



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

MONIQUE COSTA DE LIMA

**Ensaio de magnetização e curto-circuito em um
protótipo de Limitador de Corrente de Núcleo
Saturado**

NITERÓI

2021

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

MONIQUE COSTA DE LIMA

Ensaio de magnetização e curto-circuito em um protótipo de Limitador de Corrente de Núcleo Saturado

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações. Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Orientador:
Guilherme Gonçalves Sotelo

Co-orientador:
Felipe Sass

NITERÓI

2021

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

L732e Lima, Monique Costa de
Ensaio de magnetização e curto-circuito em um protótipo de Limitador de Corrente de Núcleo Saturado / Monique Costa de Lima ; Guilherme Gonçalves Sotelo, orientador ; Felipe Sass, coorientador. Niterói, 2021.
76 f. : il.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2021.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PPGEET.2021.m.15903505708>

1. Limitador de corrente de curto-circuito de núcleo saturado. 2. Ensaio de caracterização magnética. 3. Ensaio de curto-circuito. 4. Produção intelectual. I. Sotelo, Guilherme Gonçalves, orientador. II. Sass, Felipe, coorientador. III. Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDD -

Bibliotecário responsável: Sandra Lopes Coelho - CRB7/3389

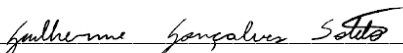
MONIQUE COSTA DE LIMA

**ENSAIOS DE MAGNETIZAÇÃO E CURTO-CIRCUITO EM UM
PROTÓTIPO DE LIMITADOR DE CORRENTE DE NÚCLEO
SATURADO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações. Área de concentração Sistemas de Energia Elétrica.

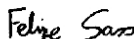
Aprovada em: 10 de fevereiro de 2021

BANCA EXAMINADORA



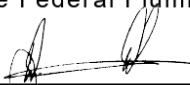
Prof. Dr. Guilherme Gonçalves Sotelo - Orientador

Universidade Federal Fluminense - UFF



Prof. Dr. Felipe Sass - Orientador

Universidade Federal Fluminense - UFF



Prof. Dr. Daniel Henrique Nogueira Dias

Universidade Federal Fluminense - UFF



Prof. Dr. Rubens de Andrade Junior

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Niterói, RJ
2021

Ao que realmente importa, minha família !

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus, pois a pandemia não foi fácil para ninguém e Ele me deu não só forças, mas me mostrou o verdadeiro caminho que deveria seguir. Depois agradeço a minha família por estar sempre comigo mesmo com todo o estresse do mestrado e da vida. Do fundo do meu coração agradeço aos meus orientadores por terem sido pilares primordiais para o andamento deste trabalho e meu desenvolvimento profissional e acadêmico. E por fim mas não menos importante agradeço aos meus amados amigos Aleça, André, Leandro, Keyla, Carol, Eliaquim, do grupo da carona Caxias - Niterói e ao NITEE por terem virado minha segunda família !

Resumo

Os avanços tecnológicos proporcionaram inúmeras melhorias para a população de modo geral, porém ocasionaram um aumento significativo na demanda por energia elétrica. Acrescendo isso ao fato de que a expansão do sistema elétrico acarretou num aumento considerável do nível de curto-circuito, os equipamentos de proteção presentes no sistema vêm sendo superados, criando uma preocupação para as distribuidoras e comercializadoras de energia. Com isso, os limitadores de corrente de curto-circuito (LCCs) surgem como equipamentos de proteção auxiliares sendo uma possível solução para mitigar esses problemas. Dentre os diversos tipos de LCC estudados, pode-se destacar o de núcleo saturado devido a sua rápida recuperação após uma falta e seu princípio de funcionamento tem como base o comportamento dinâmico dos seus núcleos ferromagnéticos visto as características magnéticas de saturação dos mesmos. O presente trabalho visa estudar através da realização de ensaios de caracterização e aplicação de curto-circuito monofásico num protótipo de limitador de corrente de curto-circuito de núcleo saturado (LCC-NS). Com base nos resultados pôde-se observar que ao ligar este dispositivo de modo monofásico ou trifásico seus níveis de limitação tanto no primeiro pico quanto no regime de curto da corrente do sistema estão na mesma ordem de grandeza. Um ponto interessante é com relação a sequência de fase da rede, dependendo da fase em que o evento de curto ocorresse a fase subsequente, tendo em vista a sequência, sofreu distorção em sua tensão. Análises harmônicas também puderam ser realizadas a fim de enriquecer o estudo para um melhor conhecimento deste protótipo.

Palavras-chave: Limitador de corrente de curto-circuito, núcleo ferromagnético saturado, ensaio de caracterização, ensaio com aplicação de falta.

Abstract

Technological advances have provided numerous improvements for the population, but have caused a significant increase in electricity demand. Adding the fact that electrical system expansion has resulted in a considerable increase in the level of the short circuit, the protective equipment present in system has been overcome, creating a concern for energy distributors and traders. As a result, fault current limiters (FCLs) appear as auxiliary protective equipment and are a possible solution to mitigate these problems. Among the various types of FCL studied, the saturated iron core can stand out due to its rapid recovery after a fault and the operating principle is based on the dynamic behavior of its ferromagnetic cores, given their magnetic saturation characteristics. The present work aims to study the performance of characterization tests and the application of a single-phase fault in the prototype of saturated iron core fault current limiter (SIC-FCL). Based on the results, could be observed that when connecting this device in a single-phase or three-phase way, its limiting levels both in the first peak and in the short circuit current of the system are in the same order of magnitude. A relevant point is related of the network's phase sequence, depending on the phase in which the short event occurred, the consecutive phase of the sequence, suffered distortion in its voltage. Harmonic analyzes also could be performed to enrich the study for a better understanding of this prototype.

Keywords: Fault current limiter, saturated iron cores, iron cores characterization test, fault test.

Lista de Figuras

2.1	Protótipo desenvolvido por Raju, Parton e Bartram.	7
2.2	Limitador de corrente de curto-circuito de núcleo saturado.	8
2.3	Exemplos de LCC-NS na literatura.	10
2.4	Protótipo de LCCS-NS de 35 kV instalado pela Innopower na China. . . .	11
2.5	Protótipo de LCCS-NS de 220 kV instalado pela Innopower na subestação de Shigezhuang em Tianjin, China.	12
2.6	Protótipo de LCCS-NS de 15 kV instalado pela Zenergy Power.	13
2.7	Protótipo da empresa GridON instalado no Reino Unido.	14
3.1	Protótipo de LCC-NS estudado.	16
3.2	Esquemático monofásico do LCC-NS. Os enrolamentos CA e o fluxo magnético gerado por eles foram representados em preto. O enrolamento CC e o fluxo magnético gerado por eles foram representados em amarelo.	17
3.3	Esquemático do ensaio de caracterização por fase.	19
3.4	Foto da realização do ensaio de caracterização por fase.	21
3.5	Ensaio realizado para a obtenção da curva de indutância do enrolamento CA.	22
3.6	Curva de excitação das fases A, B e C.	23
3.7	Curva BxH das fases A, B e C.	23
3.8	Curva $\mu_{relativo}$ das fases A, B e C.	24
3.9	Curva Indutância da fase A.	25
3.10	Circuito sem o LCC-NS.	26
3.11	Esquemático do ensaio de curto-circuito com ligação monofásica do LCC-NS.	27
3.12	Foto do ensaio de curto com a ligação trifásica do protótipo.	28

4.1	Correntes CA prospectiva x limitada do sistema com curto na fase A. . . .	31
4.2	Correntes CC com curto na fase A.	32
4.3	Tensões CA com curto na fase A.	32
4.4	Zoom das tensões CA no curto na fase A.	33
4.5	Tensões CA prospectiva x limitada com curto na fase A.	34
4.6	Correntes CA prospectiva x limitada do sistema com curto na fase B. . . .	34
4.7	Correntes CC com curto na fase B.	35
4.8	Tensões CA com curto na fase B.	35
4.9	Zoom das tensões CA com curto na fase B.	36
4.10	Tensões CA prospectiva x limitada com curto na fase B.	36
4.11	Correntes CA prospectiva x limitada do sistema com curto na fase C. . . .	37
4.12	Correntes CC com curto na fase C.	38
4.13	Tensões CA curto na fase C.	38
4.14	Zoom das tensões CA no curto na fase C.	39
4.15	Tensões CA prospectiva x limitada com curto na fase C.	39
4.16	Comparação entre as fases das correntes limitadas com ligação monofásica do LCC-NS.	40
4.17	Correntes CA do sistema com curto na fase A.	41
4.18	Correntes e tensão CC com curto na fase A.	42
4.19	Tensão nos terminais do LCC-NS com curto na fase A.	42
4.20	Tensões CA com curto na fase A.	43
4.21	Zoom das tensões CA durante o curto na fase A.	43
4.22	Correntes CA do sistema com curto na fase B.	44
4.23	Correntes e tensão CC com curto na fase B.	44
4.24	Tensão nos terminais do LCC-NS com curto na fase B.	45
4.25	Tensões CA com curto na fase B.	45

4.26	Zoom das tensões CA durante o curto na fase B.	46
4.27	Correntes CA do sistema com curto na fase C.	46
4.28	Correntes e tensão CC com curto na fase C.	47
4.29	Tensão nos terminais do LCC-NS com curto na fase C.	47
4.30	Tensões CA com curto na fase C.	48
4.31	Zoom das tensões CA durante o curto na fase C.	48
4.32	Comparação das correntes limitadas.	49

Lista de Tabelas

4.1	Tabela comparativa dos resultados das correntes obtidos	49
4.2	Espectros harmônicos da corrente com a Ligação monofásica do LCC-NS e curto nas fases A, B e C	51
4.3	Espectros harmônicos da corrente nas fases A, B e C com curto na fase A .	52
4.4	Espectros harmônicos da corrente nas fases A, B e C com curto na fase B .	53
4.5	Espectros harmônicos da corrente nas fases A, B e C com curto na fase C .	53

Lista de Abreviaturas e Siglas

LCCs	<i>Limitadores de Corrente de Curtos-circuitos</i>	1
LCC-NS	<i>Limitador de Corrente de Curto-circuito de Núcleo Saturado</i>	1
DHT	<i>Distorção Harmônica Total</i>	2
LCC	<i>Limitador de Corrente de Curto-circuito</i>	4
LCCSs	<i>Limitadores de Corrente de Curto-circuito Supercondutores</i>	5
LCCHs	<i>Limitadores de Corrente de Curto-circuito Híbridos</i>	6
CC	<i>Corrente Contínua</i>	6
CA	<i>Corrente Alternada</i>	7

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	2
1.2	Contribuições deste trabalho	2
1.3	Estrutura da dissertação	3
2	Estado da arte	4
2.1	Limitadores de corrente de curto-circuito	4
2.2	LCC do tipo Núcleo Saturado	6
2.2.1	Protótipos de LCC-NS instalados em campo	10
3	Aparatos e procedimentos experimentais	15
3.1	Protótipo de LCC-NS	15
3.2	Procedimento experimental	18
3.2.1	Ensaio de Caracterização	19
3.2.1.1	Resultados dos Ensaios de caracterização	22
3.2.2	Ensaios de Curto-circuito	25
3.2.2.1	Ligação Monofásica	26
3.2.2.2	Ligação Trifásica	27
4	Resultados e discussões dos ensaios de curto-circuito	30
4.1	Ligação Monofásica	31
4.2	Ligação Trifásica	40
4.3	Resumo dos resultados	49

4.4	Análises da Distorção Harmônica	50
5	Conclusões e trabalhos futuros	54
5.1	Trabalhos futuros	55
	Referências	56

Capítulo 1

Introdução

Os níveis de curto-circuito dos sistemas elétricos de energia tiveram um grande aumento nos últimos anos [1, 2, 3, 4, 5]. Um dos principais motivos é a introdução da Geração Distribuída, que levou a redução da distância entre a ocorrência do defeito e a geração, reduzindo assim a impedância vista pela fonte. Esse problema relatado leva a aparição de correntes de curto-circuitos com magnitudes acima da capacidade máxima de proteção da rede. Como consequência tem-se a superação de diversas subestações existentes, pois algumas destas já encontram-se em operação há muitas décadas. Possíveis soluções para este problema são a construção de novas subestações ou a troca dos equipamentos instalados. Todavia, estas soluções nem sempre são viáveis economicamente.

Uma alternativa para reduzir a sobrecorrente durante um defeito é o emprego de *Limitadores de Corrente de Curtos-circuitos* (LCCs). Atualmente, as soluções comerciais de LCCs são bastante limitadas, se restringindo a: reatores de núcleo de ar, transformadores de alta impedância, LCCs pirotécnicos e resistores de aterramento para transformadores. Todas essas soluções apresentam limitações operacionais ou causam outros problemas no sistema. A literatura apresenta diversos equipamentos não comerciais, dentre os quais o *Limitador de Corrente de Curto-circuito de Núcleo Saturado* (LCC-NS) representa uma solução promissora para mitigar os possíveis danos da ocorrência de curtos-circuitos. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo estudar um protótipo de bancada de LCC-NS através da realização de diversos ensaios no mesmo. Este protótipo foi concebido e construído num trabalho anterior [6], e a presente dissertação visa dar continuidade ao desenvolvimento desta tecnologia em nível nacional.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal a realização de ensaios em um protótipo de LCC-NS, a fim de uma melhor compreensão e estudo deste dispositivo. A partir do aprendizado com a observação e interpretação dos resultados obtidos, novas análises poderão ser desenvolvidas e melhorias poderão ser propostas. De modo a alcançar o objetivo esperado, algumas etapas são necessárias:

- Execução de ensaios, sendo estes primeiramente de caracterização dos núcleos ferromagnéticos do limitador a fim de verificar se todos os núcleos e enrolamentos encontravam-se íntegros antes de dar prosseguimento aos ensaios com aplicação de curto-circuito;
- Montagem de um sistema de testes para aplicação de curto-circuito com o protótipo alimentado de forma monofásica e posteriormente trifásica, de modo a aplicar a mesma falta em todos os ensaios a fim de analisar possíveis divergências de redução da corrente com base na ligação do dispositivo;
- Aquisição dos resultados obtidos sem e com o emprego do LCC-NS na rede, para realização de análises da capacidade de limitação de correntes de curto-circuito deste dispositivo além de possibilitar uma visão quanto as distorções harmônicas ocorridas.

1.2 Contribuições deste trabalho

A partir do estudo desenvolvido com a prática de ensaios no protótipo de LCC-NS em questão, algumas contribuições puderam ser feitas de maneira a melhorar o entendimento do dispositivo estudado como:

- Realização dos ensaios de caracterização dos núcleos ferromagnéticos para todas as fases do protótipo;
- Realização do mesmo ensaio de curto-circuito monofásico em todos os testes, variando o tipo de ligação do protótipo (monofásico ou trifásico) na rede de teste e a fase que era aplicada a falta, a fim de observar possíveis divergências;
- Análise da *Distorção Harmônica Total* (DHT) da corrente do sistema durante o curto-circuito.

Para evolução desta dissertação, foi desenvolvido o trabalho científico:

- M. C. Lima, G. dos Santos, F. Sass, G. G. Sotelo, “Ensaio de magnetização e curto-circuito de um Limitador de Corrente de Curto-circuito de Núcleo Saturado”, 19^o Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e 14^o Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, 2020.

1.3 Estrutura da dissertação

O trabalho encontra-se disposto da seguinte forma: o presente capítulo apresenta uma breve contextualização do tema assim como o objetivo e estrutura desta dissertação; no Capítulo 2, é apresentado um sucinto estado da arte do LCC-NS até o protótipo estudado; o Capítulo 3 traz a descrição do protótipo tal como a descrição dos ensaios de caracterização, com seus resultados discutidos e, a do curto-circuito realizados; o Capítulo 4 expõe os resultados obtidos com os ensaios de curto-circuito monofásico, sem e com a utilização do LCC-NS, com a ligação monofásica e trifásica deste; e no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões desta dissertação, além de sugestões de trabalho futuros.

Capítulo 2

Estado da arte

O crescente aumento da demanda por energia elétrica adicionado a gradativa inserção de geração distribuída vem provocando impactos consideráveis no sistema de energia elétrica brasileiro, tais como estresses térmicos em equipamentos, aquecimento em linhas cabos, transformadores e comutadores assim como a elevação dos níveis das correntes de curto-circuito [1, 2, 3, 4, 5]. Atrelado ao fato de que diversas das subestações em operação encontram-se com as suas vidas úteis próximas ao fim, uma preocupação acerca dos equipamentos de proteção instalados e de manter a rede estável e segura na ocorrência de curtos-circuitos.

Uma vez que os níveis de curto aumentaram ao longo dos anos e, os equipamentos de proteção permaneceram os mesmos, alguns destes estão trabalhando perto da sua capacidade máxima, sendo assim perigoso provocar danos não só a rede. Com isso, diversos dispositivos vem sendo estudados e produzidos a fim de se limitar as correntes de curto-circuito para níveis desejados, de modo aos equipamentos de proteção possam atuar de maneira segura.

Deste modo, o *Limitador de Corrente de Curto-circuito* (LCC) se mostra uma solução promissora. Este dispositivo é usualmente inserido em série com a rede e assim, não haveria a necessidade da troca dos equipamentos de proteção instalados.

2.1 Limitadores de corrente de curto-circuito

Os LCCs consistem em dispositivos para auxiliar os equipamentos de proteção previamente instalados ao reduzir a corrente de curto-circuito para níveis desejáveis e a proteção da rede consiga atuar de modo mais seguro. Esta limitação se baseia na inserção de uma

impedância equivalente no sistema de modo a limitar a corrente.

Um LCC idealmente deveria apresentar as seguintes características:

- Baixa impedância em operação normal do sistema (sem ocorrência de curto-circuito);
- Alta impedância no evento de um curto;
- Falha Segura (o sistema não é afetado em caso de um mal funcionamento do limitador);
- Tempo de recuperação rápido para o estado de regime normal ao final da falta;
- Ser compacto e menos pesado;
- Rápida detecção e atuação de limitar a corrente de curto.

Comercialmente, podem-se encontrar alguns tipos de equipamentos que limitam a corrente de curto-circuito como: reatores de núcleo de ar, dispositivos pirotécnicos, transformadores de alta impedância e, resistores de aterramento. Esses aparatos vêm sendo utilizados e difundidos. No entanto, visando agregar novas utilidades e tecnologia, os estudos e desenvolvimento dos LCCs ganham cada vez mais aplicabilidade no sistema.

Na literatura podem-se encontrar diversas configurações de LCCs, podendo serem classificados em 2 categorias [2, 7]: limitadores supercondutores, que utilizam em seu arranjo o material supercondutor; limitadores não-supercondutores, onde pode-se encontrar por exemplo reatores de núcleo de ar, limitadores com elementos como chaves de estado sólido, e, essa categoria é a mais utilizada convencionalmente; por fim, os limitadores híbridos combinam elementos e características das demais categorias.

Os *Limitadores de Corrente de Curto-circuito Supercondutores* (LCCSs) ganharam força com o advento da descoberta dos materiais supercondutores de alta temperatura na década de 80. Os materiais supercondutores tem características típicas em condições específicas de temperatura, campo magnético e corrente, como: resistência igual a zero em corrente contínua, em corrente alternada essa resistência é tende a zero; suportam altas capacidades de corrente, entre outros. Na literatura, os LCCSs podem ser classificados como do tipo resistivo ou do indutivo, com topologias como núcleo blindado, núcleo saturado, flux-lock [2, 4, 7].

Os LCCSs possuem como características um rápido tempo de atuação, grande capacidade de limitação, Não precisam ser substituídos, uma vez que, quando submetido

a uma corrente de falta o material supercondutor que compõe o limitador transite para seu estado normal, um determinado tempo após a falta o material supercondutor retorna ao seu estado de resistividade nula, podendo operar novamente. Além disso, podem ser mais leves e não dependem de sensores auxiliares para detecção e limitação da falta, em vez disso a limitação ocorre devido à propriedade do material de alterar o valor de sua resistividade quando submetido a valores elevados de correntes [8].

Os *Limitadores de Corrente de Curto-circuito Híbridos* (LCCHs) como já comentado, combinam características e elementos presentes nas demais categorias de LCCs. Tendo em vista que separadamente cada dispositivo possui algum ponto negativo, ao combinar essas duas formando um limitador híbrido visa-se obter melhores combinações das vantagens apresentadas por essas categorias separadamente. Os LCCs Não-Supercondutores podem ser encontrados nas topologias de limitadores de estado sólido, do tipo série, ressonante, ponte e de núcleo saturado [2, 3, 4], sendo o foco deste trabalho.

2.2 LCC do tipo Núcleo Saturado

O conceito, simulação e o primeiro protótipo de LCC-NS foi proposto por Raju no início da década de 80 [9, 10]. O equipamento desenvolvido tinha a capacidade 3 kV/550 A e utilizava material supercondutor no enrolamento central de *Corrente Contínua* (CC), podendo ser observado na Figura 2.1 . Optou-se por um limitador monofásico composto por um par de núcleos ferromagnéticos, onde cada um possuía um enrolamento (bobina) ligado em série com a rede.

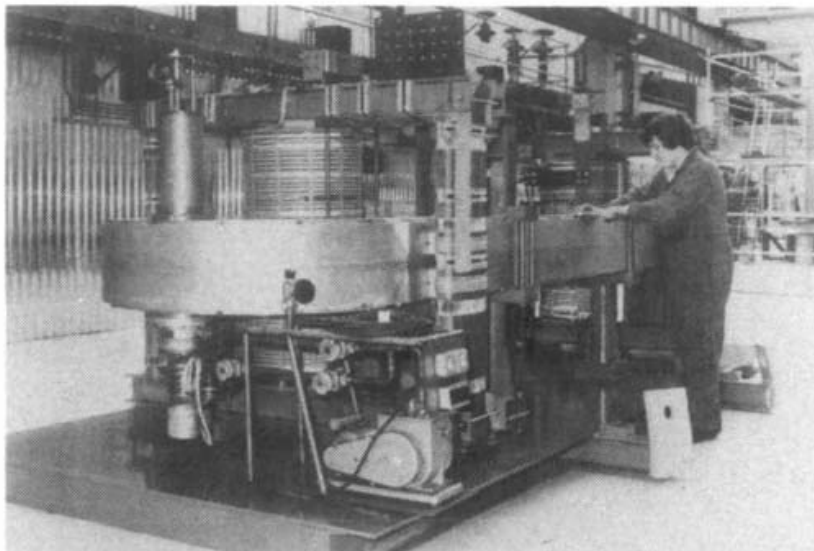


Figura 2.1: Protótipo desenvolvido por Raju, Parton e Bartram.

Fonte: [9, 10].

O LCC-NS apresenta como principais vantagens a reação e recuperação rápida a um evento de curto-circuito [11] e, tem seu princípio de funcionamento tendo em vista o comportamento dinâmico dos núcleos ferromagnético visto as características magnéticas de saturação dos mesmos. A Figura 2.2 ilustra um exemplo do LCC-NS monofásico, onde pode-se observar duas bobinas de *Corrente Alternada* (CA) que são conectados em série com a rede. Esses enrolamentos CA usualmente são construídos com material condutor convencional como cobre e encontram-se ligados de modo que os fluxos na bobina central de CC sejam subtrativos.

Esse enrolamento CC pode ser confeccionado tanto com condutor convencional quanto com material supercondutor. Ele é responsável pela saturação dos núcleos ferromagnéticos a partir da alimentação por uma fonte CC que produz um fluxo de modo que isso ocorra. Ainda acoplado a bobina CC encontram-se uma chave de acionamento rápido que se abre ao detectar a ocorrência de um curto-circuito a fim de proteger a fonte CC e contribuir para uma desmagnetização mais rápida dos núcleos em conjunto com um circuito de desmagnetização, que pode ser composto a título de exemplo por um diodo de roda livre em conjunto com uma impedância ou um elemento para supressão de campo como resistor variável.

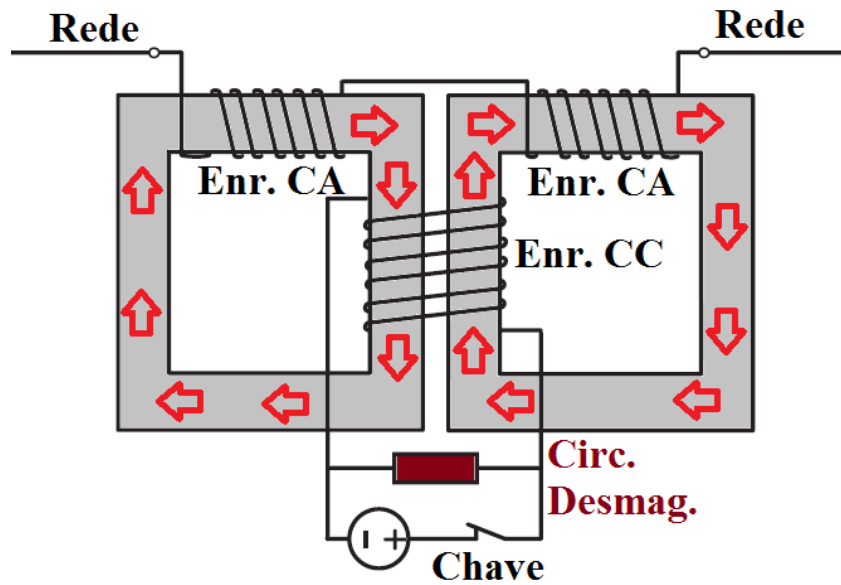


Figura 2.2: Limitador de corrente de curto-circuito de núcleo saturado.

Normalmente dispositivo de LCC-NS opera em 2 modos. O primeiro é referente a operação normal do sistema (sem evento de curto-circuito), onde a fim de minimizar impactos com a inserção deste equipamento na rede, os seus núcleos encontram-se em região de saturação na curva de magnetização do seu material ferromagnético, promovendo uma baixa permeabilidade de modo que a impedância relativa vista pelo sistema é pequena.

Com relação ao segundo modo, este se refere a quando ocorre uma falta no sistema. Durante um curto as elevadas correntes CA levam os núcleos para fora da região de saturação, ocasionando um aumento da permeabilidade e, conseqüentemente, da impedância, o que leva à limitação efetiva da corrente de curto-circuito [12]. Desta forma o LCC-NS atua promovendo condição para operação segura dos equipamentos de proteção, uma vez que o dispositivo consegue limitar a corrente do sistema na ocorrência de uma falta mesmo que a chave de acionamento rápido não funcione ou não seja empregada no lado CC do limitador. Sendo assim, o LCC-NS se comporta como um reator de núcleo de ferro na ocorrência de uma falta e, em operação normal do sistema, como um reator de núcleo de ar.

