

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIA TECNOLÓGICAS – CCT
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

VITÓRIA MARTINS MICHELS

**ESTUDO DE UM CONVERSOR MULTINÍVEL PARA COMPENSAÇÃO DE
REATIVOS E HARMÔNICAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO**

JOINVILLE

2023

VITÓRIA MARTINS MICHELS

**ESTUDO DE UM CONVERSOR MULTINÍVEL PARA COMPENSAÇÃO DE
REATIVOS E HARMÔNICAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Bacharelado em Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina, para a obtenção do Grau Engenharia Eletricista.

Orientador: Alessandro Luiz Batschauer

Coorientador: Rubens Tadeu Hock Júnior

JOINVILLE

2023

RESUMO

Para que se mantenha a qualidade de energia no sistema de distribuição é de suma importância cumprir com requisitos estabelecidos pelas agências reguladoras, porém, com a grande quantidade de cargas não-lineares tem-se dificuldade para cumprir os requisitos. Desta forma, torna-se necessário o aumento do estudo de conversores estáticos e estratégias de controle para confecção de filtros ativos de potência. Este trabalho visa estudar o conversor cascata de ponte completa interconectado e analisar seu desempenho para regulação da rede de distribuição elétrica com cargas desequilibradas e não lineares. Além do desempenho, serão analisados o fator de potência da rede, formas de ondas das correntes da rede, distorção harmônica total da corrente e coeficiente de desequilíbrio da corrente da rede. Com auxílio da transformada $abc-dq0$ são feitos os controles de corrente, tensão total e tensão individual, utilizando também a ferramenta *Sisotool* do Software *Matlab* para definição dos coeficientes dos compensadores. E por fim, serão feitas simulações no software *PSIM* do conversor cascata de ponte completa interconectado conectado à rede de distribuição de baixa tensão com carga desequilibrada e não linear, obtendo as formas de ondas das correntes da rede, do conversor e das cargas, bem como, os sinais dos circuitos de controles. Após as simulações obteve-se resultados satisfatórios, o conversor conseguiu regular a corrente da rede com cargas desequilibradas e não lineares e com mudança de carga também, mantendo a corrente da rede com baixas distorções, dentro das normas estabelecidas pela ANEEL.

Palavras-chave: Filtro Ativo. Conversor Multinível

ABSTRACT

In order to maintain the power quality in the distribution system it is of paramount importance to comply with requirements established by regulatory agencies, however, with the large amount of nonlinear loads it is difficult to meet the requirements. Thus, it becomes necessary to increase the study of static converters and control strategies for making active power filters. This work aims to study the interconnected full bridge cascade converter and analyze its performance for regulation of the electrical distribution network with unbalanced and nonlinear loads. In addition to the performance, the power factor of the network, waveforms of the network currents, total harmonic distortion of the current and unbalance coefficient of the network current will be analyzed. With the aid of the $abc-dq0$ transform, the current, total voltage and individual voltage controls are made, also using the *Sisotool* tool of the *Matlab* Software to define the coefficients of the compensators. And finally, simulations will be made in the software *PSIM* of the interconnected full bridge cascade converter connected to the low voltage distribution network with unbalanced and nonlinear load, obtaining the waveforms of the network currents, the converter and the loads, as well as the signals of the control circuits. After the simulations, satisfactory results were obtained, the converter was able to regulate the grid current with unbalanced and nonlinear loads and with load change too, maintaining the grid current with low distortions, within the standards established by ANEEL.

Keywords: Active filter. Multilevel converter

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Consumo de Energia Elétrica no Brasil de 2018 até 2023 - Residencial, Comercial e Industrial	10
Figura 2 – Consumo de Energia Elétrica no Brasil de 2018 até 2023 - Residencial, Comercial e Industrial - valores máximos em março e dezembro	10
Figura 3 – Consumo médio de energia elétrica por classe no Brasil- anos 2018 à 2023 .	11
Figura 4 – Dados de aquisição de equipamentos no Brasil e consumo de energia dos equipamentos entre 2005 e 2021	11
Figura 5 – Exemplo de uma rede com cargas não lineares e um sistema de compensação de harmônicos com filtro passivo	14
Figura 6 – Exemplo de uma rede com cargas não lineares e um sistema de compensação de harmônicos com filtro ativo	15
Figura 7 – Exemplo de circuitos de rede de energia elétrica alternada com cargas não lineares e um sistema de compensação de harmônicos com filtros ativos (a)Paralelo, (b)Série e (c)Híbrido Série-Paralelo	16
Figura 8 – Exemplo de circuitos com configuração MMC sem barramento CC comum: (a)SSBC (b)SDBC	17
Figura 9 – Exemplo de circuitos com configuração MMC com barramento CC comum: (a) Circuito com indutores acoplados, (b) Circuito sem indutores acoplados, (c) Módulos meia ponte e (d) Módulos ponte completa.	18
Figura 10 – Exemplo de um Conversor Modular Multinível Trifásico	19
Figura 11 – Etapas de operação do submódulo do MMC	19
Figura 12 – Exemplo de sistema de distribuição de energia elétrica utilizando DSTAT-COM para compensação de reativos	20
Figura 13 – Exemplo de um esquema básico de STATCOM	21
Figura 14 – Exemplo de Conversor Cascata em Ponte Completa - 5L-CHB: (a) Estrutura do conversor, (b) Forma de onda da tensão de saída sintetizada	24
Figura 15 – Diagrama das principais técnicas de modulação para conversores multiníveis de tensão	24
Figura 16 – Exemplo Modulação com as Portadoras com Deslocamento de Fase (Phase Shifted – PS)	25
Figura 17 – Conversor Cascata de Ponte Completa Interconectado (iCHB)	27
Figura 18 – Etapas de operação das células superiores	28
Figura 19 – Primeira etapa de operação da célula inferior	29
Figura 20 – Sistema de controle do conversor Cascata de Ponte Completa Interconectado (iCHB)	30
Figura 21 – Digrama de blocos das referências de corrente em coordenadas dq0	31
Figura 22 – Diagrama de blocos da malha de corrente em coordenadas dq0	32

Figura 23 – Diagrama em blocos do controle de corrente	33
Figura 24 – Diagrama de Bode da função de transferência de malha aberta da malha de corrente incluindo o controlador	34
Figura 25 – Diagrama de Bode da função de transferência de malha aberta da malha de tensão individual incluindo o controlador	35
Figura 26 – Diagrama de Bode da função de transferência de malha aberta de tensão total incluindo o controlador no tempo discreto	36
Figura 27 – Circuito de potência simplificado do iCHB com 4 células	39
Figura 28 – Circuito de comando do iCHB	40
Figura 29 – Circuito simulação rede elétrica	41
Figura 30 – Controle de tensão total e Controle de corrente	41
Figura 31 – Somatório das tensões dos capacitores de cada células	42
Figura 32 – Controle de tensão individual fase A	42
Figura 33 – Forma de onda da corrente de Rede com Degrau de Carga Desequilibrada e não linear	43
Figura 34 – Fator de desequilíbrio de corrente da rede com degrau de Carga Desequilibrada e não linear	44
Figura 35 – Forma de onda da corrente da rede com degrau de carga desequilibrada e não linear	45
Figura 36 – Sinais de corrente da rede em coordenadas síncronas do eixo direto e de quadratura	46
Figura 37 – Resposta do controle de tensão total e corrente	47
Figura 38 – Formas de onda da resposta do controle de corrente com carga desequilibrada e não linear	48
Figura 39 – Formas de onda da resposta do controle de tensão individual com carga desequilibrada e não linear	49
Figura 40 – Formas de onda da moduladora do chaveamento com carga desequilibrada e não linear	50
Figura 41 – Forma de onda da corrente da rede com carga desequilibrada e não linear	50
Figura 42 – Forma de onda da corrente de carga com carga desequilibrada e não linear	51
Figura 43 – Forma de onda da corrente na saída do conversor com carga desequilibrada e não linear	51
Figura 44 – Forma de onda da corrente de circulação com carga desequilibrada e não linear	52
Figura 45 – Comportamento dinâmico da corrente de rede durante o degrau de carga	52
Figura 46 – Fator de desequilíbrio da corrente de rede durante o degrau de carga	53
Figura 47 – Comportamento dinâmico das tensões individuais e total durante o degrau de carga	53
Figura 48 – Sinais de corrente da rede em coordenadas síncronas do eixo direto e de quadratura durante degrau de carga	54

Figura 49 – Comportamento dinâmico da corrente de carga durante o degrau de carga . .	54
Figura 50 – Comportamento dinâmico da corrente do conversor durante o degrau de carga	55
Figura 51 – Comportamento dinâmico da corrente de circulação durante o degrau de carga	55
Figura 52 – Comportamento dinâmico do controle de corrente durante o degrau de carga	56
Figura 53 – Comportamento dinâmico do controle de tensão total durante o degrau de carga	56
Figura 54 – Comportamento dinâmico do controle de tensão individual durante o degrau de carga	57
Figura 55 – Comportamento dinâmico da moduladora do chaveamento durante o degrau de carga	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros do iCHB em rede de baixa tensão com 4 células	32
Tabela 2 – Parâmetros do controlador de corrente	34
Tabela 3 – Parâmetros do controlador de tensão individual	35
Tabela 4 – Parâmetros do controlador de tensão total	36
Tabela 5 – Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental) . .	38
Tabela 6 – Parâmetros de cargas para simulação baixa e média tensão	39
Tabela 7 – Tabela de comparação de parâmetros de qualidade de energia	59

SUMÁRIO

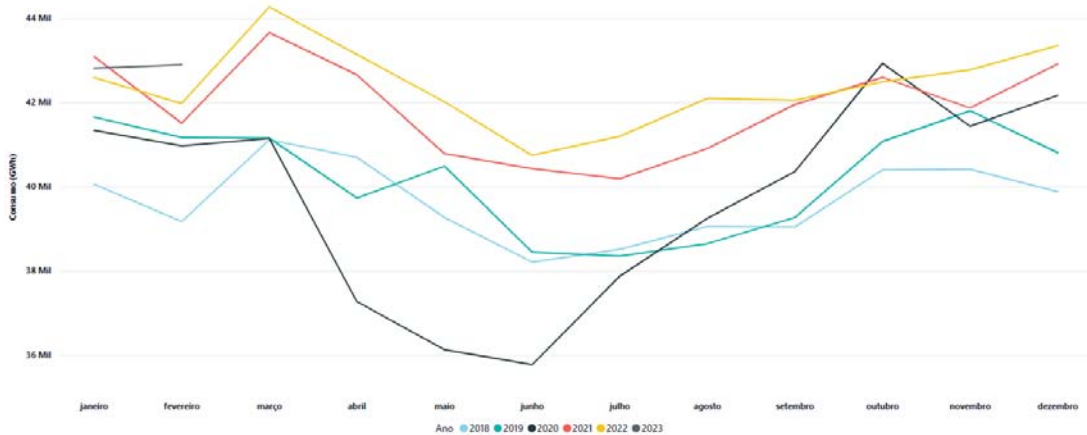
1	INTRODUÇÃO	10
1.1	OBJETIVOS GERAIS	12
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	FILTROS ATIVOS	14
2.2	CONVERSOR MODULAR MULTINÍVEL (<i>MODULAR MULTILEVEL CONVERTER</i> – MMC)	16
2.2.1	Etapas de operação do MMC	17
2.3	COMPENSADOR SÍNCRONO ESTÁTICO DE REATIVOS (<i>DISTRIBUTION STATIC SYNCHRONOUS COMPENSATOR</i> – DSTATCOM)	20
2.4	CONVERSOR COM CÉLULAS PONTE COMPLETA EM CASCATA (<i>CASCADE H-BRIDGE</i> – CHB)	21
2.4.1	Estrutura CHB	22
2.4.2	Técnica de modulação	23
2.4.3	Modulação por Largura de Pulsos para Conversores Multiníveis	25
2.4.3.1	<i>Modulação com as Portadoras com Deslocamento de Fase (Phase Shifted – PS)</i>	25
3	CONVERSOR ICHB	27
3.1	ESTRUTURA ICHB	27
3.2	ETAPAS DE OPERAÇÃO DAS CÉLULAS SUPERIORES - ICHB	28
3.3	ETAPAS DE OPERAÇÃO DAS CÉLULAS INFERIORES - ICHB	29
3.4	SISTEMA DE CONTROLE	30
3.4.1	Parâmetros do conversor	31
3.4.2	Controle de corrente	33
3.4.3	Controle de tensão individual	34
3.4.4	Controle de tensão total	35
4	SIMULAÇÃO ICHB	37
4.1	PARÂMETROS DE QUALIDADE DE ENERGIA	37
4.1.1	Desequilíbrio da corrente	37
4.1.2	Fator de Potência	38
4.1.3	Distorção Harmônica Total da Tensão	38
4.2	PARÂMETROS PARA AS SIMULAÇÕES	38
4.2.1	Circuitos de Potência	38
4.2.2	Controles de tensões e corrente	39
4.3	SIMULAÇÃO REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	43

4.4	SIMULAÇÃO ICHB 4 CÉLULAS E POTÊNCIA NOMINAL 30 KVA E REDE DE BAIXA TENSÃO	44
4.4.1	Resposta ao Degrau de carga	46
4.5	COMPARATIVO PARÂMETROS DE QUALIDADE DE ENERGIA	59
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
	REFERÊNCIAS	61
	ANEXO A – CIRCUITO DE POTÊNCIA COMPLETO DO ICHB COM 4 CÉLULAS	64

1 INTRODUÇÃO

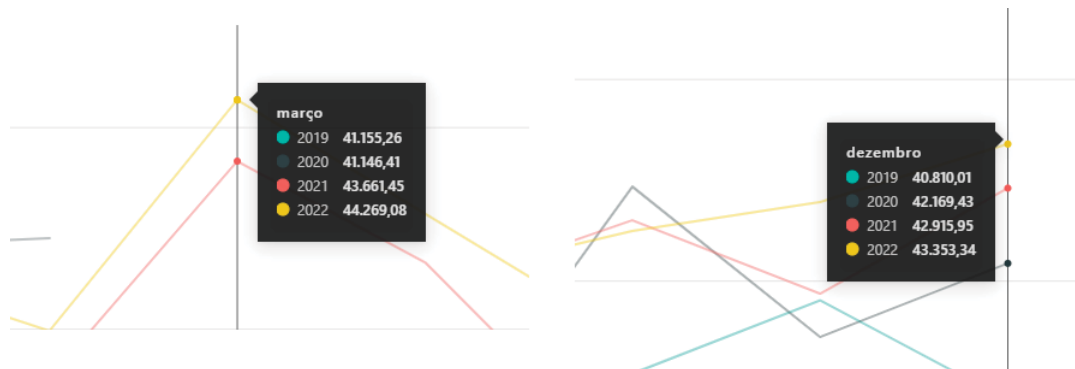
O consumo de energia elétrica no Brasil está crescendo a cada ano, analisando o consumo de Energia elétrica em geral (comercial, residencial, industrial e outros) nos últimos 6 anos no Brasil, a cada ano aumenta seu consumo, conforme mostradas na Figura 1. Analisando em mais detalhes na Figura 2, o valores máximos em março e dezembro, é notável o aumento ao longo desses 6 anos.

Figura 1 – Consumo de Energia Elétrica no Brasil de 2018 até 2023 - Residencial, Comercial e Industrial



Fonte: (ENERGETICA, 2023)

Figura 2 – Consumo de Energia Elétrica no Brasil de 2018 até 2023 - Residencial, Comercial e Industrial - valores máximos em março e dezembro

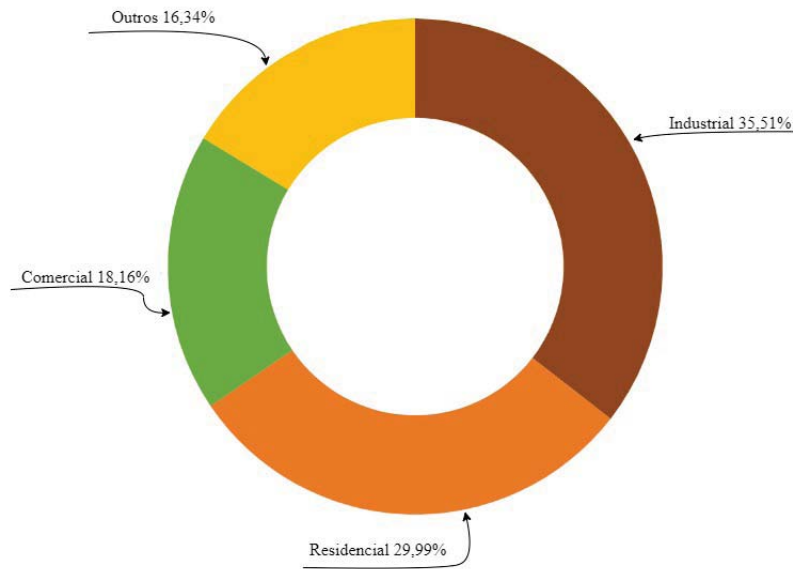


Fonte: (ENERGETICA, 2023)

Na Figura 3 apresenta-se o consumo médio de energia elétrica ao longo dos anos de 2018 até 2023 em porcentagem.

O aumento do consumo de energia elétrica nas residências deve-se à aquisição de equipamentos. A cada ano a tecnologia vem avançando para que a eficiência dos equipamentos seja cada vez melhor e tenham um melhor desempenho. Assim, com o avanço nas tecnologias, a

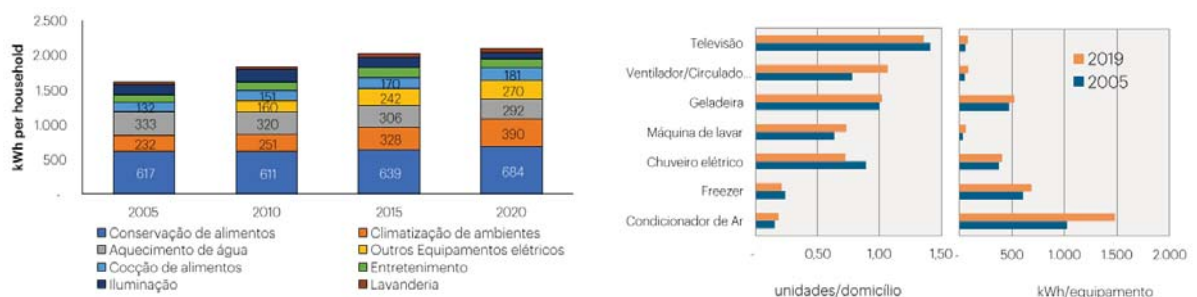
Figura 3 – Consumo médio de energia elétrica por classe no Brasil- anos 2018 à 2023



Fonte: (ENERGETICA, 2023)

compra de equipamentos vem aumentando significativamente. Analisando em mais detalhes esse aspecto do consumo e quantidade dos equipamentos nas residências, tem-se no gráfico da Figura 4 (a) a comparação da quantidade e consumo médio anual por equipamento, e complementando essa comparação tem-se o gráfico da Figura 4 (b) apresentando o consumo residencial de energia elétrica. Assim, tem-se como o equipamento com maior consumo de energia elétrica as geladeiras, por conta de ser um equipamento que se encontra em quase todas as residências e ficarem ligadas 24 horas por dia durante todo o ano, um item praticamente indispensável por se tratar de um conservador de alimentos. Assim, sua quantidade e consumo médio anual manteve-se praticamente o mesmo ao longo dos anos. O segundo equipamento que tem o maior consumo residencial de energia elétrica são os condicionadores de ar, mesmo sua quantidade ser a menor apresentada. Em contrapartida, tem-se um aumento de quantidade de Ventiladores/Circuladores de Ar, uma alternativa mais econômica em questões de energia elétrica.

Figura 4 – Dados de aquisição de equipamentos no Brasil e consumo de energia dos equipamentos entre 2005 e 2021



Fonte: (ENERGETICA, 2022)

Além do aumento do consumo de energia elétrica nestes últimos anos percebe-se uma problemática que é a garantia da qualidade da energia entregue aos consumidores. O crescimento da aquisição dos equipamentos nas residências, principalmente equipamentos eletrônicos, vêm ocasionando um impacto na rede de distribuição de energia elétrica. E também, os equipamentos estão mais sensíveis às variações da qualidade de energia, e por consequência a necessidade de serem mais eficientes (PAULILO, 2013).

Algumas causas dos distúrbios da qualidade de energia elétrica são partidas de motores, operação de disjuntores, assimetrias entre as impedâncias, cargas não-lineares, cargas intermitentes, etc (PAULILO, 2013). Devido aos distúrbios serem tão frequentes, tornou-se cada vez mais necessário o estudo de soluções para melhorar a qualidade da energia entregue ao consumidor, levando em conta a praticidade e economia da solução implementada. Há uma necessidade de entrega de uma energia sem distúrbios, com tensões equilibradas, sem interrupções, em teoria um fornecimento de energia ilimitado. Sendo que a qualidade de energia deve-se não apenas ao consumo final, mas a geração, transporte e distribuição desta energia.

Assim, para contribuir com o desenvolvimento de novas soluções que atendam a demanda do setor de distribuição e transmissão de energia, neste trabalho é estudada uma topologia para melhoria da qualidade da energia elétrica no sistema elétrico, e com aplicação em baixa tensão.

1.1 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo deste presente trabalho é estudar o conversor modular multiníveis proposto por (JÚNIOR, 2020), e sua capacidade de compensação de reativos e harmônicas para a mitigação de problemas de qualidade de energia em redes de distribuição. Avaliar o desempenho do sistema frente a condições de operação em baixa tensão e verificar o atendimento às normas técnicas vigentes.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar qualitativamente o conversor modular multinível
- Estudar o conversor em ponte completa conectado em cascata com o indutor interconectado
- Projetar controle de corrente, tensão total e individual para rede de baixa tensão
- Simular a rede de baixa tensão com carga equilibrada e desequilibrada
- Analisar os impactos das carga desequilibradas na rede de baixa tensão
- Simular a rede de baixa tensão com conversor conectado como filtro ativo
- Analisar os impactos do conversor na rede de baixa tensão com cargas desequilibradas e não lineares

- Analisar os parâmetros de qualidade da rede de baixa tensão com a compensação do conversor e carga desequilibrada e não linear.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

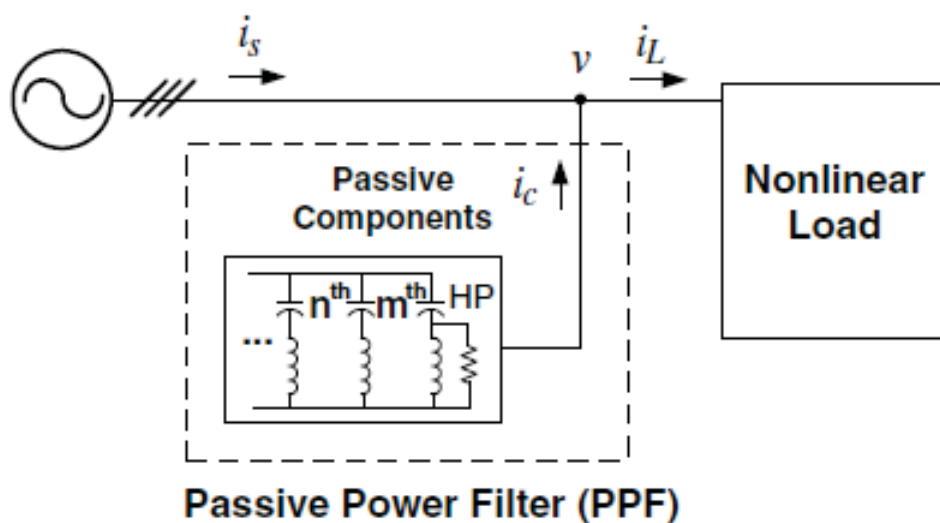
Neste capítulo é feita uma revisão dos conceitos de filtro ativo e compensador síncrono estático de reativos. Apresentação das características e etapas de operação do conversor modular multinível e as características do conversor cascata em ponte completa. Todos os conceitos apresentados neste capítulo serão utilizados para um melhor entendimento do conversor cascata em ponte completa interconectado.

2.1 FILTROS ATIVOS

Devido ao constante crescimento de novas tecnologias, nos setores industriais, residenciais e comerciais, é notável o crescimento de cargas não-lineares, motores, computadores, compressores, refrigeradores, fontes de alimentação eletrônicas etc. Assim, com a quantidade de cargas causando distúrbios na rede de distribuição, como aparecimento de harmônicas, tensões desequilibradas, fator de potência fora do padrão (não unitário) e os vários problemas ocasionados nos equipamentos conectados na rede, fez-se necessário estudo de soluções para melhorar a qualidade de energia e proteger as cargas que utilizam a energia da rede de distribuição (WONG, 2014).

Na época do ano 1940, uma das soluções mais conhecidas e estudadas era o filtro passivo, como mostra a Figura 5. O filtro ativo se propõe a solucionar o problema de harmônicas de corrente, com baixo custo de implementação e baixa complexidade. Porém, seu desempenho dinâmico é lento, além de apresentar problemas com ressonância, etc (WONG, 2014).

