



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação

FERNANDO CARDOSO FAJONI

ESTUDOS, DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DE UM LIMITADOR DE  
CORRENTES ELÉTRICAS COM NÚCLEO MAGNÉTICO SATURADO

CAMPINAS  
2015



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação

FERNANDO CARDOSO FAJONI

ESTUDOS, DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DE UM LIMITADOR DE  
CORRENTES ELÉTRICAS COM NÚCLEO MAGNÉTICO SATURADO

*Tese apresentada à Faculdade de  
Engenharia Elétrica e Computação da  
Universidade Estadual de Campinas  
como parte dos requisitos exigidos para  
a obtenção do título de Doutor em  
Engenharia Elétrica, na Área de  
Automação*

*Orientador:* Ernesto Ruppert Filho  
*Co-orientador:* Carlos Alberto Baldan

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL  
DA TESE DEFENDIDA PELO ALUNO FERNANDO  
CARDOSO FAJONI, E ORIENTADA PELO PROF. DR.  
ERNESTO RUPPERT FILHO

---

CAMPINAS  
2015

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): CNPq, 143181/2010-6

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Elizangela Aparecida dos Santos Souza - CRB 8/8098

F178e Fajoni, Fernando Cardoso, 1980-  
Estudos, desenvolvimento e construção de um limitador de correntes elétricas com núcleo magnético saturado / Fernando Cardoso Fajoni. – Campinas, SP : [s.n.], 2015.

Orientador: Ernesto Ruppert Filho.  
Coorientador: Carlos Alberto Baldan.  
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Corrente elétrica. 2. Curto-circuito. 3. Supercondutores - Materiais. 4. Energia elétrica - Transmissão. I. Ruppert Filho, Ernesto, 1948-. II. Baldan, Carlos Alberto. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Studies, development and construction of a fault current limiter with saturated magnetic core

**Palavras-chave em inglês:**

Electric current

Short circuit

Superconductors materials

Electricity - Transmission

**Área de concentração:** Automação

**Titulação:** Doutor em Engenharia Elétrica

**Banca examinadora:**

Ernesto Ruppert Filho [Orientador]

Domingos Sávio Lyrio Simonetti

Silvio Ikuyo Nabeta

Maria Cristina Dias Tavares

José Pissolato Filho

**Data de defesa:** 31-08-2015

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Elétrica

## COMISSÃO JULGADORA – TESE DE DOUTORADO

**Candidato:** Fernando Cardoso Fajoni RA: 068092

**Data da Defesa:** 31 de agosto de 2015

**Título da Tese:** "Estudos, Desenvolvimento e Construção de um Limitador de Correntes Elétricas com Núcleo Magnético Saturado".

Prof. Dr. Ernesto Ruppert Filho (Presidente, FEEC/Unicamp)

Prof. Dr. Domingos Sávio Lyrio Simonetti (UFES)

Prof. Dr. Silvio Ikuyo Nabeta (EP/USP)

Profa. Dra. Maria Cristina Dias Tavares (FEEC/UNICAMP)

Prof. Dr. José Pissolato Filho (FEEC/UNICAMP)

A ata de defesa, com as respectivas assinaturas dos membros da Comissão Julgadora, encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

Dedico este trabalho aos meus pais  
Rubens Fajoni e  
Maria Helena Cardoso Fajoni

## AGRADECIMENTOS

Agradeço,

aos professores Ernesto Ruppert Filho e Carlos Alberto Baldan, pela orientação e suporte dado durante o tempo de desenvolvimento da tese, assim como o incentivo e correções

aos meus pais Rubens e Maria Helena e irmãos Renato e Patrícia, pelo amor incondicional e apoio em todos os momentos

aos amigos de laboratório Filipe Trindade, Filipe Braga, Kenji, Massakiti, Jorge, Marcelo, Jeferson, Juan, Maria Tereza, Alexandre, Nelly, Ramon, Tarcio, Adson, Vanessa, Paulo, Tiago, Joel, Laís, Elias, Vinícius, Eliabe, Daiana Silva, Jackson, Hildo, Dennis, Sérgio Pimentel, Edson, Gabriela, pelos momentos de descontração e pela troca de ideias

à Marcela Mantovani pelo carinho especial e companheirismo

aos amigos de Campinas, Cuiabá, São Paulo, Santo Anastácio e vários outros lugares espalhados por aí: Aline Martin, João Vilella, Pedro Villela, Liliane Pires, Rafaela Rocha, Pablo Andres, Camila Julio, Paula Ferlini, Karina Maciel, Gustavo Ponce, Valter Zuliani, Thaís Anastácio, Luiz Bosso, Aline Pereira, Luana Cristina, Audirene Amorim, Natália Vieira, Victor Vianna, Giane Sales, Rafael Julião, Emily Zucatti, Matheus Pierry, Victor Perez, Gabriel Galvão, Matheus Amorim, Lucas Venturini, Rafael Kotchekoff, Monizze Missio, Luciane Sobral, Luiz Felipe, Cristhyan Dourado, Ana Thereza, Ana Carolina, Renato Cunha, Alex Narita, Mateus Batista, Rodrigo Souza, Andrea Thmpson, Romeu Corradi, Osvaldo Vadão, Guilherme Wood, Tereza Cristina, Mauro Jr, Francisco Rodrigues José Antônio Lambert, Mario Kawaphara, José Mateus Rondina, Nilo Sérgio Ribeiro, Paulo Bezerra, Paulo Henrique, Elaine Almeida, Messias Cantanhede, Anderson Aguiar, Murilo Erick, Lincon de Moraes, Robson Pereira, Jonas Jovani Rodrigues, Thelma Saddi, Andrea Rozon, Julio Cesar, Ana Tereza Moleiro, Moisés de Almeida, André Faria, Francisco Guarda, Tiago Estécio, Alexandre Augusto, Luciano Simeoni, Marlon Ruani, Marco Antônio, João Paulo Tonon, Sidnei dos Santos e Antônio Samorano

ao CNPQ e à FUNCAMP pelo apoio financeiro concedido durante o período de doutorado

à Universidade Estadual de Campinas e à Escola de Engenharia de Lorena – USP e seu corpo de funcionários

à Transformadores Jundiaí pelo apoio técnico e serviços realizados para montagem do limitador de correntes de núcleo saturado.

## RESUMO

O constante crescimento do setor elétrico tem como consequência o aumento da potência dos transformadores dos circuitos alimentadores das redes de distribuição e de transmissão de energia elétrica e o aumento do nível de curtos-circuitos, fazendo com que os equipamentos de proteção das subestações e linhas de transmissão se tornem subdimensionados com o passar do tempo.

No momento em que ocorre um curto-circuito, com corrente elétrica de magnitude maior do que o valor nominal de interrupção do disjuntor, este pode não funcionar corretamente, permitindo a passagem da corrente de falta, danificando-se e danificando os equipamentos instalados no circuito elétrico correspondente e causando danos, inclusive, para o transformador de potência.

Limitadores de correntes elétricas são dispositivos com características elétricas próximas do ideal que podem ajudar na solução desse problema de elevação de níveis de corrente de curto-circuito. Eles apresentam baixa impedância em regime permanente e durante falta inserem uma impedância alta em série com o circuito elétrico, limitando sua corrente elétrica durante um intervalo de tempo muito pequeno a um valor para o qual o disjuntor possa atuar com segurança.

Este trabalho apresenta estudo, projeto, construção e ensaios de um limitador de corrente elétrica com núcleo magnético saturado com bobina de corrente contínua de cobre. O projeto foi desenvolvido usando software de elementos finitos (Maxwell/Ansys) combinado com um software resolvidor de circuitos elétricos (Simplorer/Ansys), operando simultaneamente.

Desenvolveu-se um circuito eletrônico analógico chaveado e de baixo custo para detecção de curtos-circuitos em uma rede elétrica trifásica, que é extremamente importante para o funcionamento deste tipo de limitador de corrente elétrica. O circuito eletrônico desenvolvido é simples e, salvo melhor juízo, é inédito para esta aplicação.

Há que se ressaltar aqui que limitadores de corrente elétrica de núcleo magnético saturado podem também ser construídos com material supercondutor em seu enrolamento de corrente contínua. Assim construídos, eles apresentarão estrutura menor e consumirão menos energia em sua operação durante regime permanente. Trata-se do próximo passo a ser dado nesta pesquisa.

**Palavras chaves:** limitador de correntes elétricas, núcleo magnético saturado, corrente de curto-circuito, detecção de curto-circuito, materiais supercondutores.

## ABSTRACT

The constant growth of the electric power sector has the effect of increasing the power of the feeder transformers circuits and the increase in short-circuit level, causing the protective equipment of substations and transmission lines to become undersized over time. At the time that there is a short circuit, an electric current of magnitude larger than the rated value of the breaker interruption, this may not work properly, allowing the passage of fault current, damaging the equipment installed in the corresponding electrical circuit causing damage, including the power transformer.

Fault current limiters are ideal devices with electrical characteristics that can help to solve this problem of high short-circuit current levels. They have low impedance at steady state and, at the time of a short circuit occurrence, it inserts a high impedance in series with the circuit, limiting its electrical current for a very short time to a value for which the circuit breaker can operate safely.

This work presents the study, design, construction and testing of an electrical fault current limiter with saturated magnetic core using direct current cooper winding. The project was developed using finite element software (Maxwell / Ansys) combined with an electrical circuits solver software (Simplorer / Ansys), running at the same time.

It was developed an analogic electronic switched circuit to short-circuit detection in a three-phase power grid, which is extremely important for the operation of this type of electric current limiter. The electronic circuit developed is simple and, for the lack of better view it, is new for this application.

It must be point out here that electrical fault current limiter with saturated magnetic core also can be built with superconducting direct current winding. Thus constructed, they have probably smaller structure and they will consume less energy in their operation during steady state. This is the next step of this research work.

**Key words:** electrical fault current limiter, saturated magnetic core, short-circuit current, short circuit detection, superconductors materials.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1: Superfície crítica característica de um material supercondutor .....	19
Figura 2.2: Efeito do campo magnético aplicado sobre um supercondutor .....	20
Figura 2.3: Variação do campo magnético $B$ no interior da amostra de supercondutor.....	21
Figura 2.4: Campos críticos dos supercondutores tipo I e tipo II em função da temperatura ..	22
Figura 2.5: Aprisionamento de campo magnético nos vórtices de amostra de material supercondutor .....	22
Figura 2.6: Processo de fabricação dos fios de BSCCO - BI-2223 de primeira geração .....	24
Figura 2.7: Processo de fabricação das fitas de YBCO Y-123 de segunda geração .....	25
Figura 2.8: Estrutura de camadas de fitas de YBCO .....	26
Figura 2.9: Estrutura de camadas de fitas de YBCO com dupla camada estabilizadora.....	28
Figura 2.10: Curvas de resistência equivalente para fitas de 1G e 2G .....	29
Figura 3.1: Curva de limitação de dispositivo pirotécnico .....	34
Figura 3.2: Partes do dispositivo pirotécnico ABB .....	35
Figura 3.3: Limitador de correntes elétricas supercondutor do tipo resistivo .....	37
Figura 3.4: Elementos <i>bulks</i> produzidos pela NEXANS.....	41
Figura 3.5: LCESR 12kV/2MVA instalado em Lancashire, Reino Unido .....	42
Figura 3.6: LCESR 12kV/16MVA instalado em Boxberg, Alemanha .....	42
Figura 3.7: Diagrama unifilar do LCESR 24 kV/1 kA ECCOFLOW .....	43
Figura 3.8: Disposição bifilar de supercondutor .....	43
Figura 3.9: Módulo de enrolamentos supercondutores do LCESR da ECCOFLOW .....	43
Figura 3.10: formas de onda de corrente do ensaio de 1 kA no LCESR com Bi-2212 e fita YBCO .....	45
Figura 3.11: formas de onda de corrente do ensaio de 10 kA no LCESR com Bi-2212 e fita YBCO .....	45
Figura 3.12: formas de onda de corrente do ensaio de 30 kA no LCESR com Bi-2212 e fita YBCO .....	45
Figura 3.13: LCESR 220V 1,5kA .....	46
Figura 3.14: Curva $(V,I) \times t$ do LCES sob corrente de 1,5kA durante 5 ciclos .....	46
Figura 3.15: Topologia do limitador de correntes elétricas supercondutor híbrido .....	48
Figura 3.16: Aplicação típica do LCETS .....	49
Figura 3.17: Arranjo do LCETS 2 MVA.....	50
Figura 3.18: estrutura do LCESNB .....	52

Figura 3.19: Funcionamento do LCESNS .....	53
Figura 3.20: Características construtivas de uma fase do LCESNS.....	54
Figura 3.21: Curvas BxH de regime normal e de curto-circuito do limitador de corrente elétrica supercondutor com núcleo saturado .....	55
Figura 3.22: Aproximação da curva BxH do LCESNS.....	56
Figura 3.23: LCESNS da Innopower de 220kV/300MVA .....	59
Figura 4.1: Dimensões do núcleo do LCENS em mm .....	61
Figura 4.2: Núcleo do LCENS com os enrolamentos de corrente contínua e corrente.....	61
Figura 4.3: Gráfico da curva BxH do material Steel M125 (Fe <sub>3,5</sub> %Si) .....	62
Figura 4.4: Malha de elementos finitos utilizada em simulação .....	62
Figura 4.5: Rede elétrica do aplicativo Simplorer .....	63
Figura 4.6: Tensões dos terminais do LCENS adquiridas em simulações .....	65
Figura 4.7: Simulação do LCENS com prospectiva de 1600A e corrente contínua de 70A....	67
Figura 4.8: Simulação do LCENS com prospectiva de 1600 A e corrente contínua de 50A...68	
Figura 4.9: Simulação do LCENS com prospectiva de 1600A e corrente contínua de 30A....69	
Figura 4.10: Simulação do LCENS com prospectiva de 1600A e corrente contínua de 10A..69	
Figura 4.11: Comparação das corrente limitadas pelo LCENS adquiridas em simulações .....	70
Figura 4.12: Simulação do LCENS com prospectiva de 1400A e corrente contínua de 70A..71	
Figura 4.13: Simulação do LCENS com prospectiva de 600A e corrente contínua de 70A....72	
Figura 4.14: Simulação do LCENS com prospectiva de 300A e corrente contínua de 70A....72	
Figura 4.15: Corrente limitada X Corrente de saturação do núcleo do LCENS .....	72
Figura 4.16: Vetor indução magnética $\vec{B}$ no marcador m1 .....	73
Figura 4.17: Vetor indução magnética $\vec{B}$ no marcador m2 .....	73
Figura 4.18: Vetor indução magnética $\vec{B}$ no marcador m3 .....	74
Figura 4.19: Vetor indução magnética $\vec{B}$ no marcador m4 .....	74
Figura 4.20: Vetor indução magnética $\vec{B}$ no marcador m5 .....	74
Figura 4.21: Vetor indução magnética $\vec{B}$ no marcador m6 .....	74
Figura 4.22: Vetor indução magnética $\vec{B}$ no marcador m7 .....	75
Figura 4.23: Vetor indução magnética $\vec{B}$ no marcador m8 .....	75
Figura 4.24: Distribuição de campo magnético antes da ocorrência do curto-circuito .....	76
Figura 4.25: Distribuição de campo magnético no momento da ocorrência do curto-circuito	76
Figura 4.26: Comparação entre tensões induzidas nos terminais da fonte de corrente contínua do LCENS adquiridas em simulações. ....	77

Figura 4.27: Corrente de descarga e tensão nos terminais do circuito magnético do LCENS .	78
Figura 4.28: Formas de onda de correntes limitadas do LCENS .....	79
Figura 5.1: Diagrama de blocos do sistema de proteção da fonte de corrente contínua .....	82
Figura 5.2: Subcircuito de identificação de falta.....	83
Figura 5.3: Faixas de limite corrente do estágio de comparação.....	84
Figura 5.4: Formas de onda da lógica de identificação de curto-circuito.....	85
Figura 5.5: Subcircuito de travamento do sinal e sinalização de curto-circuito.....	86
Figura 5.6: Subcircuito de acionamento do IGBT.....	88
Figura 5.7: Circuito de simulação do circuito de proteção da fonte de corrente contínua no aplicativo Simplorer .....	89
Figura 5.8: Corrente de curto-circuito. ....	90
Figura 5.9: Tensões de referência dos comparadores e tensão no secundário do TC .....	91
Figura 5.10: Lógica de funcionamento do circuito de controle.....	92
Figura 5.11: Detalhamento da lógica de funcionamento do circuito de controle no momento da falta .....	93
Figura 5.12: Sinal de tensão do gatilho do IGBT e corrente da fonte de corrente contínua ....	93
Figura 6.1: Planilha com medidas das chapas de aço do núcleo ferromagnético do LCENS ..	95
Figura 6.2: Montagem de uma das janelas do núcleo magnético do LCENS .....	96
Figura 6.3: Detalhe do empilhamento das chapas da perna central do núcleo magnético do LCENS .....	96
Figura 6.4: Posicionamento de uma das janelas do núcleo magnético do LCENS .....	96
Figura 6.5: Construção de um dos enrolamentos de corrente alternada do LCENS .....	96
Figura 6.6: Bobinas de corrente contínua e alternada encaixadas nas pernas dos núcleos magnéticos .....	97
Figura 6.7: Encaixe das pernas centrais das janelas do núcleo magnético do LCENS .....	97
Figura 6.8: Desenho tridimensional do LCENS .....	98
Figura 6.9: Montagem final do LCENS .....	98
Figura 6.10: Curva de magnetização do LCENS .....	98
Figura 6.11: Curva B x H do LCENS.....	99
Figura 6.12: Curva de permeabilidade magnética do LCENS .....	100
Figura 6.13: Curva de Indutância x NI do núcleo magnético do LCENS .....	101
Figura 6.14: Resposta ao degrau de corrente na bobina de magnetização do LCENS.....	102
Figura 6.15: Circuito de detecção de faltas e acionamento de proteção do LCENS.....	103
Figura 6.16: Montagem para realização dos ensaios no LCENS .....	104

Figura 6.17: Motor-gerador para ensaio na EEL/USP. ....	104
Figura 6.18: LCENS, retificador e circuito <i>shunt</i> de proteção. ....	104
Figura 6.19: Chave estática 220V/2,4KA.....	105
Figura 6.20: Micro computador e interface de programação em Labview durante execução de ensaio. ....	105
Figura 6.21: Instrumentação para realização de testes no LCENS .....	106
Figura 7.1: Circuito elétrico para realização dos ensaios no LCENS .....	108
Figura 7.2: Comparação entre corrente de falta e correntes do circuito de corrente contínua	109
Figura 7.3: Comparação entre corrente de falta e corrente no IGBT .....	110
Figura 7.4: Correntes e tensão no LCENS para ensaio com corrente contínua de 10A.....	111
Figura 7.5: Correntes e tensão no LCENS para ensaio com corrente contínua de 30A.....	112
Figura 7.6: Correntes e tensão no LCENS para ensaio com corrente contínua de 50A.....	113
Figura 7.7: Correntes e tensão no LCENS para ensaio com corrente contínua de 70A.....	114
Figura 7.8: Comparação entre correntes e tensões do circuito de magnetização do LCENS mudando o resistor <i>shunt</i> .....	115
Figura 7.9: Comparação entre correntes limitadas no LCENS variando o resistor <i>shunt</i> .....	116
Figura 7.10: Corrente de curto-circuito monofásico pleno no gerador trifásico de 96kVA/380V .....	117
Figura 7.11: Comparação entre corrente prospectiva de 1600A e corrente limitada no LCENS .....	118
Figura 7.12: Detalhe do primeiro pico das correntes limitadas com diferentes correntes de magnetização para corrente prospectiva de falta de 1600A. ....	118
Figura 7.13: Queda de tensão no LCENS sob diversas condições de carga .....	121

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Principais materiais supercondutores do tipo II com seus valores de temperatura crítica e campo magnético crítico .....	23
Tabela 2.2: Características das fitas HTS de YBCO .....	27
Tabela 3.1: Valores de R/I para temperaturas próximas a $T_c$ e a 300K.....	40
Tabela 3.2: Resultados dos testes do LCESR à 220 V eficazes .....	45
Tabela 3.3: Falhas aplicadas no limitador de correntes elétricas .....	47
Tabela 4.1: Resultados das simulações do núcleo de ferro magnético.....	66
Tabela 6.1: Resistência do enrolamento de corrente alternada do LCENS .....	100
Tabela 7.1: Comparação entre fatores de limitação do LCENS obtidos com 70 espiras no enrolamento de corrente alternada.....	119
Tabela 7.2: Impedância aparente do LCENS sob várias condições de carga.....	122

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
2. Supercondutividade e Materiais Supercondutores .....	19
2.1 Supercondutores de altas temperaturas críticas - HTS .....	23
3. Limitadores de correntes elétricas .....	30
3.1 Limitadores de correntes elétricas convencionais .....	31
3.2 Limitadores de correntes elétricas supercondutores .....	36
3.2.1 Limitador de correntes elétricas supercondutor do tipo resistivo.....	37
3.2.2 Limitador de correntes elétricas supercondutor do tipo híbrido.....	47
3.2.3 Limitador de correntes elétricas supercondutor indutivo .....	49
3.2.4 Limitador de correntes elétricas supercondutor com núcleo blindado .....	51
3.2.5 Limitador de correntes elétricas supercondutor com núcleo saturado .....	52
4. Projeto de limitadores de correntes elétricas com núcleo magnético saturado usando técnicas de elementos finitos .....	60
4.1 Desenvolvimento da topologia do limitador de correntes elétricas com núcleo magnético saturado usando o aplicativo Maxwell.....	60
4.2 Simulações dinâmicas do LCENS .....	64
4.3 Simulação do LCENS com circuito de proteção .....	76
5. Desenvolvimento de um circuito eletrônico para detecção de falta e acionamento de proteção do LCENS.....	81
5.1 Funcionamento do circuito de detecção de falta .....	82
5.2 Detalhamento dos estágios .....	82
5.2.1 Estágio de leitura de corrente e comparação de sinais: .....	83
5.2.2 Estágio temporizador e identificação de falta: .....	84
5.2.3 Estágio de travamento do sinal e sinalização de curto-circuito.....	86
5.2.4 Acionamento do IGBT .....	87
5.3 Simulação do circuito de controle .....	88
6. Montagem e instrumentação do limitador de correntes elétricas de núcleo magnético saturado.....	95
6.1 Montagem do núcleo do LCENS .....	95
6.2 Caracterização núcleo do LCENS .....	98
6.3 Circuito de detecção de faltas .....	102
6.4 Montagem e instrumentação para ensaios do LCENS .....	103

7.	Ensaio do limitador de correntes elétricas com núcleo magnético saturado.....	107
7.1	Ensaio de detecção de falta e de corrente de descarga do LCENS .....	107
7.1.1	Análise do tempo de resposta do circuito de detecção de curto-circuito.....	107
7.2	Análise da variação da corrente contínua no circuito de magnetização do LCENS. ...	110
7.3	Ensaio de curto-circuito no LCENS.....	116
7.4	Queda de tensão nos terminais do LCENS.....	120
8.	Conclusões e trabalhos futuros .....	123
	REFERÊNCIAS .....	126
	ANEXO I.....	130

# 1. INTRODUÇÃO

O constante avanço tecnológico produz inúmeros benefícios à vida da civilização moderna. Várias tarefas diárias, que antigamente levavam muito tempo para serem concluídas, podem ser realizadas hoje com um simples toque na tela de um dispositivo portátil. A quantidade de eletrodomésticos nas residências de hoje tem aumentado consideravelmente, facilitando a vida das pessoas. A automação em todos os ramos de atividades humanas tem tornado os meios de produção mais eficientes. Tudo isto, somado ao crescimento populacional, leva o homem a cada dia que passa a consumir uma quantidade maior de energia, principalmente a de elétrica.

