

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

ALEXANDRE DE ARRUDA BITENCOURT

**ANÁLISE TÉCNICA DE LIMITADORES DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO  
DE ESTADO SÓLIDO**

Niterói, RJ  
Fevereiro de 2020

ALEXANDRE DE ARRUDA BITENCOURT

**ANÁLISE TÉCNICA DE LIMITADORES DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO  
DE ESTADO SÓLIDO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Daniel Henrique Nogueira Dias, D. Sc.  
Coorientador: Prof. Bruno Wanderley França, D. Sc.

Niterói, RJ  
Fevereiro de 2020

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

B624a Bitencourt, Alexandre de Arruda  
Análise Técnica de Limitadores de Corrente de Curto-  
circuito de Estado Sólido / Alexandre de Arruda Bitencourt ;  
Daniel Henrique Nogueira Dias, orientador ; Bruno Wanderley  
França, coorientador. Niterói, 2020.  
83 p. : il.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,  
Niterói, 2020.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PPGEET.2020.m.12610998775>

1. Sistemas de Potência. 2. Eletrônica de Potência. 3.  
Limitador de Corrente de Curto-circuito. 4. Produção  
intelectual. I. Dias, Daniel Henrique Nogueira, orientador.  
II. França, Bruno Wanderley, coorientador. III. Universidade  
Federal Fluminense. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDD -

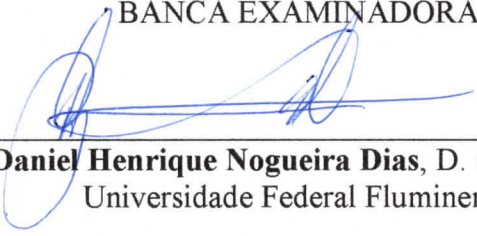
ALEXANDRE DE ARRUDA BITENCOURT

ANÁLISE TÉCNICA DE LIMITADORES DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO  
DE ESTADO SÓLIDO

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 Grau de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações.


Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica

BANCA EXAMINADORA



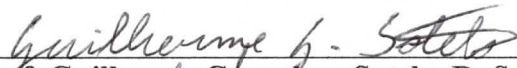
---

**Prof. Daniel Henrique Nogueira Dias**, D. Sc. (Orientador)  
Universidade Federal Fluminense



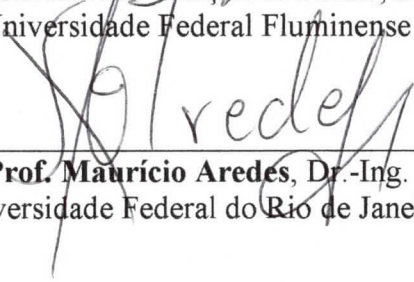
---

**Prof. Bruno Wanderley França**, D. Sc. (Coorientador)  
Universidade Federal Fluminense



---

**Prof. Guilherme Gonçalves Sotelo**, D. Sc.  
Universidade Federal Fluminense



---

**Prof. Maurício Aredes**, Dr.-Ing.  
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Niterói, RJ  
Fevereiro de 2020

## AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar ao meu orientador, professor Daniel Henrique Nogueira Dias, que permaneceu presente na aquisição de dados no laboratório até mesmo nas madrugadas e por toda paciência, auxílio e conhecimentos passados durante todo o período deste trabalho.

Agradeço a Light S/A. por financiar o projeto de P&D intitulado “Limitador de Corrente de Curto-Circuito Híbrido para Sistemas de Distribuição, que inspirou e forneceu recursos para a elaboração e desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos alunos André Queiroz, Henrique Koji, Monique Lima, Gabriel dos Santos e Guilherme Scofano, que participaram de diversas formas ao longo das etapas deste trabalho.

Agradeço a todos os professores do NITEE (Núcleo de Inovação Tecnológica em Engenharia Elétrica) que também colaboraram e estiveram presentes ao longo do trabalho.

“A alegria que se tem em pensar e aprender  
faz-nos pensar e aprender ainda mais.”

Aristóteles

## RESUMO

As correntes de curto-circuito na rede de distribuição podem ser responsáveis por causar danos aos equipamentos da subestação de energia. Os Limitadores de Corrente de Curto-circuito (LCC) são apresentados como uma solução técnica e economicamente viável a fim de proteger os equipamentos que compõem a subestação. Logo este trabalho tem como objetivo avaliar os aspectos técnicos de um protótipo de LCC em escala reduzida utilizando resultados de simulação e ensaios experimentais. A seleção das configurações a serem estudadas levou em consideração a simplicidade e quantidade de elementos que compõem o limitador. A simulação foi desenvolvida no software Simulink e baseou-se nas configurações escolhidas e nos parâmetros reais dos elementos das mesmas. Os resultados mostraram que ambas as configurações são capazes de limitar a corrente de falta a partir do terceiro semiciclo em 87%. Caso seja considerado a implementação do limitador em um sistema de potência, além dos critérios técnicos, deve-se considerar o custo de fabricação para a escolha da configuração mais adequada.

## ABSTRACT

Fault currents in distribution network may be responsible for causing damage to equipment at the substation. Fault Current Limiters (FCL) are presented as a technically and economically viable solution to protect the equipment that makes up the substation. Therefore, this work aims to evaluate the technical aspects of a small-scale FCL prototype using simulation results and experimental tests. The selection of topologies to be studied took into account simplicity and quantity of elements that compose the limiter. Simulation was developed using Simulink and was based on chosen topologies and the actual parameters of elements. Results showed that both topologies are able to limit fault current from the third semicycle to 87%. If it is considered the implementation of the limiter in a power system, in addition to technical criteria, manufacturing cost should be considered for choosing the most appropriate topology.



## Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Curto-Circuito .....	1
1.2	Objetivo.....	2
2	Limitadores de Corrente de Curto-circuito .....	4
2.1	LCCs comerciais .....	6
2.1.1	Reatores a Núcleo de Ar .....	6
2.1.2	Dispositivos Pirotécnicos.....	8
2.1.3	Resistor de Aterramento .....	11
2.2	LCCs Supercondutores.....	11
2.3	LCCs de Estado Sólido .....	12
2.3.1	Tipo Série Chaveado.....	13
2.3.2	Tipo Circuito Ressonante.....	15
2.3.3	Tipo Ponte.....	19
2.4	Dispositivos FACTS .....	20
3	Construção dos protótipos LCCs.....	24
3.1	Elementos dos protótipos .....	26
3.1.1	Indutor.....	27
3.1.2	Capacitor .....	30
3.1.3	Equipamentos de medição, controle e operação .....	30
3.1.4	Chaves semicondutoras.....	31
3.1.5	Sistema de Controle .....	32
3.2	Equipamentos e instalações.....	33
3.2.1	Descrição dos ensaios .....	36
3.3	Algoritmo de detecção de curto-circuito e operação das chaves .....	36
3.3.1	Validação preliminar do algoritmo de detecção de curto-circuito.....	38
3.4	Modelo de simulação .....	40

4	Resultados e discussões.....	45
4.1	LCC Indutor Série Chaveado .....	46
4.2	LCC Ressonante .....	53
4.3	Análise comparativa.....	58
5	Conclusão.....	61
5.1	Sugestões para Trabalho Futuros .....	62
	Referências Bibliográficas .....	64

## Lista de Abreviaturas

ABB	- Asea Brown Boveri
CA	- Corrente Alternada
CC	- Corrente Contínua
CENIBRA	- Celulose Nipo-Brasileira
CSN	- Companhia Siderúrgica Nacional
ddp	- Diferença De Potencial
ETO	- <i>Emitter Turn-Off</i>
FACTS	- <i>Flexible Alternative Current Transmission System</i>
GPFC	- <i>Grid Power Flow Controller</i>
GTO	- <i>Gate Turn-Off</i>
IBT	- Industria Brasileira de Transformadores
IGBT	- <i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
IGCT	- <i>Integrated Gate-Commutated Thyristor</i>
irp	- Corrente em Regime Permanente
ISC	- Indutor Série Chaveado
itr	- Corrente em Regime Transitório
LCC	- Limitador de Corrente de Curto-circuito
LCCS	- Limitador de Corrente de Curto-circuito Supercondutor
LTT	- <i>Light-Triggered Thyristor</i>
MOV	- <i>Metal Oxide Varistor</i>
PCI	- <i>Peripheral Component Interconnect</i>
PST	- <i>Phase Shift Transformer</i>
PWM	- <i>Pulse Width Modulation</i>
RCT	- Reatores Controlados por Tiristores
SCR	- <i>Silicon Controlled Rectifier</i>
SCV	- <i>Static Var Compensator</i>
SSS	- <i>Solid State-Switch</i>
SSSC	- <i>Static Synchronous Series Compensator</i>
STATCOM	- <i>Static Synchronous Compensator</i>
TCR	- <i>Thyristor Controlled Reactor</i>
TCSC	- <i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>
TI RTOS	- Texas Instruments Real Time Operating System
TPSC	- <i>Thyristor Protected Series Compensation</i>
TSC	- <i>Thyristor Switched Capacitor</i>
TSSC	- <i>Thyristor Switched Series Capacitor</i>
UPFC	- <i>Unified Power Flow Controller</i>

## Lista de Figuras

Figura 1 - Exemplo de circuito de corrente alternada. ....	1
Figura 2 - Comportamento da corrente no circuito exemplo.....	2
Figura 3 – Fluxograma da metodologia do trabalho.....	3
Figura 4 - Comportamento da corrente de curto-circuito com e sem limitador. ....	4
Figura 5 - Possíveis conexões para dispositivos LCCs. ....	6
Figura 6 - Ilustração de reator limitador com banco de capacitores em seus terminais. ....	7
Figura 7 - Fotografia dos reatores limitadores da subestação de Tucuruí de 500 kV. ....	8
Figura 8 - Esquema do limitador de corrente pirotécnico. ....	9
Figura 9 - Dispositivo pirotécnico da G&W. ....	9
Figura 10 - Fusível e barramento principal (a) antes e (b) após a atuação do limitador. ....	9
Figura 11 - Interrupção da corrente de curto-circuito através de um dispositivo pirotécnico..	10
Figura 12 – Inserção reator limitador após a atuação do dispositivo pirotécnico. ....	10
Figura 13 – Interrupção da corrente de curto-circuito através de um dispositivo pirotécnico em paralelo com um reator. ....	11
Figura 14 - Formas de onda característica de corrente de curto com/sem aplicação de LCCS do tipo resistivo. ....	12
Figura 15 - Configuração genérica do LCC tipo chave série. ....	13
Figura 16 – Diferentes tipos de LCC circuito Ressonante série.....	15
Figura 17 – Aplicação de reator de núcleo saturado para atuação passivo do circuito Ressonante série.....	16
Figura 18 – Aplicação de MOV para atuação passivo do circuito Ressonante série. ....	16
Figura 19 – Configurações de circuitos Ressonante paralelo com acionamento ativo; (a) TCSC; (b) TSSC.....	18
Figura 20 - (a) Configuração genérica do LCC tipo ponte; (b) EN; (c) falta de corrente alternada limitada pela fonte de corrente; (d) falta de corrente alternada limitada pelo <i>shunt</i> de falta. ..	20
Figura 21 - Diagrama esquemático do TCSC para limitar curto-circuito. ....	22
Figura 22 - Diagrama esquemático do dispositivo limitador baseado no TPSC.....	23
Figura 23 - (a) Circuito ISC em regime permanente (b) Circuito ISC em curto-circuito (c) Circuito ISC limitando corrente. ....	25
Figura 24 - (a) Circuito Ressonante em regime permanente (b) Circuito Ressonante em curto-circuito (c) Circuito Ressonante limitando corrente.....	25
Figura 25 - Bancada de testes.....	26

Figura 26 - Base superior da bancada.....	26
Figura 27 - Elementos do limitador.....	27
Figura 28 - Ilustração do projeto de uma bobina com dimensões otimizada para a economia de cobre. ....	27
Figura 29 - Ilustração do perfil de densidade de campo magnético. ....	28
Figura 30 - Ilustração da componente na direção z da densidade de força eletromecânica em cada espira. ....	28
Figura 31 - Reator de núcleo de ar construído com indutância de 2,1 mH. ....	29
Figura 32 - Resposta a um degrau de tensão de 1,3 V na bobina construída. ....	29
Figura 33 - Banco de capacitores. ....	30
Figura 34 - Microcontrolador CC2640R2F, empresa Texas Instruments. ....	31
Figura 35 - Kit de desenvolvimento para o CC2640R2F da Texas Instruments.....	31
Figura 36 - Esquema de ligação do módulo BSM150GB60DLC. ....	32
Figura 37 - Esquema de ligação do módulo TT120N16SOF. ....	32
Figura 38 - Suporte com as chaves semicondutoras, drivers e sistema de controle.....	33
Figura 39 - Oscilógrafo modelo DL850EV da Yokogawa.....	33
Figura 40 - Rack de cargas, parte frontal.....	34
Figura 41 - Rack de cargas, parte traseira. ....	35
Figura 42 - Arranjo geral para ensaio das configurações de LCC.....	35
Figura 43 - Transformador de 75 kVA utilizado nos ensaios.....	35
Figura 44 - Fluxograma do algoritmo de controle.....	38
Figura 45 - Arranjo geral da simulação hardware in the loop. ....	39
Figura 46 - Operação do LCC. ....	40
Figura 47 - Sistema modelado no Simulink. ....	40
Figura 48 - Modelagem dos tiristores no Simulink. ....	41
Figura 49 - Modelagem dos IGBTs no software Simulink. ....	41
Figura 50 - Modelagem do LCC do tipo ISC com (a) Tiristor e (b) IGBT. ....	42
Figura 51 - Modelagem do LCC do tipo Ressonante com (a) Tiristor e (b) IGBT. ....	43
Figura 52 – Modelagem do medidor de corrente real. ....	43
Figura 53 – Comparação entre corrente medida sem ruído (a) e com ruído (b).....	43
Figura 54 – Sinal de controle sem considerar ruído (a) e considerando ruído (b) na simulação. ....	44
Figura 55 - Comparação entre as correntes ensaiada e simulada do circuito sem limitador....	45

Figura 56 - Comparação entre as tensões ensaiada e simulada do circuito sem limitador.....	46
Figura 57 - Comparação entre as correntes ensaiada e simulada do circuito na configuração ISC utilizando Tiristor. ....	47
Figura 58 - Comparação entre as correntes ensaiada e simulada no indutor na configuração ISC utilizando Tiristor. ....	48
Figura 59 - Comparação entre as correntes ensaiada e simulada na chave Tiristor na configuração ISC. ....	49
Figura 60 - Comparação entre as tensões ensaiada e simulada do circuito na configuração ISC com Tiristor. ....	49
Figura 61 - Comparação entre as correntes ensaiada e simulada do circuito na configuração ISC utilizando IGBT. ....	50
Figura 62 - Comparação entre as correntes ensaiada e simulada no indutor na configuração ISC utilizando IGBT. ....	51
Figura 63 - Comparação entre a corrente ensaiada e a simulada na chave IGBT na configuração ISC. ....	51
Figura 64 - Comparação entre a tensão ensaiada e a simulada do circuito na configuração ISC utilizando IGBT. ....	52
Figura 65 - Comparação entre as correntes prospectiva e limitada ensaiadas da configuração ISC com Tiristor e IGBT. ....	52
Figura 66 - Comparação entre a corrente ensaiada e a simulada do circuito na configuração Ressonante utilizando Tiristor. ....	54
Figura 67 - Comparação entre a corrente ensaiada e a simulada no capacitor na configuração Ressonante utilizando Tiristor. ....	54
Figura 68 - Comparação entre as correntes ensaiada e simulada na chave Tiristor na configuração Ressonante. ....	55
Figura 69 - Comparação entre a tensão ensaiada e a simulada do circuito na configuração Ressonante utilizando Tiristor. ....	55
Figura 70 - Comparação entre as correntes ensaiada e simulada do circuito na configuração Ressonante utilizando IGBT. ....	56
Figura 71 - Comparação entre as correntes ensaiada e simulada no capacitor na configuração Ressonante utilizando IGBT. ....	56
Figura 72 - Comparação entre as correntes ensaiada e simulada na chave IGBT na configuração Ressonante. ....	57

Figura 73 - Comparação entre a tensão ensaiada e a simulada do circuito na configuração Ressonante utilizando IGBT.....	57
Figura 74 - Comparação entre as correntes prospectiva e limitada da configuração Ressonante com Tiristor e IGBT. ....	58
Figura 75 - Comparação entre a tensão do sistema sem limitador e com limitador na configuração Ressonante com Tiristor e IGBT. ....	58
Figura 76 - Corrente RMS do sistema das configurações de limitador.....	59
Figura 77 - Tensão RMS no sistema das configurações de limitador. ....	60

## **Lista de Tabelas**

Tabela 1 - Tecnologias de LCC indutor chaveado. ....	14
Tabela 2 – Comparação dos LCCs Ressonante .....	19
Tabela 3 - Tecnologias de LCCC ressonante. ....	19
Tabela 4 - Informações de algumas configurações de LCC tipo ponte.....	20
Tabela 5 - Parâmetros dos itens utilizados nos ensaios. ....	36
Tabela 6 - Redução percentual da corrente de falta.....	59



# 1 Introdução

## 1.1 Curto-Circuito

Curtos-circuitos são falhas que ocorrem devido a uma condição anormal de baixa impedância entre dois pontos do sistema com diferentes potenciais elétricos. A forma característica das correntes de falta pode ser compreendida através da solução de um circuito equivalente RL alimentado por fonte de tensão CA, sendo o comportamento da corrente elétrica obtido pela solução de uma equação diferencial. Para ilustrar, considere o circuito de corrente alternada monofásico apresentado na Figura 1, que possui a seguinte solução matemática descrita pela Equação (1).

$$i(t) = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \left[ \sin(\omega t + \alpha - \theta) - \sin(\alpha - \theta) e^{-\frac{R}{L}t} \right] \quad (1)$$

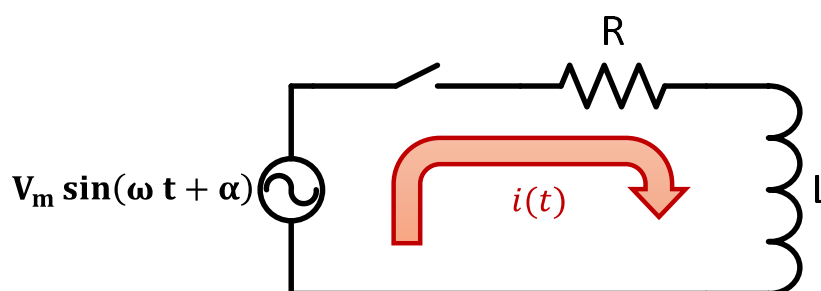


Figura 1 - Exemplo de circuito de corrente alternada.  
FONTE: Elaboração Própria.

Onde  $\theta = \tan^{-1}(\omega L/R)$  é o ângulo da impedância, e seu módulo, dado por  $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ , é um fator atenuante do resultado. Esta solução possui duas parcelas, uma de regime permanente ( $i_{RP}$ ) e uma de regime transitório ( $i_{TR}$ ), como ilustrado na Figura 2. O valor máximo que a corrente atinge durante o regime transitório depende do instante em que a chave é fechada.

Em muitas situações os curtos-circuitos podem ocasionar maiores danos à rede elétrica do que apenas a descontinuidade do fornecimento de energia, como a queima de equipamentos, que aumentariam os prejuízos da concessionária. Uma forma de resolver esse problema é através da inserção de Limitadores de Corrente de Curto-circuito (LCCs) no sistema [1]–[4], que é uma solução técnica e economicamente mais interessante do que simplesmente efetuar a troca dos equipamentos já instalados.

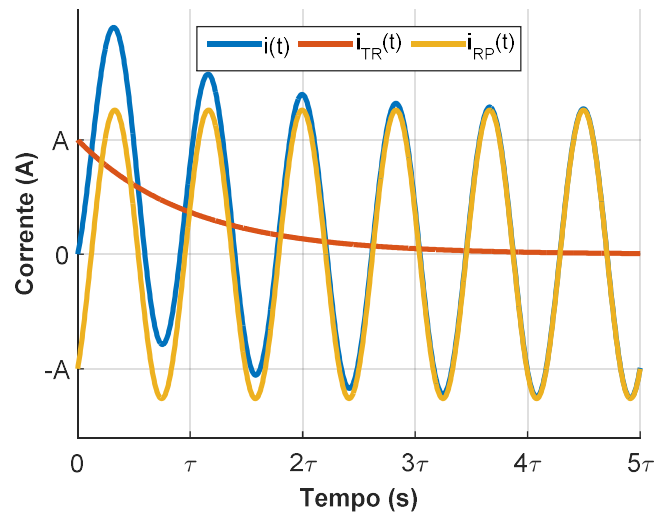


Figura 2 - Comportamento da corrente no circuito exemplo.  
 FONTE: Elaboração Própria.

## 1.2 Objetivo

Curtos-circuitos são efeitos indesejáveis na rede de distribuição de energia elétrica e podem causar danos aos equipamentos da subestação. O LCC se apresenta como uma solução técnico-econômica viável para a proteção destes equipamentos. Com base nisso, este trabalho tem como objetivo avaliar os aspectos técnicos de um protótipo de LCC em escala reduzida. A avaliação será dada pela comparação entre dados de simulação, feitas no software Simulink, e dados experimentais. Os dados experimentais serão adquiridos através de ensaios em uma bancada de testes.

Este trabalho tem sua metodologia desenvolvida de acordo com a Figura 3. A Etapa 1 é referente a revisão bibliográfica, apresentada no capítulo 2, em que se apresenta de forma geral as técnicas de limitação de corrente de curto-circuito mais utilizadas, destacando os LCCs comerciais e outras técnicas estudadas. A Etapa 2 é marcada pela seleção das configurações de LCC que serão trabalhadas. A Etapa 3, apresentada no capítulo 3 do trabalho, representa a construção e desenvolvimento de todos os equipamentos necessários, como a construção dos protótipos dos LCCs, a bancada de cargas e outros elementos necessários e, por fim, a simulação desenvolvida no Simulink. A Etapa 4, apresentada no capítulo 4, explora-se os resultados experimentais e simulados considerando cada elemento do limitador. Além disso, ao fim da etapa há uma análise dos resultados encontrados. Por fim, a Etapa 5, apresentada no capítulo 5, traz as conclusões do trabalho.

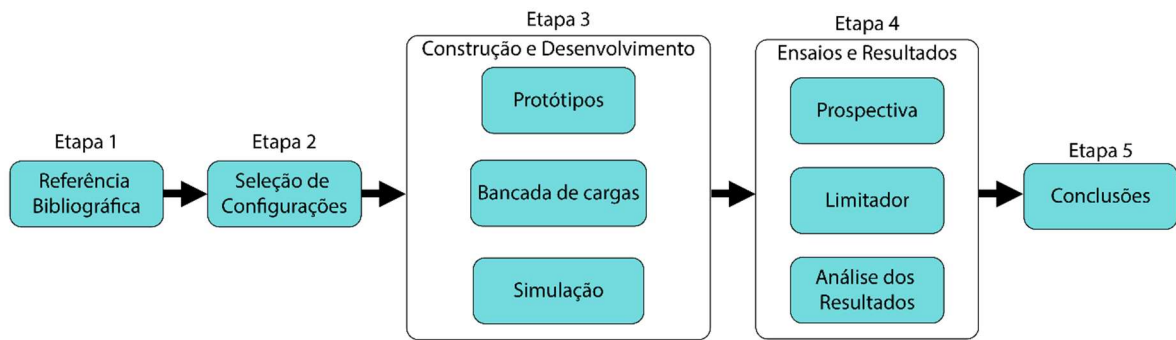


Figura 3 – Fluxograma da metodologia do trabalho.

## 2 Limitadores de Corrente de Curto-circuito

Os LCCs são equipamentos instalados geralmente em série com a rede elétrica com a finalidade de evitar que a corrente elétrica no sistema ultrapasse os limites suportados pela mesma durante a ocorrência de faltas. Existem diversas tecnologias de LCCs e a escolha do melhor tipo de limitador de corrente de curto-circuito a ser instalado em um determinado sistema deve ser baseada em critérios técnicos e econômicos [3]. A Figura 4 ilustra o funcionamento de um LCC. Quando o sistema opera sem a presença de um LCC, mostrado na Figura 4(a), pode apresentar elevados níveis de corrente de curto-circuito. O valor da corrente obtida sem limitador instalado no sistema, curva vermelha da Figura 4(c), recebe o nome de corrente prospectiva. O LCC tem a função de introduzir no sistema uma impedância série, conforme a Figura 4(b), para diminuir o valor da corrente elétrica durante a falta. Esta corrente é denominada de limitada, conforme a curva em azul da Figura 4(c).

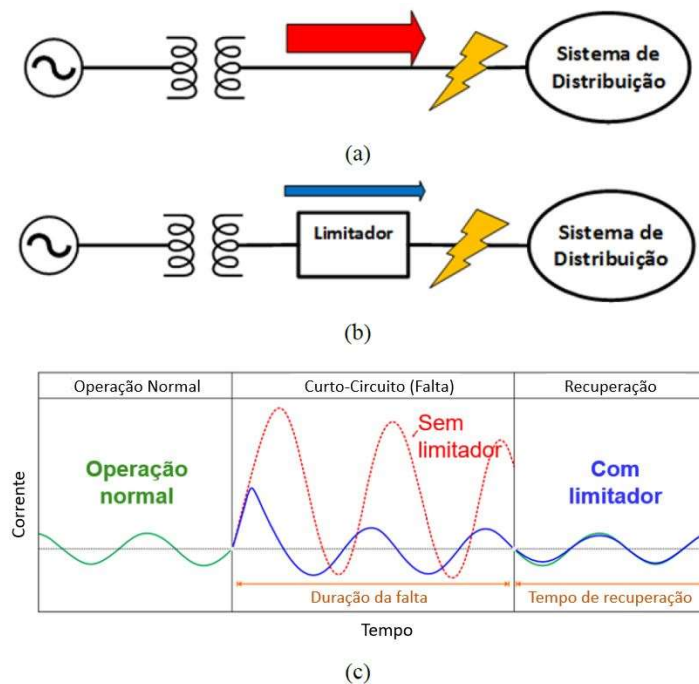


Figura 4 - Comportamento da corrente de curto-circuito com e sem limitador.  
FONTE: Elaboração Própria.

