e harmônicas diante a variação de v_{AC} (a) e de L_f (b).....	160
Figura 101 – Resultado experimental do conversor durante variação de v_{Link} para o Cenário 2.....	161
Figura 102 - Resultado de simulação do conversor durante variação de v_{Link} para o Cenário 2.....	161
Figura 103 - Resultado experimental do conversor durante variação de v_{AC} para o Cenário 2.....	162
Figura 104 - Resultado de simulação do conversor durante variação de v_{AC} para o Cenário 2.....	163
Figura 105 - DHT e fatores da CPT para a corrente injetada na rede elétrica para diferentes valores de tensão de v_{Link} (a) e de v_{AC} (b).	164
Figura 106 - Curvas de rendimento experimental e do modelo do inversor Fonte-Y: (a) $GV = 4,167$ e (b) $GV = 2$	165
Figura 107 – Estimativa de distribuição de perdas do conversor com $GV = 2$ e $POUT = 500 W$: (a) perdas por condução, chaveamento e no <i>snubber</i> RC, (b) perdas entre os componentes.	165
Figura 108 - Estimativa de distribuição de perdas do conversor com $GV = 4,167$ e $POUT = 500W$: (a) perdas por condução, chaveamento e no <i>snubber</i> RC, (b) perdas entre os componentes.	166

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Expressões de ganho de tensão e os componentes de topologias de rede de impedância.....	35
Tabela 2 – Resumo de diversas estratégias de controle e topologias de redes de impedância aplicadas a sistemas que utilizam GD.	46
Tabela 3 - Amplitude e ângulo de fase de cada parcela de corrente da carga Z_L	77
Tabela 4 - Parâmetros nominais do conversor.....	79
Tabela 5 - Modelos e valores dos componentes utilizados.	80
Tabela 6 - Elementos parasitas dos componentes do inversor Fonte-Y.	83
Tabela 7 – Parâmetros utilizados para validação do modelo CC do inversor Fonte-Y.	93
Tabela 8 - Comparação dos valores de corrente e tensão encontrados no modelo com os de simulação no PSIM.	94
Tabela 9 – Valores do fator TM (Técnica de Modulação).....	104
Tabela 10 - Ganho dos transdutores.	116
Tabela 11 - Coeficientes discretizados do controlador P+Ressonante.	124
Tabela 12 - Coeficientes discretizados do controlador P+Ressonante.	127
Tabela 13 - Resumo dos índices da CPT para cada tipo de compensação... ..	158
Tabela 14 - Resultados de DHT e fatores CPT para diferentes valores de v_{Link}	161
Tabela 15 - Resultados de DHT e fatores CPT para diferentes valores de v_{AC}	163

LISTA DE SIMBOLOS

A_c	Área de seção transversal do núcleo
B	Fator de ganho da rede de impedância
B_{mag}	Densidade de fluxo magnético
C	Capacitância da rede de impedância
C_f	Capacitância do filtro passa-baixa de saída do inversor Fonte-Y
C_{snb}	Capacitância do <i>snubber</i>
C_{PK}	Valor de pico da portadora
D	Diodo da rede de impedância
d_0	Razão cíclica de <i>shoot-through</i>
E_{total}	Energia total dissipada durante o chaveamento do IGBT
E_{on}	Energia dissipada durante a entrada em condução do IGBT
E_{off}	Energia dissipada durante a entrada em bloqueio do IGBT
E_{rr}	Energia dissipada devido a recuperação reversa do diodo intrínseco ao IGBT
f_c	Frequência de cruzamento por zero dB
f_g	Frequência da rede elétrica
f_{sw}	Frequência de chaveamento
G_V	Ganho de Tensão da rede de impedância
H_{v_c}	Ganho do transdutor de tensão do capacitor C
$H_{i_{L_f}}$	Ganho do transdutor de corrente do indutor L_f
$H_{v_{C_f}}$	Ganho do transdutor de tensão do capacitor C_f
H_{v_g}	Ganho do transdutor de tensão da rede elétrica
H_{Z_L}	Ganho do transdutor de corrente da carga Z_L
i_{C_f}	Corrente instantânea no capacitor C_f
i_{D-max}	Corrente máxima no diodo D
i_{D-ef}	Corrente eficaz do diodo D
i_{L_f}	Corrente instantânea no indutor L_f

i_{L_f-a}, i_{L_f-r} e i_{L_fk}	Corrente instantânea ativa, reativa e harmônica no indutor L_f
i_{L_f-a}, i_{L_f-r} e i_{L_fk}	Corrente de pico ativa, reativa e das k – ésimas componentes harmônicas no indutor L_f
\hat{I}_{L_f}	Corrente máxima no indutor L_f
i_{LM}	Corrente instantânea no indutor de magnetização
I_{LM}	Corrente média no indutor de magnetização
i_{N_1}, i_{N_2} e i_{N_3}	Correntes instantâneas nos enrolamentos N_1, N_2 e N_3 do indutor
i_{N_1-ef}, i_{N_2-ef} e i_{N_3-ef}	Correntes eficazes nos enrolamentos N_1, N_2 e N_3 do indutor
i_{N_1-ST}, i_{N_2-ST} e i_{N_3-ST}	Correntes nos enrolamentos N_1, N_2 e N_3 do indutor durante o período de <i>shoot-through</i>
i_{N_1-NST}, i_{N_2-NST} e i_{N_3-NST}	Correntes nos enrolamentos N_1, N_2 e N_3 do indutor durante o período de <i>non-shoot-through</i>
I_{N_1}, I_{N_2} e I_{N_3}	Correntes médias nos enrolamentos N_1, N_2 e N_3 do indutor
i_{SW-max}	Corrente máxima no interruptor ativo
i_{SW-ef}	Corrente eficaz no interruptor ativo
i_{Z_L}	Corrente instantânea na carga Z_L
i_{Z_L-a}, i_{Z_L-r} e i_{Z_Lk}	Corrente instantânea ativa, reativa e harmônica na carga Z_L
I_{Z_L-a}, I_{Z_L-r} e I_{Z_Lk}	Corrente de pico ativa, reativa e das k – ésimas componentes harmônicas na carga Z_L
\hat{I}_{Z_L}	Valor máximo da corrente na carga Z_L
K	Fator de acoplamento da rede de impedância
K_I	Ganho integral do controlador PI
K_{Ih}	Ganho integral de cada termo ressonante do controlador P+Ress
K_P	Ganho proporcional do controlador PI
L_f	Indutância do filtro passa-baixa de saída do inversor
Fonte-Y	
L_M	Indutância de magnetização