Figura 5 – Exemplo de uma rede com cargas não lineares e um sistema de compensação de harmônicas com filtro passivo

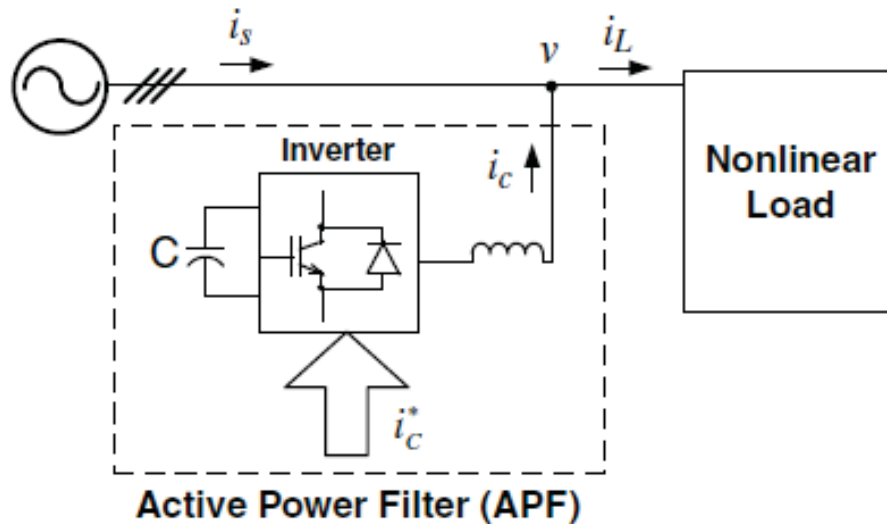


Fonte: (WONG, 2014)

Em 1976 L. Gyugyi apresentou uma nova topologia de filtro ativo mostrando a possi-

bilidade de utilização de inversores. Na Figura 6 tem-se um filtro ativo conectado à rede de distribuição com uma carga não-linear.

Figura 6 – Exemplo de uma rede com cargas não lineares e um sistema de compensação de harmônicos com filtro ativo



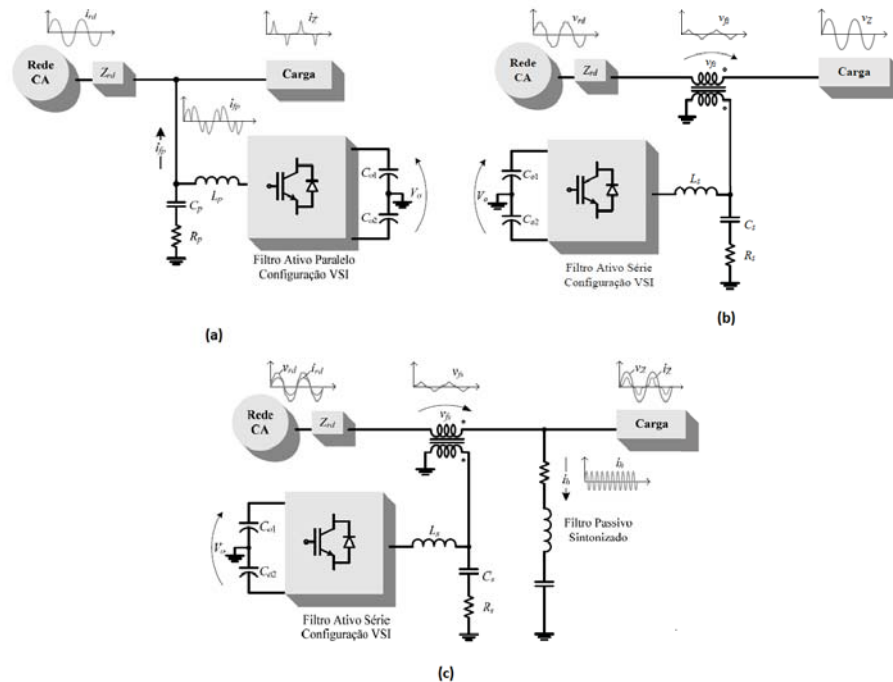
Fonte: (WONG, 2014)

No início dos estudos de filtro ativo, eram empregados apenas para compensar as harmônicas, porém, com o passar dos anos surgiram novos estudos onde o filtro ativo pode ser utilizado, além da compensação de harmônicas, para regular a tensão, redistribuir potência entre as fases, compensar desequilíbrios de tensão, compensar reativos (WONG, 2014).

O objetivo do filtro ativo é a geração de correntes harmônicas contrárias em fase das correntes harmônicas de uma ou mais fases da rede. Assim, anulando as harmônicas que majoritariamente são geradas por cargas não-lineares. É possível ter um filtro ativo ou passivo, uma grande diferença é que o passivo utiliza-se apenas de capacitores e/ou indutores para anular as correntes harmônicas, enquanto o filtro ativo utiliza além de capacitores e indutores, contendo chaveamento e módulos de controle.

Além do filtro ser classificado como ativo, existem três maneiras de utilizar o filtro conectado a rede: série, paralelo e híbrido. O série é utilizado para proteger a carga contra perturbações na tensão da rede, restauradores de tensão. O paralelo funciona como um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas, eliminando-as da rede, além de controlar o fator de potência de entrada, restauradores de corrente. E por fim, o filtro híbrido que é composto por um filtro ativo série e um filtro passivo em paralelo, onde o ativo compensa harmônicos de baixa frequência e o passivo de alta frequência (BIANCHIN, 2015)(DIAS, 2010). A Figura 7 apresenta exemplos de circuitos com filtros ativos paralelo, série e híbrido série-paralelo.

Figura 7 – Exemplo de circuitos de rede de energia elétrica alternada com cargas não lineares e um sistema de compensação de harmônicos com filtros ativos (a)Paralelo, (b)Série e (c)Híbrido Série-Paralelo



Fonte: (DIAS, 2010)

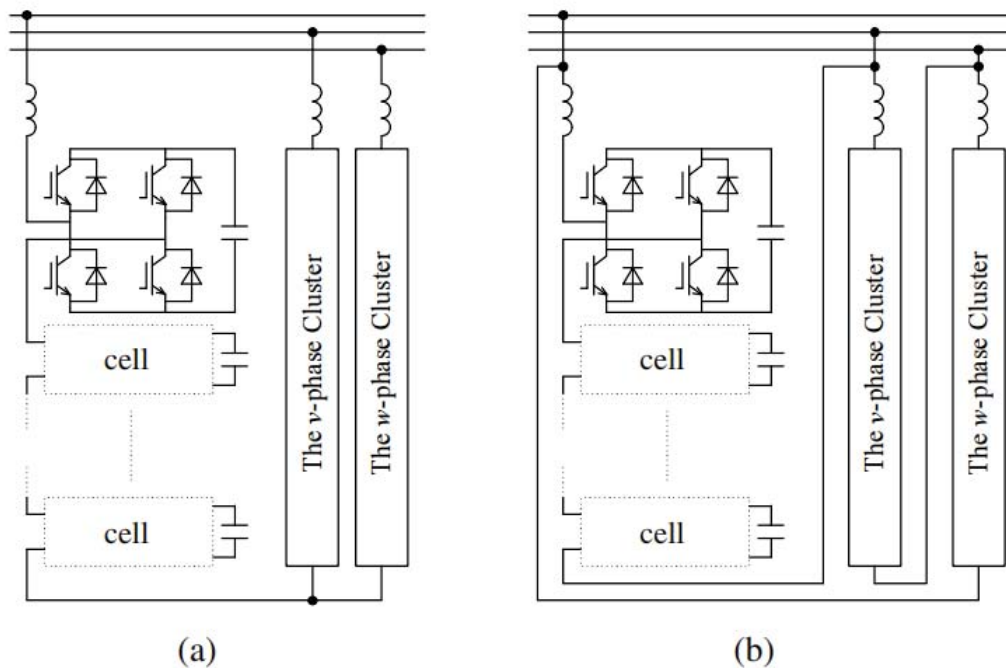
2.2 CONVERSOR MODULAR MULTINÍVEL (*MODULAR MULTILEVEL CONVERTER – MMC*)

O estudo dos conversores modulares multiníveis vem ganhando atenção nos estudos de aplicações de alta e média tensão, por ser uma topologia que está suscetível à estas tensões sem a necessidade de um transformador. Essa topologia consiste em conversores de potência com uma estrutura de braço modular com conexão em cascata, com algumas diferenças em suas configurações. A Família do Conversor Modular Multinível é composta pelas seguintes topologias (HIROFUMI, 2011):

- Conversor estrela simples com módulos ponte completa (*Single-Star Bridge-Cells – SSBC*) Figura 8 (a): Configurações baseadas em células de ponte completa trifásicas com conexão estrela.
- Conversor delta simples com módulos ponte completa (*Single-Delta Bridge-Cells – SDBC*) Figura 8 (b): Configurações baseadas em células de ponte completa trifásicas com conexão delta.

E também tem-se a configuração DSCC se combinação da Figura 9 (a) ou (b) com (c), ou a configuração DSBC se combinação da Figura 9 (a) ou (b) com (d):

Figura 8 – Exemplo de circuitos com configuração MMC sem barramento CC comum: (a)SSBC (b)SDBC



Fonte: (HIROFUMI, 2010)

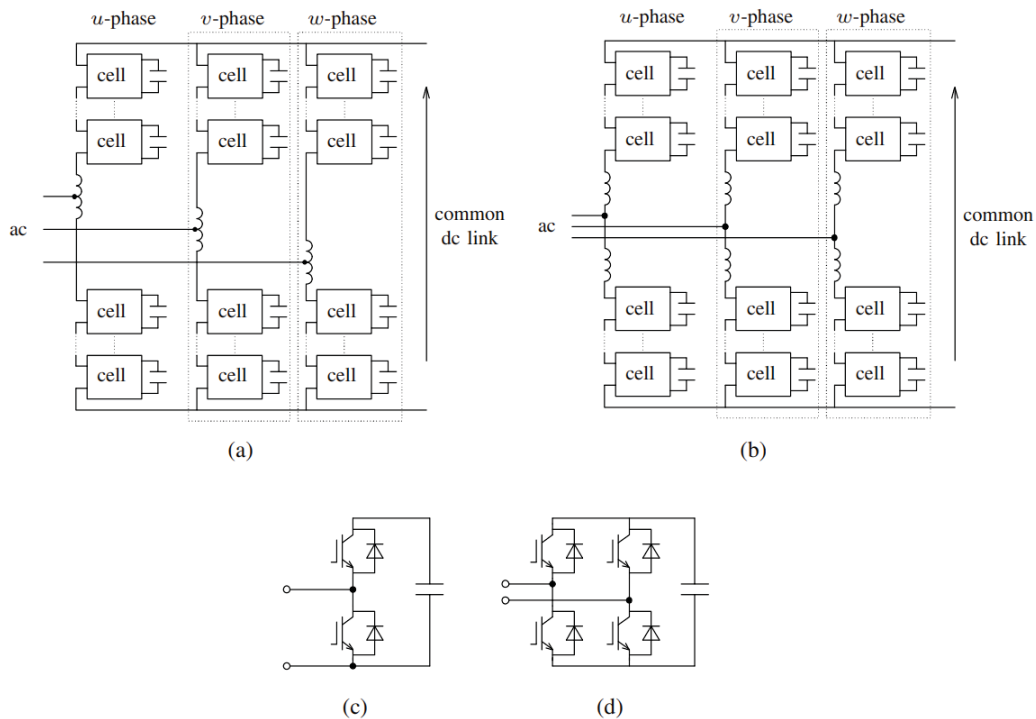
- Conversor dupla estrela com módulos meia ponte (*Double-Star Chopper-Cells - DSCC*) Figura 9 (a) ou (b) com (c): configuração baseada em conversores modulares multiníveis conectados em estrela onde as células de baixa tensão estão em cascata constituindo cada braço. Utiliza um indutor com derivação central entre as células superiores e inferiores.
- Dupla estrela com módulos ponte completa (*Double-Star Bridge-Cells - DSBC*) Figura 9 (a) ou (b) com (d): configuração baseada em conversores modulares multiníveis conectados em estrela onde as células de baixa tensão estão em cascata constituindo cada braço. Utiliza dois indutores entre as células superiores e inferiores.

2.2.1 Etapas de operação do MMC

Conforme pode ser visto na Figura 10 o conversor é trifásico, sendo formado por três fases iguais, de modo que cada fase possui N células no braço superior e N células no braço inferior, e cada célula é composta por submódulos meia ponte.

A operação dos submódulos é analisada em duas etapas, conforme a corrente do capacitor, Figura 11. Para corrente positiva, durante a primeira etapa, a chave S_2 está acionada e a S_1 em aberto, assim, a corrente não flui pelo capacitor. Na segunda etapa, a chave S_2 está aberta e a chave S_1 é acionada, assim, a corrente flui pelo capacitor, armazenando energia no submódulo. Para corrente negativa, as etapas das chaves são iguais, mudando apenas a polaridade do capacitor

Figura 9 – Exemplo de circuitos com configuração MMC com barramento CC comum: (a) Circuito com indutores acoplados, (b) Circuito sem indutores acoplados, (c) Módulos meia ponte e (d) Módulos ponte completa.



Fonte: (HIROFUMI, 2010)

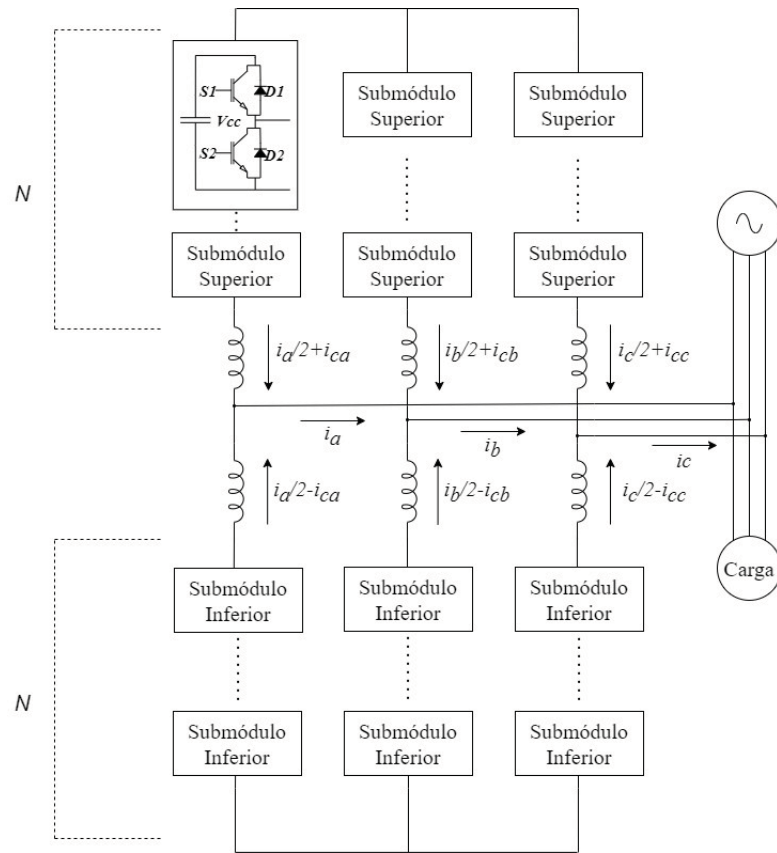
e drenando a energia do submódulo. A corrente de semibraço alterna entre uma região positiva e uma negativa durante um ciclo de rede.

As etapas de operação de todas as células são as mesmas, apenas mudando ao instante que são operadas de acordo com o sinal da portadora.

A corrente que circula no submódulo superior e inferior é composta pela metade da corrente da fonte, i_a , i_b e i_c , e pela corrente circulante entre os braços, i_{ca} , i_{cb} e i_{cc} , como pode ser visto na Figura 10. As correntes de circulação entre os braços, permite graus de liberdade para o sistema de controle.

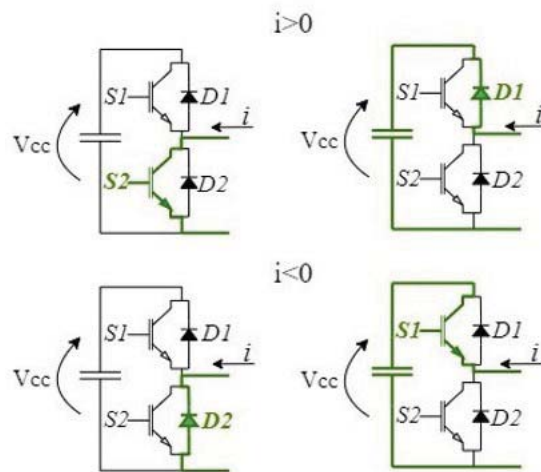
Akagi propôs um sistema de controle para o MMC onde a corrente de circulação tem uma componente da frequência fundamental e permite a troca de energia entre os polos e retirada de energia dos capacitores para injetar na rede. Porém, esse controle considera uma fonte de energia em paralelo com os braços.

Figura 10 – Exemplo de um Conversor Modular Multinível Trifásico



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 11 – Etapas de operação do submódulo do MMC

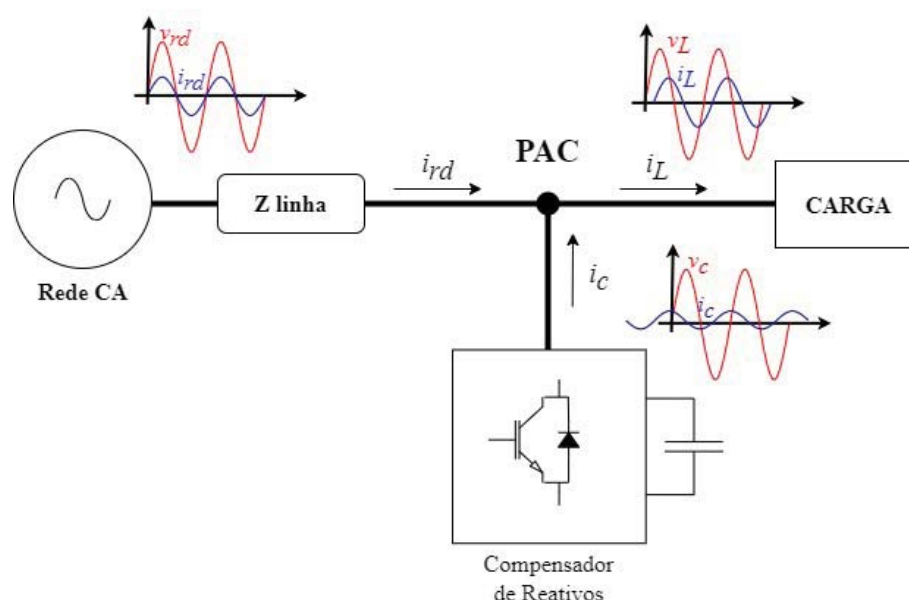


Fonte: (CUNICO, 2013)

2.3 COMPENSADOR SÍNCRONO ESTÁTICO DE REATIVOS (*DISTRIBUTION STATIC SYNCHRONOUS COMPENSATOR – DSTATCOM*)

Um outro equipamento utilizado para dar suporte à distribuição da rede elétrica é o DSTATCOM, sigla de, *Distribution Static Synchronous Compensator*, tem como principais funções compensar a energia reativa, regular a tensão, compensar os harmônicos, injetando potência reativa capacitiva ou indutiva. A estrutura é composta por inversores, capacitores, transformadores e controles, como é apresentado na Figura 12. O exemplo apresentado é um compensador conectado à uma carga indutiva, onde é injetado corrente para o PAC (Ponto de Acoplamento Comum) com comportamento capacitivo, fornecendo assim energia com elevado fator de potência, o que permite aumentar a transferência de potência ativa na linha (KARANKI NAGESH GEDDADA; KUMAR, March 2012).

Figura 12 – Exemplo de sistema de distribuição de energia elétrica utilizando DSTATCOM para compensação de reativos

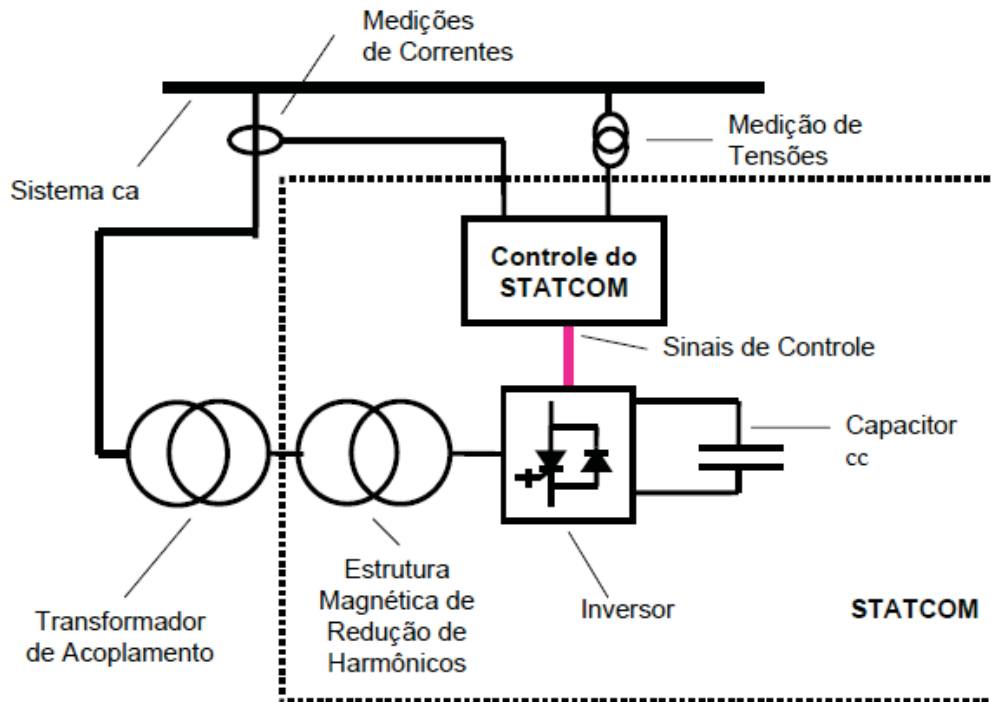


Fonte: Elaborado pela autora

Conforme pode ser visto, o DSTATCOM é formado por um inversor (podendo utilizar um filtro de entrada do tipo L, LC ou LCL), um capacitor do lado de corrente contínua, um sistema de controle, e em algumas aplicações pode ser necessário um transformador para adequação dos níveis de tensão.

Para aplicações em sistemas de transmissão, o DSTATCOM passa a ser chamado de Compensador Síncrono Estático de Reativos (*Static Synchronous Compensator - STATCOM*), podendo ser utilizado para injeção de correntes de compensação de reativos com baixo conteúdo harmônico e, além disso, pode-se trabalhar com uma alta frequência de comutação, superior à rede, permitindo um aumento na velocidade do controle dos interruptores. Na Figura 13 pode-se ver um exemplo de um STATCOM conectado à rede.

Figura 13 – Exemplo de um esquema básico de STATCOM



Fonte: (CAVALIERE, 2001)

Em (Z.; WANG, 2004), o autor apresentou um STATCOM conectado em delta, que além da compensação de potência reativa, também pode ser utilizado para compensar correntes de cargas desbalanceadas, no entanto, não é mencionado o controle de tensão sobre as células. Essa regulação da tensão de cada célula, é ponto chave para correta operação do conversor. Diversas técnicas de controle vêm sendo desenvolvidas para essa finalidade, sendo a primeira validação experimental realizada por (HIROFUMI, 2012) para o controle de componente de sequência negativa, onde os autores propõem um sistema de controle ao CHB conectado em estrela e adicionam uma malha para controle da corrente de circulação. A corrente e circulação foi definida como um sinal senoidal na frequência fundamental do sistema com a mesma amplitude e fase para os três braços (HIROFUMI, 2012),(NIEVES, 2014).

Para aplicações em rede de energia com média e alta tensão, é utilizado conversores multiníveis, permitindo então a conexão direta do STATCOM na rede de energia elétrica.

2.4 CONVERSOR COM CÉLULAS PONTE COMPLETA EM CASCATA (CASCADE H-BRIDGE – CHB)

O conversor proposto por (JÚNIOR, 2020) baseia-se na transferência de energia ativa entre braço apresentada no Conversor Modular Multinível e, também baseia-se na topologia do Conversor Cascata de Ponte Completa. Assim, para um melhor entendimento do Conversor Cascata de Ponte Completa Interconectado (iCHB), será apresentado neste capítulo de forma

qualitativa Conversor Cascata de Ponte Completa.

2.4.1 Estrutura CHB

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).

Um dos primeiros trabalhos sobre conversores multiníveis, data-se de 1975, no qual os autores Richard H. Backer e Lawrence H. Bannister, registraram patente de um conversor que utiliza conversores em ponte completa conectados em cascata (CHB) para sintetizar uma tensão de saída em corrente alternada.

