

ANO  
2020

RUBENS TADEU HOCK JÚNIOR | CONVERSOR CASCATA INTERCONECTADO PARA  
COMPENSAÇÃO DE CORRENTE EEM REDES DE DISTRIBUIÇÃO



**UDESC**

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC  
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Esta tese apresenta uma nova topologia multiníveis trifásica baseada no conversor cascata aplicado a redes de distribuição com conexão direta em alta, média e baixa tensão. Caminhos de corrente são criados através de elementos passivos, permitindo troca de energia entre as fases, aumentando a capacidade de mitigação de distúrbios atuando como um Compensador Síncrono Estático de Reativos para redes de Distribuição (DSTATCOM), Filtro Ativo de Potência e Redistribuidor de Potência. Resultados de experimentais mostram a capacidade de regulação da corrente da rede e as características da topologia proposta com cargas desequilibradas e não lineares.

Orientador: Alessandro Luiz Batschauer

Joinville, 2020

TESE DE DOUTORADO

**CONVERSOR CASCATA  
INTERCONECTADO PARA  
COMPENSAÇÃO DE CORRENTE  
EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO**

RUBENS TADEU HOCK JÚNIOR

JOINVILLE, 2020

**RUBENS TADEU HOCK JÚNIOR**

**CONVERTOR CASCATA INTERCONECTADO PARA COMPENSAÇÃO DE  
CORRENTE EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Ciências e Tecnologias da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Alessandro Luiz Batschauer

**JOINVILLE  
2020**

Hock Júnior, Rubens Tadeu

CONVERSOR CASCATA INTERCONECTADO PARA COMPENSAÇÃO  
DE CORRENTE EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO / Rubens Tadeu Hock Júnior, - 2020.  
142p.

Orientador: Alessandro Luiz Batschauer

Tese (Doutorado) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de  
Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Joinville,  
2020.

1. Conversor Multiníveis. 2. Conversor Cascata. 3. DSTATCOM. 4. Filtro  
Ativo de Potência. 5. Regulação de Corrente. I. Batschauer, Alessandro Luiz. II.  
Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título

**Conversor Cascata Interconectado para Compensação  
de Corrente em Redes de Distribuição**

por

**Rubens Tadeu Hock Junior**

Esta tese foi julgada adequada para obtenção do título de

**DOUTOR EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

Área de concentração em “Sistemas Eletroeletrônicos”  
e aprovada em sua forma final pelo

CURSO DE DOUTORADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
DO CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS DA  
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA.

Banca Examinadora:



---

Prof. Dr. Alessandro Luiz  
Batschauer  
CCT/UDESC  
(Orientador/Presidente)

Videoconferência

---

Prof. Dr. Marcelo Cabral  
Cavalcanti  
UFPE

Videoconferência

---

Prof. Dr. Roberto Francisco Coelho  
UFSC

Videoconferência

---

Prof. Dr. Cassiano Rech  
UFSC



---

Prof. Dr. Yales Rômulo de Novaes  
CCT/UDESC

**Joinville, SC, 26 de março de 2020.**



## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu pai por proporcionar a mim, assim como a minha irmã, a melhor educação possível dentro das suas possibilidades.

Ao professor Alessandro Luiz Batschauer pela amizade, pelos ensinamentos e pela confiança no meu trabalho.

Aos professores do nPEE que contribuíram no meu desenvolvimento durante as disciplinas ministradas e pelas dúvidas sanadas.

Aos colegas do curso de pós-graduação, em especial ao Felipe Zimann, Gustavo Lambert e Marcos Bressan, pelas discussões geradas durante esses longos anos e pelo companheirismo.

Aos demais integrantes do nPEE pela ajuda prestada nas diversas tarefas.

À FAPESC e à FITEJ pela contribuição na aquisição de materiais e equipamentos.

Ao CNPq pelo fomento à pesquisa e à CAPES pela bolsa de estudos cedida.



“Hard times create strong men,  
Strong men create good times,  
Good times create weak men,  
Weak men create hard times.”

G. Michael Hopf



## RESUMO

Esta tese apresenta uma nova topologia multiníveis trifásica baseada no conversor cascata aplicado a redes de distribuição com conexão direta em alta, média e baixa tensão. Caminhos de corrente são criados através de elementos passivos, permitindo troca de energia entre as fases, aumentando a capacidade de mitigação de distúrbios como um Compensador Síncrono Estático de Reativos para redes de Distribuição (DSTATCOM) e como um Filtro Ativo de Potência. A estrutura de controle é composta por uma malha de corrente de saída e duas malhas para regulação das tensões cc. Os modelos dinâmicos da topologia proposta são apresentados, assim como a metodologia de projeto dos controladores. Resultados de simulação mostram a capacidade de regulação da corrente da rede e as características da topologia proposta com cargas desequilibradas e não lineares. O trabalho é concluído com a construção de um protótipo em escala e validação dos estudos por meio de resultados experimentais, comprovando o bom funcionamento da topologia proposta.

Palavras-chave: Conversor Multiníveis. Conversor Cascata. DSTATCOM. Filtro Ativo de Potência. Regulação de Corrente.



## ABSTRACT

This thesis presents a novel three-phase multilevel topology based on the cascade converter applied to distribution grids with direct connection to high-, medium- and low-voltage grids. Current paths are created through passive components, allowing energy exchange among the converters phases, enhancing the mitigation capability of load disturbances as a Distribution Static Synchronous Converter (DSTATCOM) and as an Active Power Filter. The control structure is composed of an output current loop and two dc voltage loops. The dynamic models of the proposed topology are presented, as well as the control design methodology. Simulation results show the capacity of grid-end current regulation and the features of the proposed topology under unbalanced and nonlinear loads. This work is concluded with the construction of a down-scale prototype and validation through experimental results proves the proper operation of the proposed topology.

Key-words: Multilevel Converters. Cascade Converters. DSTATCOM. Active Power Filter. Current Regulation



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Valor acumulado da autoprodução de eletricidade no Brasil por ano em TWh23	
Figura 2 - Compensador Estático de Var .....	25
Figura 3 - Diagrama de blocos de um sistema de distribuição com a presença de um DSTATCOM .....	26
Figura 4 - Plantas instaladas de STATCOM pela ABB em (a) Austin, EUA e em (b) Cerro Navia, Chile .....	28
Figura 5 - Plantas instaladas de STATCOM pela SIEMENS na (a) Nova Zelândia e no (b) Reino Unido.....	28
Figura 6 - Modelos de STATCOM produzidos pela SIEMENS.....	29
Figura 7 - Conversor cascata conectado em estrela.....	33
Figura 8 - Conversor cascata conectado em delta .....	35
Figura 9 - Representação simplificada do CHB conectado em delta evidenciando a corrente de circulação .....	36
Figura 10 - Conversor Modular Multinível .....	38
Figura 11 - Representação simplificada do MMC evidenciando as correntes de circulação38	
Figura 12 - Representação simplificada do CHB .....	42
Figura 13 - Conversor Cascata em Ponte Completa Proposto .....	45
Figura 14 - Representação simplificada do iCHB.....	46
Figura 15 - Representação simplificada do fluxo de potência das células $x_1$ à $x_j$ .....	48
Figura 16 - Representação simplificada de um braço do iCHB .....	50
Figura 17 - Primeira etapa de operação da célula superior .....	50
Figura 18 - Segunda etapa de operação da célula superior .....	51
Figura 19 - Terceira etapa de operação da célula superior .....	51
Figura 20 - Quarta etapa de operação da célula superior .....	51
Figura 21 - Forma de onda de $v_{CB}$ para modulação por deslocamento em fase .....	52
Figura 22 - Forma de onda de $v_{AB}$ para modulação por deslocamento em fase .....	52
Figura 23 - Primeira etapa de operação das células inferiores .....	53
Figura 24 - Segunda etapa de operação das células inferiores .....	53
Figura 25 - Terceira etapa de operação das células inferiores.....	53
Figura 26 - Quarta etapa de operação das células inferiores .....	54
Figura 27 - Circuito simplificado para a obtenção da corrente de circulação do iCHB.....	54
Figura 28 - Sistema de Controle do Conversor Cascata de Ponte Completa Interconectado59	

Figura 29 - Diagrama de blocos da geração das referências de corrente em coordenadas $dq0$	
61	
Figura 30 - Diagrama de blocos da malha de corrente em coordenadas $dq0$ .....	61
Figura 31 - Circuito equivalente para a obtenção do modelo da planta de corrente .....	62
Figura 32 - Diagrama de blocos do controle de corrente .....	63
Figura 33 - Diagrama de Bode da função de transferência de malha aberta da malha de corrente incluindo o controlador no tempo discreto .....	64
Figura 34 - Circuito equivalente para a obtenção do modelo da planta de tensão total.....	65
Figura 35 - Diagrama de blocos da malha de tensão total .....	66
Figura 36 - Diagrama de Bode da função de transferência de malha aberta da malha de tensão total incluindo o controlador no tempo discreto .....	67
Figura 37 - Diagrama de blocos da malha de tensão individual .....	68
Figura 38 - Circuito equivalente para a obtenção do modelo da tensão individual .....	68
Figura 39 - Diagrama de Bode da função de transferência de malha aberta da malha de tensão individual incluindo o controlador no tempo discreto .....	70
Figura 40 - Circuitos da rede e das cargas .....	76
Figura 41 - Circuito de potência completo do iCHB .....	76
Figura 42 - Interligação indutiva dos braços do iCHB .....	77
Figura 43 - Sistema de controle embarcado em bloco C .....	77
Figura 44 - Formas de onda da tensão de braço do CHB durante o degrau de carga equilibrada para desequilibrada.....	78
Figura 45 - Formas de onda de corrente na carga durante o degrau de carga equilibrada para desequilibrada .....	78
Figura 46 - Formas de onda de corrente de saída do CHB durante o degrau de carga equilibrada para desequilibrada.....	79
Figura 47 - Formas de onda de corrente no alimentador durante o degrau de carga equilibrada para desequilibrada.....	79
Figura 48 - Formas de onda da tensão das células do CHB durante a compensação do desequilíbrio de carga .....	80
Figura 49 - Formas de onda de corrente na carga durante a compensação do desequilíbrio de carga .....	80
Figura 50 - Formas de onda de corrente de saída do CHB durante a compensação do desequilíbrio de carga .....	80

Figura 51 - Formas de onda de corrente no alimentador durante a compensação do desequilíbrio de carga .....	81
Figura 52 - Formas de onda de corrente na carga durante a compensação do desequilíbrio de carga em regime permanente .....	81
Figura 53 - Formas de onda de corrente de saída do CHB durante a compensação do desequilíbrio de carga em regime permanente .....	81
Figura 54 - Formas de onda de corrente no alimentador durante a compensação do desequilíbrio de carga em regime permanente .....	82
Figura 55 - Componentes em eixo direto e quadratura da corrente da rede com a compensação do CHB.....	82
Figura 56 - Fator de desequilíbrio de corrente da rede com a compensação do CHB .....	83
Figura 57 - Formas de onda da tensão das células do CHB durante a compensação do desequilíbrio de carga com a alteração no controle de corrente.....	83
Figura 58 - Formas de onda de corrente de saída do CHB durante a compensação do desequilíbrio de carga em regime permanente com a alteração no controle de corrente .....	84
Figura 59 - Formas de onda de corrente no alimentador durante a compensação do desequilíbrio de carga em regime permanente com a alteração no controle de corrente .....	84
Figura 60 - Componentes em eixo direto e quadratura da corrente da rede com a compensação do CHB com a alteração no controle de corrente .....	85
Figura 61 - Fator de desequilíbrio de corrente da rede com a compensação do CHB com a alteração no controle de corrente.....	85
Figura 62 - Formas de onda da tensão das células do iCHB com carga desequilibrada e não linear .....	86
Figura 63 - Formas de onda de corrente na carga com carga desequilibrada e não linear..	87
Figura 64 - Formas de onda de corrente de saída do iCHB com carga desequilibrada e não linear .....	87
Figura 65 - Formas de onda de corrente no alimentador com carga desequilibrada e não linear .....	87
Figura 66 - Formas de onda da corrente de circulação do iCHB com carga desequilibrada e não linear .....	88
Figura 67 - Formas de onda da tensão $v_{Lcirc}$ com carga desequilibrada e não linear.....	88

Figura 68 - Formas de onda da ação de controle de corrente $v_{o,x}$ com carga desequilibrada e não linear .....	89
Figura 69 - Forma de onda da ação de controle de tensão total $i_t$ com carga desequilibrada e não linear .....	89
Figura 70 - Formas de onda da ação de controle de tensão individual $v_{i,cj}$ com carga desequilibrada e não linear .....	90
Figura 71 - Formas de onda do sinal modulador $m_{cj}$ com carga desequilibrada e não linear	90
Figura 72 - Comportamento dinâmico da tensão das células do iCHB durante o degrau de carga .....	91
Figura 73 - Comportamento dinâmico da corrente na carga durante o degrau de carga .....	92
Figura 74 - Comportamento dinâmico da corrente de saída do iCHB durante o degrau de carga .....	92
Figura 75 - Comportamento dinâmico da corrente no alimentador durante o degrau de carga	92
Figura 76 - Comportamento dinâmico do valor de desequilíbrio de corrente da rede .....	93
Figura 77 - Comportamento dinâmico da corrente de circulação durante o degrau de carga	93
Figura 78 - Comportamento dinâmico do valor médio da corrente de circulação durante o degrau de carga .....	94
Figura 79 - Componentes em eixo direto e quadratura da corrente da rede com a compensação do iCHB durante o degrau de carga.....	94
Figura 80 - Formas de onda da ação de controle de corrente $v_{o,x}$ com carga desequilibrada e não linear durante o degrau de carga.....	95
Figura 81 - Forma de onda da ação de controle de tensão total $i_t$ com carga desequilibrada e não linear durante o degrau de carga.....	95
Figura 82 - Formas de onda da ação de controle de tensão individual $v_{i,cj}$ com carga desequilibrada e não linear durante o degrau de carga .....	95
Figura 83 - Formas de onda do sinal modulador $m_{cj}$ com carga desequilibrada e não linear durante o degrau de carga .....	96
Figura 84 - Formas de onda da tensão das células do MMC com carga desequilibrada e não linear.....	97
Figura 85 - Formas de onda de corrente na carga com carga desequilibrada e não linear ..	98
Figura 86 - Formas de onda de corrente de saída do MMC com carga desequilibrada e não linear.....	98

Figura 87 - Formas de onda de corrente no alimentador com carga desequilibrada e não linear .....	98
Figura 88 - Formas de onda da corrente de circulação do MMC.....	99
Figura 89 - Distribuição dos circuitos do iCHB.....	104
Figura 90 - Imagem do kit TMDSDOCK28335 e do kit Cyclone II EP2C5T144.....	105
Figura 91 - Célula ponte completa desenvolvida .....	105
Figura 92 - Fonte de corrente em corrente alternada em média frequência .....	106
Figura 93 - Forma de onda da corrente de saída da fonte de corrente em média frequência	106
Figura 94 - O protótipo implementado do iCHB.....	107
Figura 95 - Formas de onda experimentais da tensão das células do iCHB com carga desequilibrada e não linear: (a) tensão nas 9 células e (b) ondulação de tensão nas células do braço A .....	108
Figura 96 - Formas de onda experimentais de corrente na carga com carga desequilibrada e não linear (500 mA/div, 50 V/div) .....	109
Figura 97 - Formas de onda experimentais de corrente de saída do iCHB com carga desequilibrada e não linear (500 mA/div, 50 V/div) .....	109
Figura 98 - Formas de onda experimentais de corrente no alimentador com carga desequilibrada e não linear (500 mA/div, 50 V/div) .....	110
Figura 99 - Formas de onda experimentais de corrente de circulação do iCHB com carga desequilibrada e não linear (500 mA/div, 50 V/div) .....	110
Figura 100 - Formas de onda experimentais da tensão $v_{Lcircx}$ com carga desequilibrada e não linear (50 V/div) .....	111
Figura 101 - Formas de onda experimentais da tensão das células do iCHB durante o degrau de carga: (a) tensão em regime permanente nas 9 células e (b) tensão nas células do braço A.....	112
Figura 102 - Formas de onda experimentais de corrente na carga durante o degrau de carga (500 mA/div, 50 V/div) .....	113
Figura 103 - Formas de onda experimentais de corrente de saída do iCHB durante o degrau de carga (500 mA/div, 50 V/div).....	113
Figura 104 - Formas de onda experimentais de corrente no alimentador durante o degrau de carga (500 mA/div, 50 V/div).....	114
Figura 105 - Formas de onda experimentais da corrente de circulação durante o degrau de carga (500 mA/div, 50 V/div).....	114
Figura 106 - Conversor Cascata em Ponte Completa Proposto com interconexão genérica	130

Figura 107 - Formas de onda da tensão das células durante a variação do ponto de conexão indutiva.....	131
Figura 108 - Formas de onda da corrente de circulação durante a variação do ponto de conexão indutiva .....	131
Figura 109 - Formas de onda do valor eficaz da corrente de circulação durante a variação do ponto de conexão indutiva .....	132
Figura 110 - Formas de onda do índice de modulação das células durante a variação do ponto de conexão indutiva .....	132
Figura 111 - Circuito simplificado com a circulação de corrente com o bloqueio dos interruptores do CHB .....	133
Figura 112 - Circuito (a) simplificado com a circulação de corrente com o bloqueio dos interruptores do iCHB e (b) equivalente visto do referencial da rede.....	134
Figura 113 - Distribuição das tensões nas células com os pulsos de comando desabilitados	135
Figura 114 - Sistema de pré carga do iCHB.....	135
Figura 115 - Formas de onda da tensão nas células durante a pré carga do iCHB .....	136
Figura 116 - Formas de onda da corrente de saída do iCHB durante a pré carga do iCHB	137
Figura 117 - Resultado experimental: Tensões das células a1, a2 e a3 durante a inicialização do iCHB e a corrente de saída $i_a$ .....	137
Figura 118 - Conversor Cascata em Ponte Completa Proposto com interligação com sistemas de geração de energia .....	140
Figura 119 - Formas de onda da tensão das células durante a injeção de potência ativa..	141
Figura 120 - Formas de onda de corrente (a) de saída do iCHB e (b) no alimentador.....	141
Figura 121 - Potência ativa injetada no sistema de transmissão pelo iCHB .....	142

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Geração distribuída no Brasil em 2017 .....	24
Tabela 2 - Parâmetros do sistema de controle do iCHB .....	60
Tabela 3 - Limites individuais máximos dos componentes harmônicos de corrente segundo a recomendação da IEEE 519-2014.....	74
Tabela 4 - Limites individuais máximos dos componentes harmônicos de corrente segundo o Módulo 8 do PRODIST .....	75
Tabela 5 - Principais parâmetros do iCHB para a simulação numérica .....	75
Tabela 6 - Parâmetros das cargas para a simulação numérica .....	75
Tabela 7 - Comparativo entre o MMC e o iCHB.....	101
Tabela 8 - Principais parâmetros do iCHB para o ensaio experimental .....	103
Tabela 9 - Parâmetros das cargas para o ensaio experimental.....	103
Tabela 10 - Ganhos dos controladores utilizados nos ensaios experimentais .....	103



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>23</b>
<b>2</b>	<b>CONVERSORES MULTINÍVEIS APLICADOS NO SUPORTE À REDE ELÉTRICA</b> .....	<b>31</b>
2.1	CONVERSORES MULTINÍVEIS EM BAIXA TENSÃO.....	32
2.2	CONVERSORES MULTINÍVEIS EM MÉDIA E ALTA TENSÃO.....	32
2.2.1	CHB conectado em estrela.....	32
2.2.2	CHB conectado em delta.....	35
2.2.3	Conversor Modular Multiníveis.....	37
2.3	CONCLUSÃO.....	39
<b>3</b>	<b>CONVERSOR CASCATA PROPOSTO</b> .....	<b>41</b>
3.1	ANÁLISE DO FLUXO DE POTÊNCIA ATIVA DO CONVERSOR CASCATA CONVENCIONAL.....	41
3.2	TOPOLOGIA PROPOSTA DO ICHB.....	44
3.3	ANÁLISE DO FLUXO DE POTÊNCIA ATIVA DO CONVERSOR CASCATA PROPOSTO.....	45
3.3.1	Análise do fluxo global de potência.....	46
3.3.2	Análise interna do fluxo de potência ativa.....	47
3.4	ANÁLISE DA CORRENTE DE CIRCULAÇÃO.....	49
3.4.1	Etapas de operação das células superiores.....	50
3.4.2	Etapas de operação das células inferiores.....	53
3.4.3	Cálculo da corrente de circulação.....	54
3.5	CONCLUSÃO.....	57
<b>4</b>	<b>SISTEMA DE CONTROLE PROPOSTO</b> .....	<b>59</b>
4.1	MALHA DE CORRENTE.....	60
4.1.1	Geração das correntes de referência e controlador de corrente.....	60
4.1.2	Modelagem da planta de corrente.....	62
4.1.3	Projeto do controlador de corrente.....	63
4.2	MALHA DE TENSÃO TOTAL.....	64
4.2.1	Modelagem da planta de tensão total.....	65
4.2.2	Projeto do controlador de tensão total.....	66
4.3	MALHA DE TENSÃO INDIVIDUAL.....	67
4.3.1	Modelagem da planta de tensão individual.....	68

4.3.2 Projeto do controlador de tensão individual .....	69
4.4 CONCLUSÃO.....	70
<b>5 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS.....</b>	<b>73</b>
5.1 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE QUALIDADE.....	73
5.1.1 Fator de Potência .....	73
5.1.2 Fator de Desequilíbrio em Sistemas Trifásicos .....	73
5.1.3 Distorção Harmônica Total de Corrente.....	74
5.2 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO E CIRCUITOS SIMULADOS.....	75
5.3 CONVERSOR CASCATA EM ESTRELA.....	78
5.4 CONVERSOR CASCATA INTERCONECTADO .....	85
5.5 DEGRAU DE CARGA NO CONVERSOR CASCATA INTERCONECTADO ....	90
5.6 CONVERSOR MODULAR MULTINÍVEL .....	96
5.6.1 Desempenho do MMC.....	96
5.6.2 Figuras de mérito para comparação entre o MMC e o iCHB .....	99
5.6.3 Comparativo entre o iCHB e o MMC .....	100
5.7 CONCLUSÃO.....	101
<b>6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>103</b>
6.1 APRESENTAÇÃO DO PROTÓTIPO.....	103
6.2 CONVERSOR CASCATA INTERCONECTADO EM ESCALA .....	107
6.3 DEGRAU DE CARGA NO CONVERSOR CASCATA INTERCONECTADO EM ESCALA.....	111
6.4 CONCLUSÃO.....	114
<b>7 CONCLUSÃO GERAL .....</b>	<b>117</b>
<b>8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>119</b>
<b>APÊNDICE A – POSSIBILIDADES DE CONEXÃO DOS INDUTORES DE CIRCULAÇÃO DO ICHB .....</b>	<b>129</b>
<b>APÊNDICE B – INICIALIZAÇÃO DO ICHB.....</b>	<b>133</b>
<b>APÊNDICE C – INTERLIGAÇÃO DO ICHB COM SISTEMAS GERADORES E ARMAZENADORES DE ENERGIA.....</b>	<b>139</b>

## 1 INTRODUÇÃO

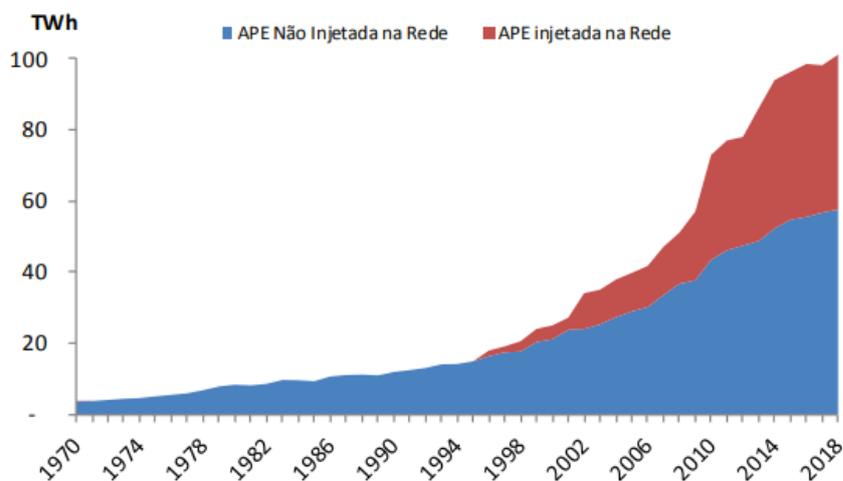
Equation Section (Next)

O aumento contínuo do consumo de energia elétrica inevitavelmente leva a duas soluções: aumento da geração de energia ou um melhor aproveitamento da energia disponível.

A geração de energia no Brasil é majoritariamente composta por geração centralizada (EPE, 2018), com grandes unidades instaladas onde há abundância de uma determinada fonte de energia para transformação em eletricidade. Grandes unidades geradoras geralmente estão distantes dos centros consumidores, demandando infraestrutura de transmissão e de distribuição. Entretanto, esse tipo de geração esbarra em limitações financeiras, técnicas e ambientais (MENEZES, 2015) (DO NASCIMENTO JÚNIOR ; GOPFERT, 2010).

No Brasil, a geração descentralizada, ou geração distribuída, está apenas começando, mas em rápida expansão, fato que pode ser visto na autoprodução de energia (APE) em 2018 segundo a Figura 1.

Figura 1 - Valor acumulado da autoprodução de eletricidade no Brasil por ano em TWh



Fonte: (EPE, 2018).

Na geração descentralizada, diversas unidades geradoras de pequeno porte geram energia perto dos consumidores, criando um efeito de alívio de carga para as grandes unidades geradoras. Em 2015 foi gerado 101,2 TWh por meio de autoprodutores de energia elétrica, correspondendo a 16,8% da demanda do ano. As principais matérias primas são o bagaço de cana de açúcar, o gás natural e a energia hidráulica (EPE, 2016). As classes de consumo que mais contribuem com a APE são as classes residencial e comercial, seguidas do ramo industrial. A Tabela 1 sumariza a potência instalada de APE por classe de consumo.

Tabela 1 - Geração distribuída no Brasil em 2017

Unidades consumidoras com geração distribuída		
Classe de consumo	Quantidade	Potência instalada (kW)
Comercial	34.153	60.507
Iluminação pública	11	15
Industrial	5.143	7.420
Poder Público	766	1.068
Residencial	137.896	164.283
Rural	12.240	18.472
Serviço Público	82	86
Comercial	34.153	60.507

Fonte: (ANEEL, 2020).

Através de estudos de expansão da transmissão e distribuição de energia elétrica, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) recomenda investimentos da ordem de R\$ 39 bilhões até 2022, adicionais aos já licitados (EPE, 2017). O escoamento da energia das unidades instaladas na região norte do país demanda a maior parte desse investimento.

O levantamento anual da EPE indica que 15,9% da energia gerada no país em 2018 foi perdida em algum estágio de transmissão, seja nas linhas de alta e/ou baixa tensão propriamente ditas, seja nas subestações e demais infraestruturas (EPE, 2018). Esse montante é significativo, ainda mais quando se busca eficiência energética elevada nos equipamentos industriais e residenciais.

Uma das formas de otimizar o emprego da energia gerada e postergar investimentos em novas unidades geradoras é evitar o desperdício de energia através de campanhas educativas, por exemplo. Além disso, ações no sentido de aumentar a qualidade de energia e a capacidade de transmissão amenizam a necessidade de expansão da matriz energética e da infraestrutura de transmissão (ANEEL, 2020).

A correção do fator de potência, a diminuição de desequilíbrios de carga e a mitigação de componentes harmônicos de corrente contribuem para uma transmissão e distribuição de energia mais eficiente. Nesse sentido, soluções capazes de satisfazer as necessidades do sistema de distribuição vêm sendo desenvolvidas e aplicadas.

Inicialmente, o emprego de capacitores em derivação com as linhas de distribuição permitiu a redução do fluxo de potência reativa (RAMAMURTHY; KOLLURI ; MADER, 2016) e, com isso, um aumento na capacidade de distribuição de potência ativa. Entretanto, esse tipo de solução apresenta uma desvantagem crucial: o valor de compensação é fixo ou variável em degraus predefinidos, além do problema de alocação (SWARNKAR; GUPTA ; NIAZI, 2010) e do impacto causado pela entrada ou saída desses capacitores (RAMAMURTHY; KOLLURI ; MADER, 2016). Apesar das deficiências, as soluções que empregam capacitores

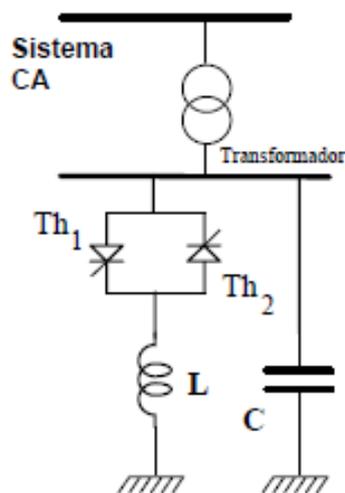
são amplamente utilizadas devido ao custo ser inferior às alternativas mais complexas (MOURSI; ALOBAIDLI ; ZEINELDIN, 2013) e por atenderem a maioria das necessidades das companhias de energia.

Com o surgimento do conceito de FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) o uso de soluções baseadas em semicondutores tem sido amplamente utilizado para suporte aos sistemas de transmissão e de distribuição em corrente alternada (WATANABE *et al.*, 1998).

A associação entre elementos passivos e tiristores compõe o Compensador Estático de Reativos (*Static Var Compensator – SVC*), conforme mostra a Figura 2. O SVC é composto por um capacitor fixo conectado permanentemente ao sistema ca e um indutor chaveado a tiristor. A capacitância do compensador estático é calculada de maneira a gerar a máxima potência reativa que o compensador deve fornecer para o sistema (WATANABE *et al.*, 1998).

O controle do ângulo de disparo dos tiristores permite o ajuste na potência reativa injetada no sistema através do controle da admitância equivalente do arranjo capacitor-indutor (TAN, 1999). Assim, comparado à solução puramente capacitiva, o SVC consegue agir dinamicamente no sistema de transmissão, melhorando a estabilidade e amortecendo ressonâncias (LUO *et al.*, 2009). Entretanto, a comutação na frequência fundamental dos tiristores gera distorções harmônicas. Por isso, são usualmente acompanhados por filtros que evitam a absorção das distorções pelo sistema (LUO *et al.*, 2009).

Figura 2 - Compensador Estático de Var



Fonte: (WATANABE *et al.*, 1998).

A evolução do SVC foi a utilização de soluções baseadas em transistores que podem operar com frequência de comutação superior à frequência da rede, chamadas de Compensador

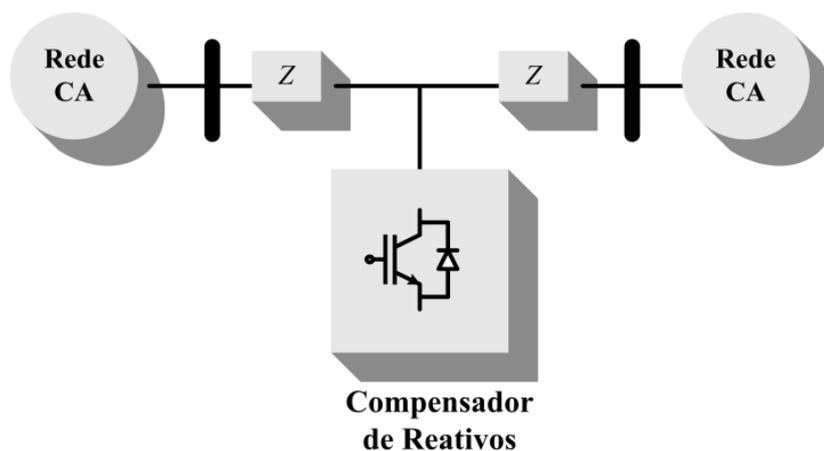
Síncrono Estático de Reativos (*Static Synchronous Compensator – STATCOM*) (SINGH *et al.*, 2009). A operação em alta frequência do STATCOM permite a redução nos filtros de saída e, com isso, a injeção de correntes de compensação de reativos com baixo conteúdo harmônico. Além disso, a comutação em frequências superiores às da rede propicia o aumento na velocidade do controle dos interruptores do STATCOM, diminuindo o tempo de resposta do STATCOM em relação ao SVC.

A operação do STATCOM permite tanto o controle em corrente quanto em tensão (LEDWICH ; GHOSH, 2002), cada um com suas vantagens e desvantagens. Além disso, há a possibilidade do STATCOM assimilar outras funções, como mitigação de harmônicos (KUMAR ; MISHRA, 2014) (DA CUNHA *et al.*, 2015).

Soluções baseadas em STATCOM permitem o aumento da estabilidade do sistema de transmissão de energia, o aumento da transferência de potência ativa nas linhas, a regulação das tensões sob cargas desequilibradas, entre outros (SONG ; LIU, 2009). Para sistemas de distribuição, o STATCOM passa a ser chamado de Compensador Síncrono Estático de Reativos para redes de Distribuição (*Distribution Static Synchronous Compensator – DSTATCOM*).

A Figura 3 apresenta um diagrama simplificado da instalação de um DSTATCOM em linha de distribuição.

Figura 3 - Diagrama de blocos de um sistema de distribuição com a presença de um DSTATCOM



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Diversos conversores cc-ca podem compor o estágio de potência de um DSTATCOM. Em sistemas de baixa tensão, os conversores de dois níveis são amplamente utilizados, devido ao número reduzido de componentes e simplicidade de confecção, de modulação e de controle.

Porém, em sistemas de média (superior a 1 kV e inferior a 69 kV) e alta tensão (superior a 69 kV e inferior a 230 kV) (ANEEL, 2016), a tecnologia de semicondutores não permite a utilização desses conversores, pois a tensão de bloqueio a qual esses semicondutores estão submetidos é muito elevada.

Para superar essa limitação tecnológica, alguns autores propõem a utilização de conversores aplicados em baixa tensão, como conversores meia ponte e conversores grampeados a diodo (*Neutral Point Clamped Converter – NPC*), operando em até 30 kV e a adição de transformadores para adequação do nível de tensão (MADHUSOODHANAN *et al.*, 2016), (GERÇEK ; ERMIS, 2014), (CETIN ; ERMIS, 2009) (BILGIN *et al.*, 2007)

Outra solução é a utilização de conversores multiníveis capazes de suportar tensões maiores que 30 kV, o que permite a conexão direta do STATCOM com a rede de média ou alta tensão (SONG ; LIU, 2009), (TAN *et al.*, 2013), (AKAGI; INOUE ; YOSHII, 2007), (BEHROUZIAN ; BONGIORNO, 2017). Esses conversores, como o Conversor com células Ponte Completa em Cascata (*Cascade H-Bridge – CHB*) e o Conversor Modular Multinível (*Modular Multilevel Converter – MMC*), dividem a tensão da rede em diversas células conectadas em série, sendo possível a utilização de semicondutores disponíveis no mercado (MAHARJAN *et al.*, 2008).

Comercialmente, há duas grandes companhias que atuam no mercado de soluções em média tensão. A empresa ABB possui uma gama de soluções para atender as demandas de qualidade de energia em sistemas de alta potência que requerem conexões em média e alta tensão, chamados SVC Light<sup>®</sup>. A tecnologia mais empregada é a de conversores estáticos NPC de três níveis com tensão de saída de até 35 kV. Acima disso, a ABB utiliza transformadores convencionais. As aplicações típicas são indústrias que utilizam fornos à arco (Charlotte, EUA com 64 MVAR capacitivo em 13,2 kV) (Outokumpu, Finlândia com 164 MVAR capacitivo em 33 kV) (Zhangjiagang, China com 164 MVAR capacitivo em 35 kV), suporte à transmissão de energia (Cerro Navia, Chile com 65 MVAR indutivo à 140 MVAR capacitivo em 220 kV) (Austin, EUA com 80 MVAR indutivo à 110 MVAR capacitivo em 138 kV), geração eólica (Norfolk, Reino Unido com 0,6 MVAR indutivo à 0,75 MVAR capacitivo em 11 kV) e tração elétrica (Evron, França com 16 MVAR indutivo à 16 MVAR capacitivo em 90 kV) (ABB, 2017). Conversores em cascata também constam no portfólio da ABB, com tensão e potência de até 69 kV e 360 MVAR, mas sem apresentar uma planta operacional. Exemplos de plantas da ABB são apresentados na Figura 4.

Figura 4 - Plantas instaladas de STATCOM pela ABB em (a) Austin, EUA e em (b) Cerro Navia, Chile

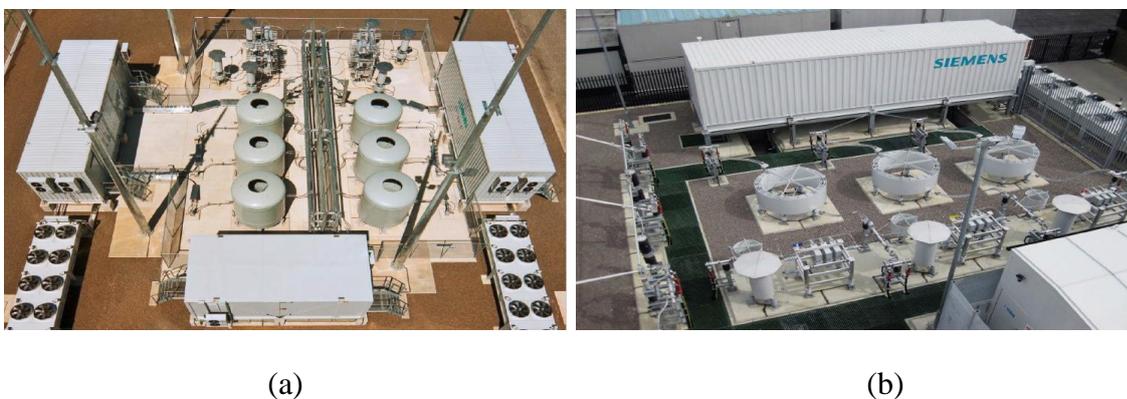


Fonte: (ABB, 2017).

Por outro lado, a Siemens está investindo fortemente em soluções baseadas em conversores multiníveis modulares, chamados SVC PLUS. Alguns exemplos são as plantas na Nova Zelândia (2x SVC PLUS M, 220 kV), Reino Unido (3x SVC PLUS L, 132 kV), Austrália (100 MVar, 132 kV) e Estados Unidos (75 MVar, 138 kV) (SIEMENS, 2014). Exemplos de plantas em operação da SIEMENS são mostrados na Figura 5.

Diferentemente da ABB, a SIEMENS trabalha com soluções prontas e pré-fabricadas (25 MVar, 35 MVar e 50 MVar), sendo que a potência total da planta instalada pode ser ajustada com a utilização de até quatro unidades de SVC PLUS conectadas em paralelo. Para facilitar o transporte e instalação, os STATCOMs são montados em contêineres.

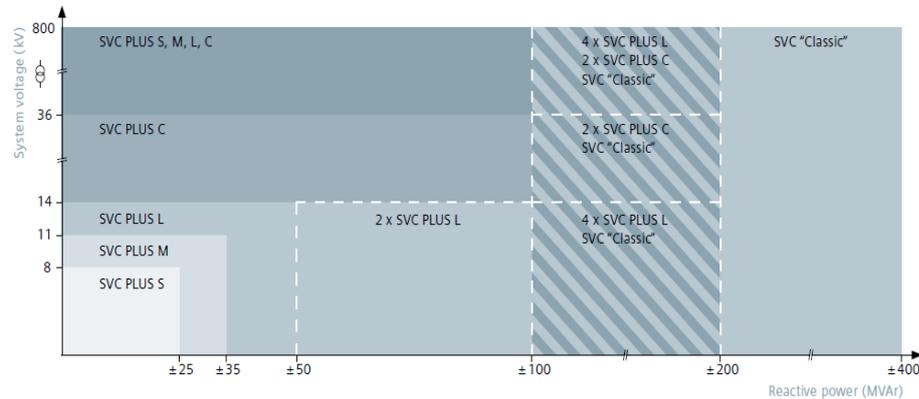
Figura 5 - Plantas instaladas de STATCOM pela SIEMENS na (a) Nova Zelândia e no (b) Reino Unido



Fonte: (SIEMENS, 2011).