A seguir, serão apresentadas algumas características destes dispositivos que devem ser analisadas para avaliar o seu desempenho:

- **Impedância em regime permanente** - Idealmente, o LCC deve ser “invisível” durante o regime normal de operação, apresentando impedância e perdas baixas ou nulas. Em algumas aplicações, a impedância do LCC pode ser capacitiva, compensando a característica indutiva da rede e, portanto, aumentando o fator de potência do circuito e

reduzindo perdas de condução [5]. Neste caso, como a impedância equivalente do circuito fica menos indutiva, a corrente prospectiva de curto-circuito aumenta;

- **Impedância sob condições de falta** - Durante o curto-circuito, deseja-se que o LCC insira na rede uma impedância alta o suficiente para limitar a corrente de falta para um valor compatível com os equipamentos de proteção existentes. Assim como ilustrado na Figura 4, a maioria das cargas conectadas em uma rede de distribuição são de natureza indutiva. Isso significa que, se no momento da falta o LCC inserir uma impedância:
  - Indutiva, a corrente de curto-circuito será menor, porém a componente de regime transitório da corrente decairá mais lentamente;
  - Resistiva, a corrente de curto-circuito será menor e a componente de regime transitório da corrente decairá mais rapidamente;

Idealmente, o limitador de corrente deve inserir uma impedância resistiva no momento da falta;

- **Tempo de transição do modo de operação normal para o modo limitador** - Quanto mais rápida a atuação do LCC, menores serão os efeitos da falta no sistema a ser protegido;
- **Tempo de recuperação** - Como muitos defeitos são de natureza transitória, deseja-se que o LCC esteja apto para o religamento da rede após o curto-circuito o mais rápido possível;
- **Confiabilidade** - A maioria dos LCCs são conectados em série com a rede. Assim, a confiabilidade de todo o sistema é diretamente dependente do bom funcionamento do dispositivo limitador. Além disso, é importante avaliar o impacto na rede quando o LCC falha em sua atuação. Alguns dispositivos são classificados como de “falha segura”, significando que caso ocorra um defeito no próprio LCC, ele não desligará o sistema;
- **Custos de instalação e de manutenção** - A viabilidade econômica da instalação do dispositivo LCC está diretamente relacionada com estes parâmetros;
- **Volume e peso** - Algumas subestações possuem espaço limitado, o que pode inviabilizar a instalação de dispositivos de grande peso e volume.

Os LCCs podem ser instalados em diversos pontos de uma rede de distribuição, como exemplificado na Figura 5. A escolha do melhor ponto para a instalação do LCC é normalmente baseada no resultado de inúmeras simulações. Geralmente, os pontos de instalação avaliados são:

- Conexão entre barramentos;
- Alimentadores;
- Saída de Transformadores;

- Geradores Independentes.

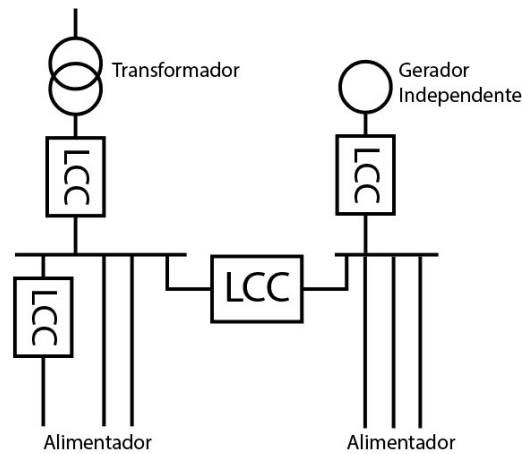


Figura 5 - Possíveis conexões para dispositivos LCCs.  
FONTE: Elaboração Própria.

## 2.1 LCCs comerciais

Dentre as diversas tecnologias existentes de LCCs algumas se destacam pelo seu grau de maturidade e desenvolvimento tecnológico. Algumas destas tecnologias já estão inseridas no sistema elétrico e contam com a expertise de diversos fabricantes.

### 2.1.1 Reatores a Núcleo de Ar

Os reatores a núcleo de ar são a tecnologia mais antiga para a limitação de correntes de curto-circuito. Por não estarem sujeitos à saturação de um núcleo ferromagnético, a indutância dos reatores construídos com núcleo de ar se mantém constante quando estes são submetidos a elevados níveis de corrente. Para a limitação de corrente, o dispositivo deve ser inserido em série com o sistema a ser protegido. Durante o curto-circuito, a impedância com característica indutiva inserida pelo reator apresenta um efeito colateral ao aumentar a constante de tempo do sistema, fazendo com que uma componente de corrente de regime transitório retarde a ação dos dispositivos de proteção que atuam com corrente nula.

Durante o regime permanente, a impedância adicionada ao sistema também apresenta efeitos indesejados, como aumento da queda de tensão e das perdas por efeito Joule. Ainda assim, em função de sua simplicidade e baixo custo, os reatores a núcleo de ar são uma solução comercial economicamente viável. Alguns fabricantes desta tecnologia são:

- *Siemens*;
- *Trench Group*;
- Adelco Sistemas de Energia;
- IBT - Indústria Brasileira de Transformadores Ltda.

Em [6], a empresa IBT apresenta equacionamento para dimensionamento dos reatores a núcleo de ar utilizados em limitadores de corrente. De fato, a tecnologia para fabricação destes dispositivos é amplamente difundida na indústria, o que contribui para a viabilidade econômica do produto. No entanto, a viabilidade técnica para a instalação de reatores de núcleo de ar no sistema necessita de estudos de curto-circuito, fluxo de potência e transitórios eletromagnéticos [7]. Alguns dos efeitos indesejados desta tecnologia, como aumento das quedas de tensão e problemas relacionados a estabilidade transitória, podem ser amenizados em redes altamente malhadas [8]. Se for necessário, pode-se associar bancos de capacitores nos terminais deste dispositivo, como ilustrado na Figura 6.

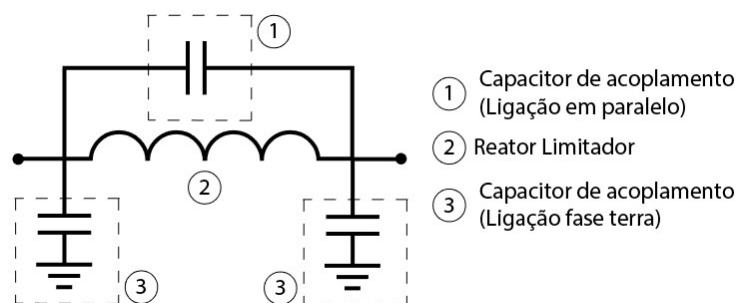


Figura 6 - Ilustração de reator limitador com banco de capacitores em seus terminais.  
 FONTE: Elaboração Própria.

O reator a núcleo de ar é o único dispositivo LCC disponível comercialmente para todos os níveis de tensão [9], além de ser uma solução utilizada em todo o mundo. No Brasil, alguns exemplos de sua utilização são:

- Subestação de Jaguará – 138 kV – MG;
- Subestação de Angra – 138 kV – RJ;
- Subestação de Mogi das Cruzes – 345 kV – SP;
- Subestação de Tucuruí – 500 kV – PR.

A Figura 7 apresenta uma fotografia dos reatores limitadores da subestação de Tucuruí, onde fica evidente a necessidade de se manter um espaçamento mínimo entre estes dispositivos, o que pode ser um empecilho para a sua instalação em algumas subestações. Este espaçamento tem como objetivo reduzir as forças de interação magnética entre os dispositivos durante o curto-circuito.

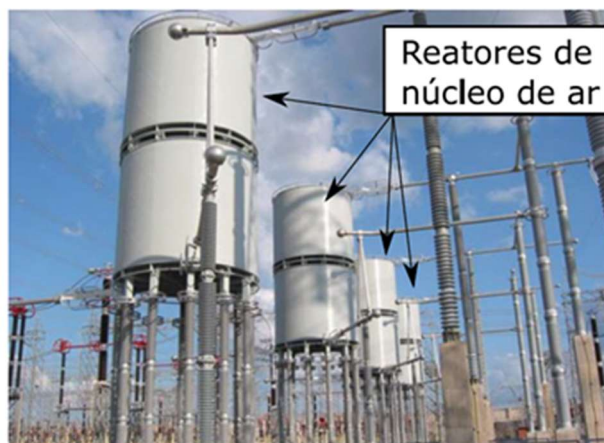


Figura 7 - Fotografia dos reatores limitadores da subestação de Tucuruí de 500 kV.  
FONTE: Adaptada de [7].

### 2.1.2 Dispositivos Pirotécnicos

Limitadores pirotécnicos são amplamente utilizados em todo mundo, uma vez que sua tecnologia foi desenvolvida na década de 50. No Brasil, estes dispositivos começaram a ser utilizados apenas na década de 90 pelas empresas CSN (Companhia Siderúrgica Nacional), CENIBRA, ARACRUZ, ACESITA, MANNESMANN e CST Stell [9]. Na época, estas empresas passaram a ter em suas plantas um sistema de cogeração, que acabou elevando os níveis de curto-circuito [8]. Para evitar a troca dos equipamentos instalados, estas indústrias optaram pela instalação de um dispositivo limitador pirotécnico, que já era uma solução comercial. Os principais fabricantes desta tecnologia são a *G&W Electric* e a *ABB*. É importante ressaltar que este dispositivo não elimina a necessidade dos equipamentos de manobra convencionais dos circuitos, como chaves seccionadoras e disjuntores [10]. No caso de curtos-circuitos com baixos níveis, quando o disjuntor é capaz de atuar com segurança, o limitador de corrente não precisa ser acionado.

Dispositivos pirotécnicos são capazes de interromper a corrente de curto-circuito em menos de  $\frac{1}{4}$  de ciclo [9]. Seu princípio de funcionamento está esquematizado na Figura 8, na qual observa-se que este LCC atua com base nas informações obtidas através de sensores de corrente. Desta forma, falhas do sensor podem implicar em um mau funcionamento do dispositivo. Com relação ao seu princípio de funcionamento, o dispositivo pirotécnico possui um barramento principal projetado para conduzir a corrente nominal. Este barramento possui estrangulamentos sob os quais estão conectadas cargas explosivas que funcionam como uma chave de abertura quando o curto-circuito é detectado (Figura 9). Após a explosão, a corrente se desvia para um fusível limitador de corrente com capacidade de ruptura adequada para interromper correntes de até 210 kA [8]. A Figura 10 apresenta imagens do fusível e do



barramento principal antes e após a atuação do limitador. É importante ressaltar que devido ao emprego do elemento fusível em paralelo, estes dispositivos são projetados para tensões máximas de até 40 kV [7].

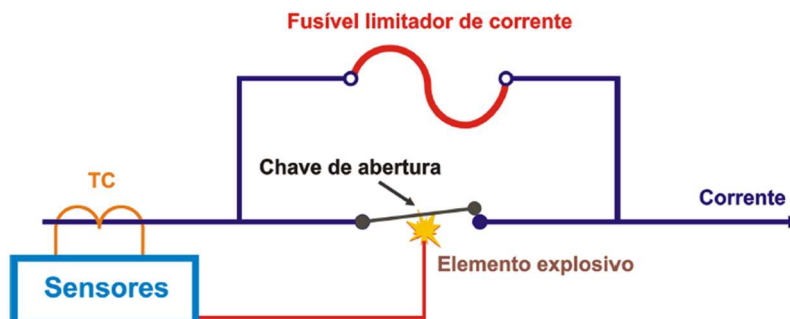


Figura 8 - Esquema do limitador de corrente pirotécnico.  
FONTE: Adaptada de [9].

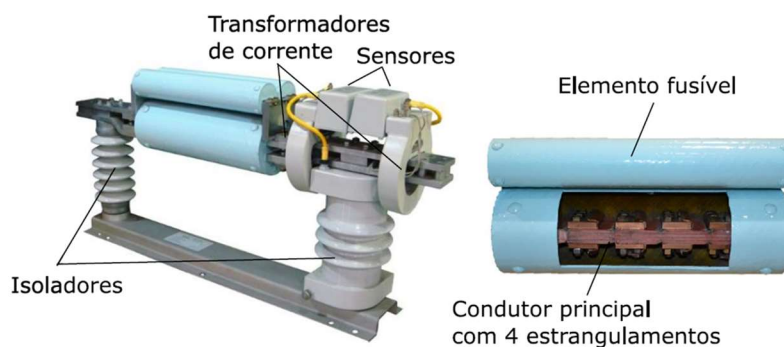


Figura 9 - Dispositivo pirotécnico da G&W.  
FONTE: Adaptada de [7].

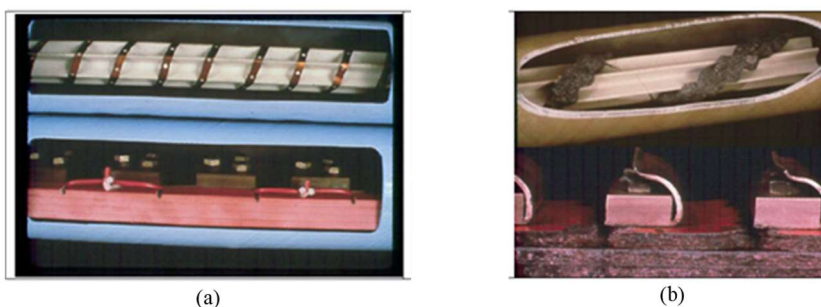


Figura 10 - Fusível e barramento principal (a) antes e (b) após a atuação do limitador.  
FONTE: Adaptada de [8].

O dispositivo pirotécnico deve atuar antes que a corrente de curto-circuito ultrapasse a capacidade de interrupção dos disjuntores, como exemplificado na Figura 11. Nota-se que após a atuação, este limitador de corrente precisa ser rearmado manualmente através da troca do elemento fusível e da câmara do barramento principal. Desta forma, deve-se levar em conta um custo operacional que engloba o custo dos componentes de reposição e o tempo em que o sistema ficará sem fornecimento de energia, sem produzir [11]. Como este processo de

reestabelecimento é lento e caro, dispositivos pirotécnicos só devem ser instalados em locais com pouca ocorrência de curto-circuito [7].

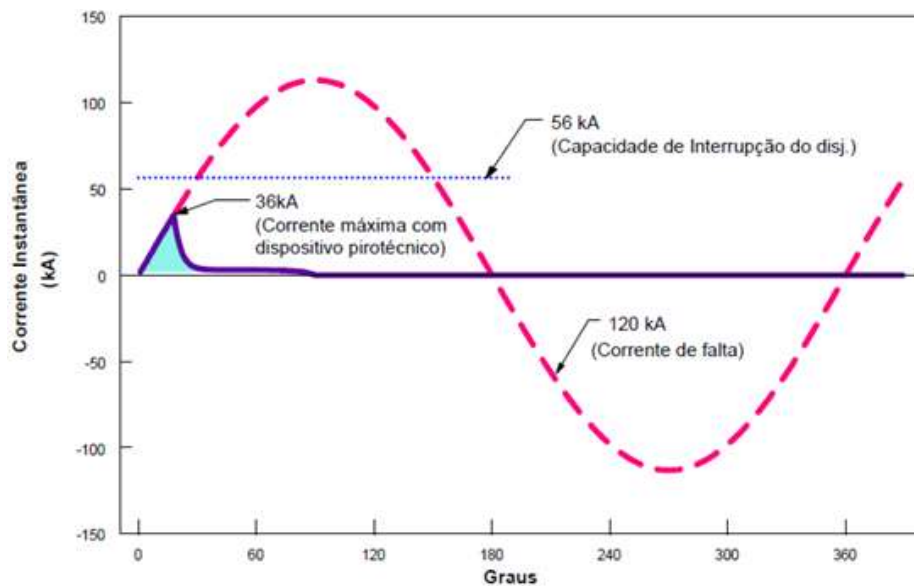


Figura 11 - Interrupção da corrente de curto-circuito através de um dispositivo pirotécnico.  
FONTE: Adaptado de [8].

Uma alternativa para que o restabelecimento do circuito não dependa da substituição da unidade limitadora (elemento fusível e câmara do barramento principal) é apresentada na Figura 12. Basicamente, um reator limitador foi inserido em paralelo com o dispositivo pirotécnico, sendo responsável por limitar a corrente enquanto a unidade limitadora não é substituída. Desta forma, o circuito pode ser energizado novamente após a eliminação da falta ao custo de maiores perdas de regime permanente. A Figura 13 exemplifica esta operação, onde a corrente prospectiva máxima foi reduzida de 85 kA para 39,9 kA com a inserção do reator limitador. Nesta configuração, o dispositivo pirotécnico possui a função de reduzir as perdas durante o regime permanente.

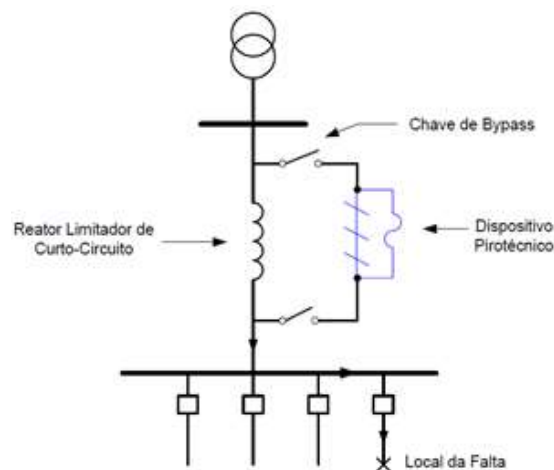


Figura 12 – Inserção reator limitador após a atuação do dispositivo pirotécnico.  
FONTE: Adaptada de [8].

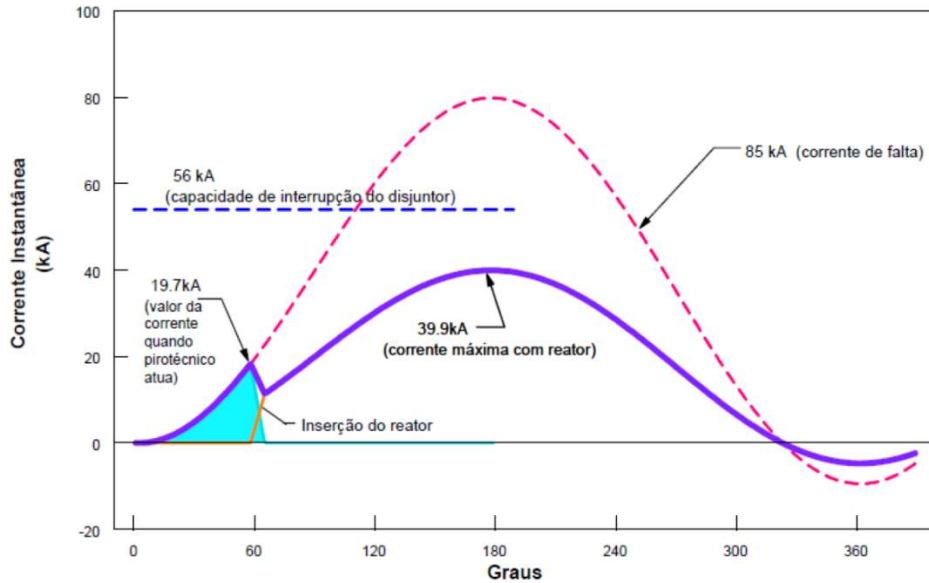


Figura 13 – Interrupção da corrente de curto-circuito através de um dispositivo pirotécnico em paralelo com um reator.

FONTE: Adaptada de [8].

### 2.1.3 Resistor de Aterramento

Uma alternativa barata para a limitação de corrente de curto-circuito em redes de distribuição consiste no aterramento do neutro do transformador através de um banco de resistores. Em [5] e [8], esta solução foi classificada como provisória devido ao fato de ser eficaz apenas em falhas monofásicas. Além disso, o resistor de aterramento permite o surgimento de uma diferença de potencial (ddp) entre a terra e o neutro do transformador. Esta ddp é proporcional aos valores da resistência de aterramento ( $R$ ) e da corrente que passa por ela ( $I_N$ ), de acordo com a Equação (2).

$$ddp = R \cdot I_N, \quad (2)$$

No caso das faltas monofásicas, a corrente  $I_N$  que aparece em (2) é justamente a corrente de curto-circuito, fazendo com que a tensão de neutro do transformador atinja valores elevados. Esta ddp pode aparecer também durante o regime permanente, uma vez que a corrente  $I_N$  está relacionada com o desequilíbrio das correntes de fase no transformador.

## 2.2 LCCs Supercondutores

Os limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores (LCCS) são dispositivos que possuem impedância aproximadamente nula em operação normal, porém em condição de falta, sua impedância cresce rapidamente em até menos de  $\frac{1}{4}$  de ciclo. Isso se deve à propriedade intrínseca do material em transitar do estado supercondutor para o estado normal, em função do rápido aumento da temperatura que ocorre durante o curto-circuito. A Figura 14 apresenta

as formas de onda típicas da corrente de falta (prospectiva) e com a inserção de um LCCS do tipo resistivo. Observa-se que durante a condição normal do sistema, o dispositivo apresenta uma impedância virtualmente nula e, na ocorrência de um curto-circuito, é inserida uma impedância que reduz o valor de pico da corrente já no primeiro semiciclo.

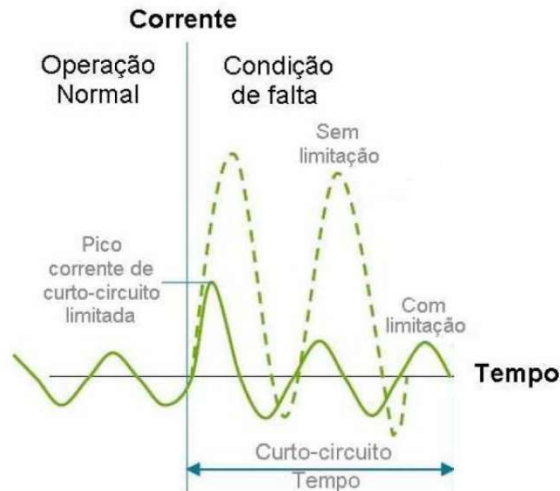


Figura 14 - Formas de onda característica de corrente de curto com/sem aplicação de LCCS do tipo resistivo.  
 FONTE: Adaptada de [12].

Considerados como uma das soluções mais promissoras para o problema dos altos níveis de curto-circuito nos sistemas elétricos [13], [14], estes LCCS apresentam as seguintes vantagens:

- Baixa impedância em condições normais;
- Não há necessidade de substituição de partes ou componentes após atuação;
- Não utiliza sensores para detecção de faltas;
- Automático e curto período de recuperação após normalização do sistema;
- Falha-segura (na ocorrência de um defeito, seja no sistema criogênico ou em outros componentes do equipamento, o circuito não poderá ser interrompido de forma indevida).

Dentre os principais tipos de LCCS propostos na literatura, podem-se destacar 3 configurações: resistivo [15]–[17], indutivo [18]–[20] e núcleo saturado [21]–[23].

### 2.3 LCCs de Estado Sólido

Os LCCs ditos de estado sólido são aqueles que têm as chaves semicondutoras de potência como principal elemento que garante a limitação da corrente de curto-circuito, ou que o seu princípio de funcionamento é dependente de tais chaves. Muitas vezes os LCCs de estado sólido são combinados com outras técnicas, classificando o LCC resultante conforme sua relevância operacional, ou como um LCC do tipo híbrido. Por comodidade de escrita, o arranjo de chaves

é comumente descrito apenas como chave, podendo ainda ser “as chaves” ou “a chave bidirecional”, dentre outros termos correlatos. Porém, deve-se ter em mente que se trata de um arranjo, capaz de suportar os níveis de tensão e corrente existentes durante a operação do dispositivo.

Além da limitação de corrente dos LCCs de estado sólido, também tem sido estudada a possibilidade de integração de outras funções em um único equipamento, como capacidade de interrupção de um disjuntor CC [24]–[26] e compensação de fator de potência [27], [28].

A seguir são discriminados os LCCs de estado sólido em suas subclassificações, que se dá de acordo com a forma com que são dispostos no circuito ou de acordo com seu arranjo construtivo (novamente em alusão a característica mais marcante).

### 2.3.1 Tipo Série Chaveado

O LCC tipo série chaveado é composto por em arranjo bidirecional de chaves semicondutoras controladas, SSS (*Solid-State Switch*), e um sistema de *shunt*, conforme apresentado na sua forma mais genérica na Figura 15. A chave bidirecional pode ser implementada utilizando um dos vários dispositivos semicondutores (SCR, GTO, ETO, IGBT, IGCT, etc), enquanto o sistema de *shunt* pode ser uma combinação de vários ramais em paralelo, sendo, conforme o exemplo da Figura 15: o *shunt* de regime permanente da rede, representado por uma chave mecânica  $S_{bp}$ ; *shunt* de corrente de falta, representado por uma impedância  $Z_f$ ; *shunt* de proteção de sobretensão, representado pelo resistor variável  $Z_nO$ ; e um dispositivo *snubber* que compõe o arranjo das chaves. Cabe destacar que, dependendo do algoritmo de resposta às faltas, o limitador de corrente de curto-circuito de estado sólido pode usar um sistema de *shunt* mais ou menos sofisticado.

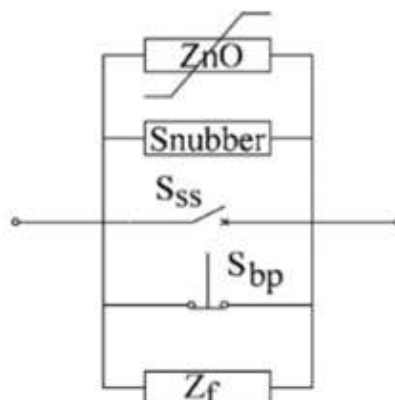


Figura 15 - Configuração genérica do LCC tipo chave série.  
FONTE: [29].

Um *shunt* de regime permanente é geralmente implementado por uma chave eletromecânica, cuja finalidade é fornecer um caminho de condução de baixa resistência a fim de diminuir as perdas semicondutoras e a distorção de forma de onda no estado normal de operação. Seu uso é opcional.

Um *shunt* de corrente de falta é empregado pelos LCCs não interruptivos e tem como objetivo restringir que esta corrente passe pelo circuito de potência e permitir que outros esquemas de proteção tomem a ação apropriada. O *shunt* de corrente de falta pode ser implementado com componentes resistivos ou indutivos. Devido ao gerenciamento térmico menos exigente, o *shunt* indutivo é a solução mais utilizada [30]. LCCs de interrupção não possuem *shunt* de corrente de falta. Quanto à forma de atuação (controle), alguns esquemas apenas desligam as chaves para interromper a corrente, enquanto outros projetos controlam o ângulo de disparo de modo a modular e manter a corrente de falta dentro de limites aceitáveis [31], [32].

Enquanto os desvios de corrente de estado normal e de corrente de falta são opcionais, o *shunt* de proteção de sobretensão é obrigatório. O *shunt* de sobretensão é geralmente implementado com varistores ou para-raios de alta tensão de  $Z_nO$  de alta potência. Como a chave é comandada para desligar, o varistor fornece um caminho alternativo de corrente, o que limita a tensão na chave e absorve parte da energia armazenada na indutância da linha. No caso de a chave ser uma chave composta (característica do arranjo), os varistores também podem ser colocados em cada dispositivo semiconductor individual, de modo a equalizar e limitar a tensão entre uma determinada chave, evitando uma sobretensão indesejada devido à atrasos de atuação entre as chaves.

O dispositivo *snubber* é uma parte importante do LCC. Sua tarefa é limitar a taxa de variação de tensão sobre a chave no momento do desligamento, mantendo-a abaixo do valor máximo permitido de acordo com as especificações do fabricante.

A Tabela 1 apresenta alguns trabalhos desenvolvidos com a configuração de LCC do tipo série chaveado.

Tabela 1 - Tecnologias de LCC indutor chaveado.