• Principais vantagens do conversor CHB:

- Esta topologia tem estrutura flexível e é facilmente estendida para qualquer número de níveis, com a inserção em série de novos módulos ao arranjo;
- No conversor em cascata simétrico, a tensão CC total é igualmente dividida entre cada módulo (célula);
- Para aumentar o número de níveis é necessário aumentar o número de células, sem necessidade de preocupação com circuitos de grampeamento de tensão, pois as tensões sobre os semicondutores são grampeadas pela fonte isolada de tensão de cada módulo;
- O conversor CHB admite a utilização de variadas técnicas de modulação, sem restrições, diferente da maioria das topologias de conversores multiníveis que são limitadas a algumas técnicas de modulação (BRESSAN, 2019);
- Menor Distorção Harmônica Total (*Total Harmonics Distortion - THD*) e melhor qualidade de energia (em relação aos conversores ponte completa convencionais), uma vez que os conversores multiníveis comutam menores níveis de tensão para sintetizar a forma de onda de saída (GUERRIERO M. COPPOLA; DALIENTO, 2016);
- São capazes de operar em condições de falha devido à sua estrutura modular, ignorando a célula defeituosa e substituindo por uma reserva. A interrupção do conversor é evitada em casos de diversas falhas (MOAMAEI; AHMADI, Feb. 2015).

- **Principais desvantagens do conversor CHB:**

- Necessidade de múltiplas fontes de tensão isolada;
- A modulação utilizada influencia na distribuição de perdas nos semicondutores, podendo ser necessário utilizar diferentes semicondutores por módulo do conversor (BRESSAN, 2019);
- Distribuição de energia desigual entre as células quando a modulação *Level-shifted* é usada. Sendo particularmente prejudicial para baterias CC, devido a descargas entre as baterias conectadas a submódulos CHB que geram menor e maiores níveis de tensão (VIATKIN, 2017);
- Para aplicações em sistema de distribuição conectados em estrela, não é possível realizar a troca de energia entre os braços (HIROFUMI, 2011),(Z.; WANG, 2004), sendo essa uma característica necessária quando o sistema é desequilibrado, gerando maiores dificuldades no controle das tensões dos capacitores (JÚNIOR, 2020);
- Necessidade de regulação de tensão de cada capacitor flutuante. A não regulação correta pode gerar falha devido à sobretensão ou aumento da distorção gerada devido à desigualdade dos níveis de tensão inseridos (CUNICO, 2013). Em aplicações como compensador de reativos ou filtros ativo, essa regulação de tensão que determina se a topologia é capaz de compensar distúrbios da rede (JÚNIOR, 2020).

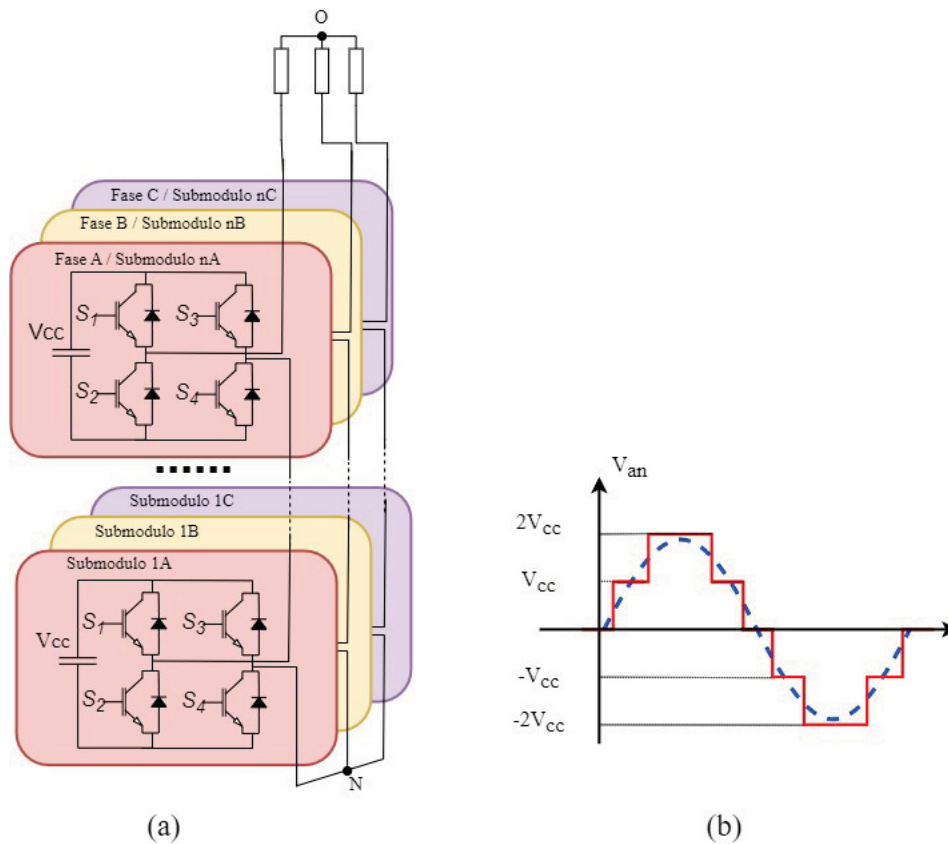
A Figura 14 apresenta a estrutura de um conversor CHB trifásico de 5 níveis de tensão de saída. Conforme pode ser visto na Figura 14 (b), o número de níveis da tensão de saída é determinado por $\lambda=2n+1$, no qual λ representa o número de níveis da tensão sintetizada e n a quantidade de módulos em ponte associados;

2.4.2 Técnica de modulação

Com o aumento dos estudos de novas topologias multiníveis para as mais diversas aplicações também se intensificaram os estudos de novas técnicas de modulação. As técnicas de modulação, empregadas a conversores multiníveis têm por objetivo sintetizar a aproximação um sinal de referência à tensão de saída de um conversor, determinando o período e a sequência dos estados de comutação do conversor (BRESSAN, 2014). De forma sucinta e generalizada, a Figura 15 apresenta a divisão das técnicas de modulação em duas categorias, e mostra algumas das técnicas de modulação mais utilizadas.

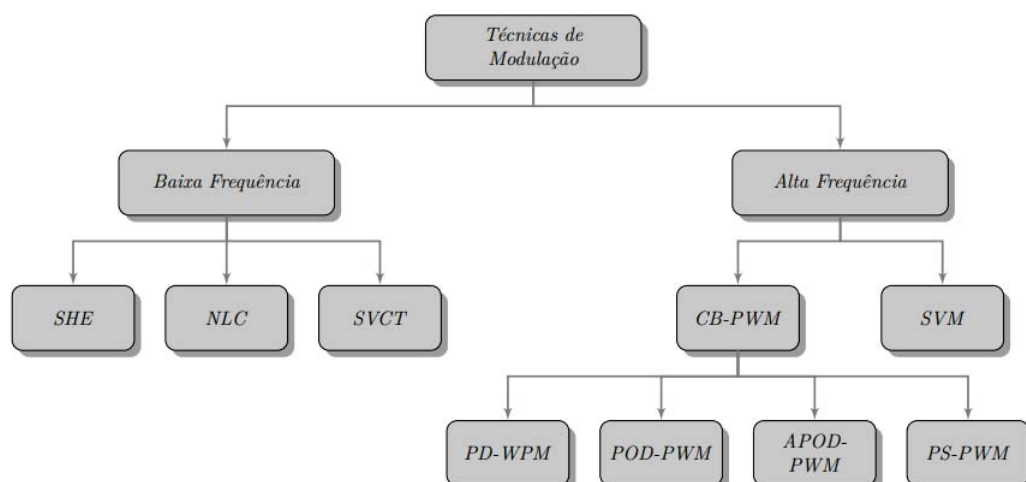
As técnicas de modulação em alta frequência são amplamente difundidas e utilizadas em conversores multiníveis, principalmente as técnicas PWM, que são o foco de estudo deste trabalho (BRESSAN, 2019).

Figura 14 – Exemplo de Conversor Cascata em Ponte Completa - 5L-CHB: (a) Estrutura do conversor, (b) Forma de onda da tensão de saída sintetizada



Fonte: (a) Adaptado de (VIATKIN, 2017) (b) Elaborado pela autora

Figura 15 – Diagrama das principais técnicas de modulação para conversores multiníveis de tensão



Fonte: (BREISSAN, 2019)

As principais técnicas de modulação foram apresentadas, porém não há uma modulação predominante. A escolha da técnica de modulação pode diminuir efeitos indesejados à aplicação

ou à estrutura de potência. As técnicas PD-PWM e PS-PWM, destacam-se por terem uma simplicidade em sua aplicação e têm grande utilidade em conversores multiníveis (BRESSAN, 2019).

2.4.3 Modulação por Largura de Pulsos para Conversores Multiníveis

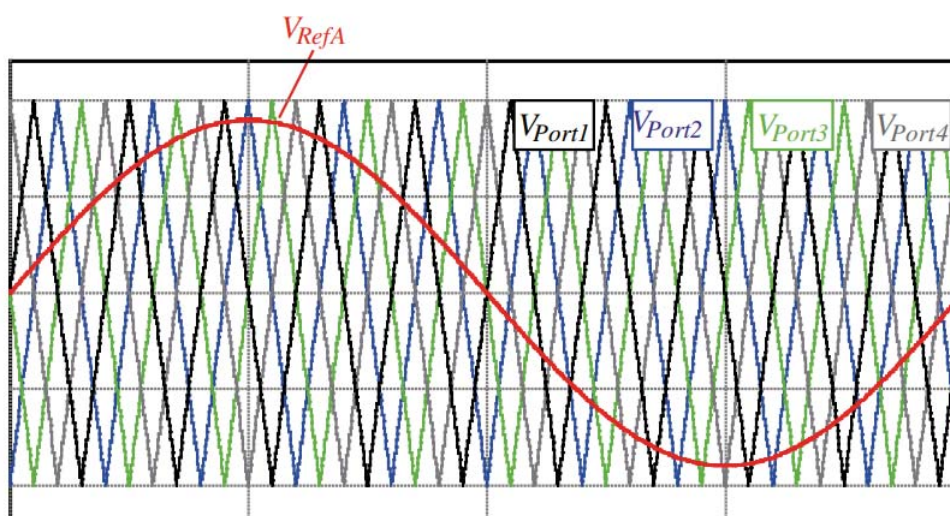
A técnica utilizada na modulação PWM senoidal, implica em modificar a largura dos pulsos que formam a tensão de saída, comparando um dado sinal de tensão (o sinal de referência) com um sinal de tensão triangular de maior frequência (o sinal da portadora). O sinal de referência é o sinal de modulação e determina a forma de onda necessária da tensão de saída (ROZANOV YURIY; RYVKIN, 2016).

Na seção a seguir, terá uma breve apresentação da técnica de modulação com as portadoras deslocadas em fase, a qual adotada para os estudos neste trabalho.

2.4.3.1 Modulação com as Portadoras com Deslocamento de Fase (Phase Shifted – PS)

A modulação com as portadoras com deslocamento de fase emprega " $\lambda - 1$ " portadoras, todas com a mesma amplitude e nível médio nulo, sendo λ número de níveis obtidos na tensão de saída do conversor. As portadoras são deslocadas entre si de $360^\circ / (\lambda - 1)$. A técnica de modulação PS é o método o qual apresenta as menores distorções harmônicas de linha quando comparado às principais técnicas de modulação por múltiplas portadoras. Porém, as perdas devido às comutações dos semicondutores são maiores (RADAN; SHAHIRINA; FALAHI, 2007). A Figura 16 é um exemplo da modulação de um conversor de 5 níveis com modulação com as portadoras dispostas com deslocamento de fase.

Figura 16 – Exemplo Modulação com as Portadoras com Deslocamento de Fase (Phase Shifted – PS)



Fonte: (BATSCHAUER, 2011)

Para o iCHB é escolhida a modulação empregada no CHB, modulação por deslocamento de fase, por conta de ser mais vantajosa para essa aplicação, assim tendo a possibilidade de distribuição uniforme do número e tempo de comutação e, por consequência, as perdas de comutação e condução nos semicondutores.

3 CONVERTOR ICHB

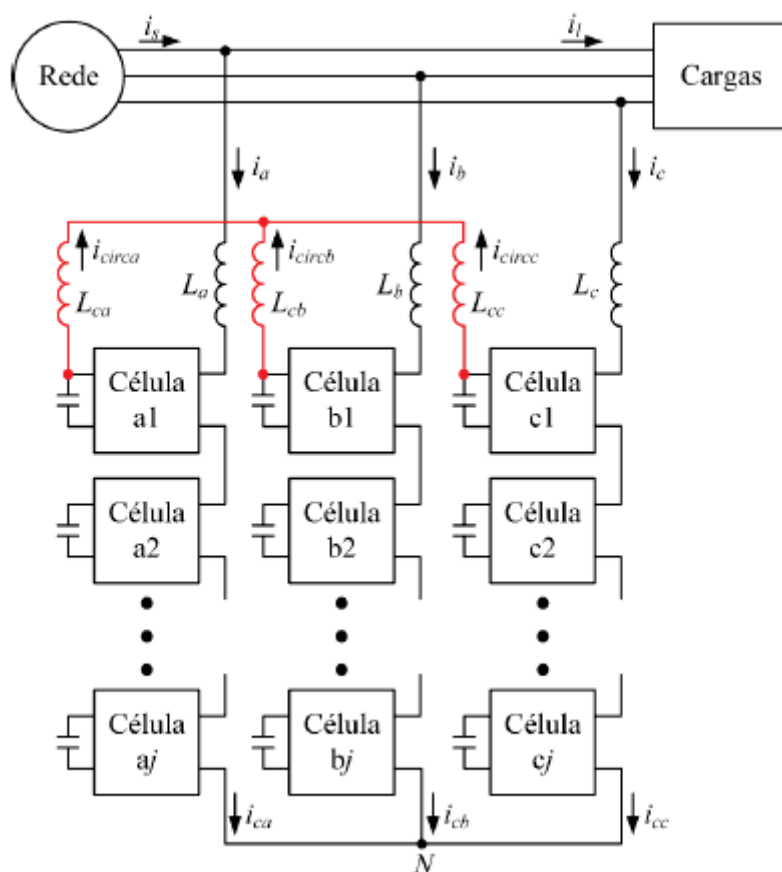
Neste capítulo é apresentado Conversor Cascata de Ponte Completa Interconectado (iCHB), estrutura do conversor, e etapas de operação.

Após essa apresentação conceitual do conversor, será apresentado o sistema de controle projetado para essa topologia.

3.1 ESTRUTURA ICHB

Tendo em vista que a topologia CHB não é adequada para compensação de desequilíbrios de corrente de redes de distribuição, em (JÚNIOR, 2020), o autor propõe uma topologia para compensação dessa limitação, inserindo indutores de circulação em estrela entre os braços de um conversor CHB trifásico, denominando assim de Conversor Cascata de Ponte Completa Interconectado (iCHB), conforme é apresentado na Figura 17.

Figura 17 – Conversor Cascata de Ponte Completa Interconectado (iCHB)



Fonte:(JÚNIOR, 2020)

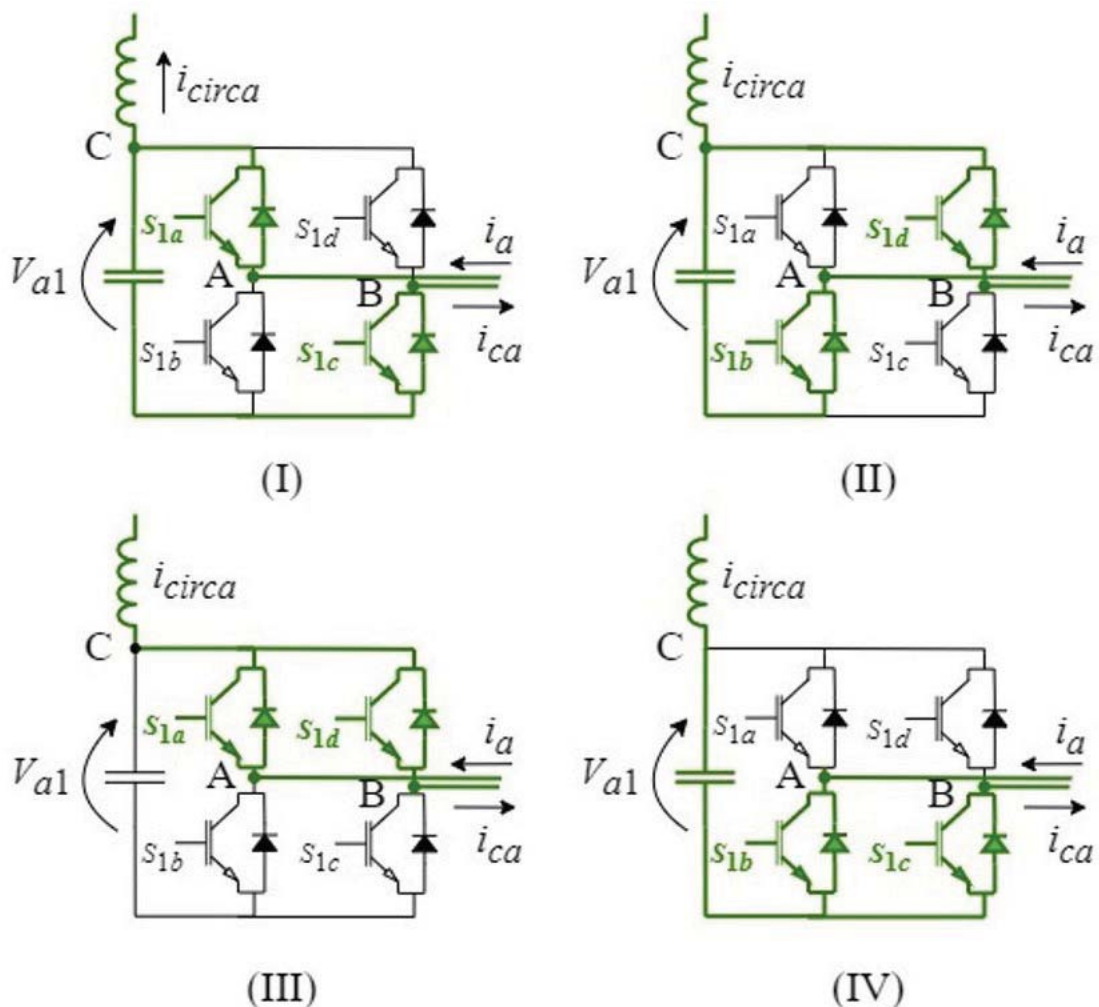
Ainda segundo o autor, essa nova topologia permite a utilização das técnicas de modulação empregadas em outros conversores multiníveis, como as empregadas no CHB.

As análises das etapas de operação são divididas em duas partes, sendo a primeira relacionada as células superiores, as quais contém os indutores de circulação e a segunda é relacionada as outras n células do conversor. Essa divisão é necessária devido a certas particularidades que surgem entre essa conexão das células superiores e inferiores (JÚNIOR, 2020).

3.2 ETAPAS DE OPERAÇÃO DAS CÉLULAS SUPERIORES - ICHB

A Figura 18 (I) mostra a primeira etapa de funcionamento da célula superior. Nessa etapa os interruptores S_{1a} e S_{1c} são acionados, e a tensão V_{AB} é V_{a1} e a tensão V_{cb} também é igual a V_{a1}

Figura 18 – Etapas de operação das células superiores



Fonte: Adaptado de (JÚNIOR, 2020)

A corrente interna, que circula pelas células inferiores, é obtida pela análise do nó C, de modo que:

$$i_{ca} = i_a - i_{circa} \quad (1)$$

Onde:

i_{ca} = corrente interna que flui nas células inferiores;

i_a = corrente da fase A;

i_{circa} = corrente de circulação entre os braços

Essa equação é válida para todas as etapas de operação.

Na Figura 18 (II) é apresentada a segunda etapa de operação, iniciando com o acionamento dos interruptores S_{1d} e S_{1b} , de modo que a tensão de saída V_{ab} é igual a $-V_{a1}$ e a tensão V_{cb} é nula.

Na Figura 18 (III) é apresentada a terceira etapa de operação, na qual são acionados os interruptores S_{1a} e S_{1d} , resultando nas tensões V_{ab} e V_{cb} ambas nulas.

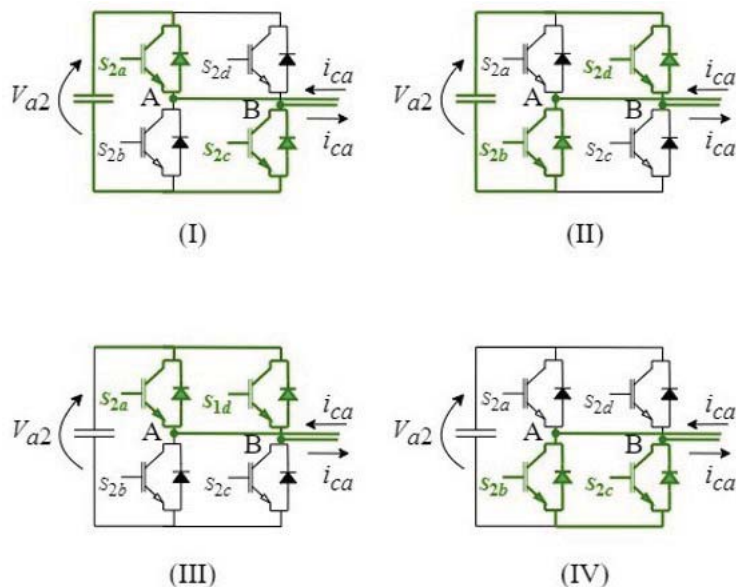
Na Figura 18 (IV) é apresentada a quarta etapa de funcionamento, na qual os interruptores S_{ab} e S_1 são acionados, de modo que a tensão de saída V_{ab} é nula, porém a tensão V_{cb} é V_{a1} .

3.3 ETAPAS DE OPERAÇÃO DAS CÉLULAS INFERIORES - ICHB

As etapas de operação de todas as células são as mesmas, apenas mudando ao instante que são operadas de acordo com o sinal da portadora. A célula escolhida para a exemplificação das etapas é a célula a_2 , sendo essas etapas mostradas a seguir.

A primeira etapa de operação ocorre quando os interruptores S_{2a} e S_{2c} são acionados, de modo que a tensão de saída V_{AB} é igual a V_{a2} , conforme pode ser visto na Figura 19 (I).

Figura 19 – Primeira etapa de operação da célula inferior



Fonte: Adaptado de (JÚNIOR, 2020)

Na figura 19 (II) é mostrada a segunda etapa de operação, a qual ocorre quando os interruptores S_{2d} e S_{2b} são acionados, sendo a tensão de saída V_{AB} dada por $-V_{a2}$.

Nas próximas duas etapas, são os instantes em que são geradas as tensões V_{AB} nula.

Na Figura 19 (III) é mostrado a terceira etapa de operação, a qual ocorre quando os interruptores S_{2a} e S_{2d} são acionados.

Na Figura 19 (IV) é mostrada a quarta etapa de operação, a qual ocorre quando os interruptores S_{2b} e S_{2c} são acionados.

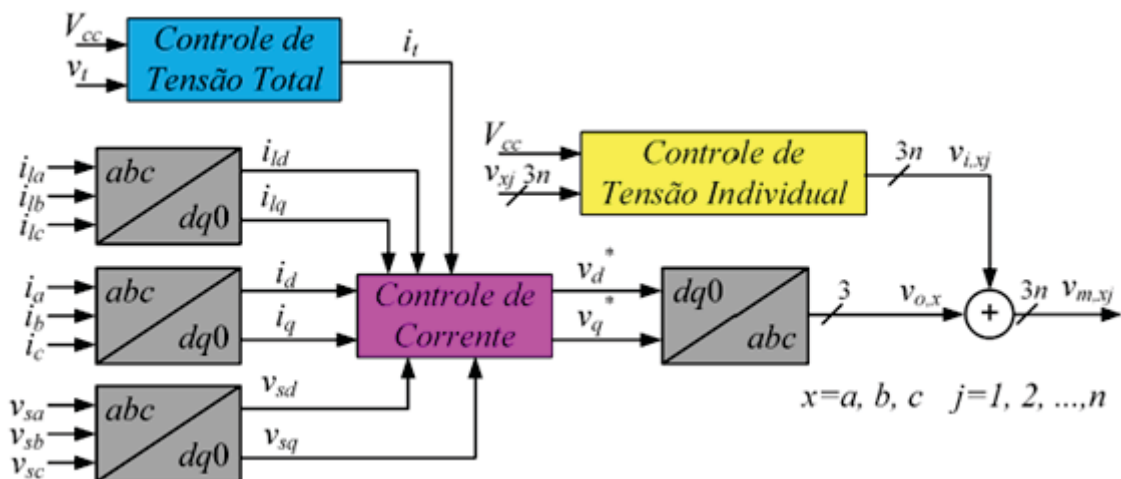
3.4 SISTEMA DE CONTROLE

Segundo (JÚNIOR, 2020), o sistema de controle do iCHB deve ser capaz de manter as correntes no alimentador equilibradas, com baixa Distorção Harmônica Total (THD) e em fase com as tensões da rede, independente da carga conectada à rede. Para obter essas características desejadas, é necessário fazer o controle de duas malhas de tensão e uma de corrente, sendo utilizados os sistemas de coordenadas síncronas $dq0$ para a realização desses controladores, conforme pode ser visto na Figura 20.