A Figura 6 apresenta as faixas de operação da linha SVC PLUS da SIEMENS que dispensam transformadores para tensões de conexão de até 36 kV.

Figura 6 - Modelos de STATCOM produzidos pela SIEMENS



Fonte: (SIEMENS, 2011).

O STATCOM é um equipamento destinado a dar suporte à rede elétrica de maneira a fornecer e absorver energia reativa. Entretanto, o STATCOM pode acumular outras funcionalidades tais como: mitigar conteúdo harmônico (DA CUNHA *et al.*, 2015) (MOHAMMADI ; BINA, 2011), redistribuir o fluxo de potência na rede (DE MORAIS; LESSA TOFOLI ; BARBI, 2016) (JUNG *et al.*, 2018), entre outras, de forma simultânea. Dessa forma, uma solução capaz de compensar o fator de potência, melhorar a forma de onda da corrente no alimentador e manter as correntes equilibradas deve ser capaz de realizar as três funções.

A utilização de conversores chaveados para suporte à rede em sistemas de média e alta tensão é um ramo novo de atuação da eletrônica de potência que ainda não possui solução definitiva, seja pela topologia empregada, sistema de controle ou mesmo estratégia de modulação.

Para contribuir com o desenvolvimento de novas soluções que atendam a demanda do setor de distribuição e transmissão de energia, essa tese apresenta um conversor multiníveis de estrutura modular baseado no conversor CHB conectado em estrela sem transformador para a correção de distúrbios de carga em linhas de transmissão e distribuição em baixa, média e alta tensão.

A topologia do conversor proposto supera a deficiência do CHB conectado em estrela de não possibilitar a troca de energia entre seus braços e se torna competidora com o conversor MMC. Complementarmente, um novo sistema de controle é desenvolvido para atender as necessidades de regulação de tensão do conversor proposto.

Resultados de simulação apresentam a desvantagem do conversor cascata conectado em estrela e a capacidade do conversor proposto em regular as correntes em linhas de distribuição,

tornando-as senoidais, equilibradas, com baixo conteúdo harmônico e elevado fator de potência. O desempenho do conversor proposto é comparado com o MMC, solução mais empregada atualmente.

A experimentação do conversor proposto em escala corrobora com os resultados obtidos por simulação demonstrando a capacidade do conversor proposto.

A tese é dividida nos seguintes tópicos. O capítulo 2 apresenta as principais soluções empregadas no suporte à rede elétrica utilizando conversores multiníveis. As soluções se diferenciam essencialmente quando empregadas em baixa, média ou alta tensão, além da presença ou ausência de transformador de interface.

No capítulo 3 é proposto um novo conversor cascata baseado no CHB conectado em estrela chamado de Conversor Cascata de Ponte Completa Interconectado (iCHB). Em relação ao CHB, o iCHB conta com três indutores conectados em estrela que permitem troca de potência ativa entre os arranjos de células. Esse capítulo demonstra que troca de potência ativa não é possível no CHB e detalha o fluxo de potência no iCHB.

O sistema de controle proposto para iCHB é apresentado no Capítulo 4. Esse sistema possui uma malha a menos que o CHB e a metade das malhas em relação ao MMC, o que traz simplicidade no projeto dos controladores. Modelos que representam o comportamento dinâmico das grandezas elétricas do iCHB são deduzidos e utilizados para o projeto dos controladores.

O capítulo 5 se dedica à apresentação de simulações numéricas do iCHB e dos dois conversores a sob análise, o CHB e o MMC. As características dos conversores são verificadas e o desempenho entre o iCHB e o MMC é comparado diante de cargas não lineares desequilibradas. Figuras de mérito são incluídas para abranger mais características de ambos conversores.

O capítulo 6 apresenta o protótipo implementado e uma descrição breve dos circuitos que o compõem. Após isso, são mostrados os principais resultados dos ensaios com o protótipo, reiterando sua capacidade de regulação das correntes da rede.

A tese se encerra apresentando as principais conclusões deste trabalho, analisando o projeto e o desempenho do conversor proposto. Na sequência são discutidas algumas sugestões para o prosseguimento da pesquisa.

## 2 CONVERSORES MULTINÍVEIS APLICADOS NO SUPORTE À REDE ELÉTRICA

Equation Section (Next)

‘Os conversores multiníveis surgiram da necessidade do compartilhamento dos esforços de tensão e de corrente que aplicações de alta potência e/ou alta tensão exigem. De imediato, a melhora da forma de onda da tensão de saída, entre outros motivos, instigou várias pesquisas tanto nas topologias existentes quanto na criação de novas.

Inúmeras topologias de conversores multiníveis foram desenvolvidas nos últimos anos, iniciando com o NPC no início dos anos 80 (BAKER, 1980), (NABAE; TAKAHASHI ; AKAGI, 1981). Essas topologias podem ser classificadas em dois grupos: modulares e não modulares.

Os conversores multiníveis não modulares, como o conversor com diodos de grameamento e o conversor com capacitores de grameamento (*Flying Capacitor – FC*), apresentam dificuldades de confecção e implementação com grande quantidade de níveis de tensão de saída (RODRIGUEZ; LAI ; PENG, 2002), (BATSCHAUER, 2011). Outro ponto a ser citado é a tensão a qual os elementos grameadores são submetidos. A tensão de bloqueio nos elementos de grameamento é desigual e se eleva conforme aumenta o número de níveis, o que muitas vezes culmina na associação série de diodos e capacitores. Dessa forma, esses conversores ficaram condicionados a projetos com número reduzido de níveis de tensão de saída (AKAGI *et al.*, 2008), (BEHROUZIAN; BONGIORNO ; PARRA, 2013).

O conceito de modularidade está por trás dos conversores conectados diretamente em média e alta tensão. A partir de conversores de mesmas características elétricas e mecânicas, chamadas de células, o simples arranjo série de mais células permite o aumento irrestrito do número de níveis de saída e da tensão total de bloqueio do arranjo (BEHROUZIAN; BONGIORNO ; PARRA, 2013). Dentre os principais conversores modulares multiníveis estão o CHB, conectado em estrela ou em delta, e o MMC.

Um dos principais desafios dos conversores multiníveis é a regulação de tensão de cada capacitor flutuante. No caso dos conversores modulares há um elevado número de células em série, triplicado em configurações trifásicas, que exigem medições isoladas nas quais altas taxas de transmissão de dados são utilizadas (LI; GRÉGOIRE ; BÉLANGER, 2015). Para aplicações como compensador de reativos ou filtro ativo, a correta regulação das tensões das células dos conversores modulares multiníveis é um dos fatores que determinam se a topologia em análise é capaz de cumprir com o objetivo de compensação dos distúrbios nos sistemas de média e alta tensão, uma vez que a manutenção da operação do conversor é garantida.

## 2.1 CONVERSORES MULTINÍVEIS EM BAIXA TENSÃO

Do ponto de vista comercial, os conversores multiníveis conectados em baixa tensão são dominados pelo NPC, pois o FC possui limitação tecnológica (vida útil dos capacitores) e, além das malhas de controle das tensões de barramento, possui malhas de controle adicionais (uma para cada capacitor flutuante).

A experimentação de um NPC de cinco níveis injetando 10 kVAr capacitivo é detalhada em (AKAGI *et al.*, 2008). Entretanto, os autores utilizam circuitos comutados para o balanço da tensão dos capacitores.

Compensando a potência reativa da carga, Shu *et al.* propõem modulação vetorial em conjunto com uma estratégia de mínima variação de energia nos capacitores para o controle das tensões nos capacitores em um NPC de cinco níveis (SHU *et al.*, 2013). Em (BUSQUETS-MONGE *et al.*, 2017) é proposta uma técnica de modulação que permite a regulação de tensão dos capacitores do NPC extensível para  $n$  níveis e  $p$  braços.

## 2.2 CONVERSORES MULTINÍVEIS EM MÉDIA E ALTA TENSÃO

Conversores a serem conectados em sistemas de média e alta tensão devem suportar tensões de linha da ordem de dezenas e centenas de kV. A tecnologia de interruptores limita a tensão de bloqueio de IGBTs, com relatos de utilização de semicondutores com tensão de bloqueio de 3,3 kV (GULTEKIN ; ERMIS, 2013) e 4,5 kV (KOYAMA *et al.*, 2015). Com isso, a operação de conversores derivados do conversor meia ponte e do conversor ponte completa fica inviável sem a utilização de um transformador elevador. Entretanto, esses transformadores usualmente operam na frequência fundamental e são volumosos, pesados e caros. Além disso, a energia gasta no elemento magnético pode corresponder a 70% das perdas da aplicação como um todo (LEE *et al.*, 2003) e 40% da área instalada (PENG ; LAI, 1997).

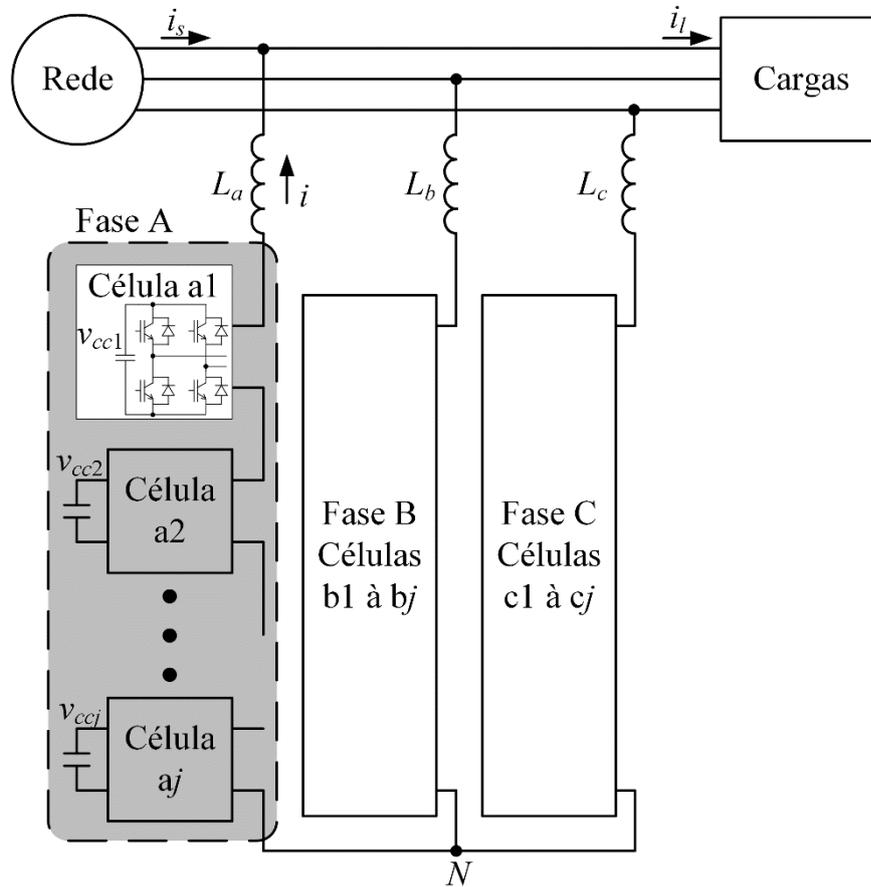
### 2.2.1 CHB conectado em estrela

O conversor CHB é um arranjo série de  $n$  células de conversores ponte completa, cada uma com um acumulador de energia flutuante. Tradicionalmente, o acumulador é do tipo capacitivo, porém há também acumuladores do tipo indutivo (BAIER *et al.*, 2013), (BAIER *et al.*, 2015), (BHESANIYA ; SHUKLA, 2016). O arranjo série de conversores ponte completa é chamado de braço (*cluster* ou *leg*).

A combinação dos braços em estrela é apresentada na Figura 7. Nessa configuração, o CHB é especificado pela tensão de fase do sistema de distribuição. O ponto central do CHB

(com o potencial  $N$ ) geralmente é flutuante, não sendo referenciado a outros pontos do sistema de distribuição.

Figura 7 - Conversor cascata conectado em estrela



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Um dos primeiros usos de um conversor cascata de ponte completa conectado em estrela aplicado à compensação de reativos foi apresentado por Peng, utilizando tiristores (PENG *et al.*, 1995) e transistores (PENG ; LAI, 1997). Um CHB com modulação em alta frequência foi apresentado por (LIANG ; NWANKPA, 1999).

A principal desvantagem do CHB conectado em estrela operando em sistemas de distribuição é a impossibilidade de troca de energia entre os braços (SONG ; LIU, 2009), (BEHROUZIAN ; BONGIORNO, 2017), (AKAGI, 2011), (PENG ; WANG, 2004), (BARRENA *et al.*, 2008), a qual se faz necessária quando o sistema é desequilibrado, o que dificulta ainda mais o controle das tensões dos capacitores.

Para casos equilibrados, (AKAGI; INOUE ; YOSHII, 2007) apresenta uma metodologia de projeto para CHB processando apenas potência reativa na frequência fundamental. Para

tanto, uma componente senoidal em fase com a tensão de saída é somada à saída do controlador de corrente, forçando o aparecimento de uma componente de potência ativa. Essa componente de potência repõe a energia perdida durante a operação e compensa variações paramétricas das células.

Para CHBs processando potência ativa, a mesma metodologia se aplica. Entretanto, é necessária a alimentação externa dos capacitores das células (AKAGI, 2017) ou sistemas de acúmulo de energia de grandes proporções (MAHARJAN *et al.*, 2008).

Nos casos onde as cargas e/ou a rede possuem desequilíbrios, a regulação de tensão dos capacitores é afetada e demanda estratégias específicas. Como será demonstrado na Seção 3.1, o CHB não possui meios para a transferência de energia entre seus braços. Dessa forma, em situações com desequilíbrios de carga e/ou de rede, o CHB em estrela perde desempenho na mitigação dos distúrbios de carga em detrimento da manutenção de sua operação.

Em (BEHROUZIAN ; BONGIORNO, 2017) os autores investigam a capacidade de injeção de componente de sequência zero na tensão de saída. A componente de sequência zero de tensão afeta o balanço de energia de cada braço. Com base nisso, os autores propõem uma estratégia de controle que utiliza injeção de componente de sequência zero nas tensões de saída com magnitude e fase determinadas pelas potências medidas nos braços, sendo a magnitude da tensão tão maior quanto mais desequilíbrio houver nas correntes de carga. Assim, o equilíbrio das tensões das células é atingido. Em contrapartida, a injeção de tensão de sequência zero demanda maior tensão cc nas células para a correta síntese da tensão de saída e as correntes de rede ainda permanecem desequilibradas.

Nessa mesma linha de raciocínio, (SONG ; LIU, 2009) apresenta um sistema de controle no qual é aplicada uma tensão de sequência zero à saída do CHB. Essa tensão de sequência zero é calculada a partir das correntes de referência do CHB e permite o cancelamento das potências ativas absorvidas/drenadas por cada braço. Assim como apresentado em (BEHROUZIAN ; BONGIORNO, 2017), a adição de componentes de sequência zero na tensão de saída aumenta significativamente o índice de modulação, o que limita a capacidade de supressão da componente de sequência negativa da carga na rede.

Chen, *et al.* apresentam uma técnica de controle que pondera a injeção de componentes de sequência negativa e zero durante afundamento de 100% em uma das fases do alimentador (CHEN *et al.*, 2016). Somente com componente de sequência zero, as correntes de rede ficam equilibradas. Adicionando parcelas de componentes de sequência negativa o equilíbrio das tensões do CHB é estabelecido, mas não das correntes de rede. O desequilíbrio das correntes

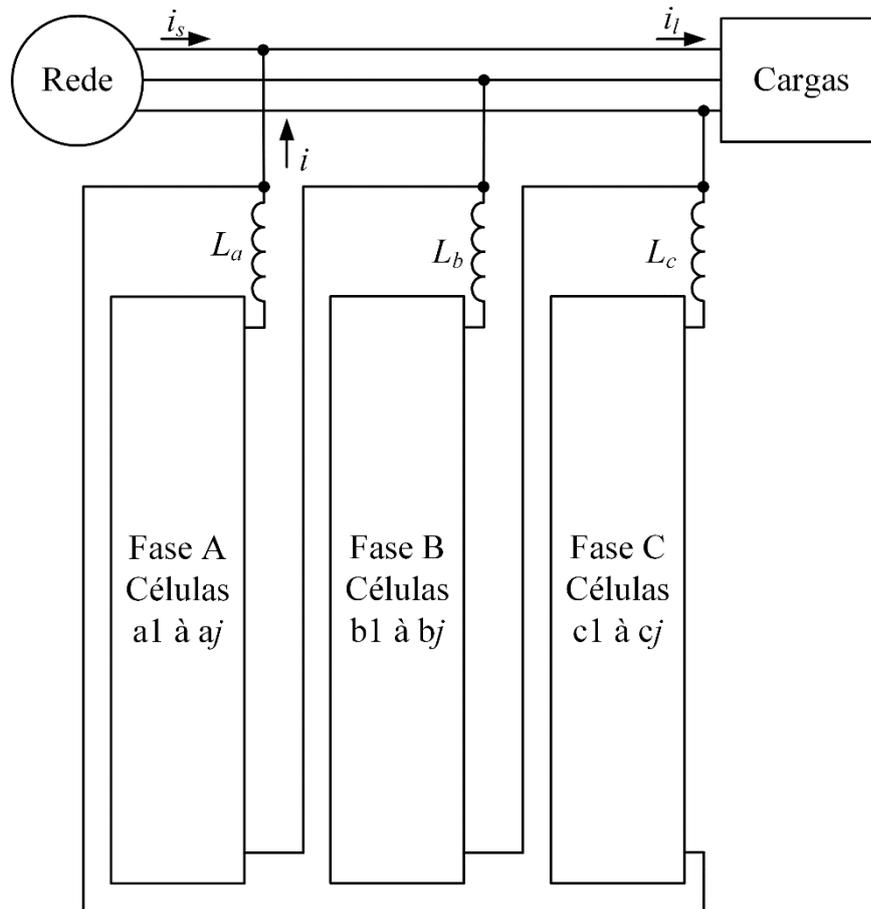
da rede aumenta proporcionalmente à parcela destinada para componente de sequência negativa injetada.

É importante ressaltar que, em nenhum dos artigos citados, cargas desequilibradas foram aplicadas aos sistemas investigados.

### 2.2.2 CHB conectado em delta

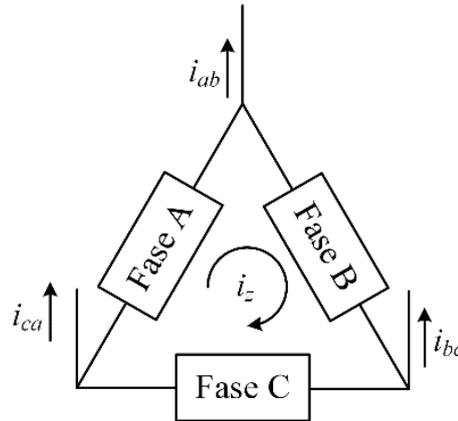
A combinação dos braços em delta é apresentada na Figura 8, de tal forma que os braços do CHB ficam submetidos à tensão de linha. A ligação das células em delta cria um caminho de corrente interno ao CHB ( $i_z$ ), conforme mostra a Figura 9, que é utilizado como grau de liberdade para o sistema de controle.

Figura 8 - Conversor cascata conectado em delta



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Figura 9 - Representação simplificada do CHB conectado em delta evidenciando a corrente de circulação



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

O conversor CHB conectado em delta foi proposto por (PENG ; WANG, 2004) como alternativa ao CHB conectado em estrela para mitigar os efeitos de cargas desequilibradas. Porém, a proposta não considera a regulação das tensões das células nem faz menção à corrente de circulação (HAGIWARA; MAEDA ; AKAGI, 2012).

Assim como todos os CHBs, a regulação de tensão de cada célula é ponto chave para correta operação. Para tanto, diversas técnicas de controle vêm sendo desenvolvidas. A primeira validação experimental foi realizada por (HAGIWARA; MAEDA ; AKAGI, 2012) para o controle de componente de sequência negativa, onde os autores propõem um sistema de controle semelhante ao controle do CHB conectado em estrela com a adição de uma malha específica para a corrente de circulação. A corrente de circulação foi definida como um sinal senoidal na frequência fundamental do sistema com a mesma amplitude e fase para os três braços (HAGIWARA; MAEDA ; AKAGI, 2012), (NIEVES *et al.*, 2014).

Liu *et al* utilizam vetores ativos superpostos com as tensões de saída para alterar o consumo ou o fornecimento de potência ativa do CHB (LIU *et al.*, 2012). Diferentemente das técnicas apresentadas em (AKAGI; INOUE ; YOSHII, 2007) (MAHARJAN; INOUE ; AKAGI, 2008), o vetor resultante da superposição está em fase com o vetor da corrente do braço, e não com a parcela reativa dessa corrente. Com isso, a deficiência de regulação com baixos valores de corrente reativa é contornada.

De forma análoga ao apresentado para o CHB conectado em estrela, (BEHROUZIAN ; BONGIORNO, 2017) apresenta a utilização de componente de sequência zero como corrente de circulação do CHB conectado em delta. Resultados semelhantes são obtidos tanto para o CHB conectado em delta quanto o CHB conectado em estrela.

Ao contrário de (HAGIWARA; MAEDA ; AKAGI, 2012), Du *et al* propõem a inserção de componentes no terceiro e quinto harmônicos (DU; LIU ; LIN, 2013) para um CHB híbrido, sendo o terceiro harmônico responsável pelo equilíbrio interno do braço e o quinto harmônico pela transferência de energia entre os braços.

Aliado à injeção de corrente de sequência zero para a regulação das tensões das células, a técnica de controle proposta por (WU *et al.*, 2017) insere um limite de corrente que circula pelos braços do CHB, evitando atuação de proteções por sobrecarga e eventuais danos. Entretanto, a limitação de corrente de braço sacrifica parcialmente a capacidade de mitigação dos distúrbios das cargas no sistema.

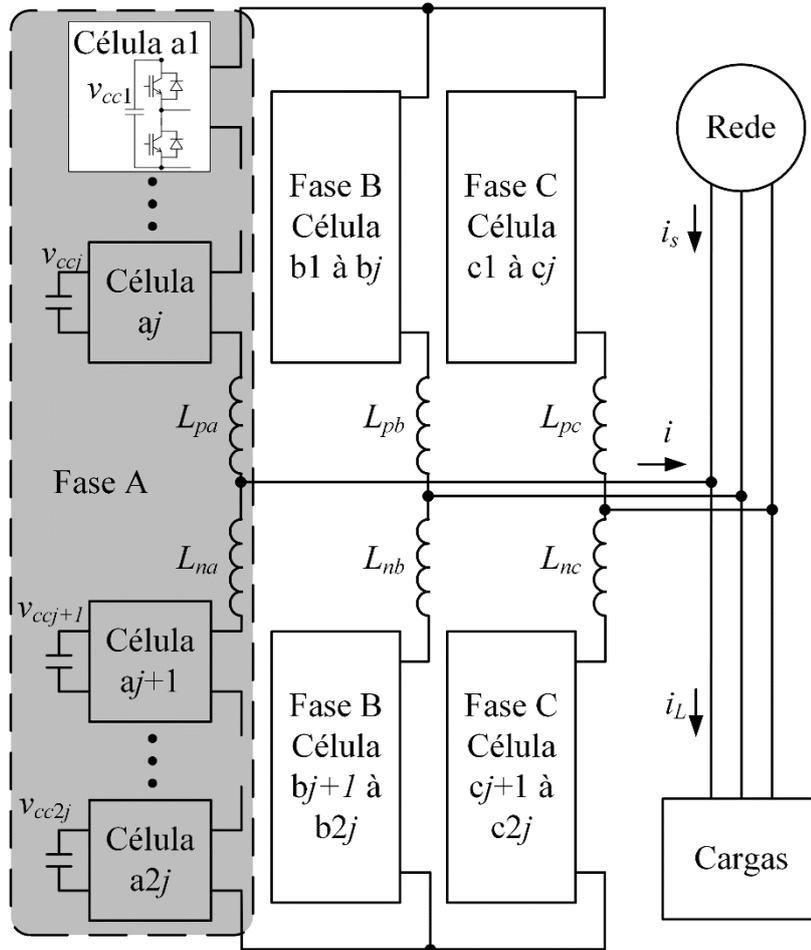
### 2.2.3 Conversor Modular Multiníveis

O MMC foi patenteado por (MARQUARDT, 2002). Em 2003 Lesnicar e Marquadt apresentaram o MMC como uma nova configuração de células meia ponte em série (LESNICAR ; MARQUARDT, 2003), conforme mostra a Figura 10. Entretanto, o MMC não é limitado a configuração meia ponte (SOLAS *et al.*, 2013), (YU; WEI ; JIANG, 2016).

Após a divulgação do MMC, problemas surgiram acerca da nomenclatura dos conversores, pois o conversor cascata também é modular e multiníveis. Tal assunto motivou Akagi a redigir um artigo específico para a readequação e uniformização das nomenclaturas (AKAGI, 2011). Assim, o conversor MMC passou a ser denominado por Akagi como o conversor dupla estrela com módulos meia ponte (*Double Star Chopper Cell – DSCC*) ou dupla estrela com módulos ponte completa (*Double Star Bridge Cell – DSBC*). O conversor cascata conectado em estrela passou a ser denotado como conversor estrela simples com módulos ponte completa (*Single Star Bridge Cell – SSBC*) e a conexão em delta como conversor delta simples com módulos ponte completa (*Single Delta Bridge Cell – SDBC*). Apesar da sugestão de nomenclatura por Akagi, este documento utilizará a nomenclatura apresentada.

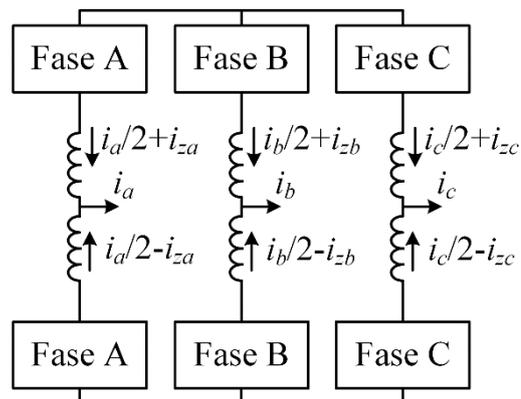
Assim como o CHB conectado em delta, o MMC possui corrente circulante, uma para cada braço, como representado na Figura 11 por  $i_{za}$ ,  $i_{zb}$  e  $i_{zc}$ . Essa corrente que circula pelos braços gera graus de liberdade para o sistema de controle.

Figura 10 - Conversor Modular Multinível



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Figura 11 - Representação simplificada do MMC evidenciando as correntes de circulação



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

O primeiro sistema de controle das tensões dos capacitores do MMC, juntamente com resultados experimentais, foi apresentado em (HAGIWARA ; AKAGI, 2009). A corrente de circulação possui uma componente na frequência fundamental, retirando energia dos

capacitores e enviando à rede, além de possibilitar a troca de energia entre os polos; e uma componente contínua que controla a tensão total do braço. Entretanto, (HAGIWARA ; AKAGI, 2009) retiram energia de fontes cc em paralelo com os braços.

Posteriormente, os autores propõem um sistema de controle para um MMC conectado à rede (HAGIWARA; MAEDA ; AKAGI, 2011). Análises do MMC são expandidas e o controle das tensões de braço é criado, mas o controle da corrente de circulação é essencialmente o mesmo.

Du e Liu propõem a utilização de terceiro harmônico na corrente de circulação para o MMC, aprimorando a transferência de energia entre os ramos superiores e inferiores (DU ; LIU, 2013).

A associação em paralelo de dois ou mais MMCs a quatro fios com indutores acoplados é apresentada por (MOHAMMADI ; BINA, 2011), onde os MMCs compartilham também os barramentos cc positivo e negativo. Essa associação permite redução significativa na ondulação de corrente de saída e a distribuição dos esforços de corrente entre os MMCs.

### 2.3 CONCLUSÃO

As topologias de conversores multiníveis para a conexão em sistemas de distribuição foram apresentadas, bem como uma revisão das técnicas desenvolvidas para a regulação das tensões desses conversores.

Os conversores NPC e FC se mostram pouco adequados a sistemas de média e alta tensão sem a utilização de transformadores devido à complexidade de extensão do número de níveis de saída e um número elevado de componentes grampeadores em série.

Por outro lado, os conversores modulares apresentam características que permitem a operação tanto com número reduzido de níveis quanto com arranjos na ordem de centenas células. Visando um conversor com topologia única para a operação em sistemas de baixa, média e alta tensão, o conversor proposto deve se basear em uma topologia multinível e modular.



### 3 CONVERSOR CASCATA PROPOSTO

Equation Section (Next)

Esse capítulo apresenta uma nova topologia multinível trifásica baseada em células de conversores ponte completa conectadas em cascata, formando arranjos em estrela, para aplicações como compensador de reativos e filtro ativo. A nova topologia, chamada de Conversor Cascata de Ponte Completa Interconectado (iCHB), se baseia na topologia do CHB conectado em estrela. A principal distinção entre o CHB conectado em estrela e o iCHB é a inserção de três indutores conectados ao polo positivo das células superiores de cada arranjo, os quais permitem a transferência de potência entre os braços do iCHB.

A incapacidade do CHB conectado em estrela de realizar transferência de energia entre as fases é bem conhecida (CHEN *et al.*, 2016), e será demonstrada ao longo do capítulo. Com isso, o CHB conectado em estrela é capaz de fornecer corrente de sequência negativa de forma limitada (BEHROUZIAN ; BONGIORNO, 2017), sendo, portanto, incapaz de suprir os desequilíbrios de carga de forma plena.

A nova topologia, que é proposta nessa tese, vem de forma a suprir a principal incapacidade do CHB conectado em estrela perante a principal topologia empregada, i.e. o MMC. Para a correta compreensão da topologia proposta, os fluxos de potência do iCHB serão apresentados em detalhes.

Os fluxos de potência ativa entre o iCHB e a rede, entre as células de cada braço e entre os braços do iCHB são explorados e a interdependência entre esses fluxos de potência é evidenciada.

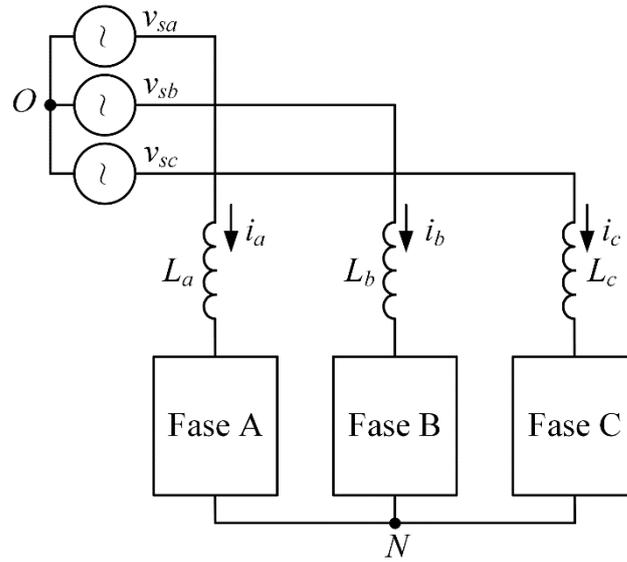
A corrente de circulação, sendo o elemento novo em relação ao CHB conectado em estrela, terá tratamento diferenciado com o intuito de apresentar as peculiaridades da ligação indutiva entre os braços do iCHB.

A fim de simplificar a notação, os seguintes sufixos são adotados:  $x$  é igual a  $a$ ,  $b$  ou  $c$  e representa a fase; e  $j$  é igual a  $1, 2, \dots, n$  e representa a célula das fases.

#### 3.1 ANÁLISE DO FLUXO DE POTÊNCIA ATIVA DO CONVERSOR CASCATA CONVENCIONAL

A análise completa do fluxo de potência ativa no conversor CHB convencional é apresentada em (CHEN *et al.*, 2016). Para a determinação do fluxo de potência ativa, o CHB é representado pelo circuito equivalente mostrado na Figura 12, onde as cargas são desprezadas bem como a queda de tensão nos indutores  $L_x$ .

Figura 12 -Representação simplificada do CHB



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

A tensão da rede referenciada ao potencial  $O$  é escrita como a soma de três componentes: a tensão de sequência positiva  $v_{sx}^p$ , tensão de sequência negativa  $v_{sx}^n$  e tensão de sequência zero  $v_{sx}^0$ .

$$v_{sx} = v_{sx}^p + v_{sx}^n + v_{sx}^0 \quad (3.1)$$

De forma semelhante, a corrente do CHB pode ser escrita em termos de sequência positiva e negativa. Devido à falta de conexão entre os potenciais  $O$  e  $N$ , não há componente de corrente de sequência zero.

$$i_x = i_x^p + i_x^n \quad (3.2)$$

Como as tensões e as correntes possuem componentes de sequência positiva e negativa, as tensões e correntes são transformadas para o eixo de coordenadas síncronas  $dq0$  em duas parcelas com o auxílio das matrizes de transformação (KRAUSE *et al.*, 2013). Enquanto a primeira parcela utiliza  $\omega$  para as componentes de sequência positiva, a segunda parcela utiliza  $-\omega$  para as componentes de sequência negativa, conforme:

$$\begin{bmatrix} V_{sd}^p \\ V_{sq}^p \end{bmatrix} = K_{dq0}^{\omega} \cdot \begin{bmatrix} v_{sa}^p \\ v_{sb}^p \\ v_{sc}^p \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\begin{bmatrix} V_{sd}^n \\ V_{sq}^n \end{bmatrix} = K_{dq0}^{-\omega} \cdot \begin{bmatrix} v_{sa}^n \\ v_{sb}^n \\ v_{sc}^n \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$\begin{bmatrix} I_d^p \\ I_q^p \end{bmatrix} = K_{dq0}^\omega \cdot \begin{bmatrix} i_a^p \\ i_b^p \\ i_c^p \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$\begin{bmatrix} I_d^n \\ I_q^n \end{bmatrix} = K_{dq0}^{-\omega} \cdot \begin{bmatrix} i_a^n \\ i_b^n \\ i_c^n \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

A potência ativa drenada por cada braço pode ser calculada como:

$$P_x = \frac{1}{T} \int_0^T (v_{sx}^p + v_{sx}^n) \cdot (i_x^p + i_x^n) dt \quad (3.7)$$

Aplicando as transformadas (3.3) à (3.6) em (3.7) e agrupando os termos, a potência total absorvida pelo conversor é obtida através da soma de  $P_a$ ,  $P_b$  e  $P_c$  e resulta em:

$$P_T = \frac{3}{2} (I_d^p V_{sd}^p + I_q^p V_{sq}^p + I_d^n V_{sd}^n + I_q^n V_{sq}^n) \quad (3.8)$$

Para a correta regulação das tensões do CHB ideal, cada fase deve absorver a mesma parcela de potência ativa. Subtraindo a potência absorvida de cada fase por um terço da potência total, tem-se que a diferença de potência ativa é dada por:

$$\begin{aligned} \Delta P_a &= P_a - \frac{P_T}{3} = \frac{I_q^n V_{sq}^p - I_d^p V_{sd}^n - I_d^n V_{sd}^p + I_q^p V_{sq}^n}{2} \\ \Delta P_b &= P_b - \frac{P_T}{3} = \frac{I_d^n V_{sd}^p + I_d^p V_{sd}^n - I_q^n V_{sq}^p - I_q^p V_{sq}^n}{4} + \frac{\sqrt{3} I_d^n V_{sq}^p + \sqrt{3} I_d^p V_{sq}^n + \sqrt{3} I_q^n V_{sd}^p + \sqrt{3} I_q^p V_{sd}^n}{4} \\ \Delta P_c &= P_c - \frac{P_T}{3} = \frac{I_d^n V_{sd}^p + I_d^p V_{sd}^n - I_q^n V_{sq}^p - I_q^p V_{sq}^n}{4} + \frac{-\sqrt{3} I_d^n V_{sq}^p - \sqrt{3} I_d^p V_{sq}^n - \sqrt{3} I_q^n V_{sd}^p - \sqrt{3} I_q^p V_{sd}^n}{4} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Para que cada braço receba a mesma parcela de energia os termos  $\Delta P_a$ ,  $\Delta P_b$  e  $\Delta P_c$  devem ser nulos. Com base nas expressões apresentadas em (3.9), verifica-se que as diferenças de potência ativa no CHB possuem componentes de sequência positiva e negativa. O equilíbrio de potência, portanto, só pode ser atingido com componentes de sequência negativa de tensão e/ou corrente. Componentes de corrente na sequência negativa não são admitidas quando se busca a regulação das correntes do alimentador pois são essas componentes que provocam desequilíbrio de corrente.

Como mostrado na Seção 2.2.1 e a exemplo de (CHEN *et al.*, 2016), há trabalhos que se utilizam de injeção de componentes de tensão de sequência zero para a regulação das tensões dos braços. Então, outras componentes de potência se somam em (3.9). O equilíbrio de tensão no CHB é atingido, mas as componentes de sequência negativa nas correntes do alimentador podem não ser totalmente eliminadas. A eliminação dos distúrbios de corrente do alimentador

está diretamente ligada ao índice de modulação, que cessa a compensação quando se aproxima da unidade. Como citado em (HATANO ; ISE, 2010) e (DU ; LIU, 2013), um grande aumento das tensões das células, e por consequência maior capacidade de injeção de tensão de componente de sequência zero, é considerado não prático e até inadmissível em sistemas em média tensão.

Dessa forma, é demonstrado que o CHB não é uma topologia adequada para a compensação de desequilíbrios de corrente de redes de distribuição e que outras topologias modulares devem ser pesquisadas para atender as demandas dessa aplicação.

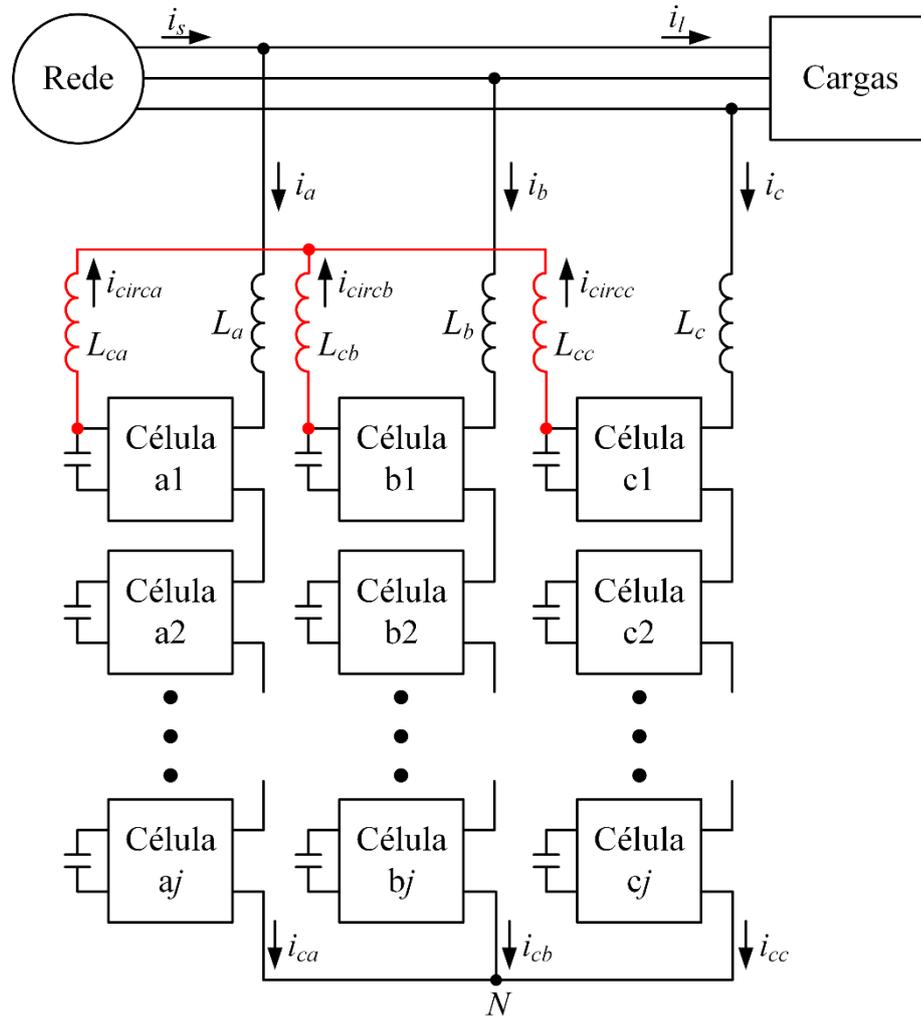
### 3.2 TOPOLOGIA PROPOSTA DO iCHB

Para permitir a troca de potência ativa entre os braços, caminhos de corrente devem existir entre eles. Como cada célula do CHB possui características de fonte de tensão, esses caminhos de corrente devem ser constituídos de elementos indutivos para garantir uma conexão segura e sem perdas entre os capacitores. O conversor iCHB proposto é apresentado na Figura 13, com três indutores de circulação ( $L_{cx}$ ) conectados às células a1, b1 e c1 em forma de estrela. As células às quais são ligados os indutores  $L_{cx}$  são denominadas de células superiores e as demais células, abaixo da interligação indutiva, são denominadas de células inferiores.