Tecnologia	Tipo	Autor	Publicação	País
Chave SCR Bidirecional	Simulação	[33]	2004	Alemanha
Chave ETO Bidirecional	Experimento	[34]	2006	EUA
Chave GTO e disjuntor auxiliar a vácuo	Experimento	[35]	1994	Japão
Chave IGBT e interruptor	Experimento	[36]	2006	Reino Unido

FONTE: Elaboração Própria

### 2.3.2 Tipo Circuito Ressonante

O efeito de ressonância é definido pela interação entre dois elementos capazes de armazenar energia elétrica, como o capacitor e indutor. Na frequência de ressonância a impedância capacitiva é igual a impedância indutiva e é dada pela Equação (3), em que  $f_{RES}$  é a frequência de ressonância,  $L$  é a indutância,  $C$  a capacitância e  $R$  a resistência, normalmente associada ao cabo do indutor. O circuito de ressonância pode ter seus elementos em série ou paralelo.

$$f_{RES} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{L^2}} \quad (3)$$

Com exceção do limitador supercondutor todos os limitadores necessitam de um detector de falta para acionamento. Porém uma das vantagens do limitador circuito Ressonante é a possibilidade de se implementar uma característica de acionamento de passivo.

#### 2.3.2.1 Tipo Circuito Ressonante Série

Para a ligação em série a impedância equivalente tende a zero na frequência de ressonância. A Figura 16 apresenta diferentes de ligações para a configuração circuito Ressonante série chaveando os elementos. Para eliminar a ressonância é possível chavear tanto o elemento indutivo quanto o capacitivo do circuito.

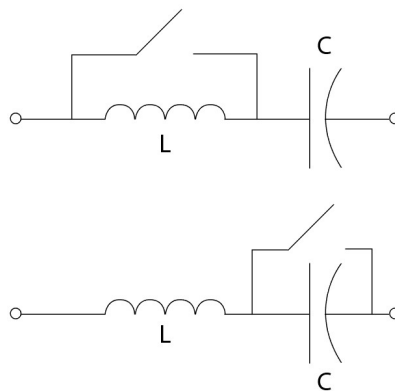


Figura 16 – Diferentes tipos de LCC circuito Ressonante série.  
FONTE: Elaboração Própria.

O circuito Ressonante série tem como característica um aumento gradual da corrente na ocorrência de uma falta. Removendo o elemento capacitivo a corrente do sistema é limitada de forma amortecida, porém há uma maior queda de tensão. Com a remoção do elemento indutivo há uma grande variação de corrente para seu nível limitado, mas uma menor queda de tensão [37].

Uma das técnicas de acionamento passivo para o circuito Ressonante série é o uso de um reator de núcleo saturado, visto na Figura 17. Todos os materiais ferromagnéticos têm uma

característica de saturação, e após certo valor de corrente a indutância do enrolamento se torna muito pequena. Essa rápida variação pode desequilibrar o circuito LC e inserir uma reatância capacitiva significativa durante a falta. Porém a corrente passa a ter uma harmônica de terceira ordem expressiva devido ao efeito de saturação. E ainda a corrente não é tão limitada quanto a técnica em que o indutor é completamente chaveado, pois a indutância do núcleo saturado não diminuiu até zero. Assim o núcleo saturado deve ser dimensionado de forma que a diferença entre condição normal e condição de saturação seja grande, com isso o valor da capacitância C deve ser ajustada de acordo.



Figura 17 – Aplicação de reator de núcleo saturado para atuação passivo do circuito Ressonante série.  
FONTE: Adaptado de [37].

Outra forma de acionar o limitador sem o uso de um detector de falta é com um resistor especial, que tem seu valor de resistência em função da queda de tensão. Alguns óxidos metálicos, chamados de varistores de oxido metálico (do inglês *Metal Oxide Varistor* – MOV), tem a característica da rápida redução de resistência caso a tensão aplicada exceda um limite. Este resistor pode ser conectado em paralelo com o capacitor, visto na Figura 18.

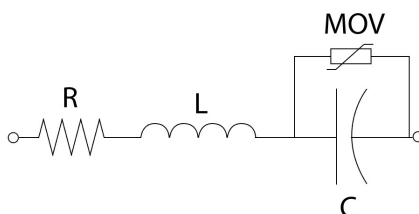


Figura 18 – Aplicação de MOV para atuação passivo do circuito Ressonante série.  
FONTE: Adaptado de [37].

Durante a falta a tensão no capacitor aumenta, e o MOV em paralelo irá ser parcialmente curto-circuitado. Assim a impedância equivalente será indutiva. Porém há uma maior queda de tensão no circuito quando se compara com o uso de chaves semicondutoras para chavear o capacitor, resultante da distorção da tensão no capacitor causada pelo MOV. Essa técnica pode ter uma maior limitação da corrente em comparação com o uso do reator de núcleo saturado, assim como uma menor taxa de distorção harmônica [37].



### 2.3.2.2 Tipo Circuito Ressonante Paralelo

Na ligação em paralelo do circuito Ressonante a impedância equivalente tende a infinito na frequência de ressonância. Como esclarecido em [37], considerando a Equação (3) é possível sintonizar a ressonância variando a resistência, o que pode ser mais fácil do que alterar os valores de L ou C para esse circuito. Como resultado pode-se associar um resistor em série com o indutor a fim de alterar a impedância equivalente do circuito.

Ao contrário do circuito Ressonante série o circuito paralelo não tem um aumento gradual da corrente na falta. Como o valor de R determina a impedância equivalente do circuito é possível estabelecer os modos de operação do limitador. Para um valor de R grande o circuito será capacitivo na operação normal e indutivo na operação de limitação. Já para um valor de R pequeno o circuito será indutivo para operação normal e capacitivo na operação de limitação. Porém nenhuma destas parcelas tem contribuição nas perdas do sistema pois a componente real da impedância é desprezível. Como em sistemas de distribuição, na maioria dos casos, a impedância equivalente é indutiva recomenda-se que utilize o modo de operação normal capacitivo [37].

Quando não há o chaveamento dos elementos ambos sofrem com os efeitos da corrente de falta. As correntes pelos elementos são maiores para a impedância equivalente capacitiva na limitação do que a impedância indutiva. Logo o capacitor deve ser dimensionado para suportar a corrente de curto-circuito, tornando o circuito com limitação por impedância capacitiva a opção mais custosa [37].

Entretanto ainda é possível utilizar o acionamento ativo do limitador, utilizando normalmente as chaves tiristores [5]. Como pode ser visto na Figura 19 (a) em que o indutor pode ser chaveado, ou na Figura 19 (b) em que o controle da ressonância se dá pelo chaveamento do capacitor. Nota-se que, neste caso, não é possível chavear todos os capacitores, pois assim todo o limitador seria chaveado. Essas formas de controle são comumente conhecidas respectivamente como Capacitor Série Controlado por Tiristor (do inglês *Thyristor Controlled Series Capacitor* – TCSC) e Capacitor Série Chaveado por Tiristor (do inglês *Thyristor Switched Series Capacitor* – TSSC).

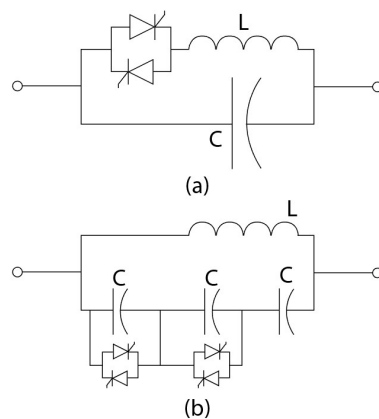


Figura 19 – Configurações de circuitos Ressonante paralelo com acionamento ativo; (a) TCSC; (b) TSSC.  
 FONTE: Elaboração Própria.

### 2.3.2.3 Comparação de desempenho

É possível sintetizar as seguintes conclusões das diversas possibilidades de construção de um LCC Ressonante [37]:

1. O projeto e operação de um circuito série é mais simples que um paralelo devido a sua análise simples e direta.
2. Os modos de operação do circuito paralelo são possibilitados pelo simples ajuste de um resistor em série com o indutor, o que é virtualmente impossível para o circuito série.
3. O circuito série não permite que a corrente de falta cresça de forma instantânea, independentemente da sua construção.
4. Os elementos utilizando o circuito série devem suportar a corrente total passando pelo sistema no momento da falta, enquanto que o circuito em paralelo em muitos casos deve suportar apenas uma porção desta.
5. O mais recomendado é que se tenha uma impedância capacitiva no modo de operação normal e indutiva na limitação.
6. Operação passiva aperfeiçoará substancialmente o desempenho do limitador, tornando-o competitivo com o limitador supercondutor.

Para comparar com precisão os vários projetos de LCCs Ressonantes vários fatores devem ser abordados, como capacidade de limitação de corrente, componente CC, queda de tensão, distorção harmônica, recuperação rápida após a falta e tempo de ativação. A Tabela I fornece um resumo da comparação de desempenho entre os limitadores, pontuando-as como excelente (E), boa (B), moderada (M) e não aplicável (N/A).

Tabela 2 – Comparação dos LCCs Ressonante

	Série				Paralelo			
	Ativo		Passivo		Ativo		Passivo	
	Ind	Cap	Ind	Cap	Ind	Cap	Ind	Cap
Limitação de corrente	E	B	E	B	E	B		E
Componente CC	M	E	E	E	B	M		M
Queda de Tensão	M	B	M	E	M	M		E
Distorção Harmônica	E	M	E	M	B	B	N/A	B
Recuperação Rápida	E	B	E	E	E	E		E
Custo de Fabricação	B	B	B	M	M	E		M
Tempo de ativação	B	B	E	E	M	M		E

FONTE: Adaptado de [37].

De forma geral o melhor limitador seria o limitador série indutivo passivo, que recebeu cinco excelentes, e o pior seria o limitador série capacitivo ativo, que recebeu um excelente. Entretanto os pesos de cada fator devem ser determinados pelas necessidades de cada projeto a fim de selecionar a melhor escolha a ser aplicada.

A Tabela 3 apresenta alguns trabalhos desenvolvidos utilizando o LCC ressonante.

Tabela 3 - Tecnologias de LCCC ressonante.

Tecnologia	Tipo	Autor	Publicação	País
LCCC Ressonante	Simulação	[38]	2007	Brasil
	Simulação	[39]	1992	EUA
	Simulação	[40]	1996	Japão
	Simulação e experimento	[41]	2007	México

FONTE: Elaboração Própria

### 2.3.3 Tipo Ponte

Os LCCs do tipo ponte são construídos utilizando um arranjo de comutação de ponte completa alimentado por fonte CC, segundo a Figura 20(a). Essa configuração é adequada para utilização de diodos e tiristores como chaves comutadas por linha. LCCs tipo ponte não possuem *shunt* de estado normal, podem ou não ter *shunt* de corrente de falha e possuem varistores para proteção contra sobretensão. Entretanto esta configuração de limitador tem como desvantagem a complexidade e o custo elevado.

Em condição normal, todos os elementos da ponte estão no modo “LIGADO”, fornecendo caminho de condução irrestrito para a corrente da linha CA, conforme a Figura 20(b). O princípio de operação do LCC do tipo ponte depende da inserção de uma fonte de corrente CC em série com a linha, como ilustrado na Figura 20(c). Os LCCs práticos do tipo ponte usam reatores para emular a ação de fonte de corrente. No caso de a ponte ser realizada com

comutadores controlados por tiristor ou semicondutores, é possível a interrupção de corrente alternada ou desvio para um *shunt* de corrente de falha, como mostrado na Figura 20(d).

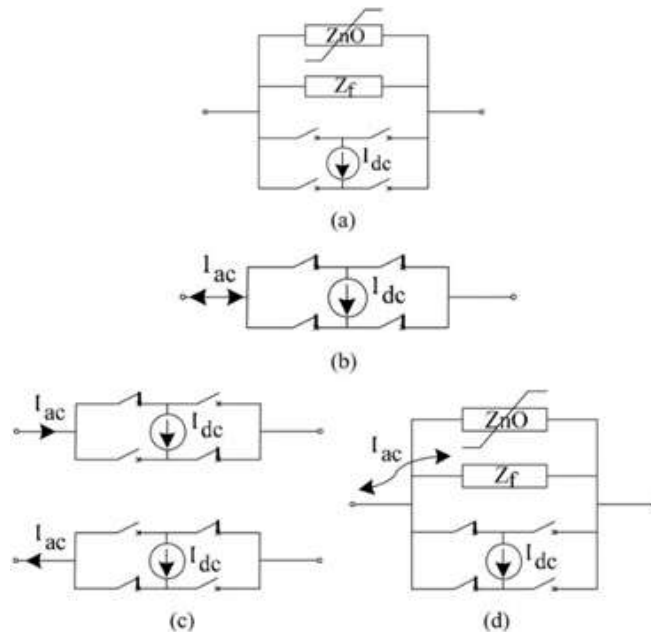


Figura 20 - (a) Configuração genérica do LCC tipo ponte; (b) EN; (c) falta de corrente alternada limitada pela fonte de corrente; (d) falta de corrente alternada limitada pelo *shunt* de falha.

FONTE: [29].

A Tabela 4 apresenta algumas informações e referências dessas configurações de LCCs do tipo ponte:

Tabela 4 - Informações de algumas configurações de LCC tipo ponte.

Tecnologia	Tipo	Autor	Publicação	País
Limitador de Corrente de Inrush de transformador com LCC de ponte retificadora	Simulação e experimento	[42]	2007	Irã
LCC com ponte de SCR e 2 Reatores	Simulação e experimento	[43]	2003	China
LCC Ponte Semi Controlada por IGCT	Simulação e experimento	[44]	2006	China
	Simulação e experimento	[45]	2007	China
LCC ponte de IGCT com chave simples	Simulação e experimento	[46]	2007	China
	Simulação e experimento	[43]	2008	China
LCC ponte GTO com transformador isolado	Simulação	[47]	2006	Canadá

FONTE: Elaboração Própria

## 2.4 Dispositivos FACTS

FACTS (*Flexible Alternative Current Transmission System*) é um sistema composto por equipamentos estáticos utilizados para transmissão de energia elétrica de corrente alternada.

Destina-se a melhorar a capacidade de controle e aumentar a capacidade de transferência de energia da rede. Geralmente é um sistema baseado em eletrônica de potência.

Os equipamentos com tecnologia FACTS podem ser classificados em três grupos: os equipamentos em derivação, os em série e os híbridos que combinam equipamentos em derivação e série simultaneamente. Alguns destes dispositivos FACTS são citados abaixo:

- Compensadores estáticos – SVC (*Static Var Compensator*) [48];
- Reator controlado por tiristor – TCR (*Thyristor Controlled Reactor*) [49];
- Capacitor chaveado por tiristor – TSC (*Thyristor Switched Capacitor*) [49];
- Capacitor série chaveado por tiristor – TSSC (*Thyristor Series Switched Capacitor*) [50];
- Capacitor série controlado por tiristor – TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*) [48];
- Transformador defasador – PST (*Phase Shift Transformer*) [51];
- Compensador síncrono estático – STATCOM (*Static Synchronous Compensator*) [48];
- Compensador síncrono estático série – SSSC (*Static Synchronous Series Compensator*) [48];
- Controlador universal de fluxo de potência – UPFC (*Unified Power Flow Controller*) [48];
- Controlador de fluxo de potência da rede – GPFC (*Grid Power Flow Controller*) [52];

Os equipamentos atuais que são baseados nos tiristores sofrem limitações devido à impossibilidade de controle total das chaves, devido a abertura desta chave só ocorrer no cruzamento da corrente por zero. Os principais esforços na área de eletrônica de potência se concentram em aperfeiçoar a tecnologia de chaves eletrônicas totalmente controladas, como o tipo GTO (*Gate Turn Off Thyristor*), IGCT (*Integrated Gate Controlled Thyristor*) e IGBT (*Isolated Gate Bipolar Transistor*).

As funções destes equipamentos podem ser associadas às aplicações:

- Controle de fluxo de potência ativa e reativa pelas linhas de transmissão;
- Amortecimento de oscilações eletromecânicas
- Aumento da capacidade de transmissão;
- Limitação das correntes de curto-circuito.

A tecnologia FACTS se tornou realidade, de modo que existe um conjunto de controladores os quais deve-se escolher aquele que se encaixa melhor para uma aplicação específica. Dos dispositivos FACTS mencionados no contexto, o controlador mais promissor para a aplicação

de limitação de corrente de curto-circuito é o TCSC. Este dispositivo já é utilizado para o controle de fluxo de potência e amortecimento de oscilações de potência.

A Figura 21 apresenta o esquema básico do TCSC para limitar correntes de curto-circuito. O circuito de potência do TCSC é composto de um banco de capacitor série em paralelo com um reator controlado por tiristores (RCT) e um para-raios (MOV – *Metal Oxide Varistor*) para proteção do capacitor.

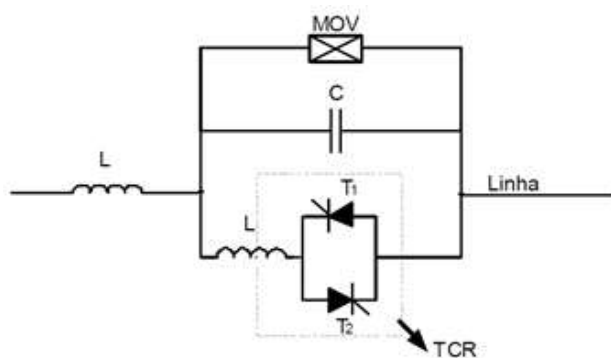


Figura 21 - Diagrama esquemático do TCSC para limitar curto-circuito.  
FONTE: [8].

Ao combinar o capacitor série convencional com os RCTs, permite-se o controle contínuo da impedância deste dispositivo. A função do TCSC de ajustar sua impedância de uma reatância capacitiva para uma reatância indutiva (chaveamento pleno dos tiristores) pode ser utilizado para limitar as correntes de falta [8].

O dispositivo TCSC possui um elevado custo em comparação com outras soluções de LCC. Portanto, este dispositivo deve ser avaliado quanto ao custo-benefício da implementação de funcionalidades adicionais, além das limitações das correntes de curto-circuito, para que se possa considerar sua aplicação. No Brasil, estão sendo utilizados quatro TCSCs para o amortecimento de oscilações de potência nas interligações Norte-Sul I e II, instalados nas subestações de Imperatriz e Serra da Mesa 500 kV.

Além do TCSC, pode-se destacar um novo dispositivo que é baseado na tecnologia FACTS, combinando como um TPSC (*Thyristor Protected Series Compensation*), com um reator externo série. A Figura 22 apresenta um diagrama simplificado deste novo dispositivo. Em regime permanente, este dispositivo opera com uma impedância nula (circuito LC ressonante). Na ocorrência de falta, o capacitor é retirado do circuito através da chave semicondutora. Desta forma a impedância equivalente do circuito é aumentada, limitando a corrente de curto-circuito. O TPSC utilizado no dispositivo limitador, é composto por uma tecnologia de disparo dos tiristores por luz (tecnologia LTT- *Light-Triggered Thyristor*) e um sistema de resfriamento das

válvulas através de dissipadores de calor (*special heat-sink*), dando a este dispositivo uma maior capacidade de atuação.

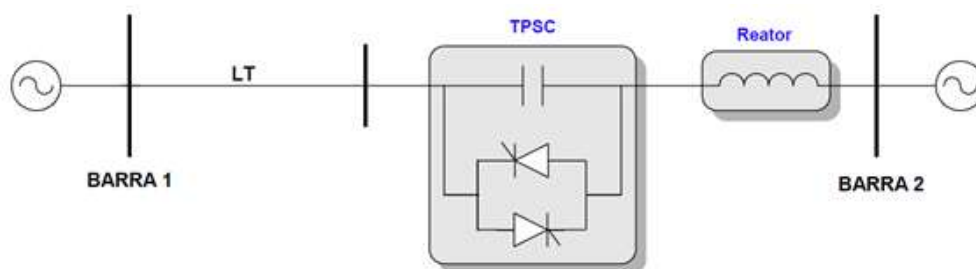


Figura 22 - Diagrama esquemático do dispositivo limitador baseado no TPSC.  
FONTE: [8].

Assim, apresentada as diversas configurações de limitador estudadas, duas destas foram selecionadas para a construção de protótipo e estudo. Os critérios utilizados foram a simplicidade de operação e a menor quantidade de equipamentos. As configurações escolhidas foram a Série Chaveada e circuito Ressonante.

### 3 Construção dos protótipos LCCs

Como visto no capítulo 2 existem diversas configurações de limitadores. Para o desenvolvimento experimental deste trabalho foram considerados os LCCs de estado sólido por possuírem maior simplicidade de aplicação e menor quantidade de equipamentos. Dentre as possíveis configurações dentro deste conjunto optou-se por duas delas, o Série Chaveado com indutor (ISC) e circuito Ressonante série com impedância indutiva.

Este capítulo irá apresentar a metodologia utilizada para o estudo e o processo de construção destes LCCs, indicando os principais componentes para obtenção dos mesmos. Também é descrito o sistema de controle, demonstrando a lógica de detecção de curto-circuito e operação das chaves, os equipamentos de medição, controle e operação. A validação do código desenvolvido que será embarcado no microcontrolador também é efetuada, baseada em simulação *hardware in the loop*.

A Figura 23 apresenta o princípio de operação do limitador ISC aplicado a um sistema, em que a área delimitada pela linha tracejada representa o limitador. O sistema é representado por uma fonte de tensão, uma resistência de carga e uma resistência de curto, que pode ser inserida ou retirada do circuito por meio de uma chave ideal. Nesta configuração as chaves semicondutoras estão em condução no regime permanente (Figura 23(a)), fazendo com que o LCC não acrescente impedância ao sistema. Com a ocorrência do curto-circuito, mostrado na Figura 23(b), há uma situação não desejada para o sistema. E então, através de um sistema detector de faltas, as chaves deixam de conduzir e o indutor entra em série com o sistema, visto na Figura 23(c), aumentando a impedância e assim, reduzindo a corrente de curto-circuito.

A Figura 24 apresenta o princípio de operação do limitador Ressonante aplicado a um sistema, em que a área delimitada pela linha tracejada representa o limitador. O sistema é representado por uma fonte de tensão, uma resistência de carga e uma resistência de curto, que pode ser inserida ou retirada do circuito por meio de uma chave ideal. Nesta configuração as chaves semicondutoras não estão em condução no regime permanente (Figura 24(a)), fazendo com que o LCC não acrescente impedância ao sistema. Com a ocorrência do curto-circuito, mostrado na Figura 24(b), há uma situação não desejada para o sistema. E então, através de um sistema detector de faltas, as chaves passam a conduzir e o indutor entra em série com o sistema, visto na Figura 24(c), aumentando a impedância e assim, reduzindo a corrente de curto-circuito.



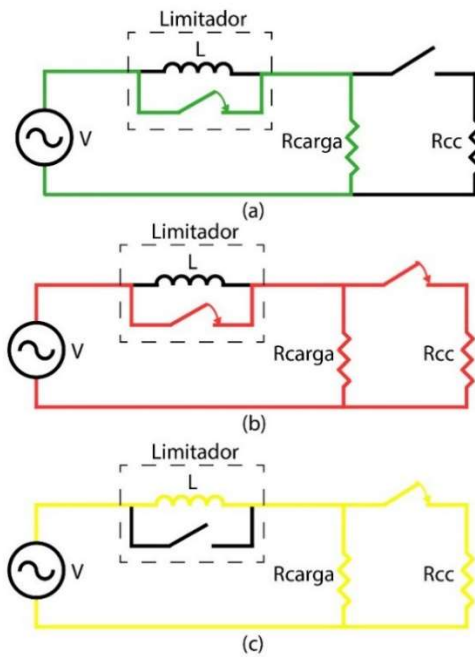


Figura 23 - (a) Circuito ISC em regime permanente (b) Circuito ISC em curto-circuito (c) Circuito ISC limitando corrente.

FONTE: Elaboração Própria

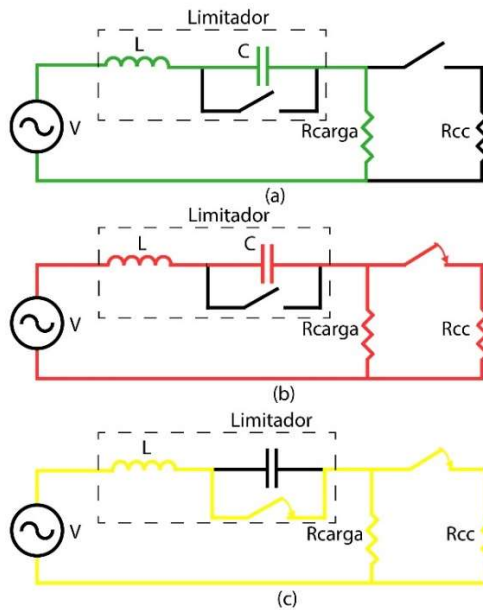


Figura 24 - (a) Circuito Ressonante em regime permanente (b) Circuito Ressonante em curto-circuito (c) Circuito Ressonante limitando corrente.

FONTE: Elaboração Própria

De forma a comprovar experimentalmente o funcionamento das configurações seleccionadas, foi construída uma bancada de teste a partir de peças impressas por uma impressora 3D, perfis de alumínio, 2 bases de MDF e barramentos de cobre, como pode ser observado na Figura 25.



Figura 25 - Bancada de testes.  
FONTE: Elaboração Própria.

A bancada de teste foi concebida de forma a permitir a troca rápida entre os modelos de LCC, sem a necessidade de remoção e/ou a inserção de equipamentos, devendo para tal operação apenas a mudança dos barramentos mostrados na Figura 26, em que as barras 1 e 5 representam a entrada e saída do LCC. A parte inferior da bancada foi confeccionada a fim de dispor o sistema de controle, as chaves semicondutoras e dissipador, e os componentes do sistema de limitação da corrente de curto circuito.

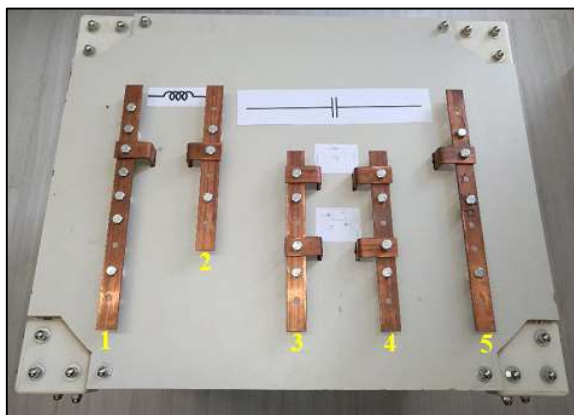


Figura 26 - Base superior da bancada.  
FONTE: Elaboração Própria.

### 3.1 Elementos dos protótipos

A Figura 27 apresenta os elementos do limitador dispostos na bancada de testes. Tendo em vista que alguns componentes dos protótipos das configurações de LCCs são análogos, cada elemento será explicado separadamente para melhor compreensão.

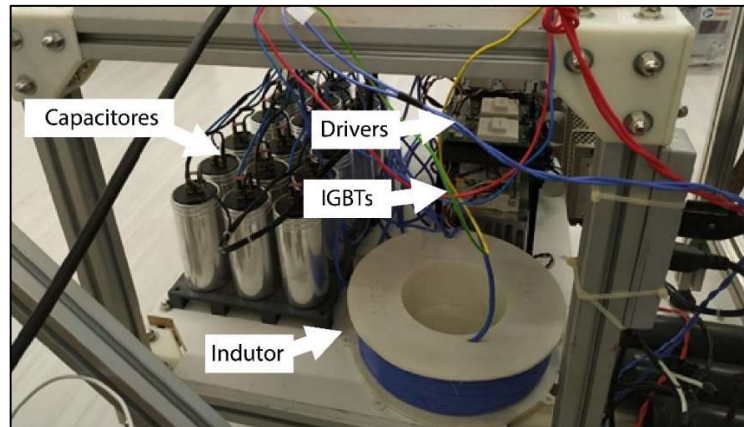


Figura 27 - Elementos do limitador.  
 FONTE: Elaboração Própria.