E ainda é necessário a leitura dos valores de correntes da carga, valores de correntes do conversor, valores das tensões de fase da rede, que após a leitura, são convertidos para as coordenadas síncronas $dq0$, além das leituras das tensões cc de todas as células, bem como o valor total da tensão das células de cada braço.

Para obter as coordenadas síncronas $dq0$ utilizou-se a transformação $abc-dq0$, uma metodologia que permite representar um sistema trifásico abc , em um sistema girante dq síncrono, onde as componentes d e q resultantes são quantidades contínuas. As componentes dq giram em uma velocidade angular ω , que é igual a frequência das componentes transformadas. Assim, é possível obter o sincronismo das componentes d e q , onde o eixo direto representa a potência ativa e o eixo de quadratura representa a potência reativa (BIANCHIN ANDRÉ RUBENS ALMEIDA,).

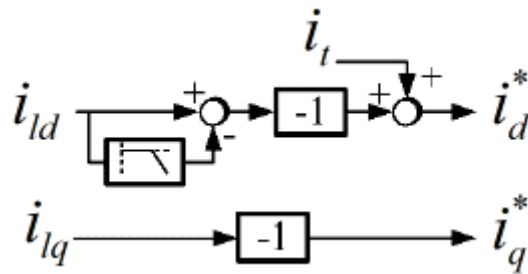
Figura 20 – Sistema de controle do conversor Cascata de Ponte Completa Interconectado (iCHB)



Fonte: (JÚNIOR, 2020)

O conversor iCHB deve processar toda a potência reativa consumida pela carga (corrente de quadratura i_{lq}), a parcela de desequilíbrio de potência da carga, além das perdas de potência ativa provenientes da operação do conversor, de modo que a rede forneça para a carga, apenas a parcela equilibrada de potência ativa. Para o processamento desse desequilíbrio de potência ativa, é utilizado o valor da corrente de carga de eixo direto (i_{ld}), o qual passa por um filtro passa-baixas para extração do valor médio (nível cc). Após, é subtraído esse nível cc do valor da corrente de carga de eixo direto, resultando assim, apenas o sinal que representa o desequilíbrio de potência ativa consumida pela carga, sendo posteriormente somado ao sinal gerado pelo controlador de tensão total das células (que representa as perdas do conversor) e formando assim a referência de corrente de eixo direto (i_d^*), conforme pode ser visto na Figura 21.

Figura 21 – Digrama de blocos das referências de corrente em coordenadas dq0



Fonte: (JÚNIOR, 2020)

Na Figura 22 é apresentado o diagrama em blocos da malha de corrente em coordenadas dq0, onde:

i_d = representa a corrente de eixo direto do conversor

i_q = representa a corrente de eixo em quadratura do conversor

i_d^* = representa a referência de corrente de eixo direto

i_q^* = representa a referência de corrente de eixo em quadratura do conversor

C_i = controlador de corrente

v_{sd} = tensão da rede de eixo direto

v_{sq} = tensão da rede de eixo em quadratura

ω = frequência angular da rede

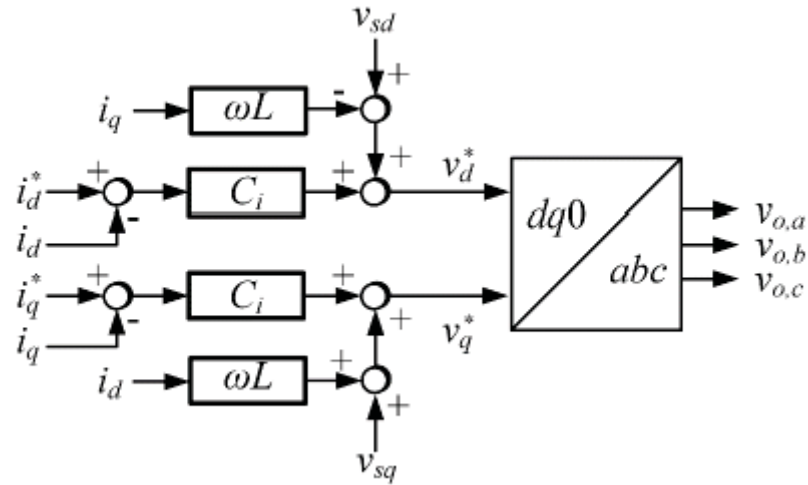
L = indutância total vista pelo conversor (indutância de entrada do conversor + indutância da rede)

Após a ação de controle da corrente, são somadas as parcelas que desacoplam os eixos d e q , representadas pelos blocos ωL , apresentado na Figura 22.

3.4.1 Parâmetros do conversor

Para o indutor de circulação foi utilizado a Equação 2 apresentada por (JÚNIOR, 2020).

Figura 22 – Diagrama de blocos da malha de corrente em coordenadas dq0



Fonte: (JÚNIOR, 2020)

$$i_{circx} = \frac{2n-1}{2} \cdot \frac{V_{cc}}{\omega L_{cx}} \quad (2)$$

A impedância de rede foi utilizada para a reatância indutiva 10% da impedância de base e para resistência da rede, 1% da impedância de base. As perdas nos resistores em paralelo com o capacitor de barramento, utilizou-se perda de 0,5% da potência nominal do sistema para cada braço e dividido pelo número de células. Os parâmetros restantes foram mantidos os mesmos de (JÚNIOR, 2020).

Os parâmetros do conversor são apresentados na Tabela 1:

Tabela 1 – Parâmetros do iCHB em rede de baixa tensão com 4 células

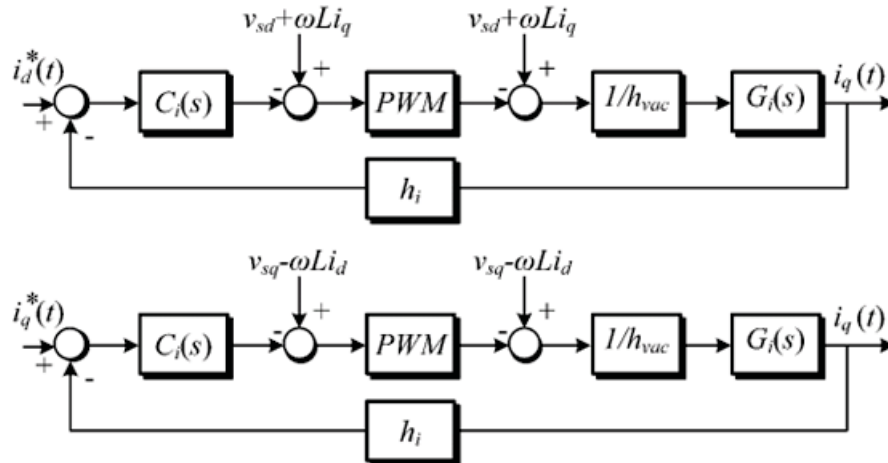
Potência nominal do iCHB	S_n	30 kVA
Tensão de rede	V_s	220 V
Frequência da rede	f_s	60 Hz
Frequência de comutação	f_{sw}	5 kHz
Número de células por braço	n	4
Tensão nominal de célula	V_{cc}	150 V
Indutância da rede	L_s	1,28 mH
Indutância de saída	L	5 mH
Indutância de circulação	L_c	10 mH
Capacitância da célula	C_c	20 mF
Ganho do modulador PWM	h_{pwm}	1/2
Ganho do sensor de corrente	h_i	1/100
Ganho dos sensores de tensão ca	h_{vac}	1/311,13
Ganho dos sensores de tensão cc	h_v	1

Fonte: Elaborado pela autora

3.4.2 Controle de corrente

Na Figura 23 é apresentado o diagrama de blocos do controle de corrente de eixo direto e em quadratura.

Figura 23 – Diagrama em blocos do controle de corrente



Fonte: (JÚNIOR, 2020)

Conforme apresentado em (JÚNIOR, 2020), a planta de corrente do conversor é dada pela Equação 3, sendo utilizado um controlador do tipo PI, projetado com uma metodologia baseada em (AKAGI; YOSHII, JULY/AUGUST 2007).

$$G_i(s) = \frac{1}{sL} \quad (3)$$

A constante de tempo é escolhida para que seja pelo menos 10 vezes mais lenta que a frequência de chaveamento, resultando em:

$$T_i = 2ms \quad (4)$$

O ganho proporcional é calculado conforme equação 5:

$$k_i = \frac{2.L_f}{T_i} \quad (5)$$

Os resultados dessa equação são os valores mínimos para o controle ter o comportamento adequado e um sistema estável, para o ganho proporcional obteve-se um ganho proporcional de 10, porém, para uma resposta ao degrau mais lenta, o ganho proporcional é multiplicado por 2.

Os parâmetros do controlador são apresentados na Tabela 2.

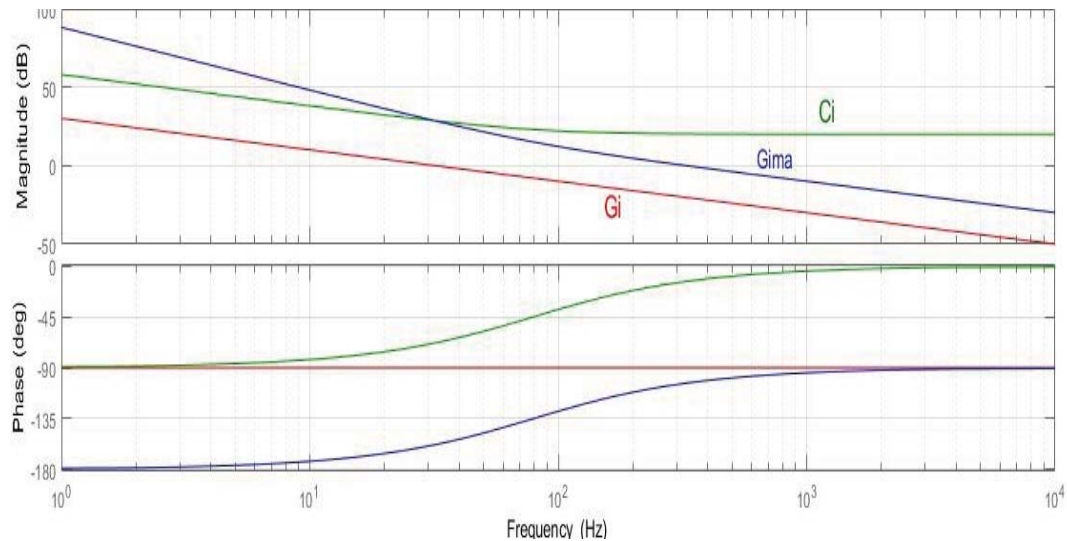
Na Figura 24 é apresentado o diagrama de bode da planta de corrente G_i , o controlador C_i e a função de transferência de malha aberta G_{ima} .

Tabela 2 – Parâmetros do controlador de corrente

Parâmetros do controlador	
Ganho integral - T_i	2 ms
Ganho proporcional - K_i	20
Frequência de corte - f_c	640 Hz
Margem de fase - M_g	82 °

Fonte: Elaborado pela autora

Figura 24 – Diagrama de Bode da função de transferência de malha aberta da malha de corrente incluindo o controlador



Fonte: Elaborado pela autora

3.4.3 Controle de tensão individual

O controle de tensão individual é feito para cada célula do conversor individualmente, ou seja, a malha de tensão individual depende do número de células do iCHB.

A planta de tensão individual é dada pela Equação 6 (JÚNIOR, 2020), e também com auxílio da ferramenta Sisotool do Matlab é projetado um controlador do tipo proporcional, com os parâmetros apresentados na Tabela 3:

$$\frac{v_{xj}(s)}{v_{i,xj}(s)} = \frac{nV_{cc}}{s\omega L_c C_c} \quad (6)$$

Sendo:

L_c – indutância de circulação

O controle de tensão individual deve ser lento o suficiente para ignorar a ondulação nos capacitores, provada pela corrente alternada em 60 Hz. Como a ondulação nos capacitores ocorre em 120 Hz, a frequência de corte do controle será 20 vezes menor, assim, o cruzamento por zero da resposta em malha aberta do controlador será em 6 Hz.

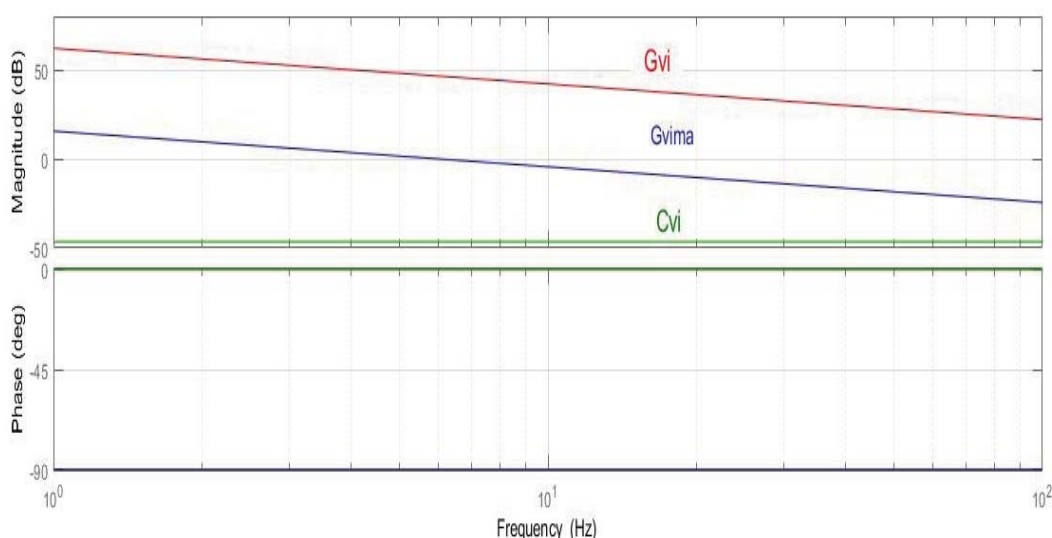
Tabela 3 – Parâmetros do controlador de tensão individual

Parâmetros do controlador	
Ganho proporcional - K_{vi}	0,0047
Frequência de corte - f_c	6 Hz

Fonte: Elaborado pela autora

Na Figura 25 é apresentado o diagrama de Bode da planta de tensão individual G_{vi} , o controlador C_{vi} e a função de transferência de malha aberta G_{vima} .

Figura 25 – Diagrama de Bode da função de transferência de malha aberta da malha de tensão individual incluindo o controlador



Fonte: Elaborado pela autora

3.4.4 Controle de tensão total

A planta de tensão total é dada por (JÚNIOR, 2020):

$$\frac{v_t(s)}{i_d(s)} = \frac{3n}{C_c \cdot v_{sd} \cdot s V_{cc}} \quad (7)$$

Sendo:

n – número de células

C_c – Capacitância de cada célula

V_{sd} – tensão da rede de eixo direto

V_{cc} – tensão cc sobre os capacitores

Com auxílio da ferramenta Sisotool do Matlab foi projetado um controlador PI com os dados apresentados na Tabela 4. O controle tem um cruzamento por zero em malha aberta em 0,6

Hz, 10 vezes mais lento que a malha de tensão individual, e menor que a frequência fundamental, evitando a correção da ondulação que ocorre nos capacitores.

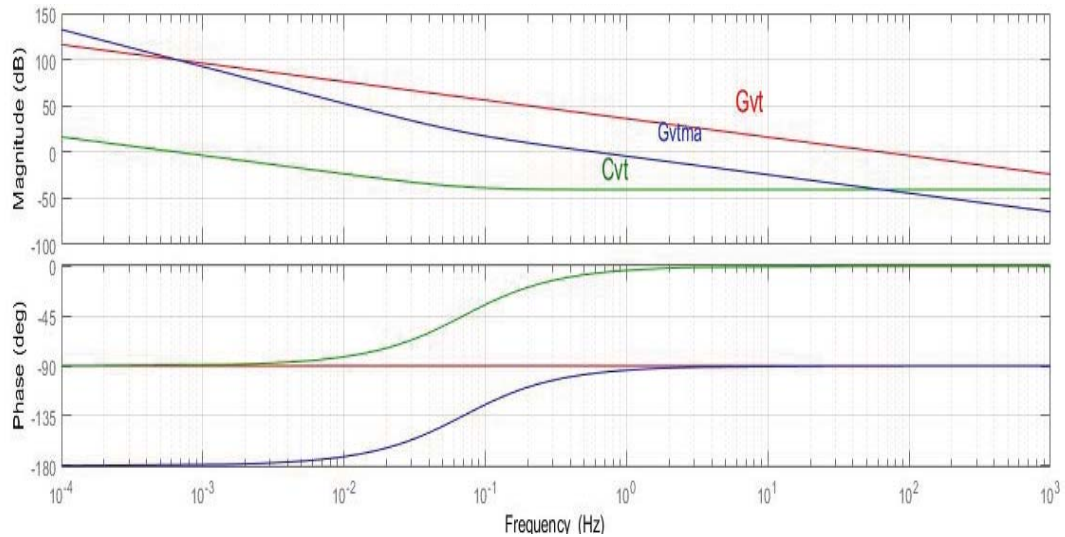
Tabela 4 – Parâmetros do controlador de tensão total

Parâmetros do controlador	
Ganho integral - T_{vt}	2,28
Ganho proporcional - K_{vt}	0,0094
Frequência de corte - f_c	0,6 Hz

Fonte: Elaborado pela autora

Na Figura 26 é apresentado o diagrama de bode da planta de tensão total G_{vt} , o controlador C_{vt} e a função de transferência de malha aberta G_{vtma} .

Figura 26 – Diagrama de Bode da função de transferência de malha aberta de tensão total incluindo o controlador no tempo discreto



Fonte: Elaborado pela autora

4 SIMULAÇÃO ICHB

Este capítulo apresenta a simulação, desenvolvida no software PSIM[®], do conversor iCHB de 9 níveis com os sistemas de controle de corrente, tensão total e tensão individual projetado no capítulo 3, e tem como objetivo principal analisar o desempenho do conversor conversor iCHB com 4 células para rede de distribuição de baixa tensão. E também avaliar a rede de distribuição sem o conversor e quando o conversor é conectado a rede.

4.1 PARÂMETROS DE QUALIDADE DE ENERGIA

O termo qualidade de energia refere-se a vários fenômenos, que abrangem diversos setores, desde o consumo, transmissão e até a geração de energia elétrica. Neste trabalho, é analisado a qualidade do produto, ou seja, a conformidade do produto "energia elétrica", dentro dos padrões estabelecidos pelas normas vigentes. Assim, será analisado o fator de potência, desequilíbrio da corrente e Distorção Harmônica Total da corrente do alimentador.

4.1.1 Desequilíbrio da corrente

Para o desequilíbrio de tensão em sistemas de distribuição trifásicos, a IEC 61000-3-13 recomenda a utilização do fator de desequilíbrio de tensão (Voltage Unbalance Factor – VUF). O VUF é definido como (IEC 61000-3-13):

$$VUF = \frac{v^n}{v^p} \cdot 100\% \quad (8)$$

Sendo v^n magnitude do fasor de tensão de sequência negativa e v^p magnitude do fasor de tensão de sequência positiva.

É uma fórmula equivalente conhecida como CIGRE-C04 (ANEEL..., 2017) (PAULILO, 2013):

$$VUF = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} * 100\%, \quad \beta = \frac{|V_{ab}|^4 + |V_{bc}|^4 + |V_{ca}|^4}{(|V_{ab}|^2 + |V_{bc}|^2 + |V_{ca}|^2)^2} \quad (9)$$

Existem diversos limites permitidos de desequilíbrio, dependendo da norma em nível nacional e internacional. Por exemplo, a ONS e ANEEL tem limite máximo e distorção de 2%, e NEMA (norma norte americana) também tem limite de 2%.

Neste trabalho é avaliado a distorção na corrente, assim, utiliza-se a Equação 9, alterando os fasores de tensão pelo os fasores de corrente, torna-se então o fator de desequilíbrio de corrente (Current Unbalance Factor – CUF):

$$CUF = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} * 100\%, \quad \beta = \frac{|I_a|^4 + |I_b|^4 + |I_c|^4}{(|I_a|^2 + |I_b|^2 + |I_c|^2)^2} \quad (10)$$

E é utilizado mesmo limite utilizado por (JÚNIOR, 2020), CUF abaixo de 5%

4.1.2 Fator de Potência

O Fator de Potência é avaliado através da Equação 11, utilizando valores das potências ativa e reativa (PRODIST - Módulo 8).

$$f_p = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (11)$$

Sendo:

f_p – Fator de potência

P – Potência ativa

Q - Potência reativa

Para conexões inferiores a 230 kV, o fator de potência no ponto de conexão deve ser entre 0,92 e 1,00 indutivo, ou 1,00 e 0,92 capacitivo, de acordo com as Regras de Prestação do Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica.

4.1.3 Distorção Harmônica Total da Tensão

As distorções harmônicas são fenômenos associados a deformações nas formas de onda das tensões em relação à onda senoidal da frequência fundamental.

Tabela 5 – Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental)

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} \leq V_n \leq 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n \leq 230 \text{ kV}$
DTT95%	10,0%	8,0%	5,0%
DTTP95%	2,5%	2,0%	1,0%
DTTI95%	7,5%	6,0%	4,0%
DTT395%	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: (ANEEL..., 2017)

4.2 PARÂMETROS PARA AS SIMULAÇÕES

Para a simulação do iCHB de 4 células foram utilizados os parâmetros apresentados na Tabela 1, e as cargas são apresentadas na Tabela 6

4.2.1 Circuitos de Potência

O circuito de potência completo está apresentado na Figura 27. E circuito de comando está apresentado na Figura 28. A modulação utilizada nesta simulação é a modulação com

Tabela 6 – Parâmetros de cargas para simulação baixa e média tensão

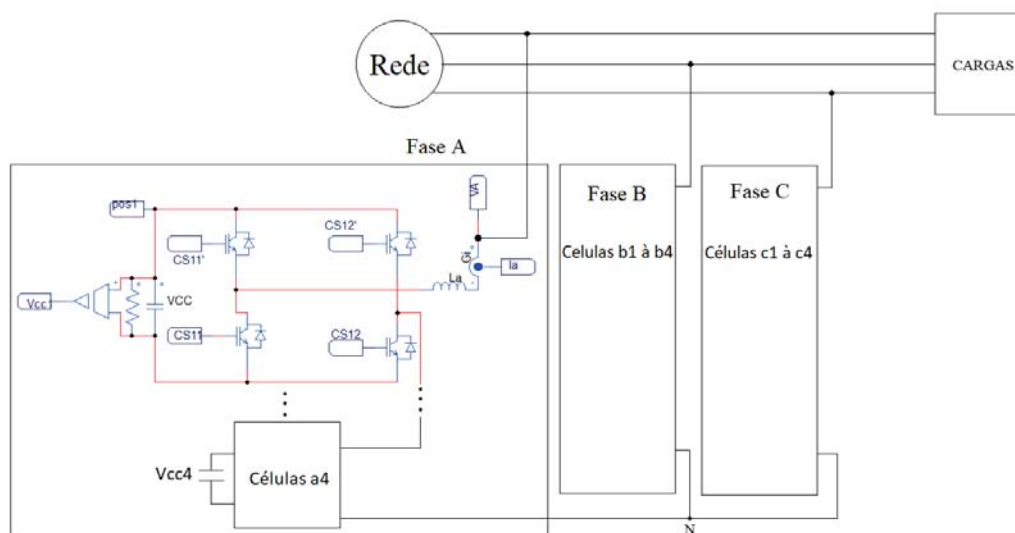
FASE	Resistência	Indutância	Não-linear
A	10 Ω	19 mH	4,5 kVA
B	4 Ω	7,6 mH	
C	2 Ω	3,8 mH	

Fonte: Elaborado pela autora

portadoras com deslocamento de fase. Para as portadoras, tem-se uma defasagem de 45° entre células e defasagem de 180° entre braço de cada célula.

Circuitos de potência e comandos completos nos Anexos A.