No Brasil, entre os anos de 2010 a 2014 a capacidade de energia elétrica instalada aumentou de 113,3GW para 133,9GW, isto representa um acréscimo de 20,6GW para atender ao aumento de demanda de 464,7GWh para 531,06GWh neste mesmo período [1]. Com a expansão dos sistemas de energia elétrica os engenheiros têm se deparado com um problema clássico, que é o da elevação dos níveis das correntes elétricas de curto-circuito. Muitas vezes é necessário aumentar a potência de transformadores o que causa elevação da corrente de curto-circuito exigindo a troca de barramentos, disjuntores, chaves, condutores e outros componentes existentes que se tornam subdimensionados.

Outra solução, em geral mais cara, é a de divisão de um circuito em dois ou mais. Outras causas de aumento da corrente de falta que podem ser citadas e que acarretam custos adicionais no sistema elétrico são as seguintes: a) ligação de geração de energia elétrica (cogeração e geração distribuída) no sistema de transmissão ou de distribuição, tanto na alta como na baixa tensão, b) aumento rápido e considerável de carga de consumidores industriais, c) consumidores que requerem alimentações paralelas para aumentar a confiabilidade de seu sistema elétrico, mas que aumentam as correntes de falta.

Nesses casos uma falta, como um curto-circuito, pode fazer passar pelo disjuntor uma corrente superior à sua capacidade de interrupção para curto-circuito, destruindo-o através de um arco voltaico que se forma entre seus terminais impedindo a sua função básica de interromper a passagem da corrente elétrica [2].

Os limitadores de corrente elétrica (LCE) são equipamentos que tem a função de evitar que um curto-circuito de magnitude elevada danifique os equipamentos do circuito em que se encontra instalado. Sua ação consiste em limitar o valor da corrente da falta, por um curtíssimo intervalo de tempo, a um nível que o disjuntor existente consiga atuar com

segurança, interrompendo a corrente de falta sem se danificar. Com isto, circuitos que já estão no limite de sua capacidade de operação do disjuntor existente no mercado, podem continuar atuando.

Algumas características desejáveis nos limitadores de correntes elétricas são: (a) apresentam impedância baixa ou nula vista pela rede elétrica em regime permanente ou em operação normal do circuito, (b) apresentar alta impedância no momento em que ocorre o curto-circuito, (c) transição muito rápida (quase instantânea) de impedância quando passa do modo normal para o modo limitador e rápida recuperação após a ocorrência da falta, (d) alta confiabilidade para longos períodos de funcionamento, (e) volume reduzido e facilidade de instalação, (e) baixo custo de produção, operação e manutenção.

Os LCE podem ser classificados em duas categorias principais: uma delas, que já está disponível no mercado e já tem uma boa experiência de uso, é a dos limitadores de corrente elétrica convencionais como: o reator de núcleo de ar e os dispositivos pirotécnicos. Os LCE não convencionais, ou seja, os limitadores de correntes elétricas que utilizam material supercondutor em seu funcionamento ainda se encontram em fase de desenvolvimento, necessitando de melhorias na tecnologia de projeto e na tecnologia de produção que os tornem exequíveis para serem industrializados e vendidos a preços adequados, visando a utilização em larga escala.

Estes limitadores devem recuperar a sua capacidade de operação em alguns segundos, podendo funcionar tão bem quanto da primeira falta para faltas subsequentes, coisa que não acontece com os limitadores de correntes elétricas eletromagnéticos (reatores de núcleo de ar) ou os com os fusíveis limitadores existentes atualmente no mercado.

Existem diversos tipos de limitadores de correntes elétricas que utilizam materiais supercondutores. Os mais desenvolvidos são baseados nas ações resistiva e indutiva. Na ação resistiva o limitador de corrente elétrica supercondutor introduz, instantaneamente, e em série com o disjuntor, uma resistência elétrica suficiente para limitar a corrente de falta a um valor adequado para que o disjuntor atue. Na ação indutiva uma reatância indutiva é introduzida no circuito elétrico, geralmente associada a um circuito magnético, ou mesmo transformadores utilizando fitas supercondutoras com função também de limitar a corrente de falta no enrolamento secundário.

Este trabalho se destina a estudar, simular a operação, projetar e construir um limitador de correntes elétricas com núcleo magnético saturado (LCENS) com bobina de corrente contínua de cobre, através de simulações realizadas com um aplicativo computacional que utiliza o método de elementos finitos. O desenvolvimento de um circuito

eletrônico de proteção, que é fundamental para o funcionamento satisfatório desse tipo de limitador, será mostrado. Serão também apresentados os diversos tipos de limitadores de corrente elétrica supercondutores em desenvolvimento no exterior e no Brasil.

Esta tese está dividida em sete (7) capítulos. No capítulo 2 apresenta-se um resumo sobre materiais supercondutores e suas principais características, assim como as principais fitas supercondutoras existentes no mercado e suas aplicações em limitadores de correntes elétricas. No capítulo 3 são apresentados os principais tipos de LCE existentes e em desenvolvimento no Brasil e no mundo, assim como suas características construtivas e funcionamento. No capítulo 4 apresenta-se o projeto de um limitador de correntes elétricas com núcleo magnético saturado usando técnicas de elementos finitos. No capítulo 5 a metodologia utilizada para o desenvolvimento do circuito eletrônico de detecção de falta e acionamento de proteção, que é fundamental para que o LCENS funcione satisfatoriamente, será apresentada. O capítulo 6 mostra as etapas de montagem do LCENS e do circuito de detecção de falta e o capítulo 7 mostra os resultados obtidos através de ensaios de curto-circuito e regime permanente realizados com o LCENS.

O limitador de corrente elétrica, construído neste trabalho, tem a bobina que gera o campo magnético responsável pela saturação do núcleo magnético construída com condutor de cobre. Se esta bobina fosse construída com material supercondutor, devido à capacidade de conduzir alta densidade de corrente das fitas supercondutoras e resistência praticamente nula, o limitador de corrente elétrica apresentaria baixo consumo de energia elétrica na criação do campo magnético, assim como suas dimensões mecânicas seriam reduzidas, principalmente quando o limitador de correntes elétricas fosse projetado para grandes potências. Normalmente estes dispositivos supercondutores são projetados para operação em banho de nitrogênio líquido.

O trabalho descreve as etapas para projetar, construir e testar este tipo de limitador de corrente elétrica que é, salvo melhor juízo, o primeiro projetado, construído e testado na América do Sul.

Nesta pesquisa foram publicados os seguintes trabalhos científicos:

a) FAJONI, F. et al.: Study of Superconducting Fault Current Limiter Using Saturated Magnetic Core. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, vol. 28, n. 2, p 685–690, Nov 2014. doi: 10.1007/s10948-014-2871-y

b) FAJONI, F. et al.: Limitadores de corrente elétrica utilizando materiais supercondutores. In: XXII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – XXII SNPTEE, 2013, Brasília.

## 2. Supercondutividade e Materiais Supercondutores

A supercondutividade foi observada pela primeira vez no ano de 1911 pelo físico Heike Kameling Onnes, que três anos após pesquisas de liquefação do gás hélio, ao fazer experiências sobre propriedades elétricas de alguns metais, observou que, quando o mercúrio era submetido a temperaturas muito baixas, a sua resistência elétrica diminuía abruptamente, descobrindo um novo estado da matéria onde os materiais apresentam resistividade elétrica nula, denominada supercondutividade.

Após alguns anos de estudos, os cientistas Walther Hans Meissner e Robert Ochsenfeld descobriram que alguns materiais, quando estivessem no estado supercondutor e submetidos a um campo magnético fraco, se comportavam como um material diamagnético perfeito, expulsando todas as linhas de campo magnético de seu interior.

Após o avanço dos estudos, descobriu-se também que a supercondutividade desaparecia com a mudança de certas propriedades do material, sendo elas, além da temperatura, a intensidade do campo magnético ao qual o supercondutor fosse submetido e a densidade de corrente que o atravessasse, determinando então as propriedades intrínsecas que são: temperatura crítica  $T_c$  e campo magnético crítico  $B_c$  e a extrínseca que é a densidade de corrente crítica  $J_c$ , que caracterizam o material supercondutor.

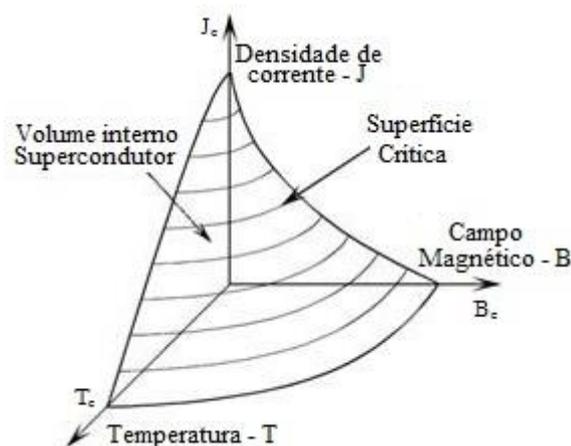
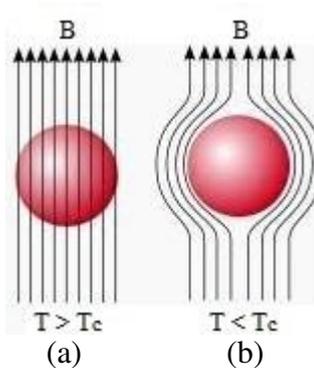


Figura 2.1: Superfície crítica característica de um material supercondutor [3]

Essas grandezas se relacionam entre si através de uma superfície no espaço, como uma função  $f(B_c, J_c, T_c)$ , característica do material, de tal forma que, dentro do volume

limitado pelos planos formados por cada par de eixos e a superfície da  $f(B_c, J_c, T_c)$ , ocorre o fenômeno da supercondutividade, tendo o material uma resistividade nula quando submetido à corrente contínua enquanto que, fora deste volume, o material apresenta característica de um condutor normal com resistividade finita (Figura 2.1) [3]

Os materiais supercondutores, além de possuírem a propriedade de apresentar resistência elétrica nula e não apresentarem perdas, quando submetidos à uma corrente contínua, como dito anteriormente, têm outras propriedades, como o efeito *Meissner*, que é a exclusão total das linhas de campo magnético de seu interior quando se encontra no estado supercondutor. Isto ocorre porque quando o material se encontra no estado supercondutor na presença de um campo magnético externo que seja mais fraco do que o seu campo magnético crítico, ele apresenta correntes elétricas em sua superfície, que anulam o campo magnético em seu interior.



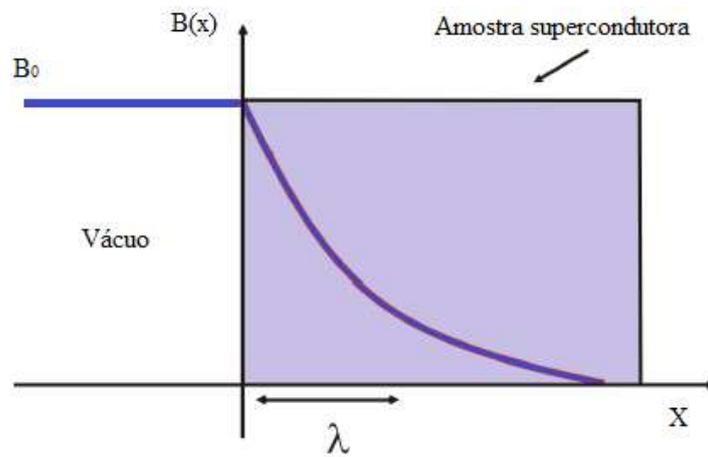
**Figura 2.2: Efeito do campo magnético aplicado sobre um supercondutor [3]**

Na figura 2.2 pode-se observar o efeito do campo magnético aplicado sobre um material supercondutor. Na figura 2.2 (a) o material supercondutor encontra-se no estado normal, com temperatura maior do que a temperatura crítica. Na figura 2.2 (b), o material se encontra com temperatura menor do que a crítica, exibindo estado supercondutor e então não permitindo indução magnética em seu interior.

Como visto, quando o material supercondutor for submetido a um campo magnético externo, correntes superficiais surgem para anular este campo magnético. Na realidade, essas correntes circulam dentro de uma camada muito fina da superfície do material supercondutor de cerca de 100nm de profundidade. O campo magnético  $B$  diminui exponencialmente desde o seu valor no exterior do material até zero, alcançando uma pequena profundidade no interior da amostra de supercondutor a ele submetida. Essa profundidade de penetração é definida pela expressão (2.1) [4].

$$\lambda = \frac{\int_0^{\infty} B(x) dx}{B_0} \quad (2.1)$$

A variação do campo magnético  $B$  no espaço pode ser observada na figura 2.3, onde  $B_0$  é o campo magnético no vácuo e  $\lambda$  é a profundidade de penetração. O supercondutor está à direita da figura e o campo magnético varia em função da distância  $x$ , onde o ponto onde  $x = 0$  é a superfície da amostra supercondutora.



**Figura 2.3:** Variação do campo magnético  $B$  no interior da amostra de supercondutor [4]

Os supercondutores podem ser classificados como materiais supercondutores do tipo I e do tipo II, onde a principal diferença entre eles é que os do tipo I apresentam dois estados, sendo um estado supercondutor, que expulsa totalmente as linhas de campo magnético de seu interior (efeito *Meissner*) e o estado normal, que permite totalmente a passagem de linhas de campo por seu interior. Os materiais do tipo II apresentam 3 estados: supercondutor, misto e normal. No estado misto, a amostra permite a penetração parcial do campo magnético em seu interior. Na figura 2.4 observa-se o gráfico dos campos críticos em função da temperatura para supercondutores do tipo I e do tipo II.

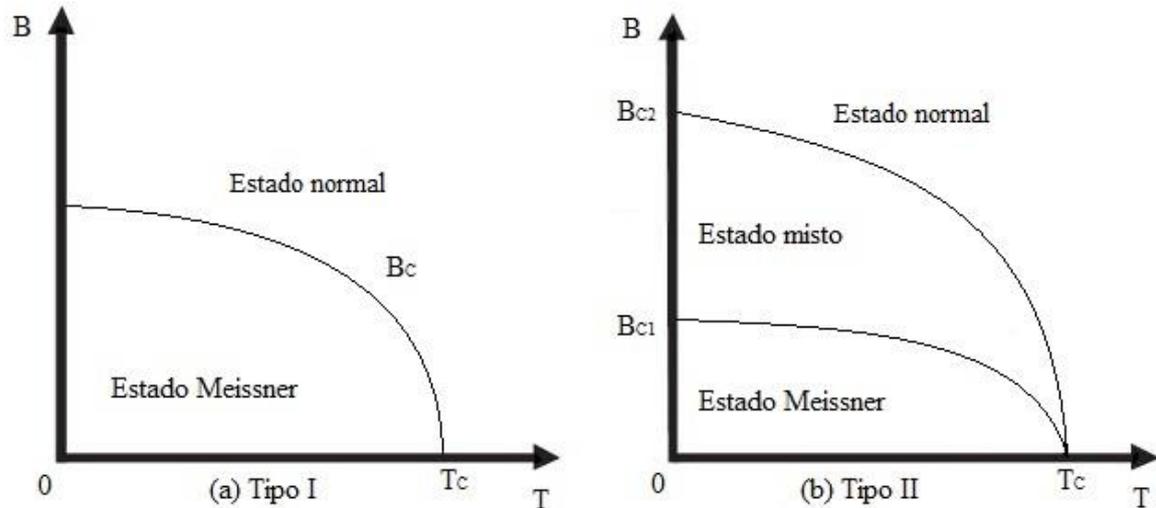


Figura 2.4: Campos críticos dos supercondutores tipo I e tipo II em função da temperatura

Quando o material supercondutor se encontra no estado misto, a sua estrutura permite que o campo magnético se estabeleça em seu interior, formando regiões em formato tubular de material normal, denominadas vórtices. Cada vórtice tem ao seu redor uma supercorrente que aprisiona o campo magnético formando uma blindagem da região supercondutora. Através de adição de impurezas é possível fixar os vórtices e impedir os respectivos movimentos, de modo que se obtenha resistência nula no estado misto supercondutor [3].

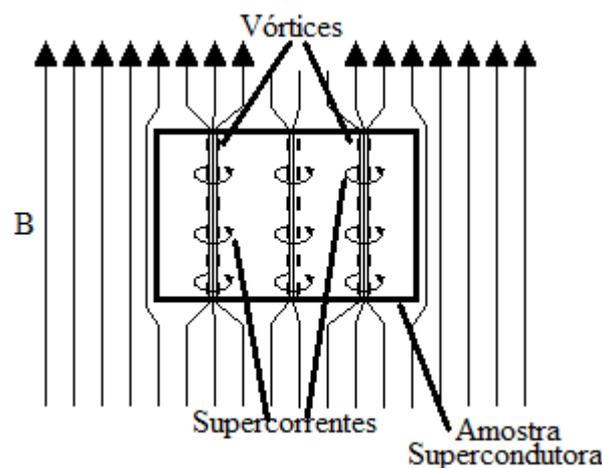


Figura 2.5: Aprisionamento de campo magnético nos vórtices de amostra de material supercondutor [5]

Os supercondutores tipo II permitiram aplicações reais dessa propriedade, pois os materiais supercondutores do tipo I além de terem temperatura crítica muito baixa, perto de zero absoluto, transitam para o estado normal com campos magnéticos da ordem de alguns mT, enquanto que os principais materiais do tipo II têm temperaturas críticas da ordem de

dezenas de Kelvins e campos magnéticos críticos da ordem de dezenas de Teslas, como pode ser observado na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1: Principais materiais supercondutores do tipo II com seus valores de temperatura crítica e campo magnético crítico**

<b>Supercondutor</b>	<b><math>T_c</math> (K)</b>	<b><math>B_{c2}</math> (T)</b>
Nb <sub>3</sub> Al	18,7	32,4
Nb <sub>3</sub> Sn	18,0	24,5
Nb <sub>3</sub> Ge	23,0	38,0
NbTi	9,3	15,0
Nb <sub>3</sub> (AlGe)	21,0	44,0
V <sub>3</sub> Ga	14,8	20,8

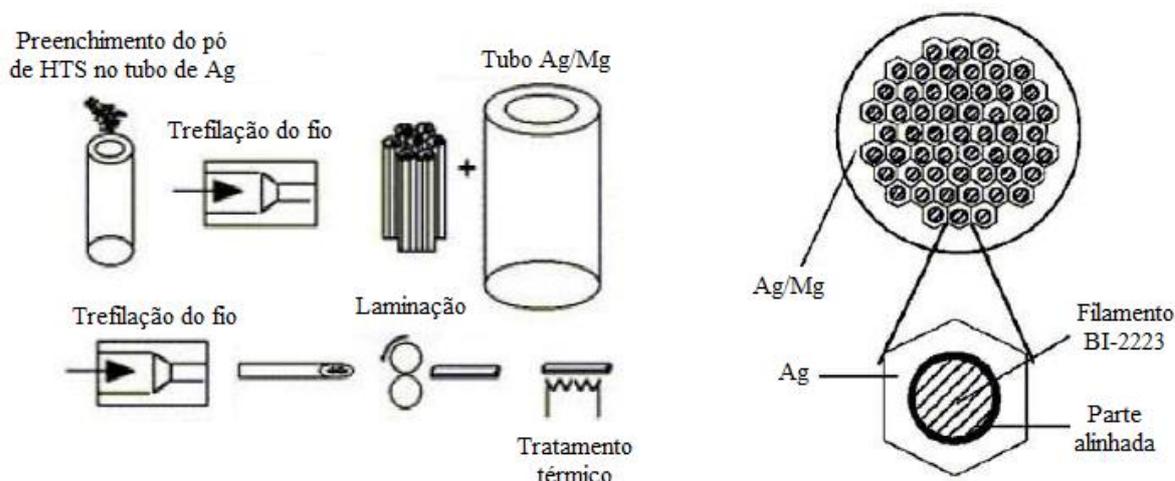
Os fios supercondutores de NbTi e Nb<sub>3</sub>Sn operando na temperatura de 4,2 K, apresentam densidade de corrente crítica em campo nulo de  $J_{c(B=0)}=10\text{kA/mm}^2$  e  $J_{c(B=0)}=20\text{kA/mm}^2$ , respectivamente. Para campos magnéticos externos a densidade de corrente tem seus valores reduzidos para: NbTi –  $J_{c(3T)}=1,8\text{kA/mm}^2$ ;  $J_{c(5T)}=0,88\text{kA/mm}^2$ ;  $J_{c(7T)}=0,74\text{kA/mm}^2$  e  $J_{c(9T)}=230\text{A/mm}^2$ . Para fios de Nb<sub>3</sub>Sn -  $J_{c(7T)}=0,95\text{kA/mm}^2$ ;  $J_{c(9T)}=0,64\text{kA/mm}^2$  e  $J_{c(11T)}=307\text{A/mm}^2$  [5].

Esta alta densidade de corrente dos fios supercondutores viabilizaram a geração de campos magnéticos intensos em grandes volumes que permitiu a construção de equipamentos médicos de imagem por ressonância magnética de corpo inteiro para campo magnético de 0,5 até 3T. Outras aplicações em pesquisas e caracterização de materiais exigem campos magnéticos de até 20T, em pequenos volumes, que são obtidos através de combinação de bobinas concêntricas de NbTi (até 10T) e Nb<sub>3</sub>Sn (interna).