l_m	Comprimento médio do caminho magnético do núcleo
M	Índice de modulação
N_1, N_2, N_3	Número de enrolamentos do indutor acoplado
η	Eficiência do conversor YSI
P_{IN}	Potência de entrada do conversor YSI
P_{OUT}	Potência de saída do conversor YSI
$P_{INV\ cond}$	Perdas totais em condução da ponte inversora
$P_{INV\ cond-st}$	Perdas em condução da ponte inversora durante o período de <i>shoot-through</i>
$P_{INV\ cond-nst}$	Perdas em condução da ponte inversora durante o período de <i>non-shoot-through</i>
$P_{T\ cond-nst}$	Perdas em condução nos transistores da ponte inversora durante o período de <i>non-shoot-through</i>
$P_{D\ cond-nst}$	Perdas em condução nos diodos da ponte inversora durante o período de <i>non-shoot-through</i>
$P_{INV\ chav}$	Perdas totais de chaveamento da ponte inversora
$P_{INV\ chav-ST}$	Perdas de chaveamento da ponte inversora durante o estado de <i>shoot-through</i>
$P_{INV\ chav-NST}$	Perdas de chaveamento da ponte inversora durante o estado de <i>non-shoot-through</i>
$P_{núcleo}$	Perdas no núcleo do indutor acoplado
P_{CU}	Perdas ôhmica nos enrolamentos do indutor acoplado
$P_{D\ cond}$	Perdas em condução no diodo
$P_{D\ chav}$	Perdas de chaveamento no diodo
$P_{Snubber\ RC}$	Perdas no <i>snubber</i> RC do diodo
P_{RC}	Perdas no capacitor
P_{Loss}	Perdas totais no conversor YSI
ph_m	Margem de fase
ρ_L	Densidade de perda (W/cm^3)
Q_{rr}	Carga associada a recuperação reversa do diodo
R_C	Resistência série do capacitor

r_{CE}	Resistência série em condução do IGBT
R_D	Resistência série do diodo
R_f	Resistência associada ao indutor L_f
r_f	Resistência série do diodo intrínseco ao IGBT
R_{L1}, R_{L2} e R_{L3} indutor acoplado	Resistências série dos enrolamentos N_1, N_2 e N_3 do indutor acoplado
R_{L_BASE}	Resistência base para determinar as resistências série equivalente dos enrolamentos do indutor acoplado
R_{snb}	Resistência do snubber
R_{SW}	Resistência série do interruptor ativo
SW	Interruptor ativo da rede de impedância
T	Período de chaveamento
\hat{v}_{AC}	Tensão de pico de fase
v_C	Tensão instantânea do capacitor da rede de impedância
V_C	Tensão média do capacitor da rede de impedância
v_{CE0} inversora	Queda de tensão coletor-emissor no IGBT da ponte
v_D	Tensão no diodo da rede de impedância
v_{D-max}	Tensão máxima reversa no diodo D
v_{f0}	Queda de tensão do diodo intrínseco ao IGBT
V_{linha}	Tensão de linha eficaz da rede elétrica
v_{IN}	Tensão de entrada da rede de impedância
v_{LM}	Tensão no indutor de magnetização
v_{N1-ST}, v_{N2-ST} e v_{N3-ST}	Tensão nos enrolamentos N_1, N_2 e N_3 do indutor durante o período de <i>shoot-through</i>
v_{N1-NST}, v_{N2-NST} e v_{N3-NST}	Tensão nos enrolamentos N_1, N_2 e N_3 do indutor durante o período de <i>non-shoot-through</i>
v_{Link}	Tensão do <i>link</i> CC
\hat{v}_{Link}	Tensão de pico do <i>link</i> CC
v_{SW-max}	Tensão máxima no interruptor ativo
V_{rr} reversa	Tensão do diodo no momento da recuperação reversa

Z_L	Carga trifásica responsável pelo consumo de corrente harmônica e reativa
λ	Fator de potência
λ_D, λ_Q e λ_U	Fator de distorção, fator de reatividade e fator de assimetria

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	23
1.1	Relevância do tema.....	23
1.2	Principais contribuições.....	27
1.3	Organização do documento	28
2	REDES DE IMPEDÂNCIA E SISTEMA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA.....	31
2.1	Redes de Impedância Fonte-Z e demais topologias	31
2.2	Técnicas de Modulação PWM modificada para inversores rede de impedância.....	36
2.2.1	Simple Boost Control (SBC)	38
2.2.2	Maximum Boost Control (MBC)	39
2.2.3	Maximum Constant Boost Control (MCBC)	39
2.3	Topologias de conversores de potência responsáveis pela conexão entre os geradores distribuídos com a rede elétrica/carga	40
2.4	Controle de conversores empregando redes de impedância aplicado a sistemas de geração distribuída	42
2.5	Emprego de multifuncionalidades em sistemas de geração distribuída	49
2.6	Considerações finais.....	50
3	MODELAGEM CC DO INVERSOR DO FONTE-Y	53
3.1	Análise do circuito	53
3.2	Modelagem CC do conversor CC-CA Fonte-Y considerando dispositivos não ideais.....	56
3.2.1	Análise durante o estado de shoot-through	57
3.2.2	Análise durante o estado de non-shoot-through	58
3.2.3	Representação do Modelo em Espaço de Estados	61
3.3	Metodologia para dimensionamento dos indutores acoplados, capacitor e semicondutores.....	67
3.3.1	Especificação do diodo D	70
3.3.2	Especificação do Interruptor SW	70
3.3.3	Projeto do capacitor C	71
3.3.4	Projeto dos indutores acoplados.....	71
3.4	Efeito da dispersão de fluxo magnético nos indutores acoplados.....	72
3.5	Considerações finais.....	73
4	INVERSOR FONTE-Y: ANÁLISE DE PERDAS, RENDIMENTO E DESEMPENHO.....	75
4.1	Considerações para o projeto do conversor.....	75

4.2	Obtenção dos parâmetros elétricos que modelam as perdas em condução	80
4.2.1	IGBT IRG4PF50WD	80
4.2.2	Diodo GC2X5MPS12.....	82
4.3	Análise de perdas e rendimento.....	83
4.3.1	Perdas em condução nos interruptores da ponte inversora trifásica	83
4.3.2	Perdas em condução na ponte inversora durante o período de non shoot-through.....	84
4.3.3	Perdas em condução na ponte inversora durante o período de shoot-through.....	84
4.3.4	Perdas de chaveamento na ponte inversora trifásica	84
4.3.5	Perdas no núcleo dos indutores acoplados	86
4.3.6	Perdas ôhmicas nos enrolamentos dos indutores acoplados.....	88
4.3.7	Perdas em condução no diodo	88
4.3.8	Perdas de chaveamento no diodo	89
4.3.9	Perdas no Snubber RC do diodo	89
4.3.10	Perdas em condução associada ao capacitor	90
4.3.11	Cálculo do rendimento do conversor	90
4.4	Curvas características do inversor Fonte-Y	91
4.5	Validação do modelo CC do inversor Fonte-Y.....	93
4.5.1	Validação do modelo em regime permanente	93
4.5.2	Validação do modelo de pequenos sinais: Análise no domínio da frequência.....	94
4.5.3	Validação do modelo de pequenos sinais: Análise do domínio do tempo	97
4.5.4	Análise com variação paramétrica.....	99
4.6	Análise da tensão <i>vLink</i> mínima para operação adequada do sistema.....	101
4.6.1	Tensão mínima de link CC para o modo seguidor de rede.....	103
4.6.2	Tensão mínima de link CC para o modo formador de rede	105
4.7	Determinação do fator <i>K</i> da rede de impedância Fonte-Y: Diretriz ao projetista	105
4.8	Considerações finais	110
5	MODELAGEM CA E CONTROLE DO INVERSOR FONTE-Y.....	113
5.1	Modelagem do inversor Fonte-Y	113
5.2	Modelagem do PWM.....	115