Figura 27 – Circuito de potência simplificado do iCHB com 4 células



Fonte: Elaborado pela autora

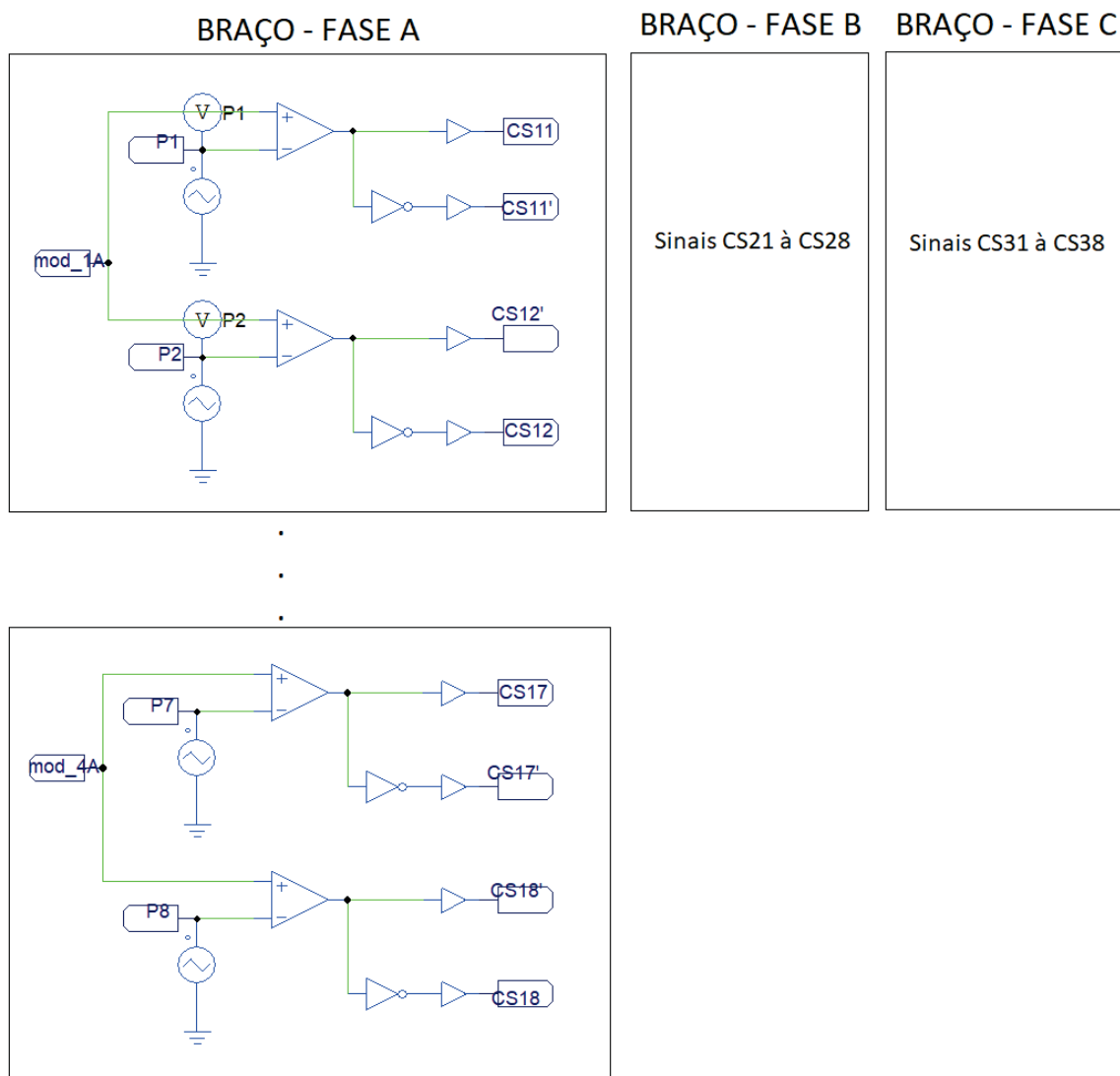
Na figura 29 é apresentado o circuito da rede elétrica adicionada à simulação, e a transformação abc para dq .

4.2.2 Controles de tensões e corrente

A Figura 30 mostra o circuito simulado do controle de tensão total e corrente, e na Figura 31 o circuito que faz o somatório das tensões dos capacitores de cada célula. O somatório das tensões dos capacitores é feito a média e comparado com o valor de referência de tensão de barramento, e com o erro gerado é aplicado o controle de tensão total. Após a ação de controle da corrente é somado o desacoplamento do eixo direto e de quadratura. E por fim, é feita a transformação $dq0$ dos sinais ci_d e ci_q .

O controle de tensão individual é responsável pela regulação das tensões cc dos capacitores de cada célula.

Figura 28 – Circuito de comando do iCHB

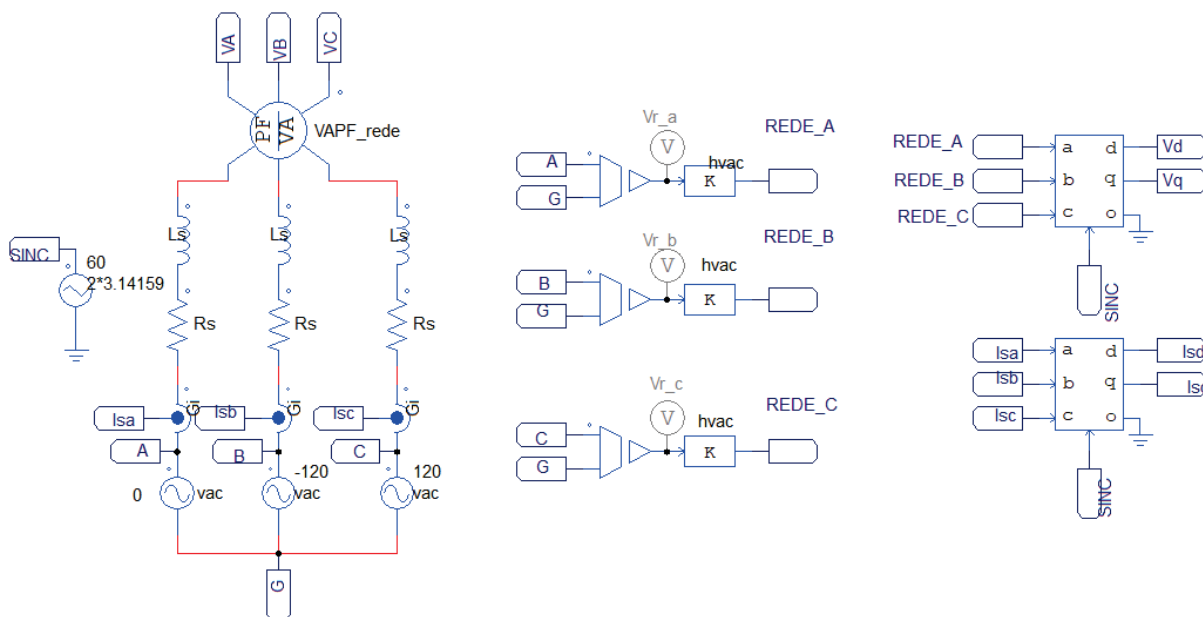


Fonte: Elaborado pela autora

Com a leitura da tensão de cada capacitor das células, é feita a subtração do valor de referência e com o erro gerado, é aplicado o controle proporcional, assim tem-se 12 controles de tensão individual. Para ter uma correta regulação das tensões é necessário multiplicar o sinal da saída do controle individual de tensão por uma função cossenoidal de amplitude unitária, com sinal positivo ou negativo conforme o sinal da corrente da carga. O sinal de saída irá se somar com o sinal de saída do controle de corrente, Mod_A , Mod_B e Mod_C , assim, é gerado os sinais modulantes para os controles das chaves do conversor. Como visto na Figura 28, os sinais modulantes, mod_{xA} , mod_{xB} e mod_{xC} , e feito a comparação com as portadoras, sendo modulação por deslocamento de fase.

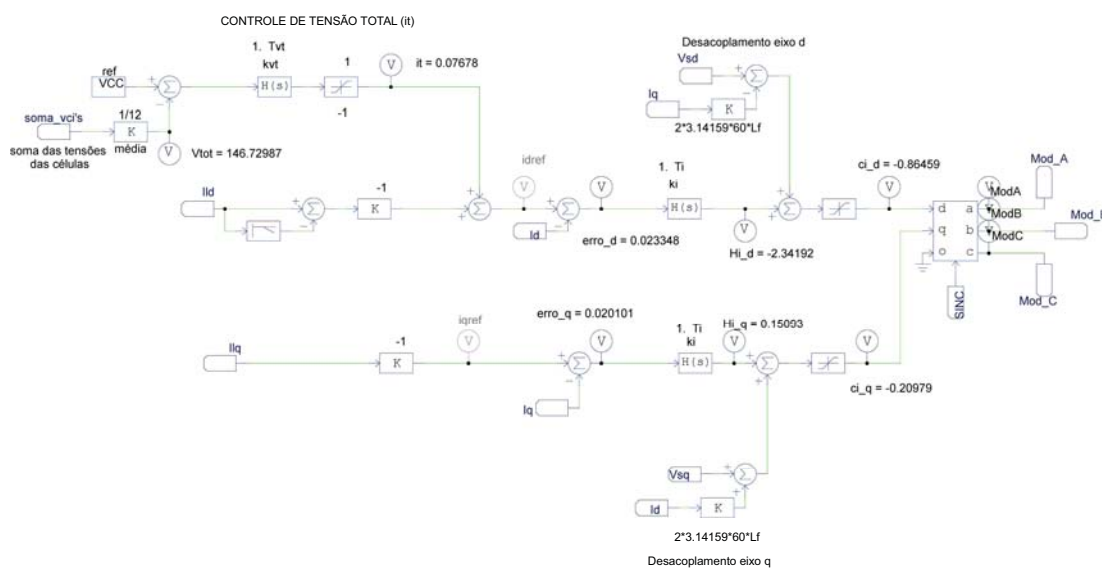
Na Figura 32 tem-se o circuito do controle de tensão individual para fase A, as fases B e C são iguais a fase A.

Figura 29 – Circuito simulação rede elétrica



Fonte: Elaborado pela autora

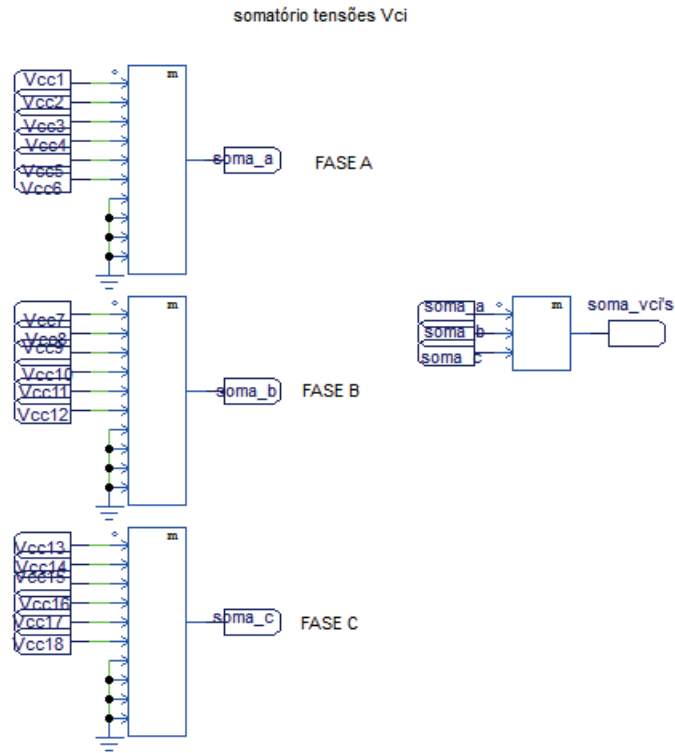
Figura 30 – Controle de tensão total e Controle de corrente



Fonte: Elaborado pela autora

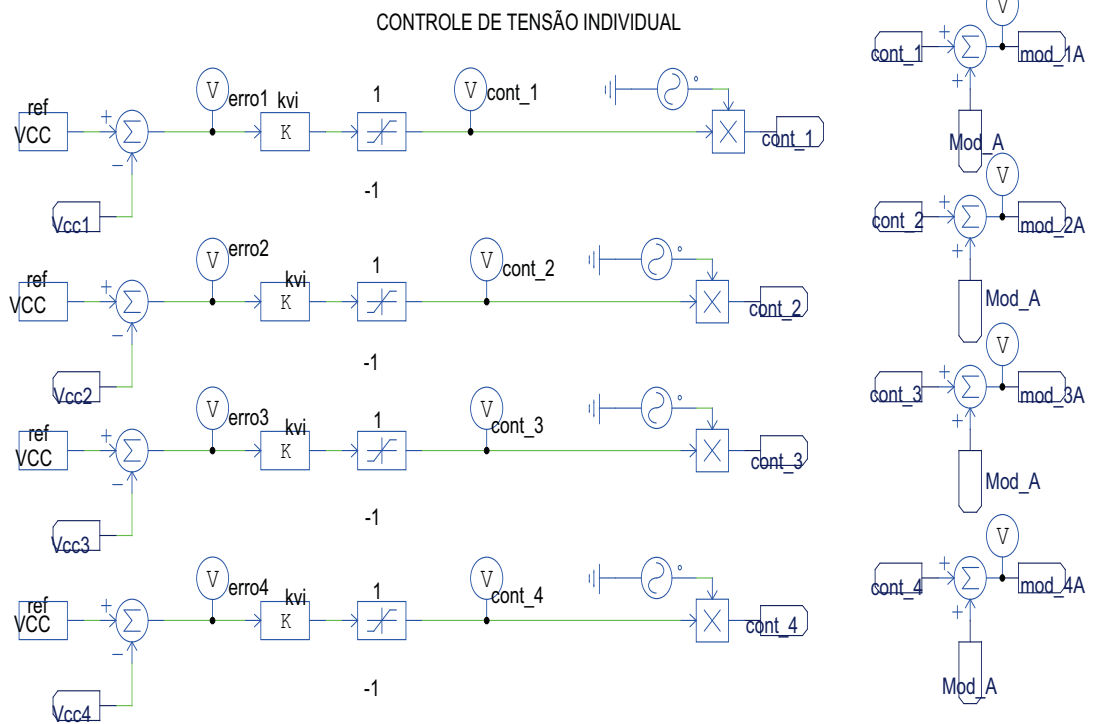
Para a simulação com 4 células, são 12 controles individuais.

Figura 31 – Somatório das tensões dos capacitores de cada células



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 32 – Controle de tensão individual fase A

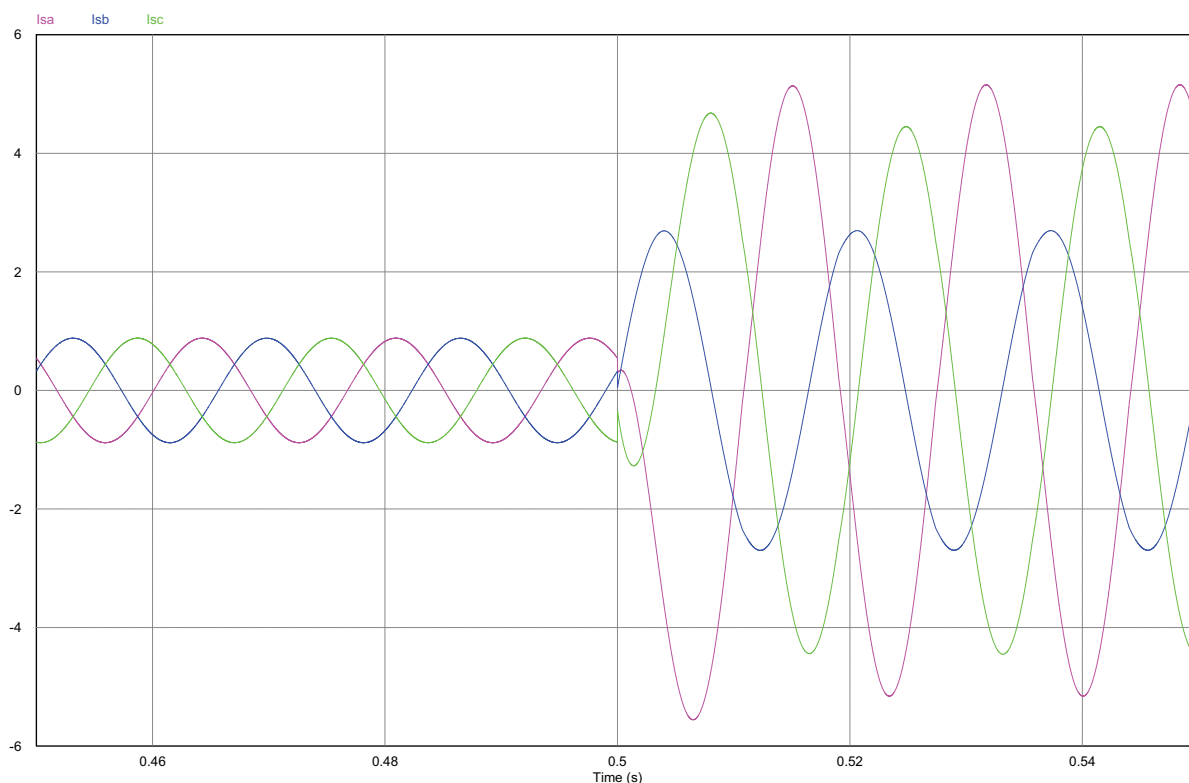


Fonte: Elaborado pela autora

4.3 SIMULAÇÃO REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Nesta seção apresenta a simulação do alimentador de 220 V com uma carga equilibrada e um degrau de carga desequilibrada e não linear. Na Figura 33 apresenta a corrente de rede equilibrada e em 0,5 s tem-se o degrau de carga desequilibrada e não linear. Nota-se que após o degrau as correntes de rede ficam com valores diferentes em cada fase e com defasagem diferente de 120° entre as fases.

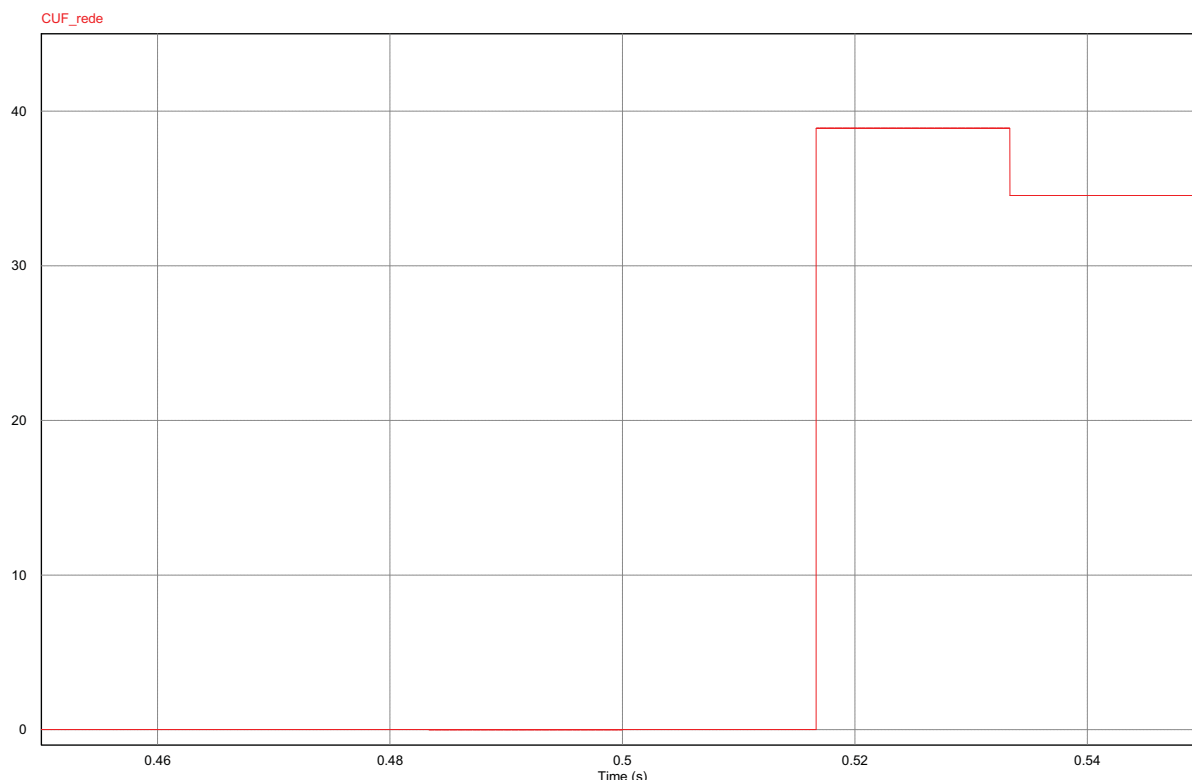
Figura 33 – Forma de onda da corrente de Rede com Degrau de Carga Desequilibrada e não linear



Fonte: Elaborado pela autora

Além disso, o CUF vai de zero para aproximadamente 35% quando ocorre o degrau de carga desequilibrada, como visto na Figura 34.

Figura 34 – Fator de desequilíbrio de corrente da rede com degrau de Carga Desequilibrada e não linear



Fonte: Elaborado pela autora

4.4 SIMULAÇÃO ICHB 4 CÉLULAS E POTÊNCIA NOMINAL 30 KVA E REDE DE BAIXA TENSÃO

Simulando o circuito iCHB com uma rede de baixa tensão, com os parâmetros da Tabela 1, com cargas lineares e equilibradas e um degrau com carga desequilibrada e não linear, tem-se a seguinte forma de onda da corrente da rede e o fator de desequilíbrio na Figura 35.

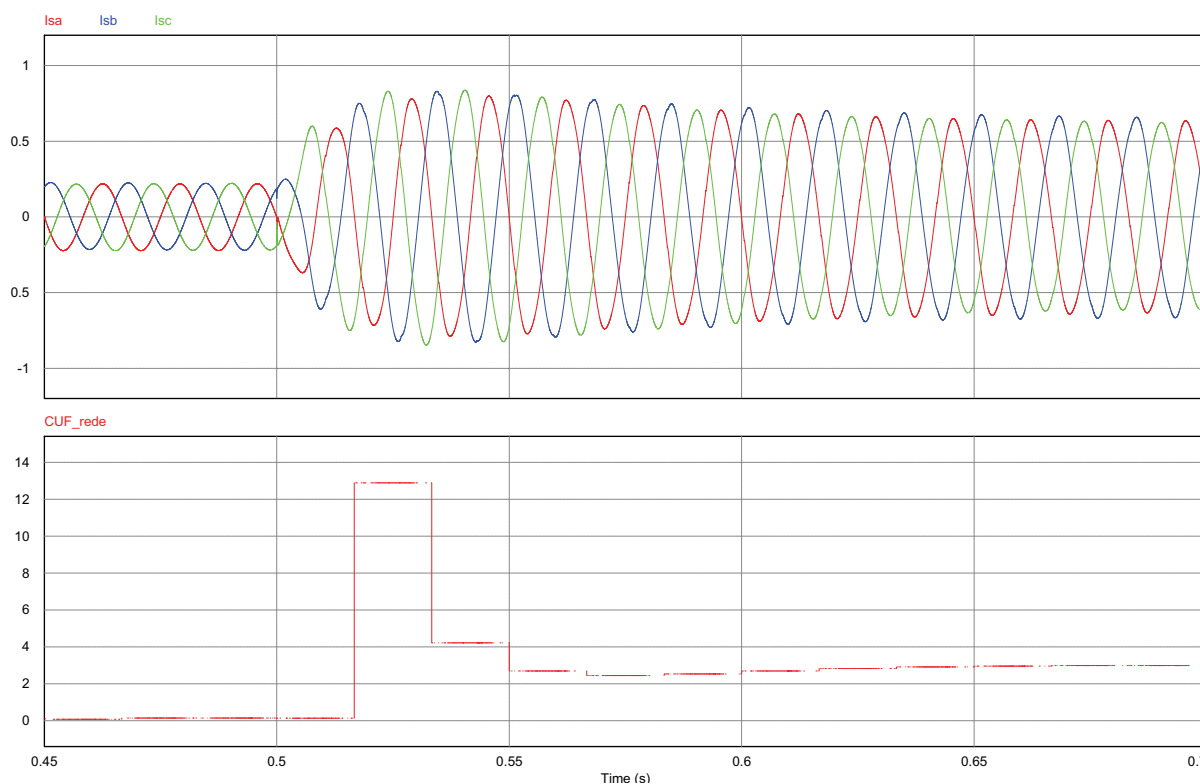
É notável a capacidade do iCHB compensar o desequilíbrio ocasionado pelas cargas desequilibradas e não linear adicionadas, ficando com um CUF de aproximadamente 2,7%, demorando aproximadamente 130 ms para estabilizar após o degrau. É possível verificar a regulação da corrente da rede através dos sinais de corrente em coordenadas síncronas, visto na Figura 36. As componentes do eixo direto i_{sd} e eixo de quadratura i_{sq} possuem pequenas ondulações, sendo predominante o valor médio.

Na Figura 37, é apresentado a resposta do controle de tensão total i_t e resposta do controle de corrente no eixo direto e quadratura, Hi_d e Hi_q .

A parcela que repõe a energia gasta na operação do iCHB é controlada pela malha de tensão total e sua ação de controle demora aproximadamente 130 ms para entrar em regime permanente. E a ação de controle de corrente que tem a parcela do controle de tensão total, também entra em regime permanente aproximadamente após 130 ms.

Na Figura 38 tem-se a resposta da ação de controle da corrente após a transformação $dq0$,

Figura 35 – Forma de onda da corrente da rede com degrau de carga desequilibrada e não linear



Fonte: Elaborado pela autora

ela será somada a resposta da ação de controle de tensão individual para compor a moduladora do chaveamento do conversor. Nota-se na neste forma de onda a presença de distorções vinda da comutação dos diodos da carga não linear.