A interconexão indutiva dos braços do iCHB não é restrita à topologia proposta. Diferentes possibilidades são discutidas no Apêndice A. As células a1, b1 e c1 foram escolhidas para serem as células superiores para se manter próximas as potências processadas por todas as células do iCHB, mantendo o conceito de modularidade.

O conversor iCHB proposto permite a utilização das mesmas técnicas de modulação empregadas em outros conversores multiníveis, mais precisamente as empregadas no CHB. Entretanto, a modulação por deslocamento em fase se mostra mais vantajosa para essa aplicação, pois distribui uniformemente o número e os tempos de comutação e, por consequência, as perdas de comutação e condução nos semicondutores. Mais informações sobre estratégias de modulação são apresentadas em detalhes em (BATSCHAUER, 2011).

Figura 13 - Conversor Cascata em Ponte Completa Proposto



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

### 3.3 ANÁLISE DO FLUXO DE POTÊNCIA ATIVA DO CONVERTOR CASCATA PROPOSTO

O conversor iCHB apresenta fluxos de potência mais complexos em comparação com o CHB. O grau de liberdade criado pela interconexão dos braços do iCHB é utilizado para garantir o equilíbrio das correntes do alimentador.

O fluxo de potência do iCHB é dividido em duas análises. A primeira análise trata da interação do iCHB com o sistema de distribuição e suas cargas. Nessa análise, é determinada a potência ativa e a potência reativa que o iCHB deve processar em cada fase.

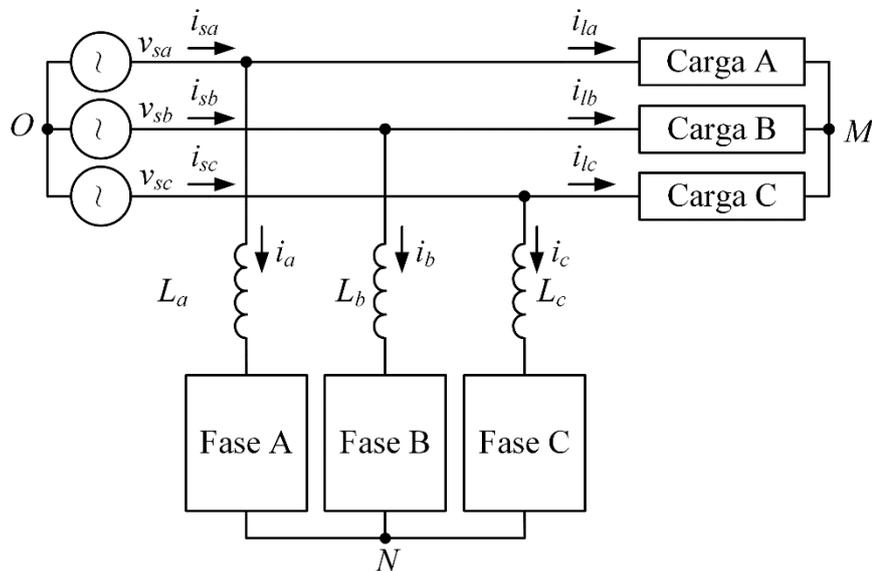
Uma vez definidas as potências processadas, a segunda análise traz o fluxo de potência que equilibra a energia acumulada em cada braço e nas células que os compõem.

### 3.3.1 Análise do fluxo global de potência

O fluxo global de potência determina a potência ativa e reativa que o iCHB deve processar para eliminar efeitos dos desequilíbrios e distorções provenientes das cargas no alimentador.

Para a análise do fluxo global de potência entre o iCHB e a rede, o iCHB é representado pelo circuito equivalente mostrado na Figura 14, no qual cada fase do iCHB permite a absorção e o fornecimento irrestrito de potência ativa e reativa. Os indutores de circulação são omitidos nessa análise pois não influenciam no fluxo global de potência.

Figura 14 - Representação simplificada do iCHB



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

As cargas conectadas ao sistema são consideradas lineares e desequilibradas, de tal forma que consomem valores de potência ativa e reativa distintos, conforme (3.10).

$$S_{lx} = v_{lx} i_{lx} = P_{lx} + jQ_{lx} \quad (3.10)$$

Entretanto, do ponto de vista do alimentador, é desejado que o fator de potência seja unitário e as correntes sejam senoidais e equilibradas. Assim, a potência no alimentador é escrita como:

$$S_{sx} = v_{sx} i_{sx} = P_s \quad (3.11)$$

com  $P_s$  definida como:

$$P_s = \frac{P_{la} + P_{lb} + P_{lc}}{3} \quad (3.12)$$

Conseqüentemente, o iCHB deve processar a diferença entre o que se deseja no alimentador e o que a carga consome, acrescido de suas perdas  $P_{loss}$ , o que resulta em:

$$P_x = P_{lx} - P_s + P_{loss} \quad (3.13)$$

O valor de potência reativa que o iCHB absorve é o oposto ao da potência reativa da carga, como segue:

$$Q_x = -Q_{lx} \quad (3.14)$$

A potência aparente processada pelo iCHB é escrita então:

$$S_x = P_x + jQ_x \quad (3.15)$$

Cargas não lineares demandam tratamento diferenciado. A potência ativa das cargas não lineares é somada com  $P_{lx}$  e a potência reativa é somada com  $Q_{lx}$ . Já o conteúdo harmônico gerado pelas cargas é totalmente compensado pelo iCHB, da mesma forma que ocorre com  $Q_{lx}$ . Então, a presente análise, para simplificar o entendimento, não fará distinção entre a potência reativa na frequência fundamental e o conteúdo harmônico. O conteúdo harmônico gerado será considerado como parte de  $Q_{lx}$ , compondo uma parcela de  $Q_x$ . Assim, a atenuação do desequilíbrio de potência ativa segue sendo com base na média das potências ativas de cada fase e o iCHB processa todo o conteúdo harmônico das correntes de carga, da mesma forma que ocorre com a potência reativa.

### 3.3.2 Análise interna do fluxo de potência ativa

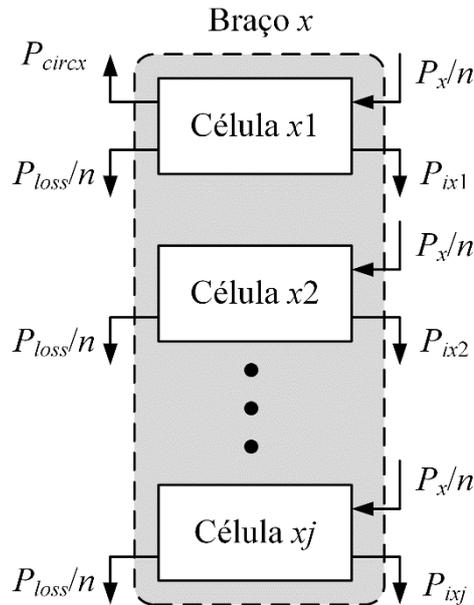
A análise global do fluxo de potência ativa do conversor iCHB determina a potência ativa que cada braço do conversor iCHB deve absorver ou injetar no ponto de conexão a fim de garantir correntes senoidais, equilibradas e com alto fator de potência no alimentador.

A diferença entre a potência que o braço absorve da rede ( $P_x$ ) e as perdas intrínsecas de operação desse braço ( $P_{loss}$ ) deve ser, então, transferida entre os braços para promover regulação adequada da tensão das células do iCHB. A transferência de energia evita que as tensões das células aumentem ou diminuam além dos limites seguros e, com isso, ocorra a interrupção da operação do iCHB por sub ou sobretensões.

Devido à conexão dos indutores, as células superiores possuem fluxo de potência diferente das demais células. As células inferiores têm comportamento idêntico aos conversores ponte completa convencionais utilizados em CHBs. Já as células superiores são afetadas diretamente pelo fluxo de potência transferida entre os braços do iCHB.

O fluxo de potência das células é dividido em quatro parcelas distintas, cada uma proveniente de um aspecto diferente do iCHB, e pode ser visto de forma simplificada na Figura 15.

Figura 15 - Representação simplificada do fluxo de potência das células  $x1$  à  $xj$



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

As células superiores possuem quatro parcelas de potência ativa distintas, enquanto as inferiores possuem apenas três. A potência de entrada  $P_x$  é dividida igualmente entre as  $n$  células em série do braço. Apesar de as células superiores processarem potência diferente das células inferiores, nesta análise as perdas intrínsecas à operação das células são consideradas iguais para todas as células do iCHB e estão representadas como  $P_{loss}/n$ . A potência transferida entre as células de cada braço é representada por  $P_{ixj}$ . Para as células superiores há também a potência transferida entre os braços, representada por  $P_{circx}$ .

Como premissa básica de funcionamento, a soma das potências de cada célula deve ser obrigatoriamente igual a zero. Assim, para as células superiores vale:

$$\frac{P_x}{n} = P_{circx} + \frac{P_{loss}}{n} + P_{ix1} \quad (3.16)$$

e para as demais células:

$$\frac{P_x}{n} = \frac{P_{loss}}{n} + P_{ixj} \quad (3.17)$$

Pode ser visto que a redistribuição individual de potência ( $P_{ixj}$ ) dentro de cada braço se faz imprescindível, que não se limita apenas à correção de pequenas variações paramétricas, função original nos CHB, mas realiza a transferência de uma parte da potência de circulação.

Enquanto o braço recebe  $P_x$  do ponto de conexão, o excesso ou a escassez de potência ( $P_x/n - P_{loss}/n$ ) das células inferiores do braço deve ser transferido às células superiores que, através de  $L_{cx}$ , transferem a potência para os braços deficitários ou excedentes, conforme visto na Figura 13.

Por se tratar de redistribuição de potência dentro de cada braço, a potência transferida entre as células respeita a relação:

$$P_{ix1} = - \sum_{j=2}^n P_{ixj} \quad (3.18)$$

Assim, a potência de circulação das células superiores é escrita como:

$$P_{circx} = \frac{P_x}{n} - \frac{P_{loss}}{n} + \sum_{j=2}^n P_{ixj} \quad (3.19)$$

Substituindo (3.17) em (3.19), o fluxo de potência do braço  $x$  é escrito por:

$$P_{circx} = P_x - P_{loss} \quad (3.20)$$

Segundo (3.13), o equilíbrio da rede é atingido com:

$$P_a + P_b + P_c = 3P_{loss} \quad (3.21)$$

o que impõe que:

$$\sum_{x=a}^c P_{circx} = 0 \quad (3.22)$$

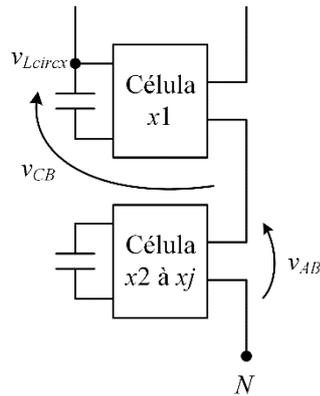
O caminho pelo qual a potência a ser transferida surge por meio dos indutores de circulação. Portanto, para a determinação de  $P_{circx}$ , se faz necessário quantificar a corrente de circulação.

### 3.4 ANÁLISE DA CORRENTE DE CIRCULAÇÃO

A corrente de circulação surge da adição dos indutores de circulação à estrutura CHB clássica e permite a troca de potência ativa entre os braços. A quantificação dessa corrente é de suma importância para o conversor iCHB.

Para a determinação da corrente de circulação entre os braços, a tensão aplicada a cada indutor ( $v_{Lcircx}$ ), em relação ao potencial  $N$ , precisa ser calculada. A análise da corrente de circulação é facilitada com a distinção entre as células superiores e inferiores, como mostrado na Figura 16. Cada grupo de células apresenta comportamento diferente e, portanto, contribui com tensões diferentes.

Figura 16 -Representação simplificada de um braço do iCHB



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

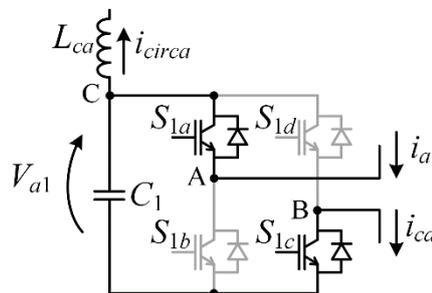
É válido ressaltar que cada célula inferior de um determinado braço contribui, idealmente, com a mesma tensão de saída e a análise que segue considera essa premissa.

### 3.4.1 Etapas de operação das células superiores

As células superiores do iCHB, as quais são conectados os indutores de circulação, possuem quatro etapas de operação. Entretanto, algumas particularidades surgem de tal conexão em relação às células inferiores.

A Figura 17 apresenta a primeira etapa de operação, sendo escolhida a célula a1 a título de exemplo. Os semicondutores  $S_{1a}$  e  $S_{1c}$  são comandados a conduzir e a tensão de saída ( $v_{AB}$ ) equivale à tensão do capacitor ( $V_{a1}$ ). Nessa etapa de operação a tensão  $v_{CB}$  também é igual a  $V_{a1}$ .

Figura 17 -Primeira etapa de operação da célula superior



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

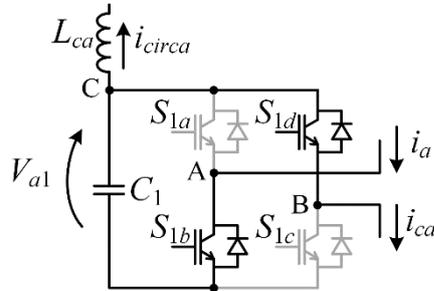
Analisando o nó C, a corrente interna, que circula nas células inferiores, é a subtração entre  $i_a$  e  $i_{circa}$ , como segue:

$$i_{ca} = i_a - i_{circa} \quad (3.23)$$

e é válida para todas as etapas de operação.

A segunda etapa de operação ocorre com o comando de  $S_{1b}$  e  $S_{1d}$ , conforme a Figura 18. A tensão de saída durante a segunda etapa é igual a  $-V_{a1}$ , enquanto  $v_{CB}$  é nula.

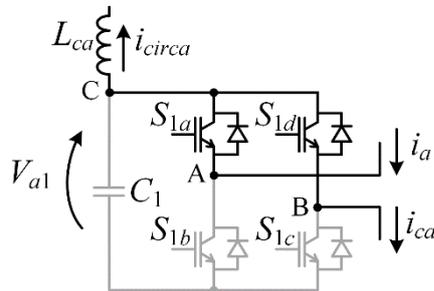
Figura 18 -Segunda etapa de operação da célula superior



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

A terceira etapa de operação inicia com o comando de  $S_{1a}$  e  $S_{1d}$ , como mostra a Figura 19. A tensão de saída é nula, bem como  $v_{CB}$ .

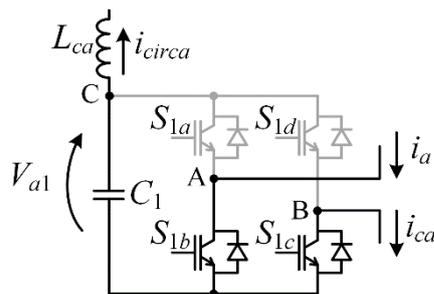
Figura 19 -Terceira etapa de operação da célula superior



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

A Figura 20 apresenta a quarta etapa de operação com o comando de  $S_{1b}$  e  $S_{1c}$ . A tensão  $v_{AB}$  é nula, porém  $v_{CB}$  é igual a  $V_{a1}$ .

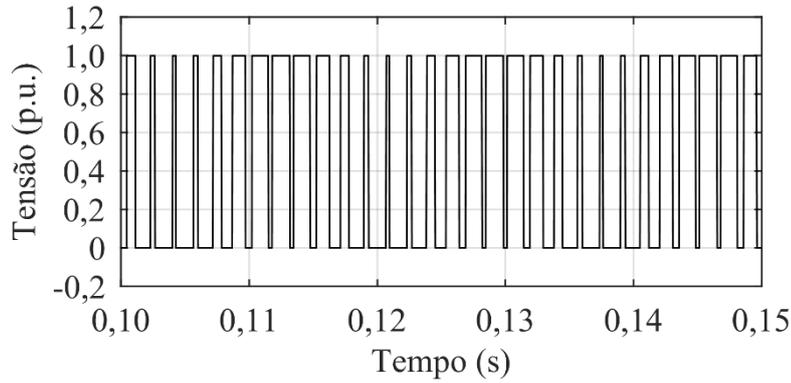
Figura 20 -Quarta etapa de operação da célula superior



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

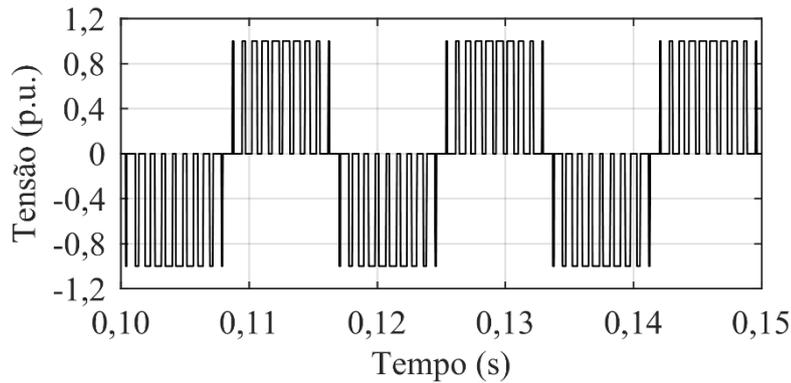
As formas de onda de  $v_{CB}$  e  $v_{AB}$  normalizadas por  $V_{aj}$  resultantes das etapas de operação para uma saída senoidal e modulação por deslocamento em fase são apresentadas na Figura 21 e na Figura 22, respectivamente.

Figura 21 -Forma de onda de  $v_{CB}$  para modulação por deslocamento em fase



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Figura 22 -Forma de onda de  $v_{AB}$  para modulação por deslocamento em fase



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Decompondo as formas de onda de  $v_{CB}$  e  $v_{AB}$  utilizando a transformada de Fourier, e considerando apenas as componentes contínuas e na frequência fundamental, pode-se escrever:

$$v_{AB} = V_{aj} \cdot m_{aj} \quad (3.24)$$

$$v_{CB} = \frac{V_{aj}}{2} + \frac{V_{aj}}{2} \cdot m_{aj} \quad (3.25)$$

onde  $m_{aj}$  é o índice de modulação da célula definido como a razão entre o valor eficaz da tensão de saída da célula ( $v_o$ ) e a tensão do barramento cc:

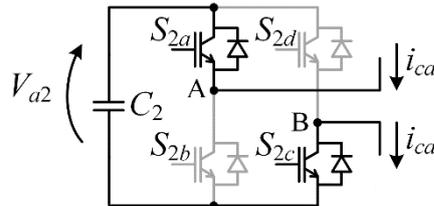
$$m_{aj} = \frac{\sqrt{2} \cdot v_o}{V_{aj}} \quad (3.26)$$

### 3.4.2 Etapas de operação das células inferiores

As células inferiores do iCHB são conversores ponte completa sem quaisquer modificações e possuem quatro etapas de operação.

A primeira etapa de operação é mostrada na Figura 23. A célula a2 é escolhida para a exemplificação das etapas, onde a tensão de saída  $v_{AB}$  é igual a  $V_{a2}$ .

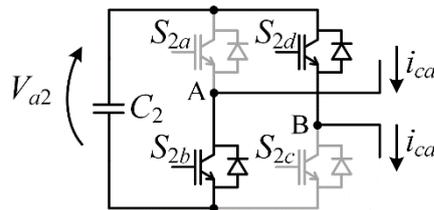
Figura 23 -Primeira etapa de operação das células inferiores



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

A segunda etapa de operação ocorre quando  $S_{2b}$  e  $S_{2d}$  são comandados a conduzir. A tensão  $v_{AB}$  é igual a  $-V_{a2}$ .

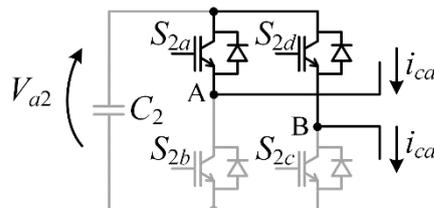
Figura 24 -Segunda etapa de operação das células inferiores



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

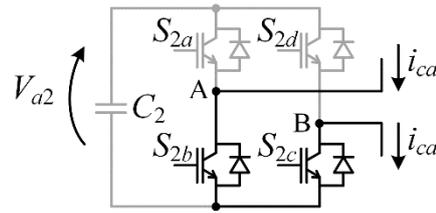
A terceira e a quarta etapas de operação são caracterizadas pela tensão  $v_{AB}$  nula, seja pelo comando de  $S_{2a}$  e  $S_{2d}$ , seja pelo comando de  $S_{2b}$  e  $S_{2c}$ .

Figura 25 -Terceira etapa de operação das células inferiores



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Figura 26 -Quarta etapa de operação das células inferiores

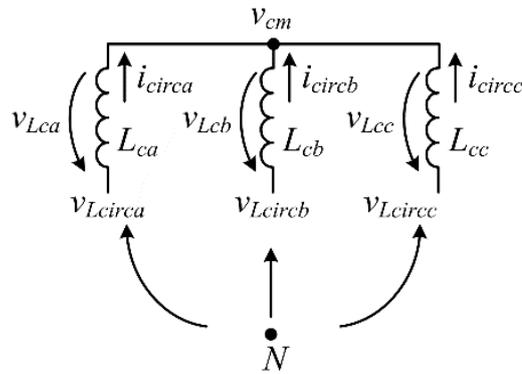


Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

### 3.4.3 Cálculo da corrente de circulação

A corrente de circulação pode ser quantificada analisando o circuito equivalente representado na Figura 27.

Figura 27 -Circuito simplificado para a obtenção da corrente de circulação do iCHB



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

A tensão imposta aos indutores de circulação depende das tensões dos pontos de conexão dos indutores nas células superiores em relação ao potencial  $N$ . Segundo a Figura 16, a tensão  $v_{Lcircx}$  pode ser escrita como:

$$v_{Lcircx} = v_{CBx1} + \sum_{j=2}^n v_{ABxj} \quad (3.27)$$

que é a combinação das tensões de saída  $v_{AB}$  das  $j-1$  células inferiores com a tensão  $v_{CB}$  da célula superior, conforme mostra a Figura 13. Devido à conexão em estrela, cada indutor está submetido a:

$$v_{Lcx} = v_{Lcircx} - v_{cm} \quad (3.28)$$

onde  $v_{cm}$  é a tensão de modo comum definida como:

$$v_{cm} = \frac{v_{Lcirca} + v_{Lcircb} + v_{Lcircc}}{3} \quad (3.29)$$

A corrente de circulação que flui por  $L_{cx}$  é dada por:

$$i_{circx} = \frac{1}{L_{cx}} \int v_{Lcx} dt + I_{dcx} \quad (3.30)$$

e é composta por duas componentes. A componente média de  $i_{circx}$  ( $I_{dcx}$ ) do indutor  $L_{cx}$  é resultado do sistema de controle e, em regime permanente, não é influenciada por  $v_{Lcx}$ . Já  $v_{Lcx}$  determina a amplitude da corrente na frequência fundamental. As componentes de alta frequência de  $v_{Lcx}$  podem ser majoritariamente mitigadas com a escolha da indutância de circulação  $L_{cx}$  e, para as análises a seguir, são desprezadas.

A tensão  $v_{Lcircx}$  pode ser escrita em função do índice de modulação de cada célula, substituindo (3.24) e (3.25) em (3.27):

$$v_{Lcircx} = \left( \frac{1}{2} + \frac{m_{x1}}{2} + \sum_{j=2}^n m_{xj} \right) \cdot V_{cc} \quad (3.31)$$

onde  $m_{xj}$  representa o índice de modulação da  $j$ -ésima célula da fase  $x$  e  $V_{cc}$  a tensão nominal da célula.

Por outro lado, no iCHB os índices de modulação dependem majoritariamente de duas parcelas do sistema de controle: uma da malha de corrente de saída e outra da malha de tensão individual, o que resulta em:

$$m_{xj} = v_{o,x} + v_{i,xj} \quad (3.32)$$

A parcela  $v_{o,x}$ , referente à malha de corrente, drena as potências ativa e reativa da carga para cumprir com o objetivo de equilíbrio e regulação das correntes do alimentador, sendo essa parcela comum às  $n$  células de cada braço. A parcela  $v_{i,xj}$ , referente à malha de tensão individual, determina a potência trocada entre células do mesmo braço  $P_{ixj}$  e cada célula possui um valor de  $v_{i,xj}$  distinto. Ambas as parcelas  $v_{o,x}$  e  $v_{i,xj}$  são grandezas adimensionais.

Como visto em (3.27), a contribuição de tensão ( $v_{CB}$ ) da célula  $x1$  é a metade do valor do barramento cc ( $V_{cc}$ ) e metade de  $m_{x1}$ , enquanto as demais células contribuem integralmente com  $m_{xj}$ . Então,  $v_{Lcircx}$  pode ser calculada como:

$$v_{Lcircx} = \frac{V_{cc}}{2} + \frac{2n-1}{2} \cdot V_{cc} \cdot v_{o,x} + \frac{n-1}{2} \cdot V_{cc} \cdot v_{i,xj} \quad (3.33)$$

Considerando que:

$$\frac{2n-1}{2} \cdot v_{o,x} \gg \frac{n-1}{2} \cdot v_{i,xj} \quad (3.34)$$

a tensão  $v_{Lcircx}$  pode ser simplificada escrevendo-a como sendo dependente somente de  $v_{o,x}$ , como segue:

$$v_{Lcircx} = \frac{V_{cc}}{2} + \frac{2n-1}{2} \cdot V_{cc} \cdot v_{o,x} \quad (3.35)$$

e, por consequência,  $v_{Lcx}$  é escrito como:

$$v_{Lcx} = k_n \cdot V_{cc} \cdot v_{o,x} - v_{cm} \quad (3.36)$$

com:

$$k_n = \frac{2n-1}{2} \quad (3.37)$$

Pode ser visto em (3.36) que a tensão sobre os indutores é, para um conversor com 3 células, equivalente a 5/6 da tensão de saída do conversor iCHB, o que gera um valor elevado de corrente na frequência fundamental. Conforme a quantidade de células aumenta, a tensão dos indutores tende ao valor da tensão de saída.

Com o valor de  $v_{Lcx}$  determinado em (3.36), e considerando uma tensão de modo comum ( $v_{cm}$ ) de baixa amplitude,  $i_{circx}$  pode ser calculada com o auxílio de (3.30):

$$i_{circx} = I_{dcx} + k_n \cdot \frac{V_{cc}}{\omega L_{cx}} \cdot i_{o,x} \quad (3.38)$$

onde  $i_{o,x}$  é definida como:

$$i_{o,x} = v_{o,x} \left| \frac{-\pi}{2} \right. \quad (3.39)$$

representando um sinal atrasado em 90 graus em relação a  $v_{o,x}$ .

Por (3.38) pode ser visto que, uma vez determinado o ponto de operação do iCHB, o indutor  $L_{cx}$  passa a ser o grau de liberdade que determina a amplitude da componente fundamental da corrente  $i_{circx}$  e pode possuir indutância de elevado valor ou permitir uma corrente de circulação com demasiada magnitude.

A potência que é transferida de cada braço pode ser calculada por:

$$P_{circx} = \frac{1}{T} \int_0^T v_{Lcircx} \cdot i_{circx} dt \quad (3.40)$$

Substituindo (3.30) e (3.35) em (3.40), a potência de circulação é definida conforme:

$$P_{circx} = \frac{1}{T} \int_0^T \left[ \left( \frac{V_{cc}}{2} + k_n \cdot V_{cc} \cdot v_{o,x} \right) \cdot \left( I_{dcx} + k_n \cdot \frac{V_{cc}}{\omega L_{cx}} \cdot i_{o,x} \right) \right] dt \quad (3.41)$$

Expandindo os termos em (3.41), chega-se a:

$$P_{circx} = \frac{1}{T} \int_0^T \left( \underbrace{\frac{V_{cc} \cdot I_{dcx}}{2}}_{1^\circ} + \underbrace{\frac{k_n \cdot V_{cc}^2}{2 \omega L_{cx}} \cdot i_{o,x}}_{2^\circ} + \underbrace{k_n \cdot V_{cc} \cdot I_{dcx} \cdot v_{o,x}}_{3^\circ} + \underbrace{k_n^2 \cdot \frac{V_{cc}^2}{\omega L_{cx}} \cdot v_{o,x} \cdot i_{o,x}}_{4^\circ} \right) dt \quad (3.42)$$

Os segundo e terceiro termos de (3.42) são sinais senoidais na frequência fundamental e, portanto, sua integralização é nula em um período da rede. Já o quarto termo de (3.42) é um

sinal no dobro da frequência fundamental. Entretanto, segundo (3.39), os sinais  $v_{o,x}$  e  $i_{o,x}$  estão defasados em 90 graus e a integral desse produto em um período da rede também é nula. Assim, a potência de circulação é escrita em termos da parcela contínua de (3.42):

$$P_{circex} = \frac{V_{cc} \cdot I_{dex}}{2} \quad (3.43)$$

### 3.5 CONCLUSÃO

A topologia do conversor proposto foi apresentada nesse capítulo, a qual é baseada no conversor cascata conectado em estrela.

As análises do fluxo de potência, tanto global quanto interna ao conversor proposto, demonstram sua capacidade de transferência de potência ativa entre os braços do iCHB, o que não ocorre no CHB conectado em estrela. Para tanto, três indutores são adicionados ao CHB convencional.

Expressões que determinam a corrente e a potência de circulação do iCHB são derivadas, sendo possível a quantificação das grandezas oriundas da inserção dos indutores. Foi verificado que a interligação entre os braços do iCHB pode gerar uma elevada componente alternada na frequência fundamental que, para ser mitigada, pode requerer grandes valores de indutância. Essa característica do iCHB desponta como sua principal desvantagem perante as demais topologias.



#### 4 SISTEMA DE CONTROLE PROPOSTO

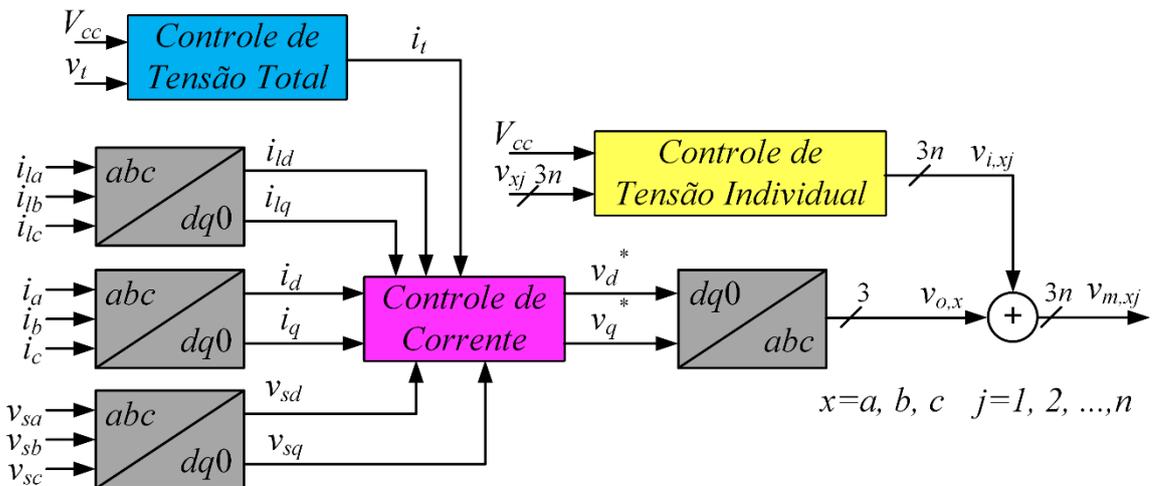
Equation Section (Next)

A estrutura de potência necessita ser associada a um sistema de controle adequado para que se possa ter êxito na regulação das correntes no alimentador em redes de distribuição em baixa e média tensão.

Dessa forma, o sistema de controle do iCHB deve ser capaz de atender as seguintes especificações: as correntes no alimentador devem ser equilibradas, com baixa Distorção Harmônica Total (DHT) e em fase com as tensões da rede, independentemente da carga conectada à rede. Para garantir o condicionamento adequado da corrente da rede, os valores médios das tensões cc das células do iCHB devem ser regulados.

O sistema de controle proposto para o iCHB é apresentado na forma de diagrama de blocos na Figura 28. O sistema é composto por uma malha interna de corrente e duas malhas de tensão.

Figura 28 - Sistema de Controle do Conversor Cascata de Ponte Completa Interconectado



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Os parâmetros do conversor iCHB para o projeto dos controladores são apresentados na Tabela 2. A indutância da rede  $L_s$  foi considerada como sendo 10% da impedância de base do sistema. A indutância de circulação  $L_c$  foi escolhida com base na equação (3.38) para que a célula processe 5 A de corrente de circulação, que corresponde à metade do valor máximo estipulado para o projeto físico do conversor da célula.

Tabela 2 - Parâmetros do sistema de controle do iCHB

Potência nominal do iCHB	$S_n$	30 kVA
Tensão da rede	$V_s$	220 V
Frequência da rede	$f_s$	60 Hz
Frequência de comutação	$f_{sw}$	5 kHz
Número de células por braço	$n$	4
Tensão nominal de célula	$V_{cc}$	150 V
Indutância da rede	$L_s$	1,28 mH
Indutância de saída	$L$	5 mH
Indutância de circulação	$L_c$	10 mH
Capacitância da célula	$C_c$	20 mF
Frequência de amostragem da malha de corrente	$f_{sa1}$	3,33 kHz
Frequência de amostragem das malhas de tensão	$f_{sa2}$	1 kHz
Ganho do modulador PWM	$h_{PWM}$	1/2
Ganho do sensor de corrente	$h_i$	1/10
Ganho dos sensores de tensão ca	$h_{vac}$	1/311
Ganho dos sensores de tensão cc	$h_v$	1

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

#### 4.1 MALHA DE CORRENTE

Para o controle das correntes do conversor iCHB, as correntes de saída ( $i_d$  e  $i_q$ ) e as correntes de cargas ( $i_{ld}$  e  $i_{lq}$ ) são necessárias para o devido controle do compensador de reativos em coordenadas síncronas  $dq0$ , conforme mostra o diagrama de blocos da Figura 28. Além das correntes, as tensões da rede ( $v_{sd}$  e  $v_{sq}$ ) são necessárias para servir de referência para o sincronismo e fazem parte do controle de corrente.

O controle de corrente é responsável pela geração dos pulsos de comando dos interruptores e, com isso, garantir que a corrente que flui do iCHB seja a corrente adequada para rejeitar os distúrbios de carga aos quais a rede é submetida.

Sendo assim, o sistema de controle de corrente é dividido em duas partes para melhor compreensão: a geração das referências de corrente e o controlador desacoplado de corrente.

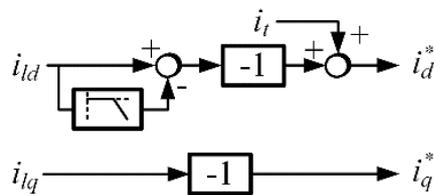
##### 4.1.1 Geração das correntes de referência e controlador de corrente

As referências de corrente são geradas utilizando a teoria da potência instantânea (AKAGI; INOUE ; YOSHII, 2007), (MOHAMMADI ; BINA, 2011), na qual as componentes síncronas das correntes de carga são utilizadas. Para o eixo  $d$ , responsável pelas parcelas ativas das potências envolvidas, a componente  $i_{ld}$  é filtrada para a extração de seu nível médio, o qual é subtraído da componente original. Assim, o sinal resultante é um valor alternado e representa o desequilíbrio de potência ativa da carga. O conversor, portanto, processa todo o desequilíbrio de potência ativa da carga, e a parcela equilibrada (parcela constante de  $i_{ld}$ ) é fornecida pela rede.

A ação de controle de tensão total gera um sinal que representa as perdas do iCHB ( $i_t$ ) é somado à componente alternada para gerar a referência de corrente no eixo direto  $i_d^*$ .

A referência em quadratura da corrente do iCHB  $i_q^*$  é igual ao oposto da componente  $i_{lq}$ . Diferentemente do eixo  $d$ , no eixo  $q$  o iCHB processa toda a potência reativa consumida ou gerada pela carga. Dessa forma, a corrente da rede é equilibrada, com baixa distorção harmônica e em fase com a tensão. A Figura 29 apresenta o diagrama de blocos da geração das referências de corrente nas coordenadas síncronas  $dq0$ .

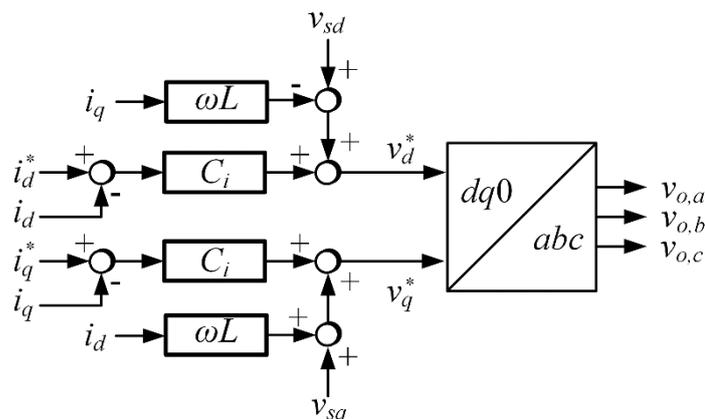
Figura 29 -Diagrama de blocos da geração das referências de corrente em coordenadas  $dq0$



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

O diagrama de blocos do controlador de corrente é apresentado na Figura 30. O sinal de erro entre  $i_d^*$  e  $i_d$  é compensado pelo controlador de corrente  $C_i$ . Após a lei de controle ser aplicada, são somadas as parcelas que desacoplam os eixos  $d$  e  $q$ , representadas pelos blocos  $\omega L$ . Os sinais  $v_d^*$  e  $v_q^*$  resultantes do controle de corrente são transformados para as coordenadas  $abc$  ( $v_{o,x}$ ) e são modulados na frequência de comutação escolhida.

Figura 30 -Diagrama de blocos da malha de corrente em coordenadas  $dq0$

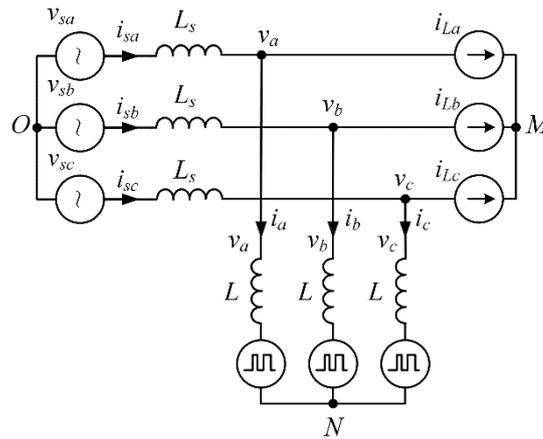


Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

#### 4.1.2 Modelagem da planta de corrente

A modelagem da planta de corrente foi retirada de (AKAGI; INOUE ; YOSHII, 2007). O modelo de corrente é obtido pela análise do circuito equivalente apresentado na Figura 31, com as tensões da rede ( $v_{sx}$ ) referenciadas ao potencial  $O$  e as tensões do iCHB ( $v_x$ ) referenciadas ao potencial  $N$ .