5.3	Transdutores	116
5.4	Realização de compensadores discretos	117
5.5	Controle no modo formador de rede	117
5.5.1	Controle CC	118
5.5.2	Controle CA	120
5.6	Controle no modo seguidor de rede	124
5.6.1	Controle CA	126
5.7	Considerações finais	128
6	RESULTADOS	129
6.1	Descrição do hardware utilizado	129
6.2	Resultados experimentais e de simulação	132
6.2.1	Formador de Rede - Degrau de carga linear	133
6.2.2	Formador de Rede - Degrau de carga não linear	136
6.2.3	Formador de Rede - Variação de v_{IN}	139
6.2.4	Seguidor de Rede - Degrau de Potência Ativa	141
6.2.5	Seguidor de Rede - Variação de v_{IN}	146
6.2.6	Seguidor de Rede – Compensação de corrente harmônica	149
6.2.7	Seguidor de Rede – Compensação de corrente reativa	152
6.2.8	Seguidor de Rede – Compensação total dos distúrbios da carga	155
6.2.9	Resultados referentes as limitações operacionais do conversor em função da tensão mínima de link CC	158
6.3	Resultados de eficiência e perdas do conversor	164
6.4	Considerações finais	166
7	CONCLUSÃO	169
7.1	Perspectivas de trabalhos futuros	172
	BIBLIOGRAFIA	174
	APÊNDICE A – TEORIA DA POTÊNCIA CONSERVATIVA	181

1 INTRODUÇÃO

1.1 Relevância do tema

O setor elétrico atual vem sofrendo grandes transformações, dentre as quais está o aumento da participação das pequenas e médias unidades de geração de energia renovável em detrimento às convencionais grandes unidades, como por exemplo as de fonte hidráulica. A geração distribuída (GD) é uma modalidade caracterizada pela utilização de geradores de pequena e média potência espalhados pela rede para fornecer energia elétrica mais próxima aos locais de consumo. As fontes empregadas em sistemas de GD incluem energia eólica, fotovoltaica, células a combustível, entre outras. (KATARAY, NITESH, *et al.*, 2023) (YANG, YANG, *et al.*, 2023).

Existem diversos pontos envolvendo as fontes de geração distribuída que despertam grandes interesses. Devido ao contínuo aumento da demanda energética é interessante ampliar os tipos de fonte para a produção de energia, o que agrega maior flexibilidade ao sistema energético, que passa a contar com várias formas de geração (AHL, YARIME, *et al.*, 2019).

Nesse novo cenário é possível consumidores produzirem a energia que consomem, podendo ainda vender o excedente ao sistema de energia. Com isso é esperado maior número de produtores independentes no mercado, que por sua vez estimulará a concorrência e juntamente com um aumento da capacidade de produção, resultará em preços reduzidos.

Outra razão para a ampliar a utilização de novas fontes de energia é devido a fatores ambientais. Vários tipos convencionais de geração de energia elétrica resultam na emissão de dióxido de carbono, que contribui para o aquecimento global. Este cenário fomentou políticas que incentivam a transição da geração de energia convencional baseada em combustíveis fósseis para fontes de energia renováveis. Usinas nucleares e grandes instalações hidrelétricas não aumentam a emissão de dióxido de carbono, mas impactam o meio ambiente de maneira diferente (AHL, YARIME, *et al.*, 2019).

A energia proveniente dos painéis fotovoltaicos e das células a combustível (CaC) tem como característica o fornecimento de tensão contínua em seus terminais. Para a utilização da energia disponível em ambos é

necessário o uso de conversores de potência como interface, seja para a conexão com a rede elétrica ou para alimentação de cargas CA isoladas (ilhadas) (FARRET e SIMOES, 2006). Esses conversores de potência devem idealmente cumprir algumas funções:

- Efetuar a conversão da tensão contínua em tensão alternada. Se o conversor operar de forma ilhada, esta tensão de saída CA deve ter o mesmo desempenho e parâmetros da rede elétrica, ou seja, ter frequência, amplitude e forma senoidal estáveis. Se operar de forma conectada à rede elétrica, deve pelo menos injetar corrente em fase com a tensão da rede, ou seja, fornecer potência ativa.
- Realizar a elevação de tensão, caso a tensão do gerador distribuído seja menor que valor de pico de tensão CA a ser sintetizada pelo conversor.
- Para uso de módulos fotovoltaicos, devem garantir a extração da máxima potência independentemente das variações das condições atmosféricas e de carga através da aplicação de métodos conhecidos como seguidor do ponto de potência máxima ou simplesmente MPPT (*Maximum Power Point Tracking*).

Tradicionalmente, inversores fonte de tensão (VSIs) ou inversores fonte de corrente (CSIs) são os conversores de potência usados como interfaces de potência entre as fontes de energia renováveis e rede elétrica/carga CA. No entanto, uma topologia de conversor denominada rede de impedância foi introduzida para o mesmo propósito no início dos anos 2000 (PENG, 2002), trazendo características operacionais inovadoras que superam algumas limitações dos VSIs e CSIs convencionais. Essa nova família de conversores baseados em redes de impedância vem crescendo ao longo das últimas duas décadas, e, oferecendo diversas vantagens para uma variedade de aplicações, como em máquinas elétricas (GUO, LIU, *et al.*, 2023) (GHAHDERIJANI e DEHKORDI, 2021), (NAIR, JOHNY e MATHEW, 2020), inversores multiníveis (RAFIQ, ULASYAR, *et al.*, 2022), (YE, ZHANG, *et al.*, 2023) e UPS (CHITRA, PRAKASH, *et al.*, 2021) (KUMLE, FATHI e INANLOO, 2015). Em particular, os inversores redes de impedância podem atuar como elevadores ou abaixadores de tensão (comportamento *buck-boost*), sendo apropriados também em aplicações que utilizam geradores distribuídos, fazendo com que o sistema

possa lidar de maneira adequada a ampla faixa de variação da tensão do dispositivo.

Basicamente, o inversor baseado em rede de impedância opera como um sistema de um único estágio, acoplando a fonte primária CC (gerador distribuído) à carga/rede elétrica. Caso a tensão fornecida pelo gerador distribuído seja alta o suficiente, a rede de impedância atuará como um filtro de entrada adicional e os mesmos métodos de modulação do inversor VSI tradicional podem ser utilizados. Porém, quando há a necessidade de elevação da tensão, a rede de impedância opera conduzindo simultaneamente os interruptores de um mesmo braço do inversor, denominado estado de *shoot-through*, de forma a armazenar energia nos elementos indutivos e capacitivos que a constituem, permitindo dessa forma a elevação de tensão.

Os trabalhos de (JUNG, DAI e KEYHANI, 2005), (HUANG, SHEN, *et al.*, 2006), (XU, ZHANG, *et al.*, 2006) e (FARHANGI e FARHANGI, 2006) foram as primeiras publicações na literatura que empregaram redes de impedância com aplicação a sistemas de geração distribuída. Porém, os primeiros trabalhos que utilizaram redes de impedância e discutiram o controle aplicado a ambos os modos de operação (conectado à rede elétrica e ilhado) foram (VILATHGAMUWA, GAJANAYAKE e LOH, 2009), (LI, PENG, *et al.*, 2010) e (LI, JIANG, *et al.*, 2013).

Ademais, desde a publicação (PENG, 2002), que propôs a primeira topologia, denominada Fonte-Z, diversas outras foram propostas com o objetivo de melhorar alguns requisitos do conversor como: aumentar o ganho de tensão, reduzir o número de componentes, fornecer corrente contínua de entrada, entre outros. Abrangentes revisões bibliográficas de diferentes topologias são apresentadas em (REDDIVARI e JENA, 2022) e (SIWAKOTI, PENG e BLAABJERG, 2015). Na literatura, algumas dessas topologias também foram aplicadas em sistemas de geração distribuída, principalmente a Fonte Z e Quasi-Fonte Z.