Tendo em vista a utilização de material supercondutor no enrolamento CC, algumas vantagens podem ser observadas como: devido ao princípio de funcionamento desta topologia de limitador, não ocorre a transição do estado supercondutor para o normal num evento de falta e assim, o tempo de recuperação do dispositivo se torna menor; o tamanho e peso do equipamento podem ser reduzidos uma vez que são necessárias menos voltas na bobina CC pois o supercondutor possui uma densidade de corrente maior que um condu-

tor normal, comparando um mesmo tamanho e por conseguinte, os núcleos poderiam ser menores;

Alguns pontos desvantajosos desta topologia de limitador que podem ser observados é que este equipamento gera um elevado conteúdo harmônico enquanto está limitando a corrente de curto-circuito em virtude da alternância entre a região de saturação e a não saturação dos núcleos ferromagnéticos com relação a curva de magnetização do material dos núcleos. Outro item é com relação ao peso e dimensões significativos devido a presença de dois núcleos, de modo que as suas proporções sejam correspondentes as de um transformador de mesma potência.

Algumas preocupações relevantes podem ser observadas com relação ao LCC-NS, como a possibilidade da corrente de curto-circuito seja tão elevada de modo que os núcleos voltem para o estado de saturação e assim, o curto não seja limitado; caso durante a limitação de uma falta o núcleo vá para a região não-linear onde não se encontra saturado introduziria harmônicos na rede.

Espera-se que caso as 3 fases sejam balanceadas e as bobinas CA sejam idênticas, durante a operação normal do sistema a soma dos fluxos no enrolamento CC deva ser zero, contudo, construir reatores idênticos é um desafio. Além disso, na ocorrência de um curto, há um fluxo do sistema CA na bobina CC o que induz uma tensão nela, sendo um dos pontos mais preocupantes do uso do limitador [7]. A solução empregada por Raju e seus companheiros de pesquisa foi a utilização de uma grande parede de alumínio ao redor da bobina CC, o que se mostrou eficaz para o protótipo em questão.

Além da utilização de material supercondutor para o enrolamento CC, na literatura pode-se encontrar estudos com novos formatos da topologia de limitador de núcleo saturado como: o emprego de ímãs permanentes nos núcleos ferromagnéticos com e sem a utilização de gaps nos núcleos [13, 14, 15, 16, 17]; enrolamentos CC e CA superpostos; uso de apenas um núcleo ferromagnético por fase [18, 19] e outras formas de deixar o dispositivo mais leve e compacto [20, 21, 22, 23, 24]; assim como o emprego dessa topologia de limitador em corrente contínua em alta tensão (HVDC) [25, 26, 27, 28]. Diversos estudos acerca da modelagem desta topologia de limitador estão sendo desenvolvidos com relação a determinação das correntes (CA e de polarização CC), tensão, campo magnético, ciclo de histerese e perdas em CA [29, 30, 31, 32, 33, 34, 35]. Enquanto alguns focam no projeto do limitador igualmente a sua coordenação com relés de distância ou outras proteções [21, 36, 37, 38, 39].

A Figura 2.3 apresenta exemplos de alguns tipos de LCC-NS, a imagem da letra (a)

consiste de um LCCS-NS onde os núcleos ferromagnéticos são abertos; já a letra (b) consiste de um exemplo de LCC-NS que além de possuir os enrolamentos CA das 3 fases sobrepostos ao enrolamento CC, o núcleo apresenta gap e utiliza ímãs permanentes.

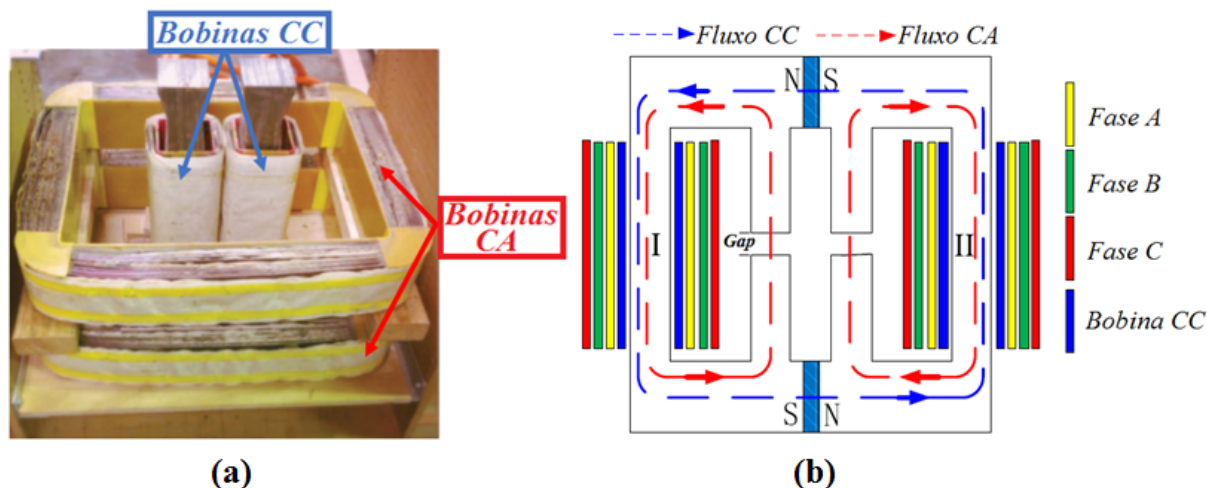


Figura 2.3: Exemplos de LCC-NS na literatura.

Letra (a) adaptada de [24] e Letra (b) adaptada de [20].

2.2.1 Protótipos de LCC-NS instalados em campo

Algumas empresas como a Innopower, Zenergy Power e GridON apostaram no desenvolvimento e instalação de LCCS do tipo núcleo saturado na rede. Países como a China, os Estados Unidos e o Reino Unido foram escolhidos para a implementação dos protótipos desenvolvidos.

A empresa Innopower em 2002 começou a desenvolver o projeto de um LCCS-NS trifásico de 35 kV/90 MVA [39, 40], sendo apresentado na Figura 2.4. Este protótipo só foi instalado na rede em 2008, na subestação de Puji pela China Southern Power Grid [41]. Ele foi confeccionado a fim de que reduzir a corrente de curto para uma magnitude cerca de 50%, além de apresentar uma estrutura hexagonal com os núcleos ferromagnéticos, minimizando assim o tamanho do dispositivo, ele foi testado no nível de tensão de distribuição. Seu circuito de magnetização consistiu por 3 partes principais: uma fonte CC, uma chave de acionamento rápido e um circuito de desmagnetização [42]. O protótipo teve duas principais desvantagens: a elevada utilização de ferro nos núcleos e risco de alta tensão induzida na bobina CC supercondutora, mas a empresa conseguiu resolvê-las.



Figura 2.4: Protótipo de LCCS-NS de 35 kV instalado pela Innopower na China.

Fonte: [41].

Como o desenvolvimento do LCCS-NS de 35 kV foi bem-sucedido, a Innopower deu seguimento a um projeto de construção de um limitador para alta tensão em 2008 [43, 44]. Em 2011, a construção e testes do LCCS-NS trifásico de 220 kV/300 MVA foi finalizada, os testes foram no nível de tensão de transmissão. A Figura 2.5, apresenta este limitador que após a realização de testes foi enviado e instalado na subestação de Shigezhuang em Tianjin, China, em 2012. A principal diferença, fora o nível de potência, entre os limitadores desenvolvidos pela Innopower foi o tipo de isolamento elétrico utilizado, no de 35 kV usou-se isolamento tipo seco enquanto no de 220 kV a óleo.



Figura 2.5: Protótipo de LCCS-NS de 220 kV instalado pela Innopower na subestação de Shigezhuang em Tianjin, China.

Fonte: [45].

A Innopower conseguiu resolver o problema encontrado de alta tensão induzida no enrolamento CC, composto através de fitas do material supercondutor de alta temperatura crítica Bi-2223 (1^a Geração) [40], ao utilizar controle ativo do sistema através de chaves para abrir o circuito CC na ocorrência de uma falta. Ao abrir o circuito CC, a máxima impedância do limitador pode ser inserida, auxiliando a limitação do curto.

O circuito CC é alimentado por duas fontes de tensão, sendo uma de Alta e outra de Baixa. A fonte de Baixa era responsável pela alimentação da bobina CC supercondutora em operação normal do sistema e, quando detectado curto a chave de acionamento rápido se abria e a partir do emprego de um piezo resistor a energia pôde ser consumida, de modo que a proteger a bobina supercondutora CC [39]. A desmagnetização do núcleo de ferro foi realizada virtualmente nos primeiros 5 ms enquanto toda energia é consumida em 10 ms [7]. A fim de satisfazer os requisitos de funcionalidade, o limitador deve retornar ao estado onde apresenta baixa impedância antes tentativa de religamento da chave. A fonte de Alta tensão foi utilizada para remagnetizar a bobina supercondutora CC em algumas centenas de milissegundos [7].

O protótipo trifásico de 15 kV/300 MVA/1,2 kA produzido pela Zenergy Power pode ser observado na Figura 2.6. Este dispositivo foi projetado para a rede de distribuição e tinha como limitação de corrente de curto pico em 20%, além de conseguir limitar uma

falta de até 30 ciclos [46]. O dispositivo possui somente uma bobina CC supercondutora e assim, apenas um criostato. Em 2009 o limitador foi instalado nos Estados Unidos pela Southern California Edison (SCE) no Circuito Avanti e, através de diversos testes realizados pôde-se verificar que ele é um equipamento com falha segura [46].

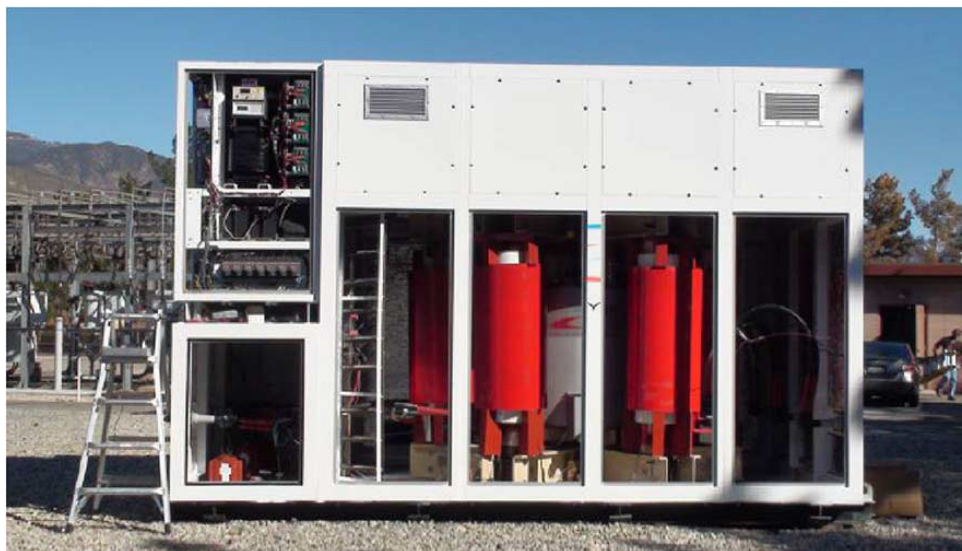


Figura 2.6: Protótipo de LCCS-NS de 15 kV instalado pela Zenergy Power.

Fonte: [46].

Antes da sua instalação na subestação, este dispositivo foi testado de diversas formas com base nos requisitos de padrões IEEE [46]. Os ensaios foram divididos em 3 grupos: teste de pré conexão onde o objetivo era avaliar o isolamento do equipamento; teste de performance em estado normal de operação do sistema, onde foram medidas a tensão em cima do limitador, potência consumida, impedância e design térmico; o terceiro grupo de teste referiu-se ao ensaio com aplicação de curto-circuito e pode-se analisar as capacidades do limitador.

A empresa GridON em conjunto com a Wilson Transformer Company, projetou, fabricou e instalou um protótipo de LCC-NS, não-supercondutor, de 11 kV/10 MVA na subestação primária da UK Power Networks em Newhaven, condado de East Sussex, em 2013 [47, 48, 49]. Este equipamento obteve resultados como redução de até 46% da corrente excessiva de curto em toda a duração da falta aplicada e, a recuperação do protótipo de volta a carga nominal foi instantânea, de modo que este limitador poderia atuar em faltas consecutivas. A Figura 2.7 apresenta o limitador instalado na rede do Reino Unido [49]. Com o sucesso do dispositivo a UK Power Networks encomendou com a GridON a mesma topologia de limitador para ser instalado em Birmingham.



Figura 2.7: Protótipo da empresa GridON instalado no Reino Unido.

Fonte: [49].

Capítulo 3

Aparatos e procedimentos experimentais

Este capítulo aborda o protótipo de limitador LCC-NS estudado e a descrição dos ensaios de caracterização e de curto-circuito realizados. Também serão apresentados e discutidos os resultados dos experimentos de magnetização. Primeiramente, os experimentos de caracterização visaram analisar as características dos núcleos ferromagnéticos e dos enrolamentos do LCC em questão. Com relação aos ensaios de curto-circuito, eles tiveram como foco observar o comportamento da rede, com a inserção do limitador na mesma, a partir da comparação de correntes e tensões com e sem a presença do LCC.

3.1 Protótipo de LCC-NS

Com os diversos estudos presentes na literatura acerca do LCC-NS, o desenvolvimento e teste de um protótipo desta topologia de limitador foi tema de tese em 2015 por Fernando Fajoni [6]. O dispositivo em questão encontra-se na Figura 3.1, ele é um limitador trifásico onde cada fase é composta por um par de núcleos ferromagnéticos do tipo janela com capacidade para limitar correntes de curto acima de 1 kA [6]. Este equipamento primeiramente foi modelado e simulado em um software de elementos finitos a fim de observar a saturação dos núcleos em regime normal e com a ocorrência de um curto-circuito. Tendo em vista os resultados obtidos, o LCC-NS pode ser construído e testado com relação a caracterização de uma das fases e a aplicação do ensaio de curto na mesma.

Este limitador foi emprestado para o Núcleo de Inovação Tecnológica em Engenharia Elétrica (NITEE) da UFF, para realização de mais ensaios, sendo estudado nesta dissertação. Este limitador é do tipo núcleo saturado e é um dispositivo trifásico. Cada fase deste aparato é composta por um par de núcleos ferromagnéticos do tipo janelas, sendo 6 ao todo.

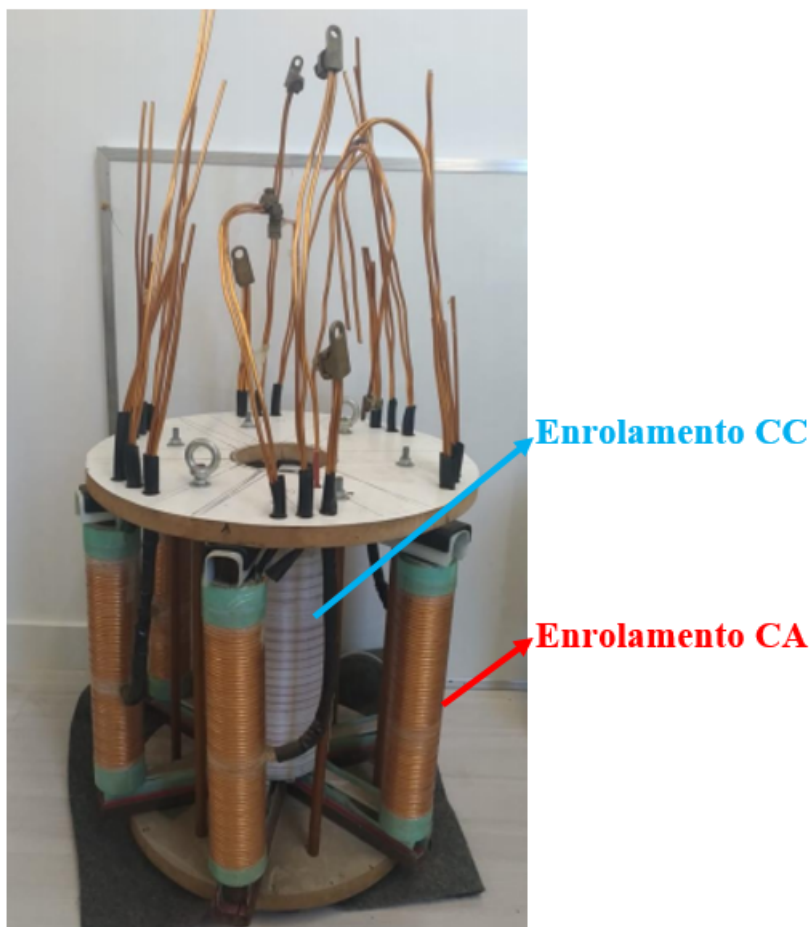


Figura 3.1: Protótipo de LCC-NS estudado.

Cada um dos seis núcleos ferromagnéticos apresenta um enrolamento CA, retângulo vermelho na Figura 3.1, composto por no máximo 70 espiras formadas por dois fios de cobre em paralelo, de $21,2 \text{ mm}^2$ de seção transversal (4 AWG) cada. Estes enrolamentos foram construídos de modo a possibilitar a escolha entre 70, 50 ou 20 espiras, que são na verdade *taps* destas bobinas. Em cada fase do LCC, dois destes enrolamentos foram conectados em série de forma subtrativa, como ilustrado na Figura 3.2. Isso significa que o fluxo magnético produzido pelos enrolamentos CA serão enlaçados pelo enrolamento de CC. Envolvendo as 6 pernas dos núcleos ferromagnéticos deste protótipo, encontra-se o enrolamento CC no ramo central do LCC-NS, retângulo azul da Figura 3.1. Na bobina CC é aplicada uma corrente contínua, cuja força magnetomotriz é responsável pela saturação simultânea de todos os 6 enrolamentos CAs, ou seja, das 3 fases. O enrolamento CC possui 300 espiras, também de cobre 4 AWG.

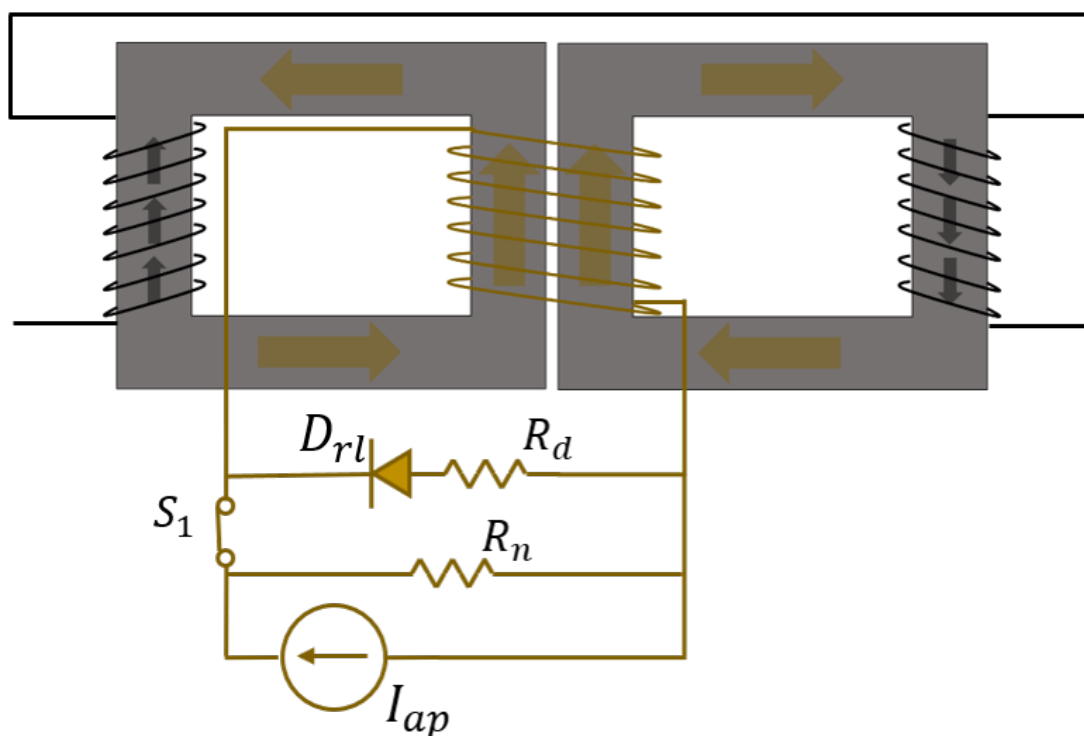


Figura 3.2: Esquemático monofásico do LCC-NS. Os enrolamentos CA e o fluxo magnético gerado por eles foram representados em preto. O enrolamento CC e o fluxo magnético gerado por eles foram representados em amarelo.

O sistema de magnetização do enrolamento CC, responsável pela saturação dos núcleos ferromagnéticos, encontra-se representado na Figura 3.2, mostrando uma fase do limitador. Neste esquema também é possível observar os seguintes itens: uma fonte de alimentação de corrente contínua (I_{ap}) que provê uma corrente cuja magnitude deve ser capaz de saturar os 6 núcleos durante a operação normal do sistema; uma chave de abertura rápida (S_1), que na montagem deste sistema foi utilizado um IGBT; a resistência R_n representando as perdas da fonte CC; um diodo de roda livre (D_{rl}) e a resistência (R_d), que compõem o circuito para desmagnetização dos núcleos durante a ocorrência de um curto-circuito.

Este protótipo de LCC-NS tem seu princípio de funcionamento dividido em 2 partes, conforme o modo de operação: operação normal do sistema ou em modo limitação (quando atuando num curto-circuito). Na operação normal do sistema (sem episódio de curto-circuito), os enrolamentos CAs do limitador, que estão conectados em série com a rede, devem apresentar o menor valor possível de impedância. Idealmente, a impedância deste enrolamento é zero. Para que isto seja possível, todos os núcleos ferromagnéticos precisam estar na região de saturação da curva de magnetização $B \times H$. Logo o circuito de magnetização acoplado ao enrolamento CC deve prover uma corrente contínua, cuja

magnitude deve ser tal que produza um fluxo magnético capaz de magnetizar os 6 núcleos simultaneamente e que seja muito superior ao fluxo produzido pelos enrolamentos CA que estão polarizados de maneira oposta. Isso deve ser feito para evitar que os núcleos das bobinas CAs saiam da região de saturação, que levariam a uma distorção na corrente da rede elétrica. Assim, os núcleos encontram-se saturados e a indutância do limitador vista pelo sistema deve ser desprezível.

Na ocorrência de um curto na rede o limitador deve mudar sua forma de operação para que os enrolamentos CAs do LCC-NS passem a apresentar uma alta impedância na rede, a fim de limitar a corrente de curto-circuito o quanto antes. As altas correntes que passam nos enrolamentos das fases que foram afetadas pelo curto elevam o fluxo produzido pelos enrolamentos CA. Como este fluxo está em oposição ao produzido pela bobina CC e possui maior magnitude, ele deve ser capaz de tirar o núcleo da saturação, elevando assim a indutância do LCC-NS. Para evitar que altas tensões reversas sejam induzidas no enrolamento CC, é necessário desconectar a fonte de alimentação deste enrolamento. Deste modo, é preciso desmagnetizar rapidamente o núcleo ferromagnético.

Para o LCC-NS em questão, utilizou-se um sistema de detecção de curto-circuito controlado através de um microcontroladores similar ao apresentado em [50]. Esse sistema de detecção de curto serviu para a abertura do IGBT presente no circuito de magnetização da bobina CC, conforme ilustrado na Figura 3.2. Com o IGBT aberto, durante a desmagnetização, a tensão induzida neste enrolamento será consumida pelo diodo de roda livre e pelo resistor de desmagnetização. No decorrer do curto-circuito, o enrolamento CC ficará aberto.

3.2 Procedimento experimental

Todos os ensaios realizados se encontram descritos nesta seção. Foram necessários realizar dois tipos de ensaios: o de caracterização e o de operação do LCC-NS. As medidas de caracterização visam investigar as propriedades físicas do protótipo e dos núcleos ferromagnéticos estudado, além da integridade dos enrolamentos. Estes ensaios também permitem obter dados que poderão ser usados na futura validação experimental de modelos de simulações de outros trabalhos do grupo. E, a partir da análise dos resultados obtidos com este ensaio, pôde-se avaliar o emprego do limitador em um sistema de teste, em escala laboratorial, ao realizar os ensaios de curtos-circuitos monofásicos.

3.2.1 Ensaio de Caracterização

Os ensaios de caracterização tiveram o intuito de analisar a integridade dos núcleos ferromagnéticos e dos enrolamentos, tanto CA como CC. Tendo isso em vista, os resultados visados para realizar o estudo foram a obtenção da curva de excitação, de magnetização $B \times H$ e da permeabilidade relativa ($\mu_{relativo}$) por fase dos núcleos. Também foi obtida a curva da variação da indutância dos enrolamentos CA da fase A.

Com o objetivo de obter as características do material ferromagnético dos núcleos do LCC-NS, os ensaios realizados são similares aos de magnetização de um transformador. Ambos dispositivos são compostos por núcleos ferromagnéticos e enrolamentos, possuindo uma relação de transformação entre eles. No entanto, o enrolamento que seria secundário do transformador, no LCC-NS é alimentado por uma fonte de corrente contínua a fim de saturar os núcleos do limitador.

O esquemático do ensaio de caracterização realizado por fase pode ser observado na Figura 3.3. O experimento consistiu em alimentar os enrolamentos CA gradualmente utilizando um variador de tensão (VARIAC), com o enrolamento CC em vazio, e mediu-se, em valores eficazes, a corrente CA do sistema (I_{ef}), a tensão em cima dos enrolamentos CA (V_{ap}) e, a tensão induzida no enrolamento CC (V_{ef}).