## 2.1 Supercondutores de altas temperaturas críticas - HTS

Com a descoberta dos materiais supercondutores de alta temperatura crítica em 1986, pelos cientistas Georg Bednorz e Alexander Müller, houve um avanço muito grande nas perspectivas de estudos e aplicação dos supercondutores. Como esses novos materiais são produzidos a partir de compostos à base de óxidos de cobre e possuem temperaturas críticas mais altas (acima de 77K), sendo resfriados em criostatos com nitrogênio líquido, que são mais baratos do que os que utilizam hélio, tornou-se possível a realização de pesquisas científicas em pequenos laboratórios e nas universidades [3].

As fitas supercondutoras de alta temperatura crítica, denominadas fitas HTS, podem ser divididas em dois grupos, as fitas de primeira e de segunda gerações. As de primeira geração possuem uma estrutura multifilamentar, inserida em uma matriz de Ag/AgMg. Essa matriz de prata faz com que, quando a fita supercondutora se encontra em estado normal, apresente uma resistência elétrica muito baixa (70% Ag), limitando sua aplicação aos equipamentos que necessitem de geração de campos magnéticos intensos em grandes volumes como tomógrafos e unidades de imagem por ressonância magnética [6].



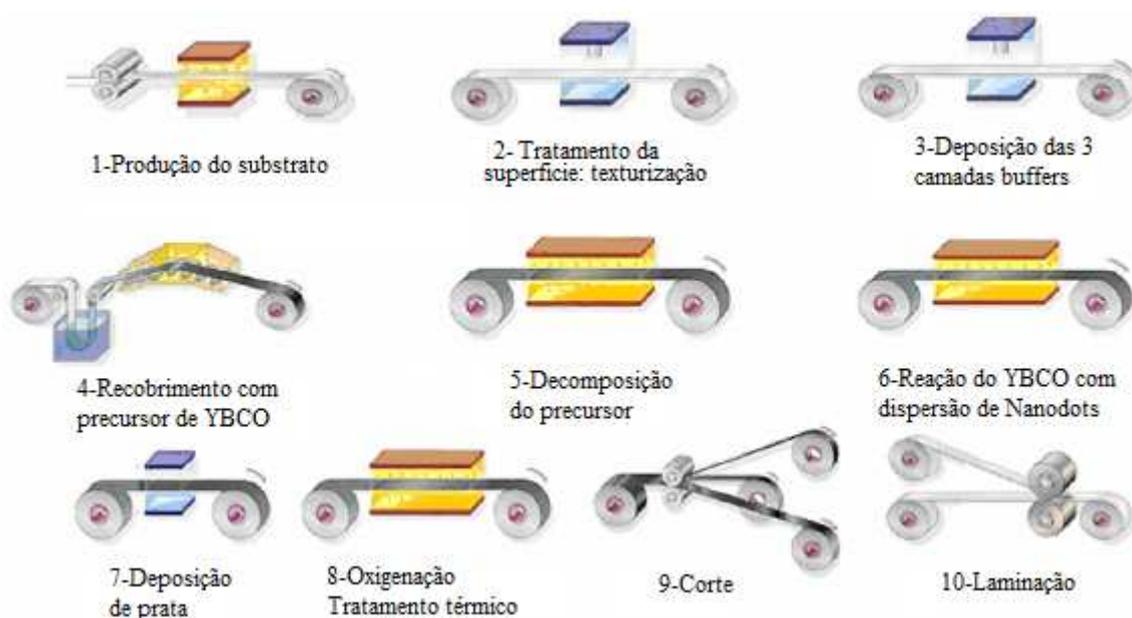
**Figura 2.6:** Processo de fabricação dos fios de BSCCO - BI-2223 de primeira geração (Adaptado de [7])

Os fios supercondutores de primeira geração são produzidos pelo processo PIT (“Powder-in-tube”) que pode ser observado simplificadaamente na figura 2.6. Inicialmente preenche-se uma matriz de Ag de 20mm de diâmetro com pó de material HTS com composição:  $\text{Bi}_{1,8}\text{Pb}_{0,33}\text{Sr}_{1,87}\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+x}$ , passando posteriormente por um vibrador magnético que deixa a mistura mais uniforme e densa. Em seguida esses tubos de Ag, preenchidos com pó HTS, são trefilados e inseridos em tubos de Ag/Mg, onde passam por um processo de laminação, seguido de tratamento térmico de recozimento à  $650^\circ\text{C}$  no vácuo. No lado direito da figura 2.6 é mostrado detalhe da seção transversal do tubo de Ag/Mg com as matrizes de Ag preenchidas com os filamentos alinhados de Bi-2223.

As fitas HTS de Bi-2223 de primeira geração (1G) com temperatura crítica de 110K, foram produzidas em escala industrial no período de 2000 a 2005 porém, devido ao seu elevado custo US\$ 100/kA.m, associado a utilização de matriz de Ag em 70% de seu volume, diversas aplicações foram limitadas pela inviabilidade econômica. Entre suas principais propriedades, operando na temperatura de 77K, destacamos sua alta sensibilidade ao campo magnético na direção perpendicular que reduz a densidade de corrente  $J_{c(0T)}=10\text{kA/mm}^2$  para

$J_{c(0,1T)}=1\text{kA/mm}^2$ , ou seja, inviabilizando sua utilização para  $B>0,5\text{T}$ . Esta dependência é reduzida drasticamente para aplicações em 4,2K quando  $J_{c(13T)}=300\text{A/mm}^2$  [6].

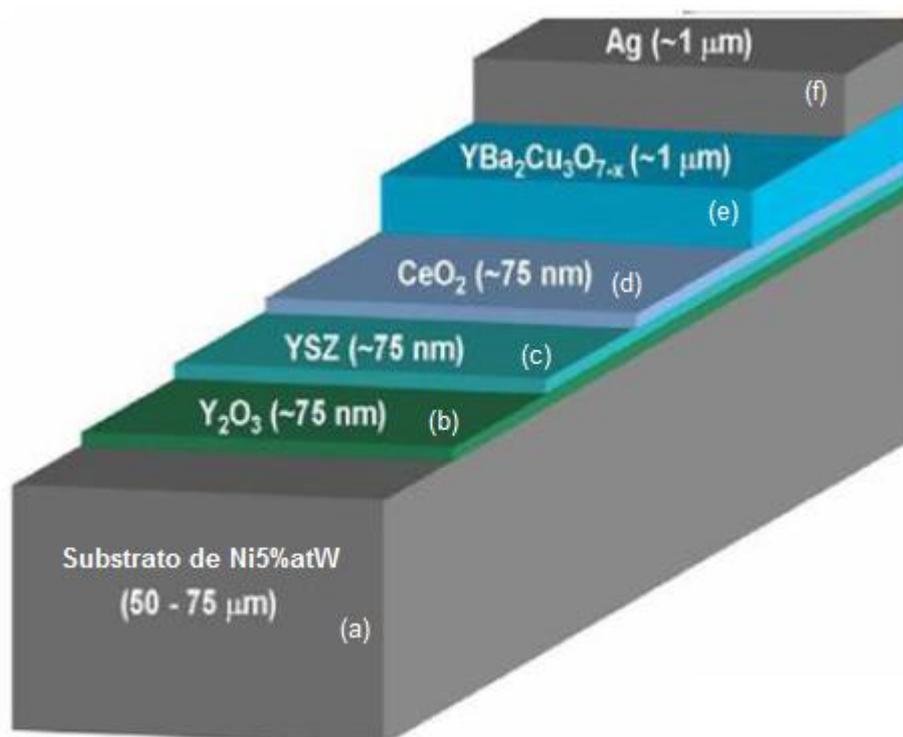
As fitas supercondutoras de segunda geração (2G) utilizam o composto que tem a seguinte composição:  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (YBCO) com temperatura crítica de 95K, conhecida também por Y123. Estas fitas foram desenvolvidas com uma técnica de deposição de camadas orientadas sob um substrato metálico, tendo resistividade muito sensível ao direcionamento do campo magnético ao que é submetido. Entretanto, sua densidade de corrente crítica é limitada, chegando à ordem de  $10^6\text{A/m}^2$  em amostras macroscópicas policristalinas. Pelo fato dessas fitas serem produzidas com compostos cerâmicos, sua resistência mecânica é baixa, tornando-as muito quebradiças.



**Figura 2.7: Processo de fabricação das fitas de YBCO Y-123 de segunda geração (Adaptado de [8])**

Os principais fabricantes de fitas supercondutoras de segunda geração, utilizam um processo de deposição de estruturas de camadas orientadas sob um substrato metálico que permite a fabricação de fitas com longos comprimentos reduzindo os custos de produção em larga escala. Este processo de fabricação se chama “MOD/RABiTS” (Metal Organic Deposition / Rolling-Assisted Biaxially Textured Substrates) ilustrado na figura 2.7 onde pode-se observar um resumo das etapas de produção da fita de YBCO através desse processo.

Ao final do processo de fabricação, a fita supercondutora YBCO fica com as características e arquitetura mostrada na figura 2.8, onde se pode observar, em uma ilustração fora de escala, a estrutura de suas camadas, característica de fitas supercondutoras HTS de segunda geração.



**Figura 2.8: Estrutura de camadas de fitas de YBCO (Adaptado de [8])**

As funções de cada camada são: (a) O substrato de Ni5%atW é uma fita de liga metálica com orientação cristalográfica preferencial e fornece base para a formação de alta ordenação no recobrimento do material supercondutor. A superfície do substrato é texturizada com enxofre, para que a deposição das camadas “buffers” sobre o substrato tenham alta qualidade. (b) Camada de óxido de Ítrio ( $Y_2O_3$ ), que tem a finalidade de transferir a textura do substrato para a camada do supercondutor. (c) Camada de YSZ (íttria estabilizada com zircônio) que serve como barreira, evitando contaminação dos metais do substrato no supercondutor YBCO. (d) Camada de cério:  $CeO_2$ , que tem a função de formar uma camada orientada para receber a camada de YBCO de alto desempenho, por ter compatibilidade química e estrutural para a formação de YBCO. (e) Camada principal de supercondutor YBCO recoberto com nanopontos de outros componentes como  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ ,  $Y_2O_3$  e  $Y_2Cu_2O_5$ , que formam vórtices no YBCO para melhorar a capacidade de transporte de corrente no supercondutor. (f) A camada de material supercondutor é coberta com uma fina camada de prata (Ag), denominada *caplayer*, que fornece baixa resistividade de contato elétrico, possibilita a permeação e combinação do oxigênio durante o tratamento térmico ( $780^\circ C$ ) para formação do composto supercondutor (passo 8 – figura 2.7) e protege o supercondutor durante o tratamento térmico do ambiente externo

As principais características e dimensões de materiais HTS de YBCO, disponíveis no mercado hoje, podem ser observadas na tabela 2.2

**Tabela 2.2: Características das fitas HTS de YBCO [9] e [10]**

Fabricante	AMSC*					SuperPower**			
	Cu35%Zn	Cobre		Aço inoxidável		Sem estab.		Cobre	
<b>Estabilizador</b>									
<b>Espessura (mm)</b>	0,40	0,19	0,20	0,25	0,33	0,055	0,105	0,10	0,10
<b>Largura (mm)</b>	4,5	4,8	12	12	12	4	12	4	12
<b>Ic (A)</b>	70-100	80-100	250-300	200-250	400-500	100	300	100	300
<b>Densidade de corrente (A/cm<sup>2</sup>)x10<sup>3</sup></b>	3,8-5,5	8,7-10,9	10,3-12,3	6,6-8,2	10,1-12,7	45,4	23,8	25,0	25,0

\* Substrato Ni5%atW

\*\* Substrato Hastelloy C-276 (Ni16%Mo15%Cr)

Quando em estado normal, o valor da resistência elétrica das fitas HTS de segunda geração é dada pela resistência elétrica de suas camadas metálicas, que são o substrato e a camada de estabilização. Ao ser percorrido por uma corrente elétrica, estando a fita HTS em estado normal, aparece um campo elétrico ao longo desta fita que, dependendo de sua intensidade e do tempo em que a fita fica submetida à passagem de corrente no estado normal, pode haver degradação do material supercondutor por efeito Joule, que pode levar à fusão das camadas internas.

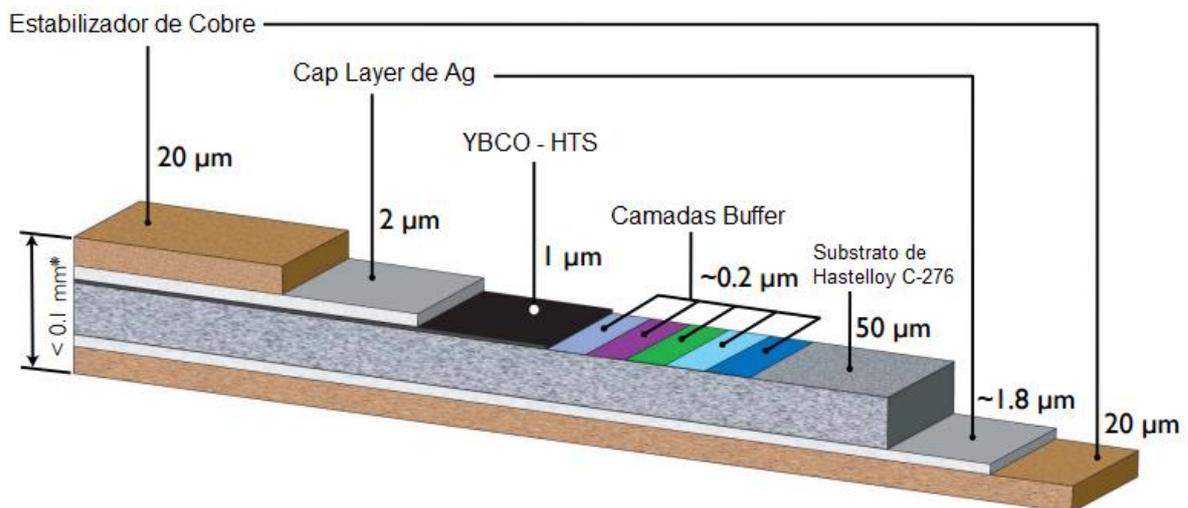
As fitas supercondutoras são caracterizadas eletricamente através de ensaios em corrente contínua para obtenção da curva  $V \times I$ , através da equação 2.2, que permite determinar o expoente  $n$  ( $n$ -index), com valores típicos  $n=30$  para fitas 2G, utilizando o critério de  $1\mu\text{V/cm}$  para definir o estado supercondutor.

$$E = E_0 \left( \frac{I}{I_c} \right)^n \quad (2.2)$$

Onde  $E_0 = 1\mu\text{V/cm}$ ,  $I_c$  é a corrente crítica,  $I$  é a corrente aplicada e  $n$  é o expoente ( $n$ -index).

O valor máximo do campo elétrico dependerá do tempo de aplicação da corrente, de sua intensidade e das condições de refrigeração da fita HTS, ou seja, da área em contato direto com o líquido refrigerante. Estes ensaios geralmente são realizados em corrente alternada relacionando o valor máximo (CC) com o valor eficaz (CA).

O valor do campo elétrico máximo utilizado no projeto de limitador de corrente elétricas resistivo estão entre 40 a 50V/m para um tempo de limitação entre 80 a 100ms [11] e [12], sendo que, se o tempo de atuação do limitador de correntes elétricas for reduzido para 20ms, o campo elétrico poderá atingir até 100V/m. Esta é uma importante propriedade para aplicação dos materiais supercondutores em limitadores de correntes elétricas alternada, pois determina o comprimento mínimo de fita supercondutora de YBCO necessária para cada classe de tensão, sendo que o número de fitas supercondutoras em paralelo será determinada pela corrente nominal no dispositivo, utilizando o critério de 60 a 80% da  $I_c$ , ou seja,  $I_n \cong 0,6 \cdot I_c / \sqrt{2}$ .



**Figura 2.9:** Estrutura de camadas de fitas de YBCO com dupla camada estabilizadora (adaptado de [10])

Na figura 2.9 mostra-se a estrutura de uma outra fita supercondutora produzida pela empresa SuperPower. Essa estrutura possui dupla camada estabilizadora de Cu, que faz com que, no momento da transição, boa parte da corrente passe pela camada de cobre ao invés de ir para o substrato, melhorando seu desempenho em relação à degradação do material supercondutor especialmente para aplicação na geração de campo magnético intenso.

Devido as suas características, os materiais supercondutores apresentam desempenho adequado para uso e desenvolvimento de limitadores de correntes elétricas alternadas, com camadas estabilizadoras de alta resistividade. Algumas fitas HTS de segunda geração, sendo elas sem camada estabilizadora ou com aço inox, são utilizadas em protótipos de limitadores de corrente elétrica resistivos, pois, quando ocorre uma falta, com a transição do material supercondutor para o estado normal, é desejável a inserção de uma resistência elétrica no circuito cuja corrente elétrica deve ser limitada.

As fitas supercondutoras com estabilizador em cobre, quando estão em seu estado normal, apresentam baixa resistência elétrica, não sendo aplicadas em limitadores de correntes elétricas que utilizem sua transição de estado para inserção de impedância no circuito, porém, tem aplicação em geração de campos magnéticos intensos, permitindo sua utilização em outros tipos de limitadores que utilizem efeitos magnéticos para inserção de impedância na ocasião de um curto-circuito.

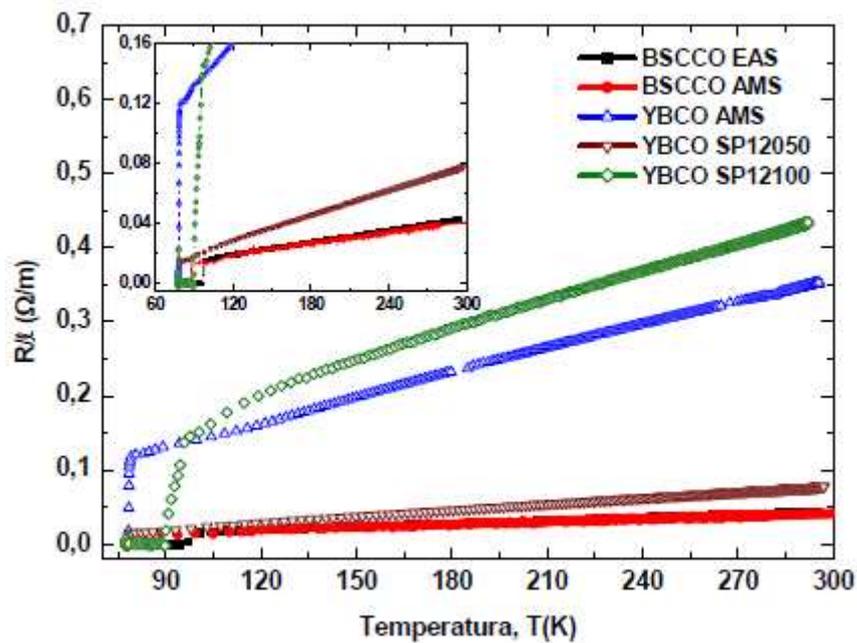


Figura 2.10: Curvas de resistência equivalente para fitas de 1G e 2G [6]

Na figura 2.10 são apresentadas as respectivas curvas de resistência equivalente ( $\Omega/m$ ) para fitas de 1G e 2G com camadas estabilizadoras de cobre, aço inoxidável e Ag [6].

No capítulo seguinte serão apresentados e discutidos os vários tipos de limitadores de correntes elétricas, inclusive os limitadores que utilizam fitas HTS de 2G.

### 3. Limitadores de correntes elétricas

O setor elétrico tem se deparado com alguns problemas devido à expansão dos sistemas de energia elétrica. Um deles é a elevação dos níveis das correntes elétricas de curto-circuito. Ao se substituir os transformadores por outros de maior potência, é necessário substituir-se equipamentos como barramentos, disjuntores, chaves, condutores e outros equipamentos que se tornam subdimensionados.

Dentre esses equipamentos, o que sofre maior dano com o aumento do nível de curto-circuito é o disjuntor. Durante a ocorrência de uma falta, como um curto-circuito, pode passar pelo disjuntor uma corrente superior à sua capacidade de interrupção destruindo-o, através de um arco voltaico que se forma entre seus terminais impedindo a sua função básica de interromper a passagem da corrente elétrica ocasionando danos a outros equipamentos.

Uma solução para este problema é o uso de limitadores de correntes elétricas, que operam de maneira a diminuir a corrente de curto-circuito por um curto intervalo de tempo, possibilitando a atuação correta do disjuntor.

Os limitadores de corrente elétrica são dispositivos utilizados para reduzir rapidamente a corrente elétrica que circula em uma rede elétrica durante a ocorrência de uma falta ou curto-circuito, de tal modo que o disjuntor do circuito consiga abrir para proteger o circuito.

Eles o fazem introduzindo uma impedância em série com o circuito, ficando a corrente elétrica reduzida a níveis considerados aceitáveis para os disjuntores existentes atuarem sem se danificarem no momento da ocorrência dessa falta. Com isto, pode-se eliminar ou postergar investimentos maiores, no caso de redes elétricas submetidas à expansão de carga. Eles podem também ser usados na estabilização de sistemas de energia elétrica quando submetidos a curtos-circuitos, aberturas de linhas e outros fenômenos transitórios.

Podem ser utilizados em diferentes pontos do sistema de energia elétrica, como em: geradores, linhas de transmissão, linhas de distribuição de energia elétrica, subestações, conexões entre redes, conexões entre barramentos, saídas de barramentos, alimentadores de transformadores, saídas de barramentos que conectam o sistema elétrico com geradores distribuídos e, também, no fechamento de anéis de redes de distribuição [2].

Vários tipos de limitadores de corrente elétrica têm sido propostos. Alguns são denominados limitadores de corrente elétrica convencionais e são assim denominados por

limitarem a corrente pela atuação de componentes passivos como indutores, capacitores e resistores ou mesmo por fusíveis combinados com chaves de alta capacidade de corrente e limitadores por circuitos baseados em dispositivos de eletrônica de potência. Os maiores problemas dos limitadores convencionais é a demora para a sua atuação e o longo tempo de recuperação após a ocorrência da limitação da corrente elétrica [13].

Os limitadores de corrente elétrica que utilizam materiais supercondutores apresentam recuperação praticamente instantânea, após a ocorrência da falta, ficando prontos para atuarem novamente em falta subsequente.

Com a sua utilização nos sistemas de energia elétrica espera-se que algumas importantes vantagens sejam obtidas em relação aos dispositivos convencionais de limitação de corrente (não supercondutores), destacando-se as seguintes: rápida atuação na limitação de corrente elétrica, baixa impedância introduzida no sistema elétrico durante a operação normal, baixa dispersão e indução magnética, peso e volume reduzidos, rápida recuperação operacional após uma falta e baixas perdas em regime permanente.