Uma classe de topologias que vem sendo recentemente objeto de estudo em diversos trabalhos são as redes de impedância magneticamente acopladas, que utilizam transformadores ou indutores acoplados em sua estrutura (YADAV, CHANDRA, *et al.*, 2022). Assim, essa classe pode fazer uso da relação entre o

número de espiras dos transformadores ou indutores como outra forma de contribuir na obtenção do ganho.

Dentre as topologias magneticamente acopladas, a denominada Fonte-Y, proposta por (SIWAKOTI, LOH, *et al.*, 2014), contém um núcleo com três enrolamentos acoplados e promove menores esforços de tensão e de corrente sobre os interruptores de potência para um mesmo ganho em relação às topologias de redes de impedância com acoplamento magnético tradicionais da literatura, como Trans Fonte-Z (STRZELECKI, ADAMOWICZ, *et al.*, 2009), (KUMAR e SHAILAJA, 2012) e (QIAN, PENG e CHA, 2011) e Fonte- Γ (LOH, LI e BLAABJERG, 2013). Devido a característica de fornecer alto ganho de tensão com baixo período de *shoot-through*, a rede de impedância Fonte-Y se torna uma interessante topologia para aplicações de geração distribuída, pois há um aumento do intervalo de tempo, dentro do período de modulação, para sintetização do sinal senoidal estabelecido como referência. Dessa forma, há a potencial redução da distorção harmônica total (DHT) do sinal sintetizado pelo conversor (MARTINS, 2017).

Apesar das vantagens expostas da rede de impedância Fonte-Y perante outras topologias, na aplicação de fontes renováveis de energia, como módulos fotovoltaicos e CaCs, é desejável pequena ondulação da corrente drenada pelo conversor (TIROLLI, 2022). Corrente descontínua na entrada, como a do Fonte-Y, pode fazer com que o rendimento desse tipo de GD seja pior, além de diminuir seu tempo de vida útil. Normalmente, como forma de mitigar esse problema são utilizados filtros junto a fonte de energia (ARANGO, RAMOS-PAJA, *et al.*, 2012).

São poucos os trabalhos encontrados na literatura que fizeram uso do inversor Fonte-Y (YSI) em aplicações de GD, como em (BADACHI e LAAD, 2021) e (CHEN e GAN, 2021). Ademais, os que fazem não apresentam resultados experimentais e não detalham ou não expõem com clareza a metodologia de projeto e/ou a estratégia de controle utilizada. Em (FARD, NAJMI e BABAEI, 2018), (RAN, WANG, *et al.*, 2017), (LIU, RAN, *et al.*, 2018) e (FOROUZESH, BAGHRAMIAN e SALAVATI, 2015) uma topologia derivada do Fonte-Y foi utilizada, denominada *Improved Y-Source Inverter (IYSI)*, que além de possuir os indutores acoplados, possui um indutor e dois capacitores a mais em sua estrutura. Porém, nenhum desses trabalhos realizou a análise de pequenos sinais do conversor, tampouco detalharam a estratégia de controle e a metodologia para

obtenção dos ganhos dos controladores empregados em malha fechada. Além disso, também não consideraram a operação com características multifuncionais para possibilidade de provimento de serviços ancilares se baseando em teoria de potência moderna, como a Teoria de Potência Conservativa.

Considerando as vantagens da rede de impedância Fonte-Y e dada as lacunas existentes no estado de conhecimento sobre essa topologia, até o presente momento (2023), especialmente na aplicação de geração distribuída, justifica-se um estudo mais aprofundado desse conversor. Por fim, aliadas às motivações e ao potencial de inovação previamente descritos, ainda, existem desafios operacionais de implementação que devem ser tratados, tais como:

- Proposição de metodologias para garantir estabilidade e resposta dinâmica adequada no controle em malha fechada, devido a característica de fase não mínima apresentada por conversores que empregam redes de impedância magneticamente acopladas;
- Proposição de metodologias para assegurar a execução de mais de uma função sobre um único conversor (elevação CC-CC, conversão CC-CA), por meio da mesma variável de controle, o que aumenta sua complexidade, sendo adotada nesse trabalho a estratégia de utilização de multimalhas de controle com estágios desacoplados;
- Proposição de mecanismos para a atenuação ou supressão dos elevados picos de tensão gerados durante a mudança de estado de *shoot-through* para *non-shoot-through* no *link* CC em consequência de indutâncias parasitas e de dispersão presentes no circuito.

1.2 Principais contribuições

Nesse contexto, esse trabalho contribui com o estado do conhecimento na temática de conversores empregando redes de impedância magneticamente acopladas da classe fonte-Y, aplicados em sistemas de geração distribuída, especialmente as que possuem como característica o fornecimento de tensão contínua em seus terminais, como painéis fotovoltaicos e células a combustível. O trabalho tem como objetivo preencher as lacunas e desafios ainda existentes na literatura para a viabilização de sua operação e, em resumo, as contribuições científicas dessa tese são as seguintes:

- Modelagem da rede de impedância Fonte-Y considerando as não idealidades dos componentes que a compõem, utilizando a técnica em espaços de estados;
- Metodologia para dimensionamento do estágio de potência da rede de impedância, baseado no comportamento de regime permanente da mesma;
- Metodologia de projeto dos controladores do lado CC e CA do conversor para o controle das correntes e tensões tanto no modo seguidor de rede, quanto no modo formador de rede;
- Exploração considerando características operacionais relacionadas ao emprego de multifuncionalidades ao conversor no modo seguidor de rede, com o provimento de serviços ancilares, ainda não demonstradas para esta topologia na literatura;
- Obtenção de expressões que determinam o valor de tensão de *link* CC mínimo necessário para que o conversor opere de forma adequada operando como seguidor e formador de rede;
- Procedimento para a escolha dos parâmetros de funcionamento do conversor de modo que diferentes requisitos de projeto (como atender a esforços de tensão e corrente em seus componentes e ainda apresentar o melhor rendimento possível) possam ser atendidos.

1.3 Organização do documento

A tese foi organizada em sete capítulos, como segue:

O capítulo 2 apresenta as principais características dos conversores redes de impedância, detalha o modo de operação e traz uma breve revisão de topologias existentes na literatura. Também é efetuada uma revisão bibliográfica dos circuitos de potência e topologias capazes de fornecer a interface entre a rede elétrica de energia e os geradores distribuídos de natureza CC, além das diversas técnicas de controle das redes de impedância aplicadas a sistemas de GD. Por fim, é discutido o emprego de multifuncionalidades aos conversores redes de impedância atuando no modo conectado à rede elétrica, permitindo o conversor desempenhar outras funções sistêmicas além de injetar potência ativa.

O capítulo 3 discute sobre etapas de operação e traz a modelagem CC do inversor rede de impedância Fonte-Y considerando perdas em condução em todos os elementos que o constituem. Utilizou-se a técnica de média de espaço de estados para se efetuar análise em pequenos sinais do conversor tomando como base as funções de transferência que caracterizam sua operação dinâmica. O capítulo também traz uma metodologia para dimensionamento dos elementos que compõem a rede de impedância, levando-se em consideração as principais formas de onda do conversor.