### 3.1.1 Indutor

Muitas das configurações de limitadores de corrente estudadas até o momento utilizam bobinas, de modo que o projeto destes dispositivos é parte importante deste trabalho. Neste contexto, o método dos elementos finitos foi utilizado para modelar um indutor com dimensões parametrizadas com base no trabalho de Neville Thiele [53]. Como resultado a Figura 28 apresenta uma ilustração do projeto de uma bobina com dimensões otimizada para a economia de cobre.

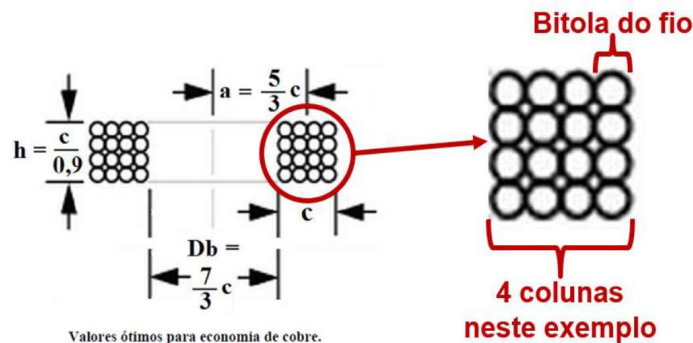


Figura 28 - Ilustração do projeto de uma bobina com dimensões otimizada para a economia de cobre.  
 FONTE: [53].

O modelo utilizando o método dos elementos finitos foi implementado no programa comercial COMSOL MULTIPHYSICS. Neste modelo, o usuário pode especificar os valores dos seguintes parâmetros de entrada:

- Raio do condutor;
- Espessura da camada isolante;
- Espaçamento adicional entre as espiras;
- Número de colunas do enrolamento;
- Resistência CC por unidade de comprimento (especificado pelo fabricante do fio);

- Resistência CA por unidade de comprimento (especificado pelo fabricante do fio).

O tempo de execução de uma simulação é inferior a 20 s, e os resultados gerados são:

- Energia armazenada no campo magnético (para um determinado valor de corrente);
- Indutância;
- Reatância indutiva em 60 Hz;
- Resistência em CC e em CA;
- Módulo da impedância complexa em 60 Hz;
- Comprimento de fio utilizado;
- Perfil de densidade de campo magnético (Figura 29);
- As componentes da densidade de força eletromecânica em cada espira (Figura 30).

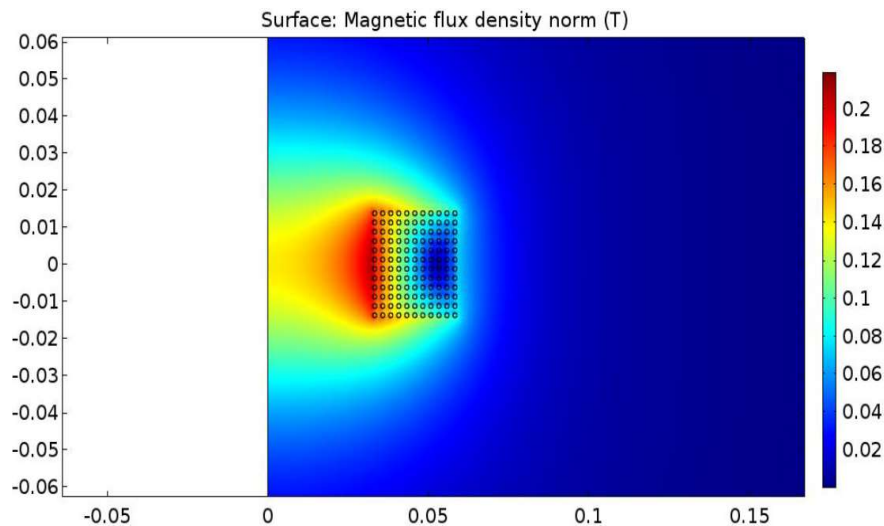


Figura 29 - Ilustração do perfil de densidade de campo magnético.  
 FONTE: Elaboração Própria.

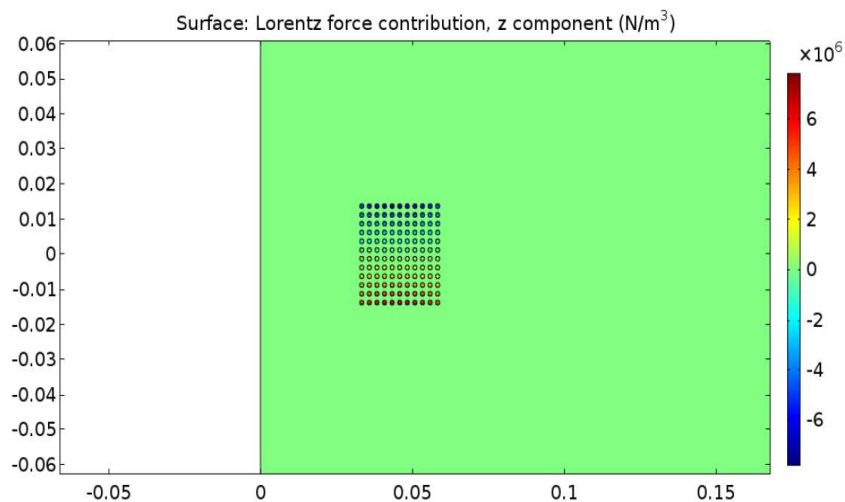


Figura 30 - Ilustração da componente na direção z da densidade de força eletromecânica em cada espira.  
 FONTE: Elaboração Própria.

Para a construção dos protótipos foi projetado e construído um reator de núcleo de ar como o elemento indutor, mostrado na Figura 31, com as seguintes características:

- Indutância: 2,1 mH;
- Resistência: 0,26  $\Omega$ ;
- Comprimento de fio utilizado: 66,7 m.

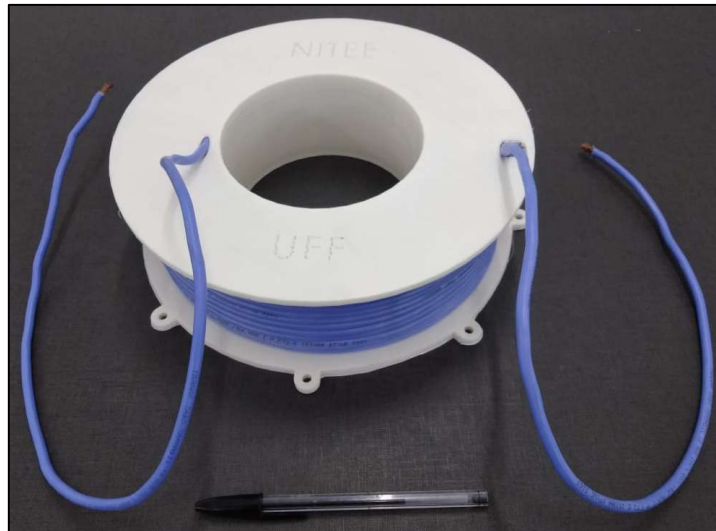


Figura 31 - Reator de núcleo de ar construído com indutância de 2,1 mH.  
FONTE: Elaboração Própria.

O suporte da bobina foi projetado em um software de modelagem 3D e fabricado por uma impressora 3D. Com a construção da bobina, foi executado um ensaio de resposta a um degrau de tensão de 1,3 V para validar os valores estimados. A Figura 32 mostra a comparação deste ensaio, comprovando o valor esperado.

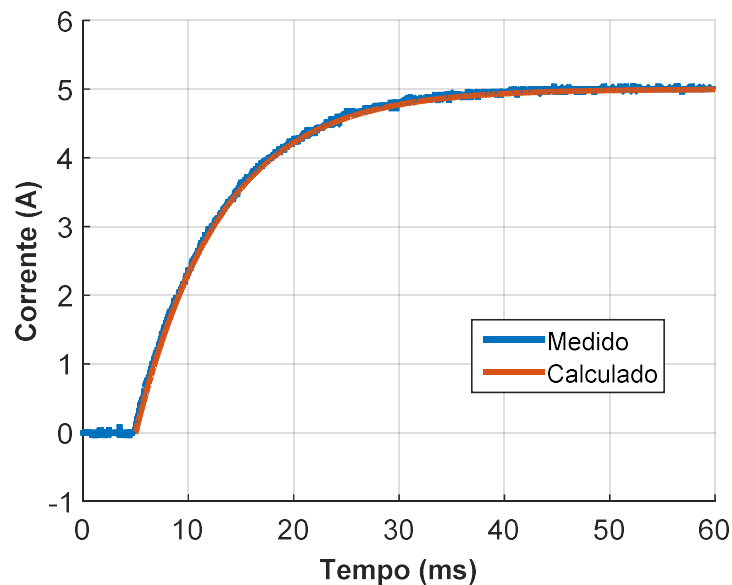


Figura 32 - Resposta a um degrau de tensão de 1,3 V na bobina construída.  
FONTE: Elaboração Própria.

### 3.1.2 Capacitor

O projeto e construção do elemento capacitor foi baseado no banco de capacitores apresentado na Figura 33, composto por 18 capacitores modelo B32340C2031A320 da EPCOS [54], conectados em paralelo, com uma capacitância equivalente de 3420  $\mu\text{F}$ , de forma que sua reatância ressona com o reator projetado. Além disso, cada capacitor contém uma resistência de descarga de valor igual a 180  $\text{k}\Omega$ , conectada entre seus terminais para dissipar a energia armazenada após sua desconexão com o sistema.



Figura 33 - Banco de capacitores.  
FONTE: [54].

### 3.1.3 Equipamentos de medição, controle e operação

O processamento de sinais do sistema de instrumentação se baseia no microcontrolador CC2640R2F da empresa *Texas Instruments* [55], ilustrado na Figura 34. O CC2640R2F executa um programa em linguagem C que implementa o algoritmo desenvolvido para a operação dos LCCs, e dispõe de três processadores: um ARM Cortex M3, considerado a principal unidade de processamento; um ARM Cortex M0, inacessível ao usuário e designado apenas para finalidades de radiofrequência; e, um processador mais simples chamado Sensor Controller, designado para aliviar parte da carga de processamento da unidade principal e poupar energia em dispositivos alimentados por baterias de pequeno porte. O microcontrolador trabalha na faixa de tensão entre 0 e 3,3 V.

A *Texas Instruments* fornece uma gama de drivers para serem utilizados em conjunto ao CC2640R2F. Os recursos de hardware disponíveis por meio desses drivers são conversões analógico/digitais, criptografia, entradas e saídas digitais, temporizadores, comunicação utilizando diversos protocolos (incluindo alguns protocolos de radiofrequência), modulação por largura de pulso (PWM), gerenciamento de energia, dentre outros. Para facilitar o uso do

CC2640R2F, foi utilizado um kit de desenvolvimento da *Texas Instruments*, modelo LAUNCHXL-CC2640R2 [56], que contém uma unidade deste microcontrolador e pinos, que facilitam as conexões elétricas de seus terminais de entrada e saída, conforme mostrado na Figura 35.



Figura 34 - Microcontrolador CC2640R2F, empresa Texas Instruments.  
FONTE: [55].

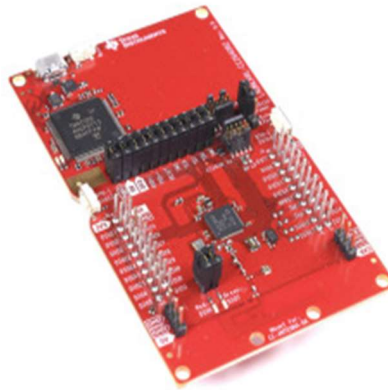


Figura 35 - Kit de desenvolvimento para o CC2640R2F da Texas Instruments.  
FONTE: [56].

O código carregado foi baseado em componentes de software fornecidos pelo fabricante, que permitem a utilização dos recursos do dispositivo com atraso mínimo e alto grau de confiabilidade. Esses componentes são, principalmente, o TI RTOS (*Texas Instruments Real Time Operating System*, um sistema operacional de tempo real) e os drivers (ligados ao código computacional) que fornecem uma abstração de alto nível para a manipulação do hardware do microcontrolador. A característica de tempo real do sistema operacional indica a sua capacidade de atender adequadamente a eventos externos que possuem um tempo de resposta definido [56].

### 3.1.4 Chaves semicondutoras

As chaves semicondutoras utilizadas foram os módulos IGBTs modelo BSM150GB60DLC [57] e módulo tiristor modelo TT120N16SOF [58]. Cada módulo IGBT é associado ao driver SKHI 22A R [59], que são responsáveis pelo acionamento das mesmas. Este tipo de chave é acionada com um sinal de tensão aplicado entre os terminais *gate* e *source*, e conduz enquanto

este sinal for mantido [60]. O driver do tiristor foi fabricado sobre encomenda pela empresa Adelco.

Para as configurações que utilizam IGBT, foi necessário utilizar dois módulos, devido a sua construção interna, exibido na Figura 36. Assim, é necessário posicionar as chaves em antissérie, conectando o terminal 3 dos dois módulos por exemplo.

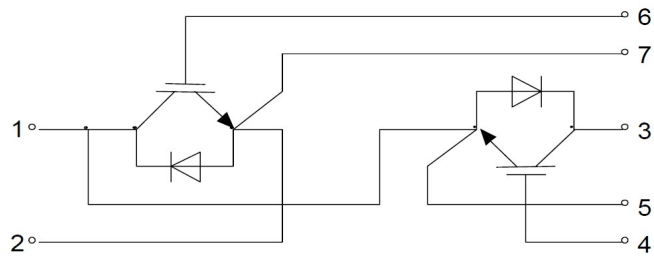


Figura 36 - Esquema de ligação do módulo BSM150GB60DLC.  
FONTE: [57].

Para as configurações que utilizam tiristor, foi possível utilizar apenas um único módulo, devido a sua construção interna, vista na Figura 37. Assim é possível, conectando os terminais 2 e 3, posicionar as chaves em antiparalelo.

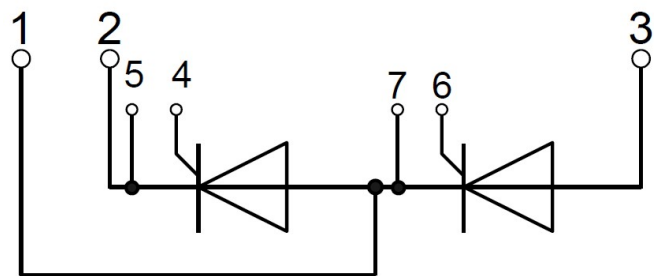


Figura 37 - Esquema de ligação do módulo TT120N16SOF.  
FONTE: [58].

### 3.1.5 Sistema de Controle

O sistema de controle é composto pelo LAUNCHXL-CC2640R2 e uma placa que regula os sinais de entrada e saída do microcontrolador. Os sensores de corrente enviam o sinal medido a placa, que é capaz de ajustar o valor a um nível adequado para o microcontrolador. Este por sua vez processa a informação através do algoritmo de detecção de curto-circuito e, através de circuitos opto-acopladores, enviar o sinal de tensão apropriado para os drivers acionarem suas respectivas chaves semicondutoras de maneira adequada.

A Figura 38 apresenta as chaves, drivers e sistema de controle fixados em um suporte de apoio e no dissipador de calor utilizados.



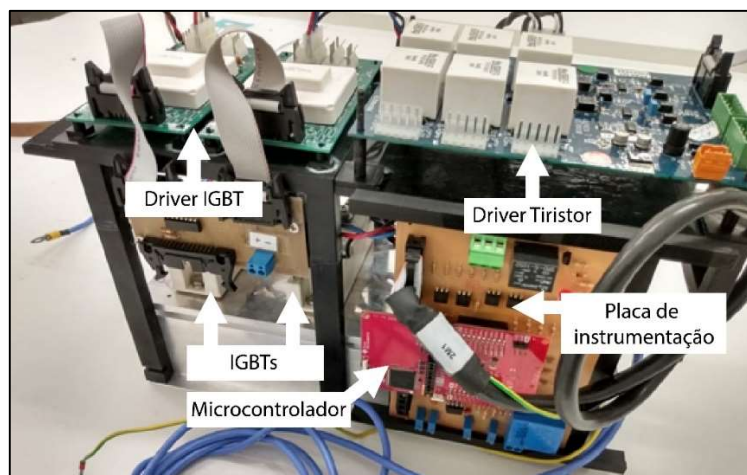


Figura 38 - Suporte com as chaves semicondutoras, drivers e sistema de controle.  
 FONTE: Elaboração Própria.

### 3.2 Equipamentos e instalações

Para medição e aquisição de dados foram utilizadas ponteiras de corrente e tensão e um oscilógrafo modelo DL850EV [61] da Yokogawa, visto na Figura 39.



Figura 39 - Oscilógrafo modelo DL850EV da Yokogawa.  
 FONTE: [61].

Um rack de cargas, apresentado na Figura 40, foi desenvolvido com o objetivo de alocar fisicamente as cargas utilizadas nos ensaios, e facilitar a comutação entre elas e obter diferentes valores de impedâncias. Outra utilidade deste painel é a aplicação do curto-circuito, que pode ser feita de forma controlada, através de uma botoeira que insere uma impedância de curto-circuito no sistema ensaiado. A parte frontal do painel é composta por uma chave de energização, um led branco para indicação de que o sistema está energizado, quatro chaves para as cargas e seus respectivos leds de sinalização, uma botoeira de curto-circuito, um relé temporizado, e um botão de emergência para desligamento do painel.

O acionamento da botoeira foi realizado em conjunto com um relé temporizado modelo Clip [62]. Este relé garante que o curto-circuito tenha uma duração controlada e de aproximadamente tempos iguais para diferentes ensaios. Tanto a comutação de carga como a aplicação de curto-

circuito são feitos por contadoras. Foram utilizadas quatro contadoras do modelo CJX2-F da JNG [63] com capacidade de corrente por fase de 225 A para a comutação das cargas. Já para a contadora do curto-circuito foi utilizada o modelo CJX2-F com capacidade de corrente de 800 A para cada fase.

A Figura 41 apresenta a parte traseira do painel. As contadoras foram conectadas com barramentos de cobre de 1.1/2” por 5/16”. A seção do barramento foi selecionada de forma a não se alterar as dimensões dos barramentos de saída das contadoras. Para aumentar a capacidade de corrente, as contadoras das cargas tiveram seus terminais curto-circuitados. Também estão dispostas as resistências de carga e curto, conectadas a um barramento.

A Figura 42 apresenta o arranjo experimental com os itens relacionados/interligados para os ensaios das configurações de LCC. Para representar o equivalente elétrico do sistema foi utilizado um transformador de potência de 75 kVA, destacado na Figura 43, com o primário conectado à rede monofásica com tensão 220 V<sub>RMS</sub> e o secundário 55 V<sub>RMS</sub>. A indutância do secundário do transformador foi considerada como uma impedância na fonte. A impedância de carga foi construída a partir de fita de aço-carbono enrolada em três tubos de PVC com enrolamentos em sentidos opostos de forma a minimizar a indutância. Cada resistência tem o valor de 1,4 Ω, com 4,2 Ω de resistência equivalente para a carga. Por fim, a resistência de curto-circuito foi composta por um arranjo de reatores toroidais com impedância de 0,262 Ω cada e equivalente de 0,175 Ω. Os valores dos componentes utilizados nos ensaios são apresentados na Tabela 5.



Figura 40 - Rack de cargas, parte frontal.  
FONTE: Elaboração Própria.

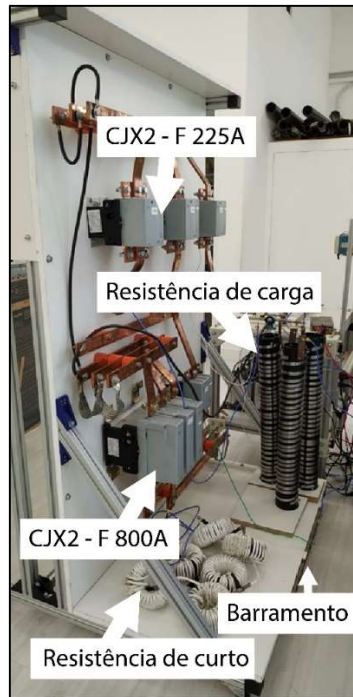


Figura 41 - Rack de cargas, parte traseira.  
FONTE: Elaboração Própria.

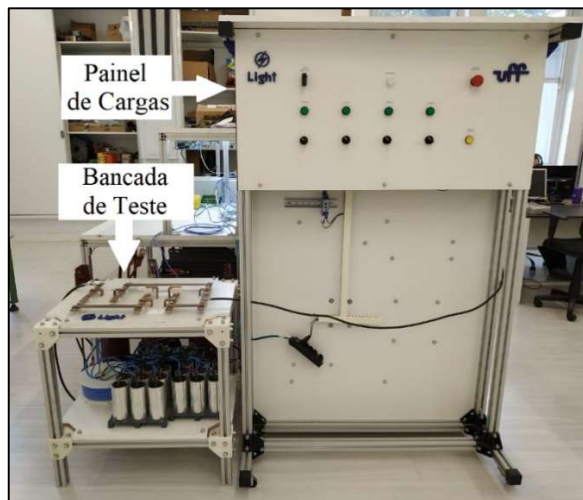


Figura 42 - Arranjo geral para ensaio das configurações de LCC.  
FONTE: Elaboração Própria.



Figura 43 - Transformador de 75 kVA utilizado nos ensaios.  
FONTE: Elaboração Própria.

Tabela 5 - Parâmetros dos itens utilizados nos ensaios.

Item	Elemento	Valores
Fonte de Tensão	Tensão	55 V <sub>RMS</sub>
	Indutância	1 mH
Reator de Núcleo de Ar	Resistência	0,26 Ω
	Indutância	2,1 mH
Banco de Capacitores	Resistência	4,9 mΩ
	Capacitância	3420 μF
Impedância da Carga	Resistência	4,2 Ω
Impedância de Curto-Circuito	Resistência	0,175 Ω

FONTE: Elaboração Própria.

### 3.2.1 Descrição dos ensaios

Com a finalidade de obter a corrente prospectiva de curto-circuito, conecta-se diretamente as barras 1 e 5, sem a aplicação do LCC. Para a montagem da configuração ISC, foram conectadas as barras 1-3 e 2-5, de modo a chavear o indutor e, ao mesmo tempo, não conectar o capacitor. Com relação ao modelo Ressonante, apenas as barras 2-3 foram conectadas para que o indutor e o capacitor fiquem associados em série com o sistema. Para substituir o tipo de chave desconecta-se a chave pelos terminais conectados entre as barras 3 e 4. A conexão 4-5 é permanente

A rotina do ensaio consisti em configurar a configuração desejada, energizar o sistema através do disjuntor conectado ao primário do transformador e por fim, executar o comando de curto-circuito, registrando as informações relevantes no oscilógrafo. O comando de curto foi aplicado por uma placa de aquisição, através de software em computador, capaz de gerá-lo sempre em um mesmo instante. Para que seja possível comparar os resultados de ensaios diferentes, é importante que a falta ocorra no instante programado.

### 3.3 Algoritmo de detecção de curto-circuito e operação das chaves

É de conhecimento geral que os equipamentos de medição possuem uma certa precisão ao efetuar uma leitura. Esta precisão é variável dentro de uma faixa, e que pode ocasionar ruídos a medição juntamente com outros fatores. Estes ruídos são capazes de provocar um acionamento indevido das chaves, uma vez que o sinal de controle se baseia em uma medição. Por este motivo é necessário considerar tal efeito no algoritmo de controle para que este atue de forma adequada. O algoritmo de detecção, apresentado a seguir, necessita dos seguintes parâmetros iniciais (dados de entrada):

- O valor máximo de corrente instantânea ( $I_{max}$ ) em [A] para a atuação do LCC. Para os ensaios realizados em laboratório, com base nos circuitos descritos nas seções anteriores, o valor máximo de corrente utilizado foi de 49,5 A.;
- O estado das chaves (*Estado*) para condição normal de operação do sistema. Essa variável depende da configuração ao qual o controle está operando (0 para chave aberta, 1 para chave fechada). Para a configuração ISC a variável Estado deve ser iniciada com o valor 1, ou seja, a chave semicondutora conduz no regime permanente. Já para a configuração Ressonante a chave semicondutora não deve conduzir no regime permanente e, assim, a variável Estado deve ser iniciada com valor 0. Ao ser detectada a falta a variável Estado tem seu valor alterado, modificando o estado de condução das chaves.
- A derivada máxima ( $D_{max}$ ), calculada de acordo com a equação  $D_{max} = \omega I_{max}$ .
- O limite de leituras de faltas (*LLF*), corresponde ao número de vezes que a corrente deve superar o valor de  $I_{max}$  para que o controlador avalie se ocorreu uma falta.
- O mínimo de leituras de saída da falta (*MLSF*), corresponde ao número de vezes que a corrente deve apresentar valor menor do que  $I_{max}$  para que o controlador avalie uma falta foi extinta.

Apesar de ser necessário o valor de derivada máxima, na prática se utiliza um diferencial máximo, dado por  $D_{max} \cdot h$ , em que  $h$  é a taxa de amostragem do microcontrolador. Essa estratégia é utilizada a fim de evitar divisões no microcontrolador, pois esta operação matemática é mais exigente no ponto de vista de hardware para o microcontrolador. O fluxograma da Figura 44 apresenta a lógica de atuação do controlador.

Na etapa “a”, os dados de entrada são lidos e o sistema é configurado considerando-se condições normais de operação. Na etapa “b” calcula-se diferença (dif) entre a corrente medida na leitura atual ( $I(h)$ ) e a obtida na leitura anterior ( $I(h - 1)$ ).

Em seguida, na condicional “c”, o módulo da corrente é comparado com a corrente máxima. As resultantes desta condição se dividem em dois casos, se o controle identifica uma possível falta ou a possível extinção da mesma. Caso a condicional “c” seja verdadeira a condicional “d” compara o contador de detecção de falta, denominado contador de entrada (*CE*), com o valor da variável *LLF*. Esta etapa garante que deve haver uma quantidade mínima de detecções de falta consecutivas para evitar um falso positivo. Caso o limite não tenha sido ultrapassado, *CE* é incrementado na etapa “e”. Em seguida retorna-se a etapa “b”.

Com a confirmação da condicional “d”, verifica-se o diferencial da corrente na condicional “f”. Se o limite foi ultrapassado a variável de pulso (p), que controla a operação da chave semicondutora, é alterada para o estado de operação em curto-circuito na etapa “g”. Por fim retorna-se a etapa “b”.