Eles permitem também múltipla reutilização, eliminando a necessidade de substituições de partes caras após cada ocorrência de falta reduzindo nos custos de ampliação de redes de energia elétrica com a postergação de investimentos a serem realizados [13] e [14].

### **3.1 Limitadores de correntes elétricas convencionais**

Os limitadores de correntes elétricas convencionais são assim denominados por serem dispositivos que atuam passivamente diante de efeitos causados por curtos-circuitos. Há uma razoável experiência de uso desses limitadores de correntes elétricas nos sistemas de energia elétrica.

Desses dispositivos, os mais conhecidos e utilizados são o reator de núcleo de ar e os dispositivos pirotécnicos.

O reator de núcleo de ar é o dispositivo mais simples e de menor custo para limitação de correntes de curto-circuito existente no mercado, porém, insere perdas constantes no sistema elétrico, produz queda de tensão, exige banco de capacitores para correção do fator de potência em regime permanente. Além disto, depois de sua atuação, demora um tempo longo para se recuperar, ou seja, para esfriarem [13].

Eles apresentam enrolamentos de cobre ou de alumínio, formando bobinas revestidas por material isolante montadas em suportes isolantes. O núcleo é de ar, pelo fato de ter de manter uma indutância constante, evitando efeito de saturação por mais que a corrente de falta se eleve. Entre as bobinas dos condutores são colocados espaçadores com a função de isolamento e sustentação mecânica, desde que permita a circulação de ar para facilitar a refrigeração dos condutores. Para os casos em que o regime de carga é variável e as sobrecargas se repetem com frequência, usa-se ventilação forçada ou refrigeração a óleo para evitar elevações altas da temperatura do reator.

Apesar de sua simplicidade, o reator de núcleo de ar apresenta algumas particularidades. Como ele permanece constantemente inserido na rede elétrica, introduz uma impedância série permanente no circuito, ocasionando perdas durante operação normal e interferindo na regulação de tensão do sistema. É comum que a linha em que ele esteja instalado seja compensada com capacitores devido à inserção da indutância própria dos limitadores em regime permanente.

Apesar da fácil instalação e do baixo custo de manutenção, a instalação do reator de núcleo de ar exige um grande espaço ao seu redor comparado com outros equipamentos instalados nas subestações. A distância entre os eixos dos seus enrolamentos entre fases não deve ser menor que 1,7 vezes o seu diâmetro e a distância para outras superfícies deve ser de no mínimo 1,1 vezes seu diâmetro [15]. Este diâmetro varia de acordo com o nível de tensão do equipamento. Isto acontece porque durante sua operação ele produz um campo magnético muito intenso, inviabilizando a sua instalação em subestações que tenham espaço limitado.

Outra observação a respeito do reator de núcleo de ar é que ele não suporta faltas consecutivas, pois, na ocorrência de uma falta, os seus enrolamentos se aquecem muito e em alguns casos podem demorar até 12 horas para voltarem à temperatura normal de operação.

Para se determinar o valor da reatância necessária ao reator de núcleo de ar são necessários estudos de curto-circuito, fluxo de potência e transitórios eletromagnéticos, levando em consideração o limite de operação dos equipamentos instalados na subestação, os valores das quedas de tensão e perdas introduzidas na rede elétrica pela presença do reator.

Outra análise que deve ser realizada é a do custo da substituição dos equipamentos superados em relação ao nível de corrente de curto-circuito em comparação com o total de perdas que os reatores introduzem no sistema. O custo dessas perdas ao longo dos anos pode inviabilizar a instalação desse equipamento.

O cálculo dos reatores de núcleo de ar é efetuado por fase utilizando as seguintes equações [15]:

$$X_L = 2 \times \pi \times f \times L \quad (3.1)$$

$$X_L = U_n^2 \times \left( \frac{1}{MVA_2} - \frac{1}{MVA_1} \right) \quad (3.2)$$

Reescrevendo em função da corrente elétrica  $I$  tem-se:

$$X_L = \frac{U_n K}{\sqrt{3}} \times \left( \frac{1}{I_{C2}} - \frac{1}{I_{C1}} \right) \quad (3.3)$$

Em (3.3),  $U_n$  é a tensão nominal do sistema [kV],  $L$  é a indutância do reator [H],  $X_L$  é a reatância indutiva do reator para uma frequência específica [ $\Omega$ ],  $MVA_1$  é a potência de curto-circuito antes da inserção do reator,  $MVA_2$  é a potência de curto-circuito depois da inserção do reator,  $I_{C1}$  é a corrente de curto-circuito antes da inserção do reator,  $I_{C2}$  é a corrente de curto-circuito depois da inserção do reator,  $K$  é o fator de sobretensão (1,05 segundo norma da ANSI). Sendo  $I_n$  é a corrente nominal máxima do sistema [A], o cálculo da queda de tensão no reator é dado por:

$$U_R = I_n \times X_L \quad (3.4)$$

$$U_{R(\%)} = \frac{\sqrt{3} \times 100 \times I_n \times X_L}{U_n} \quad (3.5)$$

$U_{R(\%)}$  é a queda de tensão percentual da tensão nominal do sistema. Com isto, pode-se calcular a corrente de curto-circuito máxima do reator para que a impedância da rede elétrica seja desprezível diante da impedância do reator.

$$I_L = \frac{U_n}{\sqrt{3} \times X_L} = \frac{I_n \times 100}{U_{R(\%)}} \quad (3.6)$$

A referência [16] mostra um exemplo de dimensionamento do limitador reator de núcleo de ar para redução de 50% da corrente de curto-circuito em um sistema com tensão

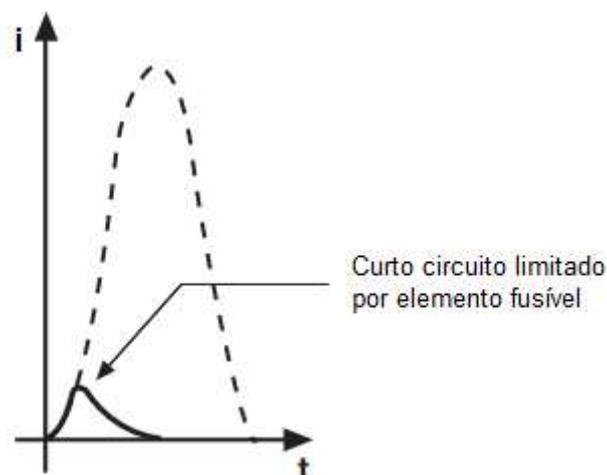
nominal de 13,8kV, nível de curto-circuito de 100MVA, considerando-se que o sistema opera em até 105% de sua tensão nominal.

O valor da impedância série calculada para o sistema sem o reator é de  $2,1\Omega$ . O cálculo da nova condição de limitação de falta, reduzindo-a a 50MVA, apresenta resultado de  $4,2\Omega$ . Sendo assim, a reatância a ser inserida pelo reator será de  $2,1\Omega$ .

Através desse cálculo realizado, pode-se verificar que a corrente de curto-circuito seria reduzida de 4kA para 2kA, adequando o valor reduzido da corrente à capacidade do disjuntor deste circuito.

No Brasil, existem algumas unidades instaladas, dentre as quais pode-se destacar: subestação de Jaguara 138kV (Minas Gerais), subestação de Angra 138kV (Rio de Janeiro), subestação de Mogi das Cruzes 345kV (São Paulo) e subestação de Tucuruí 500kV (Pará) [17].

Os dispositivos pirotécnicos são equipamentos capazes de interromper correntes de curto-circuito elevadas com muita rapidez (cerca de 1/4 de ciclo), através da combinação de cargas explosivas com elementos fusíveis. Outros equipamentos, como por exemplo disjuntores, não conseguem atuar em um tempo tão rápido para interrupção de correntes elevadas em tempos curtos (cerca de 6 ciclos) [13]. Na figura 3.1 mostra-se a curva de atuação do dispositivo pirotécnico.



**Figura 3.1: Curva de limitação de dispositivo pirotécnico (adaptado de [18])**

Apesar desse dispositivo não interferir na impedância do circuito e ter velocidade de atuação alta, ele tem a desvantagem de necessitar de substituição do conjunto elemento explosivo/fusível a cada atuação, deixando o circuito indisponível durante este período.

Porém, pela sua rápida atuação, ele pode evitar que equipamentos sejam danificados na ocorrência de apenas um curto-circuito, sem repetição [13].

Na figura 3.2 observa-se os elementos de um dispositivo pirotécnico produzido pela ABB, constituído pelas seguintes partes: 1) base do dispositivo, 2) isolador, 3) cabeça de polo com dispositivo de fixação, 4) fusível, 5) contato telescópico, 6) isolador com transformador de pulso, 7) indicador do fusível, 8) tubo isolador, 9) ponte explosiva, 10) carga explosiva, 11) indicador do condutor principal, 12) elemento fusível.

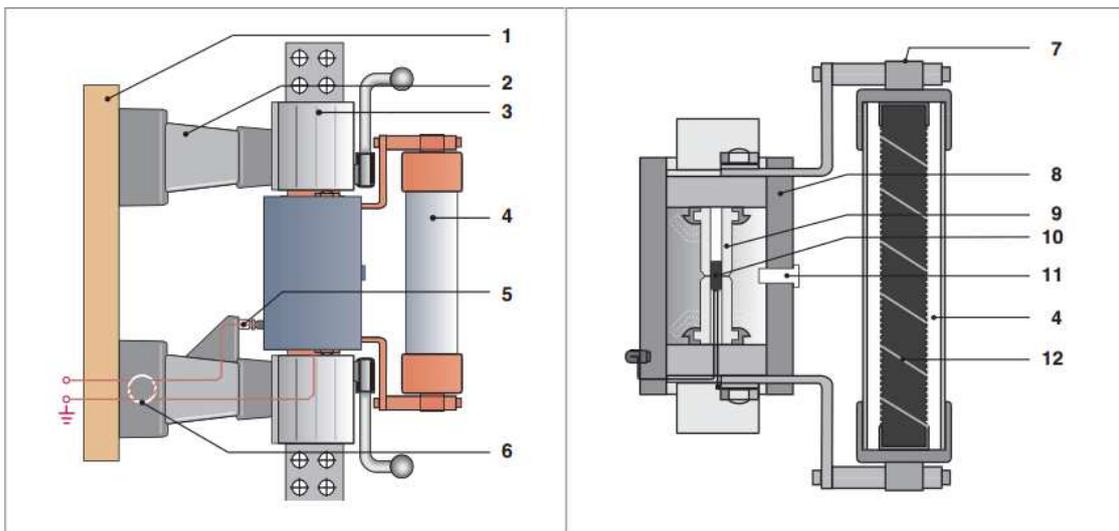


Figura 3.2: Partes do dispositivo pirotécnico ABB (adaptado de [18])

Em condições normais de operação do sistema, a corrente flui através do circuito principal do dispositivo pirotécnico sem sofrer resistência elétrica alguma para o circuito em que está inserido. Quando acontece um curto-circuito, o transformador de pulso ligado a sensores lógicos envia um pulso que detona as cargas explosivas, fazendo com que a ponte explosiva abra o circuito principal e desvie a corrente para o elemento fusível. O elemento fusível, por sua vez, se queima e interrompe a corrente de curto-circuito, eliminando o defeito e protegendo o circuito em questão.

Como já mencionado, uma das desvantagens do dispositivo pirotécnico é a de que o circuito fica indisponível por um período de tempo, devido à necessidade de substituição do elemento fusível e da câmara do circuito principal. Uma maneira de minimizar a interrupção do fornecimento de energia elétrica seria empregar o dispositivo pirotécnico em paralelo com o reator de núcleo de ar, o que amplia os custos e o espaço requerido.

Na ocorrência de um curto-circuito, após a atuação do dispositivo pirotécnico, o reator será inserido no circuito, limitando a corrente de curto-circuito a níveis suportados pelos equipamentos da subestação até que a substituição dos elementos do dispositivo pirotécnico seja realizada. Com isto, evita-se perdas no reator e as quedas de tensão em seus

terminais durante operação normal. Evita-se também, que o circuito fique desligado por um longo período [13].

### **3.2 Limitadores de correntes elétricas supercondutores**

O avanço na tecnologia e o desenvolvimento dos materiais supercondutores de alta temperatura de transição de estado (HTS), permitiu que os limitadores de correntes elétricas supercondutores (LCES) fossem implementados e desenvolvidos.

Embora ainda não existam unidades comerciais no mercado, os limitadores de corrente elétrica supercondutores são ideais para essa atividade, porque, pela ação em alguns poucos milissegundos, permitem que uma impedância seja inserida no circuito elétrico sob falta, limitando a corrente elétrica a um valor adequado para ser interrompida pelo disjuntor correspondente.

Estes limitadores recuperam automaticamente a sua capacidade de posterior operação em alguns segundos, podendo funcionar tão bem para a primeira falta e para faltas consecutivas, o que não acontece com os demais tipos de limitadores de corrente elétrica e fusíveis limitadores.

Existem diversos tipos de limitadores de corrente elétrica utilizando materiais supercondutores. Os mais desenvolvidos são baseados nas ações resistiva e indutiva. Na ação resistiva o limitador de corrente elétrica supercondutor introduz, instantaneamente, em série com o disjuntor uma resistência elétrica suficiente para limitar a corrente de falta a um valor adequado para que o disjuntor atue sem que se danifique.

Na ação indutiva uma reatância indutiva é introduzida no circuito elétrico, geralmente associada a um circuito magnético, ou mesmo transformadores utilizando fitas de material supercondutor com função também de limitar a corrente de falta.

Na área da supercondutividade, um dos principais desafios para que os supercondutores se tornem mais facilmente aplicáveis é o desenvolvimento de novos materiais que tenham temperaturas críticas próximas à temperatura ambiente, pois como visto no capítulo 2, os materiais existentes necessitam ser resfriados à temperatura de 77K (nitrogênio líquido), necessitando de um sistema de criogenia para seu funcionamento satisfatório. Do ponto de vista econômico, a evolução do processo de fabricação da fita supercondutora poderá em breve reduzir o custo destes materiais para valores próximos ao custo do cobre, compensando o investimento demandado na instalação criogênica.

### 3.2.1 Limitador de correntes elétricas supercondutor do tipo resistivo

A característica principal e mais notável do material supercondutor é a de apresentar resistência quase nula enquanto se encontra no estado supercondutor e, ao transitar para o estado normal, sua resistência elétrica aumentar abruptamente. O limitador de correntes elétricas supercondutor resistivo (LCESR) apresenta este princípio de funcionamento e é um dos principais tipos de limitadores de correntes supercondutores em estudo na atualidade, com protótipos construídos e testados em campo [2], [14], [19], [20] e [21].

Considerando o princípio da supercondutividade, onde sejam respeitadas as condições críticas de temperatura, corrente elétrica e campo magnético aos quais o material supercondutor é submetido, este apresentará resistência quase nula à passagem da corrente elétrica em regime permanente. Após a transição para o estado normal, uma resistência elétrica é inserida no circuito sem qualquer chaveamento, limitando a corrente de falta em alguns milissegundos com fator de limitação de até a ordem de 10 vezes [14].

O LCESR é sempre ligado de tal modo que o material supercondutor esteja em série com o circuito que necessita de limitação de corrente. Em paralelo com o material supercondutor conecta-se um resistor *shunt* que serve para proteção do limitador (Figura 3.3), conduzindo uma pequena fração de corrente após a transição do material supercondutor do estado supercondutor para o estado normal (condutor), limitando o campo elétrico máximo em 50V/m ao longo da fita supercondutora (para falta de até 80ms) e, conseqüentemente, a corrente elétrica do circuito ao qual ele esteja conectado.

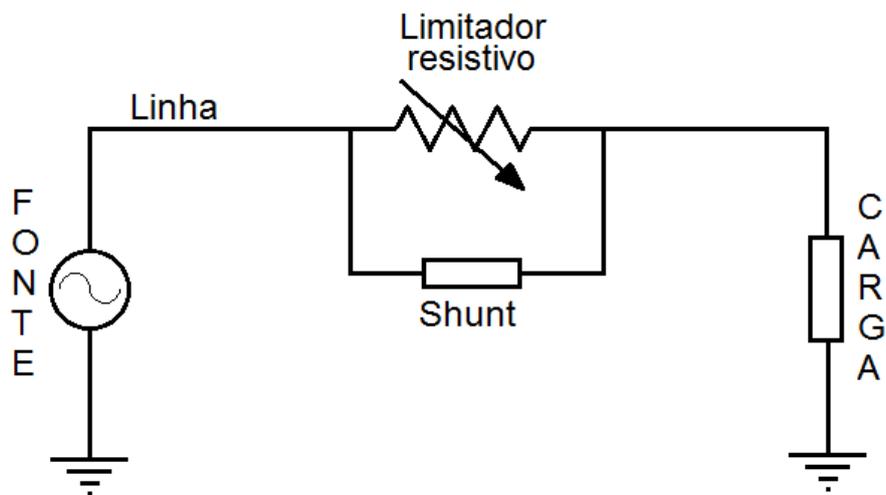


Figura 3.3: Limitador de correntes elétricas supercondutor do tipo resistivo

Na ocorrência de um curto-circuito, quando a corrente de falta atinge um valor superior ao da corrente crítica do material supercondutor, este sofre transição de estado supercondutor para o estado normal (*quench*). Esta transição aumenta instantaneamente o valor de sua resistência elétrica. O valor dessa resistência elétrica é definida pela resistência elétrica das camadas metálicas existentes na fita, que são o substrato e a camada de estabilização, que pode ser de prata, cobre ou aço inoxidável. Simultaneamente a corrente elétrica passa pelas camadas metálicas da fita supercondutora e pelo resistor *shunt*, diminuindo o valor da corrente máxima de curto-circuito para o circuito em que o LCES esteja inserido (comumente chamada nesta área de estudos de corrente prospectiva), limitando assim a corrente elétrica de falta, por até 80ms.

O circuito *shunt* (externo) tem a função de proteção. Ele é dimensionado com um valor resistivo que seja menor do que a resistência equivalente desenvolvida na fita supercondutora (300K), em seu estado normal, com a finalidade de drenar parte da corrente elétrica durante a limitação da corrente de falta. Com isto, evita-se que o valor do campo elétrico ao longo da fita ultrapasse 50V/m (máximo para a fita supercondutora), causando a sua degradação. Outra função desse resistor é a de reduzir o tempo de recuperação para o estado supercondutor após a falta ser extinta.

O tempo de recuperação do material supercondutor sem carga é definido pela velocidade de seu resfriamento até uma temperatura abaixo de sua temperatura crítica, no qual ele esteja novamente em condições de recuperar suas propriedades supercondutoras após a ocorrência de uma falta. Para que isto ocorra, no menor intervalo de tempo possível, é necessário que duas condições sejam satisfeitas. A primeira condição é a de que a menor quantidade de corrente passe pelo material supercondutor para que sua temperatura não ultrapasse 300K, a segunda é que toda a superfície do material supercondutor esteja em permanente contato com o fluido refrigerante, para evitar a formação de bolhas ou filme de gás (nitrogênio evaporado) que tem uma condutividade térmica muito inferior à do banho líquido, o que exige um bom projeto de refrigeração e controle de temperatura dos elementos dentro do criostato.

Os parâmetros para o dimensionamento do limitador de corrente resistivo são obtidos a partir do ensaio de amostras curtas do material para determinar a máxima corrente admissível para um dado tempo de atuação, para cada valor de resistência elétrica *shunt* selecionado, garantindo a recuperação das propriedades supercondutoras.

Estes parâmetros também são determinados pela resistência elétrica por unidade de comprimento da fita supercondutora em estado normal, pelo tempo que a fita

supercondutora deve limitar a corrente elétrica (até 5 ciclos) e pelo campo elétrico desenvolvido ao longo do seu comprimento durante a duração da falta.

As fitas supercondutoras comerciais de YBCO (óxido de ítrio, bário e cobre) atendem às características teóricas e técnicas para construção de limitadores de corrente supercondutores resistivos. As limitações de sua utilização estão disponíveis em [22], [23] e [24], demonstrando que o campo elétrico máximo suportável no estado supercondutor está entre 40 a 50V/m de fita. A resistência efetiva inserida no circuito varia com a espessura da capa de proteção de prata da fita (*cap-layer*) e de uma camada estabilizadora que é usada para condução da corrente elétrica após transição para o estado normal. Ela pode ser de Prata (Ag), Cobre (Cu) ou aço inoxidável, inserindo uma resistência equivalente que define basicamente, o tempo que a fita, no estado normal, conduz a corrente de falta. Este tempo varia entre 20 a 100ms na maioria dos protótipos em testes ou em operação neste momento no mundo.

Se no projeto do limitador, o tempo de circulação de corrente elétrica no material supercondutor for reduzido para 20ms, o valor do campo elétrico poderá ser aumentado para 100V/m, reduzindo o comprimento total da fita necessária para construção do limitador e consequentemente, reduzindo o custo de construção do limitador de correntes elétricas supercondutor.

Quando se dimensiona um limitador de correntes elétricas supercondutor resistivo, para um dado circuito de distribuição ou de transmissão, é necessário ajustar a quantidade de fitas que deverão ser associadas em paralelo para suportar a corrente de regime permanente e, também, a corrente de falta por um dado período muito curto de tempo. Esta definição está baseada na equação (3.7) [25]:

$$\frac{P_r}{A} = \frac{U}{L} \cdot \frac{I_c}{\sqrt{2} \cdot w} \quad (3.7)$$

Em (3.7)  $P_r$  é a potência nominal do limitador supercondutor,  $A$  é a área total de fita supercondutora,  $U/L$  é o campo elétrico ao longo da fita que deve ter valor alto (em torno de 40 a 50V/m) para se ter um limitador de dimensões compactas,  $I_c$  é a corrente crítica (corrente contínua) da fita supercondutora,  $I_c/(\sqrt{2} w)$  é o valor eficaz de uma corrente alternada que aproximadamente corresponda à corrente máxima do supercondutor por unidade de largura da fita, tendo em vista que  $U$  é o valor máximo de tensão.

Deve-se levar em consideração também a resistência por unidade de comprimento das fitas supercondutoras em estado normal, com a finalidade de dimensionar o limitador para

que suporte correntes elevadas por até 100ms sem que o material supercondutor se degrade. A Tabela 3.1 apresenta valores obtidos em experimentos realizados em amostras de fitas supercondutoras para temperaturas próximas à temperatura crítica ( $T_c$ ) e a 300K comparados com valores obtidos na literatura [5].