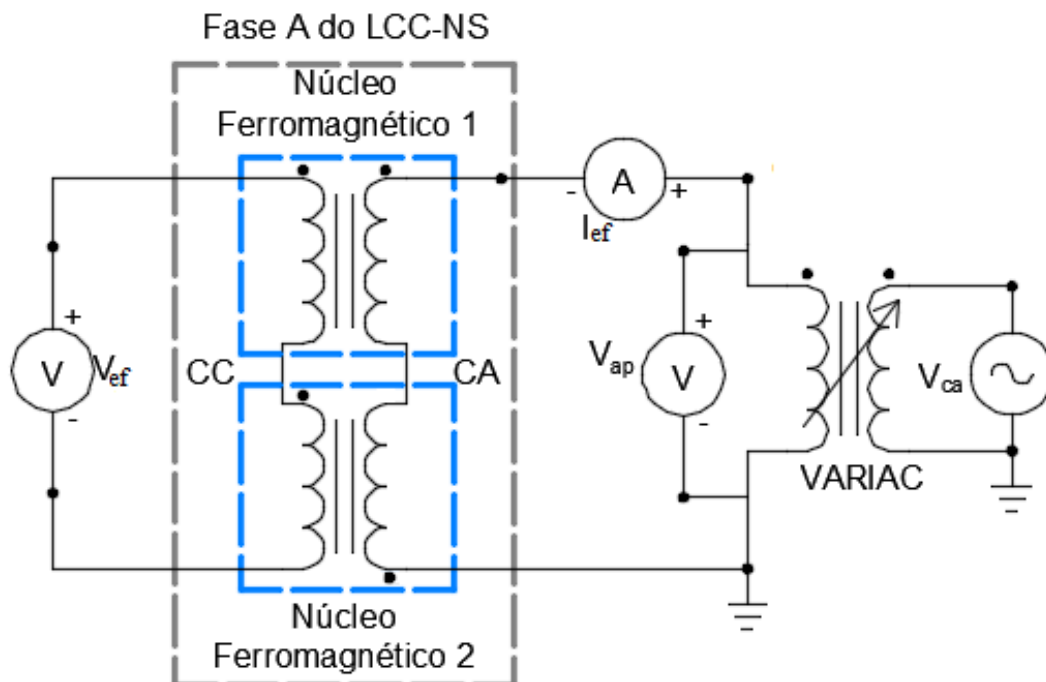


Figura 3.3: Esquemático do ensaio de caracterização por fase.

A partir dos valores eficazes de I_{ef} e V_{ef} , pode-se traçar a curva de excitação por fase. Já a curva de magnetização por fase, pode ser obtida através dos valores encontrados por meio das equações 3.1 e 3.2, onde B e H encontrados são valores de pico. Nessas equações N_{ca} é o número total de espiras do enrolamento de corrente alternada e como cada fase possui dois enrolamentos CA de 70 espiras, N_{ca} é igual a 140. A área da seção transversal do material ferromagnético é representada por A . A constante l é caminho médio do núcleo ferromagnético. A frequência angular do sistema é representada por $\omega = 2 \pi f$, sendo a frequência da rede f igual a 60 Hz. Os valores de B e H podem ser obtidos respectivamente a partir das leis de Faraday e Ampère, sendo calculados aplicando as equações 3.1 e 3.2.

$$B = \frac{V_{ap}\sqrt{2}}{\omega AN_{ca}}, \quad (3.1)$$

$$H = \frac{N_{ca}I_{ef}\sqrt{2}}{l}. \quad (3.2)$$

A partir dos resultados de B e H obtidos aplicados na equação 3.3 pode-se calcular a permeabilidade magnética relativa. A Figura 3.4 apresenta uma foto do ensaio de caracterização realizado.

$$\mu_{relativo} = \frac{B}{\mu_0 H} = \frac{B}{(4 \cdot \pi \cdot 10^{-7})H}. \quad (3.3)$$

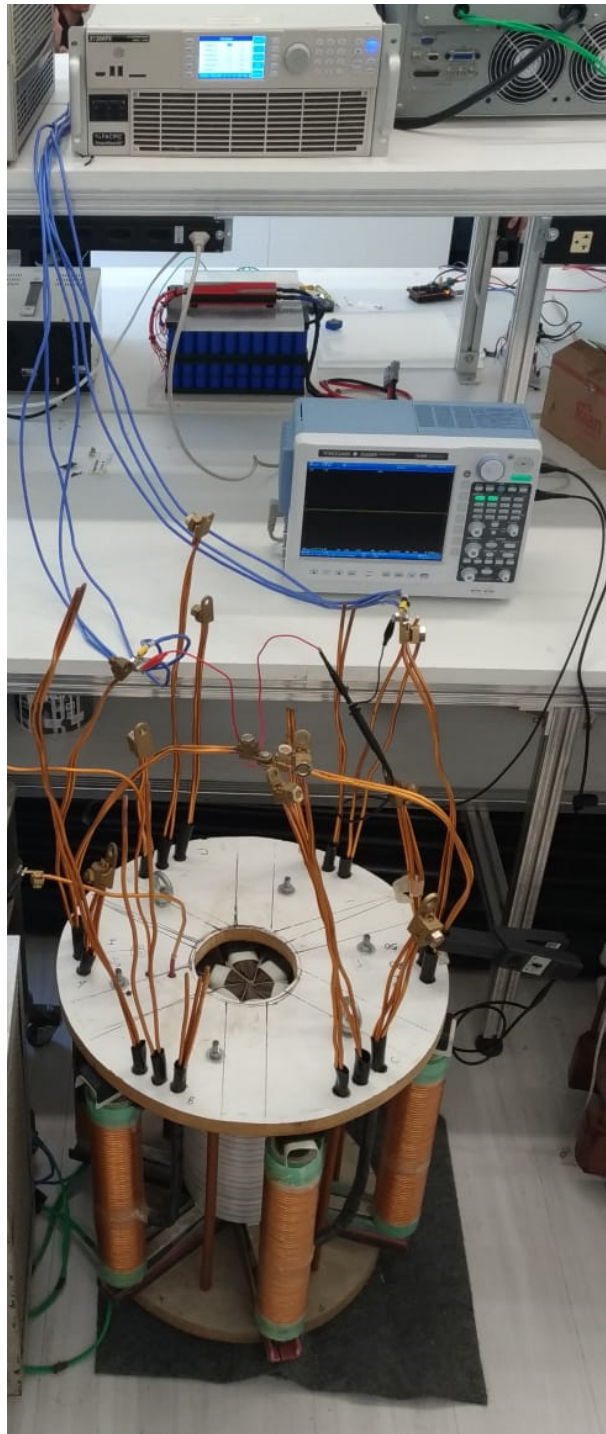


Figura 3.4: Foto da realização do ensaio de caracterização por fase.

Com relação ao teste para obtenção da curva da indutância do enrolamento CA pela força magnetomotriz, a Figura 3.5 apresenta um esquema do ensaio monofásico realizado numa fase do protótipo. Foi usado um multímetro (L_{med}), da Minipa modelo ET-2082D com frequência de teste de 100 Hz, com a função para teste de indutância habilitada, para medir as indutâncias dos enrolamentos CAs do limitador em função da corrente na bobina

CC (I_{cc}). Este ensaio visa avaliar os pontos de operação do LCC-NS, para diferentes valores de corrente contínua no enrolamento CC. Assim, pode ser conhecida a corrente mínima necessária para saturar o enrolamento CA. Dessa forma conforme a corrente foi sendo variada os valores de indutância foram medidos e assim, a curva de indutância pela força magnetomotriz (NI_{cc}) pode ser levantada. Vale lembrar que o número de espiras do enrolamento CC N é igual a 300.

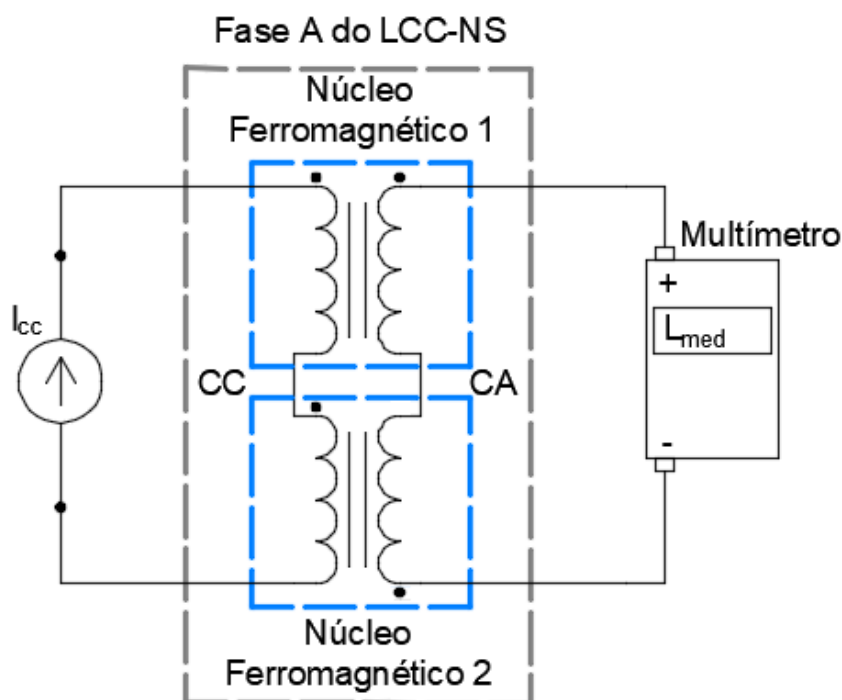


Figura 3.5: Ensaio realizado para a obtenção da curva de indutância do enrolamento CA.

3.2.1.1 Resultados dos Ensaio de caracterização

Os resultados obtidos com a realização dos ensaios de caracterização por fase do LCC-NS podem ser observados nas Figuras 3.6 a 3.9. Foram medidas a corrente e a tensão eficazes (RMS) do sistema CA por fase e a tensão induzida eficaz no enrolamento CC do LCC-NS, que se encontrava em aberto. A partir das medidas, pode-se obter a curva de excitação dos núcleos por fase, apresentada na Figura 3.6. Nesta Figura é possível observar que há uma pequena discrepância entre as fases, cerca de 2 V na região de saturação dos núcleos. Isto se deve provavelmente a uma ligeira diferença no enrolamento das espiras CA. Ademais, a saturação dos núcleos ocorre em torno de 280 V da tensão induzida no enrolamento CC.

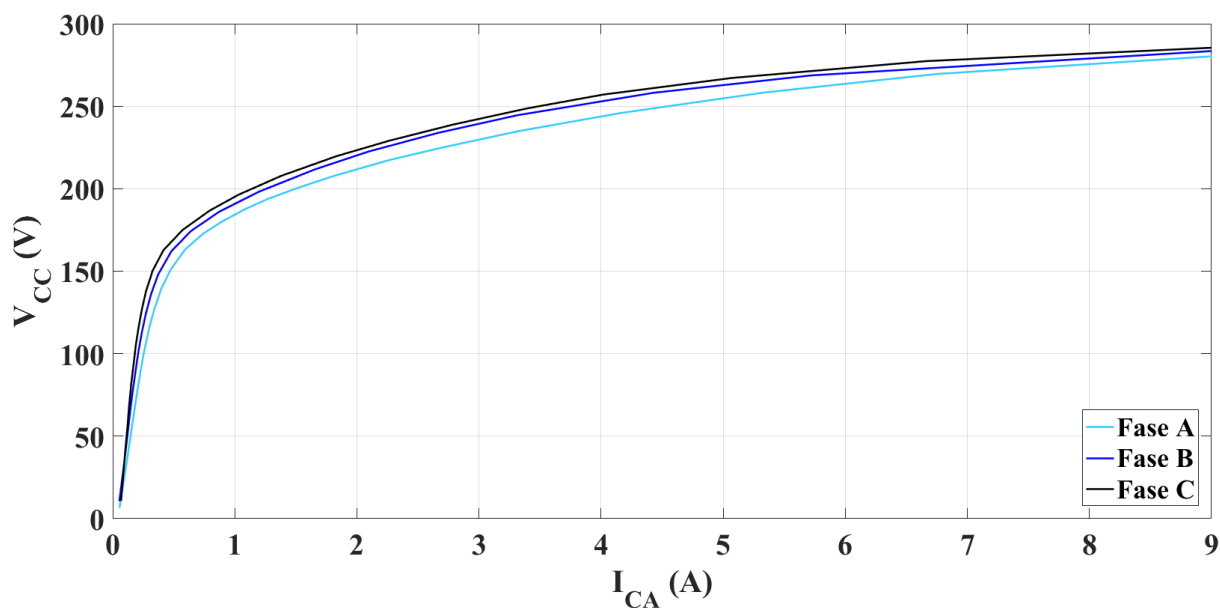


Figura 3.6: Curva de excitação das fases A, B e C.

Com base nos dados eficazes medidos da corrente e tensão do sistema CA de ensaio, pode-se obter a curva de magnetização $B \times H$ por fase através das equações 3.1 e 3.2, onde B e H apresentam seus valores máximos. As curvas $B \times H$, obtidas por fase, podem ser observadas na Figura 3.7. Nelas é possível verificar que a saturação dos núcleos ferromagnéticos nas fases ocorre em torno de $1,7 \text{ Wb/m}^2$, variando $0,05 \text{ Wb/m}^2$ entre elas.

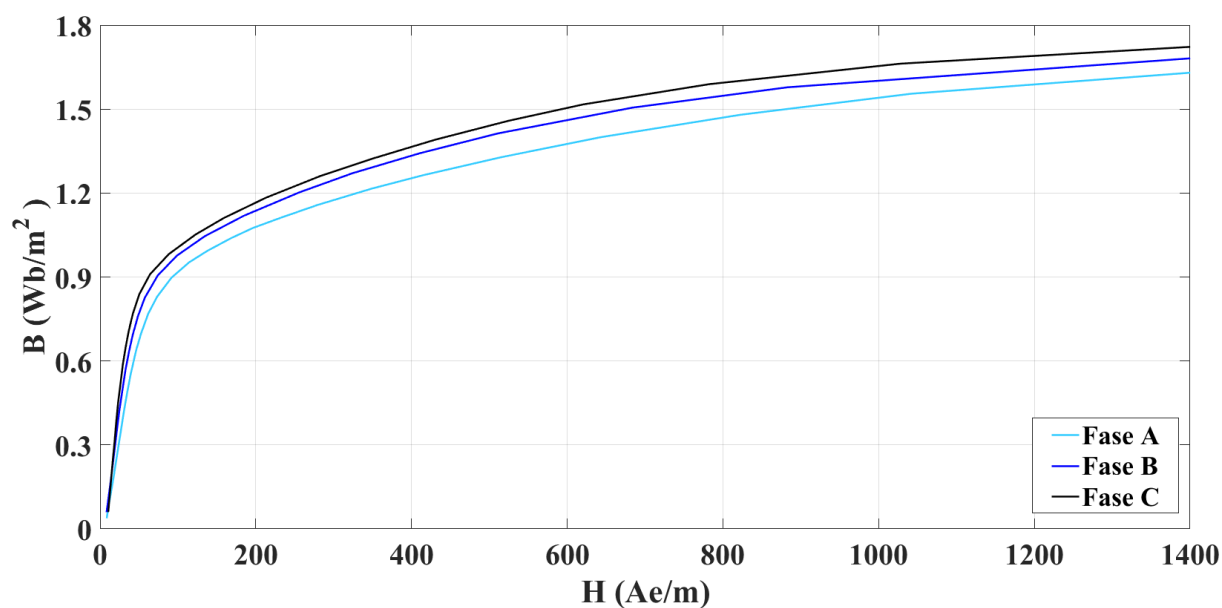


Figura 3.7: Curva BxH das fases A, B e C.

As divergências presentes nos resultados das Figuras 3.6 e 3.7 ficam mais evidente

na Figura 3.8 uma vez que o $\mu_{relativo}$ é obtido a partir da equação 3.3, ocasionando uma maior discrepância na parte inicial da curva, alcançando uma diferença de 5000 entre a fase A e C. Enquanto na região de saturação, os valores de μ_r tendem a 1000, com uma discrepância de 35 entre as fases. Como o protótipo havia sido construído num trabalho [6], não é possível garantir que 6 enrolamentos possuem exatamente o número de espiras apresentados. Dado que os valores calculados foram obtidos indiretamente, essa discrepância pode influenciar no resultado. Além disso, pode haver também pequenas diferenças no tamanho dos pacotes magnéticos de cada ramo do circuito magnético. Todas estas incertezas podem ser atribuídas as diferenças obtidas entre as fases.

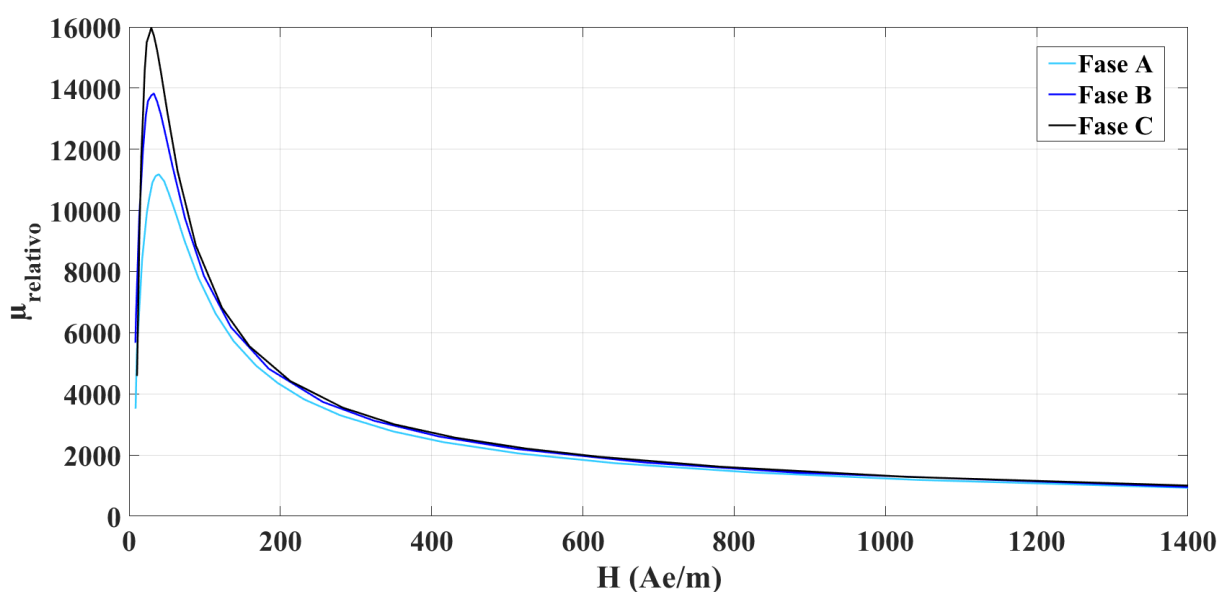


Figura 3.8: Curva $\mu_{relativo}$ das fases A, B e C.

A curva da indutância pela força magnetomotriz (NI_{cc}) do enrolamento CA da fase A pode ser observada na Figura 3.9. Fica notório que com a elevação de NI_{cc} e por conseguinte a saturação dos núcleos a indutância diminui até aproximadamente 0,25 mH. Enquanto que inicialmente chega a 4 mH, onde os núcleos encontram-se fora da região de saturação, situação esta que acontece durante a ocorrência de um curto-circuito. Esse resultado permite inferir a reatância do LCC-NS no circuito em meio a operação em regime permanente e atuando limitando curto-circuitos. Também permite estimar a corrente limitada pelo LCC-NS durante sua atuação num curto-circuito. Vale ressaltar que não foram realizados este ensaio para as demais fases do protótipo devido ao início da pandemia de COVID-19.

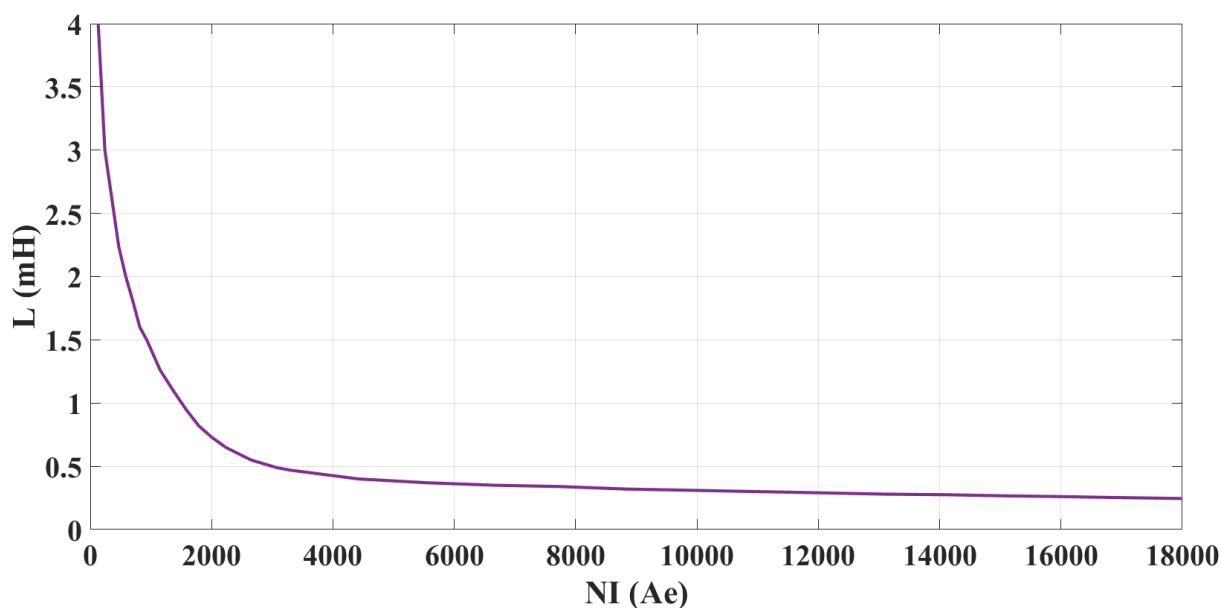


Figura 3.9: Curva Indutância da fase A.

Após a realização dos ensaios de caracterização, pôde-se observar as propriedades magnéticas dos núcleos ferromagnéticos e encontrar os valores de grandezas elétricas, como indutância e tensões e correntes de operação do LCC-NS.

3.2.2 Ensaios de Curto-circuito

Esta seção irá descrever os procedimentos experimentais e a montagem do circuito de testes, em escala laboratorial, para realização dos ensaios de curtos-circuitos.

A fim de analisar melhor as fases separadamente com relação as suas performances na ocorrência de um curto-circuito monofásico, foram realizados dois tipos de ligação do protótipo no sistema de teste: monofásica e trifásica. O sistema de testes foi conectado diretamente à rede elétrica da UFF no laboratório NITEE. Foram utilizados conjuntos de cargas puramente resistivas para as correntes de regime pré-falta em todas as fases e um reator como impedância de curto-circuito, que era inserida no sistema através de uma contatora. Mesmo com o protótipo ligado na rede com todas as 3 fases conectadas em alguns dos ensaios, destaca-se que não foram realizados testes de curto-circuitos trifásicos devido a limitação da rede do laboratório.

Para a obtenção da corrente prospectiva foi feita a ligação esquematizada na Figura 3.10. Essa corrente se refere ao comportamento que ocorreria em uma rede sem a presença de nenhum limitador de corrente de curto. Para o circuito ilustrado, foi aplicado um curto-circuito monofásico na rede de teste sem a presença do limitador. Um oscilógrafo

Yokogawa modelo DL850EV foi empregado para aquisitar as medidas da tensão na carga Z_c e da corrente do sistema. A tensão foi lida diretamente com ponteiras de tensão, e a corrente foi lida com uma bobina rogowski, da Fluke modelo i6000sFlex, devido a esse tipo de ponteira ser útil para medição onde ocorre saturação uma vez que esse tipo de dispositivo não possui núcleo ferromagnético em seu interior diferente de outros tipos de ponteira que se baseiam no Efeito Hall.

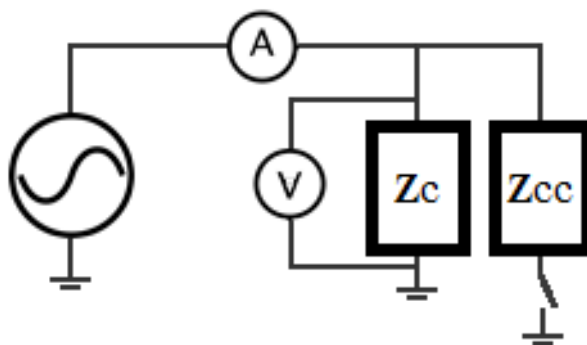


Figura 3.10: Circuito sem o LCC-NS.

As correntes e tensões para o ensaio sem o limitador foram obtidas inicialmente ligando apenas uma fase do sistema de teste por vez juntamente com a carga monofásica. Posteriormente, foi feita a conexão série do protótipo de LCC-NS com ligação mono e trifásica do mesmo no sistema de testes em questão visando reproduzir a mesma característica de curto-circuito monofásico em todos os testes.

3.2.2.1 Ligação Monofásica

Inicialmente preferiu-se ligar apenas uma fase por vez do protótipo do LCC-NS a fim de observar a resposta de cada fase individualmente. Visto que este limitador foi construído quase que artesanalmente, pequenas discrepâncias podem aparecer ao comparar os resultados das três fases para o mesmo curto aplicado.

A Figura 3.11 apresenta um esquemático do ensaio com a ligação monofásica do LCC-NS. A fonte de tensão presente nesta imagem refere-se a própria rede da UFF, com a tensão nominal de $127 V_{rms}$. A impedância de carga (Z_c), consistiu em um banco de resistores com resistência equivalente de 18 ohms, enquanto que a impedância de curto-circuito (Z_{cc}) foi um indutor de 0,15 ohms. A chave presente na figura é uma contatora que é acionada por um microcontrolador, que permite aplicar curtos-circuitos no instante desejado. Deste modo, a falha foi introduzida em 0,1 s e persistiu por 9 ciclos e meio, onde todo o ensaio

durou 0,5 s. Vale ressaltar que as mesmas condições de ensaio foram aplicadas igualmente nas três fases do protótipo a fim de conseguir um melhor comparativo entre elas.