Se a condicional “c” for falsa, a condicional “h” compara, através do contador de saída (CS), que é um contador decrescente, se houve uma quantidade mínima de detecções consecutivas de corrente abaixo do limite. Esta quantidade mínima de detecções corresponde ao valor da variável *MSLF* e é usada para garantir a extinção do curto-circuito. Caso a quantidade de medidas não tenha sido suficiente a etapa “i” é executada e, em seguida, retorna-se a etapa “b”. Caso tenha ocorrido a quantidade mínima de medidas com corrente abaixo do limite, a etapa “j” avalia o valor do diferencial, de modo que se este estiver abaixo do valor máximo especificado, altera-se a variável de controle da chave semicondutora p para o estado de operação em regime permanente na etapa “l”. Sequencialmente retorna-se a etapa “b”.

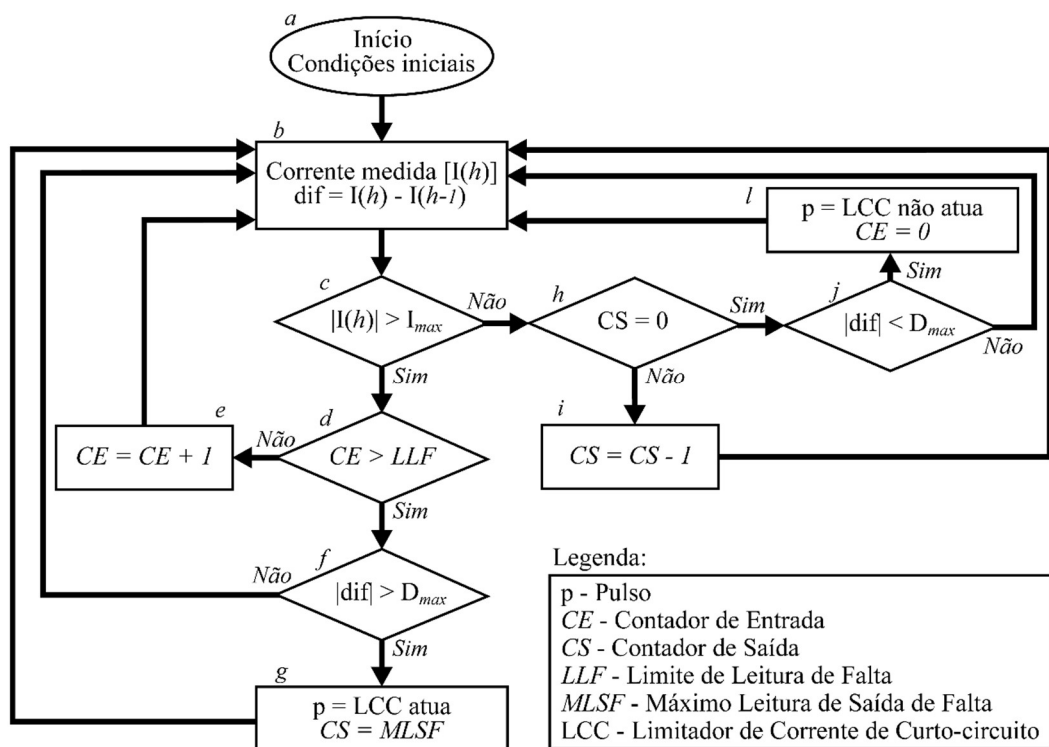


Figura 44 - Fluxograma do algoritmo de controle.  
FONTE: Elaboração Própria.

### 3.3.1 Validação preliminar do algoritmo de detecção de curto-circuito

O programa desenvolvido para o CC2640R2F foi primeiramente validado através de simulações *hardware in the loop*, que eliminam os riscos de danos em componentes reais durante os testes, e contemplam os desafios experimentais característicos de um ensaio de

bancada. A simulação foi baseada na placa de aquisição de dados PCI (*Peripheral Component Interconnect*), modelo 1711 da Advantech [64], que emula a saída dos sensores do sistema de instrumentação responsáveis por medir a corrente do sistema. Esses sensores geram um sinal de tensão a ser lido pelo microcontrolador que, por sua vez, avalia a presença de curto-circuito através do algoritmo de detecção.

As correntes nominal e de curto-circuito prospectiva utilizadas na simulação *hardware in the loop* são  $12 A_{PICO}$  e  $85,71 A_{PICO}$ , respectivamente. No intuito de se manter uma margem de segurança dos limites de tensão do microcontrolador, definiu-se uma faixa de trabalho de 0,15 a 3,15 V. Para atender a essa restrição e considerando que a corrente prospectiva deve excursionar do seu pico negativo até o pico positivo, definiu-se uma taxa de conversão para o sensor de corrente emulado de 17,5 mV/A. Considerando, ainda, alguma margem para erros de leitura do microcontrolador, foi estipulado que o critério de limite de corrente de operação seria de  $16,5 A_{PICO}$ . Já o critério de limite de derivada foi deduzido pelas equações (4) a (6). O arranjo geral da simulação pode ser observado na Figura 45, em que foi utilizado uma placa PCI em um computador para emular uma medição de corrente através de um sinal de tensão, uma osciloscópio portátil para efetuar a medição e um microcontrolador, que tinha seus dados registrados em um laptop.

$$I = 16,5 \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (4)$$

$$\frac{di}{dt} = \omega \cdot 16,5 \cdot \text{cos}(\omega t) = (2 \cdot \pi \cdot 60) \cdot 16,5 \cdot \text{cos}(\omega t) \quad (5)$$

$$\text{Derivada máxima: } 6,22 \text{ kA/s} \quad (6)$$

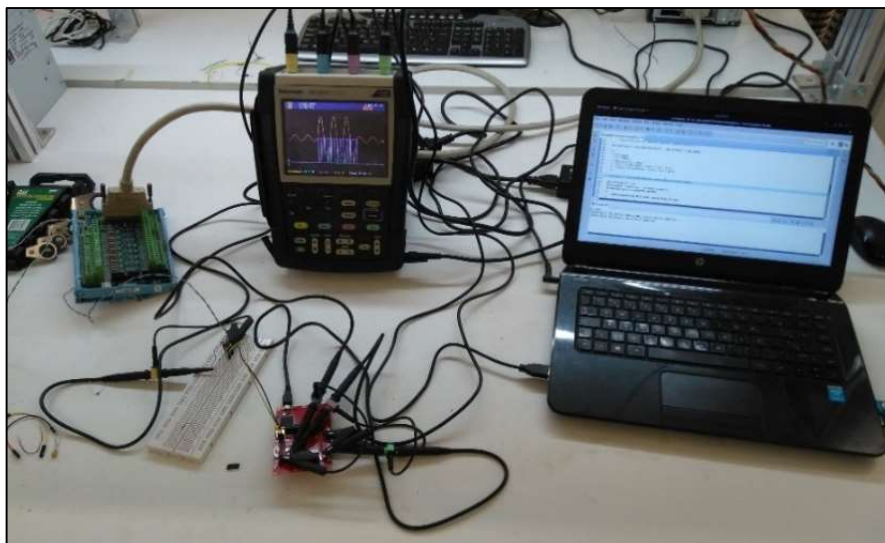


Figura 45 - Arranjo geral da simulação hardware in the loop.  
FONTE: Elaboração Própria.

Ao final da programação do microcontrolador foi utilizada uma saída digital para informar ao circuito de potência para atuar (nível lógico alto) caso detecte uma violação do limite estabelecido. O resultado pode ser visto na Figura 46, onde a forma de onda senoidal representa o sinal de corrente emulado e o pulso representa a indicação da falta.

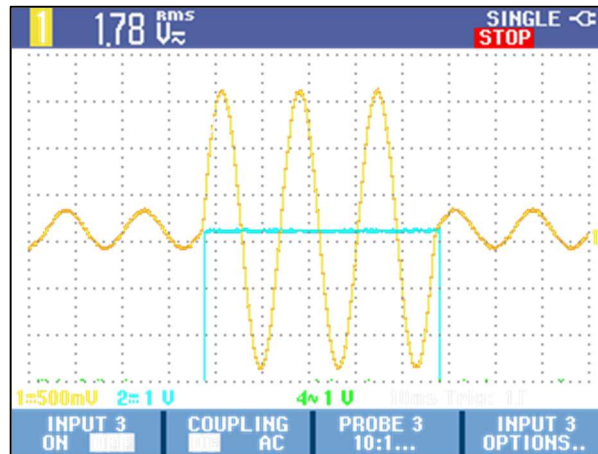


Figura 46 - Operação do LCC.  
FONTE: Elaboração Própria.

### 3.4 Modelo de simulação

Com o objetivo de obter uma compreensão aprofundada do comportamento do sistema real, foram realizadas simulações no software Simulink. O sistema simulado, visto na Figura 47, é composto por uma fonte monofásica senoidal ( $V_{\text{FONTE}}$ ) de 55  $V_{\text{RMS}}$ , com frequência de 60 Hz; uma impedância em série com a fonte, para a representação física do secundário do transformador ( $Z_{\text{TRAFO}}$ ), de indutância 0,22 mH; uma impedância de carga ( $Z_{\text{CARGA}}$ ) composto por um resistor de 4,2  $\Omega$ ; uma impedância de curto ( $Z_{\text{CURTO}}$ ) composta por um resistor de 0,1  $\Omega$ .

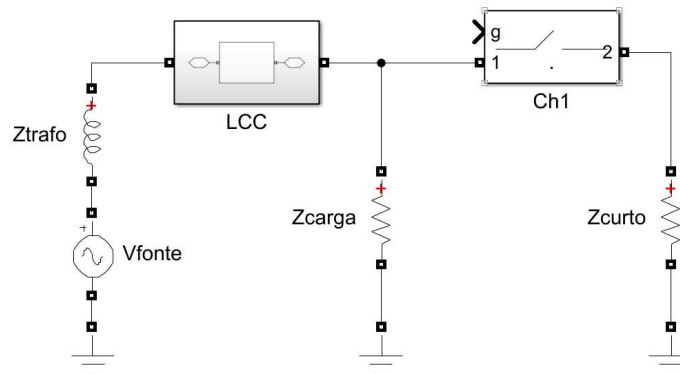


Figura 47 - Sistema modelado no Simulink.  
FONTE: Elaboração Própria.

Inicialmente, o sistema se encontra na condição nominal e, após um intervalo de tempo, a impedância de curto é inserida com o fechamento de Ch1. Esse evento ocorre no instante em



que o ângulo da corrente ( $\theta$ ) é igual a  $0^\circ$ . O valor do passo de simulação foi de aproximadamente 0,05 ms e o tempo de simulação foi 0,5 segundos.

A Figura 48 apresenta a modelagem dos tiristores em antiparalelo. Este tipo de ligação resulta em uma chave eletrônica bidirecional que conduz a corrente elétrica nos dois sentidos. Os sinais recebidos pelo “Comando” entram pelo gate dos tiristores e determinam seu estado de condução. Entretanto, a abertura da chave só ocorre quando a corrente passar por zero, característica típica do tiristor. Os pontos 1 e 2 correspondem aos terminais onde as chaves serão conectadas ao circuito LCC.

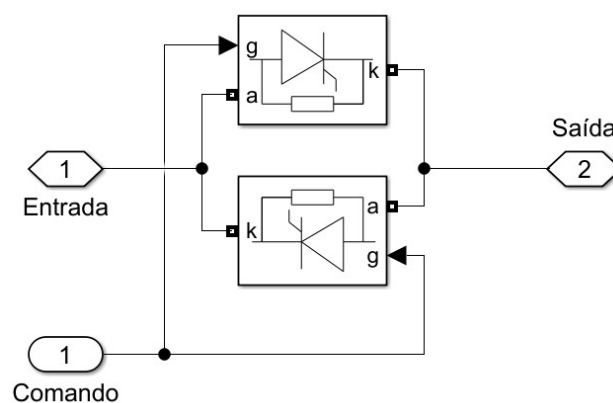


Figura 48 - Modelagem dos tiristores no Simulink.  
 FONTE: Elaboração Própria.

A Figura 49 exibe a modelagem da chave IGBT em antissérie. Para representar o módulo utilizado nos ensaios foi adicionado um diodo de condução reversa em cada IGBT. Assim, com esse esquema de ligação, é possível controlar o fluxo de corrente em um ciclo completo. O sinal de controle é recebido pela entrada de “Comando”, e os terminais 1 e 2 são as conexões elétricas.

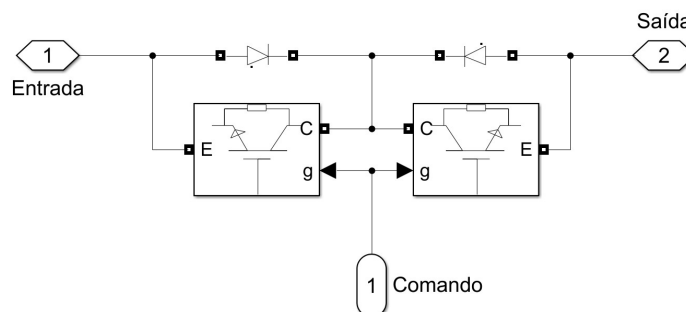


Figura 49 - Modelagem dos IGBTs no software Simulink.  
 FONTE: Elaboração Própria.

A Figura 50 exibe as modelagens do limitador na configuração ISC com os diferentes tipos de chaves. O indutor possui indutância de 2,2 mH e uma resistência de 0,28  $\Omega$ . Em paralelo com o indutor há a chave tiristor (Figura 50 (a)) ou IGBT (Figura 50 (b)), ambas acionadas pelo

sistema de controle que mede a corrente do sistema. O princípio de funcionamento consiste na condução da corrente em regime permanente pelas chaves. Na presença de uma corrente acima do valor especificado no sistema de controle, a chave é aberta e a corrente passa a ser conduzida e limitada pelo indutor.

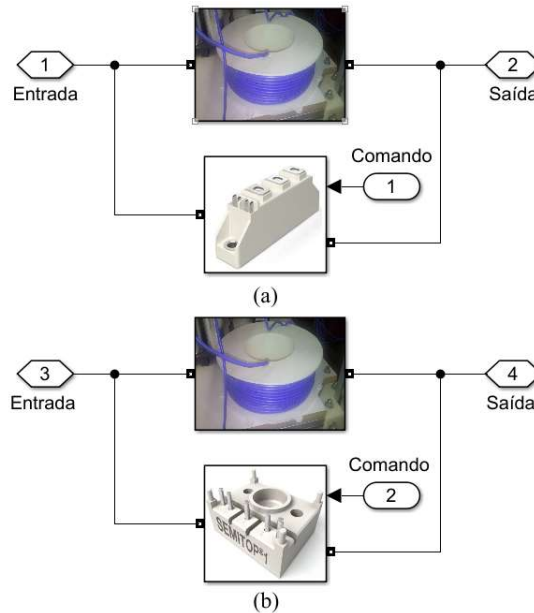


Figura 50 - Modelagem do LCC do tipo ISC com (a) Tiristor e (b) IGBT.  
 FONTE: Elaboração Própria.

A Figura 51 apresenta as modelagens do limitador na configuração Ressonante com os diferentes tipos de chaves. O capacitor, em série com o indutor, possui capacitância de  $3420 \mu\text{F}$  e resistência de descarga com valor de  $10 \text{ k}\Omega$ . O indutor é o mesmo utilizado na configuração ISC. Em paralelo com o capacitor há o conjunto de chaves de tiristores (Figura 51 (a)) ou IGBT (Figura 51 b)), ambas acionadas pelo sistema de controle que mede a corrente do sistema. O princípio de funcionamento consiste na condução da corrente em regime permanente pelo ramo LC, que em ressonância possui impedância próxima de zero. Na presença de uma corrente acima do valor especificado no sistema de controle, a chave é fechada e a corrente passa a ser conduzida e limitada pelo indutor.

As medidas reais estão associadas a precisão do instrumento de medição, o que pode causar ruídos. Entretanto a simulação, caso não modelado, não irá representar este comportamento. Afim de observar este comportamento foi adicionado um gerador de ruído associado a cada medidor de corrente, visto na Figura 52. O sinal de corrente medida é acrescido a um valor aleatório com distribuição Gaussiana, média zero e variância 0,5.

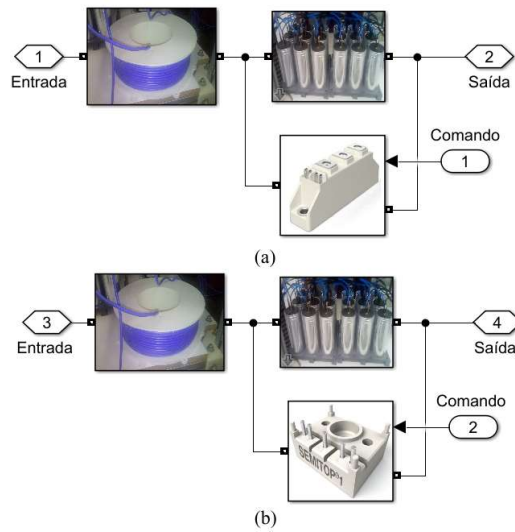


Figura 51 - Modelagem do LCC do tipo Ressonante com (a) Tiristor e (b) IGBT.  
 FONTE: Elaboração Própria.

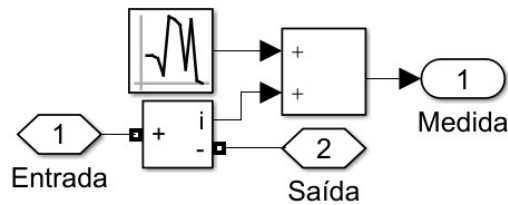


Figura 52 – Modelagem do medidor de corrente real.  
 FONTE: Elaboração Própria.

A comparação da medida com e sem ruído é visto na Figura 53. A simulação deste ruído tem como objetivo observar os efeitos no sistema de controle.

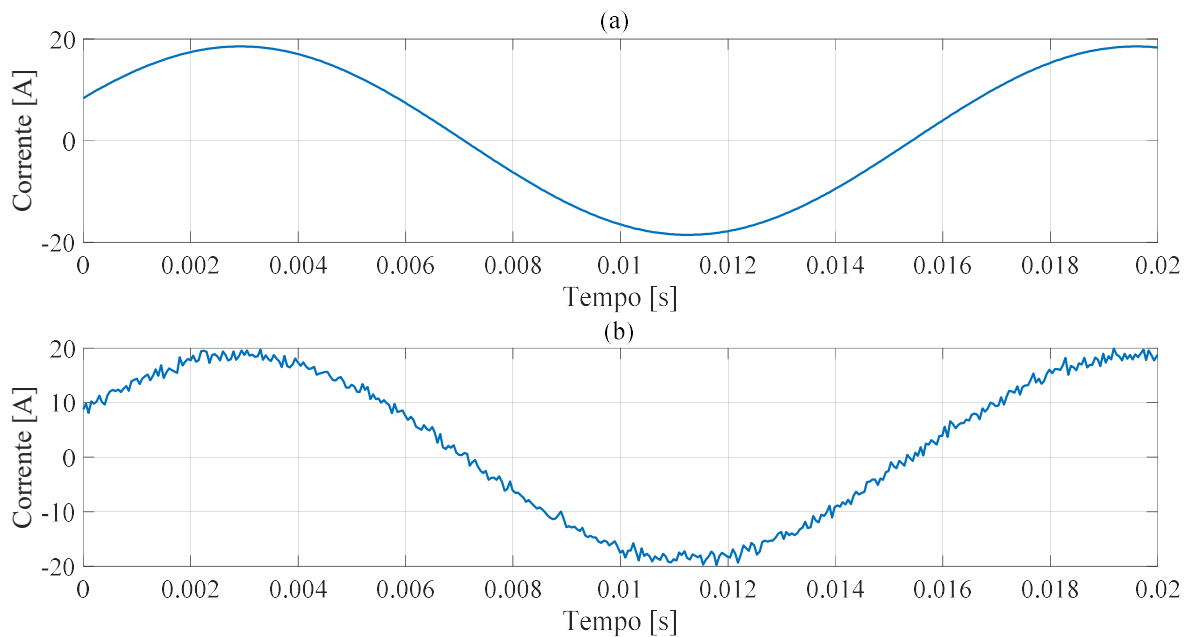


Figura 53 – Comparação entre corrente medida sem ruído (a) e com ruído (b).  
 FONTE: Elaboração Própria.

A Figura 54(a) mostra o resultado do sinal de controle simulado que não considera a leitura de um sinal com ruído nos momentos pre e pós falta. É possível observar na Figura 54(b) que, com as considerações feitas na Seção 3.3 para a lógica de detecção de falta, não há acionamento indevido das chaves.

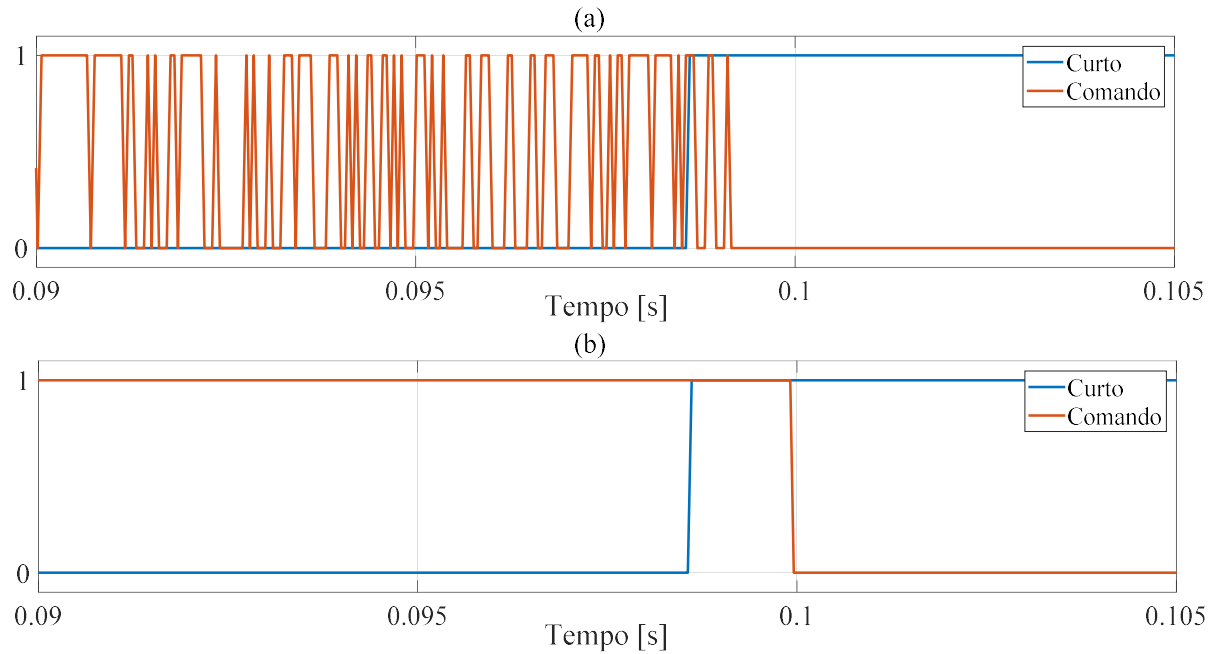


Figura 54 – Sinal de controle sem considerar ruído (a) e considerando ruído (b) na simulação.  
FONTE: Elaboração Própria.

Este capítulo apresentou todas as etapas de construção dos protótipos dos limitadores, assim como suas respectivas simulações. O capítulo seguinte irá apresentar uma discussão entre a comparação dos resultados experimentais e de simulação.

## 4 Resultados e discussões

Os resultados encontrados tanto nas simulações quanto nos ensaios experimentais serão avaliados neste capítulo. Cada configuração de limitador terá suas características estudadas individualmente e, por fim, uma análise completa entre elas será apresentada. Os principais aspectos analisados foram a tensão do sistema, a corrente do sistema e a corrente nos elementos dos limitadores.

Para todos os ensaios foi utilizado o mesmo circuito de referência, em que não há limitador. A corrente de curto-circuito aplicada a este circuito é chamada de corrente prospectiva. A Figura 55 apresenta a comparação da corrente ensaiada e simulada no sistema sem limitador, em que ambas possuem uma corrente no regime permanente de  $18,9 A_{PICO}$ . O momento da falta ocorre em aproximadamente  $0,09 s$ , próximo ao ângulo zero ( $\theta = 0^\circ$ ). A simulação e o ensaio obtiveram resultados similares, alcançando aproximadamente  $600 A_{PICO}$  a partir do terceiro semiciclo, que representa um aumento de mais de trinta vezes o valor nominal. No entanto, há uma diferença na forma de onda da corrente, de maneira que o resultado do ensaio apresenta uma deformação na corrente de curto circuito. Essa deformação pode ser devido a saturação do transformador, que passa a operar próximo do seu limite de potência no momento da falta. Como essa característica não foi implementada na simulação, não é possível observar este comportamento em seu resultado.

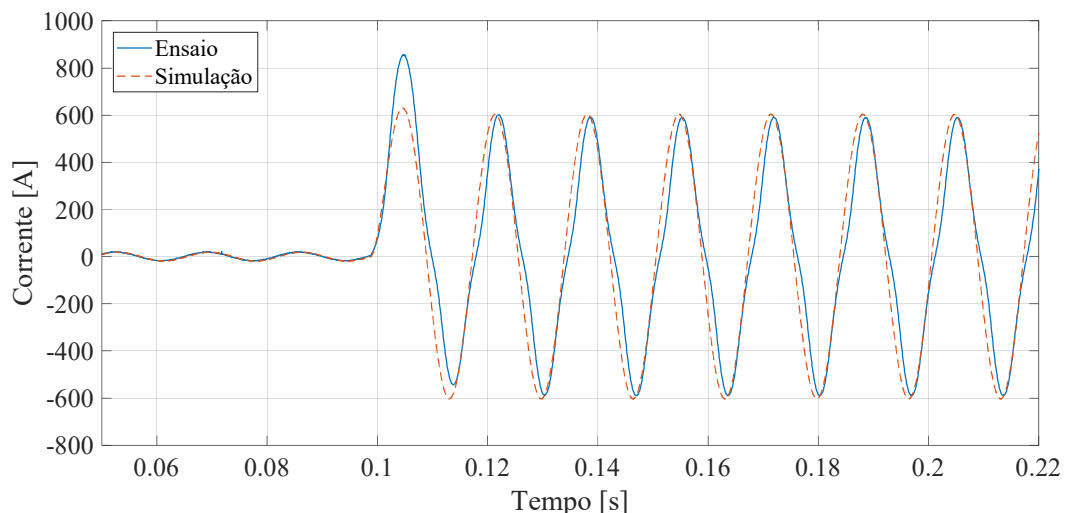


Figura 55 - Comparação entre as correntes ensaiada e simulada do circuito sem limitador.  
FONTE: Elaboração Própria.

A Figura 56 apresenta a comparação das tensões ensaiada e simulada no sistema sem limitador. No regime permanente, ambas possuem um valor de aproximadamente  $80 V_{PICO}$ , e  $60 V_{PICO}$  no curto-circuito, resultando em uma queda de tensão de 25% no sistema. Há uma diferença de fase entre o ensaio e a simulação, causada pela diferença do valor real e simulado da impedância

do secundário do transformador, que considerou uma impedância puramente indutiva. Existe também uma deformação na forma de onda da tensão ensaiada, que assim como a corrente, é causada pela saturação do transformador. Sendo este comportamento não observado na tensão simulada, pois esta característica não foi modelada.