**Tabela 3.1: Valores de R/l para temperaturas próximas a  $T_c$  e a 300K [14]**

<b>HTS/Estabilizador</b>	<b>Estabilizador Espessura/Material</b>	<b>R/l <math>T_c</math> [<math>\Omega/m</math>] Medido</b>	<b>R/l 300 K [<math>\Omega/m</math>] Medido</b>	<b>R/l 300 K [<math>\Omega/m</math>] Literatura</b>
YBCO AMS - Inox	75 $\mu m^{**}$ /Aço Inox	0,14	0,359	0,367
YBCO SP - Cu SCS12050	50 $\mu m$ /Cobre	0,02	0,079	0,11
YBCO SP - Ag SF12100	1 $\mu m$ /Ag*	0,17	0,442	0,40

\*Cap layer - sem estabilizador externo

\*\* $\mu m$  = micrometro

Portanto, levando em consideração o critério de dimensionamento de que o campo elétrico máximo durante falta deve ser de 50V/m e o preço comercial atual da fita supercondutora, ao se projetar um LCESR que será instalado em local com tensão muito elevada, a sua construção terá um custo muito elevado, podendo ser, economicamente, inviável devido à grande quantidade de fita supercondutora utilizada.

Utilizando a topologia básica do LCESR, pode-se desenvolver inúmeros projetos para instalação deste dispositivo, de acordo com a necessidade do sistema a ser protegido. Dentre os LCESR existentes podem ser destacados algumas unidades que foram construídas e estão em operação em alguns países.

A empresa NEXANS [19] desenvolveu e produziu dois LCESR para implementação em uma rede elétrica. A principal característica dos limitadores desse fabricante são os módulos de supercondutores que são denominados "*bulks*", que são tubos de material supercondutor cerâmico (Bi-2212) soldados a um tubo de metal condutor normal (Cu13%Sn) com terminais de contatos adequados à aplicação (Figura 3.4). O tubo de material condutor é necessário para evitar a formação de pontos de aquecimento (*hot spots*) ao longo do *bulk*, caso ocorra uma falta parcial que não seja suficiente para fazer transitar todo o material supercondutor para estado normal.



**Figura 3.4: Elementos *bulks* produzidos pela NEXANS [19].**

Em sua montagem, uma grande quantidade de *bulks* são ligados em série, dependendo do valor de tensão, outros ligados em paralelo dependendo da corrente especificadas. Por serem os tubos de grande seção transversal e comprimentos de até 5m por peça (helicoidal), sua aplicação fica restrita a unidades de potência superior a 500kVA.

Uma das características do limitador construído pela NEXANS é a facilidade de se adaptar a várias especificações de tensão e de corrente, devido à flexibilidade de montagem dos módulos *bulks*, não se alterando o princípio de seu funcionamento, mas sim, somente as especificações de projeto.

Há duas unidades desse tipo de limitador instaladas, sendo uma unidade de 12kV/2MVA, que pode ser observada na figura 3.5, encontra-se no barramento de uma subestação de distribuição em Lancashire, Reino Unido. Este dispositivo foi projetado para limitar a corrente de falta da ordem de 50kA para 6kA. Sua corrente nominal é de 100A, porém, o projeto tem a capacidade de suportar uma corrente de energização de 460A durante o tempo de 10 segundos sem que os supercondutores transitem para o estado normal, para uma limitação de corrente de curto-circuito de 120ms. Para refrigeração do material supercondutor, o dispositivo é mantido em um criostato em malha fechada que mantém a refrigeração com nitrogênio (77K).



**Figura 3.5: LCESR 12kV/2MVA instalado em Lancashire, Reino Unido [19].**



**Figura 3.6: LCESR 12kV/16MVA instalado em Boxberg, Alemanha [20].**

A segunda unidade, figura 3.6, fica localizada em um sistema de fornecimento de energia auxiliar de uma grande usina localizada em Boxberg, Alemanha. O dispositivo é trifásico de 12kV/16MVA, tendo a mesma tensão, porém, com uma potência nominal maior do que o protótipo instalado no Reino Unido, sendo a corrente nominal de 800A e a corrente de limitação de 1800A durante 15s.

Para que este dispositivo tivesse potência maior, utilizou-se uma quantidade maior de material supercondutor, fazendo com que cada uma das fases ficasse alojadas em criostatos individuais. Para o sistema de refrigeração deste equipamento foi escolhido um criocooler de refrigeração em malha aberta que mantém a temperatura dos elementos do limitador a 65K.

No projeto ECCOFLOW, um LCESR fabricado com fitas de YBCO será testado em dois lugares diferentes. Um deles é em um acoplamento de um barramento de uma subestação situada na cidade de Milão, Itália e o outro em um alimentador de um transformador situado na Eslováquia [20].

Este limitador resistivo, que pode ser observado na figura 3.7, esquematicamente, tem uma particularidade que é a de trabalhar em paralelo com um reator de núcleo de ar. Durante operação normal, os disjuntores DJ1 e DJ2 encontram-se fechados. Como a impedância do limitador é muito menor do que a do reator de núcleo de ar, a corrente passará toda por ele. No momento em que ocorrer uma falta, o material supercondutor transita para o estado normal limitando a corrente durante os primeiros 80ms.

Após este tempo, o disjuntor DJ1 abre e desvia toda a corrente para o reator de núcleo de ar, fazendo com que este limite a corrente de falta até o instante em que o disjuntor

principal do circuito de potência atue, eliminando o defeito. O disjuntor DJ2 fica sempre fechado, a não ser que ocorra algum evento inesperado em que seja necessário isolar o LCESR da rede elétrica.

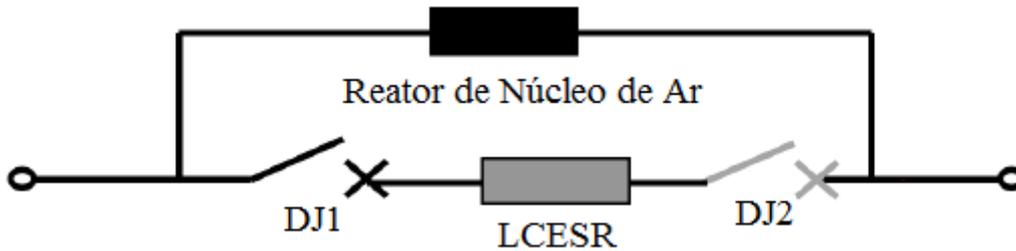


Figura 3.7: Diagrama unifilar do LCESR 24 kV/1 kA ECCOFLOW [20].

Essa configuração permite que o conjunto limitador funcione até 1s, enquanto outros LCESR são limitados a funcionar por durante 80 a 100ms. Se o limitador fosse funcionar por durante 1s usando somente supercondutor, seria necessário reduzir o critério de tensão por unidade de comprimento do supercondutor para valores muito baixos em comparação ao de 40 a 50V/m, para evitar um aquecimento excessivo do material supercondutor.

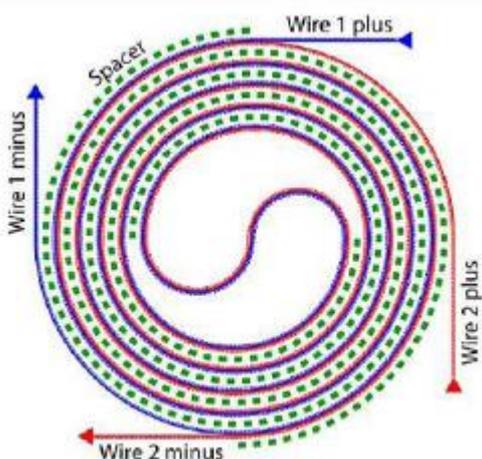


Figura 3.8: Disposição bifilar de supercondutor[2]

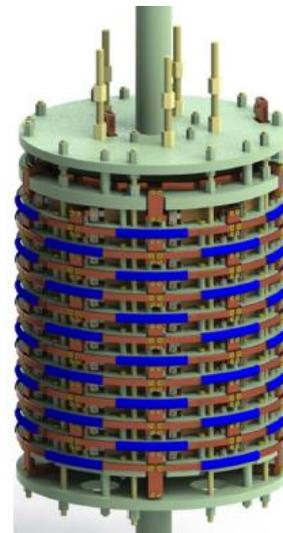


Figura 3.9: Módulo de enrolamentos supercondutores do LCESR da ECCOFLOW [20]

Para construção do limitador foram produzidos enrolamentos com disposição bifilar [2] (Figura 3.8), utilizando cinco fitas supercondutoras com aproximadamente 16m de comprimento, colocadas em paralelo com isolamento de duas camadas de poliimida entre os dois condutores. Este arranjo permite a condução de 1kA sem a necessidade de resistor *shunt* de proteção, e a tensão máxima através do componente pode chegar até 800V. Na montagem

final, doze elementos iguais a este são ligados em série e montados empilhados um sobre o outro formando um módulo, como mostrado na figura 3.9.

No Brasil há pesquisas realizadas sobre LCESR onde, também foram construídos protótipos para testes, dentre os quais podem ser citados as referências [21] e [5].

A referência [21] mostra, em experiência realizada uma comparação entre um LCESR construído com componentes do tipo *bulk* de Bi-2212 que foram fornecidos pela NEXANS *Superconductors* e outro, com fitas de YBCO de segunda geração, produzidas pela *Superpower Inc*, sendo que os limitadores foram submetidos a testes de faltas realizados no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) com correntes assimétricas em diferentes níveis de tensão.

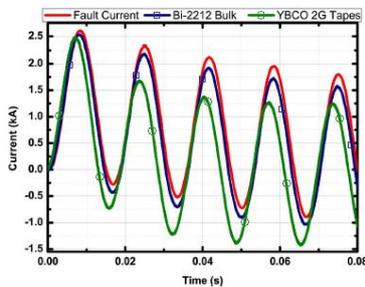
O limitador com *bulk* de Bi-2212 consiste em 12 módulos do tipo *bulk* construídos de maneira a ter uma bobina com polaridade invertida em relação à outra, para que o campo magnético resultante fosse próximo de zero. O comprimento total é de 405,5cm para cada elemento e a corrente crítica próxima de 400A à temperatura de 77K. Cada *bulk* é capaz de conduzir uma corrente nominal de 250A à temperatura de 77K. O fabricante NEXANS recomenda que cada módulo não deve ser submetido a uma tensão maior do que 100V, respeitando o critério de campo elétrico de 0,25V/cm. Como os testes foram realizados em 138V, foram ligados dois módulos em série fazendo com que a tensão máxima pudesse chegar a 200V.

O limitador com fitas de YBCO de segunda geração, que foi construído também com módulos fornecidos pela NEXANS, utilizando um módulo com arranjo bifilar para fitas supercondutoras, como já visto na figura 3.8, apresenta uma estrutura similar ao limitador construído pelo autor da referência [26]. Cada componente foi feito com 4 circuitos de 2 fitas cada. Em cada circuito são colocadas duas fitas de YBCO com seus substratos um encostado no outro, fazendo com que essas camadas façam contato elétrico. Cada enrolamento tem 4,3m de fita. Como foram construídos dois enrolamentos, eles totalizam um comprimento de 8,6m. A corrente crítica é aproximadamente de 1200A à temperatura de 77K e a tensão máxima é de 400V, que equivale a um campo elétrico de 46V/m de fita supercondutora.

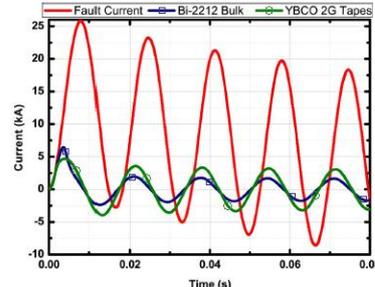
Foram realizados testes nas mesmas condições para os dois limitadores e observou-se que, para corrente de falta de 1kA e tensão de 200V, houve uma pequena limitação no primeiro pico pelos dois limitadores e um decaimento mais acentuado daquele que possui fitas de YBCO. Se comparado ao de Bi-2212 (Figura 3.10), pode-se observar também que isto se deve à maior capacidade térmica do componente do tipo *bulk*.

Apesar das diferenças entre os dois limitadores, nos ensaios de 10kA e 200V, observa-se um fator de limitação elevado para os dois dispositivos, cerca de 80%, sendo o fator de limitação um pouco maior no primeiro pico para o limitador que tem componentes de YBCO do que o que tem Bi-2212.

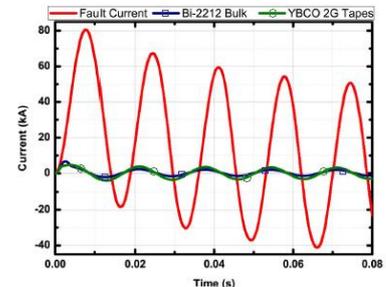
Logo após a transição do material supercondutor para o estado normal, o limitador com Bi-2212 passa a ter um fator de limitação maior do que o de YBCO. Isto pode ser atribuído à diferença de resistência elétrica total dos circuitos *shunts* dos componentes. (Figura 3.11). Também foi realizado um ensaio com uma forma de onda prospectiva de corrente de 30kA e observou-se o mesmo comportamento em relação às correntes limitadas (Figura 3.12). Isto sugere que a transição da fita de YBCO acontece mais rapidamente do que a de Bi-2212.



**Figura 3.10:** formas de onda de corrente do ensaio de 1 kA no LCESR com Bi-2212 e fita YBCO [21].



**Figura 3.11:** formas de onda de corrente do ensaio de 10 kA no LCESR com Bi-2212 e fita YBCO [21].



**Figura 3.12:** formas de onda de corrente do ensaio de 30 kA no LCESR com Bi-2212 e fita YBCO [21].

**Tabela 3.2:** Resultados dos testes do LCESR à 220 V eficazes [21]

Falta de corrente assimétrica		Corrente limitada (Valores eficazes)		Corrente limitada (Valor do primeiro pico)		Tensão no limitador (Valores eficazes)	
Valor RMS	Valor do primeiro pico	Bulk Bi-2212	Fita YBCO	Bulk Bi-2212	Fita YBCO	Bulk Bi-2212	Fita YBCO
1kA	2,60kA	0,92kA	0,94kA	2,52kA	2,47kA	2V	40V
5kA	13,75kA	1,18kA	1,95kA	6,05kA	4,58kA	184V	165V
10kA	25,75kA	1,13kA	2,12kA	6,4kA	4,66kA	198V	183V
20kA	53,50kA	1,21kA	2,19kA	6,44kA	4,60kA	199V	198V
30kA	80,50kA	1,18kA	2,20kA	6,64kA	4,58kA	193V	190V

Na tabela 3.2 apresenta-se um sumário dos ensaios realizados pelos autores da referência [21]. Estes testes mostram que este tipo de limitador pode ser considerado efetivo para problemas causados pelo aumento dos níveis de curto-circuito, uma vez que limita as correntes de falta com eficiência. Outra observação a ser feita é a de que, a partir do valor de 10kA de corrente prospectiva de curto-circuito, as correntes limitadas têm valores constantes, tanto para o primeiro pico, quanto para o seu valor eficaz.

Outro projeto, no qual foi construído e testado um LCESR que utiliza fitas do tipo YBCO CC 344S (estabilizador com  $75\mu\text{m}$  de aço inoxidável) com 4,4mm de largura, 0,15mm de espessura e corrente crítica  $I_c = 72\pm 2\text{A}$  fabricadas pela empresa *American Superconductor* foi desenvolvido na Escola de Engenharia de Lorena – EEL/USP [5].

O substrato dessa liga é de Ni5%W com alta resistividade elétrica, inserindo uma resistência elétrica equivalente a  $0,354\Omega/\text{m}$ . O campo elétrico desenvolvido durante a falta, mantendo o supercondutor em condições seguras, foi dimensionado utilizando o critério de  $0,5\text{V}/\text{cm}$ , utilizando um resistor *shunt* de resistência elétrica  $R_{sh}=80\text{m}\Omega$  por elemento.

O módulo limitador, que pode ser visto na figura 3.13, é constituído por 16 elementos, cada um contendo quatro fitas de 40cm de comprimento associadas em paralelo e com os seus terminais soldados em um barramento de cobre com uma liga de Sn-In (Estanho-Índio) com ponto de fusão de  $116^\circ\text{C}$ .



Figura 3.13: LCESR 220V 1,5kA [14].

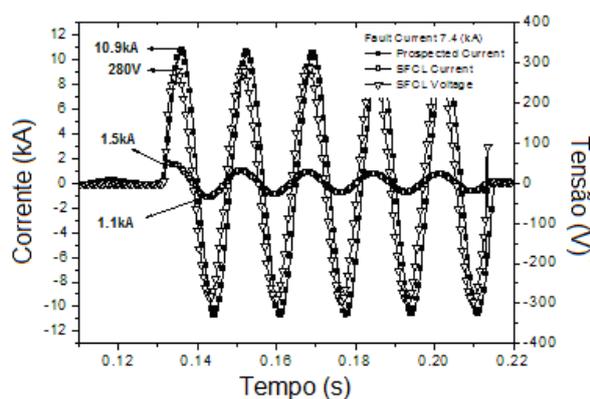


Figura 3.14: Curva (V,I) x t do LCESR sob corrente de 1,5kA durante 5 ciclos [14].

O protótipo foi submetido a vários testes de curto-circuito usando um transformador de 3MVA - 15kV/380V. O limitador foi conectado entre fase e terra e foi submetido a uma corrente prospectiva de falta de 7,4kA. A Figura 3.14 apresenta a comparação entre a prospectiva de corrente de falta de 7,4kA, com uma corrente simétrica limitada a 695A, que é correspondente a uma limitação de 10,6 vezes.

A forma de onda de tensão de 202V é referente à tensão nos terminais do limitador. Foram realizadas também medições entre todos os 16 elementos do limitador, que apresentaram valores iguais entre elas de 11,38V, mostrando que houve uma transição homogênea em todos os elementos de fita supercondutora, de tal maneira que o campo elétrico alcançasse o valor de  $0,42\text{V}/\text{cm}$ , ficando abaixo do valor de segurança de  $0,5\text{V}/\text{cm}$ .

A tabela 3.3 apresenta o sumário dos vários testes realizados no LCESR, que variam de 1kA a 10kA de pico para corrente prospectiva de falta.

**Tabela 3.3: Faltas aplicadas no limitador de correntes elétricas [14]**

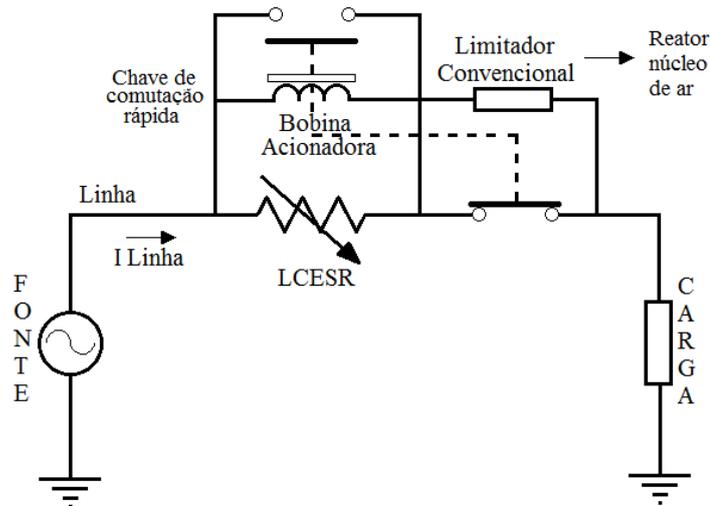
<b>Corrente prospectiva de falta (kA)</b>	<b>Corrente Limitada (A)</b>	<b>Tensão no limitador (V)</b>	<b>Tensão por elemento (V)</b>
0,8	506	87	4,9
1,0	552	113	5,9
2,0	618	153	8,0
3,4	634	176	9,9
4,2	673	187	10,5
5,7	673	194	11,0
6,2	692	201	11,3
7,0	696	203	11,5
7,4	695	202	11,4

### **3.2.2 Limitador de correntes elétricas supercondutor do tipo híbrido**

A busca pela viabilidade econômica para produção dos limitadores de correntes elétricas supercondutores incentivou o estudo de vários métodos e arranjos. Uma alternativa seria o limitador de correntes elétricas supercondutor híbrido (LCESH) que consiste na união de limitadores de correntes elétricas supercondutores com convencionais ou ainda de sensores supercondutores e limitadores convencionais como reator de núcleo de ar.

Uma topologia do limitador híbrido consiste em um módulo do limitador de correntes elétricas supercondutor do tipo resistivo operando em paralelo com um limitador de correntes elétricas do tipo reator de núcleo de ar como mostrado na Figura 3.15.

Em operação normal, a corrente da linha passa pelo LCESR devido ao fato de sua impedância ser muito baixa. No momento em que ocorre uma falta, o material supercondutor transita para o estado normal, aumentando sua impedância e desviando parte de sua corrente para a bobina acionadora. A bobina acionadora, por sua vez, faz com que uma chave eletromecânica muito rápida comute seus contatos, fazendo com que a corrente passe a fluir pelo limitador de correntes elétricas convencional [27].



**Figura 3.15: Topologia do limitador de correntes elétricas supercondutor híbrido (adaptado de [27])**

Este arranjo permite que seja utilizada uma quantidade menor de material supercondutor quando comparado com os limitadores de corrente elétrica supercondutores puramente resistivos. Isto se deve ao fato de que o surto de corrente que passa por ele será pelo tempo de 20ms, permanecendo no circuito somente durante o primeiro ciclo. A partir dos próximos ciclos a falta será limitada pelo reator de núcleo de ar, podendo chegar até o tempo de 0,5s, que é suficiente para atuação do disjuntor do circuito de potência que atua em 100ms.

O LCESH tem a característica de não inserir impedância série durante operação normal, não acarretando perdas significativas para o sistema se comparado a outros tipos de limitadores de correntes, pelo fato de o supercondutor ser utilizado como um tipo de sensor para a bobina acionadora. Não é necessária a utilização de uma grande quantidade de material supercondutor, tendo um custo de produção e operação menor se comparado com o LCE SR [28].

Por outro lado, o tempo de recuperação desse tipo de limitador é mais demorado do que o dos limitadores de correntes elétricas supercondutores do tipo resistivo, pois o reator de núcleo de ar necessita de resfriamento após a ocorrência de uma falta. Uma outra observação que deve ser feita é de que no primeiro ciclo não há limitação de corrente. Sendo assim, o sistema em que este tipo de limitador estiver inserido deve ser capaz de suportar uma falta de corrente elétrica elevada, bem maior que o pico de corrente especificada para o disjuntor durante o primeiro ciclo, sem que ocorra algum dano aos seus equipamentos.

### 3.2.3 Limitador de correntes elétricas supercondutor indutivo

Limitadores de corrente elétrica do tipo indutivo são equipamentos que associam as características dos materiais supercondutores às propriedades magnéticas dos dispositivos para inserir uma impedância indutiva no circuito a ter sua corrente limitada. Existem várias topologias desse tipo de limitador, com destaque para os que utilizam transformadores com núcleo blindado e os que utilizam núcleo saturado.