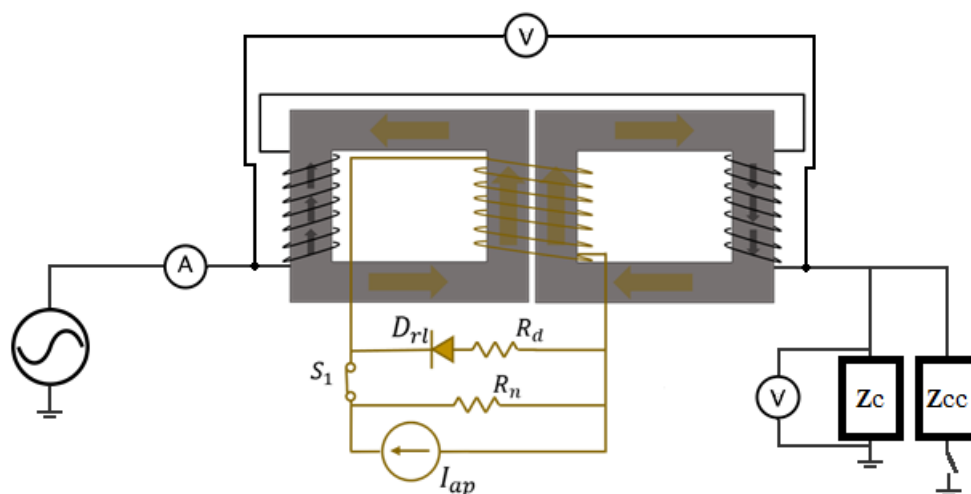


Figura 3.11: Esquemático do ensaio de curto-circuito com ligação monofásica do LCC-NS.

Para os ensaios com essa ligação do protótipo, foram medidas a corrente do sistema limitada pela inserção do LCC-NS; a corrente do lado CC da fonte I_{ap} e a do enrolamento CC, corrente que durante o curto circula apenas pelo circuito de desmagnetização formado pelo diodo de roda livre e pela resistência R_d ; a tensão em cima dos terminais da fase ensaiada do limitador e, a tensão na carga Z_c .

Como previamente foram obtidos os valores da corrente e tensão prospectivos do sistema, pôde-se realizar uma comparação com os resultados limitados pelo protótipo uma vez que as medidas foram realizadas no mesmo ponto do sistema. Um ponto importante é que com a inserção do LCC-NS no sistema, para que fosse obtida a tensão no mesmo ponto da rede que a tensão prospectiva foi aquiritada, bastou-se somar a queda da tensão em cima dos terminais do limitador com a da carga.

A partir da comparação da corrente limitada com a prospectiva obtida, pôde-se observar, por fase, a limitação da corrente e o desempenho do sistema ao inserir o protótipo.

3.2.2.2 Ligação Trifásica

Com relação a ligação trifásica do LCC-NS, o ensaio se assemelha muito ao da ligação monofásica, com exceção que neste todas as três fases do protótipo do limitador foram ligadas na rede. Devido a limitações laboratoriais, só foi possível realizar curtos monofásicos, porém foram realizados com os mesmos elementos utilizados na ligação monofásica.

Desse modo, é possível analisar as possíveis singularidades das fases que venham a aparecer, além do impacto que um curto-circuito monofásico numa determinada fase terá nas demais fases para uma rede protegida por um LCC-NS.

Como o enrolamento CC acopla todas as seis pernas dos núcleos, o circuito de magnetização apresentado na Figura 3.11 foi o mesmo para este ensaio. Com relação a parte CA, cada fase foi ligada a um banco de resistores onde todos apresentavam resistência equivalente de 18 ohms para formar a carga por fase. Essas impedâncias de carga foram ligadas em Y-aterrado. A Figura 3.12 apresenta o limitador alimentado pelas 3 fases da rede (fios laranjas) e em cima da bancada encontra-se uma parte do circuito de magnetização, enquanto que os fios pretos foram ligados nas cargas.

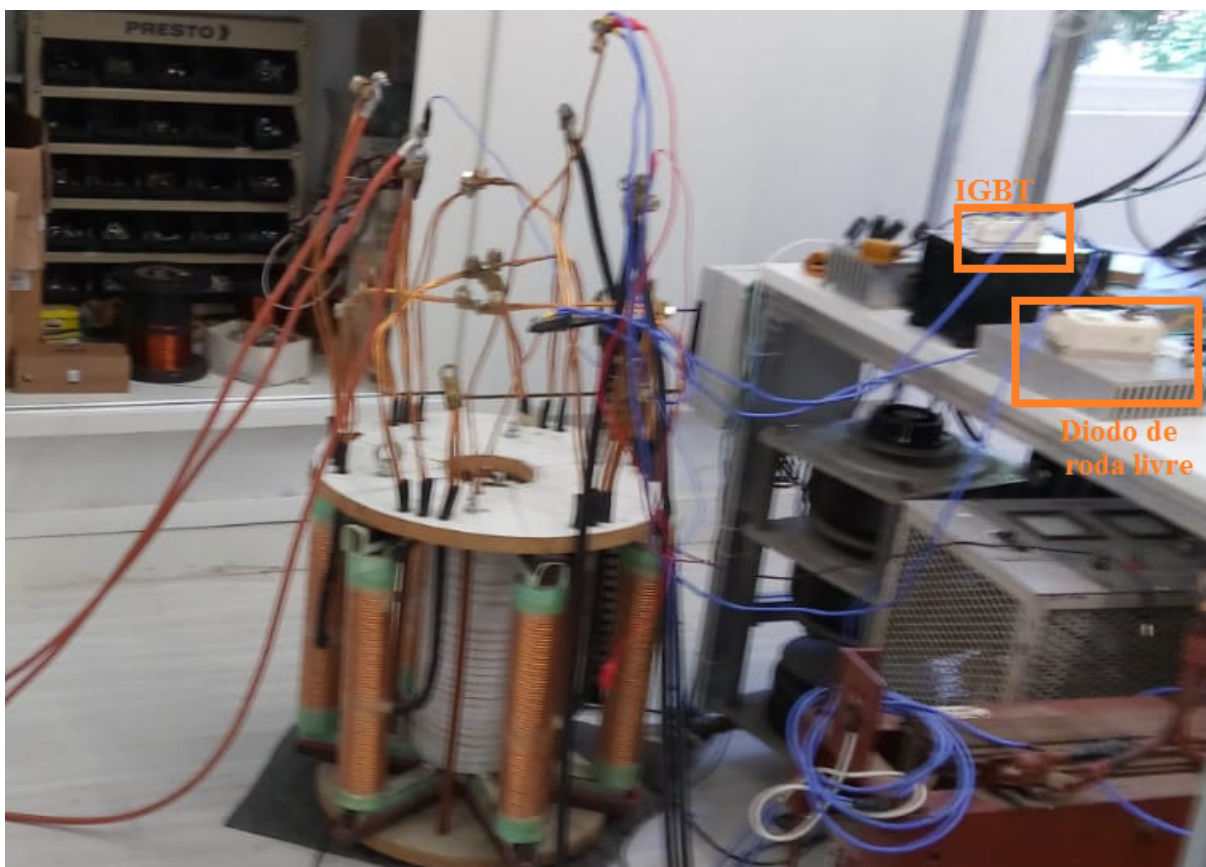


Figura 3.12: Foto do ensaio de curto com a ligação trifásica do protótipo.

Os curtos-circuitos monofásicos utilizaram a mesma impedância de curto de 0,15 ohms que os teste com a ligação monofásica do limitador, assim como a contatora para aplicação das faltas. Os eventos de curto-circuito também tiveram duração de 9 ciclos e meio para estes ensaios.

Como o sistema de teste é trifásico, tornou-se necessário realizar mais medições: as 3

correntes de fase, onde 1 delas é a limitada pelo LCC-NS; as 3 tensões em cada uma das cargas monofásicas; a tensão em cima dos terminais da fase em que foi aplicado o curto; com relação ao lado CC, além da corrente da fonte CC que passa pelo IGBT, foi medida a corrente do enrolamento CC (corrente de desmagnetização durante o curto) e a tensão neste enrolamento.

A apresentação dos resultados dos ensaios, cujos procedimentos experimentais foram descritos acima, será feita no próximo capítulo desta dissertação.

Capítulo 4

Resultados e discussões dos ensaios de curto-circuito

O capítulo em questão apresenta os resultados obtidos com os procedimentos experimentais realizados introduzidos no Capítulo 3. Ele abordará os resultados dos experimentos aplicando curto-circuito num sistema de teste de escala laboratorial reduzida com e sem a presença do LCC-NS. Os resultados dos ensaios que serão apresentados mostram testes de curto-circuitos monofásicos para o protótipo de LCC-NS conectado com apenas uma das fases ligadas à rede e com todas as fases conectadas.

A partir do ensaio de caracterização, foi possível observar que as bobinas e os núcleos estavam íntegros. Após esta etapa inicial, pôde-se dar início a montagem de um sistema de testes, em escala laboratorial, para a realização os ensaios aplicando um curto-circuito monofásico. A fim de analisar a influência da utilização do LCC-NS no sistema de testes, foi necessário realizar um ensaio aplicando o curto sem a presença do limitador na rede de modo a obter a corrente prospectiva do sistema (corrente ocasionada pelo curto sem o emprego de um limitador) e a queda de tensão da rede, conforme Figura 3.10.

Primeiramente ensaiou-se o LCC-NS apenas ligando uma de suas fases (um par de núcleos ferromagnéticos) por vez e aplicou-se o curto monofásico a fim de avaliar a capacidade de limitação das fases individualmente. Posteriormente, todas as fases do LCC-NS foram ligadas, denominando o teste aqui como ensaios trifásico, e o mesmo curto monofásico foi aplicado em cada fase separadamente. Vale ressaltar que o intervalo delimitado pela linha tracejada preta presente nas figuras representa a ocorrência do curto-circuito e, a corrente prospectiva levada em consideração para avaliar a influência da limitação do LCC-NS foi de $1225 A_{pico}$.

4.1 Ligação Monofásica

Esta seção apresentará os resultados dos ensaios de curto-circuito monofásico para apenas uma das fases do LCC-NS conectadas. As demais fases ficarão com seus enrolamentos em aberto. O diagrama esquemático da ligação deste ensaio está apresentado na Figura 3.11.

As Figuras 4.1 a 4.5 mostram resultados obtidos correspondentes aos da ligação com somente da fase A do LCC-NS conectada ao sistema e com ocorrência do curto-circuito na mesma. Nos instantes pré-falta e pós-falta, foi colocada uma carga resistiva que levava a passar uma corrente de $10 A_{pico}$ pelo protótipo. A contatora que emula o curto-circuito é fechada no instante de 0,1 s e o curto-circuito foi desfeito após 9 ciclos e meio. A Figura 4.1 apresenta a corrente prospectiva em vermelho e a limitada em verde para o ensaio. Pode-se observar que a limitação da corrente de curto-circuito com o emprego do LCC-NS já no primeiro pico do curto, com uma redução de 31,02%. Neste ensaio a corrente limitada chegou a $845 A_{pico}$. Após o transitório inicial, há uma redução na corrente de 58,11% da prospectiva para a limitada pela inserção da impedância do LCC-NS.

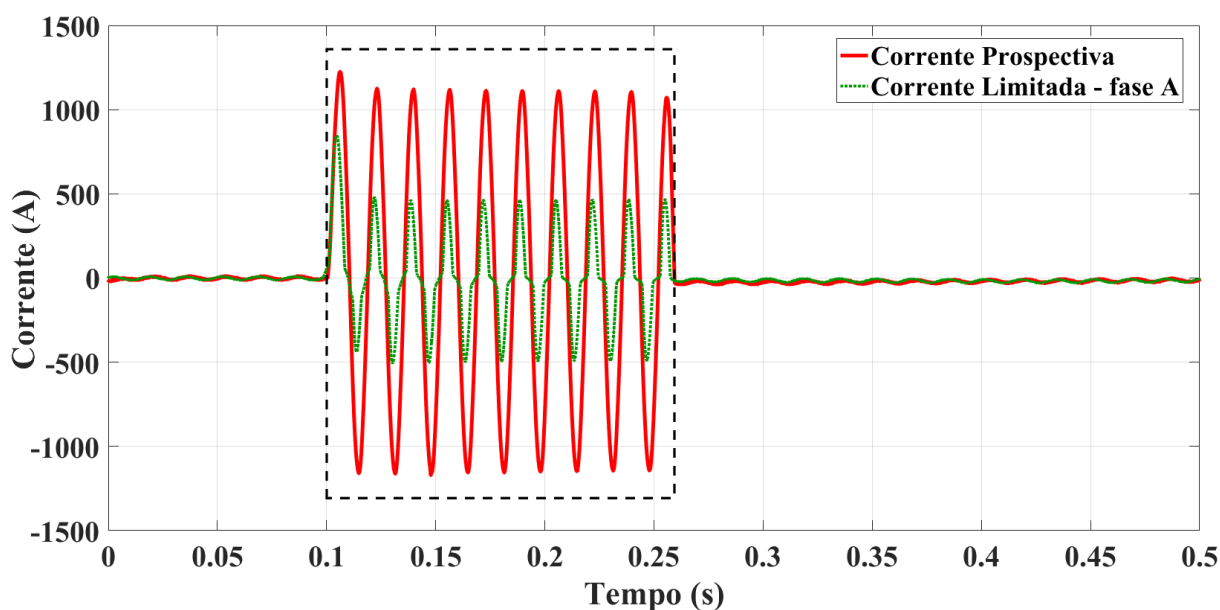


Figura 4.1: Correntes CA prospectiva x limitada do sistema com curto na fase A.

Com relação ao lado CC do LCC-NS, a Figura 4.2 apresenta a corrente presente que passa pelo IGBT, enquanto que a corrente presente na legenda dita como de desmagnetização é a corrente que passa pelo enrolamento CC propriamente e, durante o curto, essa corrente passa somente pelo circuito de desmagnetização dando origem ao seu nome e ao seu formato de onda, com base no circuito do lado CC visto na Figura 3.11. Após o final do curto, leva cerca de 0,2 s para o circuito CC voltar a saturar os núcleos ferromagné-

ticos. Em regime normal, sem ocorrência de curto-circuito, a corrente CC fica em 63 A saturando os núcleos.

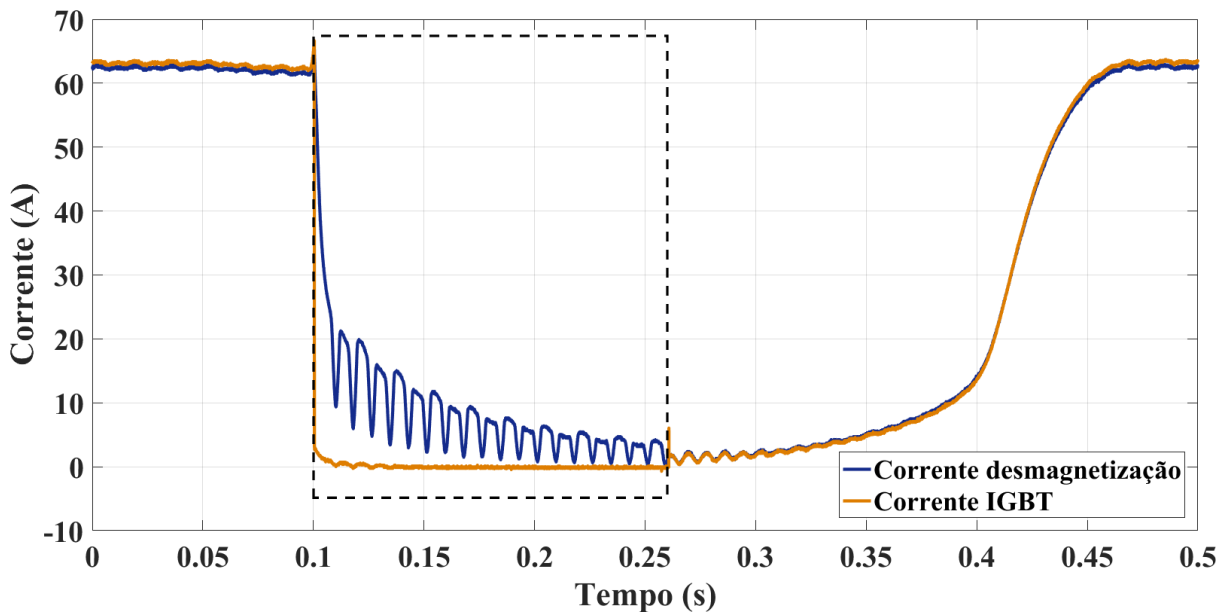


Figura 4.2: Correntes CC com curto na fase A.

Com a ligação de uma das fases do protótipo (fase A) no sistema de testes, as tensões obtidas na carga e nos terminais do limitador são exibidas na Figura 4.3. Com relação a tensão dos terminais do LCC-NS, é possível observar que sua amplitude aumenta durante o curto correspondente a atuação do LCC-NS na limitação da corrente. Um ponto a se destacar é que em operação normal, o limitador apresenta uma queda de tensão de $4,5 V_{pico}$ gerando uma potência de pico de 35 VA dissipada no LCC-NS.

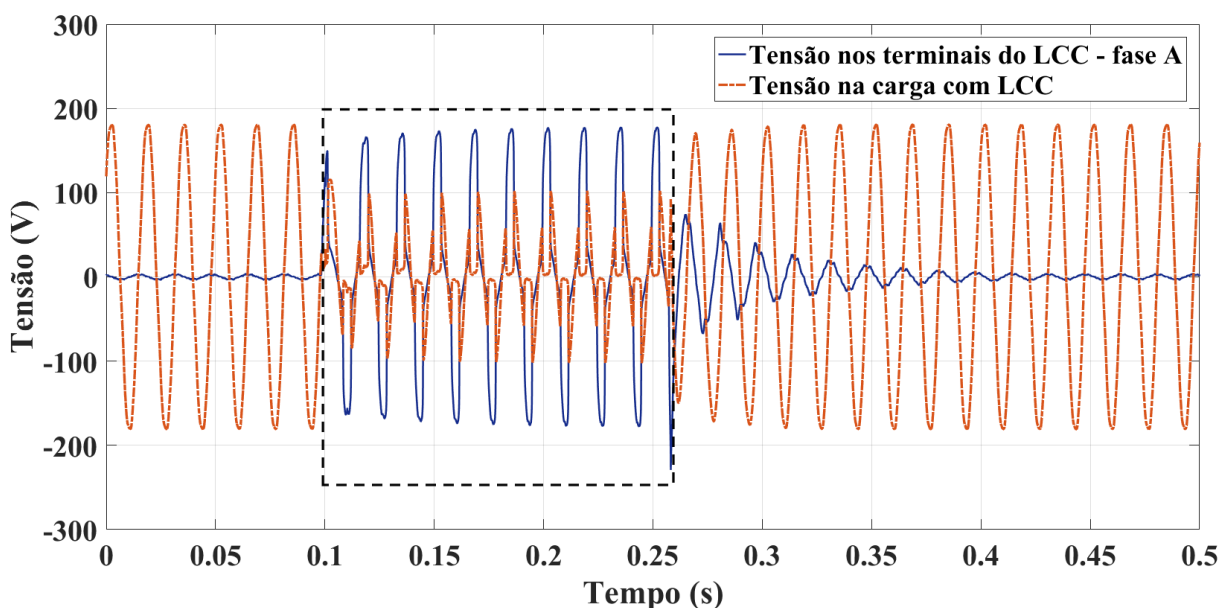


Figura 4.3: Tensões CA com curto na fase A.

A Figura 4.4 mostra um zoom do evento que foi apresentado na Figura 4.3. É possível observar a partir da Figura 4.4 uma queda no limitador e distorção da forma de onda da tensão da carga, que é resistiva. Devido a impedância de curto ser indutiva, além da própria presença do limitador, que também se comporta de maneira indutiva. Com relação a tensão nos terminais do LCC-NS, esta encontra-se correlata a forma de onda da corrente limitada e possui valor máximo de $177 V_{pico}$ em regime de curto.

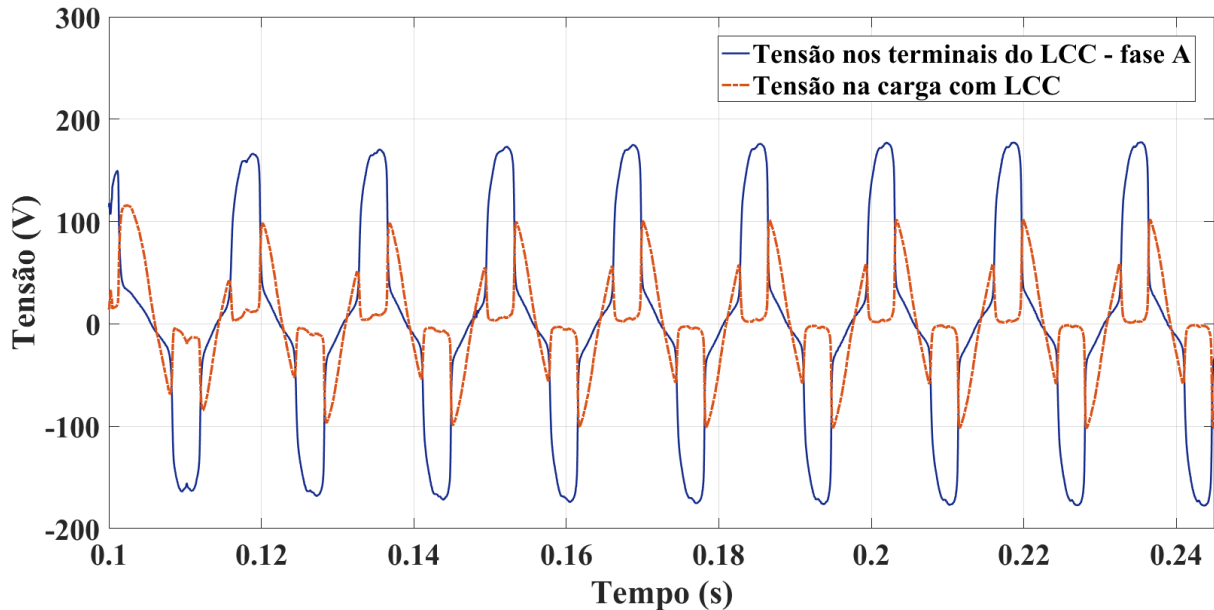


Figura 4.4: Zoom das tensões CA no curto na fase A.

Com base na Figura 4.4, a soma presente na Figura 4.5 é resultado da adição das duas curvas a fim de que a comparação com a tensão sem o limitador ocorresse nos mesmos pontos do sistema. É possível observar que com o uso do LCC-NS ainda que de forma monofásica reduziu consideravelmente a queda de tensão que o sistema sofreria, cerca de 40 V de diferença em regime de curto-circuito.

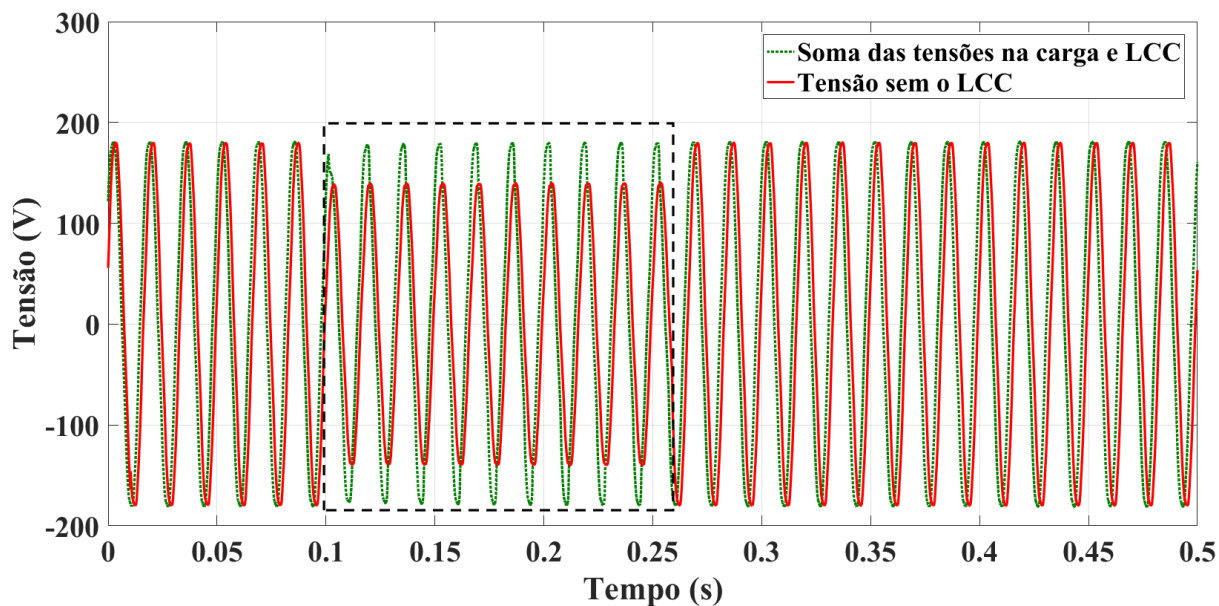


Figura 4.5: Tensões CA prospectiva x limitada com curto na fase A.

Com relação ao curto utilizando a fase B do LCC-NS, as Figuras 4.6 a 4.10 exibem os resultados adquiridos. A partir da Figura 4.6 pode-se notar que no primeiro pico do curto a corrente caiu de $1225 A_{pico}$ para $850 A_{pico}$, propiciando uma redução de 30,61%. Já em regime de curto, a limitação aumenta para 59,01% uma vez que a corrente limitada atinge $455 A_{pico}$. Em operação normal a corrente do sistema com o limitador foi de $9,5 A_{pico}$.