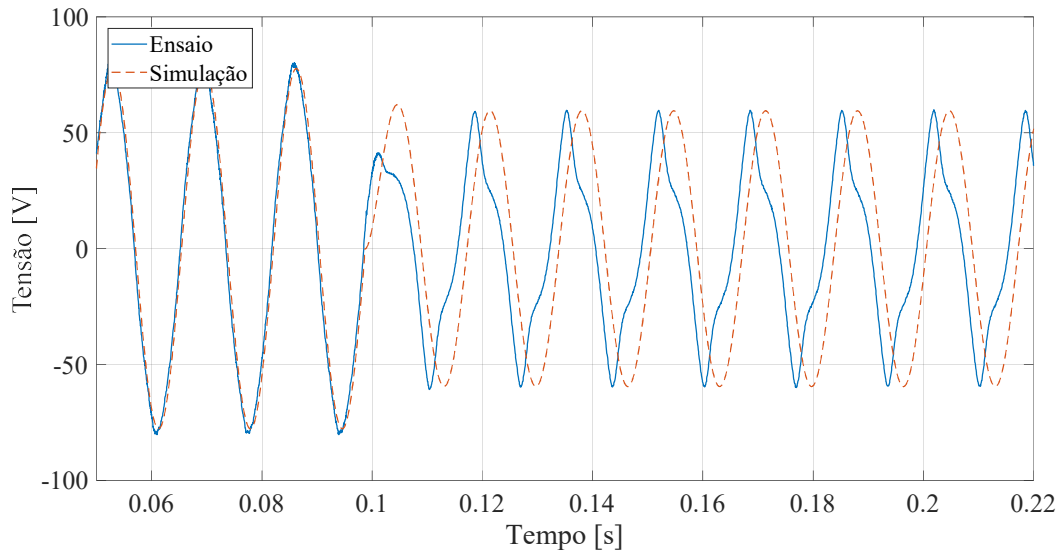


Figura 56 - Comparação entre as tensões ensaiada e simulada do circuito sem limitador.  
 FONTE: Elaboração Própria.

#### 4.1 LCC Indutor Série Chaveado

A configuração ISC foi estudada com dois tipos diferentes de chaves semicondutoras, Tiristor e IGBT. A seguir será apresentada a análise dos resultados do comportamento da configuração com cada tipo de chave.

A comparação entre as correntes ensaiada e simulada do sistema utilizando tiristores encontra-se apresentada na

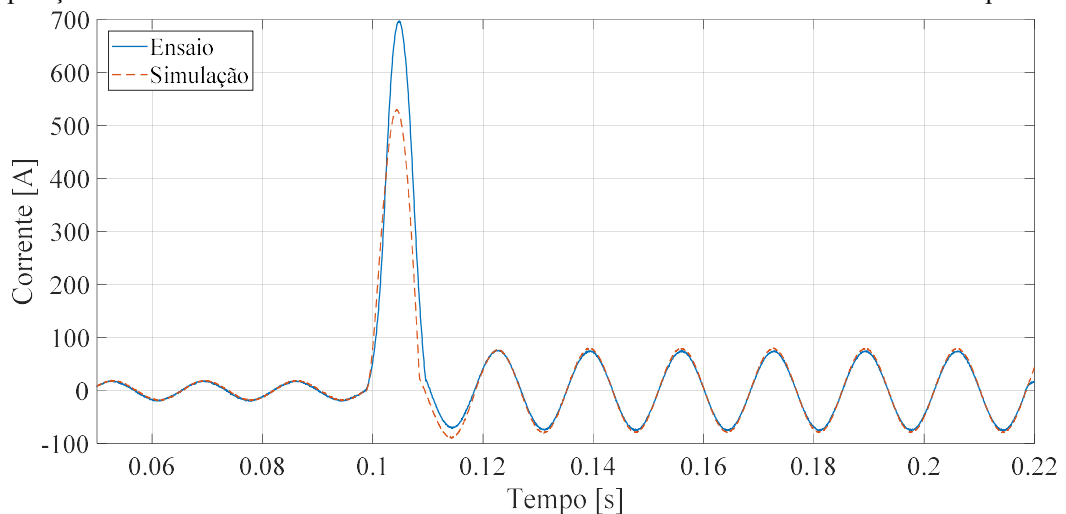


Figura 57. É possível notar que a limitação da corrente só começa a ocorrer de fato a partir do segundo semiciclo e tem seu valor reduzido para aproximadamente  $75 A_{PICO}$ . Isso está associado com a restrição de comutação do Tiristor atrelado ao fato dessa configuração manter

a chave em condução no regime permanente. O Tiristor só é capaz de abrir quando a corrente passa por zero, assim, ao detectar uma falta, ele é forçado a conduzir a corrente de curto durante um semiciclo. Há uma diferença entre os valores de pico do primeiro semiciclo após o curto-circuito. Essa desigualdade ocorreu devido à ausência da modelagem de elementos transitórios do sistema, mas de modo geral a simulação e o ensaio apresentam valores compatíveis.

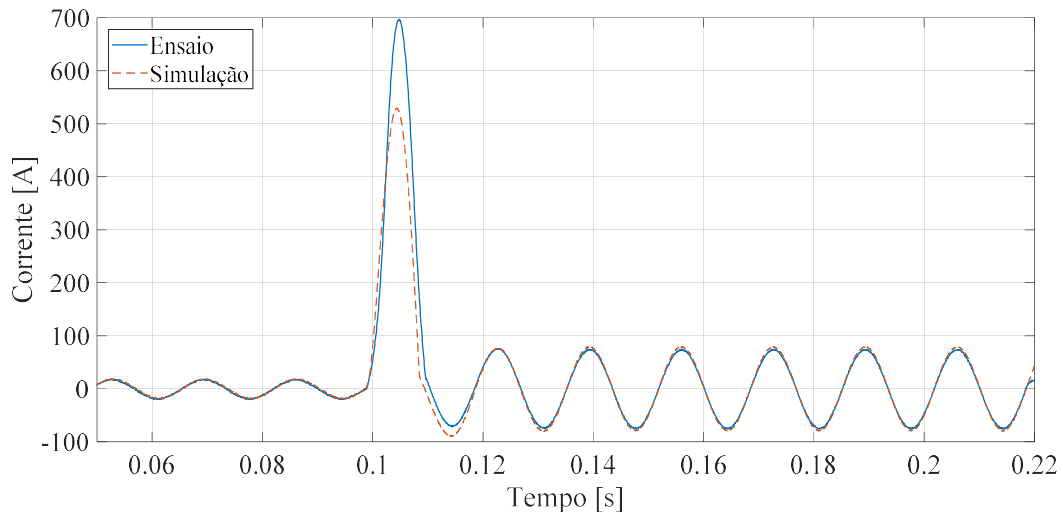


Figura 57 - Comparação entre as correntes ensaiada e simulada do circuito na configuração ISC utilizando Tiristor.

FONTE: Elaboração Própria.

A comparação entre as correntes ensaiada e simulada no indutor utilizando Tiristor é exposta na Figura 58. Os resultados simulados tiveram uma diferença nos valores de pico, porém o comportamento físico é bem representado pela simulação. No regime permanente, idealmente, não deveria haver condução de corrente pelo indutor. No entanto, há uma corrente de aproximadamente 1,41 A<sub>RMS</sub> que flui pelo indutor. No momento da falta, essa parcela cresce gradativamente, enquanto a chave não comuta. Com a comutação, o indutor se torna o elemento do limitador que conduz a corrente em sua totalidade, e assim, limitando-a.

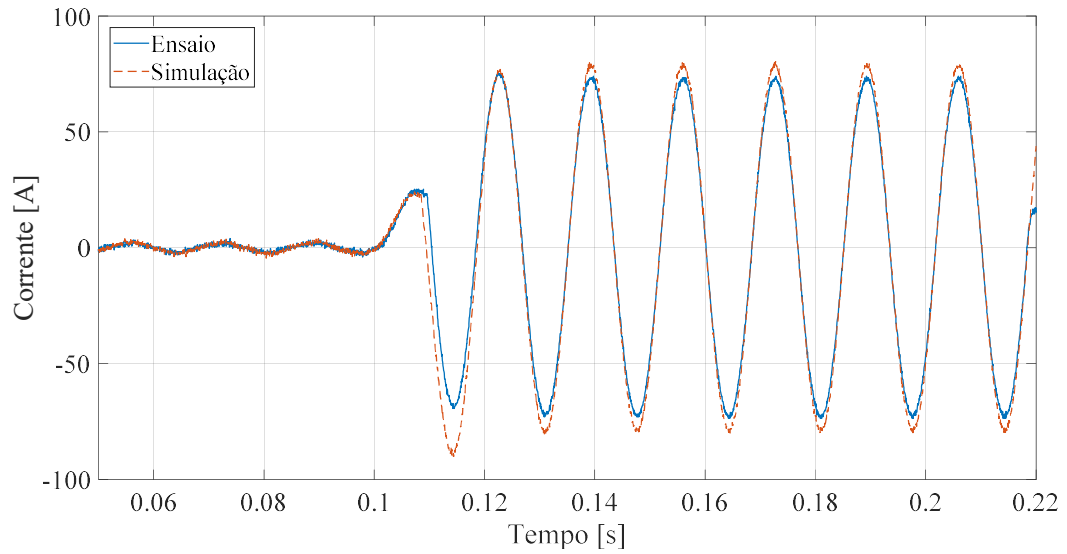


Figura 58 - Comparação entre as correntes ensaiada e simulada no indutor na configuração ISC utilizando Tiristor.

FONTE: Elaboração Própria.

A Figura 59 mostra a comparação entre as correntes ensaiada e simulada que passam nos tiristores. A diferença do valor de pico da corrente no primeiro semiciclo da corrente de falta é causada por efeitos transitórios não simulados. Pode-se observa que a maior parcela de corrente de curto é conduzida pelo Tiristor tendo em vista a

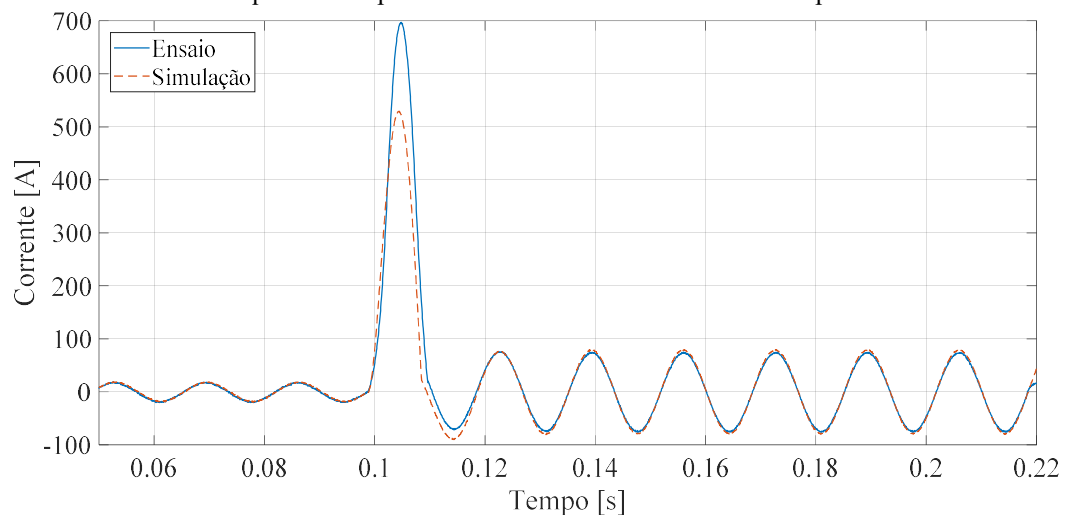


Figura 57.



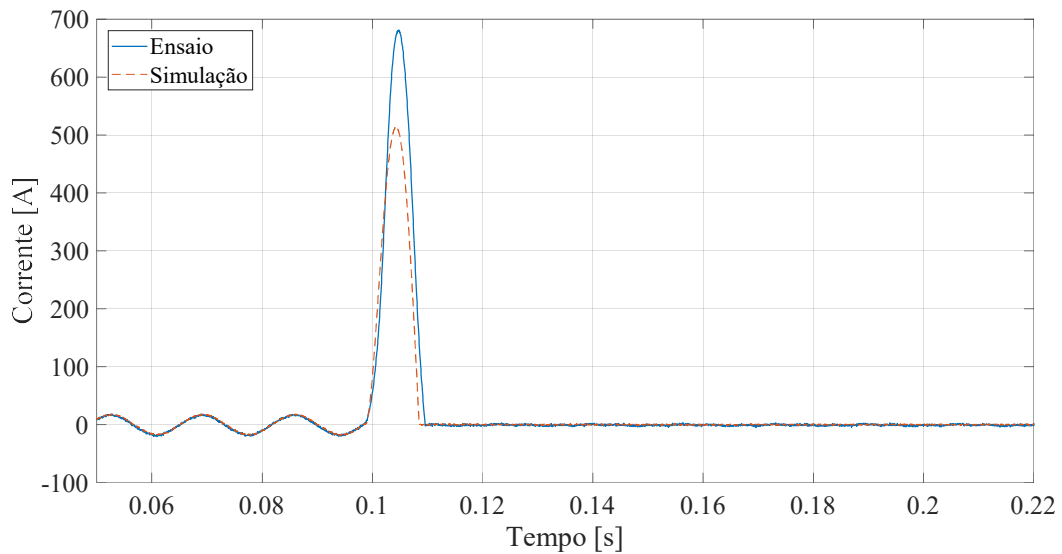


Figura 59 - Comparação entre as correntes ensaiada e simulada na chave Tiristor na configuração ISC.  
 FONTE: Elaboração Própria.

A comparação entre as tensões ensaiada e simulada do sistema na configuração ISC utilizando Tiristor é exibida na Figura 60. É possível constatar que há uma deformação na forma de onda no primeiro semiciclo após o curto-circuito, caracterizado pela saturação do transformador. Nesse momento não há limitação, logo não há redução da queda de tensão. Nos ciclos seguintes a queda de tensão é reduzida tanto na simulação como no ensaio para 5 V.

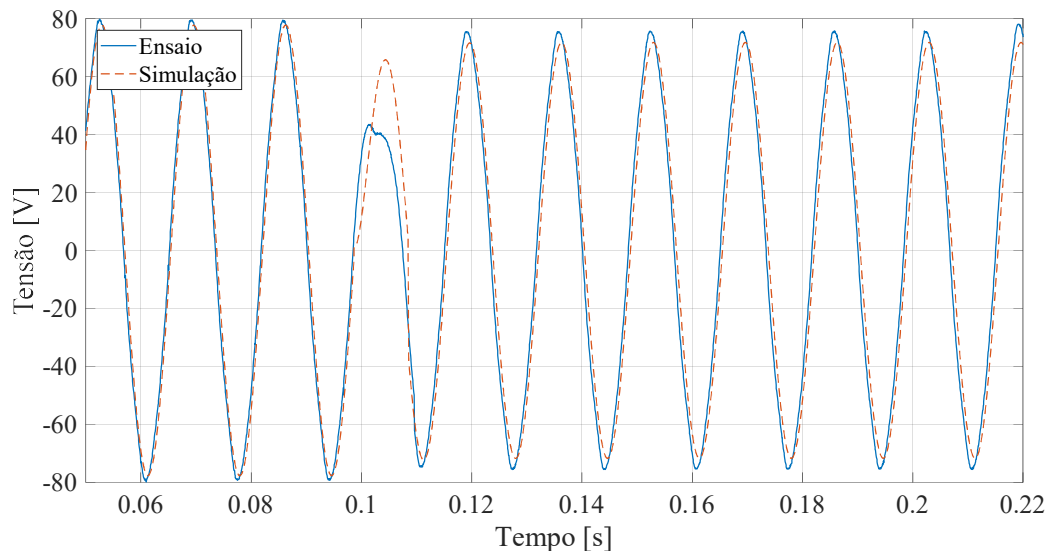


Figura 60 - Comparação entre as tensões ensaiada e simulada do circuito na configuração ISC com Tiristor.  
 FONTE: Elaboração Própria.

Para executar o ensaio da configuração ISC com chave IGBT foi necessário ajustar alguns parâmetros e acrescentar novos elementos de proteção no circuito do limitador. No circuito proposto anteriormente para o IGBT, a chave ao receber o comando para abrir não estava sendo capaz de executar a ordem. Identificou-se que a variação de corrente nos elementos indutivos do sistema induz uma tensão na chave que impede sua abertura. Por medida de segurança, já

que o IGBT não era capaz de conduzir a corrente prospectiva, optou-se por uma redução dos níveis de corrente de curto. A nova corrente prospectiva teve como pico no primeiro semiciclo um valor de 341 A<sub>PICO</sub> e 170 A<sub>PICO</sub> no terceiro semiciclo. A tensão do sistema sem limitador teve uma queda de tensão no curto-circuito de 5 V.

Outra alteração necessária foi a inserção de um circuito *snubber* em paralelo com a chave a fim de evitar uma grande variação de tensão. Esse circuito é composto por um capacitor ( $C \approx 53,33 \mu\text{F}$ ) em série com um resistor ( $R = 33 \Omega$ ). A Figura 61 mostra a comparação entre as correntes ensaiada e simulada com este circuito. Observa-se que, após a falta, há uma variação abrupta da corrente caracterizada pelo chaveamento do IGBT. A corrente é limitada logo no primeiro semiciclo, sendo reduzida para 75 A<sub>PICO</sub>, e para 54 A<sub>PICO</sub> no terceiro semiciclo, tendo assim uma redução percentual de 78% e 55%, respectivamente.

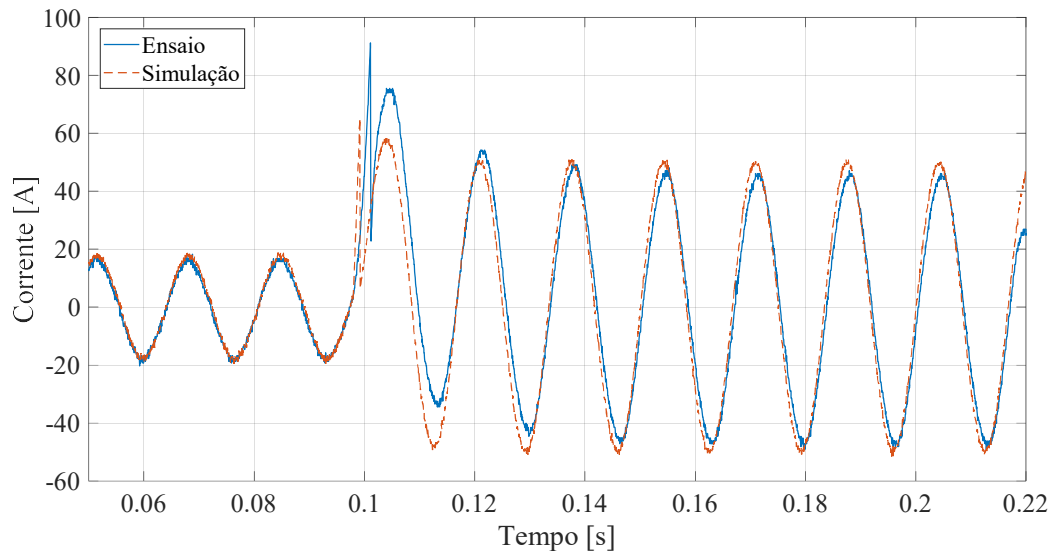


Figura 61 - Comparação entre as correntes ensaiada e simulada do circuito na configuração ISC utilizando IGBT.  
FONTE: Elaboração Própria.

A Figura 62 exibe os resultados simulado e ensaiado da corrente no indutor. Ambos possuem valores próximos tanto no regime permanente quanto na falta. Vale destacar que há uma circulação de corrente de aproximadamente 2 A<sub>RMS</sub> no regime permanente.

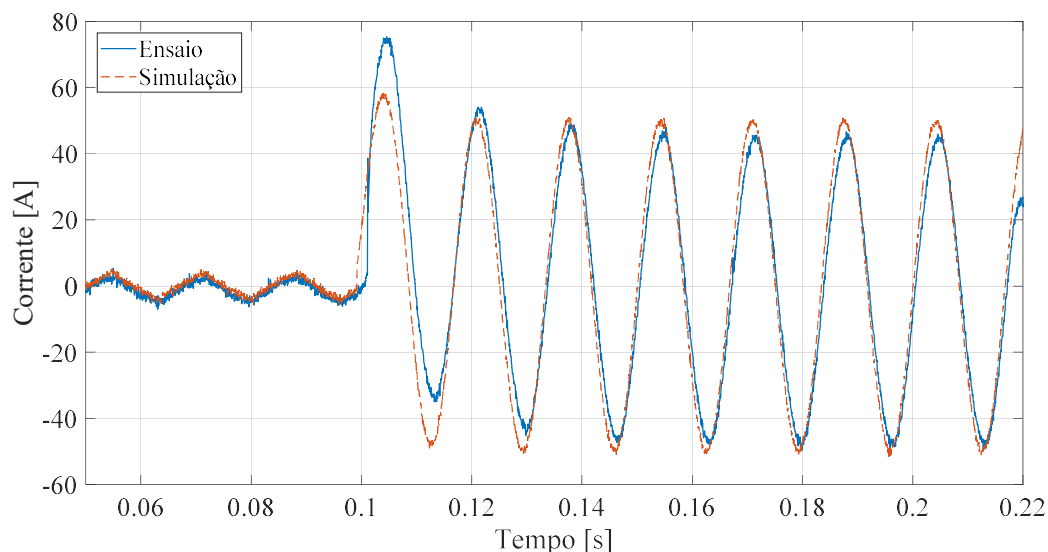


Figura 62 - Comparação entre as correntes ensaiada e simulada no indutor na configuração ISC utilizando IGBT.  
 FONTE: Elaboração Própria.

A Figura 63 apresenta uma comparação entre a corrente ensaiada e a simulada na chave IGBT. Enquanto a Figura 64 apresenta a comparação entre a tensão ensaiada e a simulada do circuito. Pode-se observar uma queda de tensão de 2 V após a falta.

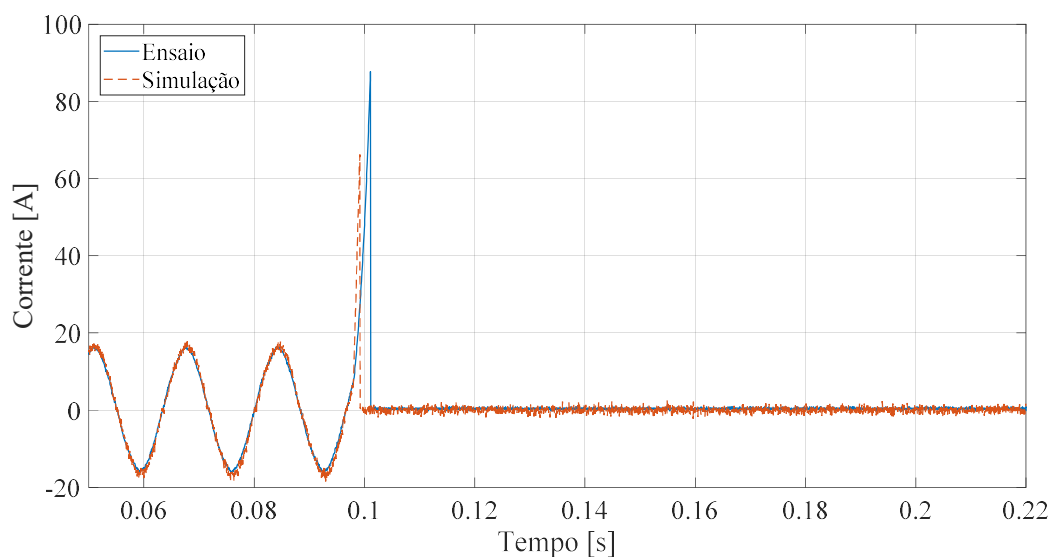


Figura 63 - Comparação entre a corrente ensaiada e a simulada na chave IGBT na configuração ISC.  
 FONTE: Elaboração Própria.

A Figura 65 apresenta uma comparação entre as correntes prospectiva e limitada da configuração ISC, com ambas as chaves, obtidas nos ensaios. O gráfico é exposto em dois quadros, pois estes resultados possuem diferentes níveis de corrente.

O LCC ISC tem como característica a quantidade reduzida de equipamentos necessários para formar o limitador. Do ponto de vista da limitação, ambas as chaves são capazes de reduzir a corrente de curto-circuito da mesma forma a partir do segundo semiciclo. Teoricamente, a configuração com Tiristor não deveria limitar a corrente no primeiro semiciclo da falta.

Entretanto, conforme apresentado na Figura 65, isso não ocorre, o que pode ser justificado pelo fato de que ao conectar o limitador no sistema já existem resistências de contato que reduzem o valor da corrente prospectiva, assim como a queda de tensão nas chaves semicondutoras. Já com relação ao IGBT, a limitação ocorre no momento da detecção da falta, onde é possível ver a ação imediata na Figura 65. Apesar dos diferentes valores de corrente entre os ensaios pode-se assumir que, para a configuração com IGBT, a corrente limitada será a mesma que a configuração com Tiristor em um mesmo nível de curto, já que são compostos pelo mesmo indutor. Assim para o primeiro semiciclo há uma redução de aproximadamente 19% para a configuração com Tiristor e haveria uma redução de aproximadamente 91% para a configuração com IGBT. Para o terceiro semiciclo há uma redução de 87% para ambas as chaves.

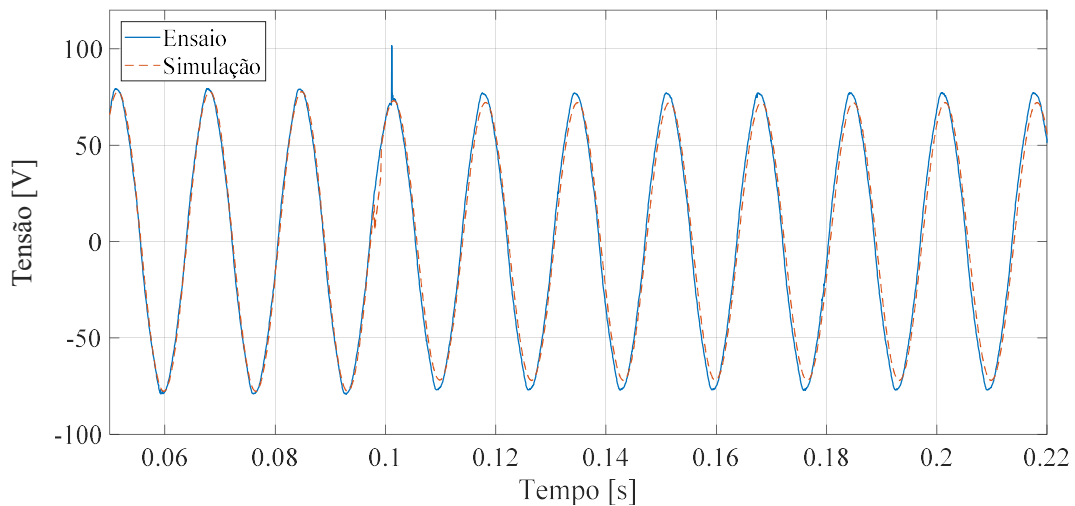


Figura 64 - Comparação entre a tensão ensaiada e a simulada do circuito na configuração ISC utilizando IGBT.  
 FONTE: Elaboração Própria.