Os transformadores supercondutores são equipamentos que podem oferecer vários benefícios em sua instalação. Desde a década de 1960 são realizadas pesquisas para construção de transformadores utilizando material supercondutor, sendo que a primeira unidade a ser construída com supercondutor de alta temperatura foi instalada no ano de 1996 [29].

As características positivas da implementação dos limitadores de corrente com transformadores supercondutores (LCETS) são: o LCETS em condições normais de operação funciona como transformador e na ocorrência de uma falta, ele limita a corrente de surto a um valor que o disjuntor opere com segurança; a função de limitador de correntes faz com que ele melhore a estabilidade do sistema em que está inserido no caso de um curto-circuito; a reatância de dispersão do transformador limitador de correntes pode ter valor reduzido em comparação a outros transformadores convencionais; a redução da reatância de dispersão melhora a capacidade de transmissão e a estabilidade do sistema em condições normais de operação; após a limitação da falta o limitador recupera suas características supercondutoras, podendo operar novamente em condições nominais.

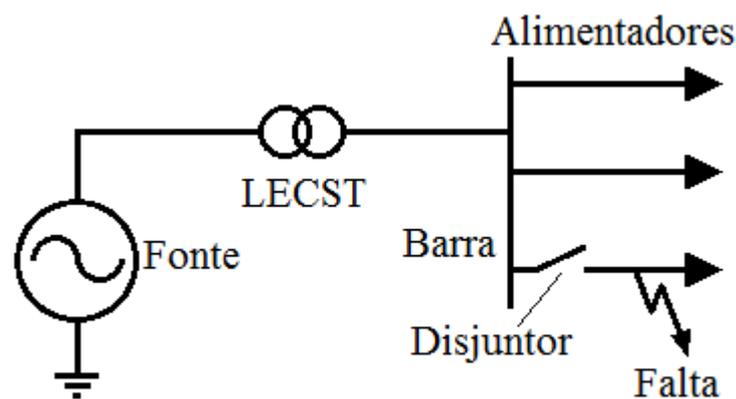


Figura 3.16: Aplicação típica do LCETS (adaptado de [29])

Sua construção se baseia em um transformador que tem fitas supercondutoras no lugar de condutores normais de cobre. Dependendo do projeto, este tipo de transformador limitador pode ter material supercondutor em todos os enrolamentos ou somente no secundário. Uma aplicação usual seria a sua instalação antes de barramentos de alimentadores com linhas de diferentes cargas (figura 3.16).

Para que a implementação de um LCETS seja viável economicamente deve-se levar em consideração o valor a ser investido em relação à potência fornecida pelo transformador supercondutor em relação a um transformador convencional, pois a sua produção é mais cara devido ao material supercondutor e à sua operação que inclui gastos com o sistema criogênico. A viabilidade econômica geralmente é possível somente para unidades com potência superior a 50MVA, quando o alto rendimento permite compensar o custo elevado após 20 anos de operação [30].

A construção de um LCETS trifásico de 2MVA, 22kV/6,6kV, desenvolvido por [31] é caracterizado pela combinação de tipos diferentes de fitas supercondutoras do tipo YBCO, que permitem um melhor controle e flexibilidade da corrente limitada.

Suas características construtivas são mostradas na figura 3.17, onde se vê uma de suas fases. Suas bobinas são dispostas em ambas as pernas do núcleo magnético (perna A e perna B), sendo envolvidas em cilindros de fibra de vidro, onde serão imersas em nitrogênio líquido, permanecendo à uma temperatura de 77K.

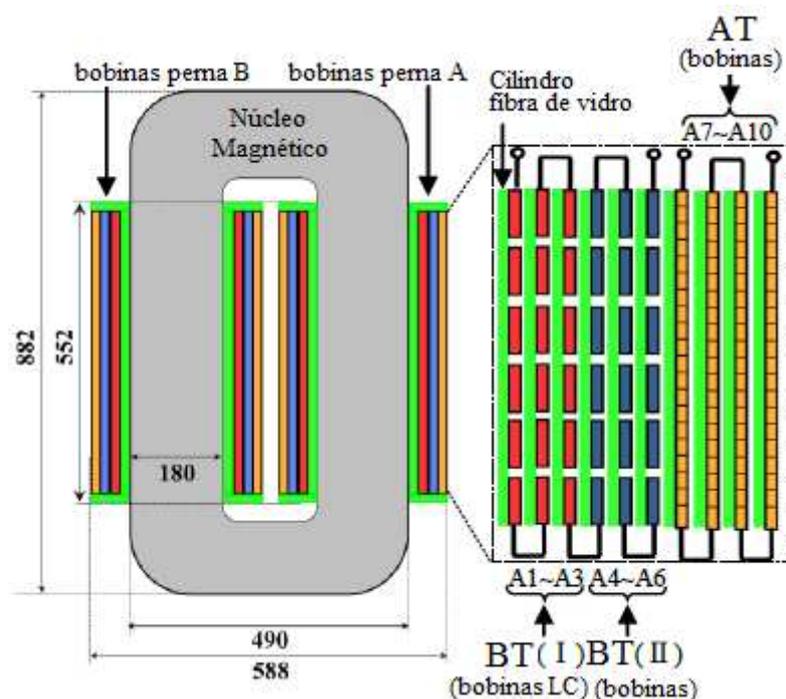


Figura 3.17: Arranjo do LCETS 2 MVA adaptado de [31]

As bobinas de baixa tensão (A1~A6, B1~B6; totalizando 12 bobinas ligadas em série, onde as bobinas que tem prefixo B estão localizadas na perna B) foram divididas em dois setores, BT I e BT II, sendo o primeiro constituído de fita de YBCO com uma fina camada estabilizadora de prata, que no momento da falta transita, aumentando sua resistência elétrica e limita a corrente. O segundo setor usa YBCO com camada estabilizadora de cobre, com a função de aumentar o comprimento do enrolamento para suportar o campo elétrico imposto no momento da falta, não tendo a função de limitador de corrente quando transita para seu estado normal, pois, mesmo com sua transição, a corrente passa pela camada de cobre.

No enrolamento de alta tensão, as bobinas que compreendem os intervalos A7~A10, B7~B10, totalizando 8 bobinas ligadas em série, são compostas de fitas de Bi2223 com camada estabilizadora de prata, não tendo função de limitar corrente, mas sim de redução de perdas na alta tensão.

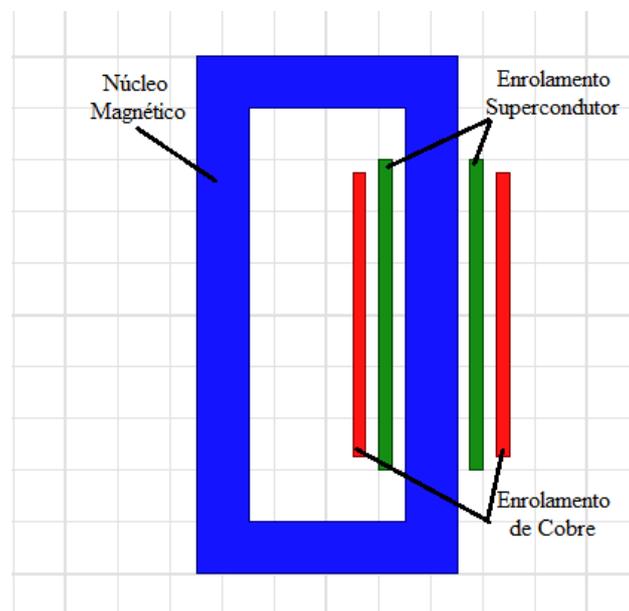
Testes de curto-circuito brusco realizados neste LCETS apresentaram resultados de 92% de limitação da corrente prospectiva no primeiro pico e 72% no quinto ciclo da corrente de falta. Os testes de circuito aberto mostraram perdas de 411W com corrente de excitação com pico de 0,55A em uma tensão de 3,81kV. A impedância de dispersão obtida através do ensaio de curto-circuito foi de 6,0%.

### **3.2.4 Limitador de correntes elétricas supercondutor com núcleo blindado**

Um novo conceito para se limitar correntes elétricas usando materiais supercondutores consiste no limitador de correntes elétricas supercondutor com núcleo blindado LCESNB, que não utiliza o material supercondutor para condução da corrente do circuito principal, mas sim o seu efeito diamagnético, que é a propriedade do supercondutor expulsar todas as linhas de campo magnético de seu interior, como blindagem descrito por [32].

A figura 3.18 mostra o LCESNB, que é constituído de um núcleo ferromagnético, um enrolamento de blindagem com anéis supercondutores que estão curto-circuitados entre si e envolvem este núcleo formando um enrolamento secundário dentro de um criostato e um enrolamento primário com bobina de cobre (externa), conectado ao circuito principal no qual circula a corrente a ser limitada.

Durante operação normal, devido ao baixo campo magnético gerado pelo circuito principal a que está submetido, o enrolamento supercondutor mantém suas propriedades supercondutoras, formando uma blindagem magnética que impede o circuito principal de sentir a impedância associada ao circuito magnético, fazendo com que a impedância resultante vista pelo sistema seja muito baixa. No momento em que ocorre a falta, o campo magnético gerado pela corrente de curto-circuito, que é muito elevada, faz com que o material supercondutor transite para o estado normal, permitindo a passagem do campo magnético gerado pelo circuito principal. Dessa maneira, o circuito alimentador passará a sofrer a ação da impedância associada ao circuito magnético, limitando assim a corrente.



**Figura 3.18: estrutura do LCESNB**

O LCESNB tem característica de grande fator de limitação no primeiro pico da forma de onda prospectiva de falta, chegando a ser de até 80% para uma corrente prospectiva de 25kA em um protótipo monofásico de 6,4kV/13MVA construído por [32]. Também mostra baixas perdas térmicas dentro do criostato e no caso de falha do criostato o limitador continuará atuando como um circuito magnético convencional, limitando a corrente de falta.

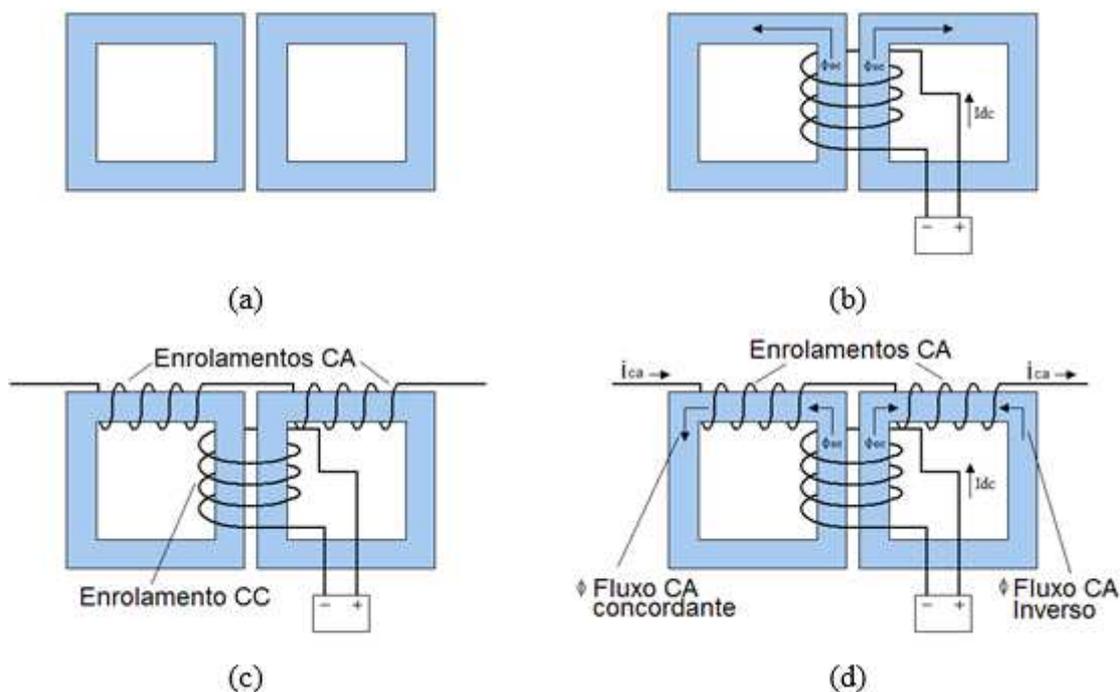
### **3.2.5 Limitador de correntes elétricas supercondutor com núcleo saturado**

O princípio de funcionamento do limitador de correntes elétricas supercondutor com núcleo saturado (LCESNS), pode ser descrito resumidamente da seguinte maneira: enquanto seus núcleos magnéticos, figura 3.19, estiverem em estado de saturação, ele não

apresenta impedância significativa para o circuito principal em que está instalado em série a proteger, porém quando retirado do estado de saturação, introduz uma impedância predominantemente indutiva, através do circuito magnético, que é capaz de limitar o valor da corrente elétrica de falta ocorrida na rede elétrica de acordo com seu projeto.

Este tipo de limitador de corrente elétrica tem sido estudado e já foi implementado experimentalmente em alguns países como China, Austrália, Reino Unido, e Estados Unidos. Devido aos resultados obtidos por diversos autores [33], [34] e [35] resolveu-se estudar o modelo, realizar simulações utilizando um software de elementos finitos para estudo e projeto, construir um protótipo de LCESNS para 380V/30A de acordo com o projeto realizado e ensaiá-lo para atuar em corrente de falta de até 1kA. Todos os detalhes a respeito do projeto e construção deste limitador de correntes elétricas serão apresentados nos próximos capítulos. Há uma boa e real possibilidade deste tipo de limitador de corrente elétrica ser utilizado em larga escala em sistemas elétricos em um futuro próximo.

A figura 3.19 apresenta as características construtivas de uma das fases do LCESNS, que é constituído de dois núcleos magnéticos com dimensões iguais em formato de janelas montados um ao lado do outro (figura 3.19a), de maneira que uma das pernas de cada janela fique em paralelo com a outra formando um ramo central, mantendo-se um espaço entre elas para evitar trepidações e danos mecânicos aos núcleos.



**Figura 3.19: Funcionamento do LCESNS**

Este ramo central é envolvido por um enrolamento cilíndrico que possui uma bobina com um grande número de espiras, construída com cobre ou com material supercondutor, que tem a finalidade de gerar um campo magnético através de uma corrente contínua, levando o núcleo magnético à saturação. O campo magnético gerado por essa bobina se orienta de acordo com o fluxo  $\phi_{cc}$  apresentado na figura 3.19b.

Os enrolamentos do circuito principal de potência, que são de corrente alternada, têm poucas bobinas e são dispostos nos núcleos magnéticos de forma a criar campos magnéticos iguais, porém em sentidos opostos, de tal maneira que, quando percorrido por corrente alternada, dependendo do semiciclo em que se encontra a rede elétrica, cria campos magnéticos que geram fluxos magnéticos nos núcleos que se somam ou se subtraem do fluxo magnético gerado pela bobina de corrente contínua (figura 3.19c e 3.19d).

A viabilidade de se utilizar supercondutor nas bobinas do circuito que geram o campo magnético de corrente contínua seria para diminuir as perdas na criação deste campo que leva o material magnético à saturação, pois, devido à resistividade do material ser quase nula, pode-se usar uma fonte de baixa potência. Outro motivo é que para unidades de grandes potências, a bobina de corrente contínua ocupa um espaço menor se for construída com supercondutor ao invés de cobre para condução do mesmo valor de corrente. Dessa forma a distribuição do campo magnético gerado pelo material supercondutor se dá de maneira mais uniforme e com menor dispersão do fluxo.

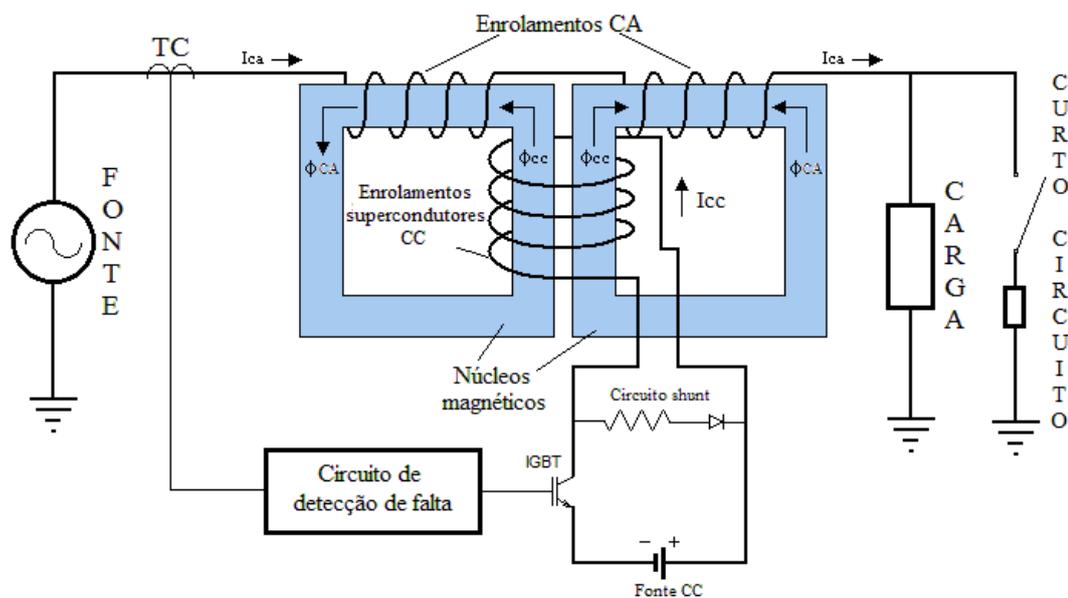
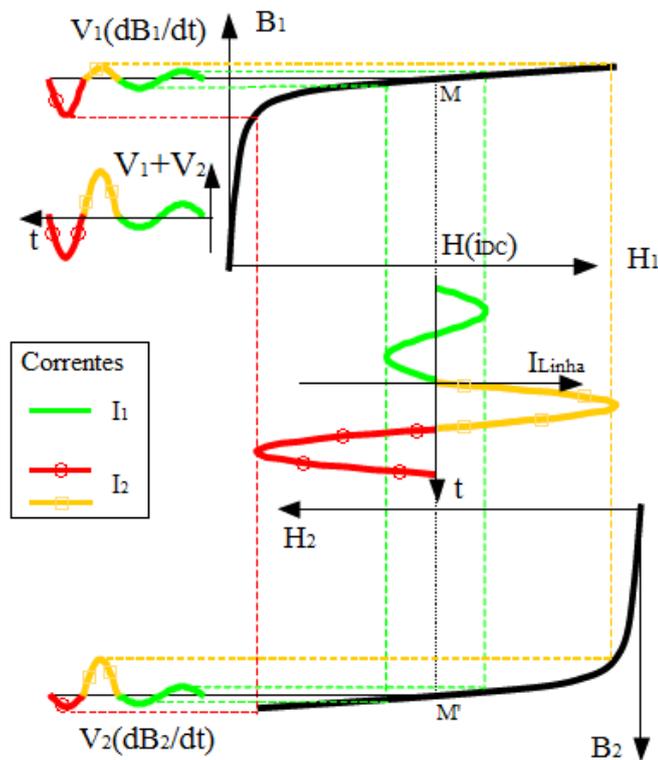


Figura 3.20: Características construtivas de uma fase do LCESNS.

Na Figura 3.20 uma das fases do LCESNS é apresentada de uma maneira mais completa, estando ele inserido em um sistema elétrico monofásico e em conjunto com um

sistema de detecção de falta, que é necessário para um funcionamento mais eficiente deste equipamento. São mostrados: uma das fases da fonte de corrente alternada, carga, chave responsável pelo curto-circuito, fonte de alimentação de corrente contínua (fonte CC), chave eletrônica rápida (IGBT) que desliga a fonte de corrente contínua que alimenta a bobina de magnetização do núcleo, circuito de descarga de corrente da bobina de magnetização do núcleo (circuito “*shunt*”), transformador de corrente (TC) e o circuito que são responsáveis pela identificação do curto-circuito.

O LCESNS apresenta duas condições de funcionamento, sendo uma sob operação normal de carga e a outra sob condição de curto-circuito. Na figura 3.21, as correntes de linha do circuito nessas condições são identificadas por  $I_1$  e  $I_2$ .



**Figura 3.21: Curvas BxH de regime normal e de curto-circuito do limitador de corrente elétrica supercondutor com núcleo saturado [2]**

Em regime permanente, a bobina de corrente contínua cria um campo magnético suficiente para levar os núcleos magnéticos à região de saturação da curva  $B \times H$  do dispositivo, fazendo com que ele tenha uma permeabilidade magnética relativa próxima de  $\mu_r \cong 1$ . Para a corrente alternada do circuito principal de potência, em condições normais de operação, o circuito é semelhante a um reator de núcleo de ar e o campo magnético gerado

por suas bobinas não é suficiente para tirar a curva BxH da saturação, resultando em um circuito de baixa impedância, assim como mostrado no gráfico da corrente  $I_1$  da figura 3.21.

Quando ocorre um curto-circuito, o campo magnético gerado pela bobina de corrente alternada que estiver se opondo ao campo magnético gerado pela corrente contínua irá fazer com que um dos núcleos magnéticos do LCESNS saia da região de saturação e vá para a região linear da curva BxH, que é referente à curva  $I_2$  da figura 3.21, dependendo do semiciclo em que ocorreu a falta, resultando em um aumento no valor da impedância vista pelo circuito de corrente alternada, limitando assim a corrente de falta [36].

No mesmo instante que ocorre o curto-circuito, um transformador de corrente envia um sinal para um circuito que identifica a falta, que por sua vez envia um comando a uma chave eletrônica rápida desconectando a fonte de alimentação de corrente contínua da bobina supercondutora.

Esta ação faz com que a bobina de saturação se desmagnetize mais rapidamente através de um resistor e um diodo de roda livre ligados em paralelo com ele, fazendo com que o fator de limitação melhore ao decorrer do tempo, pois leva o núcleo para uma região linear da curva BxH e também impede que a tensão induzida pela corrente de curto-circuito e pelo próprio circuito de descarga da bobina danifiquem a fonte de corrente contínua.

O valor deste resistor que está em série com o diodo deve ser dimensionado de maneira que o decaimento da corrente contínua do circuito seja o mais rápido possível sem que a tensão ultrapasse o valor nominal da chave que abre o circuito [37].