Na Figura 39 tem-se a resposta do controle de tensão individual, parcela que é somada à resposta do controle de corrente.

E por fim, a Figura 40 apresenta a moduladora que será utilizada para modulação das chaves do conversor, com valor dentro dos limites de modulação de -1 V a 1 V, para que fique abaixo do valor máximo da portadora e ocorra a modulação correta.

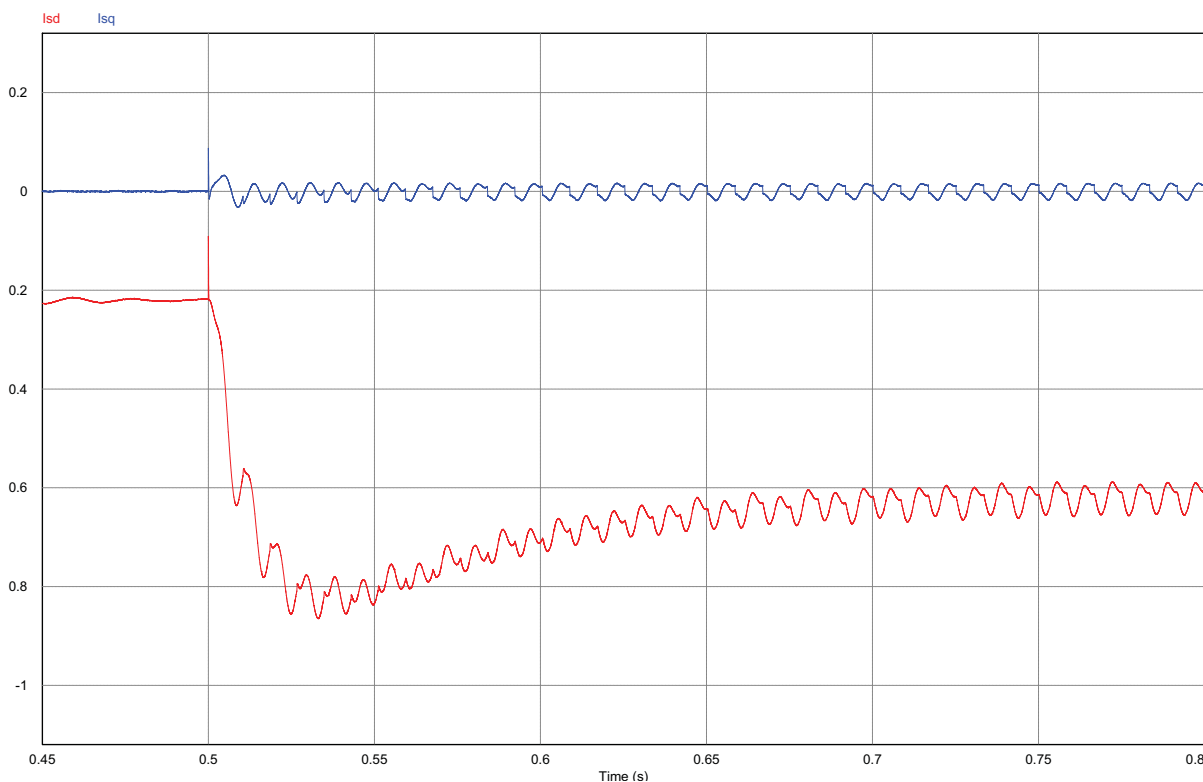
Com as formas de onda de controle da tensão individual é possível ver que as células superiores possuem um comportamento diferente das inferiores, por conta do indutor acoplado entre as fases nas células superiores.

As Figuras 41,43 e 42, apresentam as formas de onda da corrente na rede, na carga e no conversor, após o sensor de corrente, ou seja, para obter o valor real da corrente deve-se multiplicar o valor das formas de onda por 1000.

Ao observar as formas de onda da corrente da rede, da carga e do conversor, é notável que a somatória das correntes do conversor com a carga é igual a corrente da rede, confirmando o funcionamento do conversor para manter a corrente de rede sem distorções.

Para que ocorra a troca de energia entre os braços do conversor, é necessário uma parcela cc da corrente de circulação, apresentada na Figura 44, sendo os valores das parcelas cc igual

Figura 36 – Sinais de corrente da rede em coordenadas síncronas do eixo direto e de quadratura



Fonte: Elaborado pela autora

à 10,4 A; -4,9 A; -5,6 A. Porém, seu valor da parcela ca chega aproximadamente a 100 A, praticamente o dobro da corrente de saída do conversor.

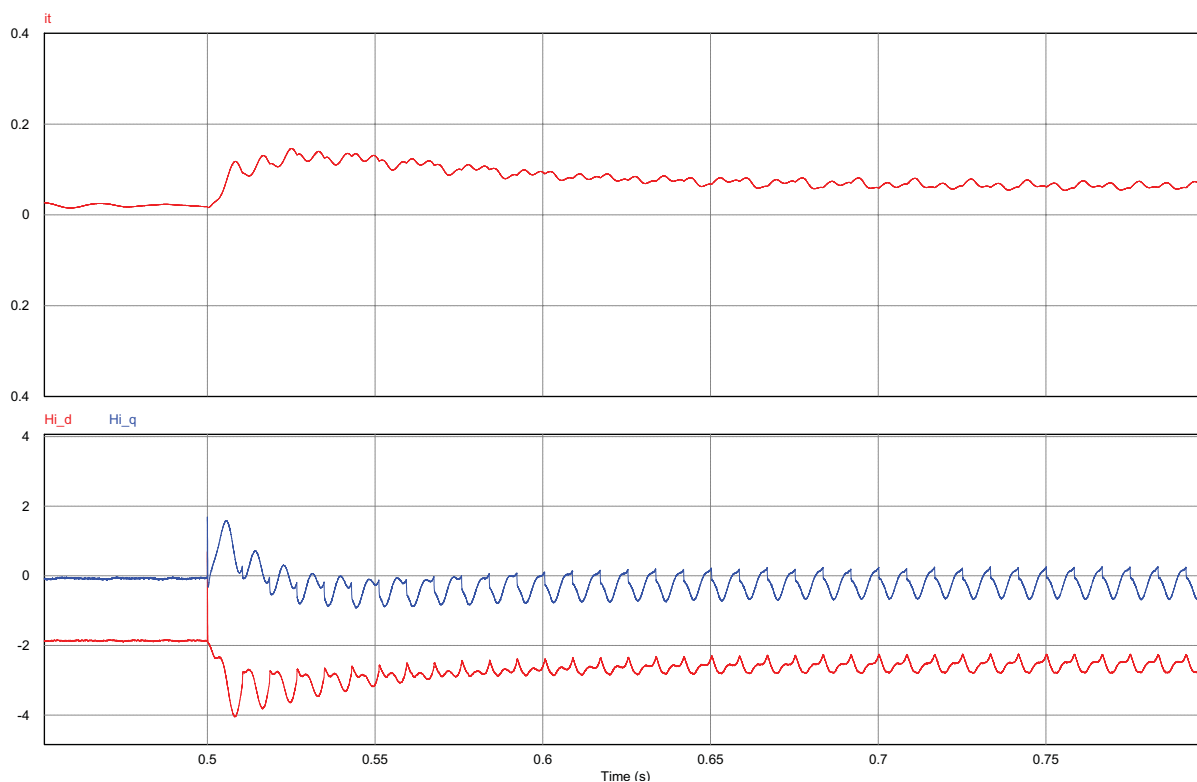
4.4.1 Resposta ao Degrau de carga

Nesta seção é avaliado o comportamento do sistema quando ocorre a mudança de cargas, em 1 s a carga da fase B é reduzida em 10 vezes. Na Figura 45 é possível ver que após os degraus de carga a corrente do alimentador permanece regulada, e o CUF após o segundo degrau vai para aproximadamente 4%, mas continuando abaixo do limite de 5%. As correntes do sistema são adequadas para que a corrente da rede permaneça sem distorções.

As tensões nos capacitores são forçadas a permanecer no valor de referência, mesmo após o degrau de carga. Na Figura 47 é apresentado as tensões dos capacitores e a tensão total durante o degrau, o comportamento da tensão da célula superior é distinto das células inferiores, ocasionando uma diferença no valor total da tensão do braço, porém, permanece muito próximo do valor de referência de 150 V. Antes do degrau tem-se um erro de aproximadamente 3% da tensão total, e após o degrau é reduzido para 2% de erro.

É possível verificar o comportamento do conversor durante o degrau com os sinais da corrente de rede em coordenadas síncronas, visto na Figura 48, onde o eixo de quadratura permanece próximo à zero e o eixo direto é adequado ao novo sistema, porém, permanecendo com baixa oscilação e valor médio sendo predominante, atingindo o equilíbrio novamente em

Figura 37 – Resposta do controle de tensão total e corrente



Fonte: Elaborado pela autora

menos de 100 ms.

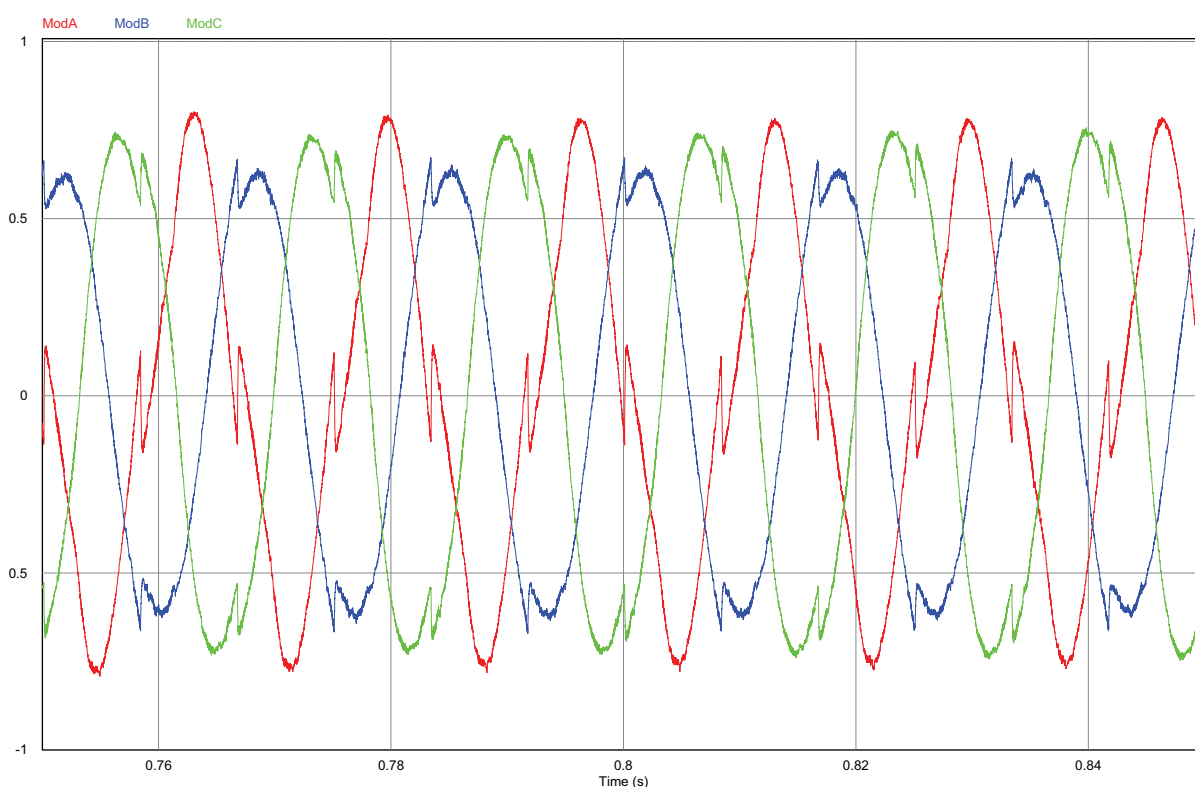
Na Figura 51 tem-se a corrente de circulação, que após o degrau, permanece com uma corrente de aproximadamente 100 A, sendo que no gráfico o valor está considerando o ganho do sensor de corrente. E seus valores da parcela são adequados para a nova carga, sendo os valores de 2 A; 4,4 A e -6,4 A.

Outros pontos a serem analisados são as respostas dos controles durante o degrau. Na Figura 52 tem-se o controle de corrente atingindo seu equilíbrio em menos de 100 ms, e na Figura 53 o controle de tensão total atingindo seu equilíbrio em menos de 200 ms.

E a Figura 54 apresenta o controle de tensão individual, onde o controle das células inferiores se adéquam para o novo sistema, e atingem o equilíbrio novamente após aproximadamente 500 ms. E o controle da célula superior tem pouca mudança, estabilizando também em aproximadamente 500 ms.

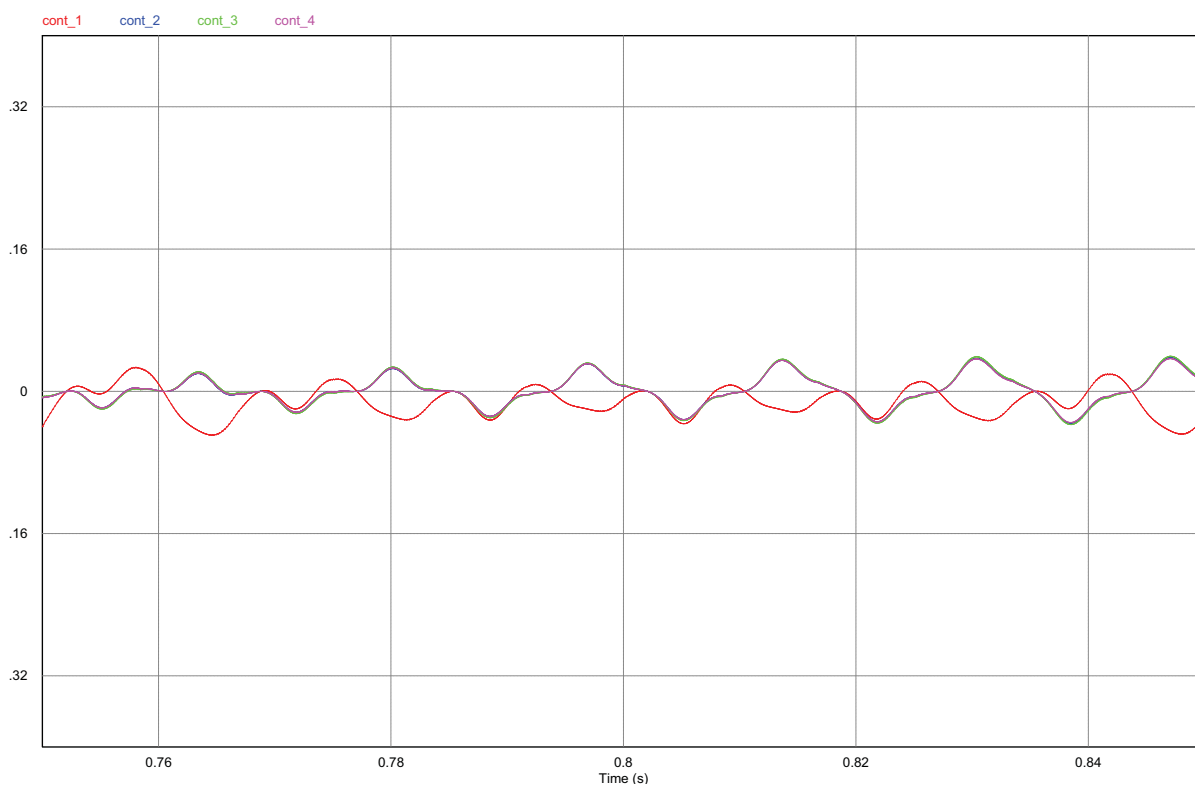
E por fim, o sinal da moduladora, resposta da soma do controle de corrente e tensão individual, tem poucas mudanças na sua amplitude, permanecendo dentro do limite de -1 V a 1 V.

Figura 38 – Formas de onda da resposta do controle de corrente com carga desequilibrada e não linear



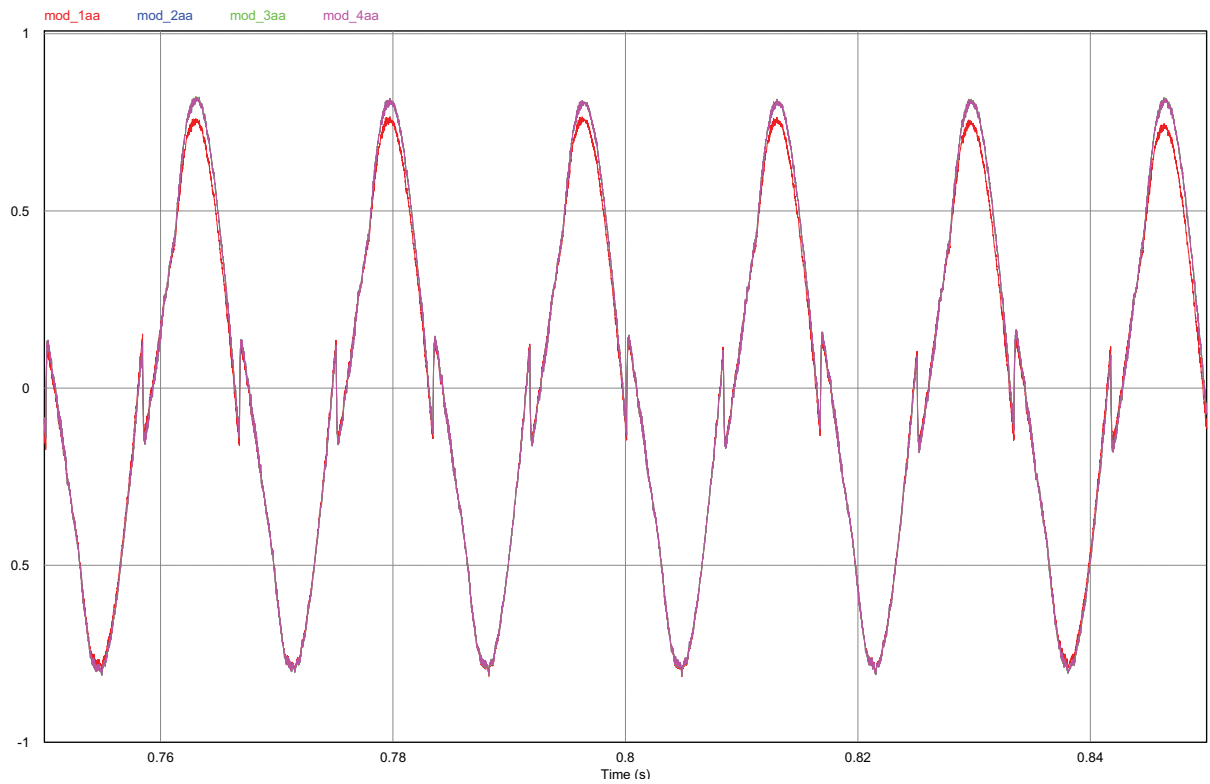
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 39 – Formas de onda da resposta do controle de tensão individual com carga desequilibrada e não linear



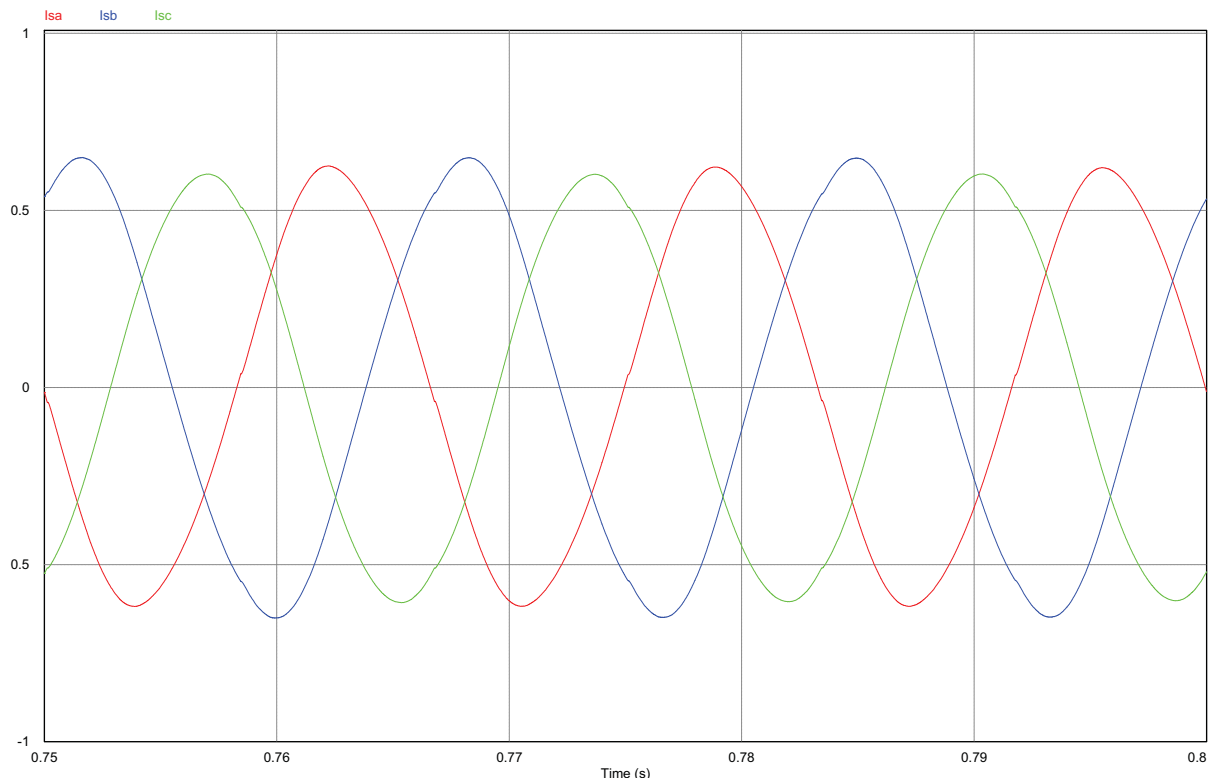
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 40 – Formas de onda da moduladora do chaveamento com carga desequilibrada e não linear



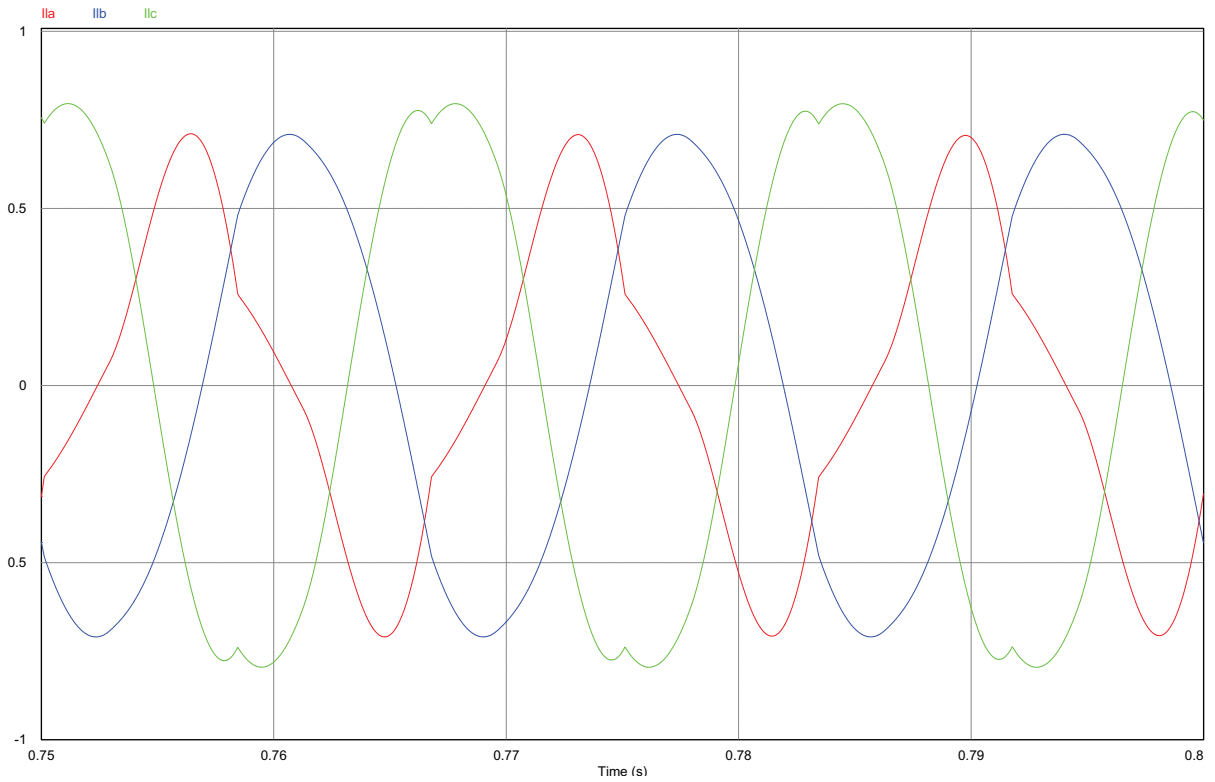
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 41 – Forma de onda da corrente da rede com carga desequilibrada e não linear