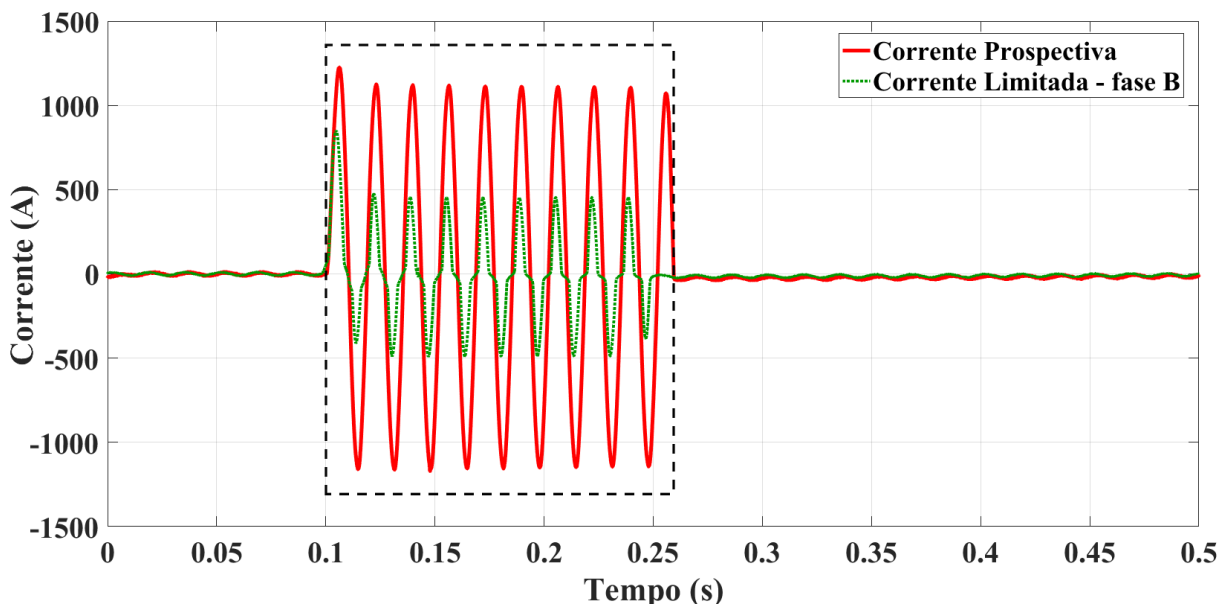


Figura 4.6: Correntes CA prospectiva x limitada do sistema com curto na fase B.

Analisando a Figura 4.7 correspondente as correntes do lado CC do limitador pode-se observar que o tempo de recuperação da corrente de saturação dos enrolamentos CC foi

de aproximados 0,2 s, de modo similar ao encontrado na fase A.

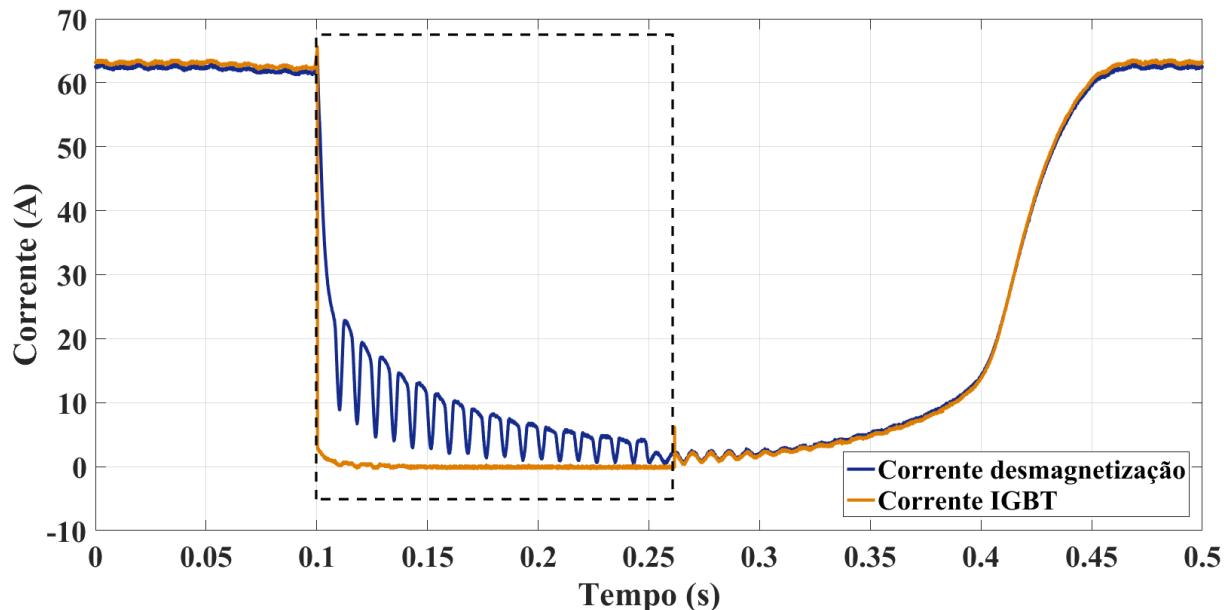


Figura 4.7: Correntes CC com curto na fase B.

A Figura 4.8 apresenta as tensões medidas com o emprego do LCC-NS na fase B. Pode-se notar que sem o curto a tensão em cima dos terminais do limitador foi de $3,6 V_{pico}$ ocasionando numa potência de pico de 34,2 VA. Já durante o curto, a tensão no LCC alcançou $177 V_{pico}$, sendo uma queda de aproximadamente 3 V em comparação com a tensão nominal.

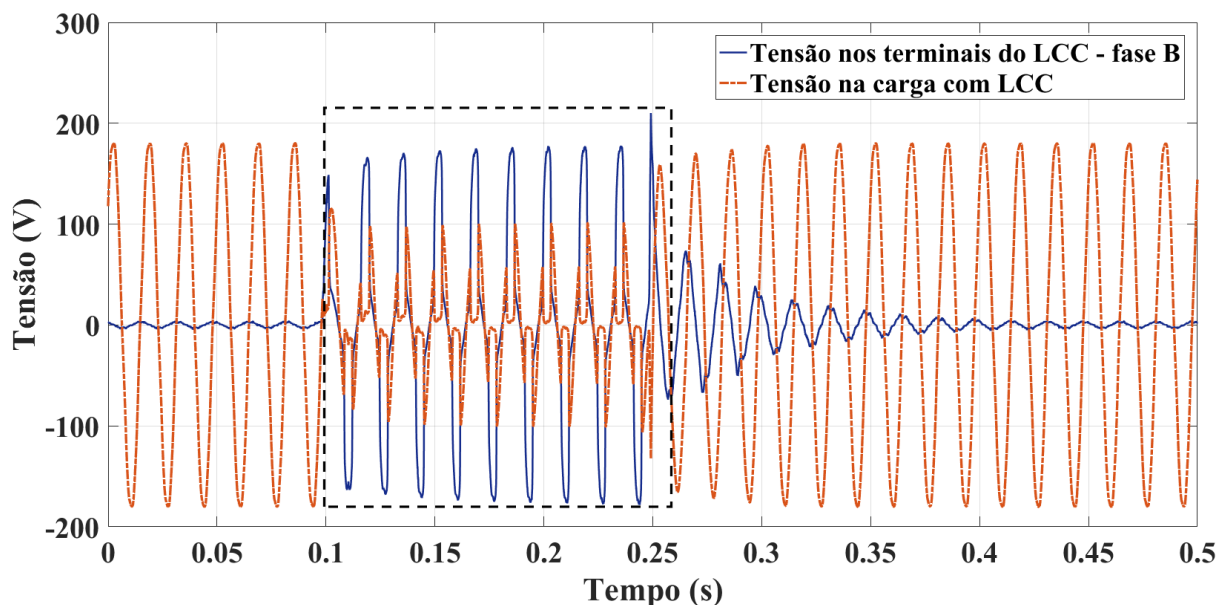


Figura 4.8: Tensões CA com curto na fase B.

A partir da Figura 4.9 pode-se observar como as formas de onda das tensões se cor-

relacionam de modo a prover ao sistema uma tensão estável, sendo possível melhor visualização na Figura 4.10.

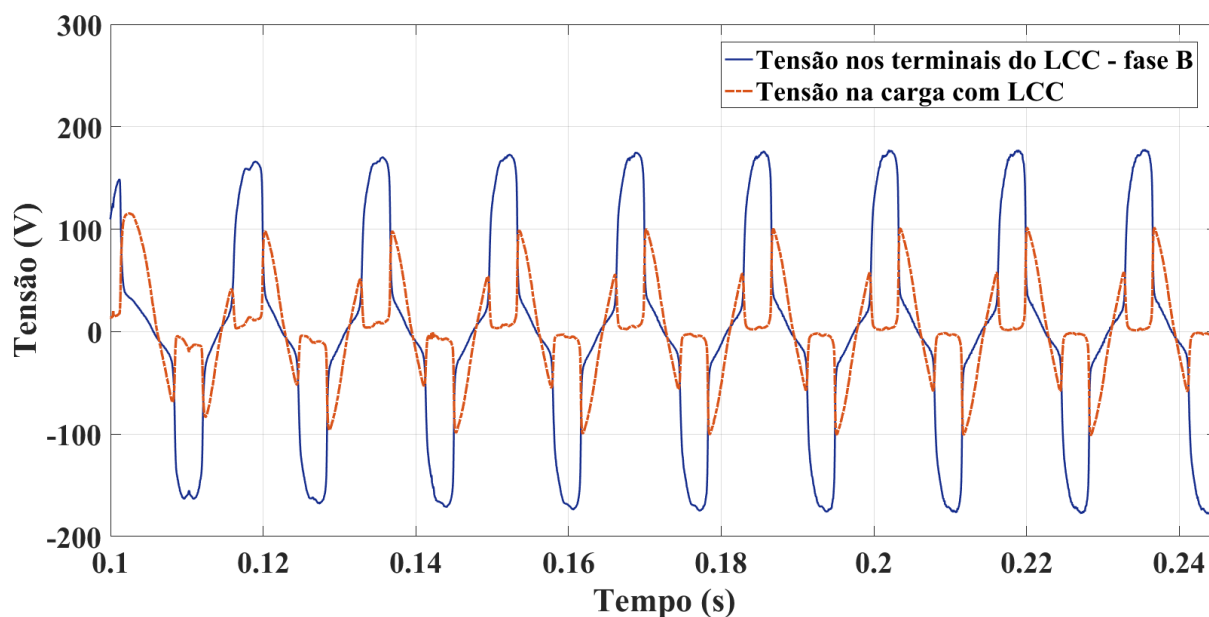


Figura 4.9: Zoom das tensões CA com curto na fase B.

Tendo em vista as tensões apresentadas na Figura 4.9, a sua soma pode ser observada na Figura 4.10 onde é comparada com a tensão prospectiva. É possível verificar que o uso do LCC-NS diminui a queda de tensão em torno de 40 V no regime de curto, assim como na fase A.

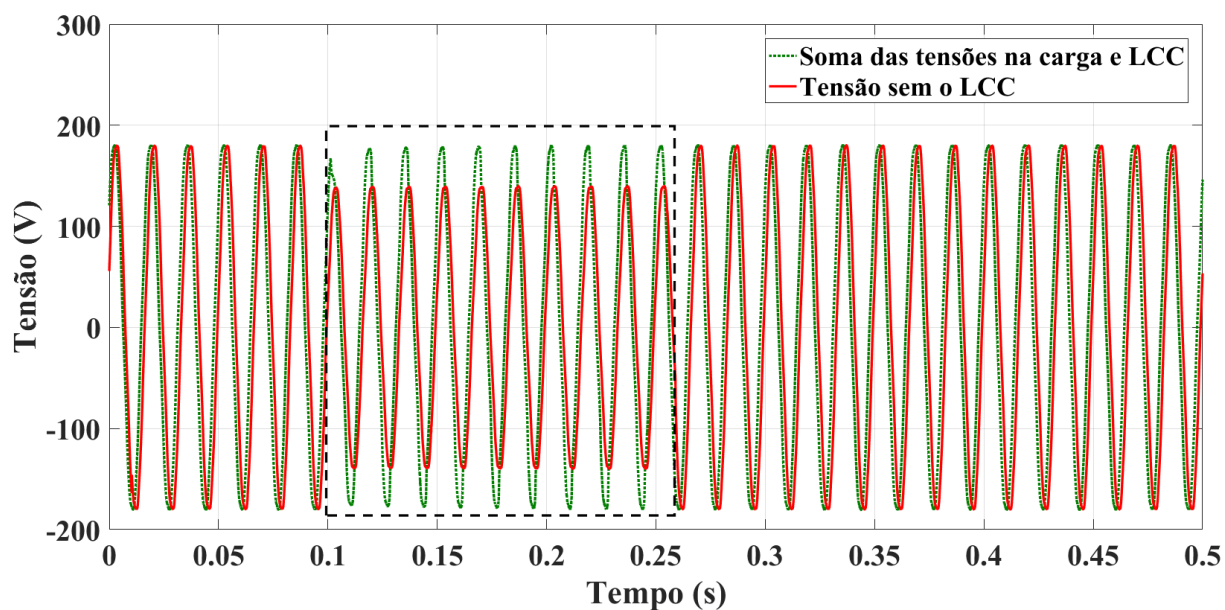


Figura 4.10: Tensões CA prospectiva x limitada com curto na fase B.

As Figuras 4.11 a 4.15 apresentam os resultados alcançados com o curto aplicado na

fase C do LCC-NS. Analisando o primeiro pico de curto-circuito na Figura 4.11, pode-se constatar que o limitador reduziu a corrente em 35,51%, de 1225 A_{pico} para 790 A_{pico} . A respeito do regime de curto, o LCC-NS limitou para 425 A_{pico} , proporcionando uma redução de 61,71% da corrente prospectiva, sendo a melhor limitação de todas as demais fases. Antes da ocorrência do curto, a corrente do sistema com o limitador era de 9,2 A_{pico} .

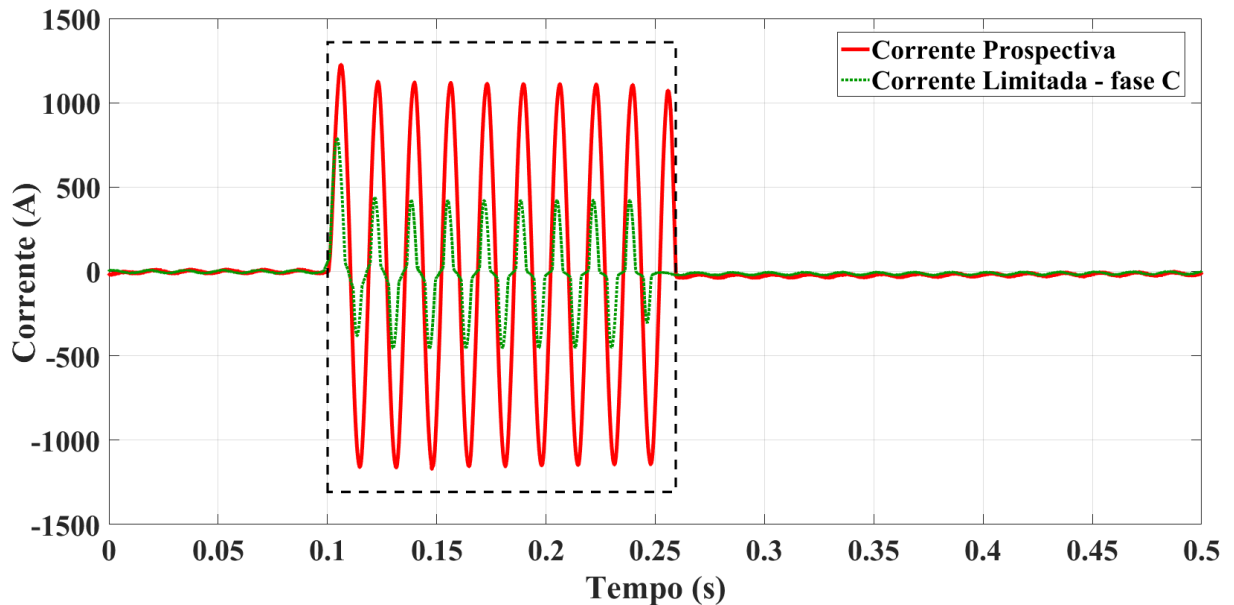


Figura 4.11: Correntes CA prospectiva x limitada do sistema com curto na fase C.

No que diz respeito ao lado CC do limitador para o curto na fase C, a Figura 4.12 apresenta as correntes no IGBT e de desmagnetização medidas. As correntes levam menos de 0,2 s para se recuperarem ao valor de saturação dos núcleos ferromagnéticos, tempo semelhante as demais fases.

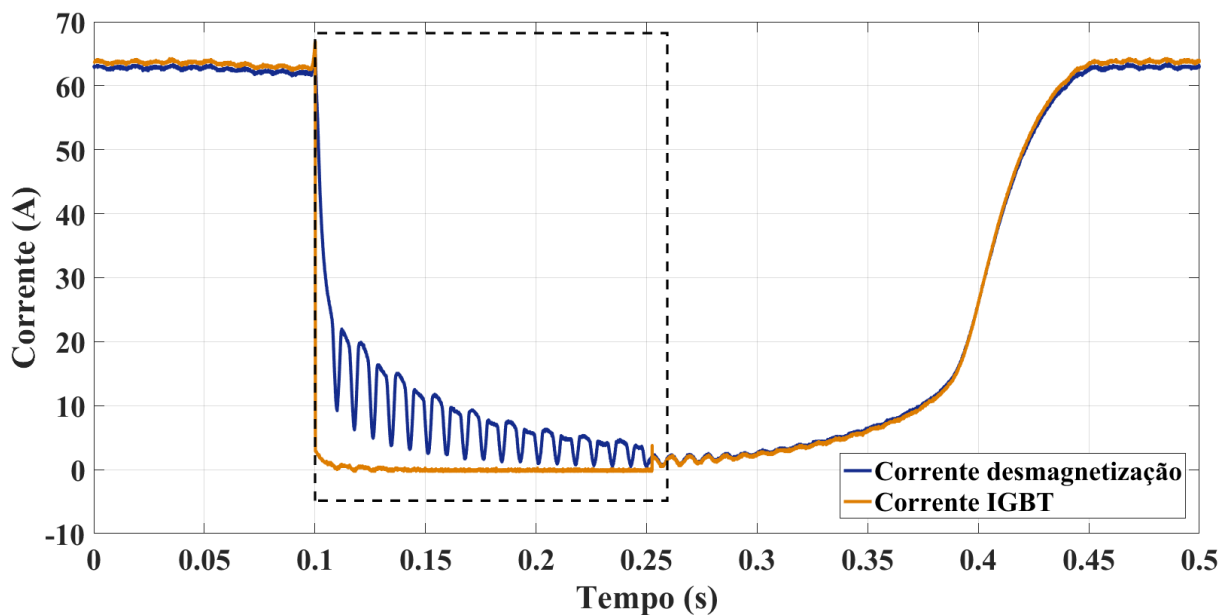


Figura 4.12: Correntes CC com curto na fase C.

As tensões medidas na fase C com o emprego do LCC-NS são apresentadas na Figura 4.13. Analisando a figura pode-se constatar que em operação normal a tensão nos terminais do limitador foi de $3,4 V_{pico}$ em regime normal de operação, ocasionando uma potência de pico de 31,28 VA.

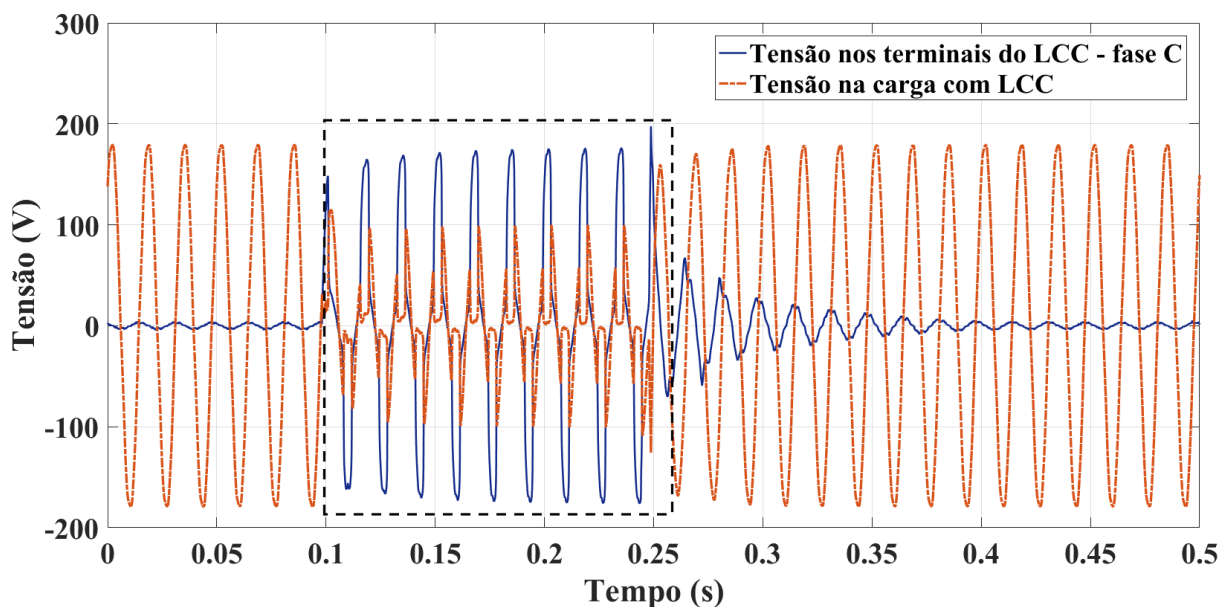


Figura 4.13: Tensões CA curto na fase C.

Examinando a Figura 4.14, a tensão de regime de curto no terminal do limitador foi de $175,6 V_{pico}$, promovendo a maior diferença com relação a tensão nominal das demais fases, mas isso se deve a limitação de corrente ter sido a maior dentre as fases.

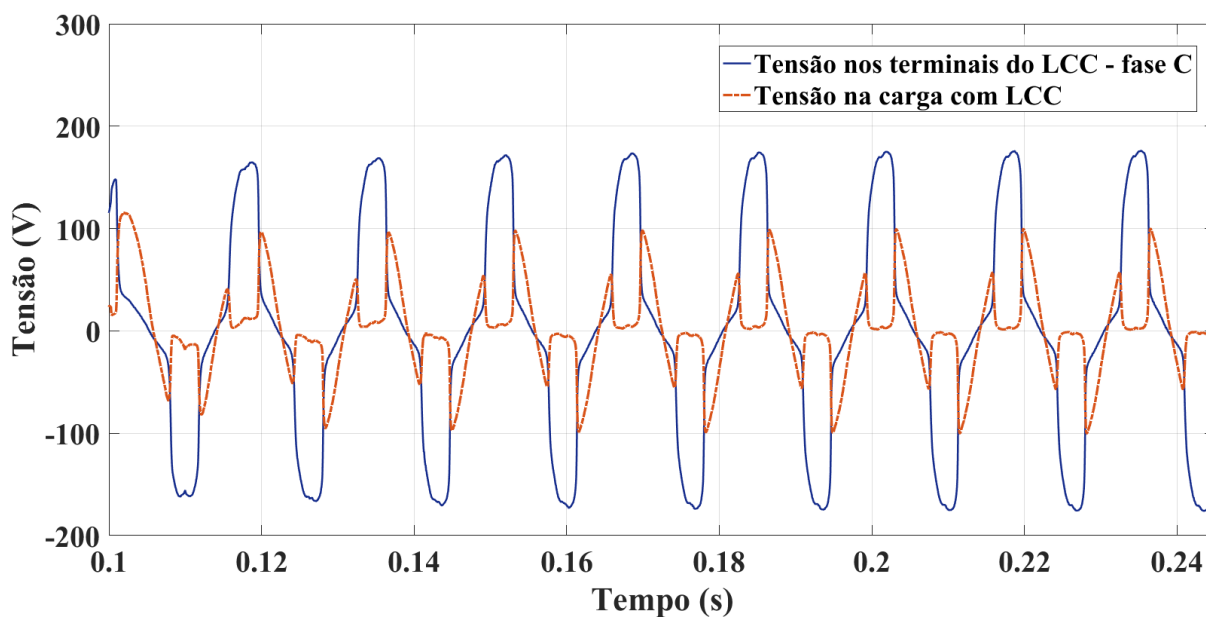


Figura 4.14: Zoom das tensões CA no curto na fase C.

Por meio da Figura 4.14, as tensões apresentadas foram somadas e comparadas com a tensão expostas na Figura 4.15. Pode-se notar que no regime de curto a tensão somada chega a $178,5 V_{pico}$, se contrapondo com os $140 V_{pico}$ da tensão prospectiva. Assim, a utilização do LCC-NS apresenta mais uma vantagem fora a limitação de corrente.

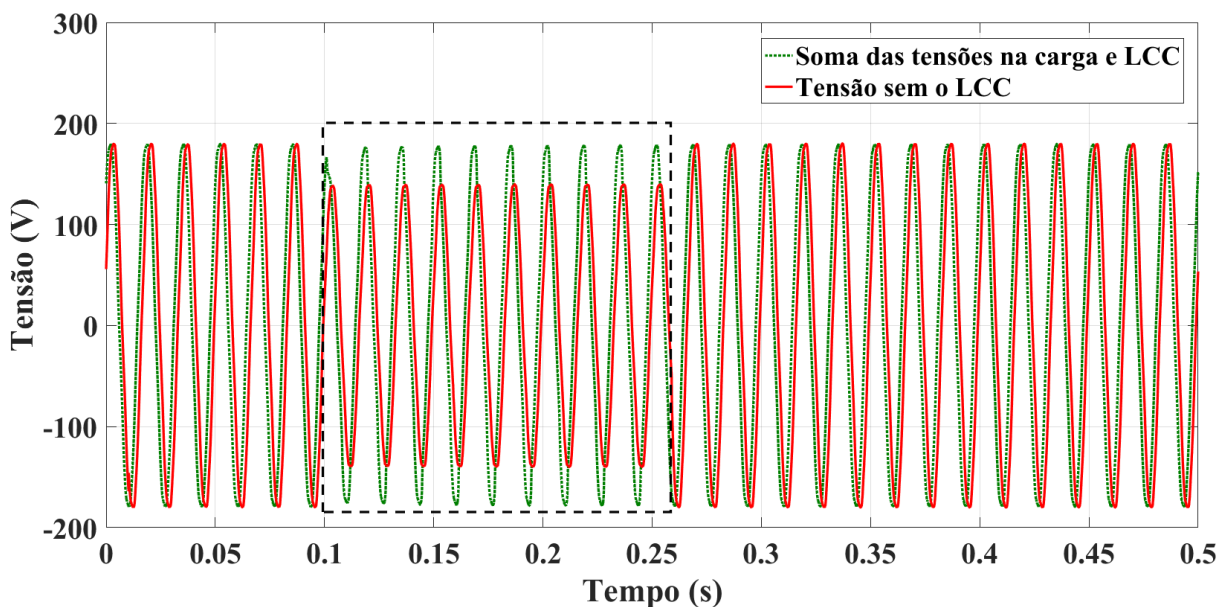


Figura 4.15: Tensões CA prospectiva x limitada com curto na fase C.

A partir da junção das Figuras 4.1, 4.6 e 4.11, a Figura 4.16 pode ser elaborada a fim de auxiliar na comparação entre as fases. Um ponto importante a destacar é que na fase A, por conta da contatora utilizada, o curto durou mais do que nas demais fases.