Figura 31 -Circuito equivalente para a obtenção do modelo da planta de corrente



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Desprezando as correntes de carga, o conjunto de equações que rege o circuito pode ser escrito como:

$$\begin{bmatrix} v_{saO} \\ v_{sbO} \\ v_{scO} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{aN} \\ v_{bN} \\ v_{cN} \end{bmatrix} = L_t \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

com  $L_t$  representando a soma das indutâncias  $L_s$  e  $L$ . Aplicando a transformada  $dq0$  em (4.1), o conjunto de equações é reduzido a duas componentes:

$$\begin{bmatrix} v_{sd} - v_d \\ v_{sq} - v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_t \frac{d}{dt} & -\omega L \\ \omega L & L_t \frac{d}{dt} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

sendo que o eixo 0 possui componentes nulas devido ao sistema trifásico a três fios. Expandindo os termos, chega-se a:

$$\begin{aligned} v_{sd} - v_d &= L_t \frac{di_d}{dt} - \omega L i_q \\ v_{sq} - v_q &= L_t \frac{di_q}{dt} + \omega L i_d \end{aligned} \quad (4.3)$$

e nota-se que há parcelas da componente do eixo direto na equação que descreve a corrente no eixo em quadratura, fato esse recíproco para a corrente no eixo direto.

A fim de tornar as equações das correntes do iCHB dependentes somente de seu eixo correspondente, o controlador utilizado subtrai tais parcelas, desacoplando os eixos direto e em quadratura, e aplica ganhos proporcionais e integrais, caracterizando um controlador PI.

$$\begin{aligned} v_d^* &= v_{sd} + \omega L_i i_q - k_i (i_d^* - i_d) - \frac{k_i}{T_i} \int (i_d^* - i_d) \\ v_q^* &= v_{sq} - \omega L_i i_d - k_i (i_q^* - i_q) - \frac{k_i}{T_i} \int (i_q^* - i_q) \end{aligned} \quad (4.4)$$

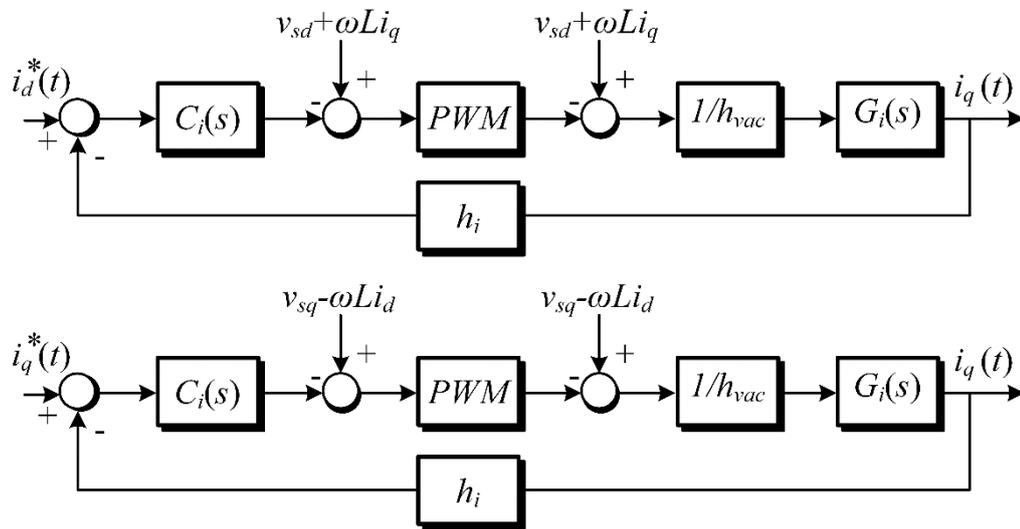
Utilizando a transformada de Laplace em (4.2), o modelo de corrente é escrito como:

$$G_i(s) = \frac{1}{sL_i} \quad (4.5)$$

#### 4.1.3 Projeto do controlador de corrente

Com o modelo da planta de corrente, e utilizando as equações (4.2) e (4.4), obtém-se o diagrama de blocos do controle de corrente mostrado na Figura 32.

Figura 32 -Diagrama de blocos do controle de corrente



Fonte: Adaptado de (AKAGI; INOUE ; YOSHII, 2007).

A metodologia de projeto do controlador de corrente é baseada em (AKAGI; INOUE ; YOSHII, 2007). Primeiro é especificado o ganho integral  $T_i$ , sendo arbitrado com sendo 50 vezes mais lento que o período de amostragem, o que resulta em:

$$T_i = 5 \text{ ms} \quad (4.6)$$

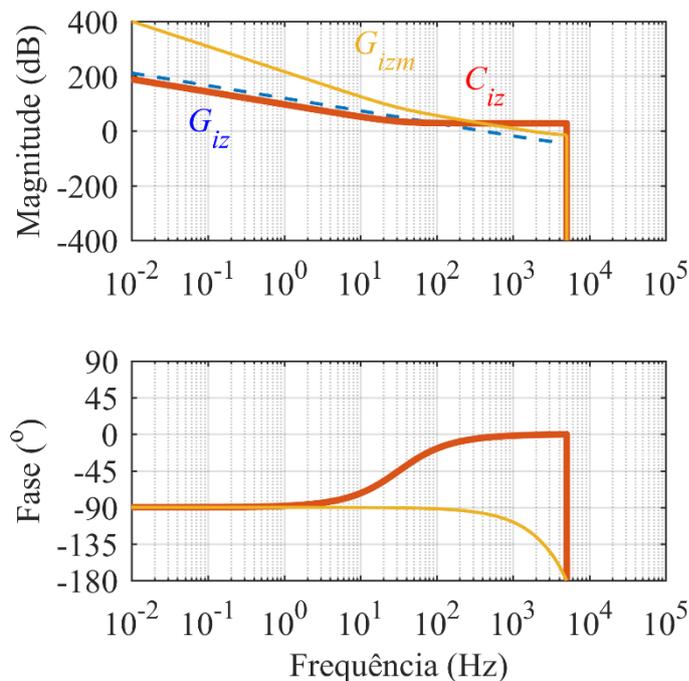
O ganho proporcional  $k_i$  é calculado segundo a equação

$$k_i = \frac{2L_f}{T_i} = 4 \quad (4.7)$$

para que o sistema em malha fechada possua um coeficiente de amortecimento unitário.

Após o projeto, a planta é transformada para o tempo discreto através do método ZOH (*Zero-Order Holder*) e os controladores através do método de *Tustin* com frequência de amostragem  $f_{sa1}$ . O diagrama de bode no tempo discreto da planta de corrente  $G_i$ , o controlador PI e a função transferência de malha aberta  $G_{im}$  é apresentado na Figura 33, com frequência de cruzamento em 1,65 kHz e margem de fase de 60 graus.

Figura 33 -Diagrama de Bode da função de transferência de malha aberta da malha de corrente incluindo o controlador no tempo discreto



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

#### 4.2 MALHA DE TENSÃO TOTAL

O controle de tensão total dos capacitores do iCHB tem por objetivo a reposição das perdas nos semicondutores e nos elementos passivos e, com isso, manter a energia acumulada no iCHB.

A soma das tensões individuais dos capacitores,  $v_t$ , é definida como:

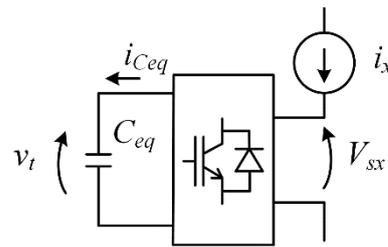
$$v_t = \frac{1}{3n} \sum_{j=1}^n \sum_{x=a}^c v_{xj} \quad (4.8)$$

onde  $v_{xj}$  é a tensão medida no capacitor  $j$  referente a fase  $x$  e  $n$  representa o número de células por braço.

#### 4.2.1 Modelagem da planta de tensão total

O modelo que descreve o comportamento da tensão acumulada no iCHB pode ser deduzido com base no circuito equivalente apresentado na Figura 34.

Figura 34 - Circuito equivalente para a obtenção do modelo da planta de tensão total



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Pelo princípio da conservação de energia, a energia fornecida pela rede (lado ca) deve ser igual à energia acumulada nos capacitores (lado cc), desprezando-se as perdas. Os capacitores são substituídos por um capacitor equivalente ( $C_{eq}$ ) e a equação que rege o circuito é escrita como:

$$v_{sx} i_x = V_{cc} C_{eq} \frac{dv_t}{dt} \quad (4.9)$$

Aplicando a transformada  $dq0$  em (4.9)

$$v_{sd} i_d + v_{sq} i_q = V_{cc} C_{eq} \frac{dv_t}{dt} \quad (4.10)$$

Pela orientação escolhida para os eixos  $d$  e  $q$ , a tensão em quadratura da rede  $v_{sq}$  é aproximadamente nula, o que reduz a equação a:

$$v_{sd} i_d = V_{cc} C_{eq} \frac{dv_t}{dt} \quad (4.11)$$

Aplicando a transformada de Laplace em (4.11), tem-se:

$$\frac{v_t(s)}{i_d(s)} = \frac{v_{sd}}{s V_{cc} C_{eq}} \quad (4.12)$$

O capacitor equivalente tem valor igual ao arranjo paralelo/série dos  $3n$  capacitores das células. Assim, a equação (4.12) é escrita como:

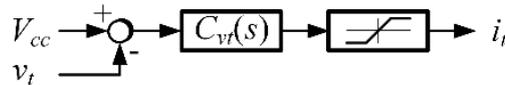
$$\frac{v_t(s)}{i_d(s)} = \frac{n}{3C_c} \frac{v_{sd}}{s V_{cc}} \quad (4.13)$$

#### 4.2.2 Projeto do controlador de tensão total

O valor instantâneo da soma das tensões é comparado com o valor de referência  $V_{cc}$ . Um controlador  $C_{vt}(s)$  do tipo PI é capaz de anular o erro entre os sinais  $V_{cc}$  e  $v_t$  em regime permanente. A Figura 35 mostra o diagrama de blocos do controle de tensão total.

O sinal de saída  $i_t$  é adicionado à parcela variante no tempo do sinal  $i_{ld}$  e compõe a referência de corrente.

Figura 35 -Diagrama de blocos da malha de tensão total



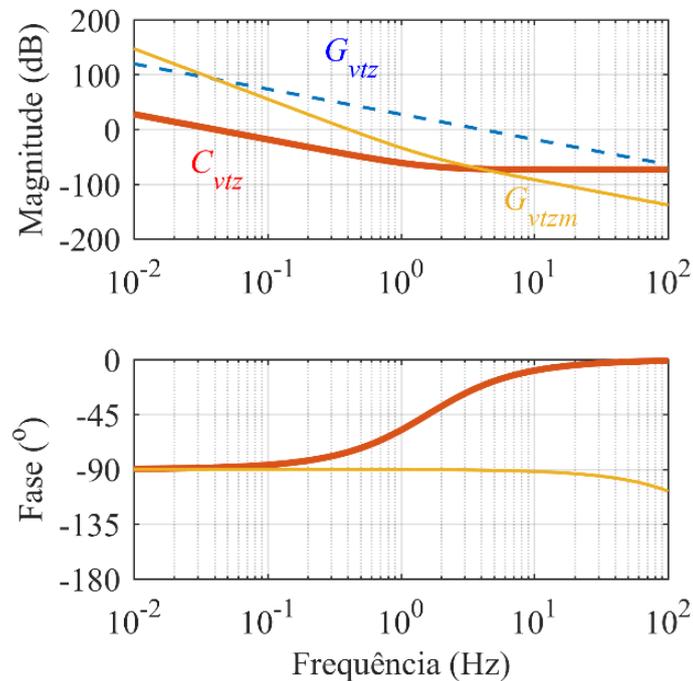
Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

O controlador escolhido para a malha de tensão total é um controlador do tipo PI. A frequência escolhida para o cruzamento por zero é de 0,4 Hz, inferior à frequência fundamental. Assim, os ganhos proporcional e integral da malha de tensão por braço são:

$$\begin{aligned} k_{vt} &= 0,025 \\ T_{vt} &= 0,1 \end{aligned} \quad (4.14)$$

A Figura 36 apresenta o diagrama de bode da planta de tensão total  $G_{vtz}$ , o controlador PI  $C_{vtz}$  e a função transferência de malha aberta  $G_{vtzm}$  no tempo discreto com frequência de amostragem  $f_{sa2}$ .

Figura 36 -Diagrama de Bode da função de transferência de malha aberta da malha de tensão total incluindo o controlador no tempo discreto



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

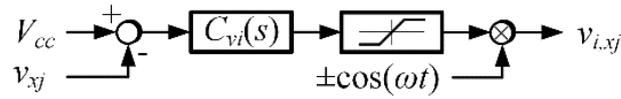
#### 4.3 MALHA DE TENSÃO INDIVIDUAL

A malha de controle de tensão individual do iCHB é responsável pela regulação da tensão cc de cada célula de forma individual através da medição e comparação com o valor de referência.

Diferentemente do CHB e do MMC, onde a malha de tensão individual corrige pequenos desvios de tensão e compensa variações paramétricas (AKAGI; INOUE ; YOSHII, 2007), (MAHARJAN *et al.*, 2008), a malha de tensão individual para o iCHB possui o objetivo de transferência de grandes quantidades de potência ativa entre as células dos braços, conforme apresentado na Seção 3.3.2, provenientes das células superiores.

Para a adequada regulação das tensões, a ação de controle da malha de tensão individual é multiplicada por uma função cossenoidal de amplitude unitária, com sinal positivo ou negativo conforme o sinal da corrente de carga, como mostra a Figura 37. A função cossenoidal faz com que a tensão na saída da célula gerada pela ação de controle esteja em fase com a componente reativa da corrente de circula nas células do iCHB (AKAGI; INOUE ; YOSHII, 2007). Dessa forma, potência ativa é produzida e enviada ou recebida da célula superior conforme a demanda de cada braço.

Figura 37 -Diagrama de blocos da malha de tensão individual



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

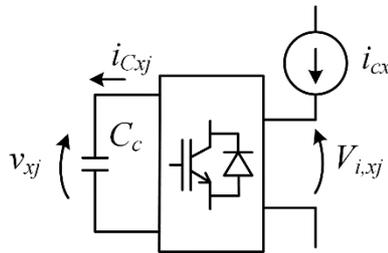
Vale ressaltar que a utilização da modulação por deslocamento de fase, que aplica tempos de condução iguais a todas as células para um mesmo braço, permite a utilização da mesma estrutura de controle para todas as células, simplificando o sistema de controle.

#### 4.3.1 Modelagem da planta de tensão individual

A modelagem da planta de tensão individual é baseada no modelo apresentado em (AKAGI; INOUE ; YOSHII, 2007).

O modelo que descreve o comportamento da tensão individual se utiliza do circuito equivalente ilustrado na Figura 38. A potência entregue ou retirada do capacitor da célula  $xj$  é calculada com base no balanço de potência, como segue:

Figura 38 -Circuito equivalente para a obtenção do modelo da tensão individual



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

$$V_{ixj} i_{cx} = i_{C,xj} V_{xj} \quad (4.15)$$

onde  $i_{cx}$  é a composição de  $i_{fx}$  e  $i_{circx}$ . Tendo em conta que essa estratégia depende da parcela reativa da corrente de compensação, e  $i_{circx}$  está defasada em 90 graus em relação a  $V_{ixj}$ , a seguinte aproximação é considerada:

$$i_{cx} \approx i_{circx} \quad (4.16)$$

ao que se refere a parcela reativa de  $i_{cx}$ . A tensão de saída da célula  $xj$  é escrita em função da ação de controle da malha de tensão individual:

$$V_{ixj} = V_{xj} v_{i,xj} \quad (4.17)$$

Substituindo (4.16) e (4.17) em (4.15), tem-se:

$$V_{xj} v_{i,xj} i_{circx} = i_{C_{xj}} V_{xj} \quad (4.18)$$

Simplificando (4.18) e expandindo a corrente no capacitor  $C_{cxj}$ :

$$v_{i,xj} i_{circx} = C_c \frac{dv_{xj}}{dt} \quad (4.19)$$

Aplicando a transformada de Laplace em (4.19), chega-se a:

$$\frac{v_{xj}(s)}{v_{i,xj}(s)} = \frac{i_{circx}}{sC_c} \quad (4.20)$$

Segundo (3.38), a amplitude de  $i_{circx}$  é:

$$i_{circx} = \frac{nV_{cc}}{\omega L_c} \quad (4.21)$$

considerando índice de modulação próximo da unidade. Combinando (4.20) e (4.21), o modelo da malha de tensão individual é escrito na forma:

$$\frac{v_{xj}(s)}{v_{i,xj}(s)} = \frac{nV_{cc}}{s\omega L_c C_c} \quad (4.22)$$

### 4.3.2 Projeto do controlador de tensão individual

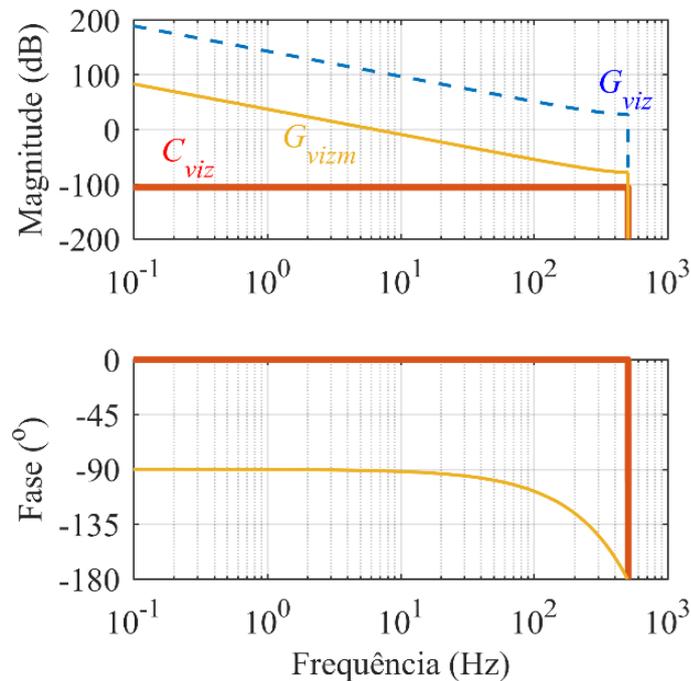
A Figura 37 apresenta o diagrama de blocos da malha de tensão individual. Diferentemente da malha de controle de tensão total, que possui uma realimentação, a malha de tensão individual depende do número de células do iCHB, o que significa que é necessária uma malha de tensão individual para cada célula, ou seja,  $3n$  malhas.

Devido à característica do modelo de tensão individual, controles proporcionais garantem a regulação adequada de  $v_{xj}$ . A frequência escolhida para o cruzamento por zero é de 6 Hz. Assim, o ganho proporcional da malha de tensão por braço é:

$$k_{vi} = 0,05 \quad (4.23)$$

A Figura 39 apresenta o diagrama de bode da planta de individual total  $G_{viz}$ , o controlador P  $C_{viz}$  e a função transferência de malha aberta  $G_{vizm}$  no tempo discreto com frequência de amostragem  $f_{sa2}$ .

Figura 39 -Diagrama de Bode da função de transferência de malha aberta da malha de tensão individual incluindo o controlador no tempo discreto



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

#### 4.4 CONCLUSÃO

Esse capítulo apresentou a estrutura do sistema de controle proposto para o iCHB, sendo composto por três malhas de controle, cada uma com uma finalidade distinta. O sistema de controle é baseado no trabalho de Akagi apresentado em (AKAGI; INOUE ; YOSHII, 2007).

Modelos que descrevem a relação entre as variáveis a serem controladas e seus sinais de controles foram obtidos de forma simplificada, forma essa suficiente para a demonstração da topologia proposta com um desempenho razoável.

A metodologia de projeto dos controladores foi baseada nas premissas contidas em (MAHARJAN; INOUE ; AKAGI, 2008) servindo como base para a sintonia dos controladores. Por se tratar de controle de variáveis senoidais (valores constantes em dq0), o efeito do desequilíbrio de cargas e das cargas não lineares não é totalmente mitigado.

A frequência de cruzamento da malha de tensão individual foi escolhida para ser dez vezes mais rápida que a malha de tensão total devido à característica da interligação indutiva do iCHB. Durante transitórios, as tensões das células superiores possuem variação de tensão maior que a variação na tensão total do iCHB, visto que toda a energia transferida para os braços passa direta e exclusivamente pelas células superiores. Com a malha de tensão individual com maior banda passante a regulação das células superiores e, por consequência, das inferiores fica

prioritária à regulação de tensão total. Adicionalmente, o iCHB tendo como função a compensação de potência reativa, a mitigação de harmônicas e o equilíbrio de potência ativa da carga, o balanço de energia total do conversor durante os transitórios é pouco afetado instantaneamente, o que permite a redução da banda passante da malha de tensão total sem grande perturbação a  $v_t$  e ao sistema de controle de corrente.

Cabe, então, estudos mais aprofundados considerando as interações entre todas as malhas de controle que compõem o iCHB para que se possa extrair o máximo de desempenho de cada uma das malhas.



## 5 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Equation Section (Next)

Esse capítulo apresenta a simulação numérica do conversor iCHB proposto, desenvolvida no software PSIM<sup>®</sup>, e avalia o desempenho dessa topologia com o sistema de controle desenvolvido no Capítulo 4.

A inaptidão do CHB conectado em estrela frente à compensação plena de desequilíbrios de carga é verificada via simulação numérica.

O desempenho do conversor iCHB é avaliado frente a cargas lineares indutivas desequilibradas combinadas com um retificador monofásico com filtro capacitivo em uma das fases.

### 5.1 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE QUALIDADE

Vários métodos de quantificação podem ser empregados para determinar se a qualidade da energia entregue a um determinado grupo de cargas está de acordo com limites pré-estabelecidos em normativas. Nessa tese são apresentados parâmetros de qualidade para o conversor proposto no que tange o fator de potência, o desequilíbrio de corrente e a distorção harmônica total da corrente do alimentador.

#### 5.1.1 Fator de Potência

No Brasil, os sistemas de distribuição são normatizados e padronizados pelos documentos contidos nos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST). Entre os documentos do PRODIST, o módulo 8 se destina à qualidade de energia nos sistemas de distribuição.

O módulo 8 do PRODIST define que o fator de potência, sendo calculado por:

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (5.1)$$

onde  $P$  é a potência ativa e  $Q$  a potência reativa. O fator de potência, para ser considerado adequado, deve ser superior a 0,92 em conexões com tensão inferior a 230 kV (ANEEL, 2015).

#### 5.1.2 Fator de Desequilíbrio em Sistemas Trifásicos

Para a quantificação do desequilíbrio de tensão em sistemas de distribuição trifásicos, a IEC 61000-3-14 recomenda a utilização do fator de desequilíbrio de tensão (*Voltage Unbalance Factor* – VUF). O VUF é definido como (KINI; BANSAL ; AITHAL, 2007):

$$VUF = \frac{v^n}{v^p} \cdot 100\% \quad (5.2)$$

onde  $v^n$  e  $v^p$  representam a magnitude do fasor de tensão de sequência negativa e positiva, respectivamente.

A norma europeia EN 50160 determina que o VUF máximo em sistemas trifásicos em baixa tensão com cargas monofásicas e/ou bifásicas seja menor que 3% durante 95% das medições realizadas a cada 10 minutos (EN50160, 2005). Em sistemas de média tensão, o VUF máximo é restrito a 2%, com exceções de 3%. Porém, tais condições não são especificadas. A norma brasileira segue o padrão europeu (ANEEL, 2015).

Para a quantificação da capacidade de compensação dos distúrbios de carga por parte do conversor proposto, o fator de desequilíbrio é utilizado como parâmetro de qualidade, substituindo os fasores de tensão pelos fasores de corrente. As componentes de corrente da rede são utilizadas em (5.2), que se torna o fator de desequilíbrio de corrente (*Current Unbalance Factor* – CUF):

$$\text{CUF} = \frac{i_s^n}{i_s^p} \cdot 100\% \quad (5.3)$$

e, na falta de normatização específica, é considerado adequado se o CUF for menor que 5%.

### 5.1.3 Distorção Harmônica Total de Corrente

A norma IEEE 519-2014 recomenda os valores máximos da distorção DHT em sistemas de distribuição.

Os limites individuais de cada componente harmônico são sumarizados na Tabela 3 em função da corrente de carga  $I_L$  e da corrente de curto-circuito  $I_{sc}$  do ponto de conexão comum.

Tabela 3 - Limites individuais máximos dos componentes harmônicos de corrente segundo a recomendação da IEEE 519-2014

Máxima distorção de harmônicos de corrente em percentual de $I_L$						
Sistemas com tensão menor que 69 kV						
$I_{sc}/I_L$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	DHT
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20<50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50<100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
Sistemas com tensão maior que 69 kV e menor que 161 kV						
$I_{sc}/I_L$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	DHT
<20	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
20<50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4,0
50<100	5,0	2,25	2,0	0,75	0,35	6,0
Sistemas com tensão maior que 161 kV						
$I_{sc}/I_L$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	DHT
<25	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
25<50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4,0
$\geq 50$	5,0	2,25	2,0	0,75	0,35	6,0

Fonte: (IEEE519-2014, 2014).

Entretanto, a norma brasileira é mais permissiva que a recomendação da IEEE 519-2014, conforme mostra a Tabela 4.

Tabela 4 - Limites individuais máximos dos componentes harmônicos de corrente segundo o Módulo 8 do PRODIST

DHT	$V_n \leq 1,0$ kV	$1,0 < V_n \leq 69$ kV	$69 < V_n \leq 230$ kV
Total	10,0%	8,0%	5,0%
Harmônicos pares	2,5%	2,0%	1,0%
Harmônicos ímpares	7,5%	6,0%	4,0%
Harmônicos múltiplos de 3	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: (ANEEL, 2015).

Avaliadas as normativas, nesse trabalho é considerada adequada a compensação por parte do conversor se a IEEE 519-2014 na condição de  $I_{sc}/I_L$  menor que 20 em sistemas com tensão menor que 69 kV for respeitada.

## 5.2 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO E CIRCUITOS SIMULADOS

A Tabela 5 contempla os principais parâmetros do iCHB. O perfil de carga a ser imposto à rede para a correção do iCHB está sumarizado na Tabela 6. As cargas são lineares e desequilibradas, sendo que a fase A conta com o acréscimo de uma carga não linear.

Tabela 5 - Principais parâmetros do iCHB para a simulação numérica

Potência nominal do iCHB	$S_n$	30 kVA
Tensão da rede	$V_s$	220 V
Tensão nominal de célula	$V_{cc}$	150 V
Frequência da rede	$f_s$	60 Hz
Frequência de comutação	$f_{sw}$	5 kHz
Número de células por braço	$n$	4
Indutância da rede	$L_s$	1,28 mH
Indutância de saída	$L_f$	5 mH
Indutância de circulação	$L_c$	10 mH
Capacitância da célula	$C_c$	20 mF
Perda por célula	$P_{loss}/n$	50 W

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

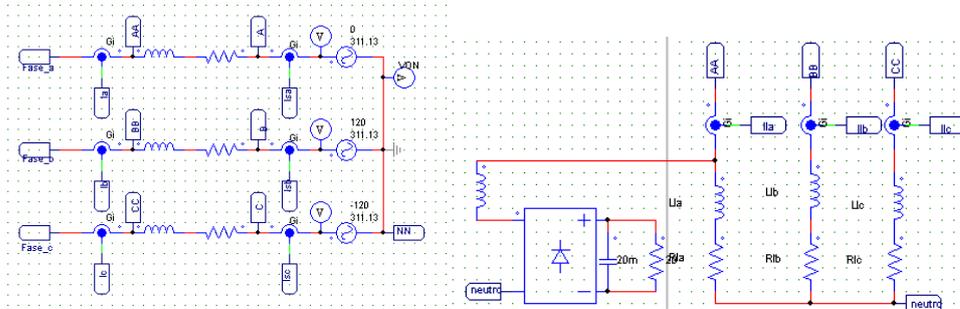
Tabela 6 - Parâmetros das cargas para a simulação numérica

Fase	iCHB e MMC			CHB	
	Resistência	Indutância	Não linear	Resistência	Indutância
A	10 $\Omega$	19 mH	4,45 kVA	10 $\Omega$	19 mH
B	4 $\Omega$	7,6 mH	0 VA	4 $\Omega$	7,6 mH
C	2 $\Omega$	3,8 mH	0 VA	2 $\Omega$	3,8 mH

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

A Figura 40 apresenta os circuitos que compõem a rede e as cargas. Note que aos pontos centrais da rede e das cargas são atribuídos nomes distintos para não haver conexão entre os mesmos.

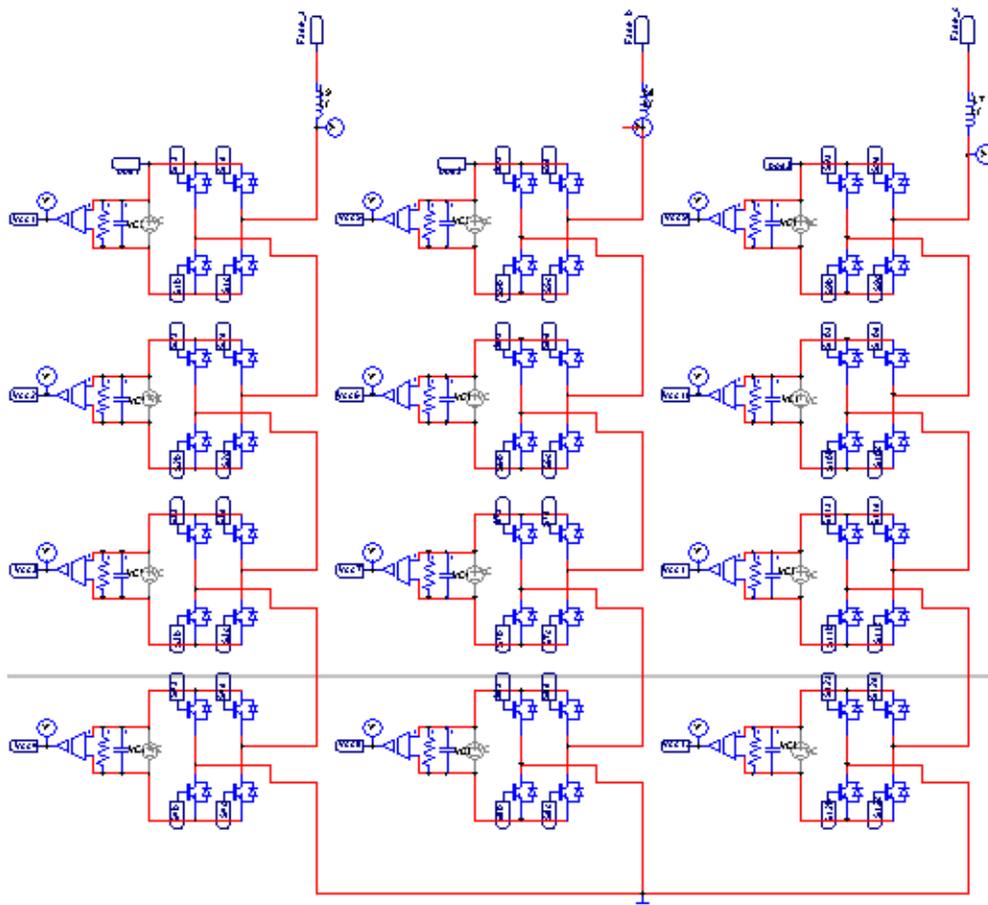
Figura 40 - Circuitos da rede e das cargas



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

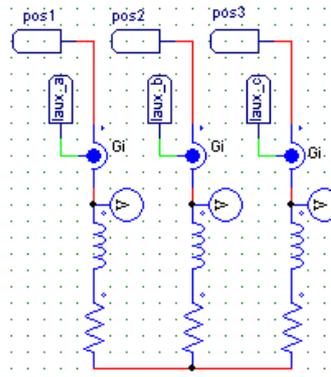
O circuito de potência completo do iCHB é apresentado na Figura 41 e a conexão indutiva das células é mostrada na Figura 42.

Figura 41 - Circuito de potência completo do iCHB



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

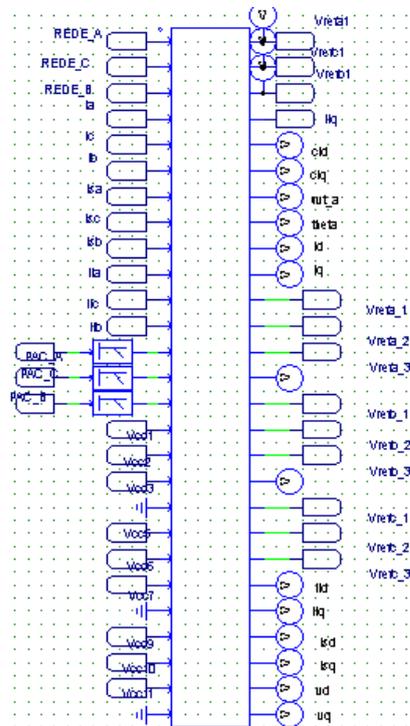
Figura 42 -Interligação indutiva dos braços do iCHB



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

A Figura 43 apresenta o sistema de controle do iCHB. Para uma maior fidelidade com a implementação do protótipo, os controladores discretizados são embarcados em um bloco que executa instruções em linguagem C, mesma linguagem do processador digital de sinais utilizado.

Figura 43 -Sistema de controle embarcado em bloco C



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

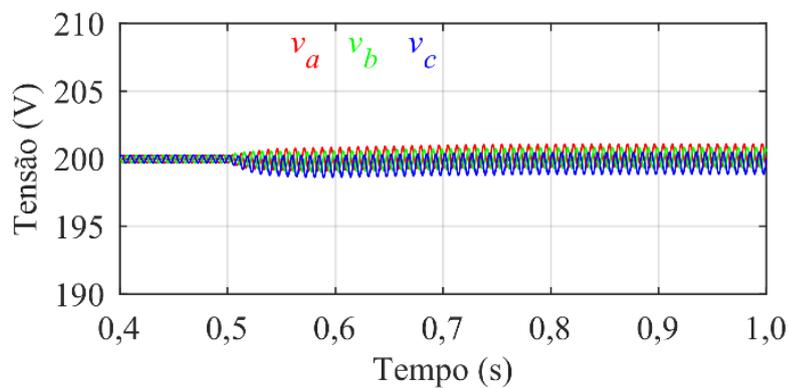
Antes de iniciar a operação do iCHB, é preciso realizar a carga controlada dos capacitores das células, de zero até a tensão nominal. O sistema de pré carga é discutido no Apêndice B.

### 5.3 CONVERSOR CASCATA EM ESTRELA

O conversor cascata em estrela (CHB) é simulado em três etapas com o sistema de controle descrito em (AKAGI; INOUE ; YOSHII, 2007).

Na primeira etapa, as cargas estão equilibradas e o CHB opera compensando a potência reativa da carga conforme a carga da fase A da Tabela 6. No instante de tempo igual a 0,5 s, o perfil de carga muda para cargas desequilibradas segundo a Tabela 6. As tensões das células não sofrem variações significativas conforme a Figura 44, com erro estático em torno de 0,1%.

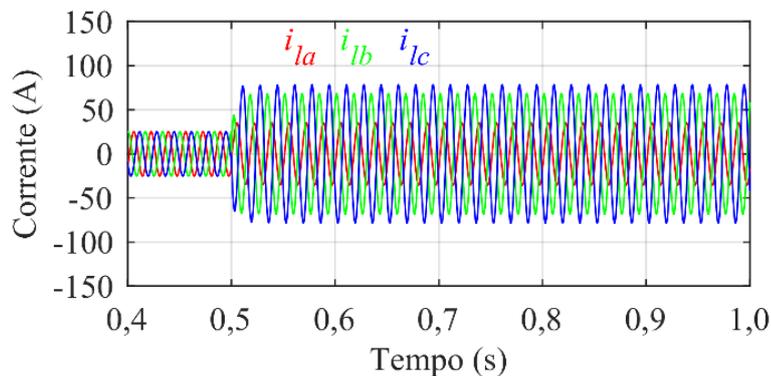
Figura 44 -Formas de onda da tensão de braço do CHB durante o degrau de carga equilibrada para desequilibrada



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

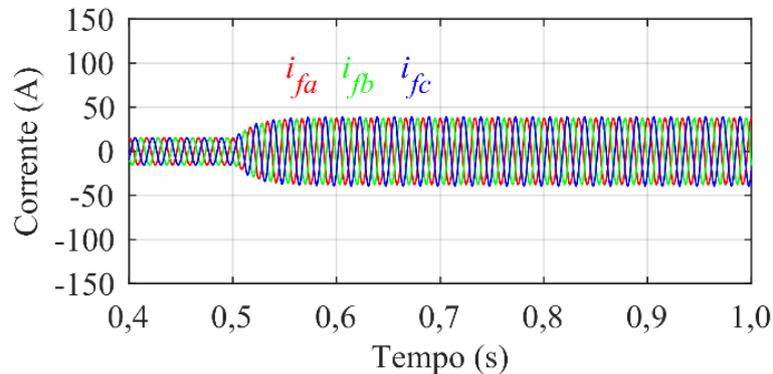
As formas de onda da corrente da carga são apresentadas na Figura 45. Para manter o equilíbrio das tensões das células, o CHB permanece compensando a parcela equilibrada da potência reativa da carga, como mostra a Figura 46. Entretanto, a corrente na rede, Figura 47, possui fator de desequilíbrio da ordem de 44%.

Figura 45 -Formas de onda de corrente na carga durante o degrau de carga equilibrada para desequilibrada



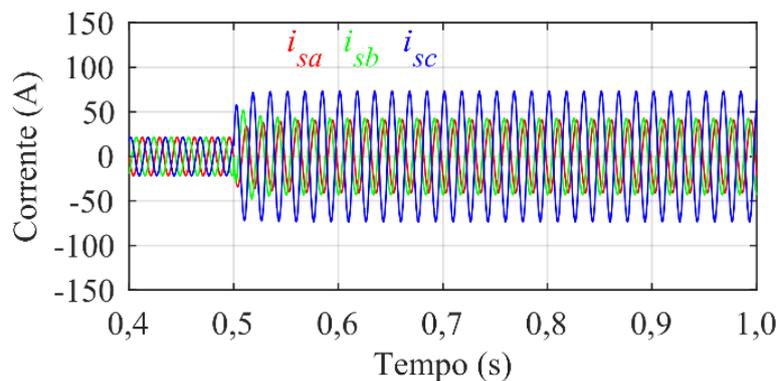
Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Figura 46 -Formas de onda de corrente de saída do CHB durante o degrau de carga equilibrada para desequilibrada



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Figura 47 -Formas de onda de corrente no alimentador durante o degrau de carga equilibrada para desequilibrada

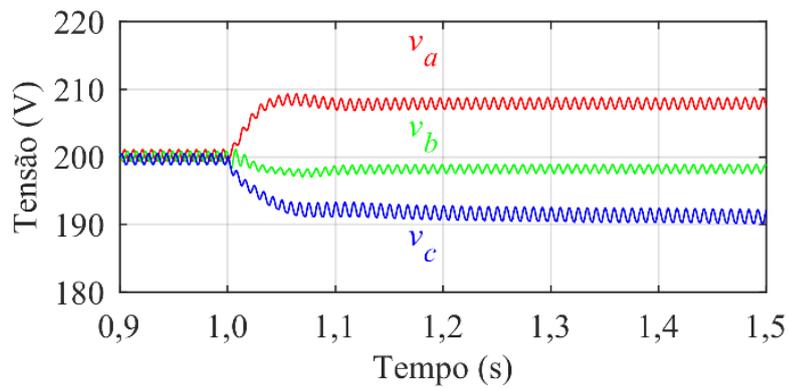


Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Na tentativa de compensar na totalidade o desequilíbrio de carga, o sistema de controle incorpora tanto o desequilíbrio de potência reativa quanto de potência ativa. Nessa situação o CHB perde a regulação das tensões das células, mas se mantém operando. A Figura 48 apresenta a tensão nas células do CHB.