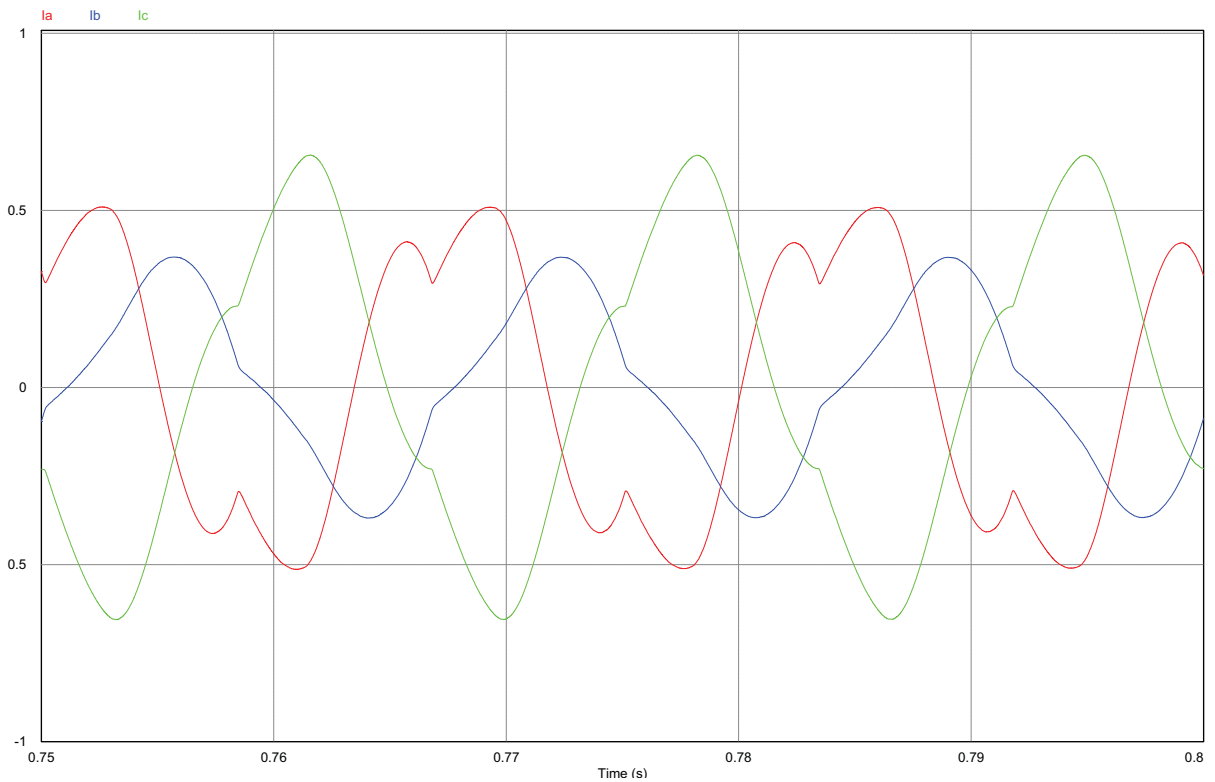
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 42 – Forma de onda da corrente de carga com carga desequilibrada e não linear



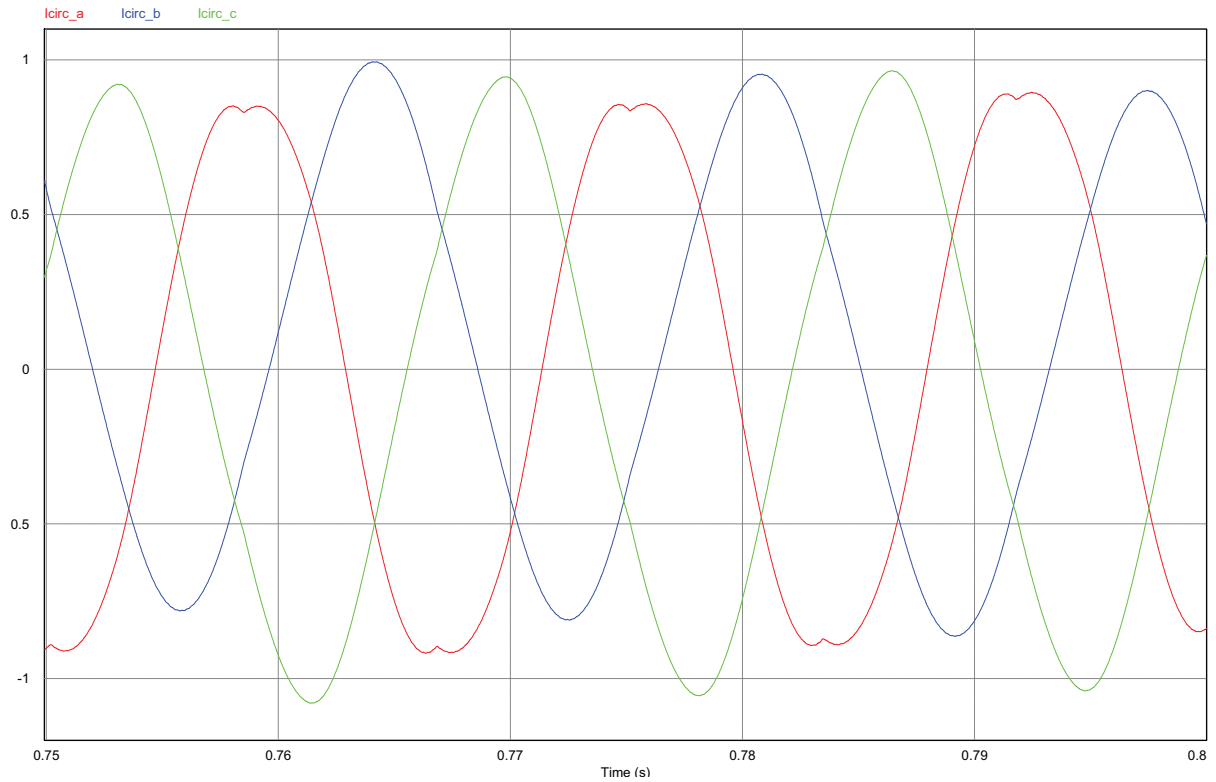
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 43 – Forma de onda da corrente na saída do conversor com carga desequilibrada e não linear



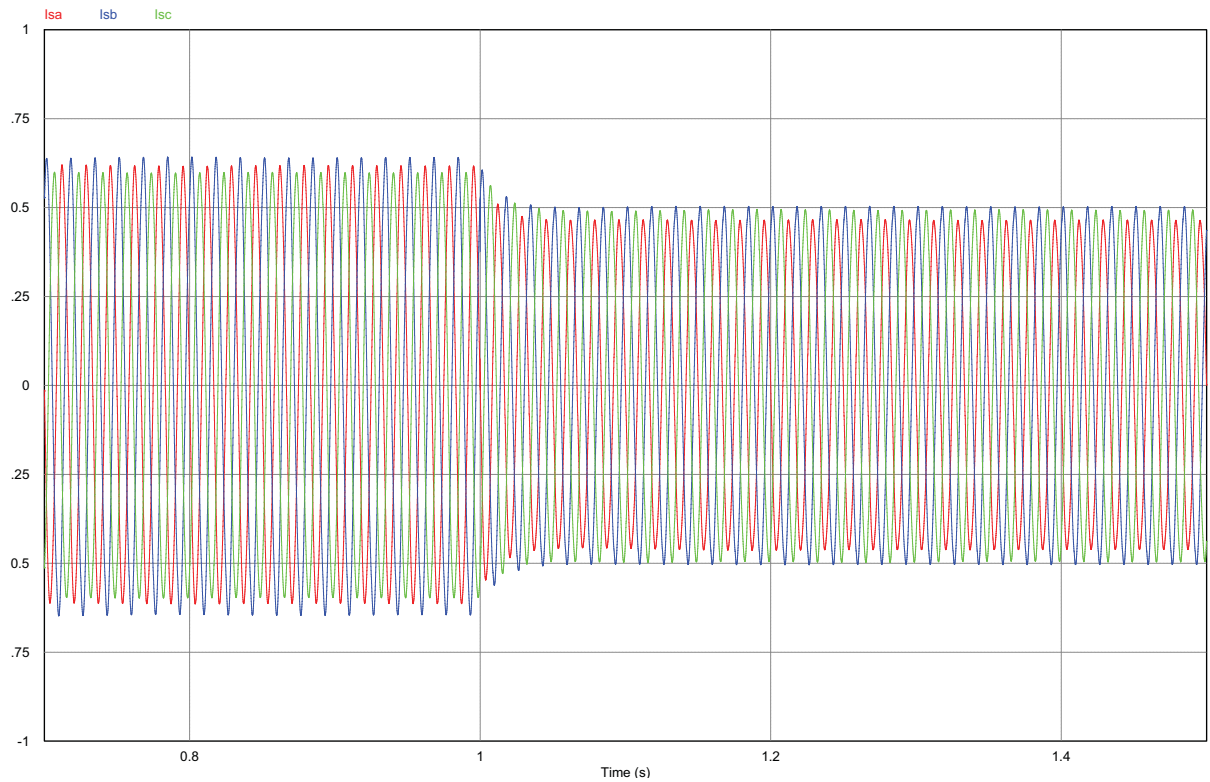
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 44 – Forma de onda da corrente de circulação com carga desequilibrada e não linear



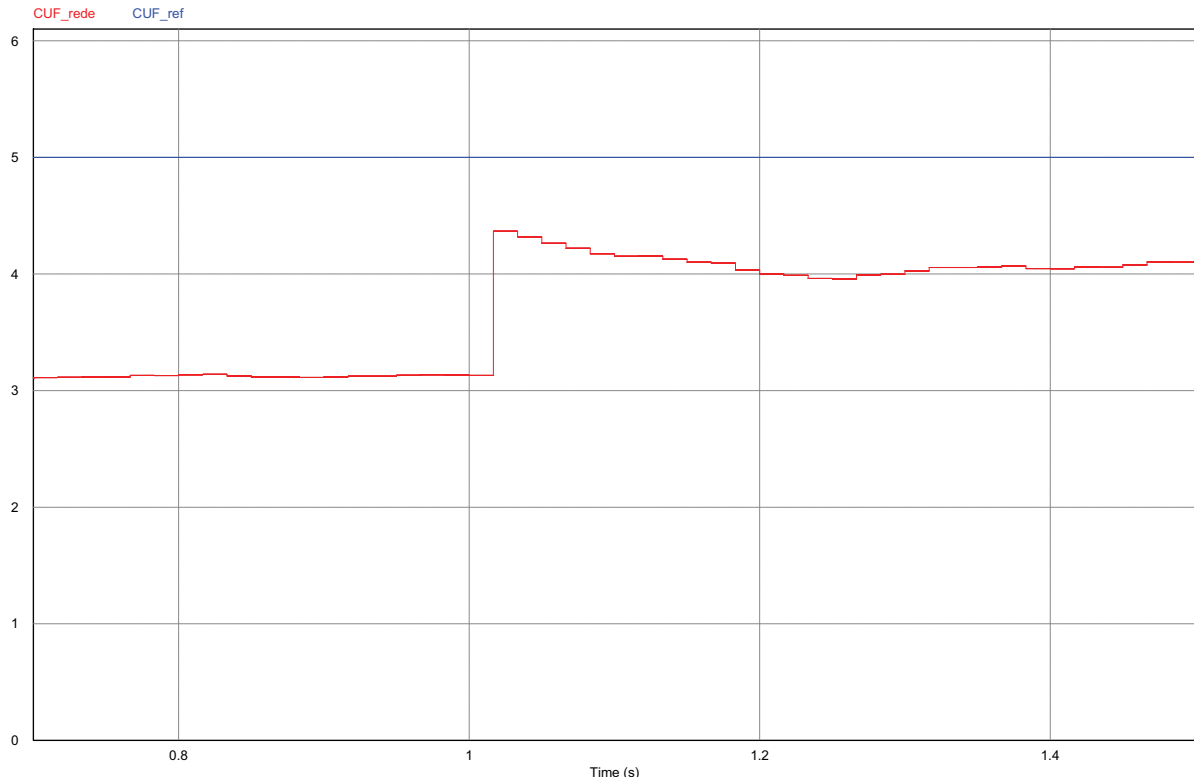
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 45 – Comportamento dinâmico da corrente de rede durante o degrau de carga



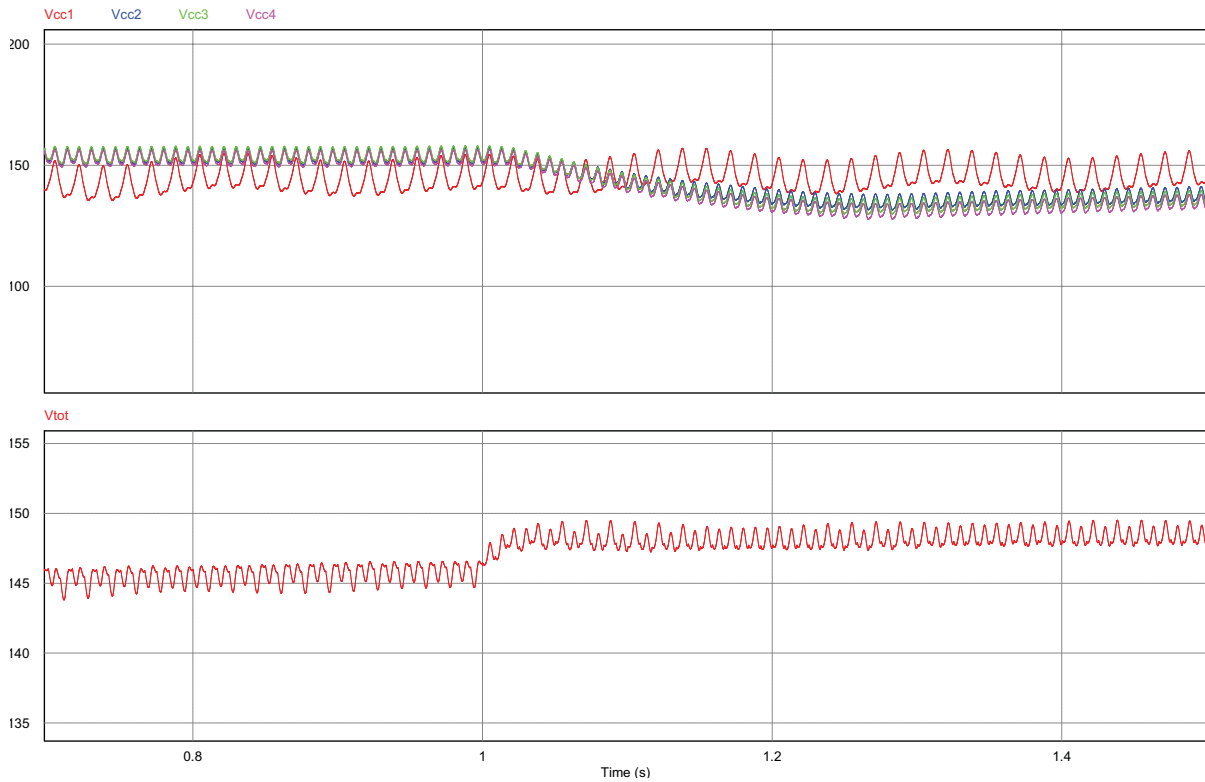
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 46 – Fator de desequilíbrio da corrente de rede durante o degrau de carga



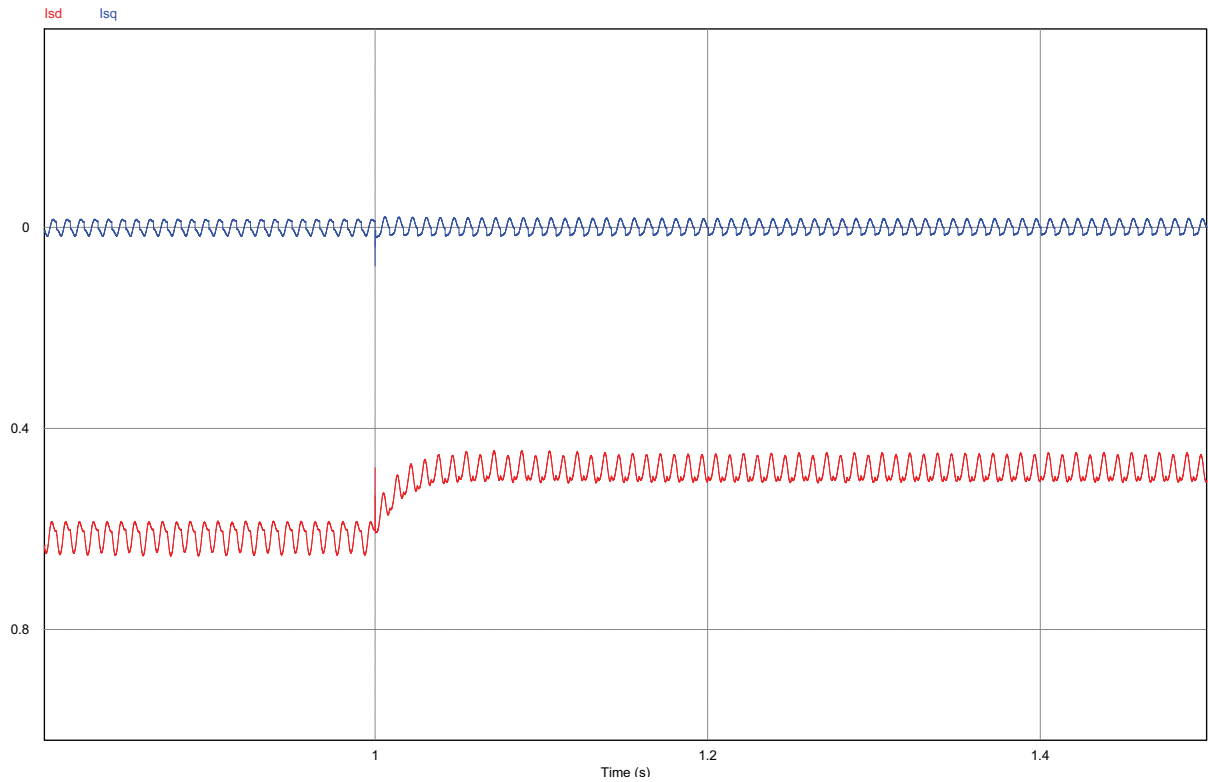
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 47 – Comportamento dinâmico das tensões individuais e total durante o degrau de carga



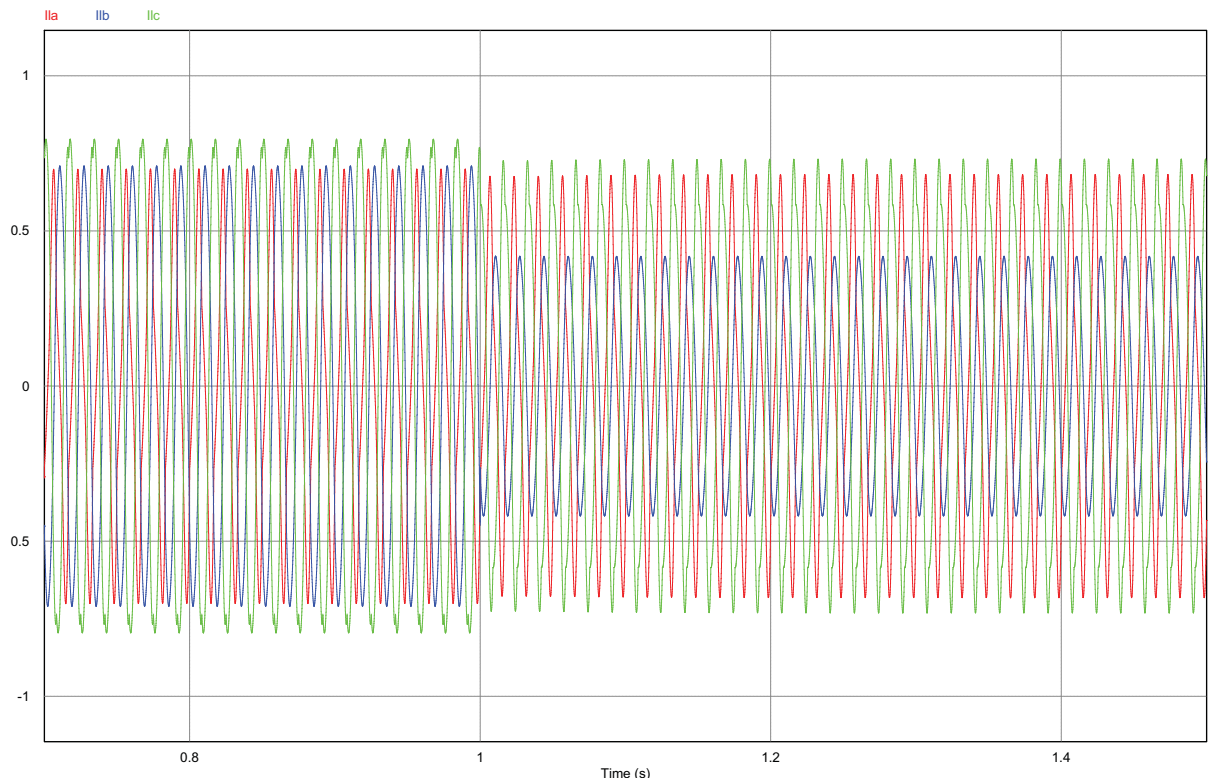
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 48 – Sinais de corrente da rede em coordenadas síncronas do eixo direto e de quadratura durante degrau de carga



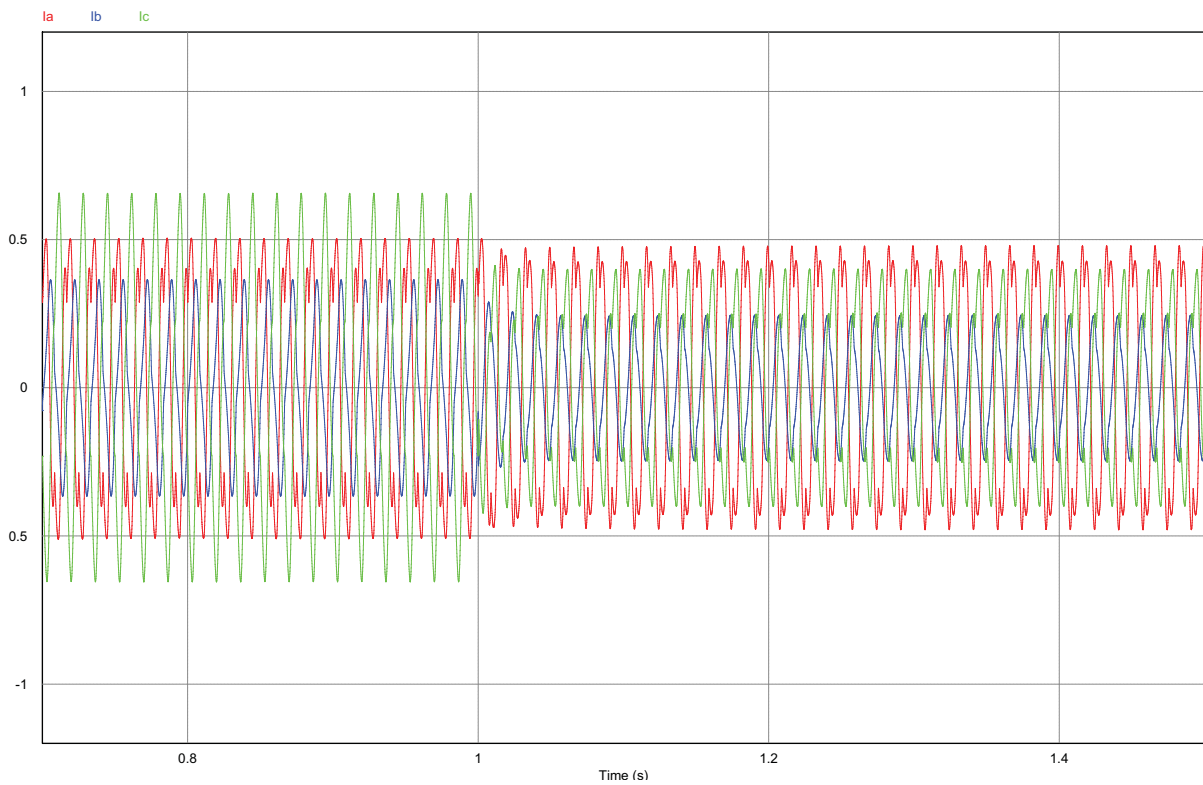
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 49 – Comportamento dinâmico da corrente de carga durante o degrau de carga