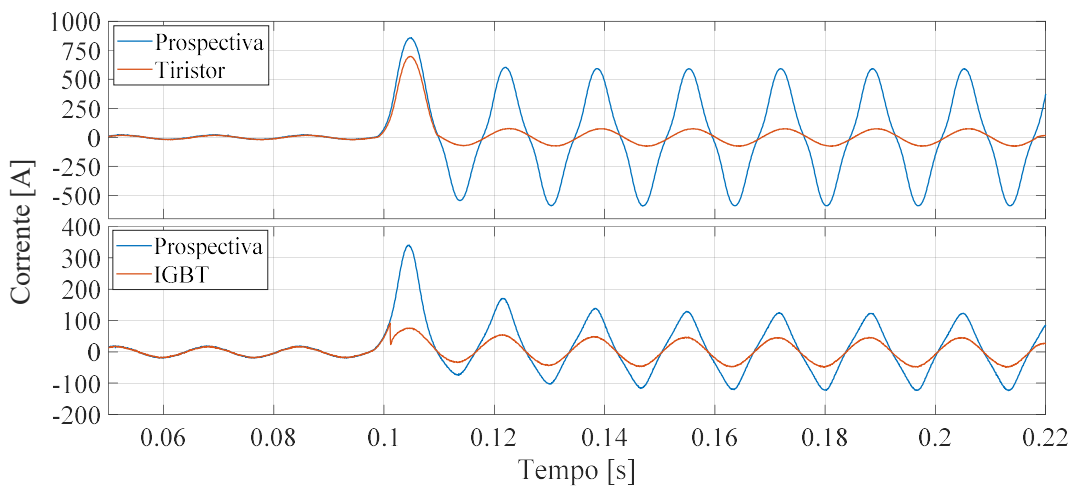


Figura 65 - Comparação entre as correntes prospectiva e limitada ensaiadas da configuração ISC com Tiristor e IGBT.  
 FONTE: Elaboração Própria.

Com relação a redução na queda de tensão, a configuração com Tiristor teve uma queda de 5 V para o terceiro semiciclo, 18,75% menor do que o sistema sem limitador, que teve uma queda de 20 V para o mesmo semiciclo. Resultados semelhantes aos obtidos com o tiristor são esperados no caso de se utilizar o IGBT como chave semicondutora.

Apesar da aparente simplicidade desta configuração, é preciso destacar certas precauções ao utilizá-la. O dimensionamento adequado da chave é fundamental, uma vez que esta, mesmo que por um breve instante, conduz a corrente de curto-circuito. Ao utilizar um Tiristor, este deve ser capaz de conduzir a corrente de falta durante um semiciclo, de modo que seu dimensionamento inadequado pode danificar a chave e comprometer a operação do limitador. Já o IGBT apresenta a vantagem da comutação sem passagem por zero, tornando possível subdimensionar a chave. Entretanto, os ensaios mostraram que mesmo para um nível de corrente de curto reduzida, há a necessidade de um circuito *snubber* para proteção contra surtos de tensão. A ausência dessa proteção pode afetar o funcionamento da chave, que pode vir a conduzir a corrente de curto por um tempo maior que do que suporta e, conseqüentemente, ser danificada. Por fim, a configuração utilizando IGBT também é susceptível a velocidade de atuação do controle, que ao retardar o sinal de comando, pode danificar a chave.

## 4.2 LCC Ressonante

A configuração Ressonante foi estudada com dois tipos diferentes de chaves semicondutoras, Tiristor e IGBT. A seguir será apresentada uma análise dos resultados do comportamento da configuração com cada chave.

A Figura 66 apresenta a comparação entre a corrente ensaiada e a simulada do sistema utilizando Tiristor. É possível observar a limitação da corrente de curto-circuito logo no primeiro semiciclo e, nos ciclos seguintes, um valor reduzido para aproximadamente 75  $A_{PICO}$ .

A Figura 67 apresenta a comparação entre a corrente ensaiada e a simulada no capacitor para a configuração utilizando Tiristor. No regime permanente, a corrente do sistema circula completamente pelo capacitor pois a chave está aberta. Entretanto, no curto circuito, mesmo com o Tiristor em condução, há uma pequena circulação de corrente pelo capacitor. Isso ocorre devido a necessidade de polarização da chave para conduzir. Outro aspecto importante é que ao detectar a falta e, com a condução do Tiristor, há um pico de corrente no ensaio. Este comportamento não ocorreu na simulação pois certas características dos elementos do limitador foram simplificadas.

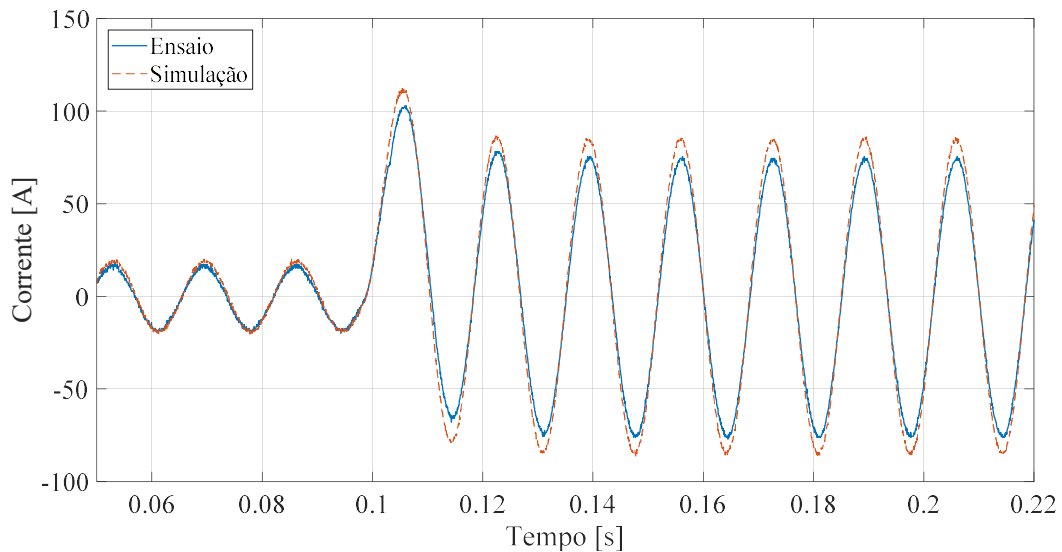


Figura 66 - Comparação entre a corrente ensaiada e a simulada do circuito na configuração Ressonante utilizando Tiristor.

FONTE: Elaboração Própria.

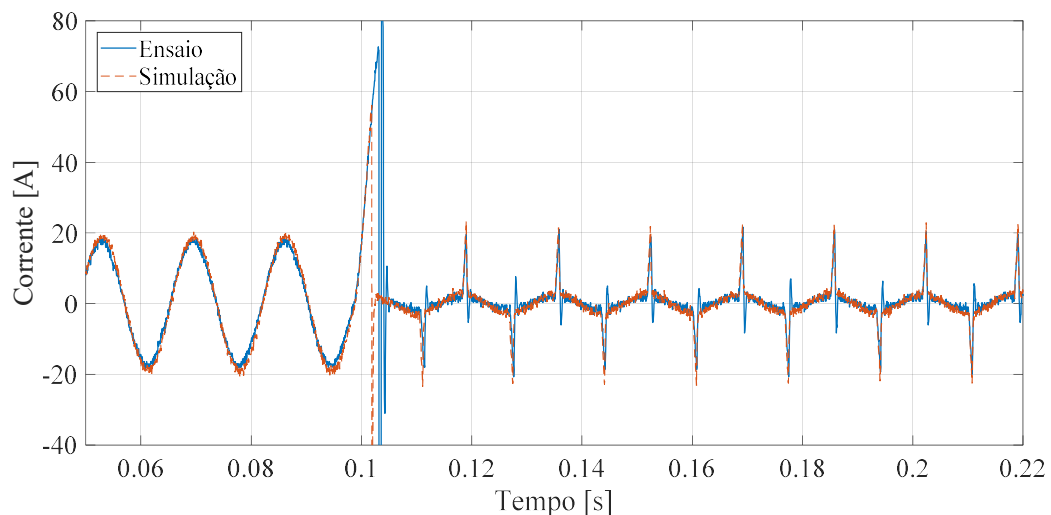


Figura 67 - Comparação entre a corrente ensaiada e a simulada no capacitor na configuração Ressonante utilizando Tiristor.

FONTE: Elaboração Própria.

A Figura 68 apresenta a comparação entre as correntes ensaiada e simulada no Tiristor. No regime permanente, não há circulação de corrente na chave pois ela não conduz. No curto-circuito, a corrente limitada circula majoritariamente pela chave. Ainda há uma variação de corrente elevada que deve ser considerada ao se dimensionar a chave para a configuração.

A comparação entre a tensão ensaiada e a simulada no sistema na configuração utilizando Tiristor é apresentada na Figura 69. Os resultados entre simulação e ensaio são muito próximos e há uma queda de tensão de 4 V entre o regime permanente e o curto-circuito, representando aproximadamente 5% da tensão total.

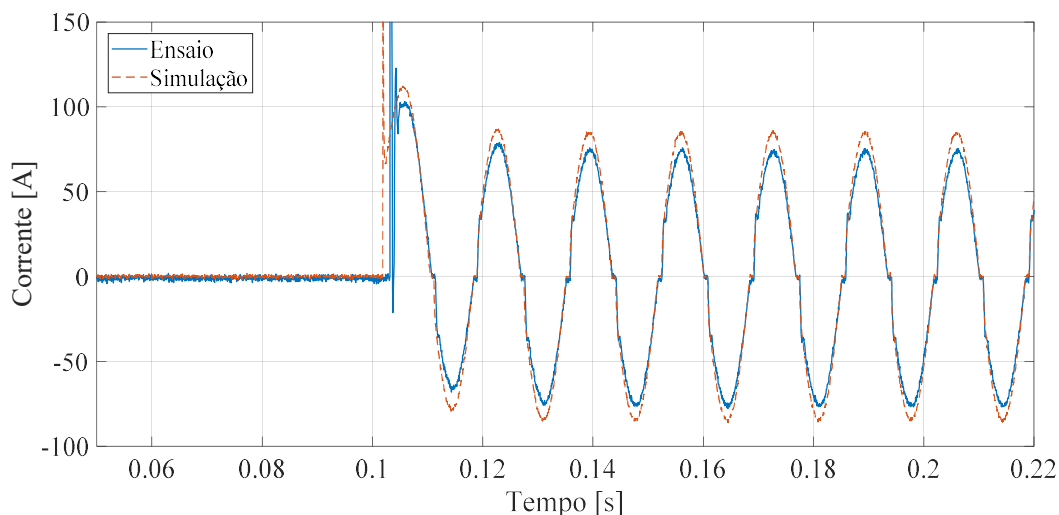


Figura 68 - Comparação entre as correntes ensaiada e simulada na chave Tiristor na configuração Ressonante.  
 FONTE: Elaboração Própria.

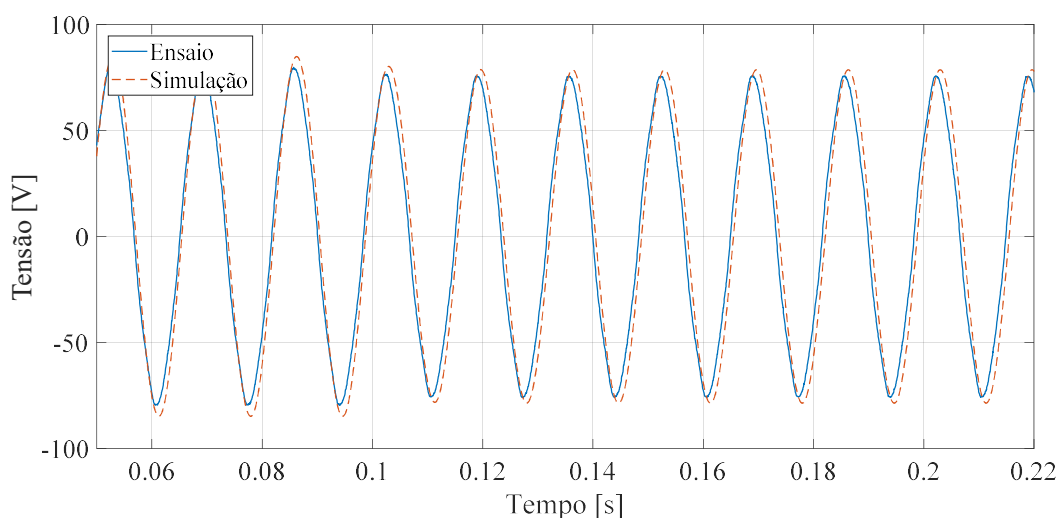


Figura 69 - Comparação entre a tensão ensaiada e a simulada do circuito na configuração Ressonante utilizando Tiristor.  
 FONTE: Elaboração Própria.

A Figura 70 exibe a comparação entre as correntes ensaiada e simulada do sistema para a configuração utilizando IGBT. É possível observar, assim como a configuração com Tiristor, há limitação da corrente de curto-circuito logo no primeiro semiciclo, que tem seu valor reduzido para aproximadamente  $75 A_{PICO}$  nos ciclos subsequentes.

A Figura 71 mostra a comparação entre as correntes ensaiada e simulada no capacitor para a configuração utilizando IGBT. O comportamento é o mesmo da configuração utilizando Tiristor. Entretanto, a circulação de corrente no curto-circuito pelo capacitor utilizando IGBT é ligeiramente maior comparado a chave Tiristor. Isso se deve ao fato de que a configuração utiliza dois IGBTs em antissérie. Ou seja, ainda há uma queda de tensão no diodo quando uma destas chaves não está conduzindo e, conseqüentemente, uma corrente maior circula pelo capacitor.

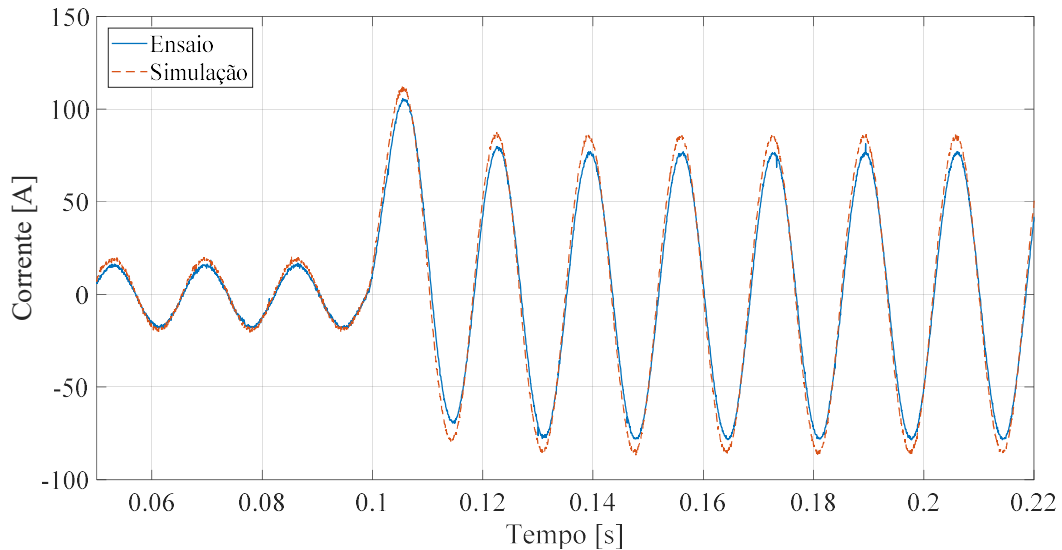


Figura 70 - Comparação entre as correntes ensaiada e simulada do circuito na configuração Ressonante utilizando IGBT.

FONTE: Elaboração Própria.

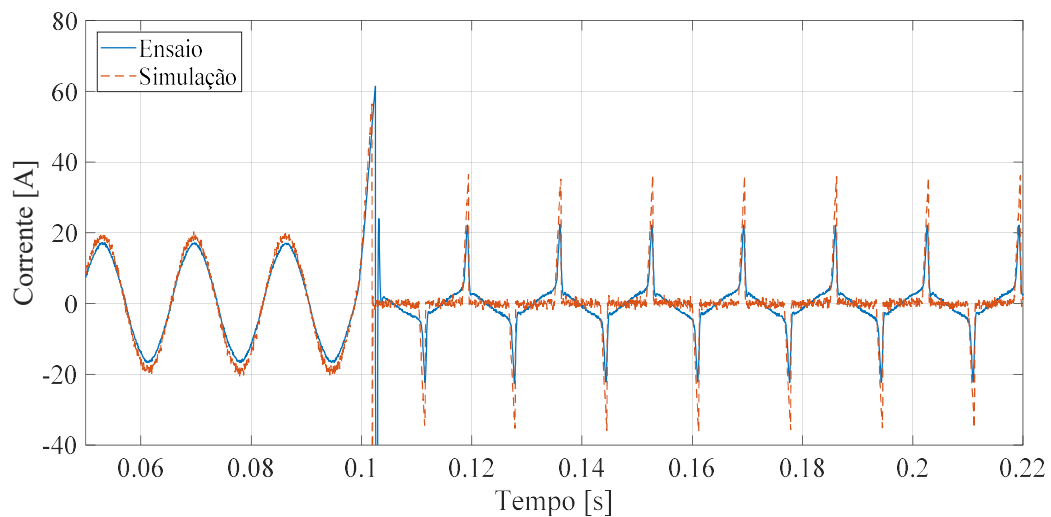


Figura 71 - Comparação entre as correntes ensaiada e simulada no capacitor na configuração Ressonante utilizando IGBT.

FONTE: Elaboração Própria.

A Figura 72 apresenta a comparação entre as correntes ensaiada e simulada no IGBT. O comportamento é muito similar em relação a configuração utilizando Tiristor, pois não há restrição de comutação do Tiristor para conduzir.

A Figura 73 apresenta a comparação entre a tensão ensaiada e a simulada no sistema na configuração ressonante utilizando IGBT. Novamente, os resultados entre simulação e ensaio são muito próximos, assim como em comparação com os resultados encontrados na configuração ressonante com Tiristor.

A Figura 74 apresenta a comparação entre as correntes prospectiva e limitada ensaiadas utilizando a configuração Ressonante com os dois tipos de chaves. Essa configuração tem como



principal característica a atuação rápida, logo no primeiro semiciclo, independentemente do tipo de chave utilizada. Assim, a limitação ocorre da mesma forma, com uma redução de aproximadamente 87% da corrente e uma redução na queda de tensão na falta de aproximadamente 20%, como pode ser visto na Figura 75.

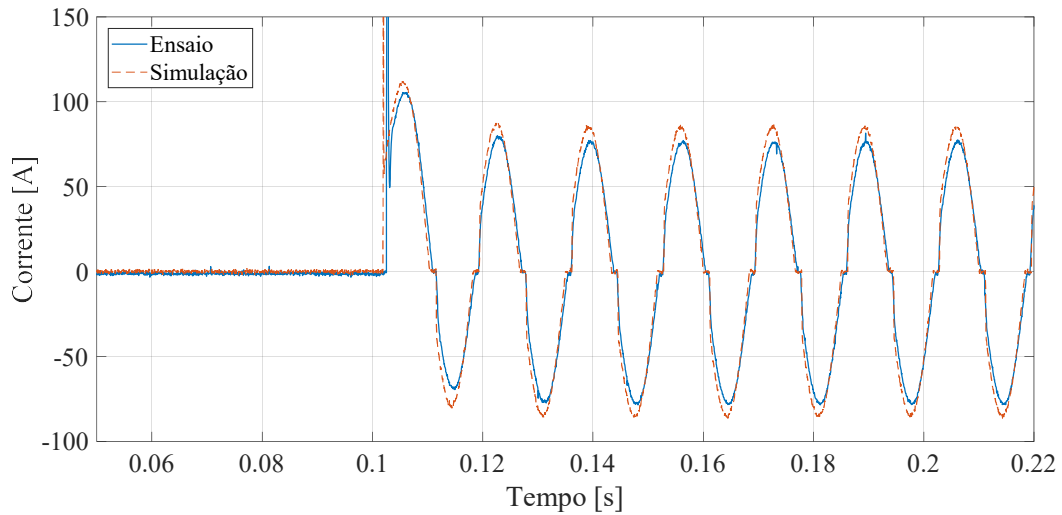


Figura 72 - Comparação entre as correntes ensaiada e simulada na chave IGBT na configuração Ressonante.  
FONTE: Elaboração Própria.

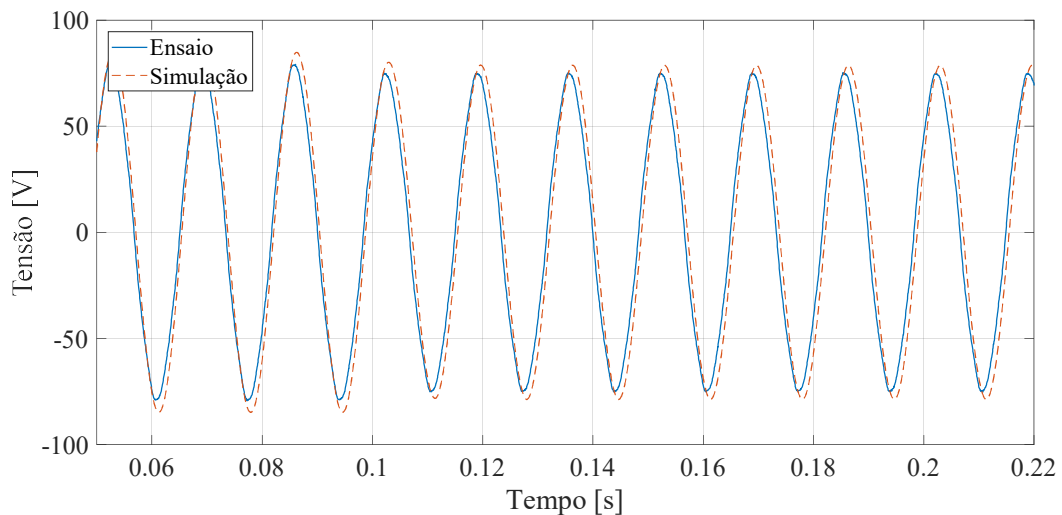


Figura 73 - Comparação entre a tensão ensaiada e a simulada do circuito na configuração Ressonante utilizando IGBT.  
FONTE: Elaboração Própria.

Outra vantagem desta configuração é que a chave naturalmente opera em uma região segura, em que a corrente que circula por ela será sempre limitada. O capacitor em paralelo também funciona como proteção para a chave, como em um circuito *snubber*, evitando grandes variações de tensão na mesma.

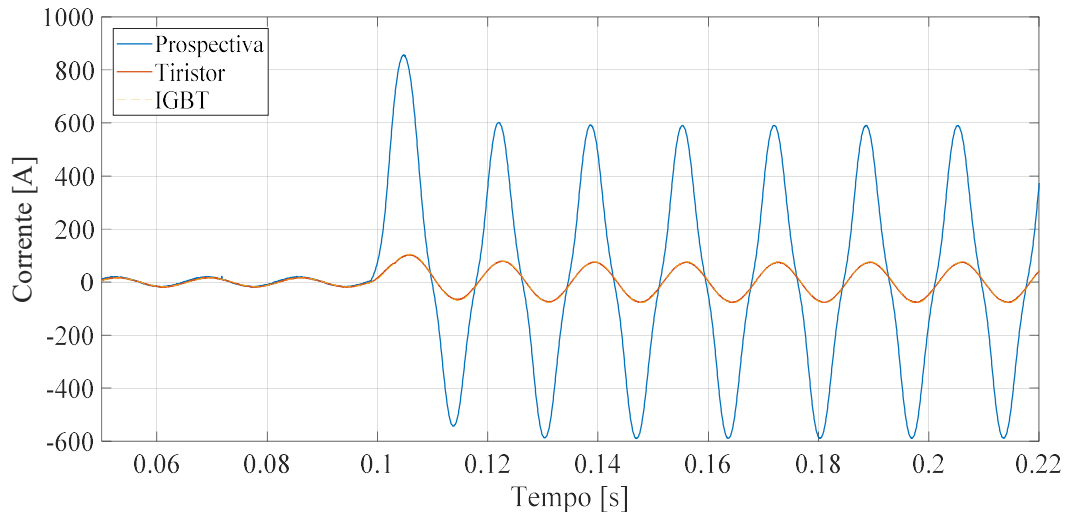


Figura 74 - Comparação entre as correntes prospectiva e limitada da configuração Ressonante com Tiristor e IGBT.

FONTE: Elaboração Própria.

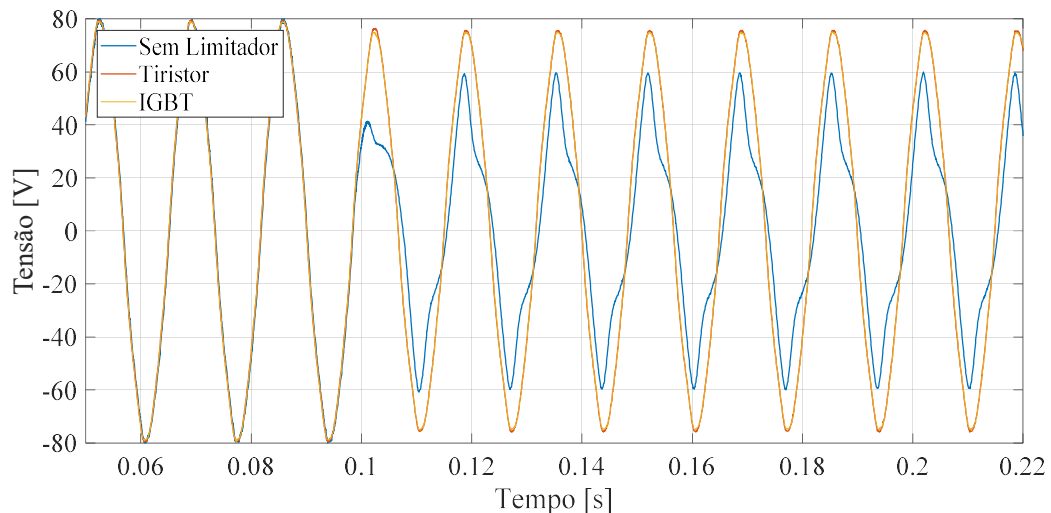


Figura 75 - Comparação entre a tensão do sistema sem limitador e com limitador na configuração Ressonante com Tiristor e IGBT.

FONTE: Elaboração Própria.

### 4.3 Análise comparativa

Os resultados apresentados mostram que as simulações tiveram resultados próximos do comportamento dos LCCs ensaiados. As diferenças são dadas devido à ausência de uma simulação detalhada do transformador, que não era o foco do trabalho. Entretanto, ainda é possível analisar os efeitos do limitador de forma quantitativa através das simulações e, assim, dimensionar de forma adequada os parâmetros do mesmo para outros ensaios.