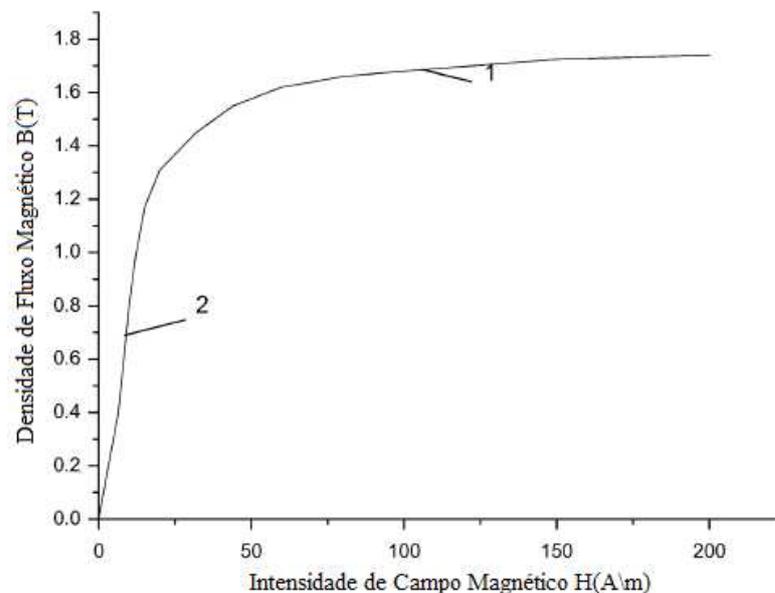


Figura 3.22: Aproximação da curva BxH do LCESNS (adaptado de [35])

Como visto anteriormente, o LCESNS é composto por 2 núcleos magnéticos, um com bobina de corrente contínua e duas bobinas de corrente alternada. Embora a permeabilidade do núcleo magnético varie de ponto a ponto da curva de magnetização, para efeito de análise, pode-se dividir a curva  $B \times H$  do LCESNS em dois segmentos de reta com diferentes inclinações, denominados 1 e 2, respectivamente, como pode ser observado na figura 3.22.

Supõe-se que o número de espiras de cada bobina de corrente alternada e da bobina de corrente contínua sejam  $N_{CA}$  e  $N_{CC}$ , o comprimento médio do circuito magnético seja  $l$  e a área da secção transversal do núcleo magnético seja  $A$ .

De acordo com a figura 3.22, no estado saturado, a permeabilidade relativa  $\mu_n$  de um núcleo apresenta uma faixa de variação de 20 a  $100\mu_r$ , onde  $\mu_r$  é a permeabilidade magnética do ar. O fluxo de dispersão pode ser ignorado e a projeção da intensidade de campo magnético  $H$  pode ser considerada como constante.

Baseado no equacionamento apresentado por [35] pode-se descrever o funcionamento do LCESNS da seguinte maneira:

De acordo com a lei de circuitação de Ampère tem-se:

$$N_d I_d + N_c i_c = H_1 l \quad (3.8)$$

$$N_d I_d - N_c i_c = H_2 l \quad (3.9)$$

Onde  $N_d$  é o número de espiras do enrolamento de corrente contínua,  $I_d$  é a corrente elétrica no enrolamento de corrente contínua,  $N_c$  é o número de espiras de cada enrolamento de corrente alternada,  $i_c$  é a corrente do circuito de corrente alternada,  $l$  é o comprimento médio dos núcleos e  $H_1$  e  $H_2$  são as intensidades dos campos magnéticos dos núcleos 1 e 2, respectivamente. Percebe-se que o sinal negativo corresponde ao enrolamento de corrente alternada que cria o campo magnético inverso ao campo magnético de corrente contínua e o sinal positivo é correspondente ao enrolamento que cria o campo concordante, resultando nas intensidades de campo magnéticos  $H_1$  e  $H_2$ , satisfazendo as condições mostradas na Figura 3.21.

Para o cálculo das tensões nos terminais dos enrolamentos de corrente alternada do LCESNS ( $u(t)$ ), pode-se utilizar as seguintes equações:

$$u(t) = \frac{N_c^2 A \mu_n}{l} \frac{di_c}{dt} + \frac{N_c^2 A \mu_f}{l} \frac{di_c}{dt} + i_c R \quad (3.10)$$

Onde  $A$  é a área da seção transversal do núcleo magnético em  $m^2$ ,  $\mu_n$  é a permeabilidade magnética do núcleo magnético quando o LCESNS está na condição normal de operação da rede, ou seja, quando ele se encontra saturado,  $\mu_f$  é a permeabilidade magnética do núcleo quando ele sai da saturação,  $l$  é o comprimento magnético médio do núcleo em metros e  $R$  é a soma da carga e das resistências elétricas dos enrolamentos de corrente alternada.

Sendo  $\alpha_1$  a inclinação da curva de  $B \times H$  na zona de saturação da figura 3.22 e  $\alpha_2$  a inclinação da mesma curva na região não saturada (linear) pode-se escrever [35]:

$$u(t) = (tg \alpha_1 + tg \alpha_2) \frac{di_c}{dt} + i_c R \quad (3.11)$$

Este equacionamento possibilita o cálculo do valor da tensão resultante em função das propriedades magnéticas e das dimensões do núcleo magnético do LCESNS em condição normal de operação e em condição de curto-circuito. No Apêndice I apresenta-se o código de cálculo em Matlab que permitiu o ajuste dos parâmetros iniciais para simulação dos pontos de operação do LCESNS.

O LCESNS foi estudado pela empresa Zenergy Power Pty. Ltd. que desenvolve produtos que utilizam tecnologia de supercondutores. Este grupo construiu várias unidades, dentre as quais pode-se destacar um protótipo de 15kV/24MVA, que foi submetido a faltas de 23kA e foi também instalado em uma linha de um sistema real de 13,1kV nos Estados Unidos [34]. Os testes realizados nesse protótipo mostraram capacidade de limitação de corrente que chegam a aproximadamente 46% para corrente prospectiva de 25kA. A queda de tensão em seus terminais durante regime permanente é de 1% para correntes de carga de 1,2kA.

O LCESNS, cujos resultados dos ensaios foi reportado em [34], funciona de maneira diferente, pois nesse protótipo a fonte de alimentação de corrente contínua, que satura o núcleo magnético, não é desligada na ocasião de uma falta, não levando em consideração a desmagnetização do núcleo durante a limitação da falta, portanto, isto implica em uma dinâmica diferente do LCESNS testado neste trabalho, podendo levar a um fator de limitação menor nos semiciclos subsequentes em relação ao primeiro pico da falta e a fonte de

alimentação de corrente contínua teria que suportar a tensão induzida pelo curto-circuito em seus terminais, para que não se danificasse.

Um outro grupo de pesquisa de LCESENS de destaque fica situado na China e é vinculado à empresa Innopower Superconductor Cable Co. Este grupo também desenvolveu várias unidades de limitadores de corrente supercondutores, tendo destaque para um de 35kV/90MVA que foi construído, testado em laboratório e instalado em um sistema de distribuição, onde foi submetido a testes de curtos-circuitos com o intuito de verificar o seu desempenho em campo [38] e [39].

Esse equipamento apresenta um dispositivo de detecção de falta para proteção da fonte de alimentação de corrente contínua, porém o autor não descreve detalhadamente o funcionamento desse dispositivo, mostrando somente o diagrama de blocos ligado a um IGBT.

Os resultados dos testes realizados mostraram uma redução na onda prospectiva de corrente de curto-circuito de 41kA de aproximadamente 40%. Para regime permanente, apresenta queda de tensão de 1% funcionando com corrente de 1,5kA a uma tensão de 35kV. Seu tempo de detecção de falta é de 1ms e tempo de atuação de 5ms, recuperando-se após 800ms depois da falta.

Recentemente foi desenvolvido um LCESENS por esse mesmo grupo para 220kV/300MVA que é o maior limitador do tipo supercondutor instalado no mundo. Ele está em operação em uma rede de energia de 220kV na China [40]. Suas dimensões externas são 8m x 8m x 9m, sua corrente nominal é de 800A com corrente limitada a 30kA para uma corrente prospectiva de falta de 50kA, com tempo de atuação imediato e tempo de recuperação de 500ms. Sua impedância total em regime permanente é de 1,85 $\Omega$ , o peso total do equipamento é de 120t e ele pode ser visualizado na figura 3.23 [40].



**Figura 3.23: LCESENS da Innopower de 220kV/300MVA [40]**

## **4. Projeto de limitadores de correntes elétricas com núcleo magnético saturado usando técnicas de elementos finitos**

Neste capítulo serão abordadas as etapas do desenvolvimento do limitador de correntes elétricas com núcleo magnético saturado (LCENS), que foram realizadas no LADIME/FEEC/UNICAMP, através de simulações com software que utiliza o método de elementos finitos. Serão também apresentados os resultados das simulações realizadas, com destaques para o comportamento dos campos magnéticos nos núcleos magnéticos e para as correntes e tensões do LCENS. Discussões a respeito da importância do desenvolvimento de um circuito de proteção para a fonte de corrente contínua do LCENS serão apresentadas.

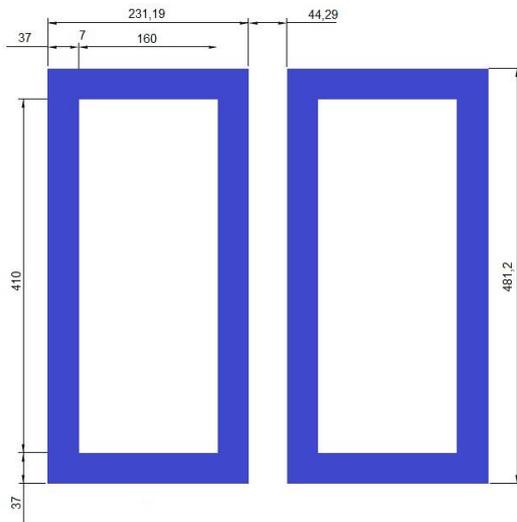
Os softwares utilizados nas simulações são da empresa ANSYS e se chamam Maxwell e Simplorer. O Maxwell utiliza elementos finitos e, para tanto, é necessário modelar a geometria das partes envolvidas do LCENS que são os núcleos ferromagnéticos, enrolamentos de corrente contínua e corrente alternada. Também é necessário definir o tipo de material de cada elemento da simulação, para a simulação realizada, utilizou-se o material de cobre da biblioteca do software para os condutores e para o núcleo ferromagnético modelou-se o material a partir dos dados do fabricante do material aço silício de grão orientado M-125 inserindo os dados de sua curva BxH correspondente.

O Simplorer é um resolvidor (“*solver*”) de circuitos elétricos que possibilita a associação de simulações de circuitos elétricos com co-simulações que utilizam elementos finitos realizadas pelo Maxwell.

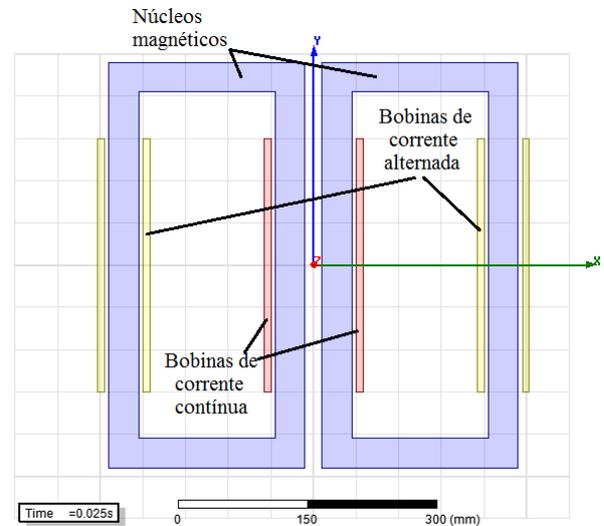
### **4.1 Desenvolvimento da topologia do limitador de correntes elétricas com núcleo magnético saturado usando o aplicativo Maxwell**

Para o desenvolvimento do LCENS, usando o aplicativo Maxwell, foi realizada a modelagem em duas dimensões com os valores reais de uma fase dos seus núcleos ferromagnéticos, conforme mostra a figura 4.1. Nela pode-se ver as dimensões das janelas do núcleo magnético utilizado nas simulações. As janelas do núcleo tem dimensões internas de 160x410mm e a espessura do núcleo em todos os seus segmentos é de 37mm. O comprimento médio no centro de cada núcleo é de 1282,4mm.

Essas medidas foram determinadas a partir de cálculos de circuitos magnéticos. O detalhamento destes cálculos é apresentado no Anexo I desta tese.



**Figura 4.1: Dimensões do núcleo do LCENS em mm**

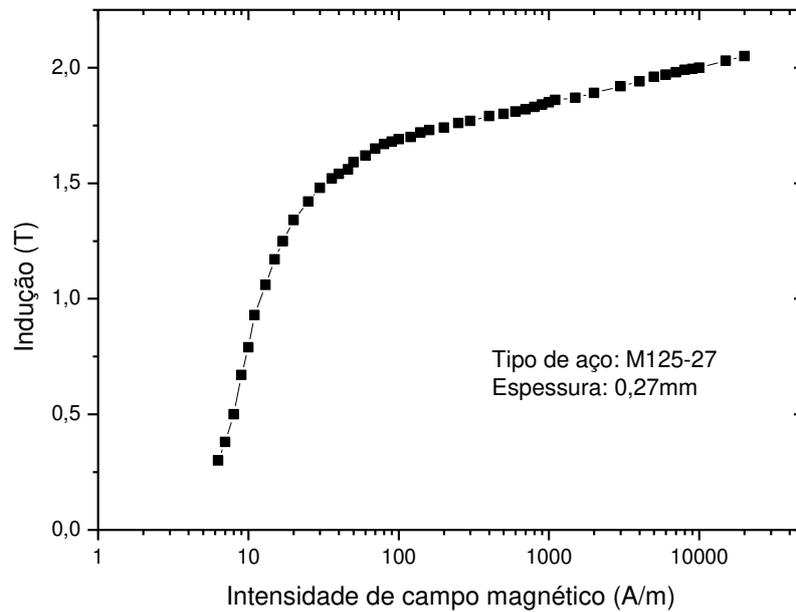


**Figura 4.2: Núcleo do LCENS com os enrolamentos de corrente contínua e corrente**

A figura 4.2 mostra o modelo de uma das fases do LCENS usado no aplicativo Maxwell. O núcleo magnético é representado pelas duas janelas separadas pelo espaçamento central para permitir o arranjo hexagonal trifásico. As bobinas de corrente alternada, que fazem parte do circuito principal, são as áreas retangulares indicadas na figura 4.2 que envolvem as pernas externas do núcleo. A bobina de corrente contínua é representada pelas áreas retangulares que envolvem as pernas centrais do núcleo.

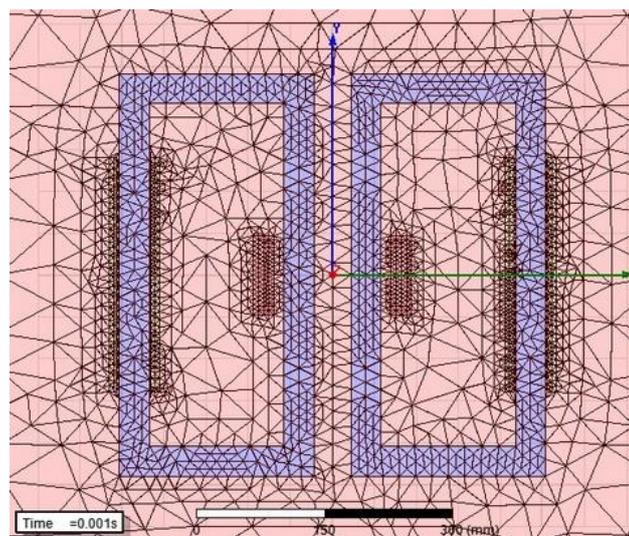
Para que a simulação tenha dinâmica mais próxima do resultado real, deve-se especificar os materiais de cada elemento do modelo. O aço silício "Steel M125" foi escolhido para modelagem dos núcleos magnéticos e a curva BxH deste material pode ser visualizada na figura 4.3. Para modelagem dos enrolamentos de corrente contínua e de corrente alternada foram utilizados fios de cobre de seção de  $21,2\text{mm}^2$  e  $42,4\text{mm}^2$  respectivamente.

Definidas as dimensões dos núcleos magnéticos e a curva B x H do material utilizado para sua construção foi possível realizar o cálculo da quantidade de espiras das bobinas dos enrolamentos de corrente contínua e de corrente alternada do LCENS. Para este cálculo foram utilizadas as equações (3.8) e (3.9), que determinam as condições de saturação do núcleo magnético do LCENS para as condições de regime permanente e de curto-circuito (fora da saturação).



**Figura 4.3: Gráfico da curva BxH do material Steel M125 (Fe3,5%Si)**

Ao se modelar as bobinas, deve-se indicar qual a quantidade de espiras em cada enrolamento, respeitando-se o número de condutores e o valor da corrente para cada simulação, e definir o sentido da corrente (entrando ou saindo) em relação ao plano de corte visualizado no modelo usado na simulação.



**Figura 4.4: Malha de elementos finitos utilizada em simulação**

Para a simulação do LCENS, quanto maior a quantidade de elementos no mapeamento da malha de elementos finitos, mais refinados serão os resultados obtidos,



Através da variação de R5, gera-se a corrente prospectiva de curto-circuito do sistema. Para valores baixos de R5 tem-se valores altos de correntes prospectivas de curto-circuito. A fonte de corrente ideal I1 representa a fonte de corrente contínua (CC). S3 e S7 representam a chave IGBT e R8, S4 e S8 constituem o circuito de desmagnetização da bobina de saturação do núcleo. Os resistores R1, R2, R3, R6, R7 e R9 têm valores desprezíveis e foram utilizados juntamente com as chaves S5 e S9 somente por motivos numéricos exigidos pelo aplicativo Simplorer.

## 4.2 Simulações dinâmicas do LCENS

Foram realizadas simulações no domínio do tempo para análise das tensões, das correntes e dos campos magnéticos nos núcleos ferromagnéticos do LCENS para corrente de regime permanente e posteriormente, para ensaios de falta.

Em condições normais de operação, analisou-se a queda de tensão nos terminais do limitador para verificar o quanto ela interfere no circuito de potência em regime permanente, determinando-se um ponto ótimo de operação do LCENS (tabela 4.1).

Aumentando-se o valor da corrente do enrolamento de corrente contínua, os núcleos ferromagnéticos do LCENS ficam mais profundamente saturados, reduzindo o valor da impedância inserida pelos núcleos no circuito de corrente alternada em regime permanente e, conseqüentemente, reduzindo a queda de tensão em seus terminais.

Para verificação desse fenômeno, foram realizadas sucessivas simulações, variando a condição de carga para corrente de regime permanente de 17, 25 e 30A no circuito de corrente alternada e também variou-se o valor da corrente de magnetização do núcleo ferromagnético do LCENS de 10, 30, 50 e 70A, para diversos pontos de operação do núcleo magnético.

Os resultados das simulações realizadas podem ser observados nos gráficos das figuras 4.6, que apresentam as formas de ondas da tensão nos terminais do LCENS. Nota-se que para todas as condições de corrente de linha, com o aumento do valor da corrente contínua, obtendo-se maior saturação do núcleo magnético, ocorre uma redução dos valores das tensões nos terminais do limitador pelo fato da indutância do limitador ter diminuído.

A síntese dos resultados das várias simulações realizadas é apresentada na Tabela 4.1, que mostra a queda de tensão percentual em relação à tensão de fase nominal e a impedância aparente que o limitador de corrente insere no circuito regime permanente.

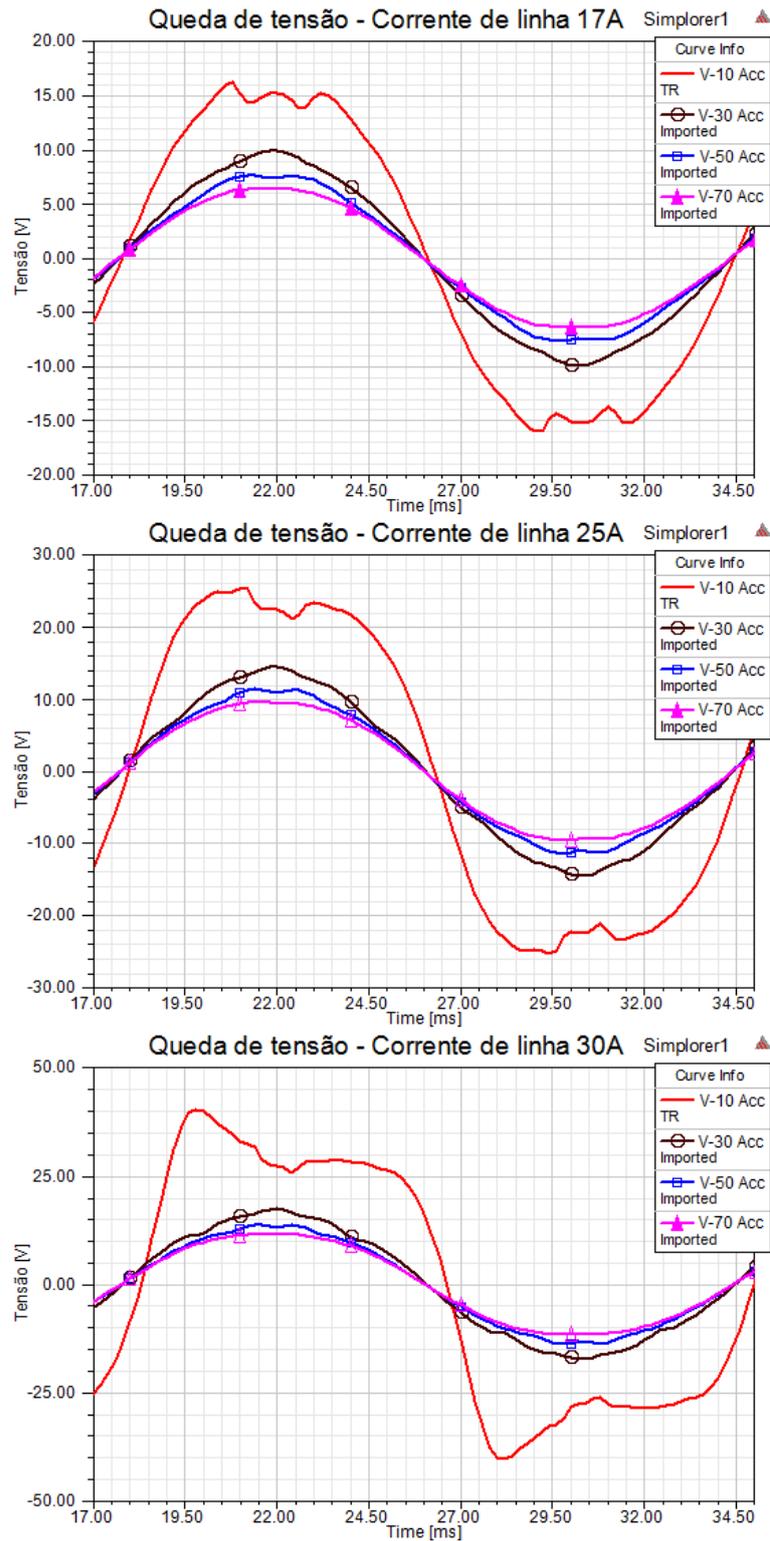


Figura 4.6: Tensões dos terminais do LCENS adquiridas em simulações

Tabela 4.1: Resultados das simulações do núcleo de ferro magnético

Corrente contínua na bobina de saturação (A)	Corrente de linha ( $A_{rms}$ )	Queda de tensão em uma fase ( $V_{rms}$ )	Queda de tensão em uma fase (%)	Impedância aparente de uma fase ( $\Omega$ )
<b>10</b>	17	10,6	4,8	0,62
	25	17,9	8,1	0,7
	30	26,2	11,9	0,87
<b>30</b>	17	7,0	3,1	0,41
	25	10,2	4,6	0,41
	30	12,3	5,6	0,41
<b>50</b>	17	5,2	2,3	0,30
	25	7,9	3,6	0,31
	30	9,5	4,3	0,32
<b>70</b>	17	4,5	2,0	0,26
	25	6,7	3,0	0,27
	30	8,2	3,7	0,27

Foram realizadas simulações que submetem o LCENS a várias condições de curto-circuito para avaliar seu desempenho para correntes prospectivas de falta nos valores de 1600, 1400, 600 e 300A com o intuito de verificar sua resposta dinâmica.