A partir da Figura 4.16 é possível constatar que há pequenas divergências entre as fases como pôde ser observado a partir dos resultados do ensaio de caracterização e com isso, há uma ligeira diferença entre as limitações ocorridas para um mesmo sistema de teste. A fase C foi a que alcançou uma maior limitação tanto no primeiro pico, 35,51%, como em regime de curto com relação a corrente prospectiva, 61,71%.

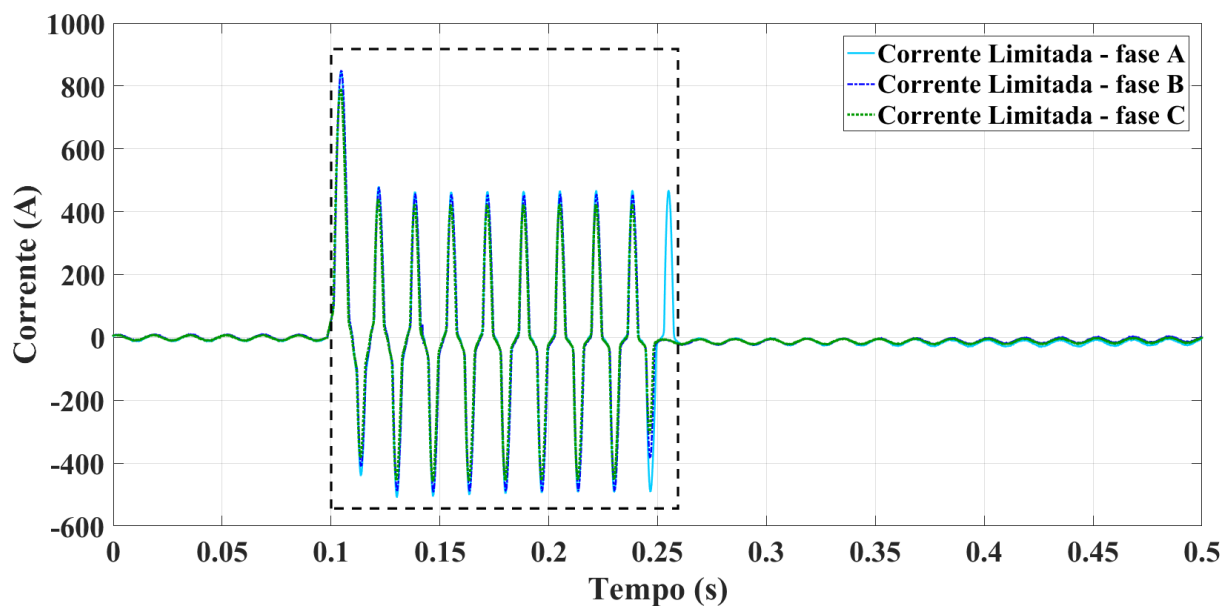


Figura 4.16: Comparação entre as fases das correntes limitadas com ligação monofásica do LCC-NS.

4.2 Ligação Trifásica

Alimentando o protótipo LCC-NS de maneira trifásica, reproduziu-se o mesmo curto-circuito monofásico em cada uma das 3 fases e os resultados obtidos serão apresentados nesta seção. Vale ressaltar que por limitações laboratoriais o ensaio de corrente e tensão prospectivas não foi realizado. Porém, as comparações realizadas serão com base na corrente prospectiva de $1225 A_{pico}$ para o primeiro pico e $1110 A_{pico}$ em regime de curto, uma vez que a impedância de curto e a contatora utilizada foram as mesmas do ensaio com ligação monofásica do limitador.

Um ponto importante é que as janelas de curto presente nas figuras de correntes são diferentes das janelas das figuras de tensão devido a utilização de 2 osciloscópios diferentes a fim de se conseguir adquirir todas as curvas apresentadas. No entanto, a janela possui o mesmo tamanho, somente está deslocada.

As Figuras 4.17 a 4.21 exibem os resultados obtidos com o curto monofásico na fase A

do LCC-NS. Na Figura 4.17 pode-se observar as correntes das 3 fases, sendo que a da fase A é limitada já no primeiro pico, apresentando uma redução de $1225 A_{pico}$ para $760 A_{pico}$, equivalente a uma limitação de 37,96%. Com relação ao regime de curto, essa redução chegou a 60,68%.

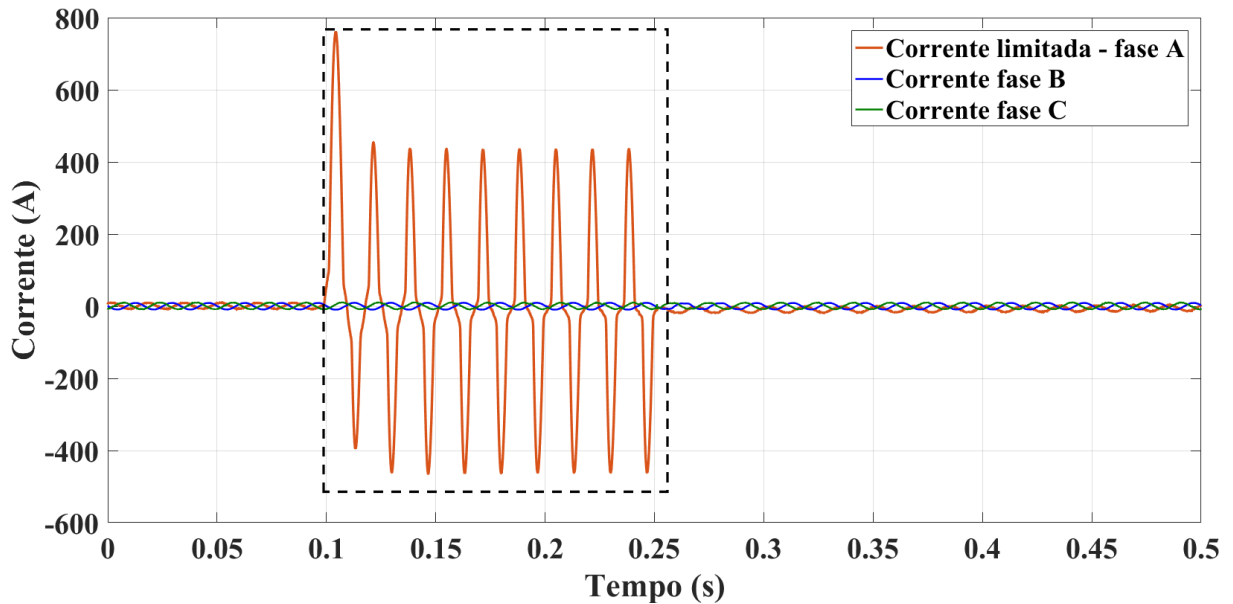


Figura 4.17: Correntes CA do sistema com curto na fase A.

Com relação ao lado CC do LCC-NS com o curto na fase A, a Figura 4.18 apresenta além das correntes no IGBT e de desmagnetização a tensão nos enrolamento CC. A partir dessa figura pode-se notar, durante o curto, que o comportamento da tensão induzida no enrolamento CC é similar ao da corrente neste enrolamento todavia no sentido contrário. Essa tensão induzida atinge o valor de - 92,3 V. Provavelmente a tensão CC que aparece antes do curto se deve a problemas no circuito de magnetização do lado CC assim como divergência construtivas entre as fases. Analisando as correntes, leva cerca de 0,21 s para voltarem a valores para saturação dos núcleos ferromagnéticos.

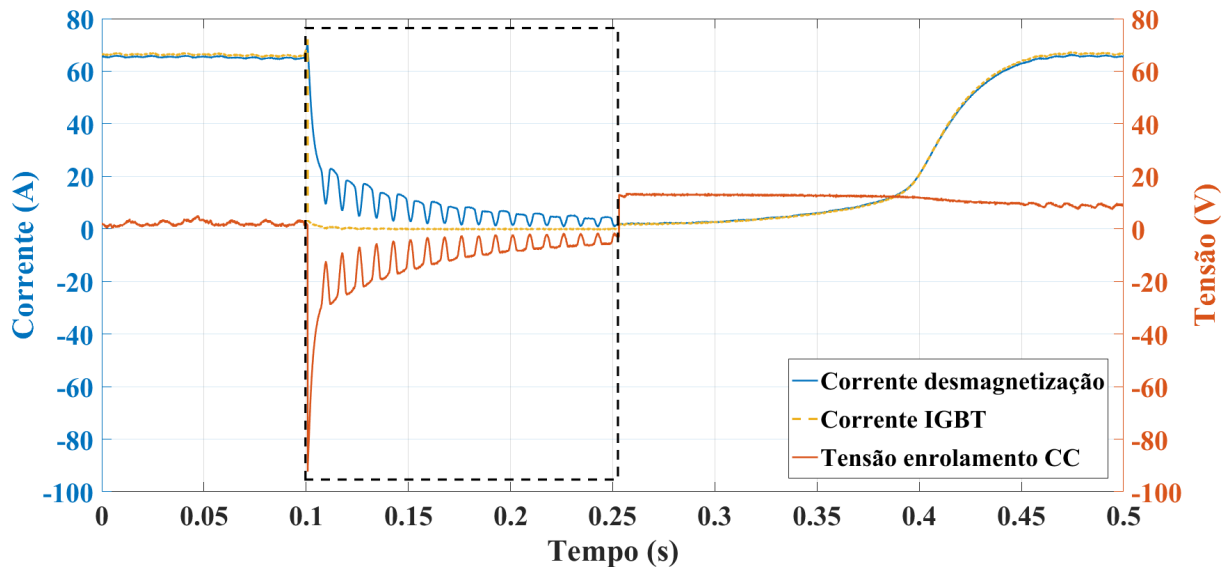


Figura 4.18: Correntes e tensão CC com curto na fase A.

A Figura 4.19 mostra que a tensão nos terminais do limitador em regime normal é de $5 V_{pico}$, proporcionando uma potência de pico de 45 VA. Em regime de curto, essa tensão atinge a $178 V_{pico}$.

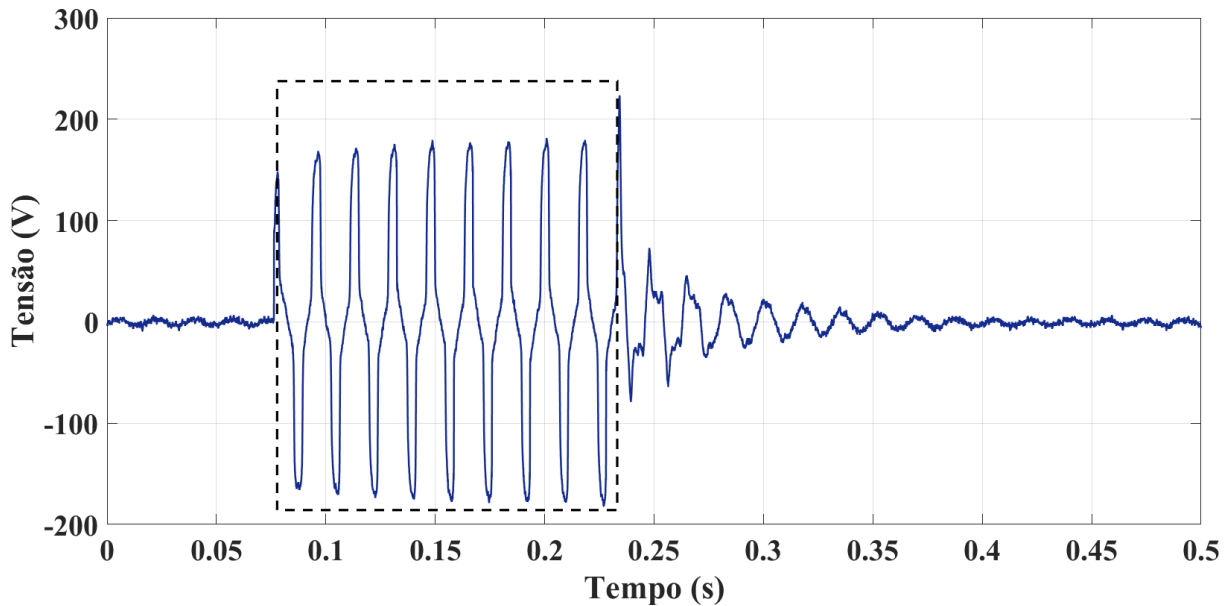


Figura 4.19: Tensão nos terminais do LCC-NS com curto na fase A.

Analisando as tensões das cargas nas 3 fases apresentada na Figura 4.20, pode-se dizer que durante o curto na fase A as demais tem suas amplitudes ligeiramente aumentadas, cerca de 3 V e a fase C foi distorcida como pode ser melhor analisado na Figura 4.21.

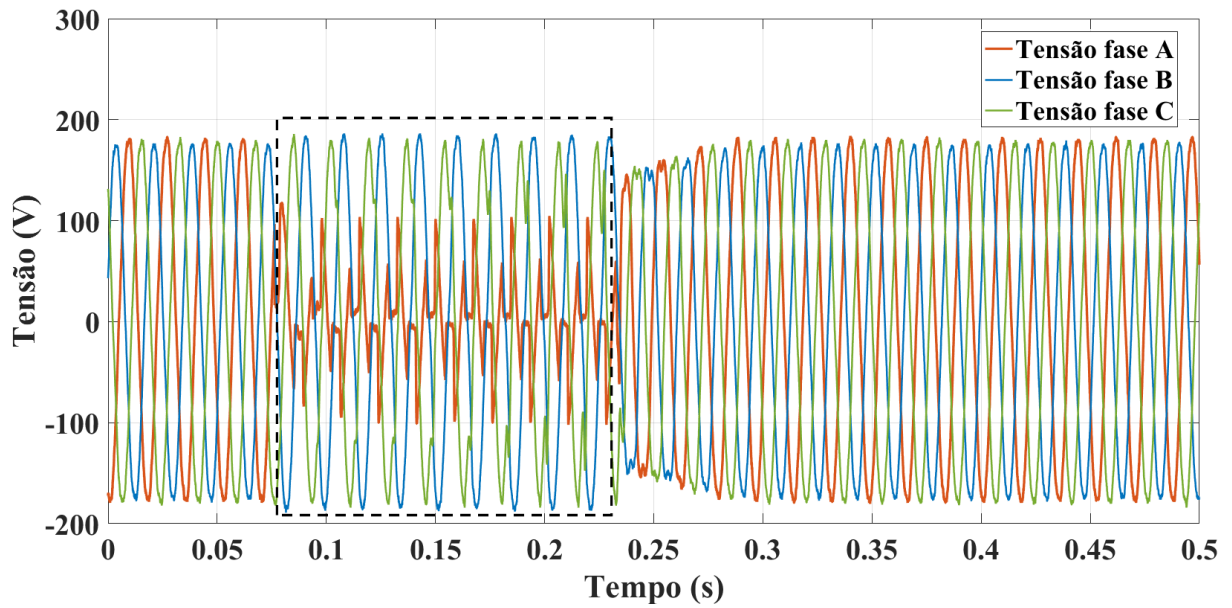


Figura 4.20: Tensões CA com curto na fase A.

Com base na Figura 4.21, pode-se ter uma melhor análise da distorção na fase C, ocasionada pelo curto na fase A, uma vez que a sequência de fase do sistema é CBA. Esta observação se mostrará mais aparente nos resultados dos curtos nas outras fases a serem apresentadas nesta seção.

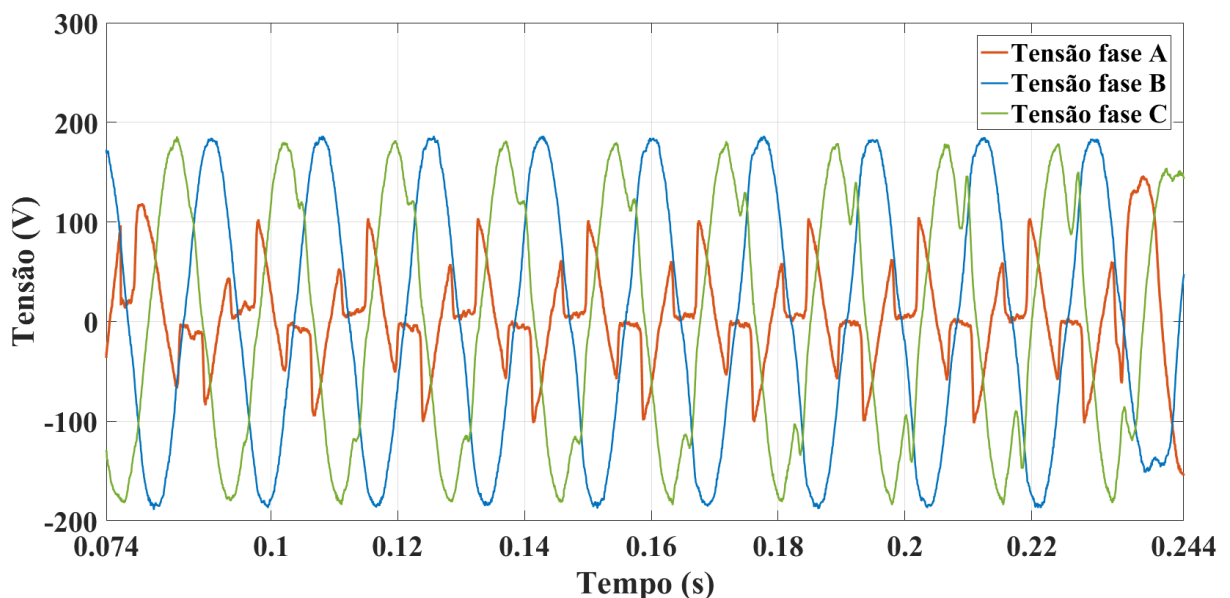


Figura 4.21: Zoom das tensões CA durante o curto na fase A.

Os resultados adquiridos pelo curto na fase B encontram-se nas Figuras 4.22 a 4.26. Com base na Figura 4.22, é possível notar que a corrente limitada de B no primeiro pico foi a $813 A_{pico}$ e a redução no regime de curto chegou a 61,17%.

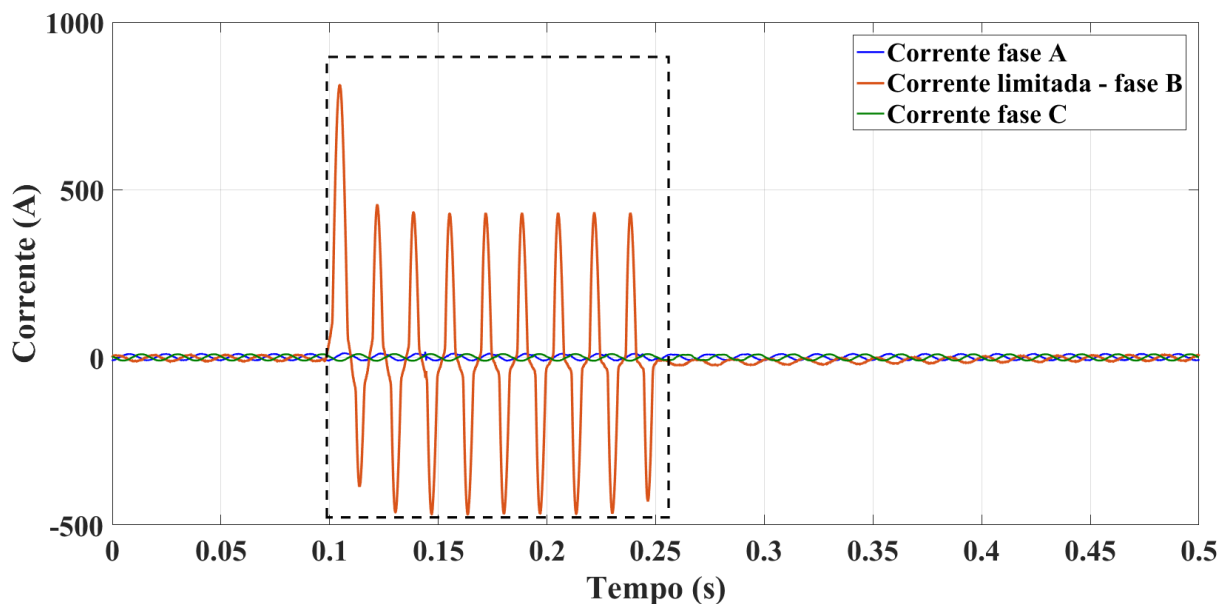


Figura 4.22: Correntes CA do sistema com curto na fase B.

Ao reparar a Figura 4.23, é possível observar que a tensão induzida no enrolamento CC no curto alcançou o valor de $-86,67\text{ V}$. Nesta Figura, também fica notório que após o curto o sistema de detecção de curto demorou alguns ms para constatar que a falta tinha sido extinta, e assim o IGBT pôde voltar a ser fechado.

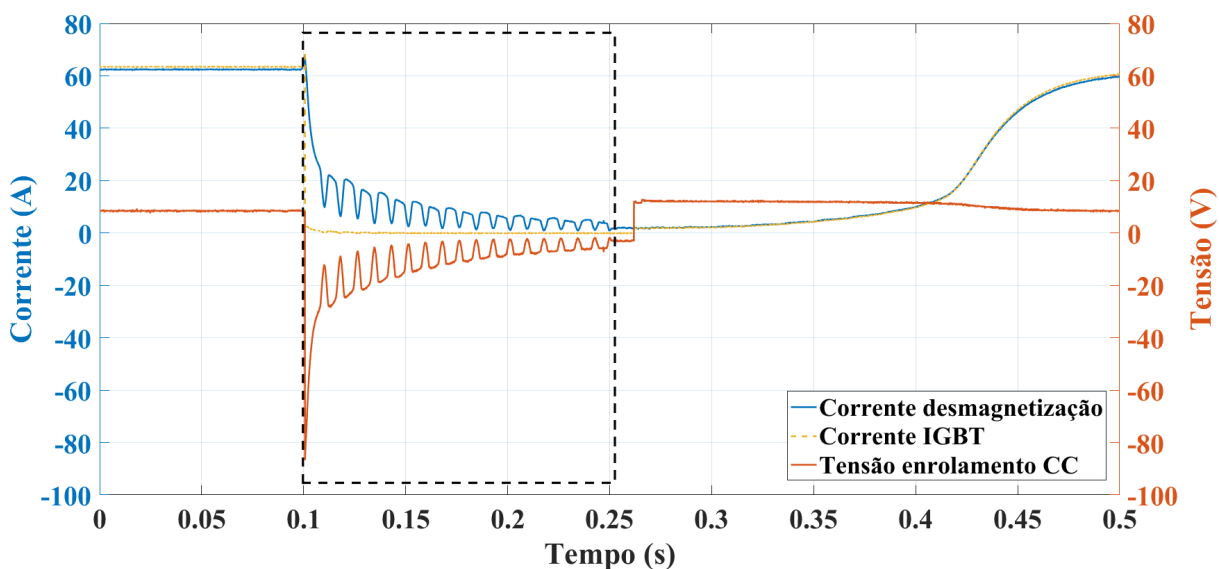


Figura 4.23: Correntes e tensão CC com curto na fase B.

A tensão dos terminais do LCC-NS da fase B encontra-se exposta na Figura 4.24. Por meio desta Figura pode-se observar que a tensão em regime de curto chega a 178 V_{pico} . No entanto, em regime normal, a tensão é de $4,8\text{ V}_{pico}$ e assim a potência de pico consumida pelo limitador é de $52,8\text{ VA}$ em operação normal.

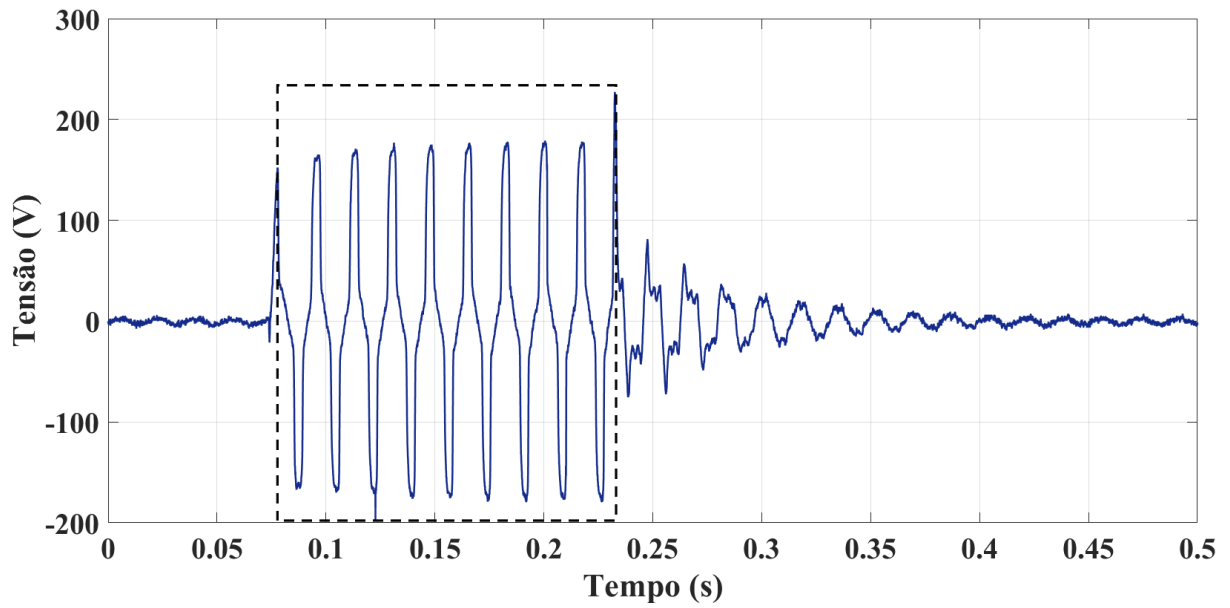


Figura 4.24: Tensão nos terminais do LCC-NS com curto na fase B.

As Figuras 4.25 e 4.26 apresentam as tensões CA medidas nas cargas de cada fase. Com base na Figura 4.25 é possível observar que com o curto-circuito na fase B as demais fases sofreram distorções tanto nas amplitudes como nas formas de onda. Com a Figura 4.26 ficam mais nítidas as distorções encontradas.