O capítulo 4 traz a metodologia realizada para a obtenção dos parâmetros elétricos que modelam as perdas dos componentes do inversor rede de impedância e na sequência são estimadas, por meio de equações, as perdas e a eficiência do mesmo. Também são efetuadas análises da resposta dinâmica do modelo desenvolvido, através da resposta no domínio da frequência e no domínio do tempo, confrontando o comportamento do circuito chaveado com o modelo médio. São mostradas as implicações resultantes de variações paramétricas dos componentes da rede de impedância, em questões relacionadas à complexidade de controle, estabilidade relativa e comportamento dinâmico. Destaca-se também a análise matemática realizada com a finalidade de encontrar expressões que determinam a tensão mínima de *link* CC de operação do conversor, de forma que o mesmo opere de forma satisfatória. Por fim, o capítulo traz uma metodologia que auxilia o projetista a escolher o valor do fator de acoplamento K adequado da rede de impedância de modo que diferentes requisitos de projeto possam ser atendidos.

O capítulo 5 apresenta a modelagem CA do conversor, estratégia de controle e metodologia de projeto dos controladores empregando o inversor rede de impedância Fonte-Y, aplicado a sistemas de geração distribuída, operando tanto como formador de rede (modo ilhado) ou como seguidor de rede (conectado à rede elétrica).

O capítulo 6 fornece detalhes da construção do protótipo e apresenta os resultados do YSI que permite a conexão de um gerador distribuído com uma carga ilhada ou com a rede elétrica de baixa tensão 127 V / 220 V. Foram obtidos resultados experimentais e de simulações no modo formador de rede alimentando cargas lineares e não-lineares, e no modo seguidor de rede

realizando a injeção de potência ativa e compensando, simultaneamente e seletivamente, os distúrbios na corrente causados por uma carga conectada ao PAC. Por fim, o capítulo apresenta os resultados experimentais de perdas e eficiência do conversor e os compara com os resultados teóricos estimados.

Finalmente, no capítulo 7 são discutidas as principais as conclusões obtidas da tese e as propostas para trabalhos futuros.

7 CONCLUSÃO

A utilização da energia proveniente de fontes renováveis tem aumentado significativamente nas últimas décadas, devido principalmente ao esgotamento e impacto ao meio ambiente causados pelas matrizes de geração baseadas no emprego de combustíveis fósseis, além do interesse em ampliar os tipos de fonte para a produção de energia, o que agrega maior flexibilidade ao sistema energético, que passa a contar com várias formas de geração.

A utilização de energia proveniente dos geradores distribuídos de forma eficiente não é possível sem uso da eletrônica de potência, que fornece a interface entre a fonte local com a carga ou rede elétrica. No caso específico dos painéis fotovoltaicos e das células a combustível, o circuito de potência de interface deve ser capaz de efetuar a conversão CC-CA e a elevação de tensão (se a tensão do GD for menor que a tensão da rede elétrica).

Considerando o número de estágios de conversão de energia, o circuito de potência pode ser classificado em dois tipos: conversor de estágio único e de dois estágios. No sistema de dois estágios, tradicional na literatura, é utilizado um conversor CC-CC para elevar a tensão fornecida pelo GD até um nível necessário para a entrada do conversor CC-CA. O emprego desse conversor elevador CC-CC, em geral, aumenta a complexidade do controle, diminui a eficiência e aumenta o custo do sistema.

Uma forma que vem sendo discutida na literatura, que também realiza a conexão entre os GD com carga ou rede elétrica, é a utilização de conversores empregando redes de impedância. Esse tipo de topologia de conversor permite que as ações de conversão relacionadas a elevação de tensão (CC-CC) e inversão (CC-CA) sejam efetuadas por uma única estrutura sem introduzir mais interruptores de potência controlados.

Apesar dos inversores empregando redes de impedância serem objeto de diversos estudos recentes e se mostrarem promissores em diversas aplicações, especificamente conversores empregando redes magneticamente acopladas do tipo Fonte-Y ainda apresentam desafios operacionais a serem resolvidos. A presença dos indutores magneticamente acoplados na rede de impedância introduz obstáculos para o dimensionamento e projeto de controle do conversor, devido à problemas de sobretensão (especialmente nos semicondutores)

ocasionadas pela presença de indutância de dispersão. Uma forma de mitigar esse problema, além claro de cuidados especiais na fabricação das PCBs e dos elementos magnéticos que integram esses circuitos, é a utilização de *snubbers* no *link* CC, como forma de suavizar os picos de tensão, apesar de existirem poucos trabalhos na literatura até o momento que discutem esse problema. Outra dificuldade encontrada é assegurar a execução de mais de uma função sobre um único conversor, por meio da mesma variável de controle, o que aumenta a complexidade de controle, sendo adotada nesse trabalho a estratégia de utilização de multimalhas de controle com estágios desacoplados.

Nesse contexto, esse trabalho contribui com o estado do conhecimento na temática de conversores empregando redes de impedância magneticamente acopladas da classe Fonte-Y, preenchendo lacunas e desafios ainda existentes na literatura, relacionadas com determinação e aprimoramento de limitações operacionais, metodologias de projeto do estágio de potência, metodologia de projeto dos controladores, e ainda a exploração considerando características operacionais relacionadas com o provimento de serviços ainda não demonstrados para esta topologia na literatura.

Este trabalho apresenta a análise, o projeto e o desenvolvimento de conversores baseados no emprego da rede de impedância do tipo fonte-Y, com o objetivo de utilização em sistemas de geração distribuída de energia elétrica em redes de baixa tensão, operando como formador de rede (modo ilhado) ou seguidor de rede (conectado à rede elétrica). Além disso, há a proposição de estratégias de controle multifuncional, fundamentadas pela Teoria de Potência Conservativa, que viabilizam a operação de tais conversores como prestadores de serviços ancilares.

No modo conectado à rede, além da injeção potência ativa fornecida pelo dispositivo pela fonte de entrada, é adicionado junto ao controle a capacidade de o sistema operar de forma multifuncional, agregando funcionalidades relacionadas ao tratamento de problemas de qualidade da energia elétrica, atuando como um filtro ativo de potência, compensando ao menos parte dos distúrbios causados por cargas locais não-lineares ou que consomem energia reativa.

A estratégia de controle aplicada para o inversor rede de impedância nesse

trabalho possui dois estágios: o controle do lado CC e do lado CA. Nessa estratégia o controle é desacoplado, possibilitando que os dois lados sejam executados de forma separada. O controle do lado CC é realizado através da regulação de período de *shoot-through* gerando a elevação de tensão e do lado CA através da regulação do índice de modulação M , que é responsável pela conversão CC-CA. Ainda há a característica típica de fase não mínima apresentada por conversores que empregam redes de impedância magneticamente acoplados, aspecto que restringe a resposta dinâmica do conversor, dificultando a operação.

No trabalho é detalhada a modelagem dos conversores eletrônicos, na qual utilizou-se a técnica média de espaço de estados, pela qual foi possível realizar a análise em regime permanente e da resposta dinâmica do modelo desenvolvido. Foram apresentadas equações que determinam as perdas nos semicondutores, magnéticos e capacitores do conversor e que estimam a eficiência do conversor. Foram feitas análises comparando o desempenho do conversor ideal (sem perdas) com outro considerando parâmetros reais, sendo possível estimar quanto as não idealidades dos componentes interferem no desempenho da rede de impedância. Destacam-se também como contribuições as análises no domínio do tempo e frequência, avaliando as implicações de mudanças paramétricas dos componentes da rede de impedância, em questões relacionadas à complexidade de controle, estabilidade relativa e comportamento dinâmico.