A Figura 76 ilustra os valores RMS das correntes no sistema para as configurações de limitador estudadas. O valor RMS em cada instante de tempo foi calculado utilizando as leituras armazenadas durante o último período de 16,7 ms, correspondente a frequência de 60 Hz. Não é apresentada a corrente para a configuração ISC com IGBT, pois o ensaio foi executado em

um outro nível de corrente. A configuração Ressonante apresenta uma taxa de crescimento da corrente menor quando comparada com as outras configurações. Isso se dá ao fato da corrente circular pelo ramo ressonante no regime permanente, influenciando o seu comportamento transitório durante a falta.

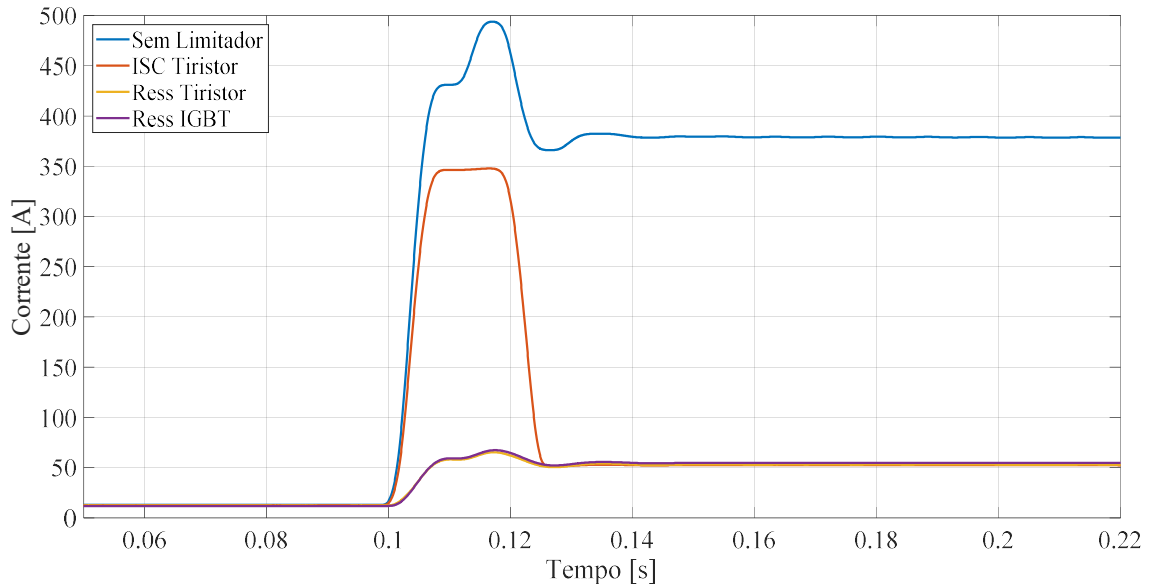


Figura 76 - Corrente RMS do sistema das configurações de limitador.  
 FONTE: Elaboração Própria.

A Tabela 6 apresenta uma análise, nos seis primeiros semiciclos após a falta, da redução percentual da corrente nas configurações estudadas. As configurações ISC com IGBT e Ressonante com ambas as chaves são as que apresentam a maior redução média da corrente de falta. Nota-se que a limitação a partir do segundo semiciclo é a mesma para todas as configurações, pois o elemento limitador é o mesmo. Logo, o dimensionamento do indutor torna-se o parâmetro técnico mais importante a ser considerado, pois ele define o percentual de limitação da corrente.

Tabela 6 - Redução percentual da corrente de falta.

Configuração	Semiciclo					
	1	2	3	4	5	6
ISC Tiristor	19%	87%	87%	87%	87%	87%
ISC IGBT	91%	87%	87%	87%	87%	87%
Ress Tiristor	88%	88%	87%	87%	87%	87%
Ress IGBT	88%	87%	87%	87%	87%	87%

FONTE: Elaboração Própria.

Outro aspecto técnico a ser considerado ao utilizar chaves IGBTs é o dimensionamento do *snubber*, a fim de garantir a operação adequada da chave e, conseqüentemente, do limitador.

A Figura 77 ilustra as tensões, em RMS e  $pu$ , no sistema para as configurações de limitador estudadas. É possível observar que a redução da queda de tensão está diretamente relacionada com a capacidade de limitação da configuração. A configuração Ressonante reduz a queda de tensão logo no primeiro semiciclo, já que seu funcionamento permite uma atuação rápida e suavizada.

Não é apresentada a tensão para a configuração ISC com IGBT, pois o ensaio foi executado em um outro nível de potência. Porém, pode-se assumir que, após o tempo aproximado de 125,5 ms, o comportamento dessa configuração seria semelhante ao do ISC com Tiristor.

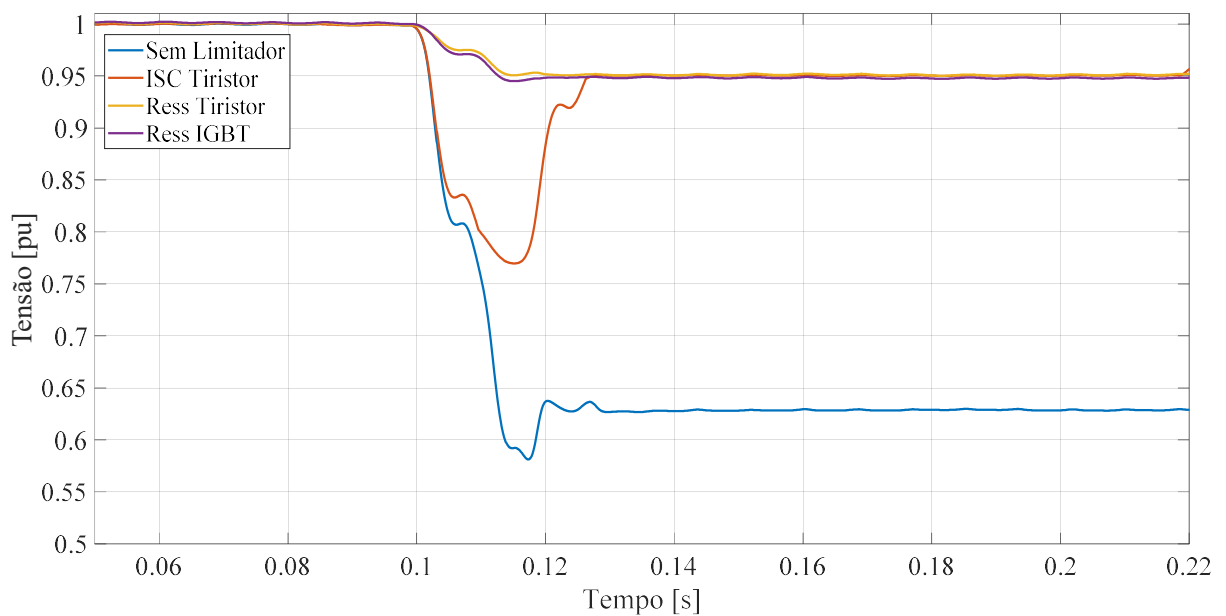


Figura 77 - Tensão RMS no sistema das configurações de limitador.  
FONTE: Elaboração Própria.

## 5 Conclusão

Curtos-circuitos são eventos indesejáveis na rede de distribuição capazes de causar danos a mesma e aos equipamentos da subestação. Os Limitadores de Corrente de Curto-circuito são apresentados como uma solução técnica e economicamente viáveis a fim de proteger os equipamentos que compõem a subestação. Logo este trabalho teve como objetivo avaliar os aspectos técnicos de um protótipo de LCC em escala reduzida utilizando resultados de simulação e ensaios experimentais.

Os LCCs de estado sólido são formados fundamentalmente por chaves de estado sólido, e possuem diversas configurações, como série chaveado, ressonante e ponte. Baseado nas diversas vantagens e desvantagens de cada configuração de limitador foram selecionadas as configurações de estado sólido série chaveado com indutor, nomeada Indutor Série Chaveado (ISC), e circuito ressonante série com capacitor chaveado, nomeada apenas por Ressonante. Cada configuração foi analisada considerando dois tipos de chave semicondutora, tiristor e IGBT.

Foi desenvolvida uma bancada de testes para executar os ensaios das configurações escolhidas. Desde sua estrutura para suportar os equipamentos, até os equipamentos em si, como o indutor de núcleo de ar, arranjo de chaves, banco de capacitores, sistema de controle e resistências de carga. A simulação foi desenvolvida no software Simulink, e considerou efeitos reais a fim de ter um resultado mais próximo da realidade, como queda de tensão nas chaves e ruídos de medição.

Os resultados de simulação e experimentais tiveram seus valores muito próximos, justificando as diferenças encontradas pela ausência da modelagem do transformador utilizado, que foi simplificado por uma impedância na fonte. A corrente prospectiva foi de 600 A<sub>PICO</sub> a partir do terceiro semiciclo e houve uma queda de tensão de 25% no sistema sem limitador. Com a configuração ISC com tiristor não há limitação de corrente no primeiro semiciclo. Entretanto, é possível observar uma diferença da corrente comparada a prospectiva. Esta diferença é justificada pelas resistências de contato e queda de tensão na condução da chave ao se inserir o limitador no sistema. A partir do segundo semiciclo a corrente é limitada em 87%. A queda de tensão nesse momento é reduzida para 6,25%. A configuração ISC com IGBT foi executada em um menor nível de corrente, com o objetivo de manter a chave semicondutora em um nível seguro. Obteve-se uma redução da corrente de 78% no primeiro semiciclo, 55% no terceiro semiciclo e queda de tensão de 2,5%. Porém, pode-se assumir que a corrente seria limitada para

o mesmo nível em um ensaio com uma corrente maior, já que o indutor responsável pela limitação é o mesmo. Para a configuração Ressonante os resultados tanto de limitação de corrente quanto de redução na queda de tensão são os mesmos, já que para este caso ambas as chaves podem passar a conduzir a qualquer momento. A redução de corrente é de 88% no primeiro semiciclo e 87% a partir do terceiro semiciclo. A queda de tensão é de 5%.

A partir destes resultados pode-se concluir que para limitar o primeiro semiciclo, deve-se considerar o tipo de configuração e o tipo de chave semicondutora utilizada. Logo, os principais parâmetros técnicos a serem considerados são a impedância do indutor, o tipo de configuração e o tipo de chave, assim como as proteções associadas a esta. Com relação a queda de tensão observou-se que há uma redução proporcional a limitação da corrente. Então, do ponto de vista técnico, ambas as configurações são capazes de limitar a corrente de falta. Caso seja considerado a implementação em um sistema de potência de alguma delas, além dos critérios técnicos destacados, deve-se considerar o custo de fabricação de cada configuração para a escolha da mais adequada.

## **5.1 Sugestões para Trabalho Futuros**

Através da simulação e ensaio experimental foi possível observar as características de duas configurações de LCC. Nesta seção são apontados alguns temas para a continuidade do estudo elaborado nessa dissertação:

- Os ensaios foram feitos em cargas resistivas, entretanto a rede de distribuição tem carga majoritariamente indutiva. É necessário estudar os efeitos do limitador em outros tipos de carga, como indutivas e não-lineares.
- O sistema detector de faltas é de extrema importância para o limitador, ele determina o modo de operação do LCC. É necessário um aprofundamento no código de detecção, a fim de que este seja capaz de distinguir todos os eventos comuns a uma rede de distribuição.
- Os limitadores desenvolvidos são monofásicos, entretanto a rede de distribuição é trifásica. Neste caso, para aplicação real, faz-se necessário o projeto e dimensionamento de um limitador trifásico.
- Com o aumento da tensão do sistema é preciso dimensionar um arranjo de chaves semicondutoras de forma que estas suportem a tensão, que em sistemas de distribuição é na ordem de kV. Neste sentido um trabalho futuro é a equalização e otimização deste arranjo, a fim de reduzir a quantidade de chaves utilizada.

- As chaves semicondutoras são acionadas por seus respectivos drivers. Entretanto as soluções comerciais não são compatíveis com as necessidades do limitador. Assim é preciso desenvolver um driver que atenda essas necessidades.
- O elemento indutor é o componente principal do limitador, responsável pela redução da corrente de curto-circuito. Com o aumento da potência do sistema deve haver um projeto detalhado deste elemento, considerando uma aplicação em um limitador trifásico, a fim de otimizar seus parâmetros.
- Com o aumento da potência do sistema novos elementos de proteção devem ser considerados na construção do limitador, como *snubbers* e chaves de *bypass*. Visto que o limitador é um equipamento em série com a rede, deve haver um caminho alternativo caso este equipamento venha a sofrer algum defeito.

## Referências Bibliográficas

- [1] J. Kozak, M. Majka, e S. Kozak, “Experimental Results of a 15 kV, 140 A Superconducting Fault Current Limiter”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 27, n° 4, p. 1–4, jun. 2017, doi: 10.1109/TASC.2017.2651120.
- [2] A. Sahebi, H. Samet, e T. Ghanbari, “Evaluation of power transformer inrush currents and internal faults discrimination methods in presence of fault current limiter”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 68, p. 102–112, fev. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.09.124.
- [3] L. M. Castro, D. Guillen, e F. Trillaud, “On Short-Circuit Current Calculations Including Superconducting Fault Current Limiters (ScFCLs)”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 33, n° 5, p. 2513–2523, out. 2018, doi: 10.1109/TPWRD.2018.2800732.
- [4] M. Badakhshan e S. M. Mousavi G., “Flux-lock type of superconducting fault current limiters: A comprehensive review”, *Physica C: Superconductivity and its Applications*, vol. 547, p. 51–54, abr. 2018, doi: 10.1016/j.physc.2018.01.011.
- [5] M. M. lattes Lanes, “Limitador eletrônico de corrente de curto-circuito baseado em circuito ressonante controlado por dispositivos semicondutores de potência”, Dissertação, Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), 2006.
- [6] I. I. B. de Transformadores Ltda., “Reatores a Núcleo de Ar”. 25-mar-2018.
- [7] H. J. Schettino, “Análise de Limitador de Corrente Supercondutor Resistivo para Inserção de Geradores ao Sistema de Transmissão”, Tese, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.
- [8] A. M. Monteiro, “Um estudo de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito com ênfase no ipc (interphase power controller)”, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.
- [9] W. T. B. de Souza, “Simulações e Ensaio com Limitadores de Corrente de Curto-Circuito Supercondutores do Tipo Resistivo”, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.
- [10] F. D. C. Oliveira, “Limitador de Corrente de Falta Supercondutor”, Master’s thesis, Vitória, 2005.
- [11] G. Mafra, “APLICAÇÃO DE LIMITADORES DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO SUPERCONDUTORES EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE DISTRIBUIÇÃO E PLATAFORMAS DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO E GÁS NATURAL”, 2016, doi: 10.13140/rg.2.1.3266.8408.
- [12] L. Kovalsky, X. Yuan, K. Tekletsadik, A. Keri, J. Bock, e F. Breuer, “Applications of Superconducting Fault Current Limiters in Electric Power Transmission Systems”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 15, n° 2, p. 2130–2133, jun. 2005, doi: 10.1109/TASC.2005.849471.
- [13] A. Morandi, “State of the art of superconducting fault current limiters and their application to the electric power system”, *Physica C: Superconductivity*, vol. 484, p. 242–247, jan. 2013, doi: 10.1016/j.physc.2012.03.004.
- [14] A. Hobl, S. Elschner, J. Bock, S. Kramer, C. Janke, e J. Schramm, “Superconducting fault current limiters: a new tool for the ‘grid of the future’”, in *CIREN 2012 Workshop: Integration of Renewables into the Distribution Grid*, Lisbon, Portugal, 2012, p. 296–296, doi: 10.1049/cp.2012.0852.
- [15] Z. Hong *et al.*, “The Development and Performance Test of a 10 kV Resistive Type Superconducting Fault Current Limiter”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 22, n° 3, p. 5600504–5600504, jun. 2012, doi: 10.1109/TASC.2011.2180278.
- [16] A. Hobl, W. Goldacker, B. Dutoit, L. Martini, A. Petermann, e P. Tixador, “Design and Production of the ECCOFLOW Resistive Fault Current Limiter”, *IEEE Trans. Appl.*



- Supercond.*, vol. 23, n° 3, p. 5601804–5601804, jun. 2013, doi: 10.1109/TASC.2013.2238288.
- [17] M. Stemmler, F. Merschel, M. Noe, e A. Hobl, “AmpaCity &#x2014; Advanced superconducting medium voltage system for urban area power supply”, in *2014 IEEE PES T&D Conference and Exposition*, Chicago, IL, USA, 2014, p. 1–5, doi: 10.1109/TDC.2014.6863566.
- [18] J. Kozak, M. Majka, S. Kozak, e T. Janowski, “Design and Tests of Coreless Inductive Superconducting Fault Current Limiter”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 22, n° 3, p. 5601804–5601804, jun. 2012, doi: 10.1109/TASC.2011.2178977.
- [19] S. Hellmann, M. Abplanalp, L. Hofstetter, e M. Noe, “Manufacturing of a 1-MVA-Class Superconducting Fault Current Limiting Transformer With Recovery-Under-Load Capabilities”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 27, n° 4, p. 1–5, jun. 2017, doi: 10.1109/TASC.2017.2652493.
- [20] N. Hayakawa, H. Kojima, M. Hanai, e H. Okubo, “Progress in Development of Superconducting Fault Current Limiting Transformer (SFCLT)”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 21, n° 3, p. 1397–1400, jun. 2011, doi: 10.1109/TASC.2010.2089412.
- [21] Yin Xin *et al.*, “Manufacturing and Test of a 35 kV/90 MVA Saturated Iron-Core Type Superconductive Fault Current Limiter for Live-Grid Operation”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 19, n° 3, p. 1934–1937, jun. 2009, doi: 10.1109/TASC.2009.2018510.
- [22] F. Moriconi, F. De La Rosa, A. Singh, B. Chen, M. Levitskaya, e A. Nelson, “An innovative compact saturable-core HTS Fault Current Limiter - development, testing and application to transmission class networks”, in *IEEE PES General Meeting*, Minneapolis, MN, 2010, p. 1–8, doi: 10.1109/PES.2010.5590090.
- [23] Y. Xin *et al.*, “Factory and Field Tests of a 220 kV/300 MVA Saturated Iron-Core Superconducting Fault Current Limiter”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 23, n° 3, p. 5602305–5602305, jun. 2013, doi: 10.1109/TASC.2012.2234205.
- [24] M. Komatsu, “A Solid-State Current limiting Switch for the Application of DC Power Network”, in *2018 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, Turin, 2018, p. 1–7, doi: 10.1109/INTLEC.2018.8612397.
- [25] M. Komatsu, “Approach and basic evaluation for the DC circuit breaker with fault current limiting feature”, in *2016 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, Austin, TX, USA, 2016, p. 1–5, doi: 10.1109/INTLEC.2016.7749138.
- [26] H.-C. Lin e K.-C. Hsiao, “Integration of DC circuit breaker and fault current limiter based on zero-voltage resonant switching approach”, *IET Circuits, Devices & Systems*, vol. 13, n° 3, p. 344–351, maio 2019, doi: 10.1049/iet-cds.2018.5167.
- [27] F. Paterakis, C. C. Marouchos, G. A. Putrus, M. Darwish, e C. Makarounas, “A solid-state fault current limiting and interrupting device (FCLID) with power factor correction”, in *2018 53rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Glasgow, 2018, p. 1–6, doi: 10.1109/UPEC.2018.8542042.
- [28] A. Bahrami, R. Faranda, e H. Hafezi, “Integration of fault current limiting function into a single-phase series compensator”, in *2018 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Ljubljana, 2018, p. 1–6, doi: 10.1109/ICHQP.2018.8378879.
- [29] A. Abramovitz e K. Ma Smedley, “Survey of Solid-State Fault Current Limiters”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, n° 6, p. 2770–2782, jun. 2012, doi: 10.1109/TPEL.2011.2174804.
- [30] A. Abramovitz e K. Ma Smedley, “Survey of Solid-State Fault Current Limiters”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, n° 6, p. 2770–2782, jun. 2012, doi: 10.1109/TPEL.2011.2174804.

- [31] J. A. Sa'ed, M. Quraan, M. Abu-Khaizaran, S. Favuzza, e F. Massaro, "Control of solid-state fault current limiter for DG-integrated distribution systems", in *2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, Milan, Italy, 2017, p. 1–5, doi: 10.1109/EEEIC.2017.7977785.
- [32] Y. Feng, E. Johnson, O. Saadeh, J. C. Balda, H. A. Mantooth, e M. Schupbach, "Impact of solid-state fault current limiters on protection equipment in transmission and distribution systems", in *IEEE PES T&D 2010*, New Orleans, LA, USA, 2010, p. 1–6, doi: 10.1109/TDC.2010.5484242.
- [33] C. Meyer, P. Kollensperger, e R. W. De Doncker, "Design of a novel low loss fault current limiter for medium-voltage systems", in *Nineteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004. APEC '04.*, Anaheim, CA, USA, 2004, vol. 3, p. 1825–1831, doi: 10.1109/APEC.2004.1296114.
- [34] B. Chen, A. Q. Huang, M. Baran, C. Han, e W. Song, "Operation Characteristics of Emitter Turn-Off Thyristor (ETO) for Solid-State Circuit Breaker and Fault Current Limiter", in *Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006. APEC '06.*, USA, 2006, p. 174–178, doi: 10.1109/APEC.2006.1620535.
- [35] T. Genji, O. Nakamura, M. Isozaki, M. Yamada, T. Morita, e M. Kaneda, "400 V class high-speed current limiting circuit breaker for electric power system", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, n° 3, p. 1428–1435, jul. 1994, doi: 10.1109/61.311172.
- [36] M. M. R. Ahmed, G. A. Putrus, L. Ran, e R. Penlington, "Development of a Prototype Solid-State Fault-Current Limiting and Interrupting Device for Low-Voltage Distribution Networks", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, n° 4, p. 1997–2005, out. 2006, doi: 10.1109/TPWRD.2006.874584.
- [37] M. Rezaee e R. G. Harley, "Resonance-Based Fault Current Limiters: Theory, Applications, and Assessment", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, n° 4, p. 3066–3076, jul. 2018, doi: 10.1109/TIA.2018.2817626.
- [38] M. Martins Lanes, H. A. Carvalho Braga, e P. Gomes Barbosa, "Fault Current Limiter Based on Resonant Circuit Controlled by Power Semiconductor Devices", *IEEE Latin America Transactions*, vol. 5, n° 5, p. 311–320, set. 2007, doi: 10.1109/TLA.2007.4378523.
- [39] G. G. Karady, "Principles of fault current limitation by a resonant LC circuit", *IEE Proceedings C Generation, Transmission and Distribution*, vol. 139, n° 1, p. 1, 1992, doi: 10.1049/ip-c.1992.0001.
- [40] S. Sugimoto, J. Kida, H. Arita, C. Fukui, e T. Yamagiwa, "Principle and characteristics of a fault current limiter with series compensation", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, n° 2, p. 842–847, abr. 1996, doi: 10.1109/61.489342.
- [41] H. G. Sarmiento, "A fault current limiter based on an LC resonant circuit: Design, scale model and prototype field tests", in *2007 iREP Symposium - Bulk Power System Dynamics and Control - VII. Revitalizing Operational Reliability*, Charleston, SC, USA, 2007, p. 1–5, doi: 10.1109/IREP.2007.4410570.
- [42] M. Tarafdar Hagh e M. Abapour, "DC reactor type transformer inrush current limiter", *IET Electr. Power Appl.*, vol. 1, n° 5, p. 808, 2007, doi: 10.1049/iet-epa:20060511.
- [43] W. Fei, Y. Zhang, e Z. Lu, "Novel Bridge-Type FCL Based on Self-Turnoff Devices for Three-Phase Power Systems", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 23, n° 4, p. 2068–2078, out. 2008, doi: 10.1109/TPWRD.2008.2002838.
- [44] W. Fei e Y. Zhang, "A novel IGCT-based Half-controlled Bridge Type Fault Current Limiter", in *2006 CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Shanghai, China, 2006, p. 1–5, doi: 10.1109/IPEMC.2006.4778168.

- [45] W. Fei, Y. Zhang, e Z. Meng, “A Novel Solid-State Bridge Type FCL for Three-Phase Three-Wire Power Systems”, in *APEC 07 - Twenty-Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Anaheim, CA, USA, 2007, p. 1369–1372, doi: 10.1109/APEX.2007.357694.
- [46] W. Fei, Y. Zhang, e Q. Wang, “A Novel Bridge Type FCL Based on Single Controllable Switch”, in *2007 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, Bangkok, Thailand, 2007, p. 113–116, doi: 10.1109/PEDS.2007.4487687.
- [47] V. K. Sood e S. Alam, “3-Phase Fault Current Limiter for distribution systems”, in *2006 International Conference on Power Electronic, Drives and Energy Systems*, 2006, p. 1–6, doi: 10.1109/PEDES.2006.344259.
- [48] S. Chirantan, S. C. Swain, P. C. Panda, e R. Jena, “Enhancement of power profiles by various FACTS devices in power system”, in *2017 2nd International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)*, Coimbatore, 2017, p. 896–901, doi: 10.1109/CESYS.2017.8321212.
- [49] S. U. Bagwan e A. M. Mulla, “A solution of power quality issues by adaptive FACTS controller: A modelling and simulation”, in *2015 International Conference on Energy Systems and Applications*, Pune, India, 2015, p. 612–616, doi: 10.1109/ICESA.2015.7503422.
- [50] B. D. Deotale e S. R. Paraskar, “Transient stability improvement using Thyristor Switched Series Capacitor (TSSC) FACTS device”, in *2016 IEEE Students’ Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS)*, Bhopal, India, 2016, p. 1–6, doi: 10.1109/SCEECS.2016.7509268.
- [51] K. Elamari e L. A. C. Lopes, “Comparison of phase shifting transformer and unified power flow control based interphase power controllers”, in *2016 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, Ottawa, ON, Canada, 2016, p. 1–6, doi: 10.1109/EPEC.2016.7771768.
- [52] K. Sadek, M. Mohaddes, M. Rashwan, D. Brandt, e W. Braun, “GPFC-grid power flow controller: description and applications”, in *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Chicago, IL, USA, 2002, vol. 1, p. 461–466, doi: 10.1109/PESS.2002.1043277.
- [53] N. Thiele, “Air-Cored Inductors for Audio”, *J. Audio Eng. Soc*, vol. 24, n° 5, p. 374–378, 1976.
- [54] E. EPCOS, “Film Capacitors – Power Factor Correction” . .
- [55] E. Texans Instruments, “CC2640R2F SimpleLink Bluetooth low energy Wireless MCU” . .
- [56] E. Texans Instruments, “TI LaunchPad kit with SimpleLink Wireless MCU” . .
- [57] E. Infineon, “Technical Information (Datasheet) - BSM 150 GB 60 DLC” . .
- [58] E. Infineon, “Technical Information (Datasheet) - TT120N16SOF” . .
- [59] E. SEMIKRON, “Datasheet - SKHI 22 A/B R driver” . .
- [60] D. W. Hart, *Power electronics*. New York: McGraw-Hill, 2011.
- [61] E. Yokogawa, “DL850E/DL850EV ScopeCorder” . .
- [62] E. CLIP Automação Industrial, “AFX Series – Temporizadores Eletrônicos Digitais” . .
- [63] E. JNG Materiais Elétricos, “Contatora linha CJX2” . .
- [64] E. Advantech, “PCI-1711, 100 kS/s, 12-bit, 16-ch Universal PCI Multifunction DAQ Card” . .