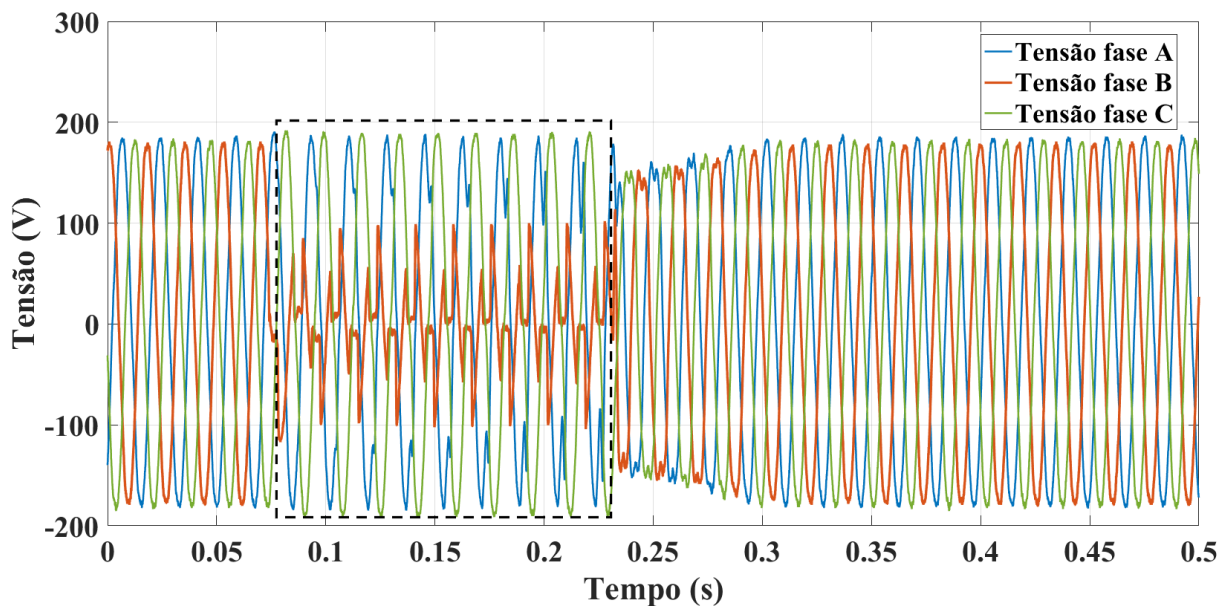


Figura 4.25: Tensões CA com curto na fase B.

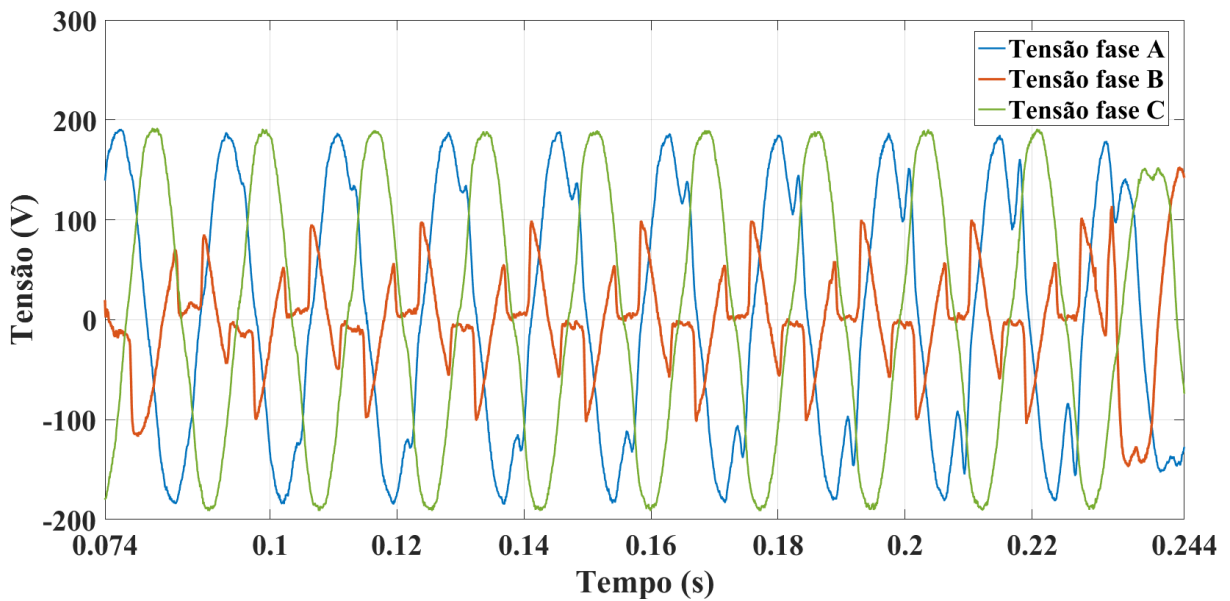


Figura 4.26: Zoom das tensões CA durante o curto na fase B.

Os resultados obtidos pelo curto na fase C encontram-se nas Figuras 4.27 a 4.31. A Figura 4.27 exibe as correntes, onde é possível notar que a corrente limitada da fase B no primeiro pico apresentou uma redução de 29,80%, enquanto no regime de curto chegou a 69,19%. A fase C foi a que teve pior resultado com o LCC-NS ligado de forma trifásica em relação as demais fases.

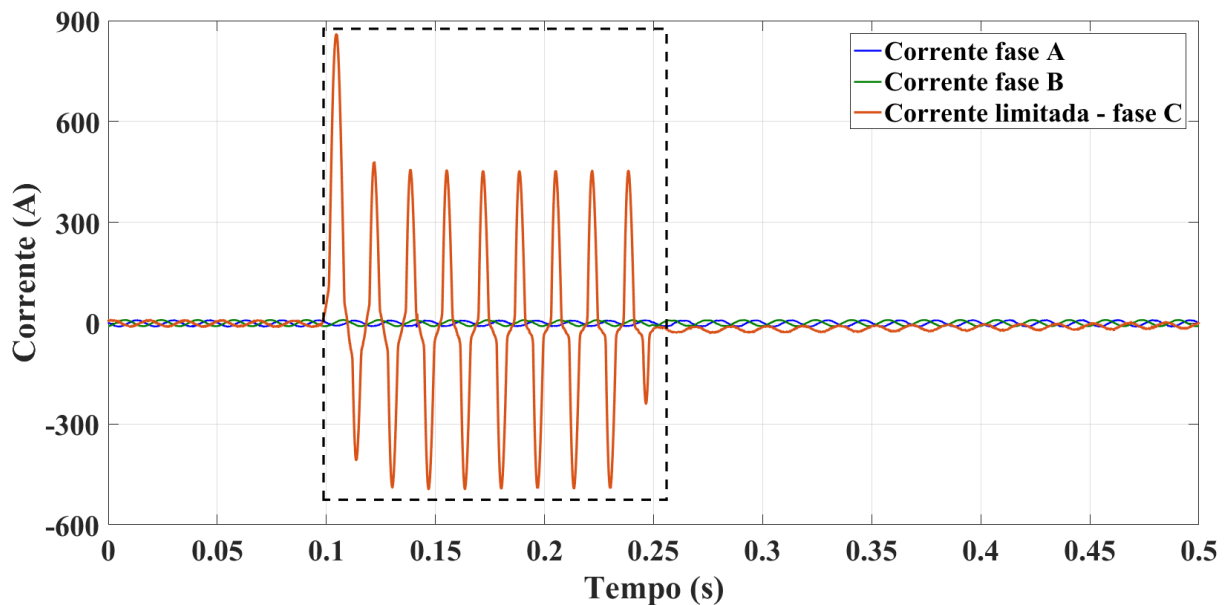


Figura 4.27: Correntes CA do sistema com curto na fase C.

Tendo em vista o lado CC do limitador, a Figura 4.28 exibe os resultados adquiridos com o curto na fase C. Nela é possível observar que a tensão do enrolamento CC chega

a - 90 V no início do curto-circuito. Já as correntes levam aproximadamente 0,22 s para retornarem ao valor de saturação dos núcleos ferromagnéticos.

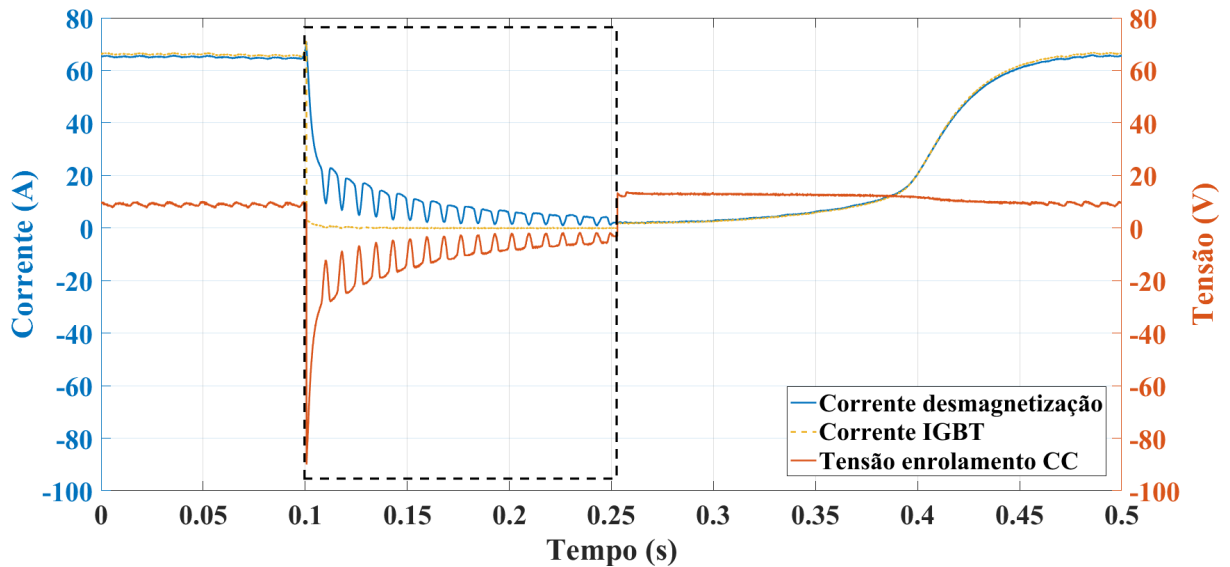


Figura 4.28: Correntes e tensão CC com curto na fase C.

Com base na Figura 4.29, a tensão nos terminais da fase C do limitador em regime normal de operação do sistema foi de $4,5 V_{pico}$ resultando numa potência de pico de 45,5 VA. Com relação ao regime de curto, essa tensão chegou a $178 V_{pico}$.

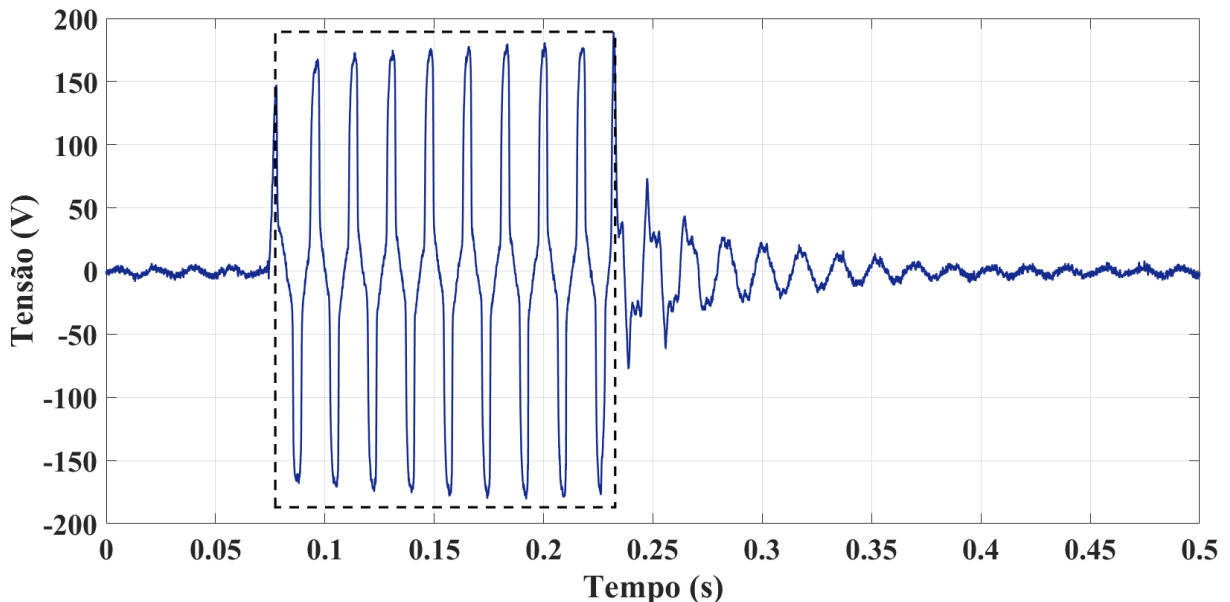


Figura 4.29: Tensão nos terminais do LCC-NS com curto na fase C.

Assim como ocorreu nos curtos das demais fases, as Figuras 4.30 e 4.31 apresentam distorções nas formas de onda das fases que não sofreram o curto-circuito, no caso as fases

A e B. Além disso, também pôde-se observar que após a extinção do curto demorou cerca de 0,075 s para que as tensões nas 3 fases voltassem aos valores nominais.

Vale ressaltar que na ocorrência de um curto monofásico, a fase subsequente, na sequência de fase, a qual sofreu a falta é a sofre mais distorção em seu formato de onda.

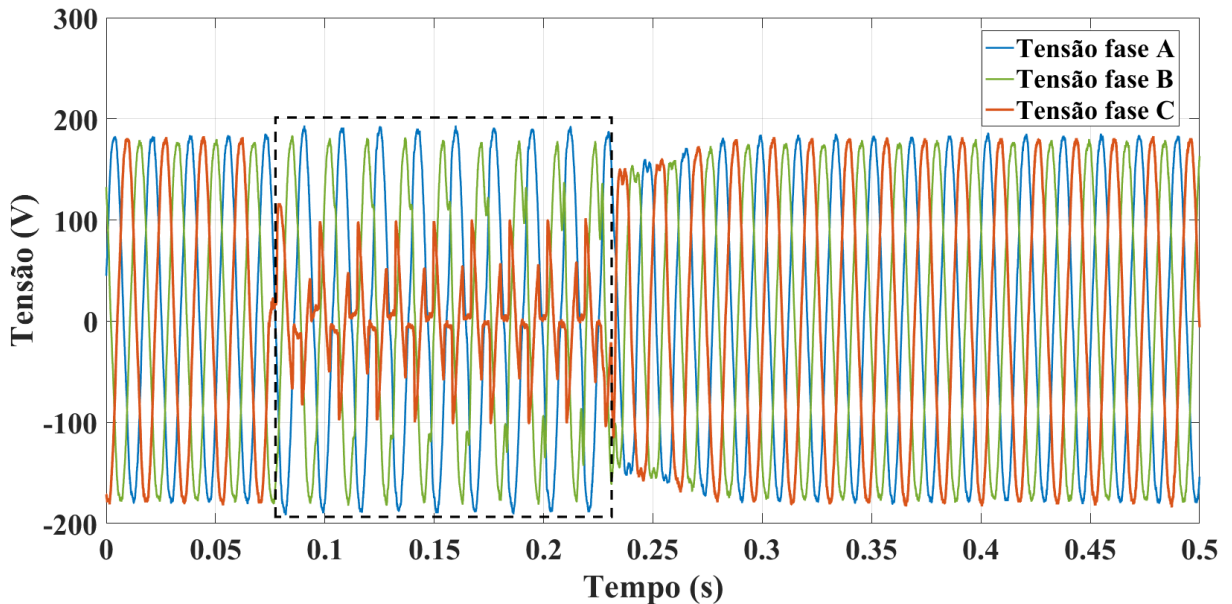


Figura 4.30: Tensões CA com curto na fase C.

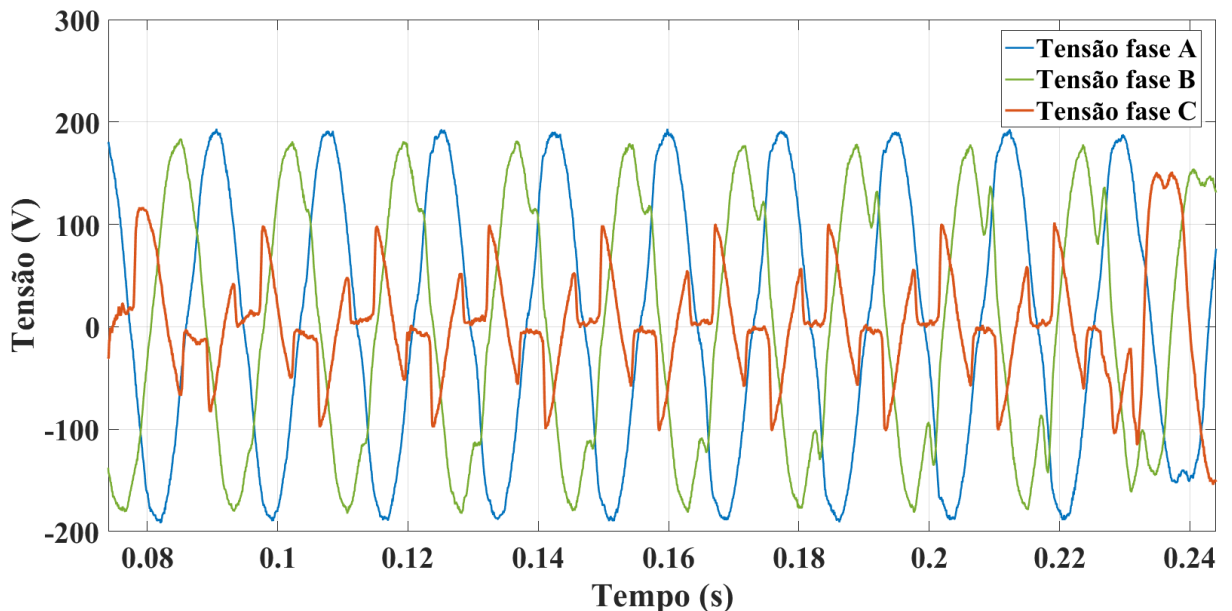


Figura 4.31: Zoom das tensões CA durante o curto na fase C.

A Figura 4.32 é composta pelas correntes limitadas nas Figuras 4.17, 4.22 e 4.27. Com a ligação trifásica do LCC-NS, a fase A foi a que melhor limitou a corrente de curto-

circuito tanto no primeiro pico como no regime de curto. As divergências encontradas entre correntes limitadas mostra que as fases não são 100% iguais construtivamente.

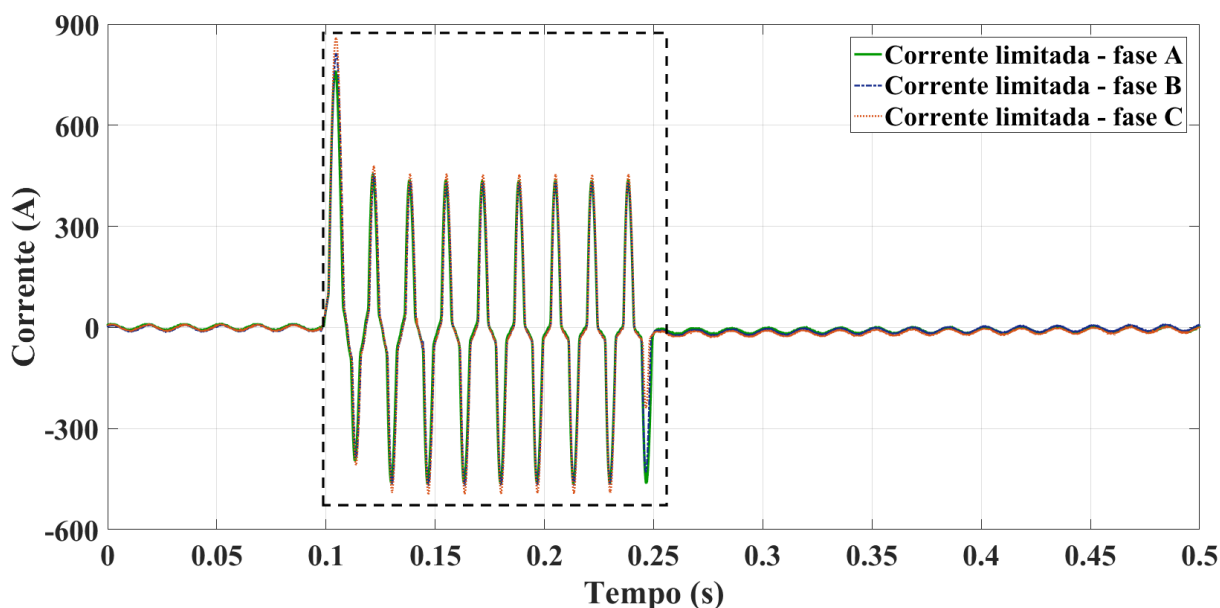


Figura 4.32: Comparação das correntes limitadas.

4.3 Resumo dos resultados

A Tabela 4.1 congrega todos os resultados obtidos das correntes da rede tendo em vista o emprego do LCC-NS. Em verde encontram-se os melhores valores de limitação da corrente de curto-circuito tanto no primeiro pico da falta como quando esta encontrava-se em regime de curto. Enquanto os valores em vermelho representam os piores percentuais de redução alcançados, no entanto, não significam que são valores baixos de limitação.

Tabela 4.1: Tabela comparativa dos resultados das correntes obtidos

Corrente	Ligação Monofásica do LCC-NS				Ligação Trifásica do LCC-NS			
	1° pico curto-circuito (A)	Limitação (%)	Regime de curto-circuito (A)	Limitação (%)	1° pico curto-circuito (A)	Limitação (%)	Regime de curto-circuito (A)	Limitação (%)
Prospectiva	1225	-	1110	-	-	-	-	-
Limitada com curto na Fase A	845	31,02	465	58,11	760	37,96	436,5	60,68
Limitada com curto na Fase B	850	30,61	455	59,01	813	33,63	431	61,17
Limitada com curto na Fase C	790	35,51	425	61,71	860	29,80	453	59,19

A partir dos resultados apresentados neste capítulo, é possível afirmar que o protótipo trifásico de LCC-NS estudado é capaz de limitar um curto-circuito monofásico seja

este dispositivo ligado de forma monofásica ou trifásica. Para a ligação monofásica do limitador, a maior redução da corrente de curto do sistema medida, em comparação com a corrente prospectiva, chegou a 35,51% no primeiro pico enquanto que com a ligação trifásica a limitação máxima foi de 37,96%.

Pode-se constatar que ao ligar as 3 fases do protótipo na rede, o desempenho do limitador foi superior com relação a diminuição da corrente de curto. No entanto, vale ressaltar que os resultados obtidos com a ligação monofásica do LCC-NS alcançaram valores na mesma ordem de grandeza que os com a ligação trifásica do protótipo.

4.4 Análises da Distorção Harmônica

A partir dos resultados obtidos neste capítulo, pôde-se analisar as formas de onda da corrente com relação aos espectros harmônicos de modo a calcular a sua DHT durante o regime de curto-circuito tanto com a ligação monofásica quanto com a trifásica do protótipo de LCC-NS na rede de teste. Isto foi possível através do cálculo das amplitudes por meio da transformada de Fourier levando em consideração as frequências desejadas como múltiplos da frequência da rede ($f=60$ Hz).

Com base nas amplitudes obtidas dos espectros da corrente e aplicando os valores na Equação 4.1, onde o n_{max} selecionado foi 23, pôde-se calcular a DHT da corrente limitada durante o regime do curto para cada ensaio realizado. Foi

$$DHT_i = \frac{100 \sqrt{\sum_{h \neq 1}^{n_{max}} I_h^2}}{I_1}. \quad (4.1)$$

A Tabela 4.2 apresenta os valores das amplitudes e ângulos dos espectros da corrente para os curtos com a ligação monofásica do protótipo LCC-NS na rede de teste. Por meio da Equação 4.1, a DHT_i para as fases A, B e C foram de 50,14%, 50,63% e 51,07%, respectivamente.

Tabela 4.2: Espectros harmônicos da corrente com a Ligação monofásica do LCC-NS e curto nas fases A, B e C

Componente Harmônica	Frequência (Hz)	Curto na Fase A		Curto na Fase B		Curto na Fase C	
		Amplitude	Ângulo (°)	Amplitude	Ângulo (°)	Amplitude	Ângulo (°)
Termo CC	0	11,60	270,0	16,38	270,0	13,95	270,0
Fundamental	60	320,76	-4,9	313,74	-8,4	290,88	-3,2
2	120	45,48	167,5	44,24	162,7	40,88	172,5
3	180	148,86	165,8	147,17	155,4	137,77	170,9
4	240	26,47	-13,7	26,06	-29,1	24,26	-7,7
5	300	16,65	9,7	17,09	-8,4	16,40	15,2
6	360	10,23	-75,9	10,14	264,2	8,94	-63,1
7	420	18,31	-61,2	18,34	-84,2	17,13	-46,8
8	480	9,54	131,3	9,13	101,0	8,95	143,0
9	540	2,26	189,3	2,23	164,2	2,34	190,6
10	600	6,44	93,2	6,02	58,8	5,64	109,8
11	660	4,63	98,5	4,56	62,3	4,48	118,9
12	720	4,30	-79,5	4,53	242,7	4,23	-57,0
13	780	0,44	41,8	0,45	-45,2	0,28	-3,4
14	840	4,29	237,7	4,13	191,0	3,57	260,9
15	900	0,98	231,0	1,01	196,3	0,80	258,9
16	960	1,94	84,9	1,76	26,3	2,11	104,4
17	1020	0,14	202,5	0,32	221,0	0,05	-42,3
18	1080	2,33	31,5	2,38	-37,5	2,21	64,5
19	1140	0,46	214,7	0,63	171,4	0,63	237,4
20	1200	1,08	232,6	1,15	192,0	0,90	265,9
21	1260	0,70	166,0	0,38	92,0	0,50	199,8
22	1320	1,52	183,7	1,58	108,3	1,45	225,8
23	1350	0,51	5,5	0,61	261,9	0,65	74,4

As Tabelas 4.3 a 4.5 apresentam os resultados durante o curto-circuito monofásico para a ligação trifásica do LCC-NS. Com base na Tabelas 4.3 pode-se calcular a DHT_i da fase em que ocorre o curto, que no caso é a fase A, e nas demais. As porcentagens de DHT_i foram 46,98%, 7,15% e 22,99% nas fases A, B e C respectivamente.