Com o objetivo de determinar as regiões limites de operação do inversor rede de impedância, foi realizada uma análise matemática com a finalidade de encontrar a tensão mínima de *link* CC exigida em uma determinada aplicação, seja ela conectada à rede elétrica ou de forma ilhada, para que o conversor opere de forma adequada. Concluiu-se que a tensão mínima de *link* CC depende de diversos fatores, dentre os quais o filtro CA de saída do inversor, a magnitude e a ordem harmônica da corrente circulante pelo conversor, a potência extraída do GD, o fator de enrolamento K da rede de impedância Fonte-Y, entre outros.

Como a rede de impedância Fonte-Y possui dois graus de liberdade para alcançar o ganho de tensão desejável (fator K e d_0) é necessário escolhê-los de forma apropriada. Portanto, foi proposta uma metodologia para a determinação

de seu ponto de operação de forma que possam ser atendidos simultaneamente diferentes requisitos de projeto, com o conversor operando com a tensão mínima de *link* CC permitida, com melhor rendimento possível e ainda não ultrapassando os limites máximos de tensão e corrente em seus componentes.

Por fim, foram obtidos resultados experimentais e de simulação computacional do conversor pelos quais pode-se validar os esquemas de controle propostos em ambos os modos de operação. No modo formador de rede, o conversor foi submetido a testes com degrau de carga e variações na tensão de entrada. Com o sistema no modo seguidor de rede foram realizados ensaios com variação na potência ativa entregue a rede elétrica e atuando de forma multifuncional, compensando seletivamente os distúrbios na corrente causados pela carga conectada ao PAC.

7.1 Perspectivas de trabalhos futuros

Como propostas de continuidade do trabalho, destacam-se:

- Realização de projeto otimizado dos componentes que formam a rede de impedância com o objetivo de alcançar um melhor rendimento do conversor;
- Agregar ao sistema um dispositivo de armazenamento de energia para garantir a alimentação das cargas no modo formador de rede, caso um GD de natureza intermitente (por exemplo painéis fotovoltaicos) esteja conectado ao sistema;
- Emprego de outra estratégia de modulação ao inversor rede de impedância que apresenta maior ganho de tensão, menores esforços nos semicondutores e menores perdas de chaveamento;
- Emprego de outra topologia de *snubber* no diodo da rede de impedância que não seja dissipativa, de forma a melhorar o rendimento do conversor.
- Emprego de outras topologias de redes de impedância magneticamente acopladas que promovem corrente de entrada contínua (ideais para aplicações que utilizam PV e CaC), menores esforços de tensão e corrente nos componentes e que efetuem o grampeamento da tensão de

link CC, absorvendo os altos picos de tensão gerados pela indutância de dispersão presente nos indutores acoplados.

- Considerar a influência de cargas desbalanceadas para dedução das expressões que determinam a tensão mínima de *link* CC da rede de impedância Fonte-Y para ambos os modos de operação (ilhado e conectado à rede elétrica).

BIBLIOGRAFIA

ABU-RUB, H. et al. Quasi-Z-Source Inverter-Based Photovoltaic Generation System With Maximum Power Tracking Control Using ANFIS. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, v. 4, p. 11-20, Janeiro 2013.

AHL, Amanda et al. Review of blockchain-based distributed energy: Implications for institutional development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 107, p. 200-211, 2019.

ALONSO, Augusto M. D. S. Distributed Harmonic Compensation in Single-Phase Low-Voltage Microgrids. **Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho"**, 2018.

ANDERSON, J.; PENG, F. Z. Four quasi-Z-Source inverters. **2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference**, Rhodes, p. 2743-2749, 2008.

ARANGO, E. et al. Asymmetrical Interleaved DC/DC Switching Converters for Photovoltaic and Fuel Cell Applications—Part 1: Circuit Generation, Analysis and Design. **Energies**, p. 4590-4623, 2012.

BADACHI, C.; LAAD, P. S. Modelling and Analysis of Magnetically Coupled Impedance Source Inverter for Solar Photovoltaic Systems. **International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT)**, Coimbatore, India, p. 335-339, 2021.

BAJESTAN, M. M.; SHAHPARASTI, M.; KHABURI, D. A. Application of trans Z-source inverter in photovoltaic systems. **2013 21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)**, Mashhad, Irã, p. 1-6, 2013.

BIERHOFF, M. H.; FUCHS, F. W. Semiconductor losses in voltage source and current source IGBT converters based on analytical derivation. **2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference**, Aachen, Alemanha, 2004. 2836-2842.

BONALDO, J. P.; PAREDES, H. K. M.; POMILIO, J. A. Control of Single-Phase Power Converters Connected to Low-Voltage Distorted Power Systems With Variable Compensation Objectives. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 31, p. 2039-2052, Março 2016.

BRADASCHIA, Fabrício. Conversores fonte Z para sistemas fotovoltaicos e monofásicos-trifásicos. **Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco.**, 2012.

BRANDÃO, Danilo I. Sistema de geração fotovoltaico multifuncional. **Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”**, Janeiro 2013.

BRITO, Moacyr A. G. D. Inversores Integrados Monofásicos e Trifásicos para Aplicações Fotovoltaicas: Técnicas para obtenção de MPPT, detecção e proteção de ilhamento, sincronização e paralelismo com a rede de distribuição de energia elétrica. **Tese de doutorado**, Universidade Estadual Paulista, 2013.

BUBALO, M. et al. Experimental Investigation of a Standalone Wind Energy System with a Battery-Assisted Quasi-Z-Source Inverter. **Energies**, v. 14, 2021.

BUSO, Simone; MATTAVELLI, Paolo. **Digital Control in Power Electronics**. 1ª ed.

CHA, H.; LI, Y.; PENG, F. Z. Practical Layouts and DC-Rail Voltage Clamping Techniques of Z-Source Inverters. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 31, p. 7471-7479, Nov. 2016.

CHEN, Danpeng; GAN, Shihong. Grid connection of Y-source inverters for photovoltaic power vessels. **International Core Journal of Engineering**, v. 7, p. 486-493, 2021.

CHITRA, K. et al. Switched Inductor Z-Source Inverter with Modified Space Vector. **International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.)**, v. 16, p. 368-376, 2021.

CHUN, T. W. et al. Power control for a PV generation system using a single-phase grid-connected quasi Z-source inverter. **8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia**, Jeju, Coreia do Sul, p. 889-893, 2011.

CUPERTINO, A. F. et al. Inversores multifunconais para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. **V Congresso Brasileiro de Energia Solar**, Recife, Brasil, 2014.

DABOUR, S.M. et al. A Comprehensive Review on Common-Mode Voltage of Three-Phase Quasi-Z Source Inverters for Photovoltaic Applications. **Energies**, v. 16, 2023.

ELLABBAN, O.; ABU-RUB, H. Z-Source Inverter: Topology Improvements Review. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, v. 10, p. 6-24, Março 2016.

ERICKSON, R. W.; MAKSIMOVIC, D. **Fundamentals of power electronics**.

FARD, A. Y.; NAJMI, E. S.; BABAEI, E. An energy stored improved Y-source single-phase inverter for photovoltaic system applications. **2018 IEEE 12th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG 2018)**, Doha, Catar, 2018.

FARHANGI, B.; FARHANGI, S. Comparison of z-source and boost-buck inverter topologies as a single phase transformer-less photovoltaic grid-connected power conditioner. **2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference**, Jeju, Coreia do Sul, 2006. 1-6.