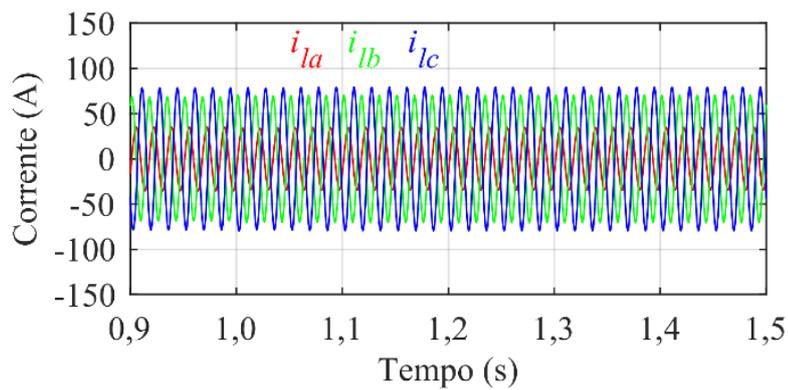
As formas de onda da corrente de carga são apresentadas na Figura 49. O CHB injeta correntes desequilibradas no PCC, conforme a Figura 50, na tentativa de mitigar o desequilíbrio, mas falha ao mantê-las senoidais e equilibradas, como mostra a Figura 51.

Figura 48 - Formas de onda da tensão das células do CHB durante a compensação do desequilíbrio de carga



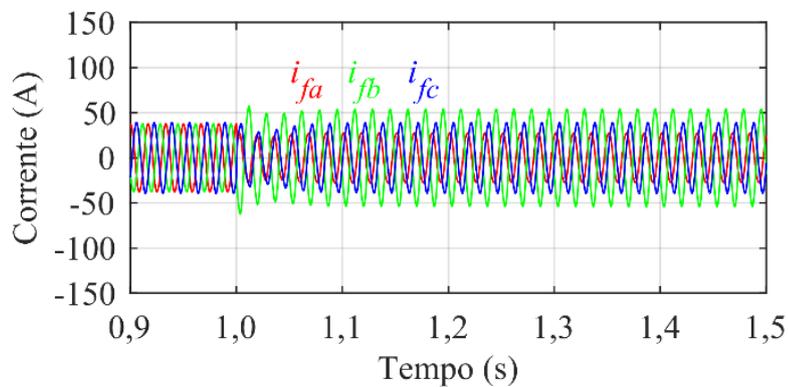
Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Figura 49 - Formas de onda de corrente na carga durante a compensação do desequilíbrio de carga



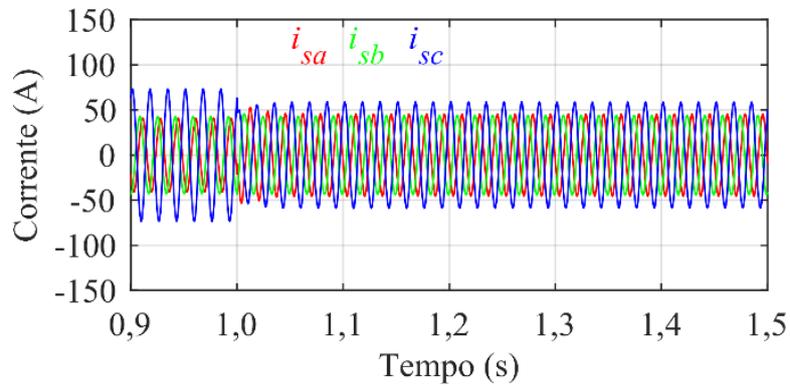
Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Figura 50 - Formas de onda de corrente de saída do CHB durante a compensação do desequilíbrio de carga



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

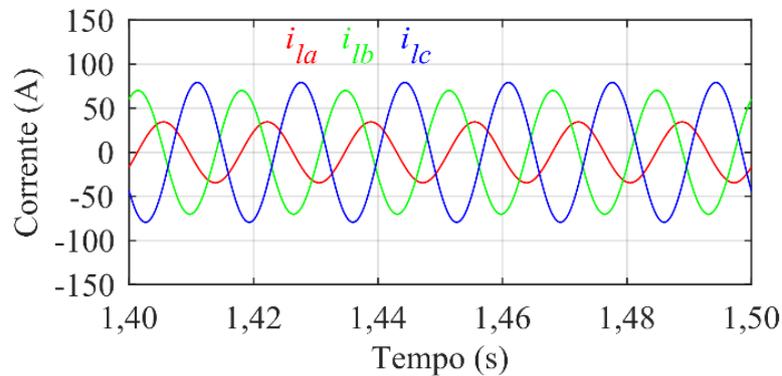
Figura 51 -Formas de onda de corrente no alimentador durante a compensação do desequilíbrio de carga



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

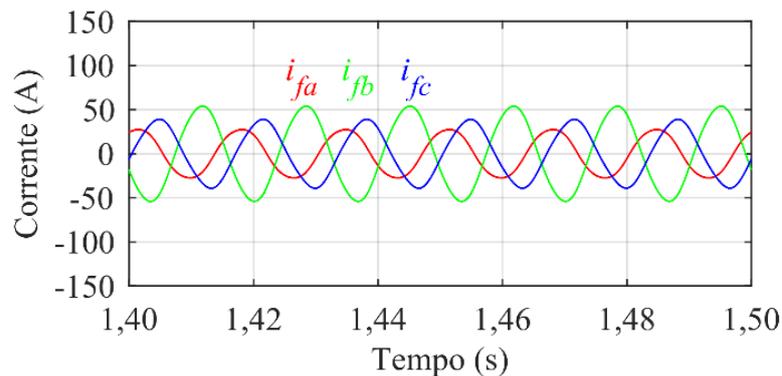
A Figura 52, a Figura 53 e a Figura 54 apresentam as formas de onda de corrente de carga, do CHB e da rede em regime permanente, respectivamente.

Figura 52 -Formas de onda de corrente na carga durante a compensação do desequilíbrio de carga em regime permanente



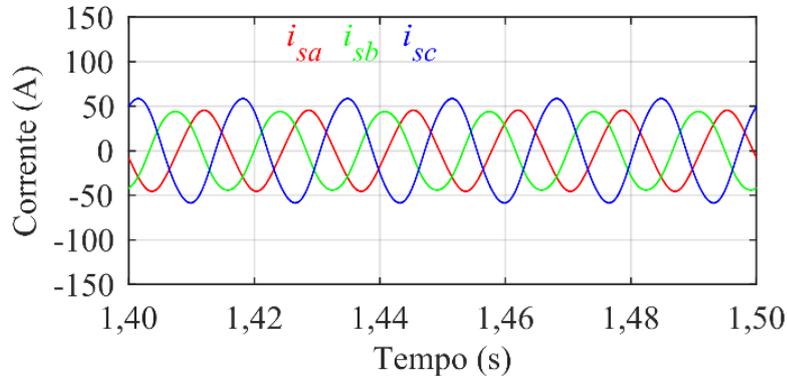
Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Figura 53 -Formas de onda de corrente de saída do CHB durante a compensação do desequilíbrio de carga em regime permanente



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

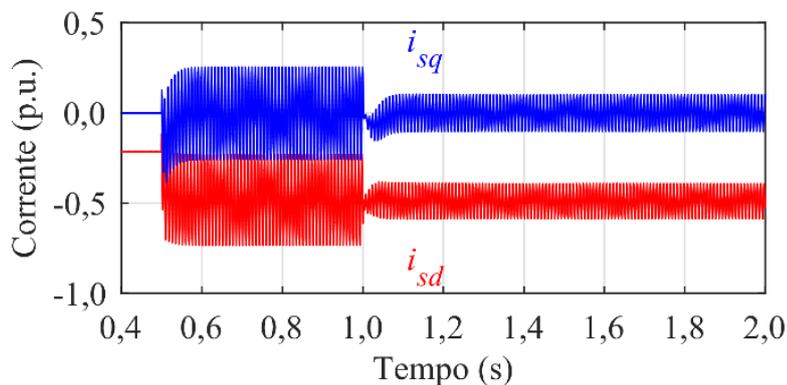
Figura 54 - Formas de onda de corrente no alimentador durante a compensação do desequilíbrio de carga em regime permanente



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

A Figura 55 apresenta a transformação da corrente da rede com a compensação do CHB em coordenadas síncronas. Pode-se notar que o CHB é capaz de compensar a potência reativa de sequência positiva (valor médio de  $i_{sq}$ ) tanto durante a carga equilibrada quanto com a carga desequilibrada. No instante de tempo igual a 1,0 s o sistema força a compensação do desequilíbrio de potência ativa (valor alternado de  $i_{sd}$ ), o CHB continua compensando a potência reativa de sequência positiva, embora não consiga compensar as demais componentes de sequência.

Figura 55 - Componentes em eixo direto e quadratura da corrente da rede com a compensação do CHB



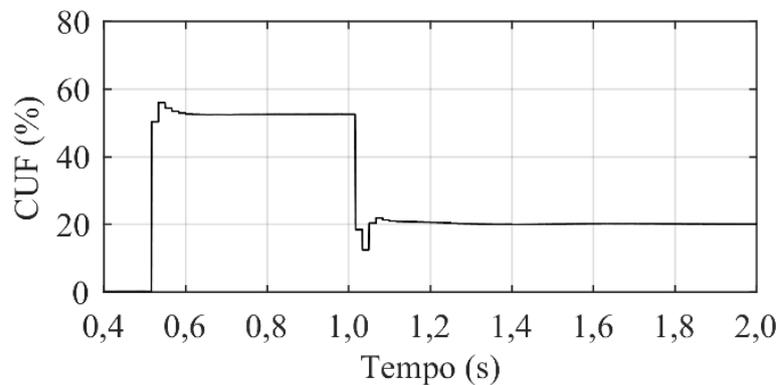
Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

A capacidade de regulação de desequilíbrios também pode ser analisada pelo fator de desequilíbrio de corrente (CUF) mostrado na Figura 56. Com carga equilibrada, o CHB mantém a regulação da potência reativa e a corrente da rede apresenta CUF em torno de 0,25%. Com o

desequilíbrio de cargas, o CUF aumenta para 52,6%, estando fora da faixa considerada adequada. Durante a tentativa de compensação do desequilíbrio de potência ativa, o desequilíbrio nas correntes de rede converge para 20,1%, igualmente fora do valor estabelecido.

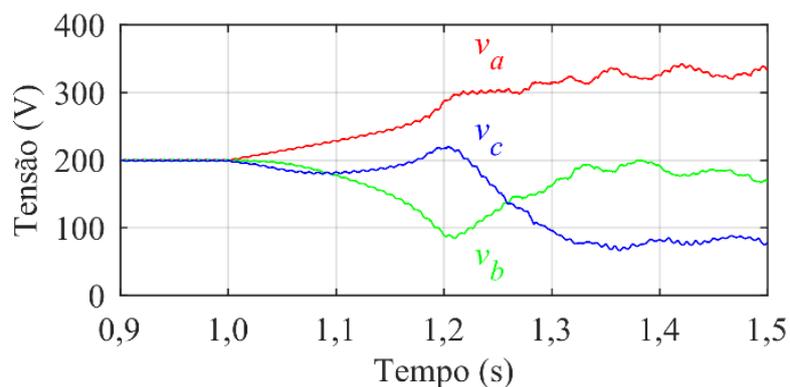
Alterando o sistema de controle de corrente apresentado em (AKAGI; INOUE ; YOSHII, 2007) para se tornar igual ao do iCHB, i.e. as referências de corrente passam a considerar as parcelas alternadas de  $i_{ld}$  e  $i_{lq}$ , a Figura 57 apresenta as tensões das células dos CHB. É possível verificar que o CHB não consegue manter as tensões reguladas em seus valores nominais.

Figura 56 -Fator de desequilíbrio de corrente da rede com a compensação do CHB



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Figura 57 -Formas de onda da tensão das células do CHB durante a compensação do desequilíbrio de carga com a alteração no controle de corrente

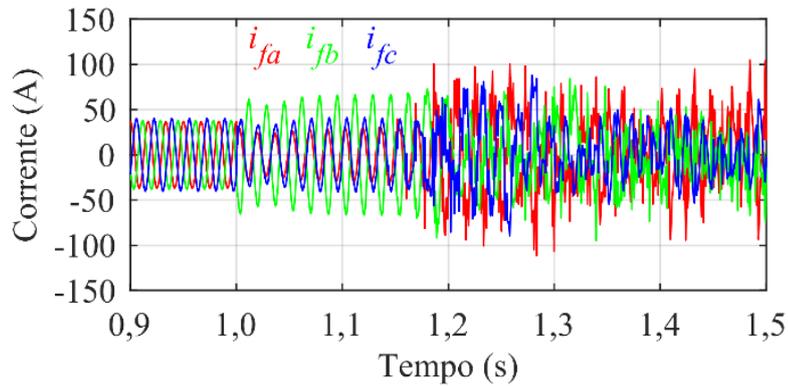


Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

A corrente de compensação do CHB se torna adequada para a regulação da corrente da rede durante um pequeno intervalo de tempo, visto na Figura 58, mantendo a corrente da rede equilibrada, conforme a Figura 59. Com a severa falta de regulação das tensões das células, o CHB perde a capacidade de regulação das correntes de rede.

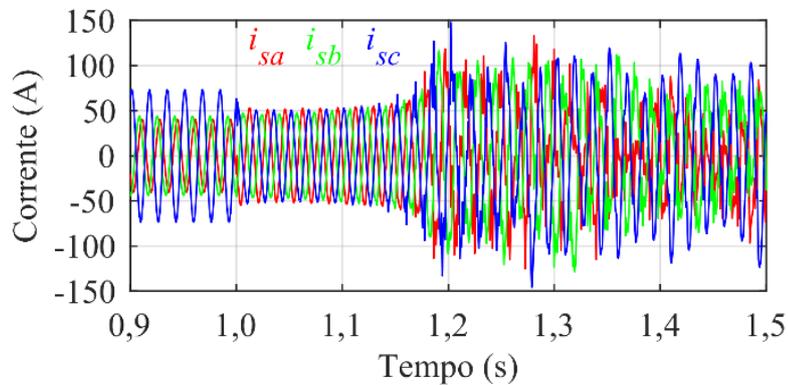
Os resultados obtidos evidenciam a inaptidão do CHB frente à regulação plena da corrente de rede em regime permanente. Apesar disso, é vastamente utilizado em seu nicho de aplicação.

Figura 58 - Formas de onda de corrente de saída do CHB durante a compensação do desequilíbrio de carga em regime permanente com a alteração no controle de corrente



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

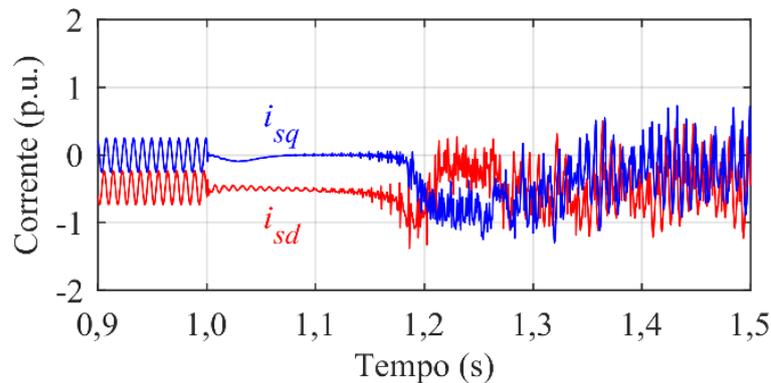
Figura 59 - Formas de onda de corrente no alimentador durante a compensação do desequilíbrio de carga em regime permanente com a alteração no controle de corrente



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

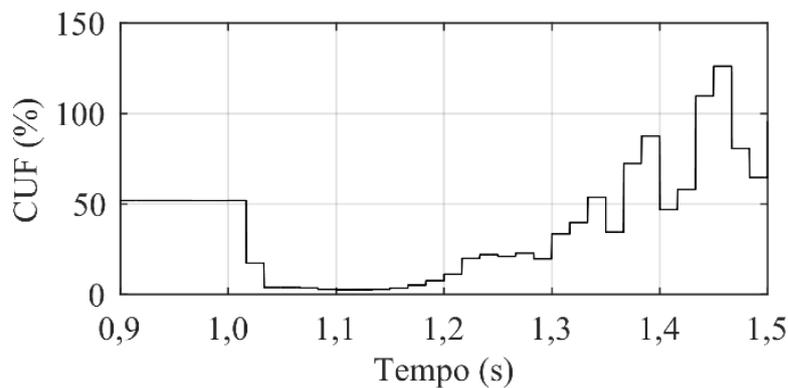
As componentes da corrente de rede em coordenadas síncronas são mostradas na Figura 60. Durante o período em que o CHB compensa plenamente o desequilíbrio de corrente, as componentes  $i_{sd}$  e  $i_{sq}$  apresentam valores cc com pequenas ondulações e com CUF de 4%, como mostra a Figura 61.

Figura 60 -Componentes em eixo direto e quadratura da corrente da rede com a compensação do CHB com a alteração no controle de corrente



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Figura 61 -Fator de desequilíbrio de corrente da rede com a compensação do CHB com a alteração no controle de corrente

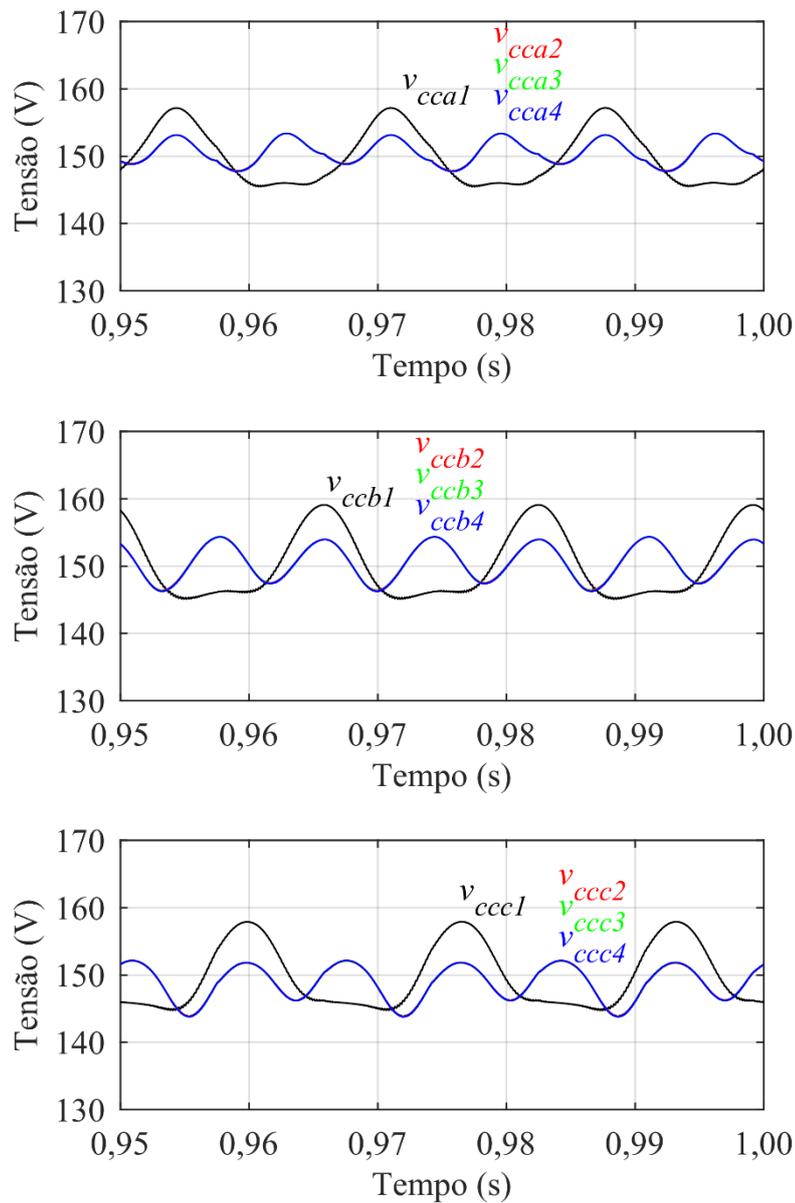


Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

#### 5.4 CONVERSOR CASCATA INTERCONECTADO

A Figura 62 apresenta as formas de onda da tensão em cada célula do iCHB. Percebe-se que as tensões estão reguladas em torno da tensão nominal estabelecida com erro de regime permanente menor que 0,8%. É verificada também a presença de ondulações na frequência fundamental do sistema, que surgem da interação da tensão gerada pela célula com a componente cc da corrente de circulação. As tensões das células inferiores, i.e.  $j = 2, 3$  e 4, são exatamente iguais e aparecem sobrepostas por se tratar de simulações ideais.

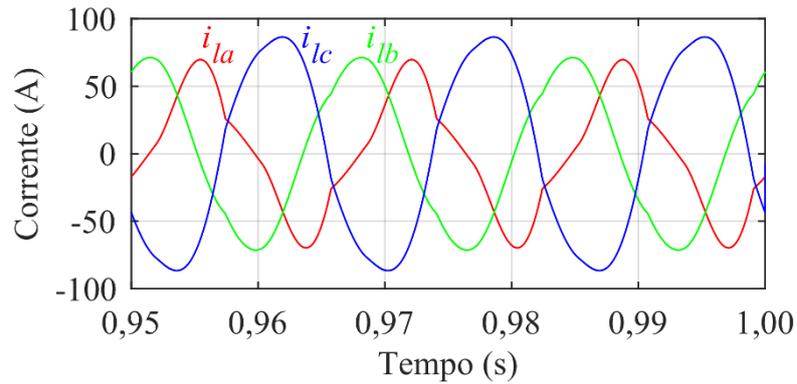
Figura 62 - Formas de onda da tensão das células do iCHB com carga desequilibrada e não linear



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

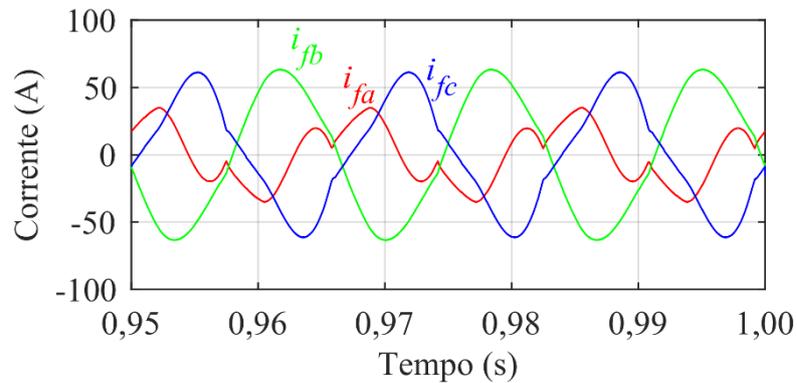
A corrente de carga possui desequilíbrio e distorções consideráveis ( $CUF = 27,7\%$  e  $DHT = 20,1\%$ ,  $5,4\%$  e  $8,8\%$ , respectivamente), conforme a forma de onda mostrada na Figura 63. Para a correta regulação da corrente do alimentador, a corrente fornecida pelo iCHB ao PCC deve conter toda a distorção da corrente de carga acrescida da parcela reativa e é apresentada na Figura 64. A corrente do alimentador, com a compensação do iCHB, apresenta alto fator de potência ( $fp > 0,9999$ ), baixa distorção ( $DHT < 1,03\%$ ) e estão equilibradas ( $CUF = 0,96\%$ ), de acordo com a Figura 65.

Figura 63 - Formas de onda de corrente na carga com carga desequilibrada e não linear



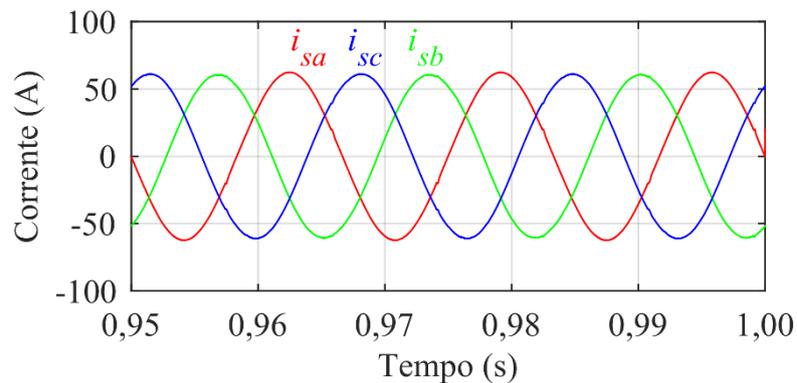
Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Figura 64 - Formas de onda de corrente de saída do iCHB com carga desequilibrada e não linear



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Figura 65 - Formas de onda de corrente no alimentador com carga desequilibrada e não linear

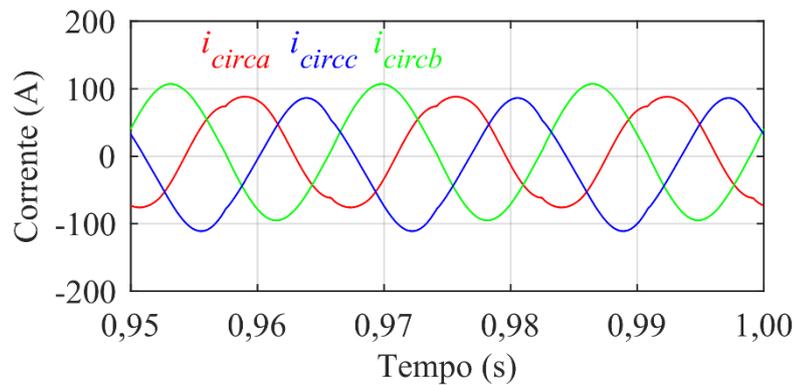


Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

A corrente necessária para a troca de energia entre os braços do iCHB é a parcela cc da corrente de circulação, apresentada na Figura 66, de valor 6,22 A; 6,07 A; -12,29 A, respectivamente. Em contrapartida, a parcela ca alcança patamares próximos a 70 A, quase o

dobro do valor eficaz da corrente de saída. Essa é, portanto, a principal deficiência em relação ao MMC.

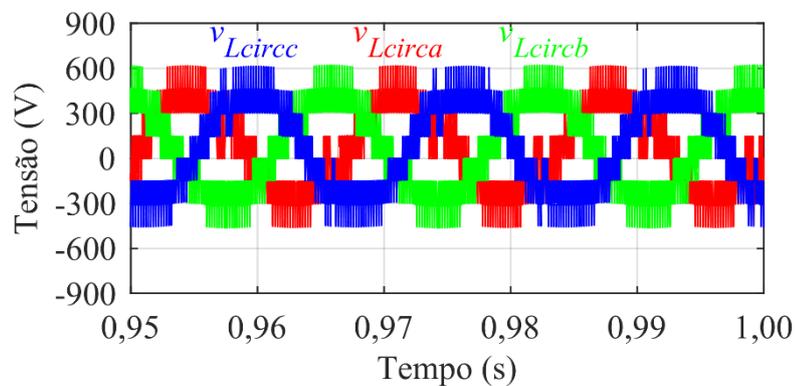
Figura 66 -Formas de onda da corrente de circulação do iCHB com carga desequilibrada e não linear



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

A Figura 67 traz as formas de onda de tensão que produzem as correntes de circulação, com nível médio igual a  $V_{cc}/2$ .

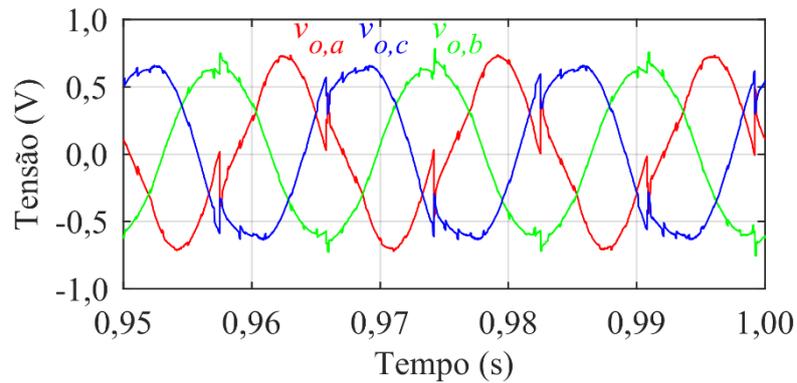
Figura 67 -Formas de onda da tensão  $v_{Lcirx}$  com carga desequilibrada e não linear



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

A ação de controle responsável pela imposição da corrente de saída, fruto da associação do controlador PI, é mostrada na Figura 68. A ação de controle apresenta entalhes como reflexo da comutação dos diodos da carga não linear.

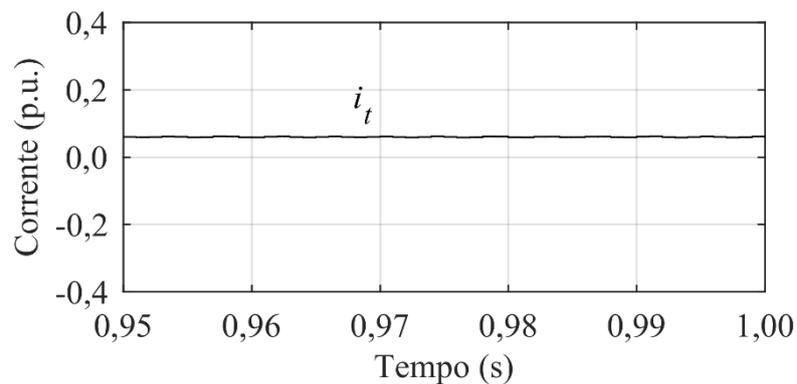
Figura 68 -Formas de onda da ação de controle de corrente  $v_{o,x}$  com carga desequilibrada e não linear



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

A parcela que repõe a energia gasta na operação do iCHB é controlada pela malha de tensão total, cuja ação de controle é ilustrada na Figura 69.

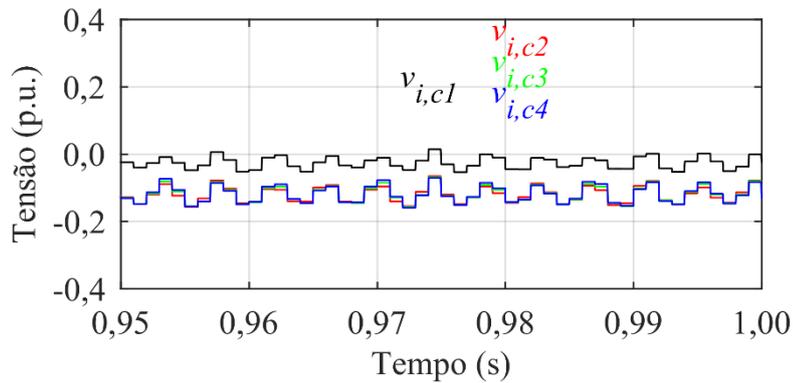
Figura 69 -Forma de onda da ação de controle de tensão total  $i_t$  com carga desequilibrada e não linear



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Combinada com  $v_{o,x}$ , a ação de controle de tensão individual  $v_{ix,j}$  promove a regulação de tensão nas células, sem a qual não é possível a manutenção da operação do iCHB. A ação de controle  $v_{ix,j}$  apresentada na Figura 70, referente às células da fase C, é multiplicada por uma função cossenoidal, ditando a amplitude desse cosseno.

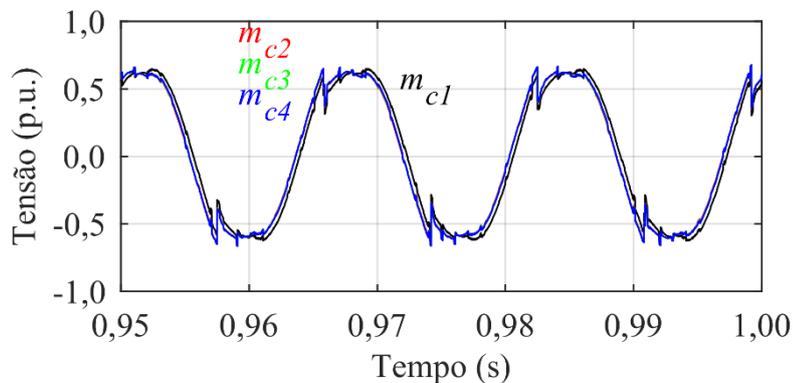
Figura 70 - Formas de onda da ação de controle de tensão individual  $v_{i,cj}$  com carga desequilibrada e não linear



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

A Figura 71 apresenta a ação de controle resultante dos controles de corrente e tensão individual para cada célula da fase C do iCHB. Como citado anteriormente, a célula superior possui comportamento distinto das células inferiores e, se consideradas todas as células iguais, as células inferiores possuem comportamento idêntico.

Figura 71 - Formas de onda do sinal modulador  $m_{cj}$  com carga desequilibrada e não linear



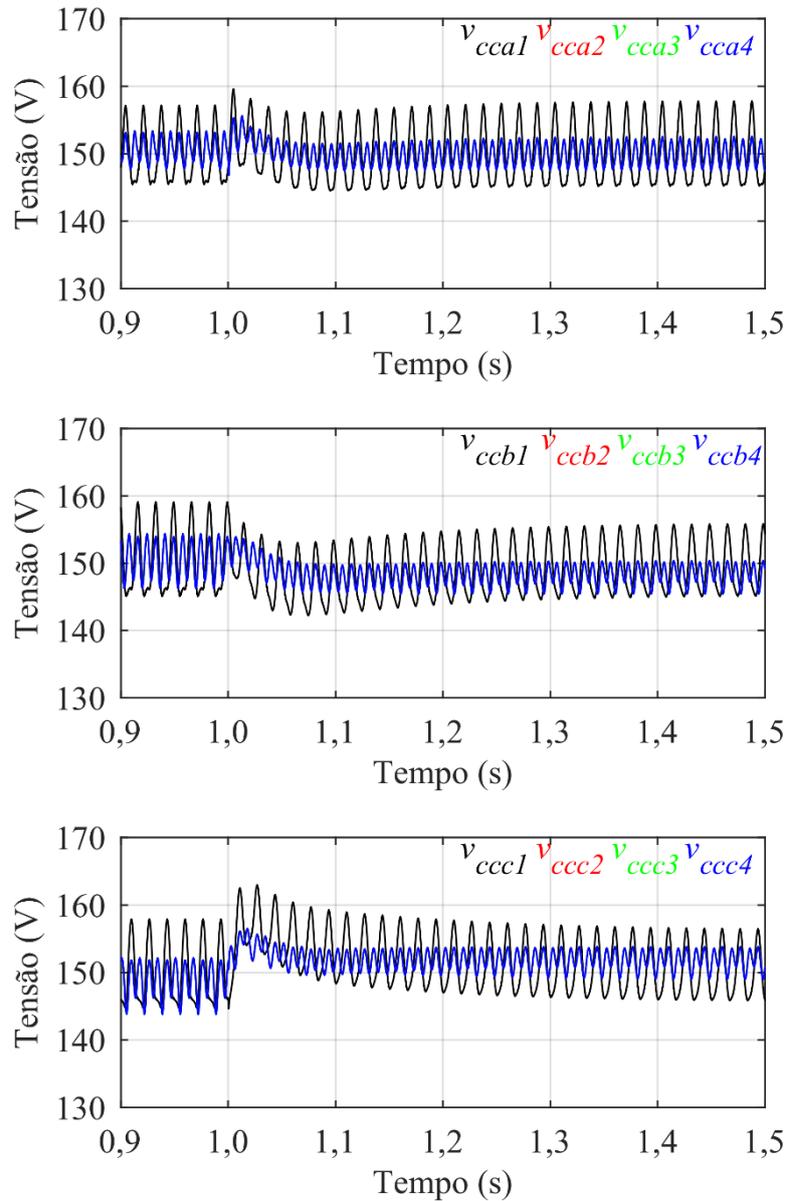
Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

## 5.5 DEGRAU DE CARGA NO CONVERSOR CASCATA INTERCONECTADO

O conversor iCHB foi avaliado frente a variações de carga. O sistema inicia com carga não linear e, no instante de tempo igual a 1,0 s, a carga da fase C é reduzida em dez vezes.

A Figura 72 apresenta o comportamento dinâmico das tensões das células do iCHB durante o transitório gerado pelo degrau de carga. Os resultados obtidos podem ser considerados adequados devido ao pequeno desvio apresentado, em torno de 1,2%.

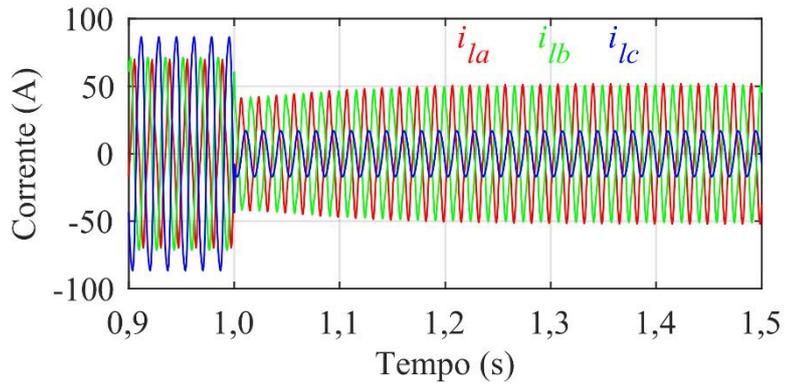
Figura 72 -Comportamento dinâmico da tensão das células do iCHB durante o degrau de carga



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

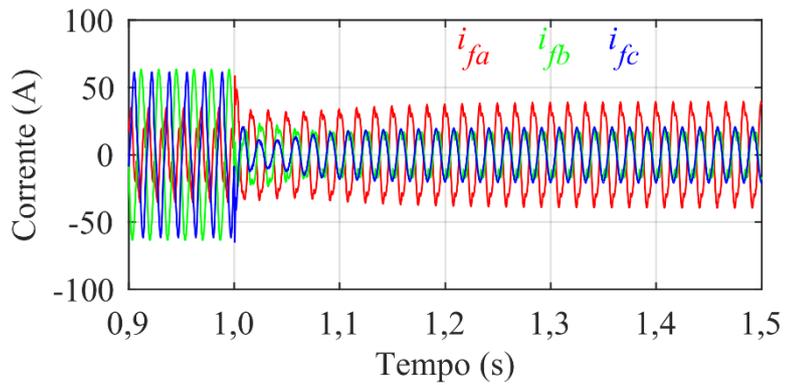
Após o degrau, as correntes de carga, Figura 73, são instantaneamente alteradas (CUF = 50,8 %) e forçam as correntes de saída do iCHB, Figura 74, a se adequarem ao novo ponto de operação. As correntes do alimentador permanecem reguladas mesmo durante o transitório de carga, conforme mostra a Figura 75. A envoltória da corrente do alimentador é determinada pelo comportamento dinâmico do controlador de tensão total do iCHB. Após entrar em regime, o CUF aumenta de 1,2% para 2,67% como pode ser visto na Figura 76.