Tabela 4.3: Espectros harmônicos da corrente nas fases A, B e C com curto na fase A

Componente Harmônica	Frequência (Hz)	Fase A		Fase B		Fase C	
		Amplitude	Ângulo (°)	Amplitude	Ângulo (°)	Amplitude	Ângulo (°)
Termo CC	0	13,07	270,0	0,02	270,0	0,70	90,0
Fundamental	60	309,76	19,8	9,39	210,4	8,71	-36,0
2	120	17,00	217,3	0,23	28,1	0,29	183,5
3	180	141,43	239,6	0,40	114,6	1,33	195,4
4	240	9,70	88,0	0,10	22,6	0,14	208,8
5	300	14,03	148,7	0,35	143,5	0,97	226,5
6	360	4,60	86,9	0,12	1,3	0,07	-55,7
7	420	21,46	117,6	0,09	122,4	0,68	224,4
8	480	2,96	-33,1	0,12	-8,4	0,17	36,4
9	540	3,44	104,8	0,10	11,1	0,38	221,0
10	600	3,3	-21,3	0,07	0,7	0,11	34,9
11	660	6,91	13,1	0,09	26,0	0,16	244,9
12	720	1,40	233,9	0,05	-13,4	0,06	1,0
13	780	2,15	12,0	0,08	4,3	0,05	128,3
14	840	2,31	230,2	0,02	-10,1	0,05	78,6
15	900	2,85	262,8	0,05	-10,1	0,08	45,8
16	960	0,45	177,6	0,02	3,5	0,11	53,0
17	1020	1,79	-87,5	0,04	-7,2	0,14	173,0
18	1080	1,56	121,6	0,01	16,4	0,10	52,9
19	1140	1,05	160,9	0,02	-6,9	0,11	-3,0
20	1200	0,45	98,2	0,04	42,1	0,02	25,9
21	1260	0,99	162,9	0,01	-39,6	0,04	20,5
22	1320	1,01	18,6	0,02	8,6	0,05	-12,3
23	1350	0,40	75,0	0,01	1,9	0,06	30,6

A partir da Tabela 4.4, pôde-se calcular a DHT_i de cada fase como sendo 26,12%, 46,86% e 8,48%. Assim como o curto na fase A, a ocorrência do curto na fase B provocou a maior DHT_i .

Por fim, os espectros observados nas 3 fases com a aplicação do curto na fase C podem ser observados na Tabela 4.5. A DHT_i de cada fase calculada obtiveram os valores de 15,18%, 19,84% e 47,49%.

Pode-se observar que em todos os resultados de DHT_i obtidos com a ligação do LCC-NS de maneira trifásica, a distorção total na fase consecutiva a fase a qual ocorreu o evento de curto-circuito, tendo em vista a sequência de fase CBA, foi a menor taxa entre as percentagens das fases.

Tabela 4.4: Espectros harmônicos da corrente nas fases A, B e C com curto na fase B

Componente Harmônica	Frequência (Hz)	Fase A		Fase B		Fase C	
		Amplitude	Ângulo (°)	Amplitude	Ângulo (°)	Amplitude	Ângulo (°)
Termo CC	0	0,62	90,0	17,78	270,0	0,14	270,0
Fundamental	60	9,59	-31,5	309,25	17,4	9,73	206,0
2	120	0,38	182,7	19,15	213,5	0,34	25,1
3	180	1,88	205,5	140,57	232,0	0,52	83,7
4	240	0,07	200,0	10,41	76,7	0,11	19,1
5	300	1,14	219,1	13,81	134,7	0,41	114,9
6	360	0,02	76,3	5,07	71,1	0,12	2,0
7	420	0,78	208,6	20,87	101,7	0,14	93,5
8	480	0,20	60,1	3,09	-55,9	0,11	-5,1
9	540	0,26	186,5	3,62	86,4	0,10	-10,5
10	600	0,07	57,8	3,24	-46,7	0,07	5,3
11	660	0,17	189,4	6,63	-13,5	0,09	7,4
12	720	0,13	33,5	1,48	208,8	0,05	-25,1
13	780	0,11	52,0	2,24	-20,3	0,07	-21,0
14	840	0,12	39,3	2,28	200,6	0,04	-12,2
15	900	0,13	53,4	2,74	220,3	0,04	-24,5
16	960	0,09	58,5	0,51	138,4	0,04	16,9
17	1020	0,10	29,5	1,85	233,6	0,03	-15,0
18	1080	0,09	-16,2	1,59	77,5	0,03	29,9
19	1140	0,04	141,4	0,82	118,4	0,03	39,1
20	1200	0,08	66,2	0,45	58,4	0,02	-14,8
21	1260	0,07	77,4	1,01	124,2	0,02	-3,5
22	1320	0,08	-40,2	0,97	-34,7	0,03	11,7
23	1350	0,06	8,9	0,21	20,4	0,02	0,3

Tabela 4.5: Espectros harmônicos da corrente nas fases A, B e C com curto na fase C

Componente Harmônica	Frequência (Hz)	Fase A		Fase B		Fase C	
		Amplitude	Ângulo (°)	Amplitude	Ângulo (°)	Amplitude	Ângulo (°)
Termo CC	0	0,75	270,0	0,06	270,0	18,89	270,0
Fundamental	60	8,20	208,0	8,62	-37,4	324,90	16,6
2	120	0,18	35,9	0,32	168,3	19,54	211,4
3	180	0,40	180,3	1,26	188,8	148,65	230,0
4	240	0,10	74,5	0,11	197,7	10,98	73,3
5	300	0,57	126,4	0,92	215,0	15,10	131,8
6	360	0,11	-21,5	0,02	120,9	5,09	67,7
7	420	0,31	106,1	0,64	213,3	21,69	95,8
8	480	0,11	-40,1	0,10	49,3	3,47	-58,4
9	540	0,17	22,2	0,25	187,9	3,80	76,6
10	600	0,16	11,9	0,08	24,5	3,49	-52,3
11	660	0,12	0,3	0,16	179,6	6,97	-22,6
12	720	0,06	-3,4	0,11	11,3	1,58	191,7
13	780	0,08	-47,4	0,02	138,5	2,16	-27,5
14	840	0,05	50,8	0,10	14,5	2,56	189,6
15	900	0,02	-39,2	0,06	34,7	2,69	217,7
16	960	0,04	-60,1	0,06	11,3	0,60	118,4
17	1020	0,07	-39,7	0,05	29,7	1,68	219,2
18	1080	0,04	172,0	0,04	-11,8	1,71	66,6
19	1140	0,05	36,7	0,03	22,1	1,01	101,7
20	1200	0,11	-4,9	0,03	-2,5	0,68	12,1
21	1260	0,03	78,4	0,03	18,1	0,95	100,1
22	1320	0,08	13,2	0,05	13,3	1,08	-61,7
23	1350	0,01	-4,6	0,02	81,9	0,39	-20,6

Capítulo 5

Conclusões e trabalhos futuros

Este trabalho apresentou um estudo envolvendo ensaios em um protótipo de limitador de corrente de curto-circuito de núcleo saturado (LCC-NS) em uma rede de testes. Estes ensaios foram divididos em duas categorias: a primeira referente a um levantamento e caracterização dos núcleos ferromagnéticos do dispositivo ensaiado a fim de investigar as propriedades físicas do protótipo e dos seus núcleos, além da integridade dos enrolamentos. Com base na análise dos resultados obtidos pôde-se dar início aos ensaios aplicando curto-circuito monofásico primeiramente com o LCC-NS ligado de forma monofásica e depois trifásica ao sistema de teste.

A partir do estudo desenvolvido obteve-se uma prova de conceito referente ao princípio de funcionamento da topologia de LCC de núcleo saturado. Desta forma, a pesquisa neste tema e área de estudos pôde ser expandida em território nacional além deste ser o segundo trabalho no Brasil ensaiando este tipo de limitador.

Com relação aos valores medidos com os ensaios de caracterização executados, foi possível observar pequenas divergências entre as fases. De modo que este tipo de limitador seja afetado por ligeiras diferenças construtivas, ficando mais evidenciado essa peculiaridade com o ensaio aplicando o curto-circuito.

Os resultados obtidos mostraram que este dispositivo mesmo sendo trifásico atuou muito bem quando ligado de maneira monofásica além de os valores de limitação da corrente de curto alcançaram a mesma ordem de grandeza que os da ligação trifásica. A maior redução da corrente de curto em comparação com a corrente prospectiva com o emprego desse LCC-NS na sua ligação monofásica tanto no primeiro pico como no regime de curto foi da fase C, que alcançou as percentagens de 35,51% e 61,71% respectivamente. Já com a ligação trifásica do protótipo obteve resultados similares como era esperado para

todas as fases. Com isso, ficou clara a efetividade em quesito de limitação deste protótipo.

Ainda com relação aos resultados medidos com a ligação trifásica do LCC-NS, pode-se observar que as formas de onda das tensões das fases não afetadas pelo curto-circuito também apresentaram distorções. Isto se deve ao fato do desligamento da fonte CC tirar o circuito magnético da saturação de todas as fases. Observou-se que a fase subsequente a qual houve a falta sofreu mais distorção do que a fase precedente. Vale ressaltar que os resultados de DHT_i corroboram esta observação.

De modo geral, o trabalho teve como objetivo obter um melhor conhecimento do protótipo de LCC-NS a partir da realização dos ensaios e discussão dos resultados obtidos. Além de apresentar novas análises e comparações entre as fases do dispositivo.

5.1 Trabalhos futuros

A partir do estudo desenvolvido neste trabalho, alguns tópicos de pesquisa puderam ser observados a fim de dar prosseguimento ao conhecimento adquirido com esta dissertação a cerca do protótipo estudado, como:

- Aumentar o nível de potência do ensaio a fim de atingir os parâmetros nominais do dispositivo e elevar o curto monofásico assim como a realizar testes neste protótipo aplicando curtos bifásicos e trifásicos a fim de avaliar seu comportamento tanto com relação a limitação da corrente de curto como num possível impacto no lado CC através da tensão induzida.
- Avaliar a qualidade de energia da rede após a inserção do LCC-NS na mesma, através de uma análise da taxa de distorção harmônica da tensão visto que as demais fases são afetadas pela ocorrência de um curto-circuito monofásico.
- Troca da bobina CC de cobre por uma bobina supercondutora.

Referências

- [1] SCHMITT, H. Fault current limiters report on the activities of CIGRE WG A3.16. In: *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*. Montreal, Canada: IEEE, 2006. p. 5 pp. ISBN 978-1-4244-0493-3. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/PES.2006.1709205>>.
- [2] ALAM, M.; ABIDO, M.; EL-AMIN, I. Fault current limiters in power systems: A comprehensive review. *Energies*, v. 11, n. 5, p. 1025, 2018. ISSN 1996-1073. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3390/en11051025>>.
- [3] ZHOU, H.; YUAN, J.; CHEN, F.; CHEN, B. Inductive fault current limiters in vsc-hvdc systems: A review. *IEEE Access*, v. 8, p. 38185–38197, 2020. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2976116>>.
- [4] PRIYADHARSHNA, S. J.; VENKATESAN, T. A review on development and operational strategy of fault current limiters. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, IJEECS, v. 1, n. 1, p. 1, 2016. ISSN 2502-4760, 2502-4752. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.11591/ijeecs.v1.i1.pp1-9>>.
- [5] NOE, M.; STEURER, M. High-temperature superconductor fault current limiters: concepts, applications, and development status. *Superconductor Science and Technology*, IOP Publishing, v. 20, n. 3, p. R15–R29, jan 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/0953-2048/20/3/r01>>.
- [6] FAJONI, F. C. *Estudos, desenvolvimento e construção de um limitador de correntes elétricas com núcleo magnético saturado*. Tese de doutorado — Universidade Estadual de Campinas, 2015.
- [7] TIXADOR, P. *Superconducting Fault Current Limiter: Innovation for the Electric Grids*. WORLD SCIENTIFIC, 2018. (World Scientific Series in Applications of Superconductivity and Related Phenomena, v. 03). ISBN 978-981-327-297-2 978-981-327-298-9. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1142/11062>>.
- [8] SOUSA, W. T. B. d.; POLASEK, A.; DIAS, R.; JR., R. d. A. Limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores: principais conceitos e testes. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 34, n. 4, 2012. ISSN 1806-1117. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1590/S1806-11172012000400013>>.
- [9] RAJU, B. P.; BARTRAM, T. C. Fault-current limiter with superconducting DC bias. *IEE Proceedings C - Generation, Transmission and Distribution*, v. 129, n. 4, p. 166–171, 1982. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1049/ip-c:19820028>>.
- [10] RAJU, B. P.; PARTON, K. C.; BARTRAM, T. C. A Current Limiting Device Using Superconducting D.C. Bias Applications and Prospects. *IEEE*

- Power Engineering Review*, PER-2, n. 9, p. 34–35, 1982. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1109/MPER.1982.5519468>>.
- [11] MOSCROP, J. W. Experimental Analysis of the Magnetic Flux Characteristics of Saturated Core Fault Current Limiters. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 49, n. 2, p. 874–882, 2013. ISSN 0018-9464, 1941-0069. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1109/TMAG.2012.2214396>>.
- [12] COMMINS, P. A.; MOSCROP, J. W. Analytical Nonlinear Reluctance Model of a Single-Phase Saturated Core Fault Current Limiter. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 28, n. 1, p. 450–457, 2013. ISSN 0885-8977, 1937-4208. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2012.2214404>>.
- [13] YUAN, J.; LEI, Y.; WEI, L.; TIAN, C.; CHEN, B.; DU, Z. A Novel Bridge-Type Hybrid Saturated-Core Fault Current Limiter Based on Permanent Magnets. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 51, n. 11, p. 1–4, 2015. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1109/TMAG.2015.2440427>>.
- [14] YUAN, J.; ZHONG, Y.; LEI, Y.; TIAN, C.; WEI, L.; GUAN, W.; GAO, Y.; MURAMATSU, K.; CHEN, B. A novel topology of hybrid saturated core fault current limiter considering permanent magnets stability performance. In: *2016 IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC)*. [s.n.], 2016. p. 1–1. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1109/CEFC.2016.7816232>>.
- [15] YUAN, J.; ZHONG, Y.; LEI, Y.; TIAN, C.; GUAN, W.; GAO, Y.; MURAMATSU, K.; CHEN, B. A Novel Hybrid Saturated Core Fault Current Limiter Topology Considering Permanent Magnet Stability and Performance. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 53, n. 6, p. 1–4, 2017. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1109/TMAG.2017.2669358>>.
- [16] TIAN, C.; ZHONG, Y.; WEI, L.; LEI, Y.; CHEN, B.; GAO, Y.; MURAMATSU, K.; YUAN, J. A Coupled Method for Evaluating Eddy Current Loss of NdFeB Permanent Magnets in a Saturated Core Fault Current Limiter. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 53, n. 6, p. 1–4, 2017. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1109/TMAG.2017.2664828>>.
- [17] LI, L.; LI, L. A novel saturated open-core fault current limiter and its nonlinear magnetic circuit model. *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, v. 36, n. 6, p. 1739–1749, 2017. ISSN 0332-1649. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1108/COMPEL-12-2016-0575>>.
- [18] VILHENA, N.; ARSÉNIO, P.; MURTA-PINA, J.; PRONTO, A.; ÁLVAREZ, A. A Methodology for Modeling and Simulation of Saturated Cores Fault Current Limiters. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 25, n. 3, p. 1–4, 2015. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1109/TASC.2014.2374179>>.
- [19] ZHANG, C.; TANG, Y.; XU, Y.; REN, L.; WANG, Z.; LIANG, S. Analysis of Magnetic Circuit and Leakage Magnetic Field of a Saturated Iron-Core Superconducting Fault Current Limiter. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 27, n. 4, p. 1–5, 2017. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1109/TASC.2017.2672819>>.

- [20] YUAN, J.; ZHONG, Y.; LIAO, S.; WEI, L.; GAO, Y.; MURAMATSU, K.; JIA, J.; CHEN, B.; BAI, L. A Novel Three-Phase Compact Saturated-Core Fault Current Limiter. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 53, n. 11, p. 1–4, 2017. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1109/TMAG.2017.2704662>>.
- [21] VILHENA, N.; MURTA-PINA, J.; PRONTO, A.; ÁLVAREZ, A. A Design Methodology for the Optimization of Three-Phase SFCL of Saturated Cores Type. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 28, n. 4, p. 1–5, 2018. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1109/TASC.2018.2806001>>.
- [22] COMMINS, P. A.; MOSCROP, J. W. Analytical Nonlinear Reluctance Model of a Single-Phase Saturated Core Fault Current Limiter. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 28, n. 1, p. 450–457, 2013. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2012.2214404>>.
- [23] GUNAWARDANA, S. M.; COMMINS, P. A.; MOSCROP, J. W.; PERERA, S. Applicability of nonlinear reluctance model to a closed core Fault Current Limiter. In: *2015 IEEE Eindhoven PowerTech*. [s.n.], 2015. p. 1–6. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1109/PTC.2015.7232797>>.
- [24] GUNAWARDANA, S. M.; COMMINS, P. A.; MOSCROP, J. W.; PERERA, S. Transient Modeling of Saturated Core Fault Current Limiters. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 31, n. 5, p. 2008–2017, 2016. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2016.2524647>>.
- [25] LI, B.; JING, F.; JIA, J.; LI, B. Research on Saturated Iron-Core Superconductive Fault Current Limiters Applied in VSC-HVDC Systems. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 26, n. 7, p. 1–5, 2016. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1109/TASC.2016.2601649>>.
- [26] LEE, H.; ASIF, M.; PARK, K.; LEE, B. Feasible Application Study of Several Types of Superconducting Fault Current Limiters in HVDC Grids. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 28, n. 4, p. 1–5, 2018. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1109/TASC.2018.2799745>>.
- [27] LI, B.; CUI, H.; JING, F.; LI, B.; LIU, Y. Current-limiting characteristics of saturated iron-core fault current limiters in VSC-HVDC systems based on electromagnetic energy conversion mechanism. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, v. 7, n. 2, p. 412–421, 2019. ISSN 2196-5625, 2196-5420. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1007/s40565-018-0459-4>>.
- [28] TRIPATHI, P. M.; SAHOO, S. S.; CHATTERJEE, K. Enhancing the fault ride through capability of DFIG-based wind energy system using saturated core fault current limiter. *The Journal of Engineering*, v. 2019, n. 18, p. 4916–4921, 2019. ISSN 2051-3305. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1049/joe.2018.9296>>.
- [29] JIA, Y.; AINSLIE, M. D.; HU, D.; YUAN, J. Numerical Simulation and Analysis of a Saturated-Core-Type Superconducting Fault Current Limiter. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 27, n. 4, p. 1–5, 2017. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1109/TASC.2017.2656619>>.

- [30] JIA, Y.; SHI, Z.; ZHU, H.; HAO, L.; ZOU, J.; YUAN, J. Cognition on the Current-Limiting Effect of Saturated-Core Superconducting Fault Current Limiter. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 51, n. 11, p. 1–4, 2015. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1109/TMAG.2015.2436715>>.
- [31] ZHANG, C.; TANG, Y.; XU, Y.; REN, L.; WANG, Z.; LIANG, S. Analysis of Magnetic Circuit and Leakage Magnetic Field of a Saturated Iron-Core Superconducting Fault Current Limiter. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 27, n. 4, p. 1–5, 2017. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1109/TASC.2017.2672819>>.
- [32] NIKULSHIN, Y.; WOLFUS, Y.; FRIEDMAN, A.; YESHURUN, Y.; ROZENSHTEIN, V.; LANDWER, D.; GARBI, U. Saturated Core Fault Current Limiters in a Live Grid. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 26, n. 3, p. 1–4, 2016. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1109/TASC.2016.2524444>>.
- [33] LI, B.; GUO, F.; WANG, J.; LI, C. Electromagnetic Transient Analysis of the Saturated Iron-Core Superconductor Fault Current Limiter. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 25, n. 3, p. 1–5, 2015. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1109/TASC.2014.2374191>>.
- [34] SARKAR, D.; UPADHYAYA, A.; CHOUDHURY, A. B.; ROY, D. Synthesis of parameter dependency performance of saturated iron-core superconducting fault current limiter. In: *Michael Faraday IET International Summit 2015*. [s.n.], 2015. p. 187–192. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1049/cp.2015.1628>>.
- [35] UPADHYAYA, A.; SARKAR, D.; CHOUDHURY, A.; ROY, D. Performance analysis of a 380v three-phase saturated iron-core superconducting fault current limiter using jiles-atherton hysteresis model. *2015 International Conference on Energy, Power and Environment: Towards Sustainable Growth (ICEPE)*, p. 1–6, 2015. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1109/EPETSG.2015.7510153>>.
- [36] SARKAR, D.; UPADHYAYA, A.; CHOUDHURY, A. B.; ROY, D. Performance analysis of a saturated iron core superconducting fault current limiter using different core materials. In: *Proceedings of The 2014 International Conference on Control, Instrumentation, Energy and Communication (CIEC)*. [s.n.], 2014. p. 387–391. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1109/CIEC.2014.6959116>>.
- [37] LI, B.; LI, C.; GUO, F. Application Studies on the Active SISFCL in Electric Transmission System and Its Impact on Line Distance Protection. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 25, n. 2, p. 1–9, 2015. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1109/TASC.2014.2368131>>.
- [38] LI, B.; LI, C.; GUO, F.; XIN, Y.; WANG, C.; PANG, X. Coordination of Superconductive Fault Current Limiters With Zero-Sequence Current Protection of Transmission Lines. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 24, n. 5, p. 1–5, 2014. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1109/TASC.2014.2340456>>.
- [39] XIN, Y.; GONG, W.; NIU, X.; CAO, Z.; ZHANG, J.; TIAN, B.; XI, H.; WANG, Y.; HONG, H.; ZHANG, Y.; HOU, B.; YANG, X. Development of Saturated Iron Core HTS Fault Current Limiters. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 17, n. 2, p. 1760–1763, 2007. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1109/TASC.2007.898181>>.

- [40] GONG, W.; ZHANG, J.; CAO, Z.; HONG, H.; TIAN, B.; WANG, Y.; WANG, J.; NIU, X.; QIU, J.; WANG, S.; XIN, Y. HTS DC bias coil for 35kV/90MVA saturated iron-core fault current limiter. *Physica C: Superconductivity*, v. 468, n. 15, p. 2050–2053, 2008. ISSN 09214534. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1016/j.physc.2008.05.124>>.
- [41] XIN, Y.; GONG, W. Z.; NIU, X. Y.; GAO, Y. Q.; GUO, Q. Q.; XIAO, L. X.; CAO, Z. J.; HONG, H.; WU, A. G.; LI, Z. H.; HU, X. M.; TIAN, B.; ZHANG, J. Y.; HE, Y.; WANG, Y.; CUI, J.; DING, S. Z.; WANG, J. Z.; REN, A. L.; YE, F. Manufacturing and Test of a 35 kV/90 MVA Saturated Iron-Core Type Superconductive Fault Current Limiter for Live-Grid Operation. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 19, n. 3, p. 1934–1937, 2009. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1109/TASC.2009.2018510>>.
- [42] HONG, H.; CAO, Z.; ZHANG, J.; HU, X.; WANG, J.; NIU, X.; TIAN, B.; WANG, Y.; GONG, W.; XIN, Y. DC Magnetization System for a 35 kV/90 MVA Superconducting Saturated Iron-Core Fault Current Limiter. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 19, n. 3, p. 1851–1854, 2009. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1109/TASC.2009.2019292>>.
- [43] XIN, Y.; GONG, W. Z.; HONG, H.; GAO, Y. Q.; NIU, X. Y.; ZHANG, J. Y.; SUN, Y. W.; REN, A. L.; WANG, H. Z.; ZHANG, L. F.; LI, Q.; WEI, Z. Q.; WANG, L. Z.; CUI, J. B.; NIU, G. J.; XIONG, Z. Q. Development of a 220 kV/300 MVA superconductive fault current limiter. *Superconductor Science and Technology*, v. 25, n. 10, p. 105011, 2012. ISSN 0953-2048, 1361-6668. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1088/0953-2048/25/10/105011>>.
- [44] XIN, Y.; GONG, W. Z.; SUN, Y. W.; CUI, J. B.; HONG, H.; NIU, X. Y.; WANG, H. Z.; WANG, L. Z.; LI, Q.; ZHANG, J. Y.; WEI, Z. Q.; LIU, L.; YANG, H.; ZHU, X. H. Factory and Field Tests of a 220 kV/300 MVA Saturated Iron-Core Superconducting Fault Current Limiter. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 23, n. 3, p. 5602305–5602305, 2013. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1109/TASC.2012.2234205>>.
- [45] XIN, Y.; GONG, W. Z.; HONG, H.; NIU, X. Y.; ZHANG, J. Y.; REN, A. R.; TIAN, B. Saturated iron-core superconductive fault current limiter developed at innopower. *AIP Conference Proceedings*, v. 1573, n. 1, p. 1042–1048, 2014. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1063/1.4860820>>.
- [46] ABRAMOVITZ, A.; SMEDLEY, K. M.; ROSA, F. D. L.; MORICONI, F. Prototyping and Testing of a 15 kV/1.2 kA Saturable Core HTS Fault Current Limiter. v. 28, n. 3, p. 1271–1279, 2013. ISSN 0885-8977, 1937-4208. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2256801>>.
- [47] PANNU, M.; VALENT, Y.; GARBI, U. Pre-saturated core fault current limiter. In: *2013 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*. [s.n.], 2013. p. 1–7. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1109/AUPEC.2013.6725433>>.
- [48] KLAUS, D.; MCWILLIAM, J.; HELM, J.; WALLER, C.; BERRY, J.; JAFARNIA, M.; JONES, D.; BOCK, J.; HOBL, A. Superconducting fault current limiters

- UK network trials live and limiting. In: *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013)*. [s.n.], 2013. p. 1–4. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1049/cp.2013.0650>>.
- [49] ELADAWY, M.; METWALLY, I. A. Design and Performance Analysis of Single-Phase Pre-Saturated Core Fault Current Limiters. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 33, n. 6, p. 2603–2612, 2018. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2018.2808318>>.
- [50] Bitencourt, A. A. *Análise Técnica de Limitadores de Corrente de Curto-circuito de Estado Sólido*. Dissertação — Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2020.