FARRET, Felix A.; SIMOES, M. Godoy. **Integration of Alternative Sources of Energy**.

FENILI, M. D. P. Estudo e Implementação de um Filtro Ativo Paralelo Monofásico de 8kVA. **Dissertação de Mestrado**, Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

FOROUZESH, M. et al. Small-Signal Modeling and Comprehensive Analysis of Magnetically Coupled Impedance-Source Converters. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 31, p. 7621-7641, Novembro 2016.

FOROUZESH, M. et al. Analysis and design of an energy regenerative snubber for magnetically coupled impedance source converters. **2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)**, p. 2555-2561, 2018.

FOROUZESH, M.; BAGHRAMIAN, A.; SALAVATI, N. Improved Y-source inverter for distributed power generation. **2015 23rd Iranian Conference on Electrical Engineering**, Tehran, Irã, 2015. 1677-1681.

GAO, F. et al. Operational analysis and comparative evaluation of embedded Z-Source inverters. **2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference**,

Rhodes, Grécia, 2008. 2757-2763.

GENESIC, 2020. Disponível em: <<https://genesicsemi.com/zh/sic-schottky-mps/GC2X5MPS12-247/GC2X5MPS12-247.pdf>>. Acesso em: 10 Maio 2023.

GHAHDERIJANI, M. M.; DEHKORDI, B. M. Comprehensive Robust and Fast Control of Z-Source-Inverter-Based Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive System. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 68, p. 11783-11793, 2021.

GRAOVAC, Dušan; PÜRSCHHEL, Marco. IGBT power losses calculation using the data-sheet parameters. **Application note**, 2009.

GRGIĆ, I. et al. Optimal Control of a Standalone Wind-Solar-Battery Power System with a Quasi-Z-Source Inverter. **International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA)**, Glasgow, p. 61-66, 2020.

GUERREIRO, Joel F. AC Power Electronic Systems: Impedance-based Stability. **Universidade Estadual de Campinas**, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, 2020.

GUO, M. et al. Dual, Three-Level, Quasi-Z-Source, Indirect Matrix Converter for Motors With Open-Ended Windings. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 38, p. 64-74, 2023.

HUANG, Y. et al. Z-Source Inverter for Residential Photovoltaic Systems. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 21, p. 1776-1782, Novembro 2006.

HUSEV, O. et al. Comprehensive Comparative Analysis of Impedance-Source Networks for DC and AC Application. **Electronics 2019**, 2019.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. **IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces: in IEEE Std 1547-2018**. [S.l.], p. 1-138. 2018.

INTERNATIONAL RECTIFIER, 2004. Disponível em: <www.infineon.com/dgdl/irg4pf50wdpbf.pdf?fileId=5546d462533600a401535647eed32305>. Acesso em: 10 Maio 2023.

JAIN, S. et al. Direct decoupled active and reactive predictive power control of grid-tied quasi-Z-source inverter for photovoltaic applications. **2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)**, Cincinnati, OH, p. 4582-4588, 2017.

JOKIPII, J. Dynamic Characteristics of Grid-Connected Three-Phase Z-Source Inverter in Photovoltaic. **Tampere University of Technology**, 2016.

JUNG, J.-W.; DAI, M.; KEYHANI, A. Modeling and control of a fuel cell based Z-source converter. **Twentieth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)**, Austin, EUA, v. 2, p. 1112-1118, 2005.

KATARAY, Tarun et al. Integration of smart grid with renewable energy sources: Opportunities and challenges – A comprehensive review. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 58, 2023.

KHANI, S. et al. Application of embedded Z-Source inverters in Grid connected photo-voltaic systems. **Proc. 18th Conf. Electrical Power Distribution Networks (EPDC)**, 1–5 Maio 2013.

- KUMAR, Sheeja P.; SHAILAJA, P. T-Shaped Z-Source Inverter. **International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)**, v. 1, p. 1-6, Novembro 2012.
- KUMLE, A. N.; FATHI, S. H.; INANLOO, M. Z-source online UPS. **The 6th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC2015)**, Tehran, Irã, p. 621-626, 2015.
- LI, Y. et al. Controller design for quasi-Z-source inverter in photovoltaic systems. **IEEE Energy Conversion Congress and Exposition**, Atlanta, GA, EUA, p. 3187-3194, 2010.
- LI, Y. et al. Modeling and Control of Quasi-Z-Source Inverter for Distributed Generation Applications. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 60, p. 1532-1541, Abril 2013.
- LI, Y. W. Control and Resonance Damping of Voltage-Source and Current-Source Converters With LC Filters. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Maio 2009. 1511-1521.
- LIU, H. et al. A Modified Single-Phase Transformerless Y-Source PV Grid-Connected Inverter. **IEEE Access**, v. 6, p. 18561-18569, 2018.
- LIU, W.; YANG, Y.; KEREKES, T. Characteristic Analysis of the Grid-Connected Impedance-Source Inverter for PV Applications. **2019 IEEE 10th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)**, Xi'an, China, p. 874-880, 2019.
- LIU, Y. et al. Control System Design of Battery-Assisted Quasi-Z-Source Inverter for Grid-Tie Photovoltaic Power Generation. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, v. 4, p. 994-1001, Outubro 2013.
- LIU, Yushan et al. An improved MPPT method for quasi-Z-source inverter based grid-connected photovoltaic power system. **2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics**, Hangzhou, China, p. 1754-1758, 2012.
- LOH, Poh C.; LI, Ding; BLAABJERG, Frede. Γ -Z-Source Inverters. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 28, p. 4880-4884, 2013.
- MAGMATTEC, 2009. Disponível em: <https://www.magmattec.com.br/wp-content/uploads/2019/09/SENDUST_01.pdf>. Acesso em: 10 Maio 2023.
- MANDE, D. et al. Dual-Source Bidirectional Quasi-Z-Source Inverter Development for Off-Road Electric Vehicles. **World Electric Vehicle Journal**, v. 13, 2022.
- MARTINS, Alex D. S. Análise e projeto do conversor fonte-y para uso em sistemas de geração de energia fotovoltaica de baixa tensão. **Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"**, Instituto de Ciência e Tecnologia (Câmpus de Sorocaba), 2017.
- MOREY, Meghraj et al. A comprehensive review of grid-connected solar photovoltaic system: Architecture, control, and ancillary services. **Renewable Energy Focus**, v. 45, p. 307-330, 2023.
- NAIR, D. A.; JOHNY, L. M. K; MATHEW, J. A Three-Phase Enhanced Boost Switched Inductor Z-Source Based Three-level Inverter-fed Induction Motor Drive. **2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)**, p. 1-5, 2020.

ODAGUIRI, Vitor Telles. Modelagem e estratégia de controle do inversor Fonte Z. **Dissertação de Mestrado**, Universidade do Estado de Santa Catarina, 2018.

OGATA, KATSUHIKO. **Engenharia de Controle Moderno**. 5^a. ed.

PADUA, M. S.; DECKMANN, S. M.; MARAFÃO, F. P. Frequency-Adjustable Positive Sequence Detector for Power Conditioning Applications. **2005 IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference**, Dresden, Alemanha, p. 1928-1934, 2005.

PANIGRAHI, R. et al. Grid Integration of Small-Scale Photovoltaic Systems in Secondary Distribution Network—A Review. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 56, p. 3178-3195, 2020.