Figura 73 -Comportamento dinâmico da corrente na carga durante o degrau de carga



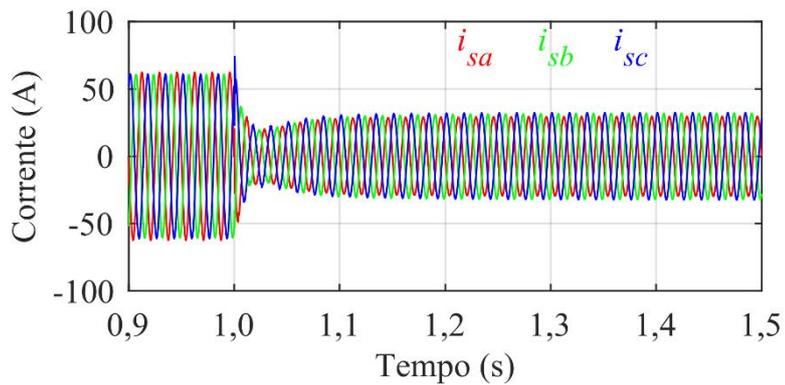
Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Figura 74 -Comportamento dinâmico da corrente de saída do iCHB durante o degrau de carga



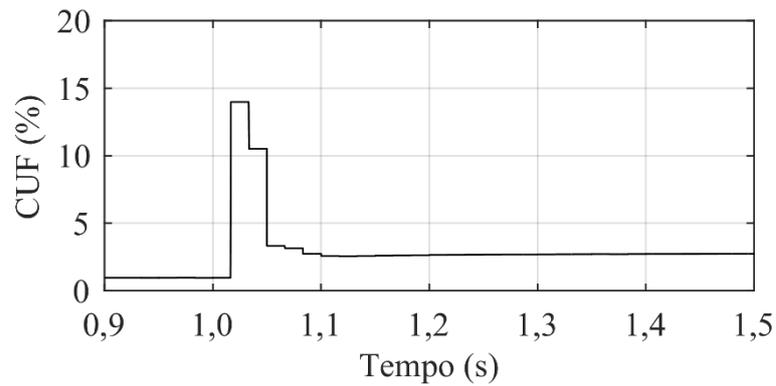
Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Figura 75 -Comportamento dinâmico da corrente no alimentador durante o degrau de carga



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

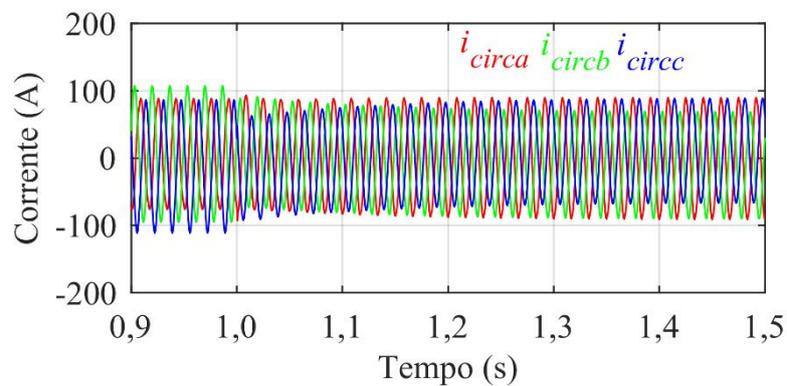
Figura 76 -Comportamento dinâmico do valor de desequilíbrio de corrente da rede



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

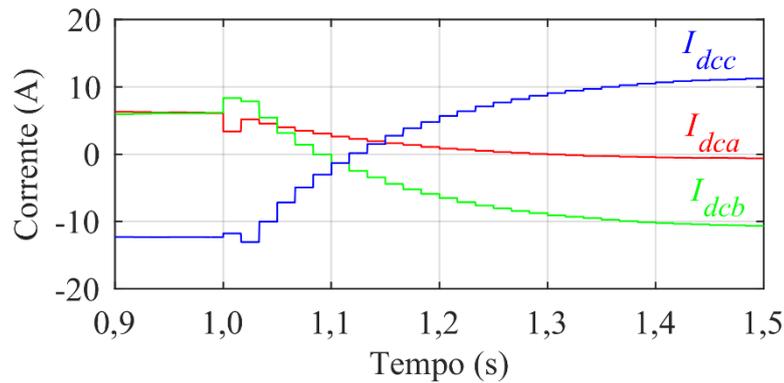
O transitório da corrente de circulação pode ser visto na Figura 77. É possível notar na Figura 77 que a componente ca na frequência fundamental não possui variações significativas. Já o valor médio da corrente de circulação  $I_{dcx}$  varia para se estabelecer no novo ponto de equilíbrio, segundo a Figura 78.

Figura 77 -Comportamento dinâmico da corrente de circulação durante o degrau de carga



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

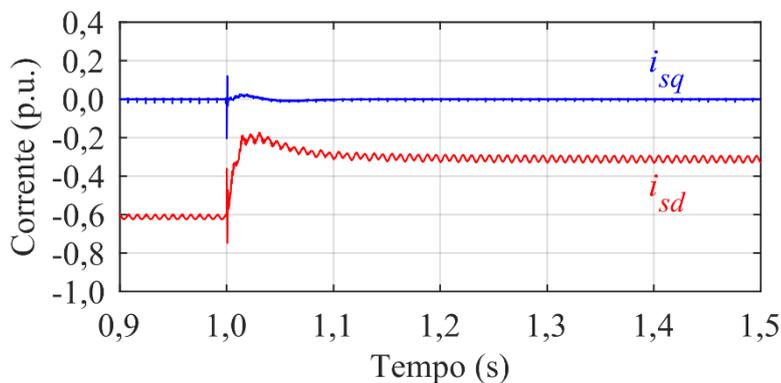
Figura 78 -Comportamento dinâmico do valor médio da corrente de circulação durante o degrau de carga



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

A capacidade de regulação das correntes da rede pelo iCHB pode ser verificada também pelos sinais de corrente em coordenadas síncronas, conforme mostra a Figura 79. As componentes no eixo direto  $i_{sd}$  e em quadratura  $i_{sq}$  possuem pequenos valores alternados, sendo predominante seus valores médios.

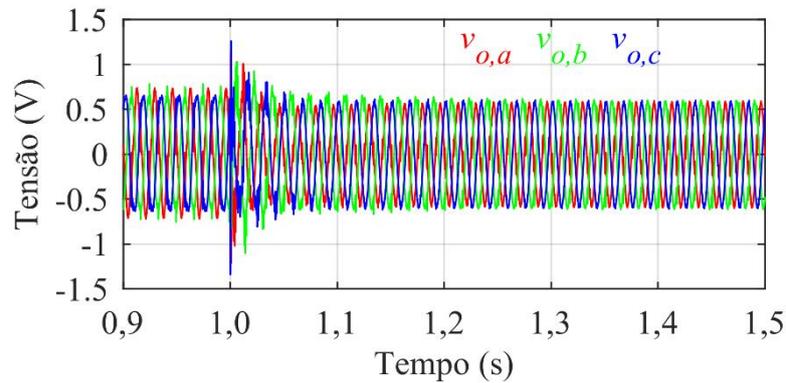
Figura 79 -Componentes em eixo direto e quadratura da corrente da rede com a compensação do iCHB durante o degrau de carga



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

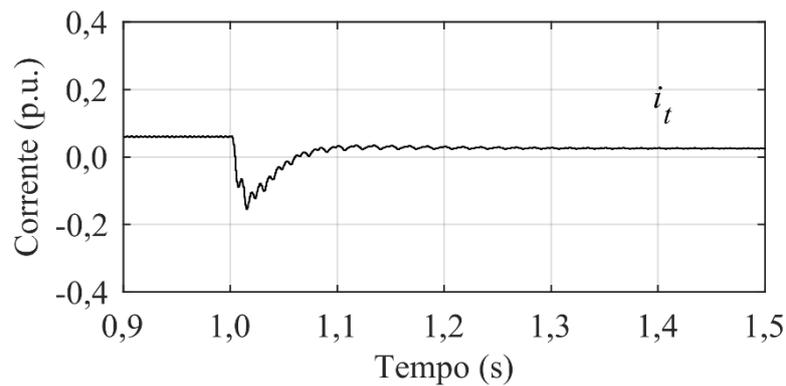
O transitório da ação de controle de corrente é apresentado na Figura 80. Em menos de 200 ms o sistema atinge novamente o ponto de equilíbrio. A malha de tensão total entra em regime permanente em torno de 100 ms, conforme mostra a Figura 81.

Figura 80 -Formas de onda da ação de controle de corrente  $v_{o,x}$  com carga desequilibrada e não linear durante o degrau de carga



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

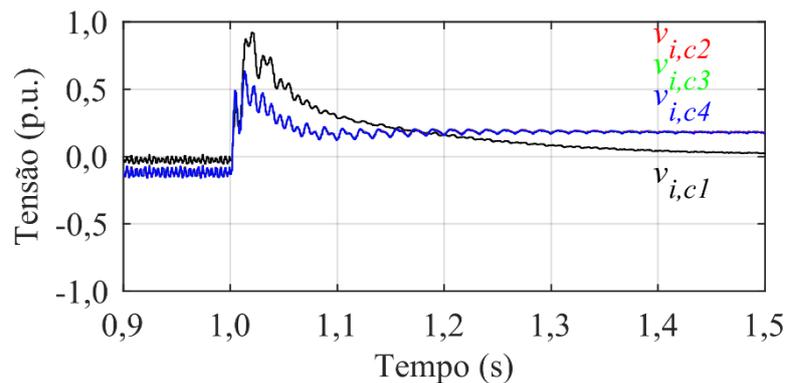
Figura 81 -Forma de onda da ação de controle de tensão total  $i_t$  com carga desequilibrada e não linear durante o degrau de carga



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

A malha de tensão individual necessita de 500 ms para equilibrar as tensões do iCHB. As ações de controle da malha de tensão individual da fase C são apresentadas na Figura 82.

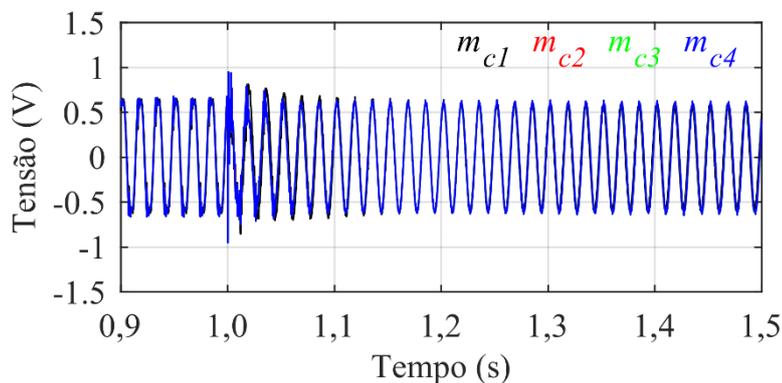
Figura 82 -Formas de onda da ação de controle de tensão individual  $v_{i,cj}$  com carga desequilibrada e não linear durante o degrau de carga



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Os sinais modulantes, efeito da combinação das ações dos controladores de corrente e de tensão, são mostrados na Figura 83. É necessário, durante o início do transitório, que a ação de controle seja mantida dentro da faixa linear de modulação, que no presente caso se restringe a tensões entre -1 V e 1 V.

Figura 83 -Formas de onda do sinal modulador  $m_{cj}$  com carga desequilibrada e não linear durante o degrau de carga



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

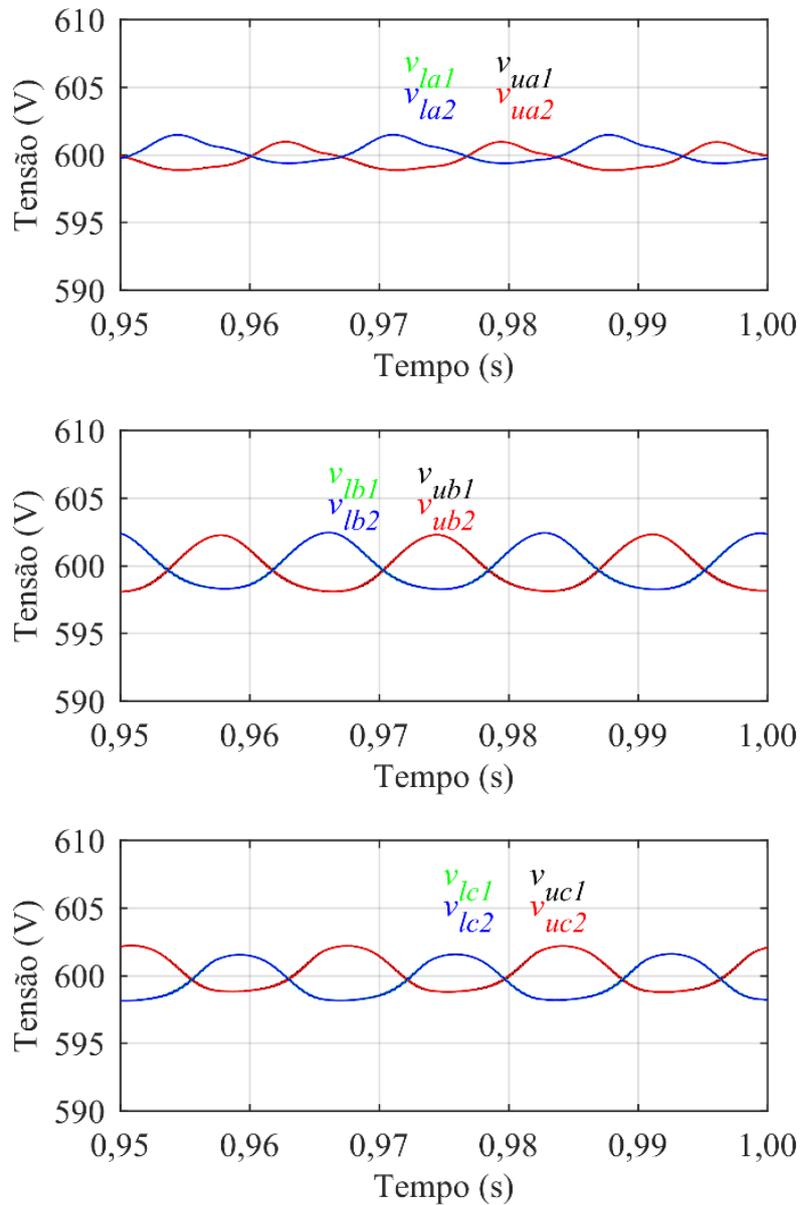
## 5.6 CONVERSOR MODULAR MULTINÍVEL

O conversor modular multinível foi simulado com os mesmos parâmetros do iCHB para fins de comparação entre as topologias. O MMC simulado é composto por duas células meia ponte por semibraço, totalizando quatro células por braço/fase, mesma quantidade de células do iCHB. É válido ressaltar que o número de células deve dobrar para que o MMC sintetize o mesmo número de níveis de saída em relação ao iCHB.

### 5.6.1 Desempenho do MMC

A Figura 84 apresenta a forma de onda da tensão em cada célula. É nítido que a tensão de cada célula possui valor médio quatro vezes superior ao iCHB com a metade da ondulação de tensão para a mesma capacitância. Nesse quesito, a vantagem é da topologia proposta.

Figura 84 -Formas de onda da tensão das células do MMC com carga desequilibrada e não linear



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

As formas de onda da corrente no sistema (carga, MMC e alimentador) são praticamente iguais para as duas topologias, objetivo primário para essa comparação, e são apresentadas na Figura 85, Figura 86 e Figura 87, respectivamente.

Figura 85 - Formas de onda de corrente na carga com carga desequilibrada e não linear

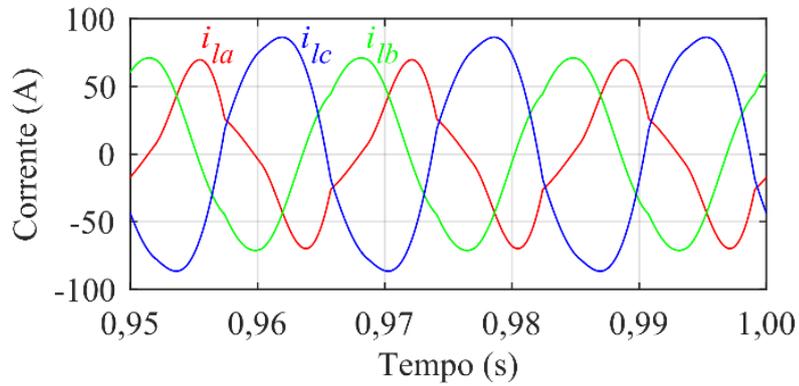


Figura 86 - Formas de onda de corrente de saída do MMC com carga desequilibrada e não linear

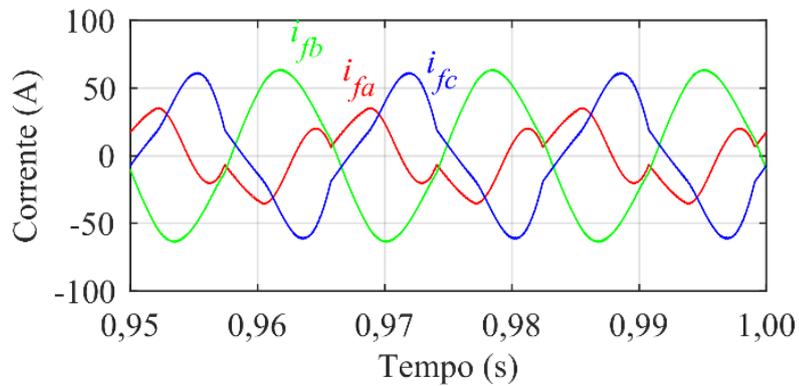
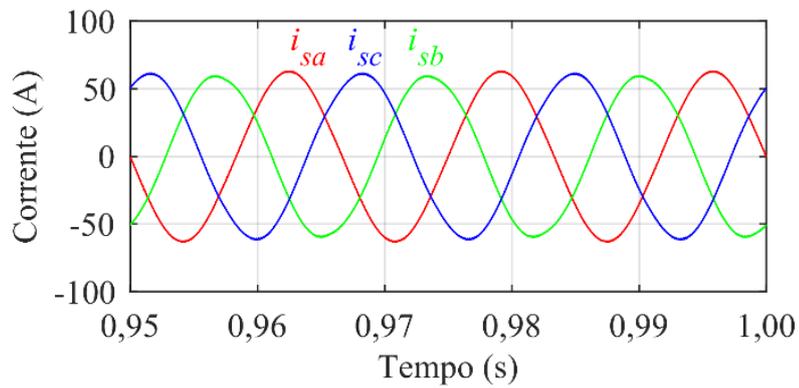


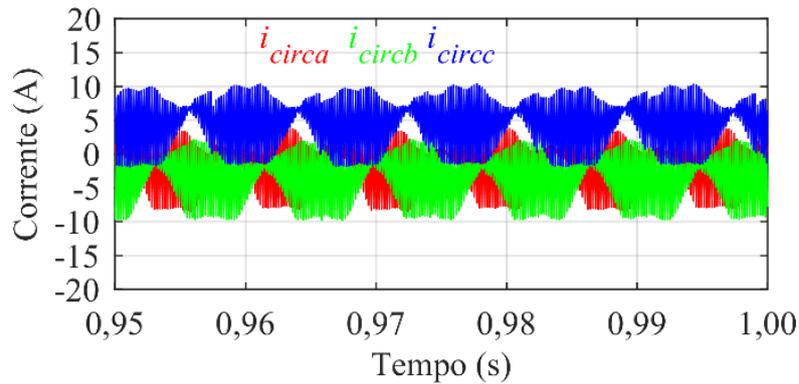
Figura 87 - Formas de onda de corrente no alimentador com carga desequilibrada e não linear



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

A Figura 88 apresenta a corrente de circulação do MMC, definida como a diferença entre as correntes de cada braço. O valor médio das correntes de circulação é -1,48 A, -3,24 A e 4,72 A e valor eficaz de 3,25 A, 4,42 A e 5,57 A para as fases A, B e C, respectivamente.

Figura 88 -Formas de onda da corrente de circulação do MMC



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

### 5.6.2 Figuras de mérito para comparação entre o MMC e o iCHB

As figuras de mérito servem como parâmetros de comparação entre as topologias apresentando aspectos diversos e salientando as vantagens de cada topologia com relação a aspectos específicos da aplicação em que a topologia se propõe a satisfazer. A análise será feita considerando um braço do conversor.

A primeira figura de mérito para a comparação entre as topologias é o produto entre o número de células e a tensão de cada célula. Assim:

$$\begin{aligned} (nV_{cc})_{\text{MMC}} &= 4 \cdot 600 = 2400 \text{ V} \\ (nV_{cc})_{\text{iCHB}} &= 4 \cdot 150 = 600 \text{ V} \end{aligned} \quad (5.4)$$

e é verificado que o iCHB precisa de quatro vezes menos tensão por braço para operar.

A segunda figura de mérito é o produto entre a tensão da célula e o valor eficaz da corrente que flui pelos semicondutores, representando a potência processada pelo elemento comutador. Para tanto, devido aos esforços desiguais entre as células superiores e inferiores, dois produtos são contabilizados para o iCHB:

$$\begin{aligned} \sum_{x=a}^c (V_{ce} I_{Sx})_{\text{MMC}} &= 600 \cdot (7,8 + 15,6 + 13,6) = 22,2 \text{ kVA} \\ \sum_{x=a}^c (V_{ce} I_{Ssx})_{\text{iCHB}_{\text{sup}}} &= 150 \cdot (15,1 + 31 + 27) = 10,97 \text{ kVA} \\ \sum_{x=a}^c (V_{ce} I_{Six})_{\text{iCHB}_{\text{inf}}} &= 150 \cdot (56,8 + 81,3 + 75,5) = 32,04 \text{ kVA} \end{aligned} \quad (5.5)$$

Embora as células superiores apresentem a metade do valor de potência do MMC, as células inferiores processam 45% a mais de potência. Esse resultado corrobora a necessidade de técnicas de mitigação da corrente de circulação sem a utilização de indutores com indutância exageradas.

A terceira figura de mérito é a energia acumulada em cada célula do conversor, fator importante quando se trata de avaliação ou aplicação de técnicas para suportabilidade a sub tensões decorrentes de faltas na rede (LVRT – *Low-Voltage Ride-Through*).

$$\begin{aligned} \left( \frac{C_c V_{cc}^2}{2} \right)_{\text{MMC}} &= \frac{5m \cdot 600^2}{2} = 900 \text{ J} \\ \left( \frac{C_c V_{cc}^2}{2} \right)_{\text{iCHB}} &= \frac{5m \cdot 150^2}{2} = 56,25 \text{ J} \end{aligned} \quad (5.6)$$

O fator quadrático aplicado à tensão faz com que o MMC acumule 16 vezes mais energia do que o iCHB e seja mais adequado para aplicações com entrega temporária de energia ao sistema.

### 5.6.3 Comparativo entre o iCHB e o MMC

A Tabela 7 apresenta o resumo da quantidade de elementos ativos e passivos, bem como as variáveis medidas e malhas de controle, necessários para a implementação das topologias com o mesmo número de níveis ( $\lambda$ ) na tensão de saída. Para essa comparação foi considerado que o MMC comute com modulação por deslocamento em fase que gere  $2N+1$  níveis na saída.

O iCHB é constituído pela metade do número de células e de malhas de controle, além de requer menos sensores em comparação ao MMC utilizando o sistema de controle convencional.

Para sistemas de média e alta tensão, que requerem um número elevado de células para suportar a tensão do sistema, o iCHB se torna mais atrativo que o MMC pois utiliza a metade do número de células em comparação ao MMC utilizando células meia ponte e metade do tráfego de dados de comunicação entre o sistema de controle central e as células. A redução do tráfego de dados pode ser vital para a adequada operação de conversores modulares com grandes extensões de células (DA SILVA, 2017).

Tabela 7 - Comparativo entre o MMC e o iCHB

Quantidade	MMC	iCHB
Células	$3 \lambda - 1$	$\frac{3}{2} \lambda - 1$
Interruptores	$12 \lambda - 1$	$12 \lambda - 1$
Indutores	6 (1 por semibraço)	3 saída 3 circulação
Malhas de controle	Saída Total	Saída Total
	Braço	-
	Semibraço	-
	Circulação	-
Variáveis realimentadas	6 correntes (1 por semibraço)	3 correntes de saída
	$3 \lambda - 1$ tensões	$\frac{3}{2} \lambda - 1$ tensões

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

## 5.7 CONCLUSÃO

A capacidade de regulação da corrente no alimentador foi verificada via simulação numérica para um iCHB em uma rede de baixa tensão tendo como potência nominal de 30 kVA. Foram demonstradas as suas vantagens sobre o CHB com valor de indutância de circulação próximo ao valor da indutância de saída.

O CHB conectado em estrela é incapaz de manter seus capacitores regulados e simultaneamente compensar o desequilíbrio de potência ativa na rede, o que foi verificado via simulação.

Os resultados obtidos demonstram o desempenho do iCHB frente a cargas não lineares desequilibradas. A corrente no alimentador possui pequeno desequilíbrio, com fator de potência unitário e as tensões das células foram reguladas em torno do valor nominal.

O controlador proporcional na malha de tensão individual não consegue erro nulo em regime permanente. Apesar disso, e pelo pequeno erro verificado, o desempenho é considerado satisfatório.

Para fins de comparação, a simulação de um MMC com potência nominal de 30 kVA foi incluída, com os mesmos parâmetros do iCHB. O resultado, no que diz respeito às correntes de carga, dos conversores e do alimentador, é igual para os dois conversores. Isso demonstra que o iCHB é equivalente ao MMC quando aplicado à regulação das correntes do alimentador.

Além disso, figuras de mérito foram definidas e utilizadas para uma melhor comparação entre as topologias, bem como a contagem dos elementos que os compõem.

O desenvolvimento de um método para a redução da parcela ca da corrente de circulação se faz imprescindível para que o iCHB se torne não somente atrativo e promissor, mas sim competitivo e viável para a aplicação desejada.

## 6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Equation Section (Next)

Após a verificação das características do iCHB durante as análises teóricas e simulações numéricas, foi desenvolvido em laboratório um protótipo em escala visando a reprodução dos ensaios realizados no ambiente de simulação. Devido a restrições orçamentárias, o iCHB será construído em escala reduzida, com os parâmetros do conversor apresentados na Tabela 8 e os parâmetros de carga apresentados na Tabela 9.

Tabela 8 - Principais parâmetros do iCHB para o ensaio experimental

Potência nominal do iCHB	$S_n$	1 kVA
Tensão da rede	$V_s$	60 V
Tensão nominal de célula	$V_{cc}$	50 V
Frequência da rede	$f_s$	60 Hz
Frequência de comutação	$f_{sw}$	5 kHz
Número de células por braço	$n$	3
Indutância da rede	$L_s$	16,5 mH
Resistência da rede	$R_s$	0,75 $\Omega$
Indutância de saída	$L$	10 mH
Indutância de circulação	$L_c$	111,4 mH
Capacitância da célula	$C_c$	2300 $\mu$ F

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Tabela 9 - Parâmetros das cargas para o ensaio experimental

Fase	Resistência	Indutância	Não linear
A	122 $\Omega$ (38,4 $\Omega$ )	16 mH	0 VA
B	61 $\Omega$	32 mH	0 VA
C	122 $\Omega$	16 mH	91,3 VA

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Os controladores utilizados no protótipo em escala foram reprojitados mantendo as premissas apresentadas no Capítulo 4. Os ganhos resultantes estão sumarizados na Tabela 10.

Tabela 10 - Ganhos dos controladores utilizados nos ensaios experimentais

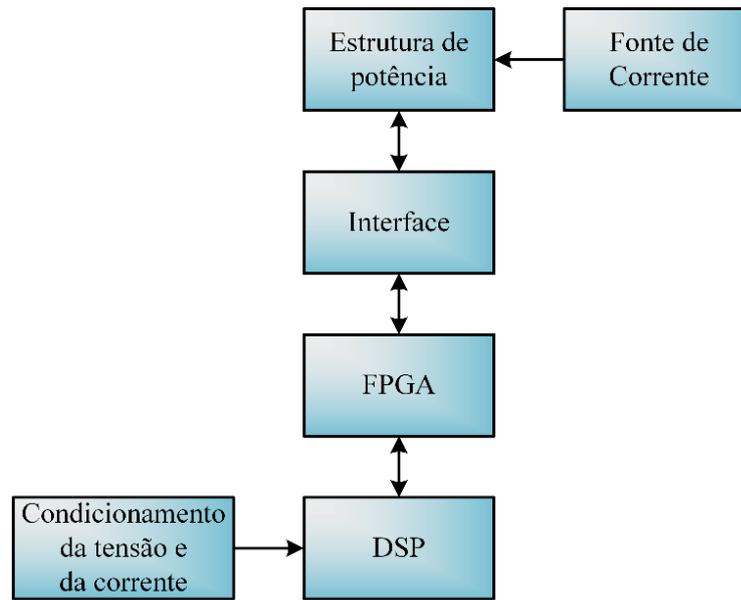
Controlador	Ganho Proporcional	Ganho Integral
Corrente	8	0,005
Tensão Total	0,05	0,1
Tensão Individual	0,1	0

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

### 6.1 APRESENTAÇÃO DO PROTÓTIPO

Os circuitos que compõem o iCHB são separados por placas que desempenham funções específicas conforme a Figura 89.

Figura 89 - Distribuição dos circuitos do iCHB



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

A placa de condicionamento tem por objetivo a compatibilização dos sinais medidos (sensores de corrente da rede, tensão da rede e da corrente de carga) para a amostragem pelo processador digital de sinais (DSP).

O DSP é encarregado de realizar a leitura das variáveis de interesse do iCHB, o sistema de sincronismo, as transformações  $abc/dq0$  e  $dq0/abc$ , o cálculo e a atualização das ações de controle, além da proteção por sobretensão das células e sobrecorrente do iCHB. O DSP utilizado é o TMS320F28335 da Texas Instruments® no kit de desenvolvimento TMDSDOCK28335 utilizando a *daughter board* TMDSCNCD28335. O sensoriamento de tensão utiliza transformadores e o sensoriamento de corrente utiliza transdutores de efeito *Hall* LA 55-P da LEM®.

Entre o DSP e o arranjo de portas programáveis em campo (FPGA) é criado um canal de comunicação paralela. Através desse canal de comunicação, o DSP informa os valores de comparação para que o FPGA faça a modulação PWM por deslocamento em fase e gere os pulsos de comando para os interruptores das células. Adicionalmente, o FPGA informa ao DSP o valor de leitura de tensão de cada célula. O FPGA utilizado é o Cyclone II EP2C5T144 da Altera®. A Figura 90 apresenta uma imagem do kit de desenvolvimento do DSP e do FPGA.

Figura 90 - Imagem do kit TMDSDOCK28335 e do kit Cyclone II EP2C5T144

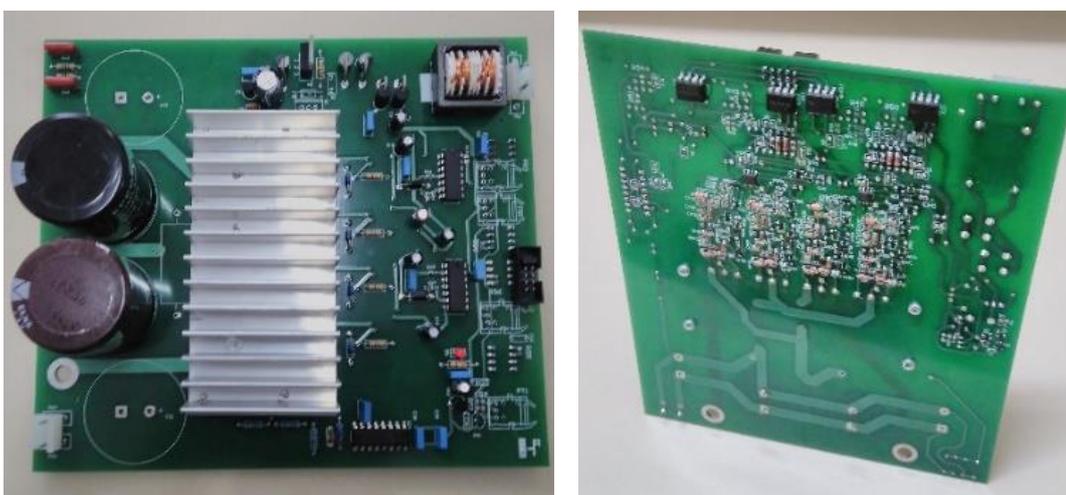


Fonte: Texas Instruments e Altera.

A placa de interface adequa os níveis de tensão entre o FPGA e as células, tanto no envio dos pulsos de comando quanto no recebimento da leitura das tensões das células.

A estrutura de potência é constituída de nove células, cada uma com um conversor ponte completa, mostrado na Figura 91. A medição de tensão da célula é feita por divisores resistivos e, através de um circuito oscilador do tipo VCO (*Voltage-Controlled Oscillator*), cria-se pulsos quadrados que variam em frequência proporcionalmente à tensão medida. Circuitos óticos provêm a isolação dos sinais de comutação e de realimentação de tensão entre a célula e a placa de interface.

Figura 91 - Célula ponte completa desenvolvida

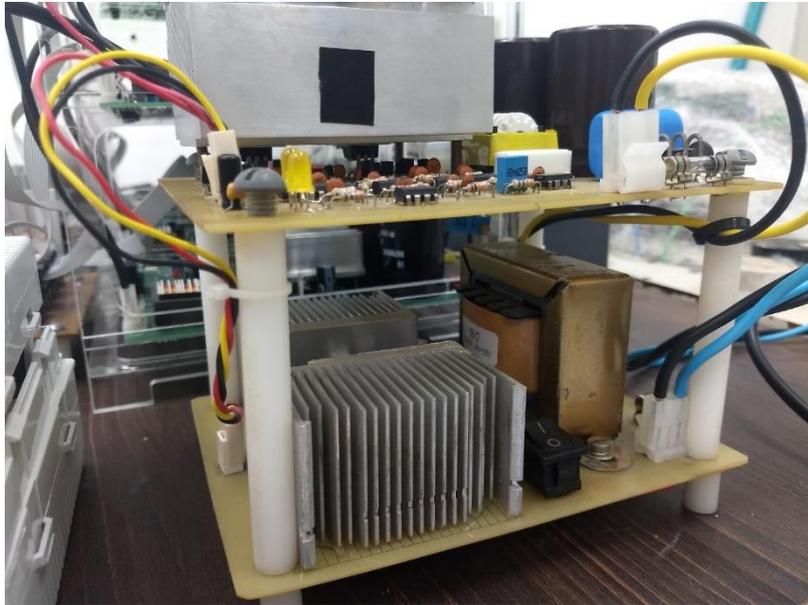


Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Os circuitos auxiliares de cada célula do iCHB são alimentados por uma fonte de corrente constituída de um conversor meia ponte monofásico, Figura 92, em corrente alternada de média frequência (4,36 kHz), conforme mostra a Figura 93. A isolação entre as células é

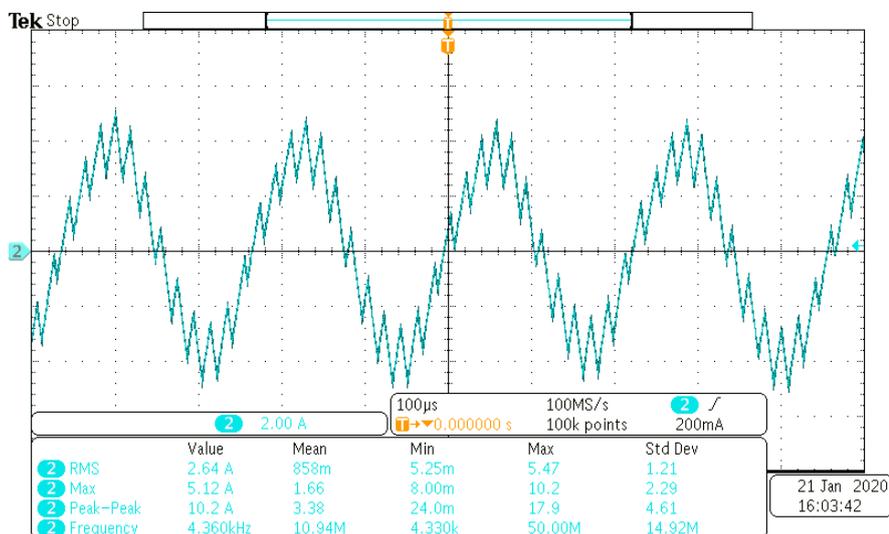
provida por meio de transformadores e a regulação de tensão para os circuitos da célula fica a cargo da própria célula (LAMBERT *et al.*, 2019).

Figura 92 -Fonte de corrente em corrente alternada em média frequência



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

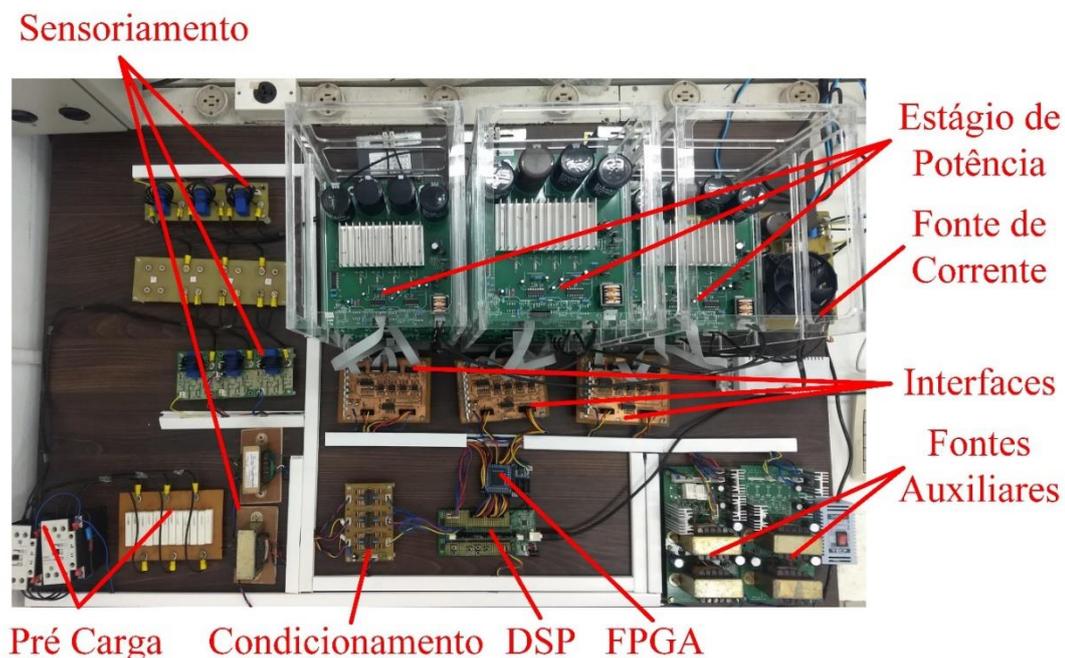
Figura 93 -Forma de onda da corrente de saída da fonte de corrente em média frequência



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

O protótipo em escala desenvolvido para o iCHB com os circuitos descritos é apresentado na Figura 94.