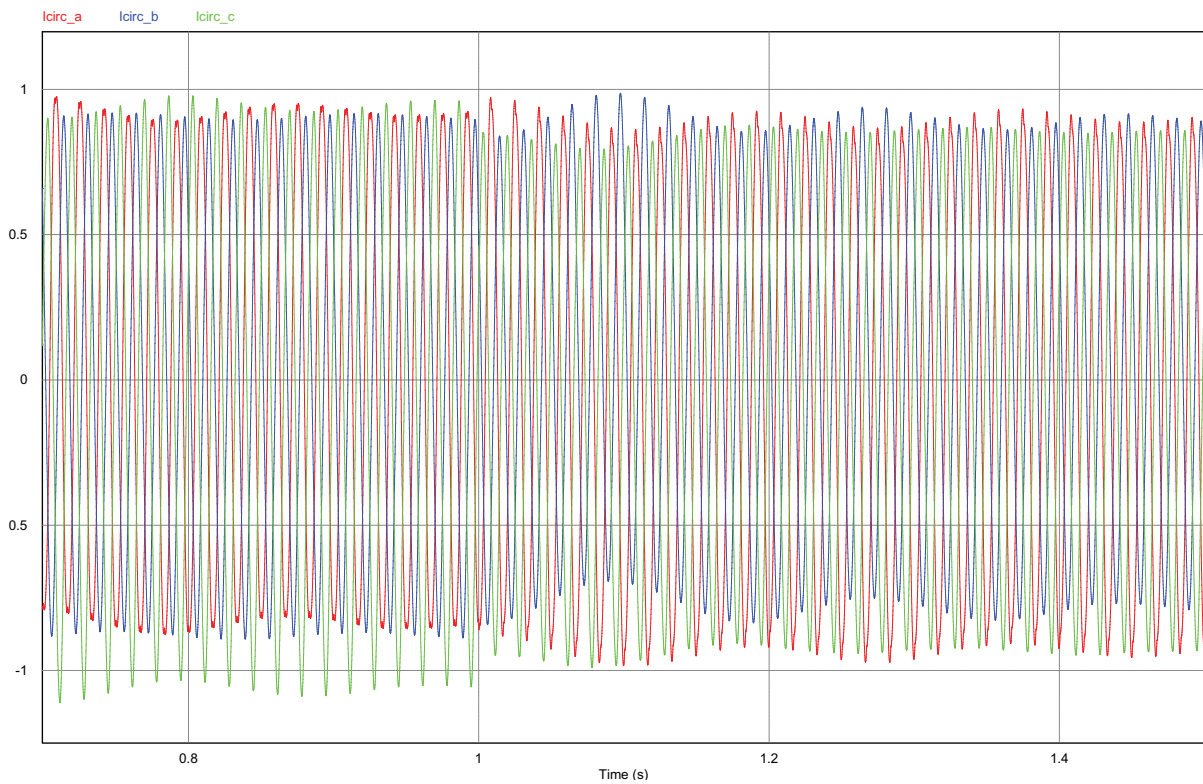
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 50 – Comportamento dinâmico da corrente do conversor durante o degrau de carga



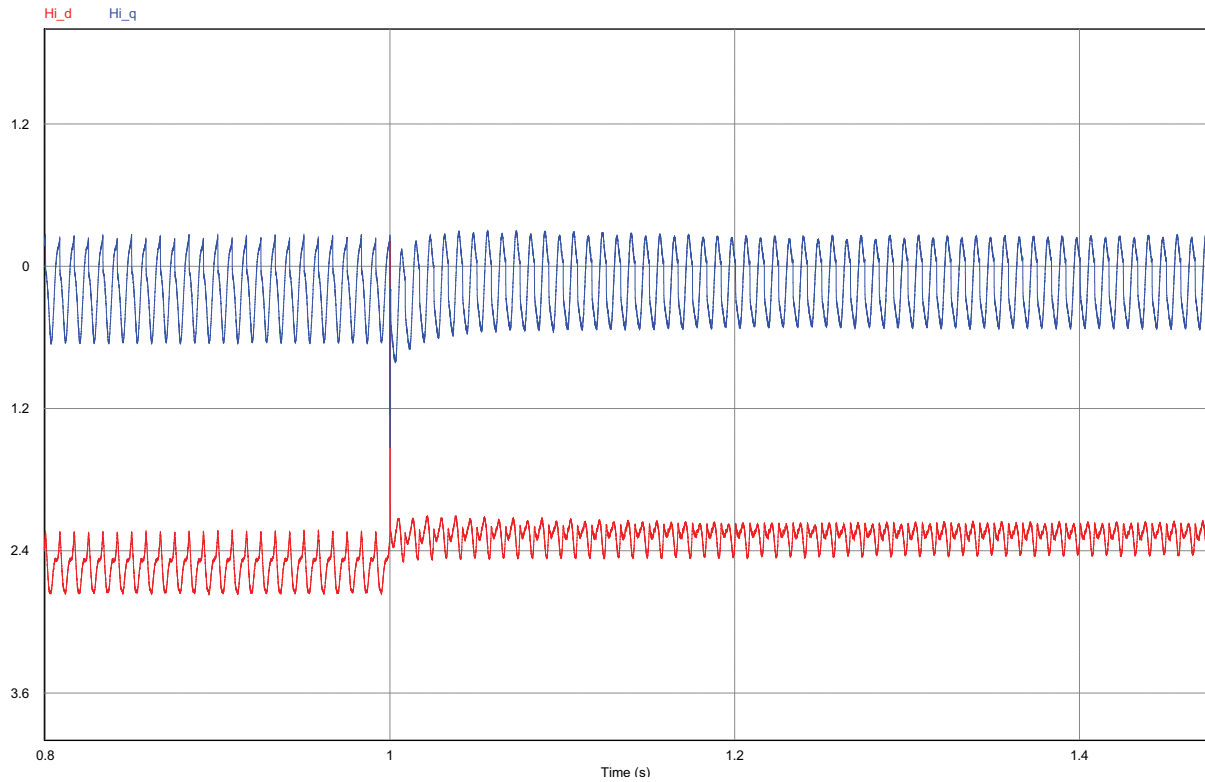
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 51 – Comportamento dinâmico da corrente de circulação durante o degrau de carga



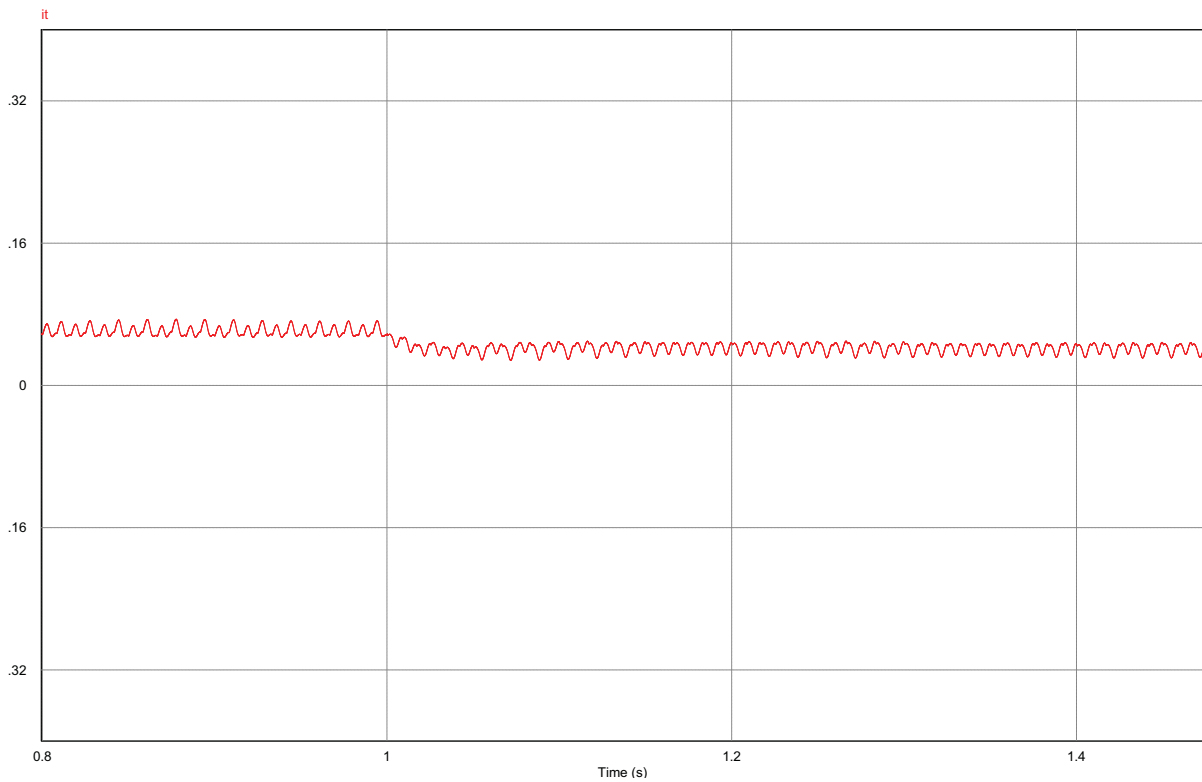
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 52 – Comportamento dinâmico do controle de corrente durante o degrau de carga



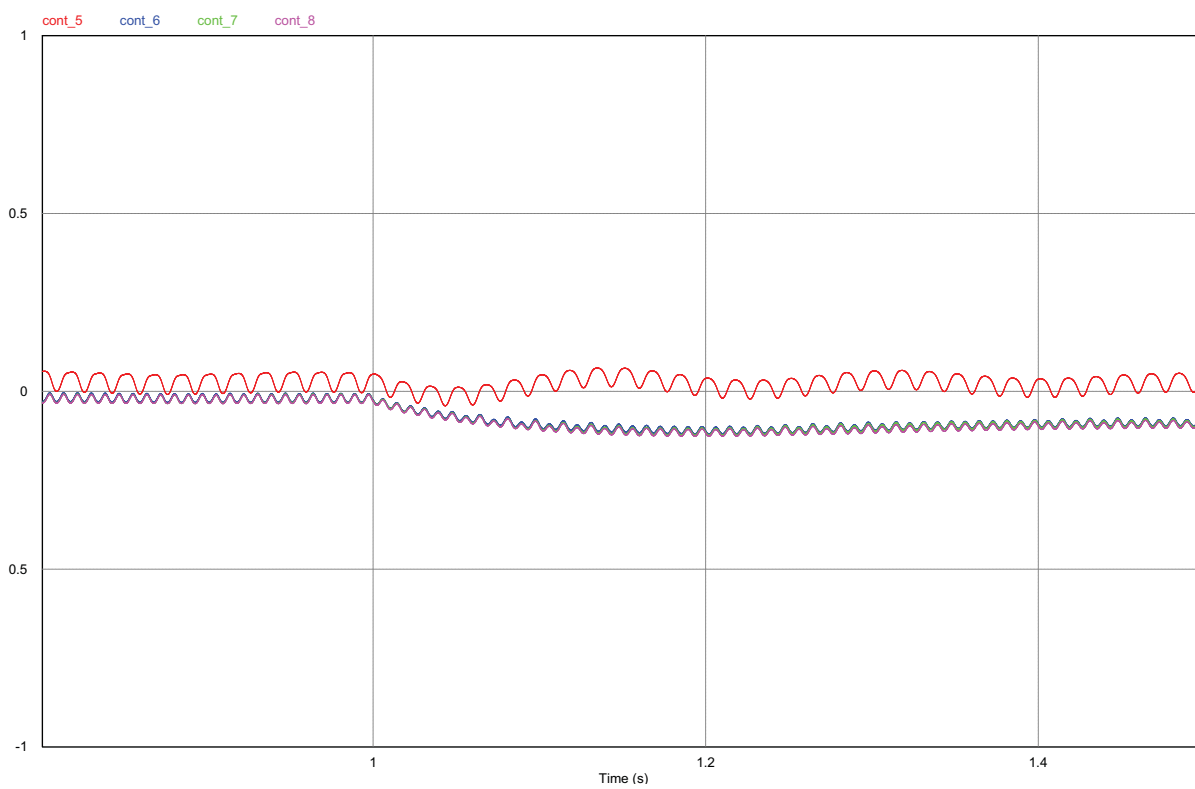
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 53 – Comportamento dinâmico do controle de tensão total durante o degrau de carga



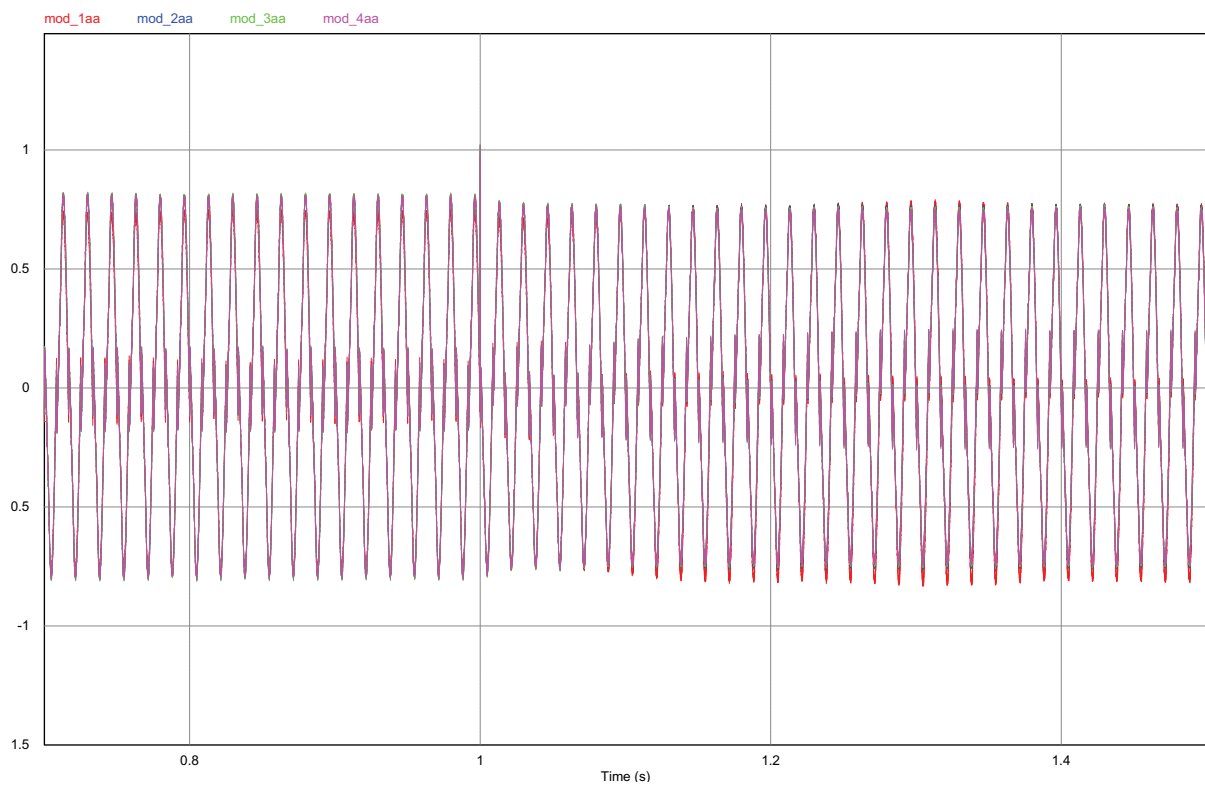
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 54 – Comportamento dinâmico do controle de tensão individual durante o degrau de carga



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 55 – Comportamento dinâmico da moduladora do chaveamento durante o degrau de carga



Fonte: Elaborado pela autora

4.5 COMPARATIVO PARÂMETROS DE QUALIDADE DE ENERGIA

Por fim, resumindo os resultados de parâmetros de qualidade durante os dois degraus de carga, obteve-se a Tabela 7. Nota-se que mesmo com as cargas fora dos limites das normas, os parâmetros de qualidade da rede manteve-se regulado e dentro dos limites das normas.

Tabela 7 – Tabela de comparação de parâmetros de qualidade de energia

		iCHB 4 células			
		Degrau 1		Degrau 2	
	fp	CUF	THD	CUF	THD
Fase A/B/C	$\leq 0,99$	3,1%	2,7/2,9/1,9%	4,1%	2,8/1,6/1,7%

Fonte: Elaborado pela autora

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou o estudo da topologia iCHB com 4 células, com aplicação em rede de baixa tensão. Devido o aumento dos distúrbios na rede energia elétrica, se faz necessário o estudo para soluções práticas e econômicas. Os conversores multiníveis estão ganhando atenção nos estudos relacionados à aplicações para regulação da rede de energia elétrica. Este trabalho apresenta a utilização do conversor modular multinível para rede de baixa tensão, mostrando sua capacidade de regulação da rede. Esta simulação foi feita em baixa tensão para que fosse comparada com o trabalho do (JÚNIOR, 2020) e, depois o objetivo era aumentar para média tensão, porém, não houve tempo hábil para fazer tal simulação.

Para a simulação foi utilizado o *software* PSIM, e foi simulado o conversor iCHB com 4 células, com controle analógico de corrente, tensão total e tensão individual, projetados no capítulo 4.

Com os resultados obtidos foi possível verificar a capacidade do conversor regular as correntes da rede com duas cargas diferentes, e permanecendo dentro das normas vigentes.

A maior dificuldade encontrada foi durante a simulação no PSIM, por se tratar de um conversor multinível, a simulação torna-se grande e mais complexa, assim, quando surgia algum erro, era necessário dedicar um bom tempo para encontrar a solução.

Um estudo que pode se seguir com este trabalho, é a aplicação do iCHB em uma rede de média tensão, assim aumentando a potência do conversor.

REFERÊNCIAS

- AKAGI, Hirofumi; YOSHII, Tsurugi. 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/AUGUST 2007. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>>. Acesso em: 26 jun. 2023. Citado na página 33.
- ANEEL - PRODIST Módulo 8. 2017.
 Url <https://antigo.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/Módulo8Revisao8/9c78cfab-a7d7-4066-b6ba-cfbda3058d19>. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 38.
- BATSCHAUER, Alessandro Luiz. **INVERSOR MULTINÍVEIS HÍBRIDO TRIFÁSICO BASEADO EM MÓDULOS MEIA-PONTE**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/95577>>. Acesso em: 09 fev. 2021. Citado na página 25.
- BIANCHIN ANDRÉ RUBENS ALMEIDA, Rogers Demonti Tarcísio Loddi Carlos Gabriel. Estudo sobre métodos de detecção de afundamentos de tensão e geração de referências para um restaurador dinâmico de tensão. **Programa de pesquisa e desenvolvimento da ANEEL**. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/266056315_Estudo_sobre_Metodos_de_Deteccao_de_Afundamentos_de_Tensao_e_Geracao_de_Referencias_para_um_Restaurador_Dinamico_de_Tensao>. Acesso em: 25 jun. 2023. Citado na página 30.
- BIANCHIN, Carlos Gabriel. Filtro ativo trifásico para qualidade de energia elétrica: compensação e balanceamento. **Paranaense Electric Company, COPEL**, 2015. Disponível em: <<http://www.mfap.com.br/pesquisa/arquivos/20090119100308-22222.pdf>>. Acesso em: 15 may, 2020. Citado na página 15.
- BRESSAN, Marcos Vinicius. **Inversor multinível híbrido baseado na cascata do conversor 3L-NPC e conversores meia ponte**. Dissertação (Mestrado) — Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2014. Acesso em: 10 fev. 2021. Citado na página 23.
- BRESSAN, Marcos Vinicius. **Conversor Multinível em Ponte Completa de Conversores com Capacitores Flutuantes**. Tese (Doutorado) — Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2019. Disponível em: <<http://sistemabu.udesc.br/pergamumweb/vinculos/000069/00006983.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2021. Citado 4 vezes nas páginas 22, 23, 24 e 25.
- CAVALIERE, Carlos André Carreiro. **ANALISE DE STATCOM OPERANDO EM SISTEMAS DESBALANCEADOS**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL, 2001. Disponível em: <<http://pee.ufrj.br/teses/textocompleto/2001074001.pdf>>. Acesso em: 26 June 2023. Citado na página 21.
- CUNICO, LUCAS M. **ESTUDO DO CONVERSOR MODULAR MULTINIVEL**. Dissertação (Mestrado) — UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC, Joinville, 2013. Disponível em: <<http://www.npee.joinville.br>>. Acesso em: 18 may 2023. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 23.
- DIAS, Josué. **CONDICIONADOR UNIFICADO DE QUALIDADE DE ENERGIA COM CONTROLE DIGITAL**. Dissertação (Mestrado) — UDESC CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT, UDESC - CCT - Joinville, 2010. Disponível em: <<http://www.npee.joinville.br>>. Acesso em: 16 may 2023. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 16.

ENERGETICA, Empresa de Pesquisa. **Atlas Eficiência Energética Brasil 2022**. 2022. Url<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-741/AtlasEficienciaEnergeticaBrasil2022.pdf>. Citado na página 11.

ENERGETICA, Empresa de Pesquisa. **Painel de Monitoramento do Consumo de Energia Elétrica**. 2023. Url<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/consumo-de-energia-eletrica>. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 11.

GUERRIERO M. COPPOLA, F. Napoli G. Brando A. Dannier D. Iannuzzi P.; DALIENTO, S. Three-phase pv chb inverter for a distributed power generation system. **Applied Sciences**, v. 6, n. 287, p. 1–15, 2016. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/journal/applsci>>. Acesso em: 18 may 2023. Citado na página 22.

HIROFUMI, Akagi. Classification, terminology, and application of the modular multilevel cascade converter (mmcc). **The 2010 International Power Electronics Conference**, Tokyo Institute of Technology, p. 508–515, 2010. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>>. Acesso em: 17 may 2023. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.

HIROFUMI, Akagi. Control and analysis of the modular multilevel cascade converter based on double-star chopper-cells (mmcc-dscc). **IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS**, Tokyo Institute of Technology, v. 26, n. 6, p. 1649–1658, 2011. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>>. Acesso em: 17 may 2023. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 23.

HIROFUMI, Akagi. Negative-sequence reactive-power control by a pwm statcom based on a modular multilevel cascade converter (mmcc-sdbc). **IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS**, Phoenix, AZ, v. 48, n. 2, p. 720–729, 2012. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>>. Acesso em: 17 may 2023. Citado na página 21.

JÚNIOR, RUBENS TADEU HOCK. **CONVERSOR CASCATA INTERCONECTADO PARA COMPENSAÇÃO DE CORRENTE EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO**. Tese (Doutorado) — Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2020. Acesso em: 09 fev. 2021. Citado 14 vezes nas páginas 12, 21, 23, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 38 e 60.

KARANKI NAGESH GEDDADA, Mahesh K. Mishra Srinivas Bhaskar; KUMAR, B. Kalyan. A dstatcom topology with reduced dc-link voltage rating for load compensation with nonstiff source. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS**, India, v. 26, n. 3, p. 1201–1211, March 2012. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>>. Acesso em: 23 may 2023. Citado na página 20.

MOAMAEI, H. Mahmoudi P.; AHMADI, R. Fault-tolerant operation of cascaded h-bridge inverters using one redundant cell. **Power and Energy Conference**, Illinois (PECI), p. 1–5, Feb. 2015. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>>. Acesso em: 18 may 2023. Citado na página 22.

NIEVES, M. et al. Enhanced control strategy for mmc-based statcom for unbalanced load compensation. **16th European Conference on Power Electronics and Applications**, Lappeenranta, Finlândia, p. 1–10, 2014. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>>. Acesso em: 17 may 2023. Citado na página 21.

PAULILO, Gilson. Capítulo iii - desequilíbrios de tensão. **Fascículo Qualidade de Energia**, p. 42–48, 2013. Disponível em: <https://www.osestoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2013/03/Ed86_fasc_qualidade_cap3.pdf>. Acesso em: 26 June 2023. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 37.

ROZANOV YURIY; RYVKIN, Sergey; et al. **Power Electronics Basics: Operating principles, design, formulas, and applications**. New York: CRC Press - Taylor & Francis Group, 2016. Citado na página 25.

VIATKIN, Aleksandr. **Development of a Test Bench for Multilevel Cascaded H-Bridge Converter with Self-Balancing Level Doubling Network**. Dissertação (Mestrado) — SCHOOL OF ENGINEERING AND ARCHITECTURE, 2017. Disponível em: <<https://amslaurea.unibo.it/14974/1/masterthesis.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.

WONG, Chi-Seng Lam e Man-Chung. **Design and Control of Hybrid Active Power Filters**. Springer Heidelberg New York Dordrecht London: Springer, 2014. Disponível em: <<https://www.springer.com/series/10059>>. Acesso em: 16 May 2023. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 15.

Z., Peng Fang; WANG, Jin. A universal statcom with delta-connected cascade multilevel inverter. **35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference**, Michigan State University-2120 Engineering Building, East Lansing, Anchen, Germany, p. 3529–3533, 2004. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>>. Acesso em: 16 May 2023. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 23.

ANEXO A – CIRCUITO DE POTÊNCIA COMPLETO DO ICHB COM 4 CÉLULAS