PAREDES, H. K. M. Teoria de Potência Conservativa: Uma nova abordagem para o controle cooperativo de condicionadores de energia e considerações sobre atribuição de responsabilidades. **Tese de Doutorado**, UNICAMP, 2011.

PAREDES, H. K. M. et al. Application of Conservative Power Theory to load and line characterization and revenue metering. **IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS) Proceedings**, Aachen, Alemanha, p. 1-6, 2012.

PENG, F. Z. Z-source inverter. **Proc. Ind. Appl. Conf**, 2, Outubro 2002. 775–781.

PENG, Fang Z. Z-source inverter. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 39, p. 504-510, Março-Abril 2003.

PENG, Fang Z.; SHEN, Miaosen; QIAN, Zhaoming. Maximum boost control of the Z-source inverter. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 20, p. 833-838, Julho 2005.

PIRES, V. F. et al. Control Strategy for a Four-Wire T-Type qZSI based PV System to Support Grids with Unbalanced Non-Linear Loads. **2019 IEEE 13th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG)**, Sonderborg, Dinamarca, p. 1-6, 2019.

QIAN, W.; PENG, F. Z.; CHA, H. Trans-Z-Source Inverters. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 26, p. 3453-3463, Dezembro 2011.

RABKOWSKI, J. The bidirectional Z-source inverter for energy storage application. **2007 European Conference on Power Electronics and Applications**, Aalborg, Dinamarca, p. 1-10, 2007.

RAFIQ, Muhammad A. et al. Design and Control of a Quasi-Z Source Multilevel Inverter Using a New Reaching Law-Based Sliding Mode Control. **Energies**, v. 15, 2022.

RAN, Y. et al. A power decoupling solution for improved single-phase Y-Source inverter. **2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)**, Harbin, 2017. 1-5.

RASEKH, Navid; HOSSEINPOUR, Majid. LCL filter design and robust converter side current feedback control for grid-connected Proton Exchange Membrane Fuel Cell system. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, p. 13055-13067, 2020.

RASIN, Zulhani B. Grid-connected quasi-Z-source photovoltaic inverter with energy storage. **University of New South Wales**, Abril 2015.

REDDIVARI, Reddiprasad; JENA, Debashisha. Correlative Investigation of Impedance Source Networks: A Comprehensive Review. **IETE Technical Review**, p. 506-539, 2022.

REDDIVARI, Reddiprasad; JENA, Debashisha. Improved Gamma type Y-source inverter for rooftop PV based V-G applications. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 142, 2022.

RODRIGUES, Marcus V. M.; SILVA, Newton da. Multiloop Controller To Single Phase Inverter And Static Transfer Switch Control Applied To Uninterruptible Power Supplies. **Revista Eletrônica de Potência**, v. 21, p. 52-62, 2016.

SAJADIAN, S.; AHMADI, R. Model predictive control of dual-mode operations Z-source inverter: Islanded and grid-connected. **IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)**, Cincinnati, OH, p. 4971-4977, 2017.

SANTOS, R.; GONÇALVES, F.A.S. Sinusoidal PWM Techniques Comparison for the Quasi-Y-Source Inverter. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, p. 1399–1407, 2021.

SHARIFI, T. et al. An Asymmetrical Cascaded Single-phase quasi Z-Source Multilevel Inverter with Reduced Number of Switches and Lower THD. **Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference (PEDSTC)**, Tehran, Irã, p. 1-5, 2020.

SHEN, Miaosen et al. Constant boost control of the Z-source inverter to minimize current ripple and voltage stress. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 42, p. 770-778, Maio-Junho 2006.

SIGAMANI, T.; PONRAJ, R. P.; RAVINDRAN, V. Modified Single Phase Matrix Converter with Z-Source for Renewable Energy Systems. **International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT)**, Tirunelveli, India, p. 601-607, 2020.

SIWAKOTI, Y. P. et al. Y-source impedance network. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 29, p. 3250-3254, Julho 2014.

SIWAKOTI, Y. P. et al. Impedance-Source Networks for Electric Power Conversion Part II: Review of Control and Modulation Techniques. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 30, p. 1887-1906, Abril 2015.

SIWAKOTI, Y. P. et al. Y-Source Boost DC/DC Converter for Distributed Generation. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 62, p. 1059-1069, Fevereiro 2015.

SIWAKOTI, Y. P.; PENG, F. Z.; BLAABJERG, F. Impedance-Source Networks for Electric Power Conversion Part I: A Topological Review. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 30, Fevereiro 2015. 699-716.

SOARES, Marcelo N. Estratégia de Minimização de Perdas Para um Gerador de Indução Duplamente Alimentado. **Dissertação Mestrado**, Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

SOUZA JUNIOR, M.E.T.; FREITAS, L.C.G. Power Electronics for Modern Sustainable Power Systems: Distributed Generation, Microgrids and Smart Grids—A Review. **Sustainability**, v. 14, 2022.

STRZELECKI, R. et al. New type T-Source inverter. **2009 Compatibility and Power Electronics**, Badajoz, Espanha, p. 191-195, 2009.

TENTI, P.; PAREDES, H. K. M.; MATTAVELLI, P. Conservative Power Theory, a Framework to Approach Control and Accountability Issues in Smart Microgrids. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 26, p. 664-673, Março 2011.

TI. TMS320F2837xD Dual-Core Microcontrollers datasheet. **Texas Instrument**, Dezembro 2013. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tms320f28379d.pdf?ts=1688102367909&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FTMS320F28379D%253FkeyMatch%253DF28379D>.

TIROLLI, Marcelo Nogueira. Projeto e desenvolvimento de um conversor CC-CC multicelular com operação assimétrica no modo de condução crítica. **Tese de doutorado**, Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2022.

VILATHGAMUWA, D. M.; GAJANAYAKE, C. J.; LOH, P. C. Modulation and Control of Three-Phase Paralleled Z-Source Inverters for Distributed Generation Applications. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 24, p. 173-183, Março 2009.

VILLALVA, Marcelo G. Conversor eletrônico de potência trifásico para sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica. **Universidade Estadual de Campinas**, Campinas, SP, 2010.

WANG, Y.; XIE, Y.-X. Adaptive DC-link Voltage Control for Shunt Active Power Filter. **Journal of Power Electronics**, v. 14, p. 764–777, 2014.

XU, P. et al. Study of Z-source inverter for grid-connected PV systems. **2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference**, Jeju, Coreia do Sul, 2006. 1-5.

YADAV, A. et al. A Topological Advancement Review of Magnetically Coupled Impedance Source Network Configurations. **Sustainability**, v. 14, 2022.

YANG, Zhichun et al. Review on optimal planning of new power systems with distributed generations and electric vehicles. **Energy Reports**, v. 9, p. 501-509, 2023.

YE, Y. et al. Quasi-Z-Source-Fed Switched-Capacitor Multilevel Inverters Without Inrush Charging Current. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 70, p. 1115-1125, 2023.

ZHONG, Q.-C.; HORNIK, T. **Control of Power Inverters in Renewable Energy and Smart Grid Integration**.

ZHOU, Y.; LI, H.; LI, H. A Single-Phase PV Quasi-Z-Source Inverter With Reduced Capacitance Using Modified Modulation and Double-Frequency Ripple Suppression Control. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 31, p. 2166-2173, Março 2016.

ZMOOD, D. N.; HOLMES, D. G. Stationary frame current regulation of PWM inverters with zero steady-state error. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 18, p. 814-822, Maio 2003.