Figura 94 -O protótipo implementado do iCHB



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

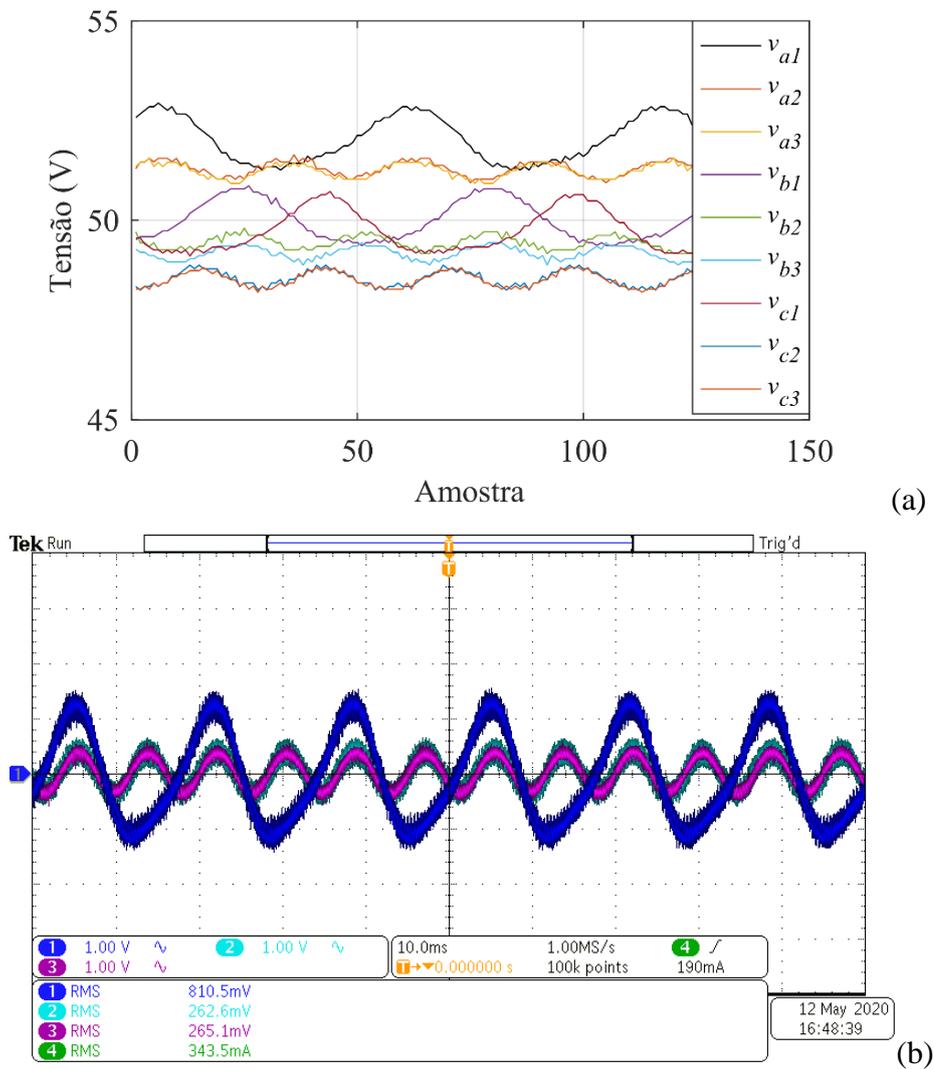
## 6.2 CONVERSOR CASCATA INTERCONECTADO EM ESCALA

As formas de onda de corrente e tensão ( $i_{lx}$ ,  $i_x$ ,  $i_{sx}$ ,  $i_{circx}$  e  $v_{Lcircx}$ ) das fases A, B e C serão doravante atribuídas aos canais 1, 2 e 3, respectivamente. A forma de onda da tensão da rede da fase A ( $v_{sa}$ ) é apresentada conjuntamente às formas de onda de corrente e de tensão para se ter o mesmo referencial de fase entre os resultados e foi designada para o canal 4.

Os valores de medição das tensões das nove células do iCHB recebidos pelo DSP podem ser vistas na Figura 95 (a), com os valores médios regulados em torno do valor nominal. O maior erro em regime permanente verificado foi de 3,9%, inerente ao sistema de controle com controlador proporcional. Entretanto, a magnitude desse erro não traz grandes consequências ao controle de corrente.

As tensões das células superiores contêm ondulação de tensão na frequência fundamental, além da ondulação no dobro da frequência fundamental. As formas de onda da parcela alternada das tensões das células do braço A podem ser vistas na Figura 95 (b), sendo as células a1, a2 e a3 representadas nos canais 1, 2 e 3, respectivamente. Como esperado, as tensões das células inferiores possuem o mesmo comportamento e diferem da tensão da célula superior, resultados esses semelhantes às formas de onda obtidas via simulação.

Figura 95 - Formas de onda experimentais da tensão das células do iCHB com carga desequilibrada e não linear: (a) tensão nas 9 células e (b) ondulação de tensão nas células do braço A



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

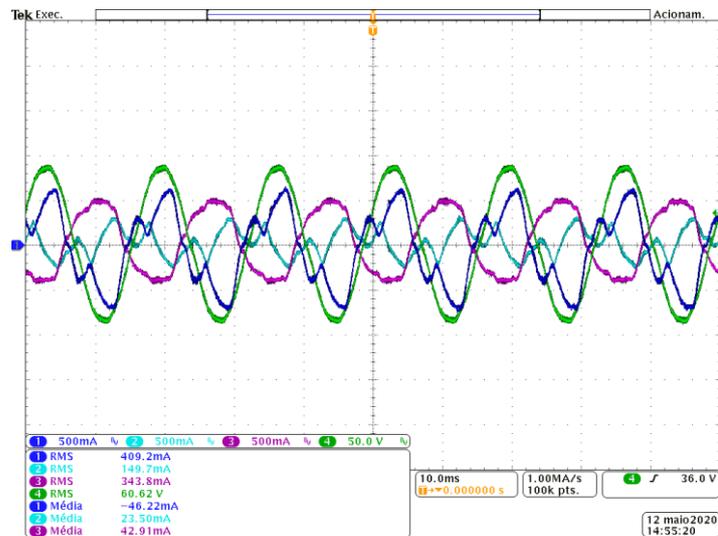
A Figura 96 traz as formas de onda da corrente na carga, com CUF medido em torno de 17,5% e com distorção harmônica de 7,41%, 7,61% e 14,4%, respectivamente. As formas de onda da corrente de compensação do iCHB são apresentadas na Figura 97. Como efeito do iCHB, as formas de onda de corrente do alimentador são praticamente senoidais (DHT menor que 3,26%), estão próximas do equilíbrio (CUF = 3,9%) e com fator de potência superior à 0,999, como mostra a Figura 98.

Figura 96 -Formas de onda experimentais de corrente na carga com carga desequilibrada e não linear (500 mA/div, 50 V/div)



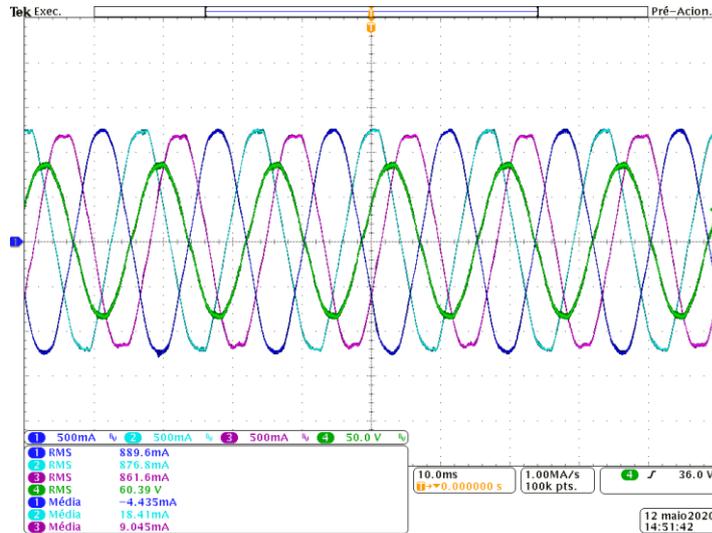
Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Figura 97 -Formas de onda experimentais de corrente de saída do iCHB com carga desequilibrada e não linear (500 mA/div, 50 V/div)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

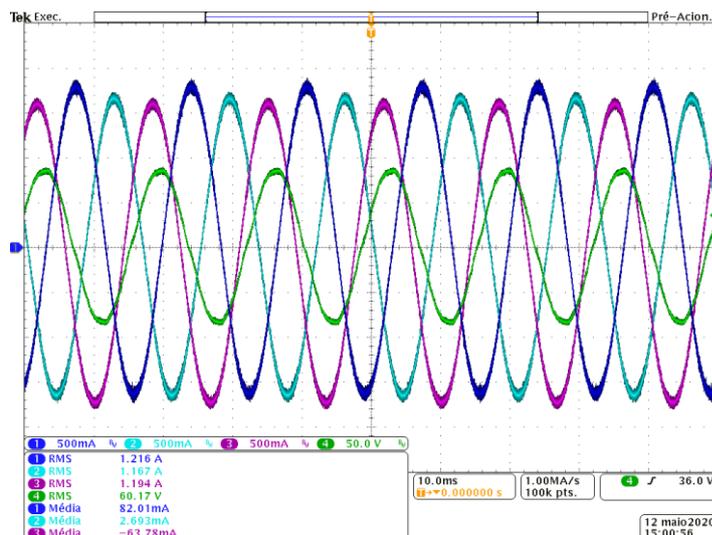
Figura 98 - Formas de onda experimentais de corrente no alimentador com carga desequilibrada e não linear (500 mA/div, 50 V/div)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

A Figura 99 mostra as formas de onda da corrente de circulação que flui pelos indutores do iCHB. As correntes possuem valor médio de 82 mA, 2 mA e -64 mA, respectivamente. O valor eficaz das correntes de circulação é de 1,22 A, 1,17 A e 1,19 A, respectivamente, e está de acordo com o valor esperado (1,195 A).

Figura 99 - Formas de onda experimentais de corrente de circulação do iCHB com carga desequilibrada e não linear (500 mA/div, 50 V/div)

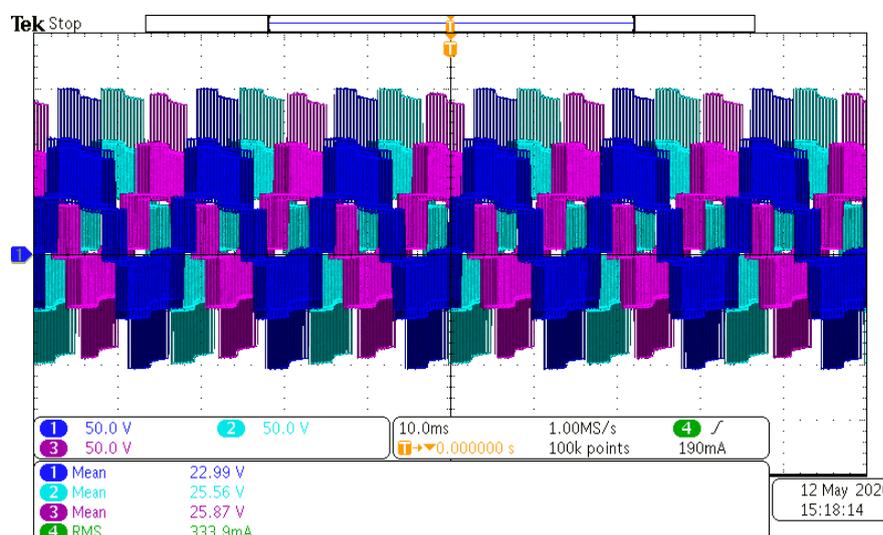


Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

As formas de onda da tensão  $v_{Leircx}$  que geram as correntes de circulação são mostradas na Figura 100. O valor médio de tensão é de 23 V, 26 V e 26 V, respectivamente, enquanto o

valor eficaz é de 62 V, 64 V e 59 V, respectivamente. Os valores médios das tensões  $v_{Lcircx}$  apresentaram concordância em relação ao valor esperado (25 V).

Figura 100 - Formas de onda experimentais da tensão  $v_{Lcircx}$  com carga desequilibrada e não linear (50 V/div)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

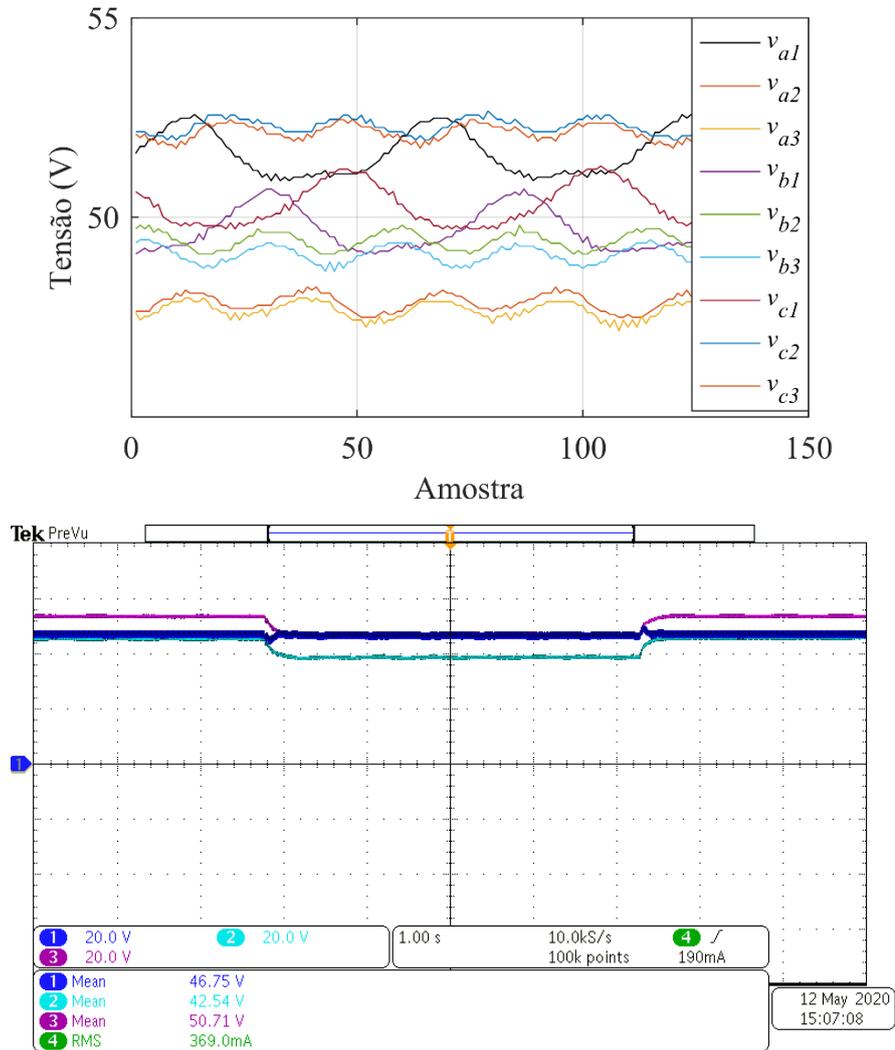
### 6.3 DEGRAU DE CARGA NO CONVERSOR CASCATA INTERCONECTADO EM ESCALA

Para a verificação da resposta dinâmica do iCHB, uma perturbação de carga é criada com a adição de 56  $\Omega$  em paralelo com a carga da fase A.

As formas de onda da tensão das células são ilustradas na Figura 101. É possível verificar que as tensões são reguladas em torno do valor nominal, sendo que o maior erro em regime permanente verificado é de -4,65%.

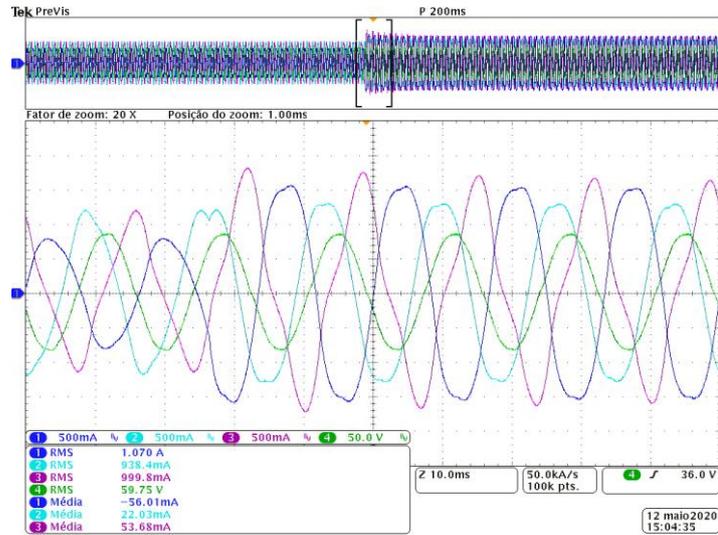
O transitório de corrente da carga é apresentado na Figura 102 e da corrente injetada no PCC por parte do iCHB é mostrado na Figura 103. O CUF medido da corrente da carga é de 14,4% e a THD é de 7%, 5,8% e 14,6%, respectivamente. A corrente do alimentador permanece regulada durante todo o transitório, o que pode ser verificado na Figura 104. O CUF da rede após a estabilização é de 4,1% e a THD máxima é de 2,83%.

Figura 101 - Formas de onda experimentais da tensão das células do iCHB durante o degrau de carga: (a) tensão em regime permanente nas 9 células e (b) tensão nas células do braço A



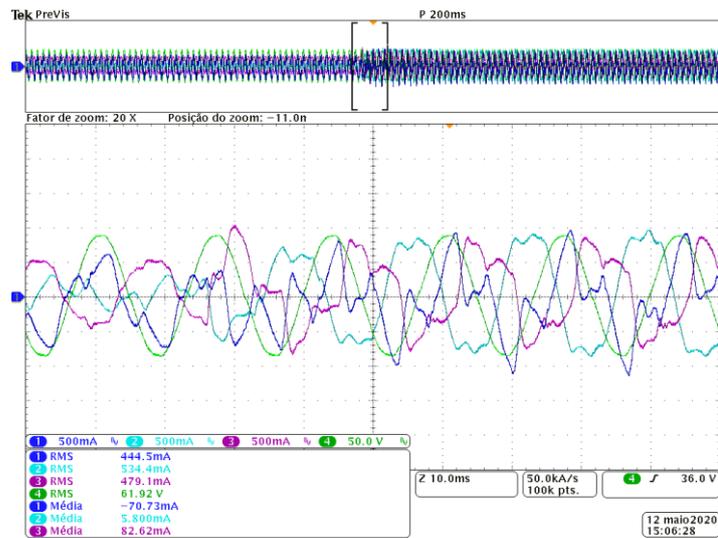
Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Figura 102 - Formas de onda experimentais de corrente na carga durante o degrau de carga (500 mA/div, 50 V/div)



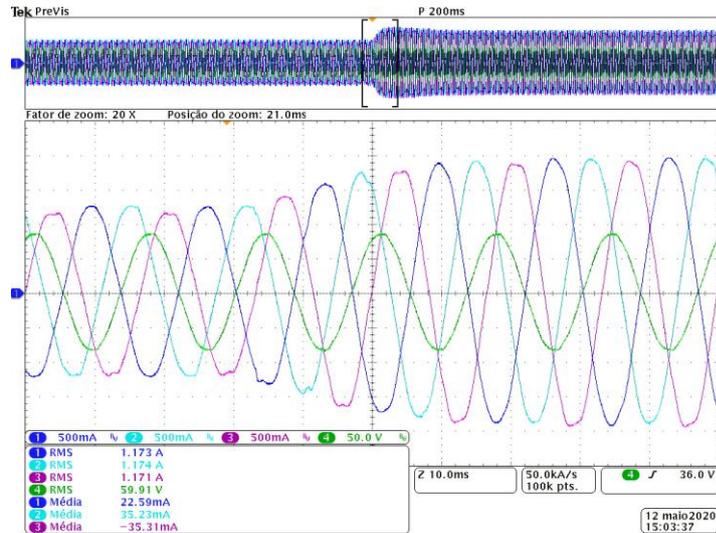
Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Figura 103 - Formas de onda experimentais de corrente de saída do iCHB durante o degrau de carga (500 mA/div, 50 V/div)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

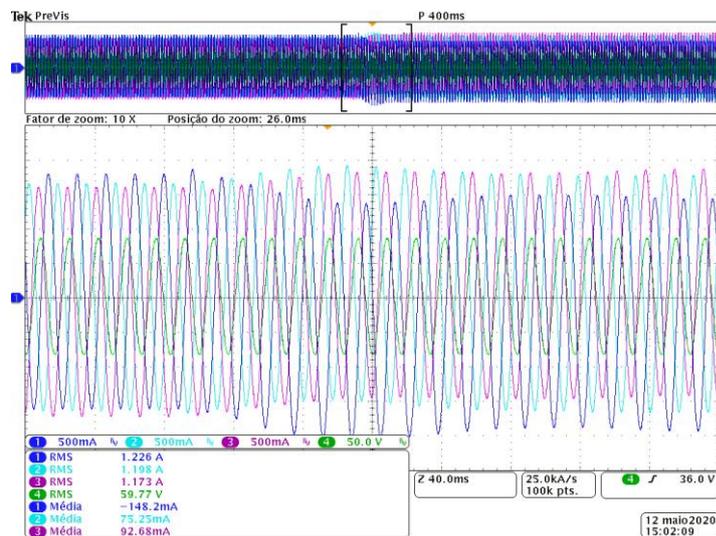
Figura 104 - Formas de onda experimentais de corrente no alimentador durante o degrau de carga (500 mA/div, 50 V/div)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

A resposta dinâmica da corrente de circulação é ilustrada na Figura 105. Os valores médios das correntes de circulação estabilizaram em -227 mA, 21 mA e 225 mA, respectivamente, evidenciando a alteração do ponto de operação do iCHB.

Figura 105 - Formas de onda experimentais da corrente de circulação durante o degrau de carga (500 mA/div, 50 V/div)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

## 6.4 CONCLUSÃO

Nesse capítulo foram expostos os resultados experimentais do protótipo construído para o conversor em cascata interconectado.

Com tensão e potência reduzidas, foi verificado que o iCHB foi capaz de regular a corrente no alimentador dentro dos limites de qualidade estabelecidos, com três formas de onda senoidais, equilibradas e em fase com a tensão do alimentador ao mesmo tempo mantendo reguladas as tensões das células que compõem o estágio de potência.

As formas de onda de tensão das células com ondulação no valor da frequência e no dobro do valor da frequência da rede foram verificadas, característica do iCHB que difere dos demais conversores modulares multiníveis.

A regulação de tensão das células do iCHB apresentou desempenho satisfatório. O erro em regime permanente verificado é em torno de 4,6%, superior ao inquerido no ambiente de simulação. Apesar desse erro mais elevado, o desempenho da malha de corrente não foi afetado.

O valor médio das correntes de circulação e das tensões no ponto da conexão indutiva demonstram a transferência de potência ativa de um braço para o outro.

O iCHB teve bom desempenho durante o degrau de carga, mantendo as correntes da rede reguladas durante todo o transitório.



## 7 CONCLUSÃO GERAL

Equation Section (Next)

Esse documento apresentou um conversor capaz de regular as correntes do alimentador em sistemas de média e alta tensão. O conversor proposto é baseado no CHB, na configuração estrela, com conexão direta ao sistema de distribuição. Caminhos de corrente foram criados para permitir o fluxo de potência ativa entre os braços do iCHB, condição imprescindível para o equilíbrio energético do conversor.

O capítulo 2 apresentou as principais topologias que permitem a absorção de potência reativa e harmônicos em sistemas de média e alta tensão sem a necessidade de um transformador. Um breve histórico das pesquisas com conversores multiníveis para a aplicação desejada e o estado da arte das estratégias de regulação das tensões cc das células dessas topologias foram mostrados.

O capítulo 3 se destinou à análise completa do iCHB. A impossibilidade de regulação das correntes do alimentador por parte do CHB foi demonstrada, que não é capaz de absorver todo o conteúdo na componente de sequência negativa. A topologia do iCHB foi proposta e o fluxo de potência deduzido em duas partes. A primeira parte do fluxo de potência equacionou a condição de potência ativa e reativa que cada braço do iCHB deve atender para suprir a demanda da rede. Posteriormente, a segunda parte deduziu o fluxo interno de potência do iCHB e como se comportam as tensões que geram as correntes de circulação. O Capítulo 3 termina com a quantificação das correntes de circulação em função da indutância utilizada e dos níveis de tensão desejados para o iCHB.

O capítulo 4 abordou em detalhes o sistema de controle proposto para o iCHB. O controle mais interno é realizado na corrente de saída do iCHB em coordenadas síncronas. Malhas responsáveis pela regulação das tensões cc das células do iCHB são adicionadas seguindo o estado da arte para CHB conectado em estrela e do MMC, agregando características de ambos conversores. Os modelos que descrevem o comportamento das grandezas elétricas do iCHB foram obtidas e, juntamente com uma metodologia de projeto bastante difundida na literatura, permitiram a sintonia dos controladores que compõem o sistema de controle.

No capítulo 5 foi avaliado o desempenho do iCHB perante distúrbios de carga através de ferramentas computacionais. A capacidade da regulação tanto da corrente do alimentador quanto das tensões cc das células foi verificada, com cargas não lineares desequilibradas. Por fim, uma análise dinâmica das tensões das células foi apresentada diante de grau de carga.

O capítulo 6 trouxe os resultados obtidos com o protótipo construído em laboratório. O iCHB reproduziu, com pequena margem de erro, o desempenho visto no ambiente de

simulação. Ele foi capaz de regular a corrente do alimentador dentro dos limites estabelecidos e manter suas células com as tensões reguladas no valor nominal.

O iCHB possui estrutura de potência igual ao CHB conectado em estrela, com a adição de três indutores. A capacidade de regulação de corrente da rede por parte do iCHB é semelhante ao MMC, que é constituído do dobro de células em relação ao CHB. Entretanto, a magnitude da corrente de circulação do iCHB aumenta os esforços de corrente nas células, trazendo a principal e significativa desvantagem frente ao MMC. Da maneira que se apresenta, o iCHB constitui uma topologia promissora. Para tanto, algumas investigações são propostas a fim de complementar a pesquisa acerca da topologia proposta:

- Obtenção de modelos mais precisos e técnicas de sintonia dos controladores mais refinadas para que se extraia o máximo desempenho do iCHB
- Investigação de técnicas de mitigação da componente alternada da corrente de circulação
- Investigação de novas maneiras de prover a circulação de potência ativa entre os braços do CHB, preferencialmente de forma passiva e não dissipativa
- Análise dos possíveis pontos de conexão dos indutores de circulação para se ter o melhor compromisso entre a magnitude da corrente de circulação e a magnitude da tensão de célula (Ver Apêndice A)
- Investigação da viabilidade de integração do iCHB com sistemas de geração e/ou armazenamento de energia (Ver Apêndice C)

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABB. **FACTS**. Disponível em: <http://www.abb.com/facts>, 2017. Acesso em: 10 out. 2018.

AKAGI, H. Classification, Terminology, and Application of the Modular Multilevel Cascade Converter (MMCC). **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 26, n. 11, p. 3119-3130, Nov 2011.

AKAGI, H. Multilevel Converters: Fundamental Circuits and Systems. **Proceedings of the IEEE**, v. 105, n. 11, p. 2048-2065, Nov 2017.

AKAGI, H. et al. A 6.6-kV Transformerless STATCOM Based on a Five-Level Diode-Clamped PWM Converter: System Design and Experimentation of a 200-V 10-kVA Laboratory Model. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 44, n. 2, p. 672-680, March 2008.

AKAGI, H.; INOUE, S.; YOSHII, T. Control and Performance of a Transformerless Cascade PWM STATCOM With Star Configuration. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 43, n. 4, p. 1041-1049, July 2007.

Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - Módulo 8 Qualidade da Energia Elétrica**. 2015. (Norma)

Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - Módulo 1 Introdução**. 2016. (Norma)

Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. **GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**. Disponível em: [http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD\\_Classe.asp](http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD_Classe.asp), 2020. Acesso em: 24 fev. 2020.

BAIER, C. R. et al. Current-source cascaded multilevel converters based on single-phase power cells. In: IECON, 2013, Viena, Áustria. **39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**. 2013. p. 6207-6212.

BAIER, C. R. et al. Nonlinear control strategy for current source cascaded H-bridge inverters: An approach considering single-phase DQ components. In: ICIT, Sevilha, Espanha. **2015 IEEE International Conference on Industrial Technology**. 2015. p. 3079-3084.

BAKER, R. H. **Switching circuit**. U.S. 4210826, 1980.

BARRENA, J. A. et al. Individual Voltage Balancing Strategy for PWM Cascaded H-Bridge Converter-Based STATCOM. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 55, n. 1, p. 21-29, Jan 2008.

BATSCHAUER, A. L. **Inversor Multiníveis Híbrido Trifásico Baseado em Módulos Meia-Ponte**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC. 2011.

BEHROUZIAN, E.; BONGIORNO, M. Investigation of Negative-Sequence Injection Capability of Cascaded H-Bridge Converters in Star and Delta Configuration. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 32, n. 2, p. 1675-1683, Feb 2017.

BEHROUZIAN, E.; BONGIORNO, M.; PARRA, H. Z. D. L. An overview of multilevel converter topologies for grid connected applications. In: EPE, 2013, Lille, França. **15th European Conference on Power Electronics and Applications**. 2013. p. 1-10.

BHESANIYA, M. M.; SHUKLA, A. Current Source Modular Multilevel Converter: Detailed Analysis and STATCOM Application. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 31, n. 1, p. 323-333, Feb 2016.

BILGIN, H. F. et al. Reactive-Power Compensation of Coal Mining Excavators by Using a New-Generation STATCOM. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 43, n. 1, p. 97-110, Jan 2007.

BUSQUETS-MONGE, S. et al. A Modulation Strategy to Operate Multilevel Multiphase Diode-Clamped and Active-Clamped DC-AC Converters at Low Frequency Modulation Indices With DC-Link Capacitor Voltage Balance. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 32, n. 10, p. 7521-7533, Oct 2017.

CETIN, A.; ERMIS, M. VSC-Based D-STATCOM With Selective Harmonic Elimination. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 45, n. 3, p. 1000-1015, May 2009.

CHEN, H. C. et al. A Flexible DC Voltage Balancing Control Based on the Power Flow Management for Star-Connected Cascaded H-Bridge Converter. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 52, n. 6, p. 4946-4954, Nov 2016.

DA CUNHA, J. C. et al. Multifunctional current-controlled DSTATCOM with harmonic mitigation through voltage detection. In: ICIT, 2015, Sevilha, Espanha. **IEEE International Conference on Industrial Technology**. 2015. p. 1348-1354.

DA SILVA, G. S. **Conversores Multiníveis Modulares: Contribuições ao Estudo e ao Desenvolvimento de Sistemas de Controle Distribuídos**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS. 2017.

DE MORAIS, A. S.; LESSA TOFOLI, F.; BARBI, I. Modeling, Digital Control, and Implementation of a Three-Phase Four-Wire Power Converter Used as a Power Redistribution Device. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 12, n. 3, p. 1035-1042, Mar 2016.

DAHIDAH, M. S. A.; AGELIDIS, V. G. Selective Harmonic Elimination PWM Control for Cascaded Multilevel Voltage Source Converters: A Generalized Formula. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 23, n. 4, p. 1620-1630, July 2008.

DO NASCIMENTO JÚNIOR, J. S.; GOPFERT, L. C. **Impactos Ambientais pela Implantação da Linha de Transmissão 500 kV Oriximiná - Cariri**. 2010. Monografia (Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ. 2010.

DU, S.; LIU, J. A Study on DC Voltage Control for Chopper-Cell-Based Modular Multilevel Converters in D-STATCOM Application. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 28, n. 4, p. 2030-2038, Oct 2013.

DU, S.; LIU, J.; LIN, J. Hybrid Cascaded H-bridge Converter for Harmonic Current Compensation. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 28, n. 5, p. 2170-2179, May 2013.

European Committee for Electrotechnical Standardization - CENELEC. **EN50160 Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems**. 2005. (Norma)

EPE. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2018**. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anuario2018vf.pdf>. 2018. Acesso em: 24 fev. 2020.

EPE. **BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2019**. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-494/BEN%202019%20Completo%20WEB.pdf>. 2019. Acesso em: 24 fev. 2020.

EPE. **Programa de Expansão da Transmissão**. Disponível em: [http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-180/topico-183/PET\\_PELP\\_Ciclo%202017\\_1\\_Semestre.pdf](http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-180/topico-183/PET_PELP_Ciclo%202017_1_Semestre.pdf). 2017. Acesso em: 10 out. 2018.

FORTESCUE, C. L. Method of Symmetrical Co-Ordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, v. 37, n. 2, p. 1027-1140, July 1918.

GERÇEK, C. Ö.; ERMIS, M. Elimination of Coupling Transformer Core Saturation in Cascaded Multilevel Converter-Based T-STATCOM Systems. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 29, n. 12, p. 6796-6809, Dec 2014.

GULTEKIN, B.; ERMIS, M. Cascaded Multilevel Converter-Based Transmission STATCOM: System Design Methodology and Development of a 12 kV 12 MVar Power Stage. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 28, n. 11, p. 4930-4950, Nov 2013.

HAGIWARA, M.; AKAGI, H. Control and Experiment of Pulsewidth-Modulated Modular Multilevel Converters. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 24, n. 7, p. 1737-1746, July 2009.

HAGIWARA, M.; MAEDA, R.; AKAGI, H. Control and Analysis of the Modular Multilevel Cascade Converter Based on Double-Star Chopper-Cells (MMCC-DSCC). **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 26, n. 6, p. 1649-1658, June 2011.

HAGIWARA, M.; MAEDA, R.; AKAGI, H. Negative-Sequence Reactive-Power Control by a PWM STATCOM Based on a Modular Multilevel Cascade Converter (MMCC-SDBC). **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 48, n. 2, p. 720-729, March 2012.

HATANO, N.; ISE, T. Control Scheme of Cascaded H-Bridge STATCOM Using Zero-Sequence Voltage and Negative-Sequence Current. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 25, n. 2, p. 543-550, April 2010.

HAW, L. K.; DAHIDAH, M. S. A.; ALMURIB, H. A. F. SHE-PWM Cascaded Multilevel Inverter With Adjustable DC Voltage Levels Control for STATCOM Applications. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 29, n. 12, p. 6433-6444, Dec 2014.

Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE. **IEEE 519-2014 Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems**. 2014. (Norma)

JUNG, J. et al. DC Capacitor Voltage Balancing Control for Delta-Connected Cascaded H-Bridge STATCOM Considering Unbalanced Grid and Load Conditions. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 33, n. 6, p. 4726-4735, Jun 2018.

KINI, P. G.; BANSAL, R. C.; AITHAL, R. S. A Novel Approach Toward Interpretation and Application of Voltage Unbalance Factor. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 54, n. 4, p. 2315-2322, Aug 2007.

KOYAMA, Y. et al. System fault test of SiC device applied 6.6kV transformerless D-STATCOM. In: EPE'15 ECCE-Europe, 2015, Genebra, Suíça. **17th European Conference on Power Electronics and Applications**. 2015. p. 1-10.

KRAUSE, P. C. et al. **Analysis of Electric Machinery and Drive Systems**. 3. ed: Wiley-IEEE Press, 2013.

KUMAR, C.; MISHRA, M. K. A Multifunctional DSTATCOM Operating Under Stiff Source. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 61, n. 7, p. 3131-3136, July 2014.

LAMBERT, G., SEIDEL, F., FIORIO, L. V., DE NOVAES, Y. R. Insulated Modular Auxiliary Power Source Concept With Multiple Outputs. **Revista Eletrônica de Potência**, v. 34, n. 2, p. 139-146, Junho 2019.

LEDWICH, G.; GHOSH, A. A flexible DSTATCOM operating in voltage or current control mode. **IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution**, v. 149, n. 2, p. 215-224, Mar 2002.

LEE, C. K. et al. Circuit-level comparison of STATCOM technologies. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 18, n. 4, p. 1084-1092, July 2003.

LESNICAR, A.; MARQUARDT, R. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range. In: 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings, Bolonha, Itália. **2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings**. June 2003. p. 6 pp. Vol.3-.

LI, L. et al. Multilevel selective harmonic elimination PWM technique in series-connected voltage inverters. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 36, n. 1, p. 160-170, Jan 2000.

LI, W.; GRÉGOIRE, L. A.; BÉLANGER, J. A Modular Multilevel Converter Pulse Generation and Capacitor Voltage Balance Method Optimized for FPGA Implementation. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 62, n. 5, p. 2859-2867, May 2015.

LIANG, Y.; NWANKPA, C. O. A new type of STATCOM based on cascading voltage-source inverters with phase-shifted unipolar SPWM. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 35, n. 5, p. 1118-1123, Sep 1999.

LIU, Z. et al. A Novel DC Capacitor Voltage Balance Control Method for Cascade Multilevel STATCOM. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 27, n. 1, p. 14-27, Jan 2012.

LUO, A. et al. Combined System for Harmonic Suppression and Reactive Power Compensation. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 56, n. 2, p. 418-428, Feb 2009.

MADHUSOODHANAN, S. et al. Harmonic Analysis and Controller Design of 15 kV SiC IGBT Based Medium Voltage Grid Connected Three-Phase Three-Level NPC Converter. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. PP, n. 99, p. 1-1, 2016.

MAHARJAN, L. et al. A transformerless battery energy storage system based on a multilevel cascade PWM converter. In: PESC, 2008, Rhodes, Grécia. **IEEE Power Electronics Specialists Conference**. 2008. p. 4798-4804.

MAHARJAN, L.; INOUE, S.; AKAGI, H. A Transformerless Energy Storage System Based on a Cascade Multilevel PWM Converter With Star Configuration. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 44, n. 5, p. 1621-1630, Sept 2008.

MARQUARDT, R. **Stromrichterschaltungen mit verteilten Energiespeichern**. DE 10103031 A1, 2002.

MENEZES, V. P. D. **Linhas de Transmissão de Energia Elétrica Aspectos Técnicos, Orçamentários e Construtivos**. 2015. Monografia (Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ. 2015.

MOHAMMADI, H. P.; BINA, M. T. A Transformerless Medium-Voltage STATCOM Topology Based on Extended Modular Multilevel Converters. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 26, n. 5, p. 1534-1545, May 2011.

MOURSI, M. E.; ALOBAIDLI, K. A.; ZEINELDIN, H. H. A hybrid STATCOM for economical system installation with proven dynamic and transient response. In: IEEE Grenoble Conference 2013, Grenoble, França. **IEEE Grenoble Conference**. 2013. p. 1-5.

NABAE, A.; TAKAHASHI, I.; AKAGI, H. A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. IA-17, n. 5, p. 518-523, Sept 1981.

NIEVES, M. et al. Enhanced control strategy for MMC-based STATCOM for unbalanced load compensation. In: EPE, 2014, Lappeenranta, Finlândia. **16th European Conference on Power Electronics and Applications**. 2014. p. 1-10.

PARK, R. H. Two-reaction theory of synchronous machines generalized method of analysis-part I. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, v. 48, n. 3, p. 716-727, July 1929.

PENG, F. Z. et al. A multilevel voltage-source inverter with separate DC sources for static VAR generation. Industry Applications Conference, In: IAS, 1995, Orlando, Estados Unidos da América. **Thirtieth IAS Annual Meeting**. 1995. p. 2541-2548, vol.3.

PENG, F. Z.; LAI, J.-S. Dynamic performance and control of a static VAR generator using cascade multilevel inverters. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 33, n. 3, p. 748-755, May 1997.

PENG, F. Z.; WANG, J. A universal STATCOM with delta-connected cascade multilevel inverter. In: PESC, 2004, Aachen, Alemanha. **IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference**. 2004. p. 3529-3533, vol.5.

RAMAMURTHY, J. R.; KOLLURI, S.; MADER, D. Shunt capacitor bank switching solutions for transient mitigation - design approach and EMTP simulations. In: PESGM, 2016, Portland, Estados Unidos da América. **IEEE Power and Energy Society General Meeting**. 2016. p. 1-5.

RODRIGUEZ, J.; LAI, J.-S.; PENG, F. Z. Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 49, n. 4, p. 724-738, Aug 2002.

SHU, Z. et al. Multilevel SVPWM With DC-Link Capacitor Voltage Balancing Control for Diode-Clamped Multilevel Converter Based STATCOM. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 60, n. 5, p. 1884-1896, May 2013.

SIEMENS. **The Efficient Way.** Disponível em: [http://www.energy.siemens.com/MX/pool/hq/power-transmission/FACTS/SVC\\_PLUS\\_The% 20efficient %20Way.pdf](http://www.energy.siemens.com/MX/pool/hq/power-transmission/FACTS/SVC_PLUS_The%20efficient%20Way.pdf), 2011. Acesso em: 10 out. 2018.

SIEMENS. **STATCOM with Multilevel Converter for AC Transmission Systems.** Disponível em: <http://www.apec-conf.org/Portals/0/Industry%20Session%20Presentations/2014/IS2-2-2.pdf>. 2014. Acesso em: 10 out. 2018.

SINGH, B. et al. Static synchronous compensators (STATCOM): a review. **IET Power Electronics**, v. 2, n. 4, p. 297-324, July 2009.

SOLAS, E. et al. Modular Multilevel Converter With Different Submodule Concepts Part I: Capacitor Voltage Balancing Method. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 60, n. 10, p. 4525-4535, Oct 2013.

SONG, Q.; LIU, W. Control of a Cascade STATCOM With Star Configuration Under Unbalanced Conditions. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 24, n. 1, p. 45-58, Jan 2009.

STEVENSON JR., W. D. **Elementos de Análise de Sistemas de Potência.** 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

SWARNKAR, A.; GUPTA, N.; NIAZI, K. R. Optimal placement of fixed and switched shunt capacitors for large-scale distribution systems using genetic algorithms. In: ISGT Europe, 2010,

Gothenberg, Suécia. **IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe**. 2010. p. 1-8.

TAN, L. et al. High performance controller with effective voltage balance regulation for a cascade STATCOM with star configuration under unbalanced conditions. In: EPE, 2013, Lille, França. **15th European Conference on Power Electronics and Applications**. 2013. p. 1-10.

TAN, Y. L. Analysis of line compensation by shunt-connected FACTS controllers: a comparison between SVC and STATCOM. **IEEE Power Engineering Review**, v. 19, n. 8, p. 57-58, Aug 1999.

TOWNSEND, C. D.; SUMMERS, T. J.; BETZ, R. E. Phase-Shifted Carrier Modulation Techniques for Cascaded H-Bridge Multilevel Converters. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 62, n. 11, p. 6684-6696, Nov 2015.

WATANABE, E. H. et al. Tecnologia FACTS – Tutorial. In: CBA, 1998, Uberlândia, Brasil. Congresso Brasileiro de Automática. 1998. p. 39-55.

WENIG, S. et al. Simulation Framework for DC Grid Control and ACDC Interaction Studies Based on Modular Multilevel Converters. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 31, n. 2, p. 780-788, April 2016.

WU, P. H. et al. Delta-Connected Cascaded H-Bridge Converter Application in Unbalanced Load Compensation. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 53, n. 2, p. 1254-1262, March 2017.

YU, X.; WEI, Y.; JIANG, Q. STATCOM Operation Scheme of the CDSM-MMC During a Pole-to-Pole DC Fault. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 31, n. 3, p. 1150-1159, June 2016.

## APÊNDICE A – POSSIBILIDADES DE CONEXÃO DOS INDUTORES DE CIRCULAÇÃO DO ICHB

O Conversor Cascata de ponte completa Interconectado iCHB foi proposto com a ligação indutiva, que permite a troca de potência ativa entre as células, conectado às primeiras células, i.e. células  $a1$ ,  $b1$  e  $c1$ , como apresentado na Figura 13. Entretanto, o iCHB não é restrito a essa ligação.

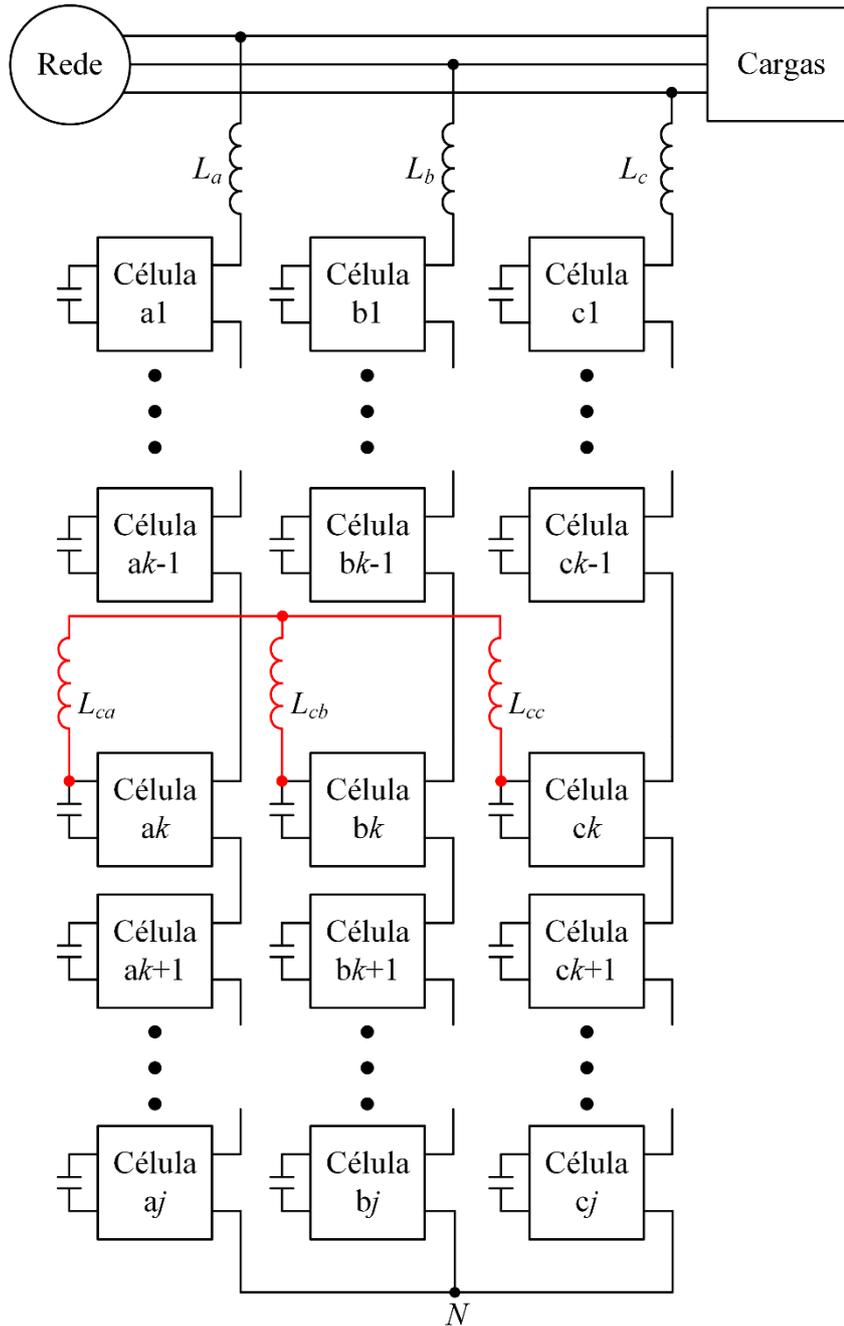
A rigor, a ligação indutiva pode ser realizada em qualquer célula do iCHB e uma representação genérica é apresentada na Figura 106, onde a interconexão é realizada nas células  $ak$ ,  $bk$  e  $ck$ , no meio da cascata de ponte completa. Porém, algumas implicações surgem de ligações no meio das cascatas de ponte completa.

As células acima da ligação indutiva processam somente a corrente de saída  $i_{fx}$ , enquanto as células abrangidas pela ligação indutiva processam  $i_{cx}$ , que é a soma de  $i_{fx}$  e  $i_{circx}$ . Logo surge a primeira diferenciação em relação ao iCHB proposto: as células processam potências aparente bem diferentes e, com isso, reduz a modularidade da topologia. Então, seria necessário o emprego de duas células com especificações diferentes ou a subutilização das células não abrangidas (células  $x1$  à  $xk-1$ ).

O segundo ponto a ser considerado diz respeito ao sistema de controle. Para uma mesma aplicação, que requer a mesma potência ativa circulando pelos indutores de circulação, o número de células que trocam energia com as células superiores, agora definidas como  $ak$ ,  $bk$  e  $ck$ , são menores. Então, a parcela  $P_{ixj}$  das células inferiores (células  $xk+1$  à  $xj$ ) será maior e, por consequência, a ação de controle da malha de tensão individual também será. Esse aumento leva a topologia com interconexão no meio das cascatas de ponte completa a operar com índices de modulação maiores com potências de circulação menores do que na topologia proposta. O ponto positivo do sistema de controle é que ele mantém a mesma estrutura independentemente da posição da interconexão indutiva.

Quando os indutores de circulação são conectados às células  $xk$ , a tensão sobre eles é menor do que a tensão quando estão conectados às células  $x1$ . Com isso, a corrente de circulação apresenta menor parcela  $ca$ , o que pode acarretar menos perdas de operação ou a redução da indutância de  $L_{cx}$ . Em contrapartida, a parcela  $cc$  se mantém praticamente inalterada, resultando em valor eficaz de  $i_{circx}$  na célula  $k$  menor do que na célula  $x1$ .

Figura 106 - Conversor Cascata em Ponte Completa Proposto com interconexão genérica

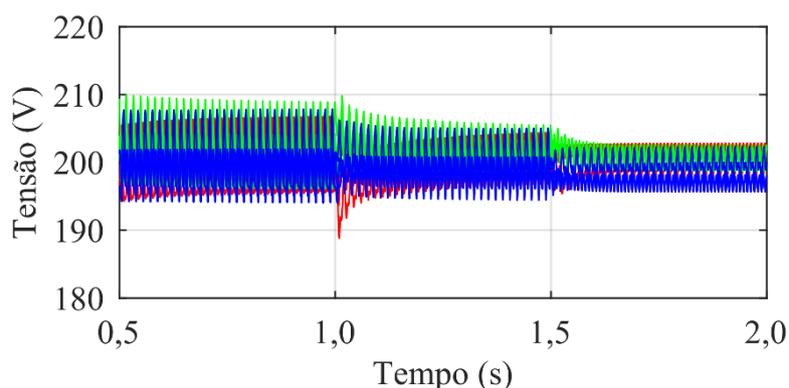


Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Para demonstrar as características do iCHB com variação nos pontos de conexão dos indutores de circulação, uma simulação foi realizada para um iCHB de três células. No início da simulação, a conexão indutiva está situada nas células  $x1$ . No instante de tempo igual a 1,0 s, a ligação passa a ser realizada somente nas células  $x2$  e no instante de tempo igual a 1,5 s somente nas células  $x3$ .

A Figura 107 apresenta a forma de onda das tensões das células durante a variação do ponto de conexão indutiva. A regulação de tensão é mantida com o sistema de controle e sua sintonia inalterada. Entretanto, há aumento no erro em regime permanente das tensões das células em relação à conexão nas células  $x1$ , pois menos células são englobadas pela ligação indutiva. Dessa forma, quanto mais perto da célula  $xj$  é a ligação, mais o iCHB tende à operação do CHB.

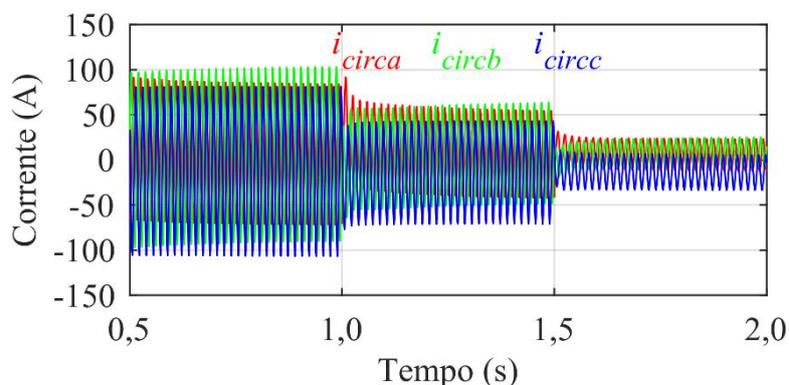
Figura 107 - Formas de onda da tensão das células durante a variação do ponto de conexão indutiva



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

A magnitude da corrente de circulação é reduzida, como visto na Figura 108, devido à redução do valor eficaz de tensão sobre os indutores de circulação. A parcela cc da corrente de circulação apresenta pouca variação.

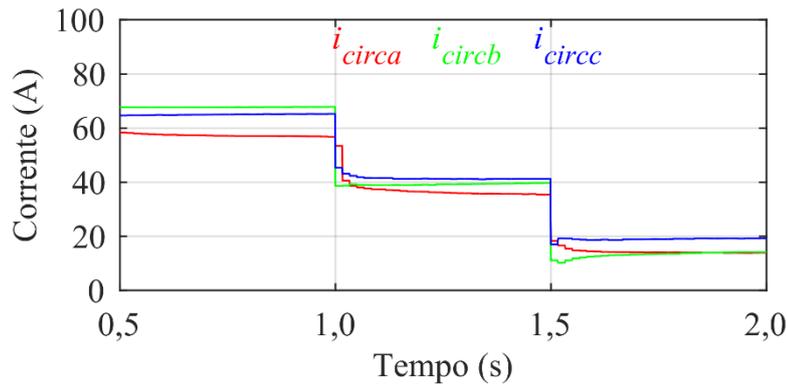
Figura 108 - Formas de onda da corrente de circulação durante a variação do ponto de conexão indutiva



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

A redução do valor eficaz da corrente de circulação pode ser vista na Figura 109.

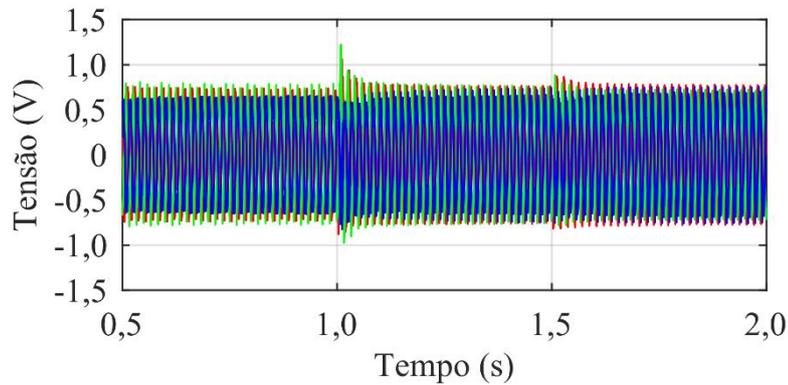
Figura 109 - Formas de onda do valor eficaz da corrente de circulação durante a variação do ponto de conexão indutiva



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Os sinais de comparação que geram os pulsos de comando das células do iCHB são mostradas na Figura 110. Há um leve aumento no valor de pico dos sinais conforme a ligação se aproxima da célula  $x_j$ .

Figura 110 - Formas de onda do índice de modulação das células durante a variação do ponto de conexão indutiva



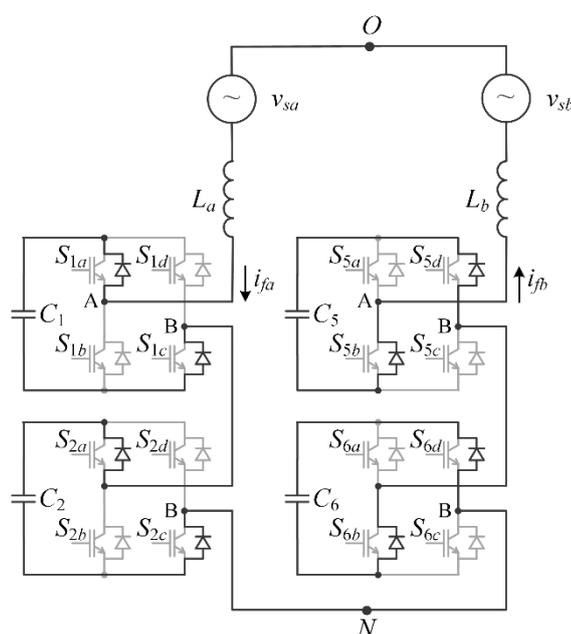
Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

## APÊNDICE B – INICIALIZAÇÃO DO ICHB

Com a interligação indutiva das fases do iCHB, surgem peculiaridades do sistema de pré carga do conversor iCHB e essas peculiaridades serão discutidas a seguir.

Em CHBs, com o bloqueio de todos os interruptores, há a circulação de corrente pelos diodos em antiparalelo com os transistores e as células se comportam como retificadores em ponte completa. Como o CHB é composto por  $n$  células, cada capacitor de cada célula acumulará uma tensão igual à razão entre o valor de pico da fase e o número de células em série  $2n$ . Quando a fase A possui a maior tensão instantânea e a fase B possui a menor tensão, a circulação de corrente no CHB com o bloqueio de todos os interruptores é apresentada de forma simplificada na Figura 111. A partir de então, o sistema de controle é habilitado e as tensões das células convergem para o valor nominal conforme o procedimento projetado.

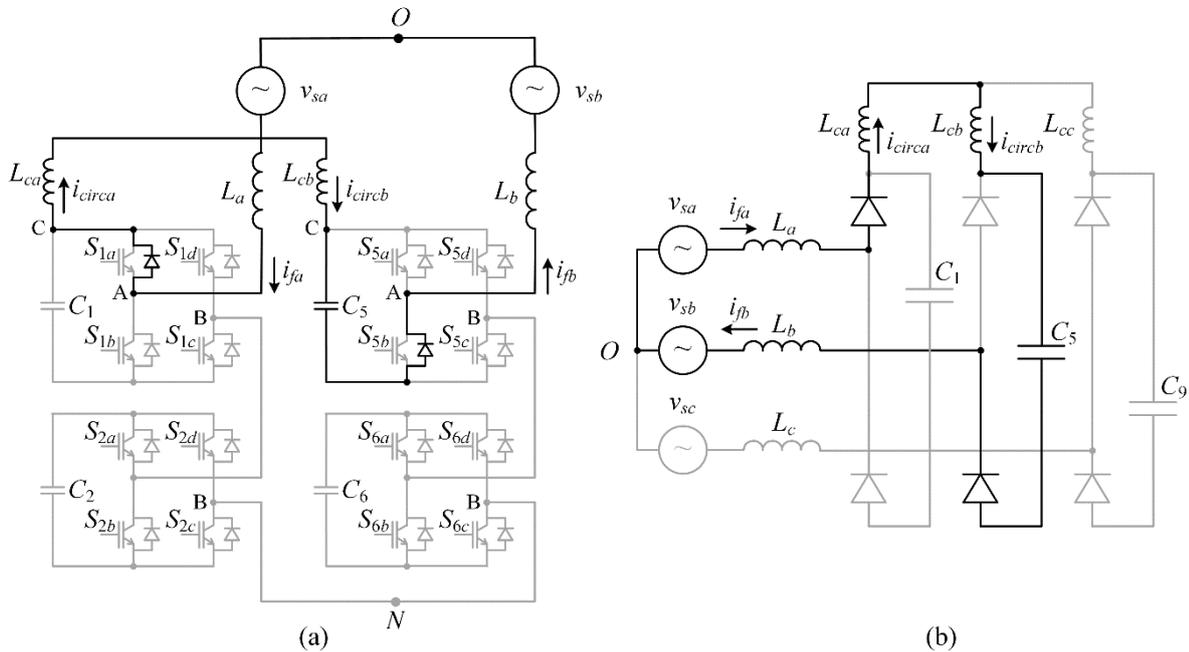
Figura 111 - Circuito simplificado com a circulação de corrente com o bloqueio dos interruptores do CHB



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Com a interligação indutiva dos braços do iCHB essa divisão igualitária deixa de ocorrer. Quando a fase A possui a maior tensão instantânea e a fase B possui a menor tensão, a circulação de corrente no iCHB com o bloqueio de todos os interruptores é apresentada de forma simplificada na Figura 112 (a).

Figura 112 - Circuito (a) simplificado com a circulação de corrente com o bloqueio dos interruptores do iCHB e (b) equivalente visto do referencial da rede



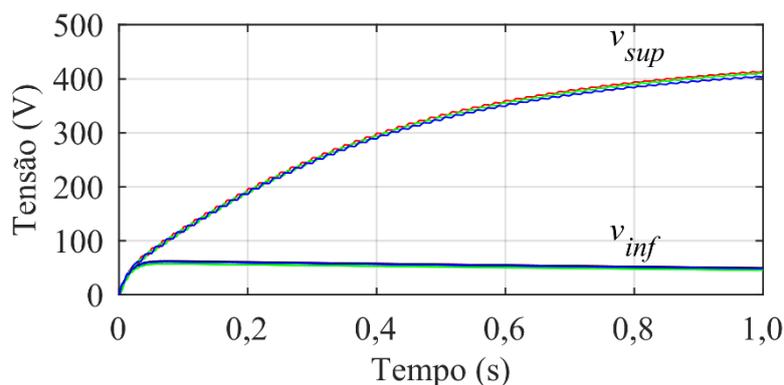
Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Nessa etapa de operação, os diodos em antiparalelo com os interruptores  $S_{1a}$  e o  $S_{5b}$  estão diretamente polarizados e começam a conduzir, entregando ao capacitor  $C_5$  uma tensão próxima à tensão de pico de linha do sistema, sendo atenuada pela presença das indutâncias em série. Pelas células inferiores não há circulação de corrente e, conseqüentemente, a tensão nos capacitores dessas células tende a zero.

Quando a tensão instantânea da fase A for a menor e a tensão da fase B a maior, os diodos em antiparalelo com os interruptores  $S_{5a}$  e o  $S_{1b}$  conduzem a corrente da rede, no sentido reverso ao apresentado na Figura 112 (a), carregando o capacitor  $C_1$ . As etapas que envolvem a combinação entre a fase A e B se repetem para a combinação entre a fase B e C e entre a fase A e C. Dessa forma, é possível determinar o circuito equivalente visto da rede, sendo apresentado na Figura 112 (b). O circuito equivalente se assemelha a um retificador trifásico com filtro capacitivo, exceto pela divisão em três capacitores distintos,  $C_1$ ,  $C_5$  e  $C_9$ .

A Figura 113 ilustra a distribuição das tensões nas células do iCHB quando os pulsos de comando bloqueiam os interruptores. Durante os primeiros ciclos, os indutores de circulação não possuem acúmulo de energia e as células inferiores  $v_{inf}$  recebem energia da forma apresentada para o CHB. Após isso, a carga dos capacitores das células inferiores cessa e os capacitores se descarregam. Por outro lado, os capacitores das células superiores  $v_{sup}$  se carregam e tendem ao valor de pico da tensão de linha da rede.

Figura 113 - Distribuição das tensões nas células com os pulsos de comando desabilitados

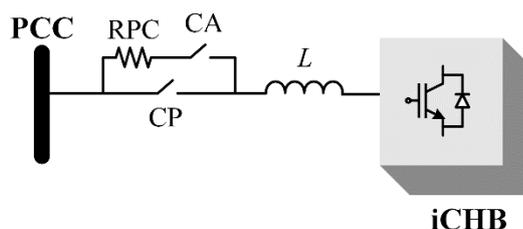


Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

É importante citar que a célula não é projetada para suportar o valor de pico da tensão de linha da rede, seja o capacitor seja os interruptores, muito menos em sistemas de média e alta tensão.

Diante do apresentado, o sistema de pré carga a ser utilizado deve levar em conta a distribuição desigual de tensão na energização do iCHB. Os elementos de hardware que compõem o sistema de pré carga sugerido para o iCHB são apresentados no diagrama unifilar da Figura 114, com resistência de pré carga (RPC) e dois contatores trifásicos, um principal (CP) e um auxiliar (CA).

Figura 114 - Sistema de pré carga do iCHB



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Uma das formas de realizar a pré carga dos capacitores do iCHB é dividir a pré carga em 4 etapas. Na primeira etapa, o CA é comandado a fechar e CP permanece aberto, inserindo a RPC em série com o iCHB e o sistema de controle é mantido desligado, i.e., os interruptores são mantidos bloqueados. A corrente flui pelos diodos em antiparalelo com os interruptores das células e carregam os capacitores. Devido à interligação indutiva do iCHB, a tensão não é igualmente distribuída entre os capacitores das células. As células superiores acumulam mais energia que as células inferiores e tendem a ultrapassar o valor nominal. Dessa forma, a fim de

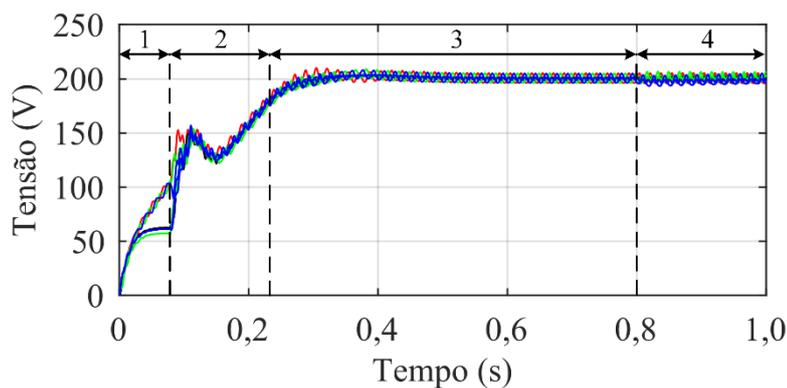
evitar danos ao iCHB, quando a tensão das células superiores atingi um limite pré-definido, definido como sendo metade da tensão nominal, a segunda etapa é iniciada.

Na segunda etapa da pré carga CP é comandado a fechar e são habilitadas as malhas de tensão individual e total, sendo a malha de tensão total composta apenas pela parcela proporcional, agindo de forma análoga a uma estratégia *anti-windup*. Além disso, a malha de corrente também é habilitada, mas com  $i_d^*$  a igual  $i_t$  e  $i_q^*$  igual a zero, fazendo com que haja absorção de energia da rede e o equilíbrio entre as tensões das células do iCHB.

Quando a tensão das células se aproxima da tensão nominal, definido como sendo 90% da tensão nominal, a malha de tensão total é habilitada com o controlador PI, caracterizando a terceira etapa da pré carga. CP permanece fechado e CA é comandado a abrir. Por fim, após 0,5 s do início da terceira etapa, a quarta etapa da pré carga aplica  $i_d^*$  e  $i_q^*$  de acordo com a Seção 4.1.1 e o iCHB opera em regime permanente.

A Figura 115 apresenta as formas de onda das tensões das células durante a inicialização do iCHB. Ao início da pré carga é visível a diferença de tensão das células enquanto o sistema está na primeira etapa. Enquanto as células superiores são carregadas com tensão de 100 V, as inferiores são carregadas com tensão em torno de 60 V. Após a habilitação das malhas de tensão, as células se mantêm com tensões iguais.

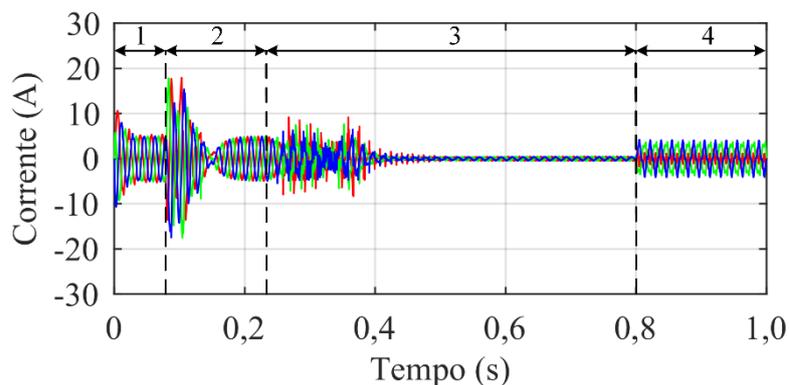
Figura 115 - Formas de onda da tensão nas células durante a pré carga do iCHB



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

A corrente de saída do iCHB é mostrada na Figura 116. Após a transição da primeira para a segunda etapa, o iCHB passa por um transitório de corrente com amplitudes elevadas.

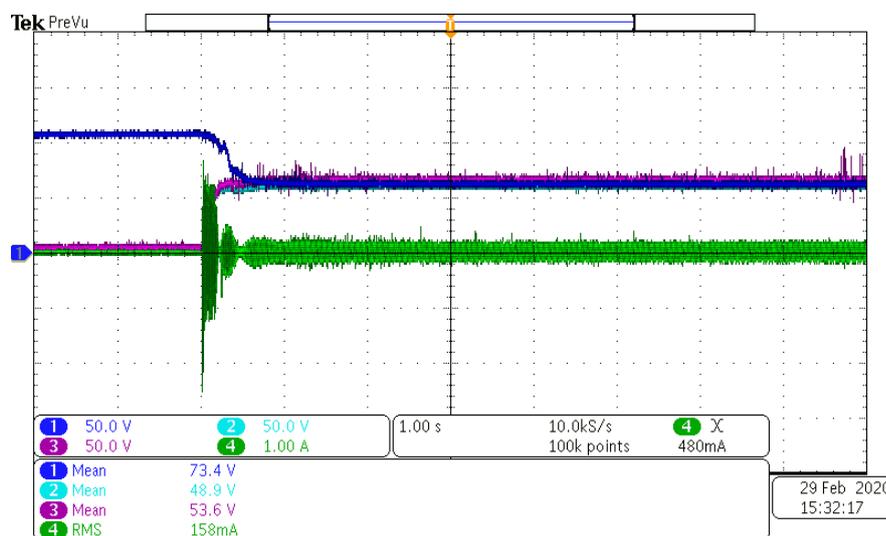
Figura 116 - Formas de onda da corrente de saída do iCHB durante a pré carga do iCHB



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Os ensaios experimentais do iCHB foram feitos sem a utilização dos contatores para a realização da pré carga dos capacitores das células. A Figura 117 apresenta as formas de onda das tensões da fase A (a1 – CH1, a2 – CH2 e a3 – CH3) e é possível verificar que toda a tensão está sobre o capacitor da célula superior. Quando os sinais de comando para o iCHB são habilitados, as malhas de tensão total e individual controlam as tensões das células no valor de referência.

Figura 117 - Resultado experimental: Tensões das células a1, a2 e a3 durante a inicialização do iCHB e a corrente de saída  $i_a$



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.



## APÊNDICE C – INTERLIGAÇÃO DO ICHB COM SISTEMAS GERADORES E ARMAZENADORES DE ENERGIA

Uma funcionalidade que pode ser adicionada ao iCHB é a interligação do iCHB a um sistema de energia que possa fornecer potência ativa, no caso de geradores eólicos ou fotovoltaicos, ou absorver energia, no caso de sistemas de armazenamento de energia.

Assim como o MMC, a injeção de potência ativa é feita a partir de apenas dois pontos de conexão. Para o MMC, a fonte é conectada nos barramentos positivo e negativo (WENIG *et al.*, 2016), enquanto no iCHB a fonte é conectada nos pontos centrais da estrela do arranjo cascata e da interligação indutiva, como sugere a Figura 118.

A corrente que sai do sistema de energia é denominada  $i_g$ . Com  $i_g$  sendo positiva, potência ativa é transferida pelo sistema de energia para os capacitores das células de forma, idealmente, equilibrada entre as fases. A elevação de tensão nas células força o controlador de tensão total a injetar o excedente de energia na rede, ajudando o alimentador a suprir as cargas.

Já com  $i_g$  negativa, o efeito é contrário. O sistema de energia retira energia das células do iCHB e o controlador de tensão total aumenta a potência ativa absorvida da rede.

Sistemas de armazenamento podem, portanto, serem incorporados ao projeto do iCHB para que haja o aproveitamento de energia em horários de baixa carga, carregando os acumuladores de energia, e o fornecimento dessa energia nos horários de pico de consumo.

Segundo as equações que regem o iCHB, a potência transferida entre o sistema de energia e o iCHB pode ser escrita como:

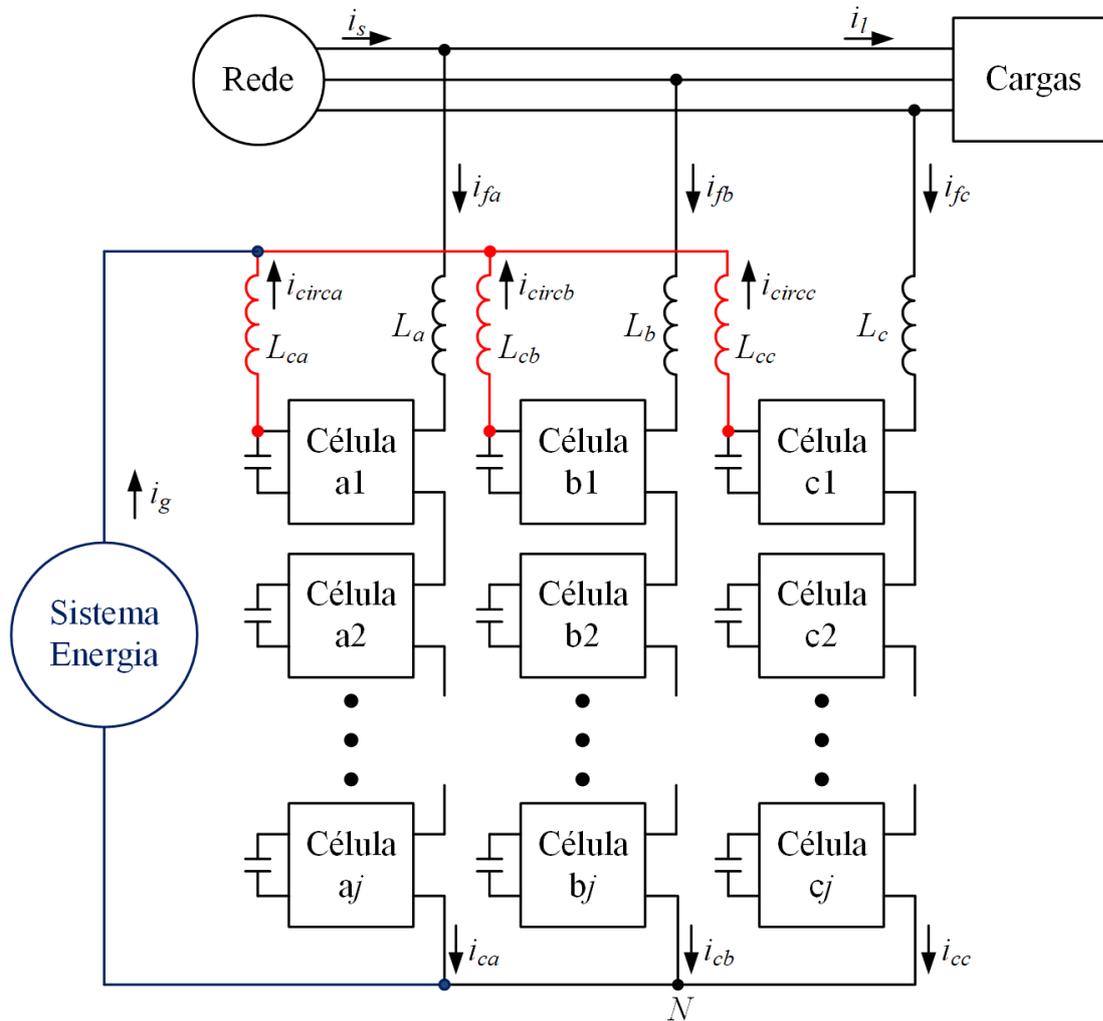
$$P_g = \int_0^T V_{Lcirc} \cdot i_g dt \quad (E.1)$$

Considerando  $i_g$  como constante, tem-se que a potência transferida é expressa em termos da tensão de célula como segue:

$$P_g = \frac{V_{cc}}{2} \cdot i_g \quad (E.2)$$

A potência produzida pelo sistema de geração e/ou armazenamento, portanto, é proporcional à metade da tensão de célula que, por sua vez, é uma característica inferior ao do MMC, onde a potência gerada é proporcional à tensão de braço. Isso exige do sistema de geração/armazenamento capacidade de corrente maior do que se fosse empregado a um MMC.

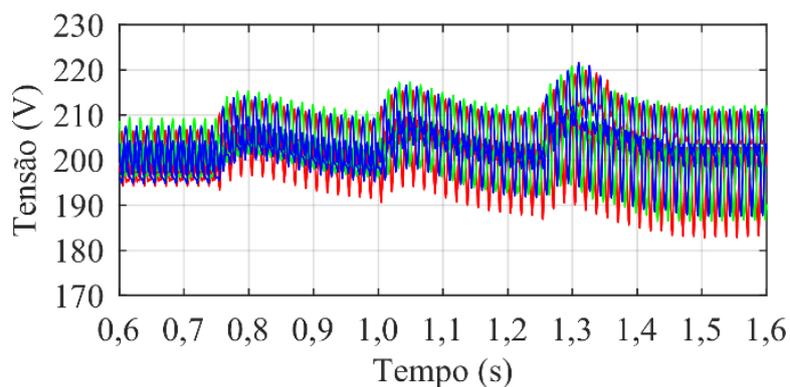
Figura 118 - Conversor Cascata em Ponte Completa Proposto com interligação com sistemas de geração de energia



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Para ilustrar a capacidade do iCHB em prover energia ao sistema de transmissão, a Figura 119 apresenta as formas de onda das tensões das células quando o iCHB injeta potência ativa ao sistema. O sistema de energia fornece 70 A cc para o iCHB em degraus nos instantes de tempo iguais a 0,75 s, 1,0 s e 1,25 s, totalizando 210 A ao término dos degraus.

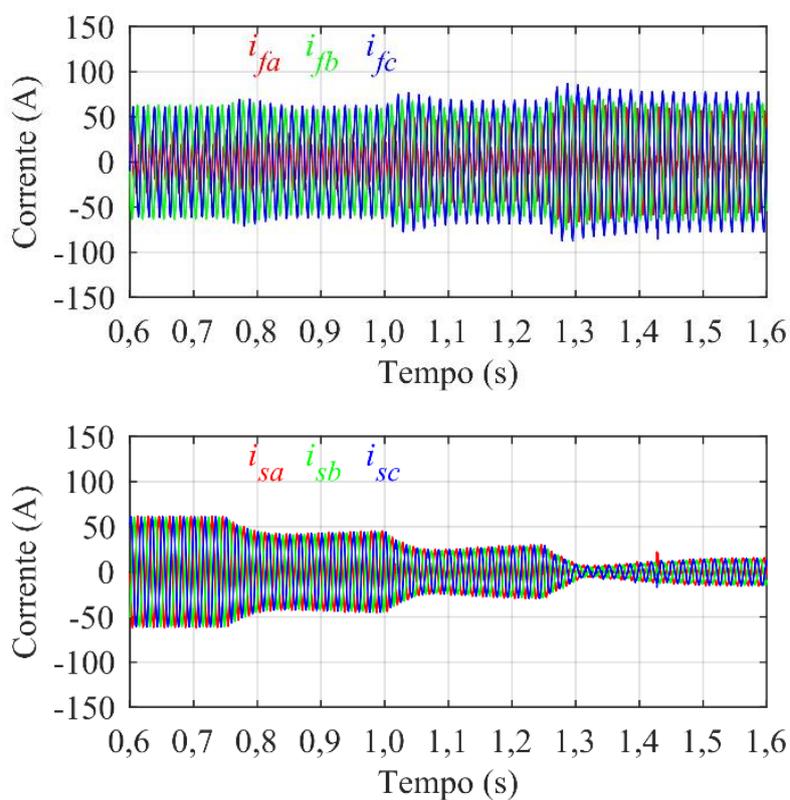
Figura 119 - Formas de onda da tensão das células durante a injeção de potência ativa



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

As formas de onda da corrente de saída e do alimentador são mostradas na Figura 120. A corrente de saída aumenta seu valor eficaz, enquanto a corrente do alimentador diminui sua amplitude, uma vez que é exigido menos potência da rede. Enquanto no início da simulação a rede fornecia 28,42 kW para a carga, ao final a rede contribui com apenas 6,63 kW.

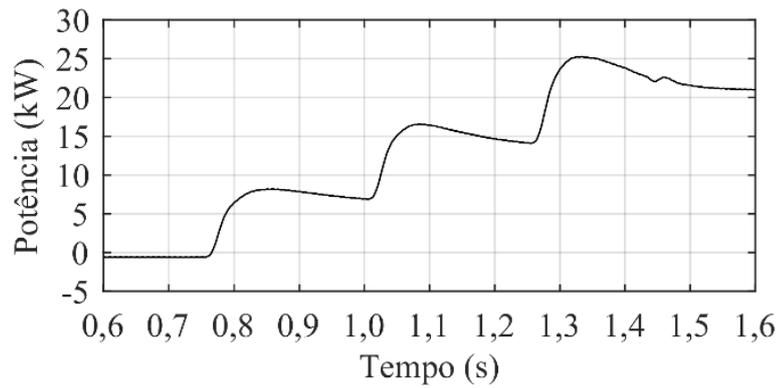
Figura 120 - Formas de onda de corrente (a) de saída do iCHB e (b) no alimentador



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

A Figura 121 apresenta a potência ativa líquida injetada na rede de transmissão. Antes do fornecimento de energia por parte do sistema de energia, o iCHB absorve potência ativa igual às perdas consideradas na Tabela 5, i.e., 600 W. Após o primeiro degrau, e durante os seguintes, a potência líquida se torna positiva, ou seja, o iCHB entrega à rede o excesso de energia gerado pelo sistema de energia.

Figura 121 - Potência ativa injetada no sistema de transmissão pelo iCHB



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.