O gráfico da figura 4.7 mostra os resultados de simulações de um curto-circuito na rede elétrica com corrente de falta prospectiva de 1600A e duração de 70ms. Na simulação, que foi realizada usando o diagrama da figura 4.5, a chave S1 inicialmente se encontra aberta, para que, nos primeiros 5ms, a fonte de corrente contínua I1 magnetize a bobina de corrente contínua do LCENS com uma corrente de 70A. A partir dos 5ms a chave S1 se fecha e uma corrente de 30A eficazes começa a percorrer o circuito principal, que passa pelos dois enrolamentos de corrente alternada do LCENS e alimenta a carga R4.

No instante de tempo de 50ms, que é o momento em que a corrente passa por zero, a chave S2 é acionada, provocando um curto-circuito, que devido ao resistor R5, teria o valor de corrente de 1679A (indicada na figura 4.7 por: “corrente prosp.” marcador m1) no primeiro ciclo se não fosse pela ação do limitador de correntes elétricas. Porém, com a sua atuação, a corrente é limitada a aproximadamente 1329A no primeiro pico (Indicada na figura 4.7 por corrente limitada, marcador m2) e 830A (marcador m4) no terceiro pico, com fatores de limitação de 20,8% e 50,5%, respectivamente.

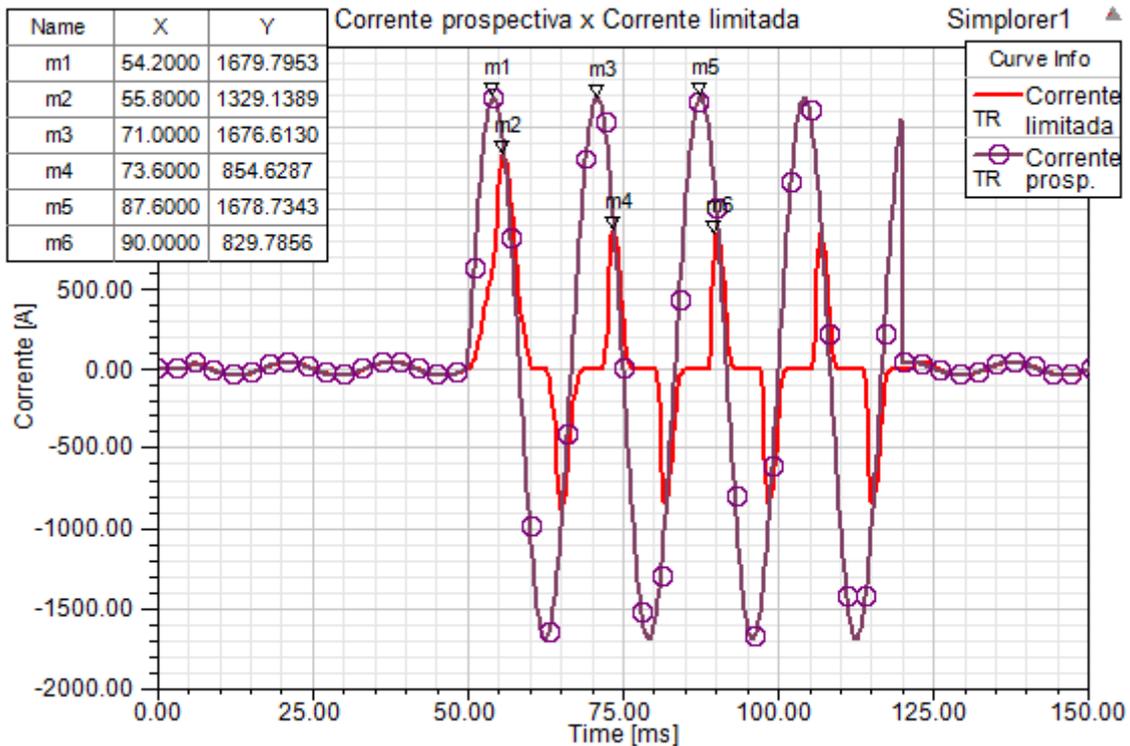
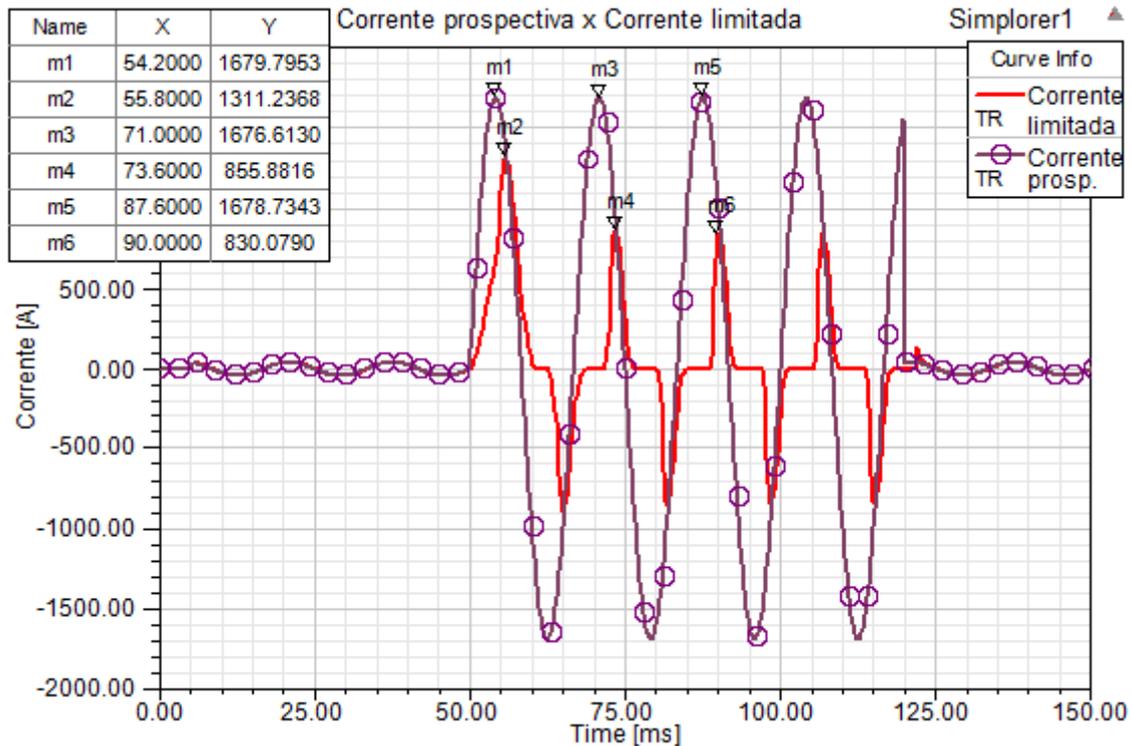


Figura 4.7: Simulação do LCENS com prospectiva de 1600A e corrente contínua de 70A

O aumento no fator de limitação é consequência da desmagnetização do núcleo do limitador pois, após 2ms do início do curto-circuito a chave S3 abre o circuito, retirando a corrente do circuito de corrente contínua e ao mesmo tempo S4 fecha o circuito com R8 para que a energia armazenada nesse enrolamento seja descarregada, reduzindo o campo magnético no núcleo e aumentando ainda mais a sua impedância sob ponto de vista do circuito de corrente alternada.

Após 70ms da ocorrência do curto-circuito, no instante correspondente a 120ms, a chave S6 é aberta, fazendo com que o curto-circuito seja extinto. Ao mesmo tempo, a chave S7 é fechada, fazendo com que a fonte de corrente contínua magnetize novamente o núcleo magnético do LCENS e então a corrente do circuito principal volta ao seu valor nominal.

Na figura 4.7 também pode ser observado que há um defasamento entre a corrente prospectiva de falta e a corrente limitada no momento que acontece a falta. Isto acontece porque o limitador insere uma impedância indutiva no circuito, fazendo com que a corrente limitada fique atrasada em relação à corrente prospectiva, que foi obtida através de simulação em um circuito com carga puramente resistiva.



**Figura 4.8:** Simulação do LCENS com prospectiva de 1600 A e corrente contínua de 50A

Para diversos valores de corrente de magnetização do núcleo magnético do LCENS, nota-se que o tempo e o efeito da desmagnetização do núcleo influencia principalmente no valor da corrente limitada do primeiro pico, assim como pode ser observado nos ensaios seguintes, onde foram simulados os casos para correntes de 50, 30 e 10A no enrolamento de corrente contínua.

Na figura 4.8 mostra-se o desempenho do LCENS para corrente contínua do enrolamento de magnetização com o valor de 50A. Nota-se que a corrente limitada no primeiro pico teve uma pequena redução de 1679 para 1311A, aumentando seu fator de limitação para 21,9%, nos semiciclos posteriores o fator de limitação manteve-se próximo de 20%, indicando que a corrente de descarga de energia armazenada na bobina de corrente contínua já teria sido descarregada através do circuito *shunt*.

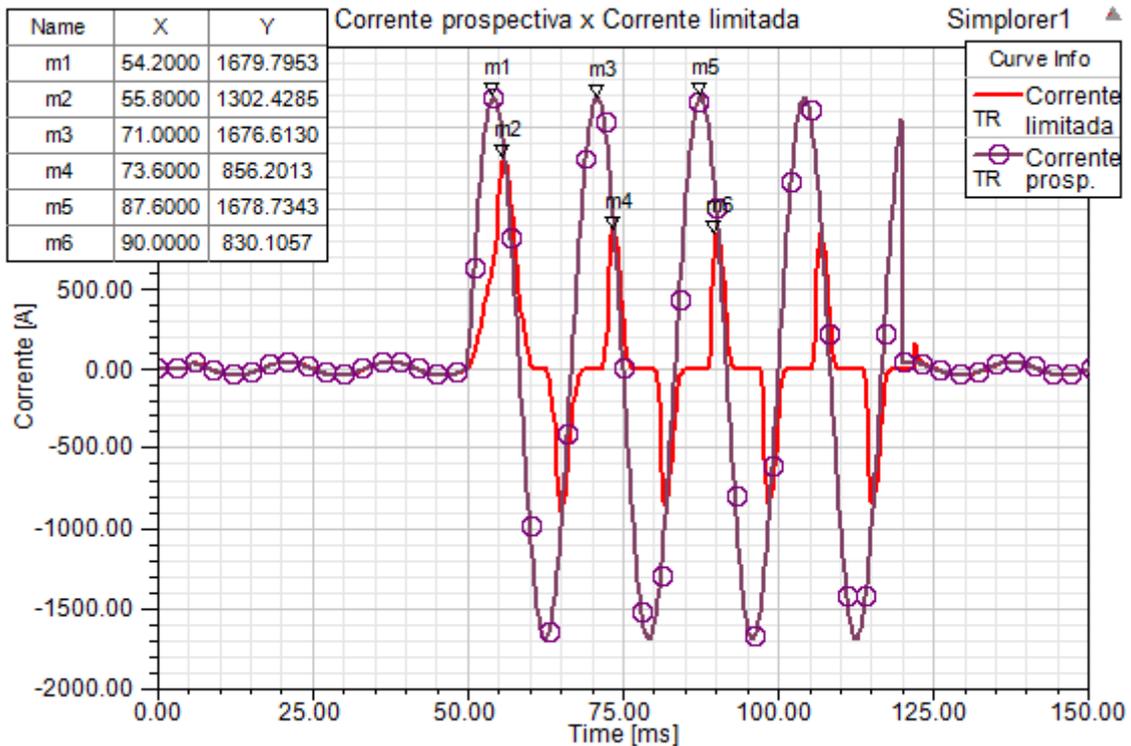


Figura 4.9: Simulação do LCENS com prospectiva de 1600A e corrente contínua de 30A

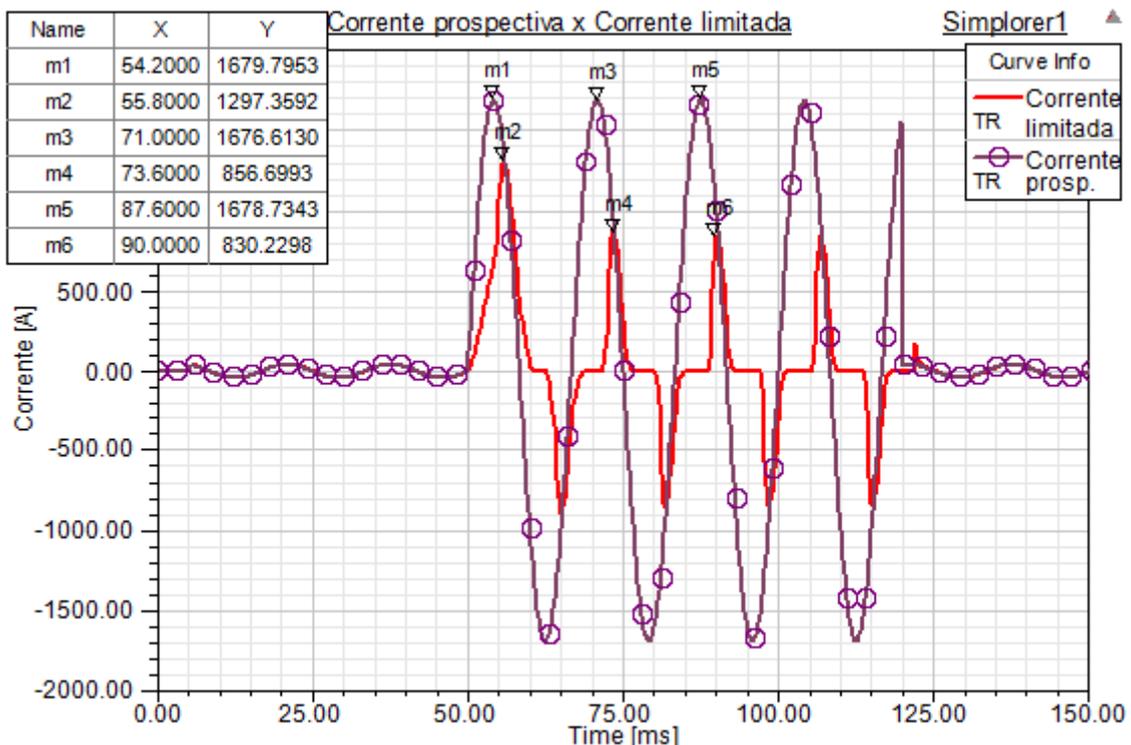


Figura 4.10: Simulação do LCENS com prospectiva de 1600A e corrente contínua de 10A

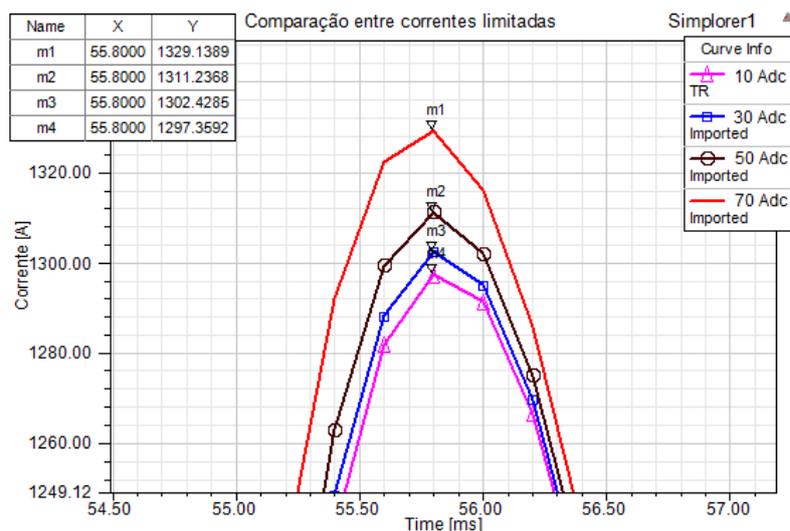
Para a simulação com corrente de magnetização do núcleo de 30A (figura 4.9), o valor da corrente limitada diminui de 1679 para 1302A, tendo um fator de limitação de 22,4% e para o caso com corrente de magnetização de 10A (figura 4.10), o valor da corrente limitada

atinge 1297A e fator de limitação de 22,7%, mostrando a influência da saturação do núcleo na corrente limitada.

A corrente de magnetização do LCENS tem influência direta na queda de tensão nos terminais dele quando o sistema está em condições normais de operação.

Em condição de curto-circuito, ao se comparar os picos das correntes limitadas para diferentes correntes de magnetização do núcleo (figura 4.11), como visto nas simulações anteriores, há uma pequena redução no fator de limitação à medida em que se aumenta a corrente de magnetização do núcleo. Isto ocorre devido ao fato de que quanto mais se satura o núcleo do LCENS, menor é a impedância do mesmo, portanto ocorre essa diminuição do fator de limitação pelo aumento da corrente de saturação.

Essa redução do fator de limitação, ao se aumentar a corrente de saturação do núcleo magnético, não prejudica o funcionamento do LCENS, tendo em vista que: a) a ordem de grandeza das correntes de falta é muito maior do que a diferença dos seus valores de pico sob diferentes correntes de saturação do núcleo magnético; b) o LCENS mantém condições para que o disjuntor possa abrir com segurança durante a ocorrência da falta; c) a profunda saturação do núcleo magnético através de corrente contínua é necessária, pois, como foi visto anteriormente, ela tem muita influência na queda de tensão nos terminais do LCENS em regime permanente.



**Figura 4.11: Comparação das corrente limitadas pelo LCENS adquiridas em simulações**

Foram realizadas simulações com outros valores de correntes prospectivas, com o intuito de verificar o comportamento do fator de limitação na ocorrência de faltas para os valores de correntes de curto-circuito de 1400, 600 e 340A.

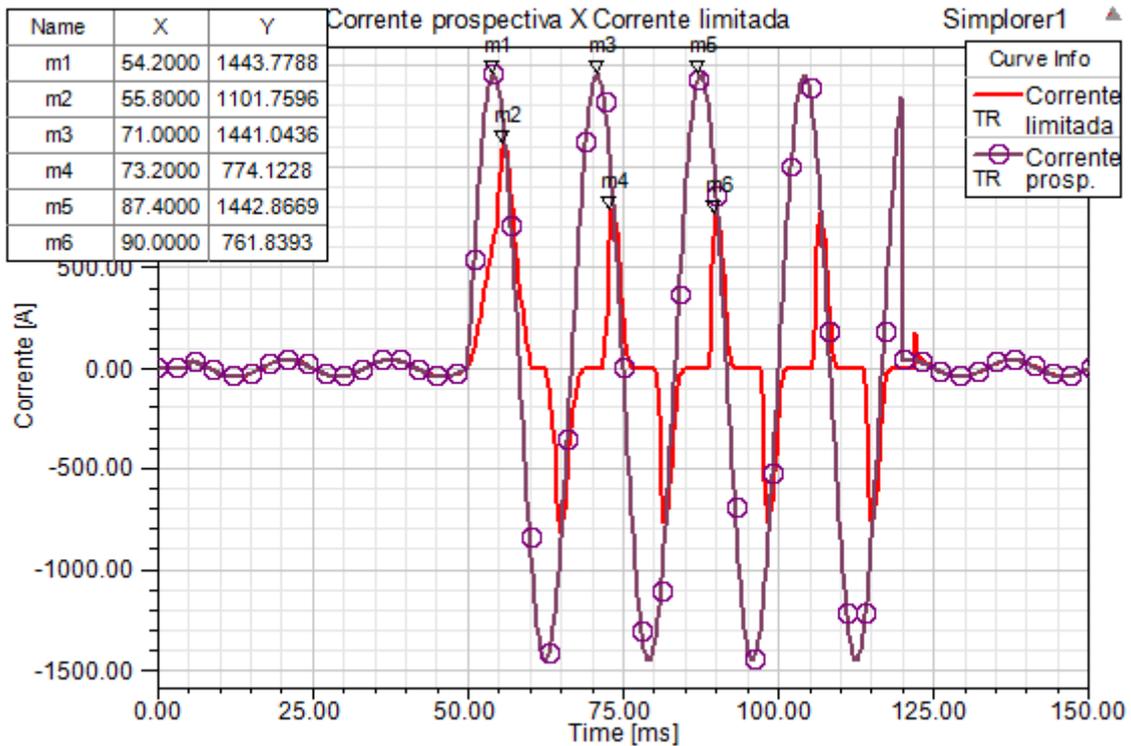
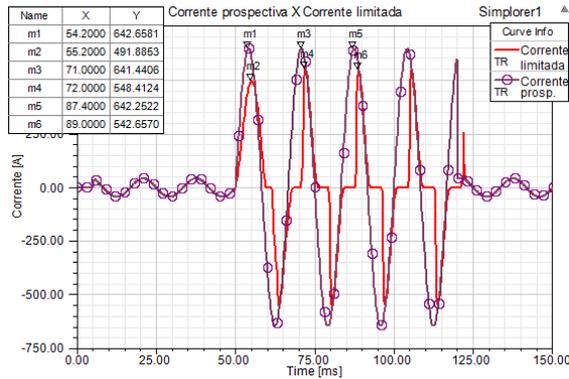


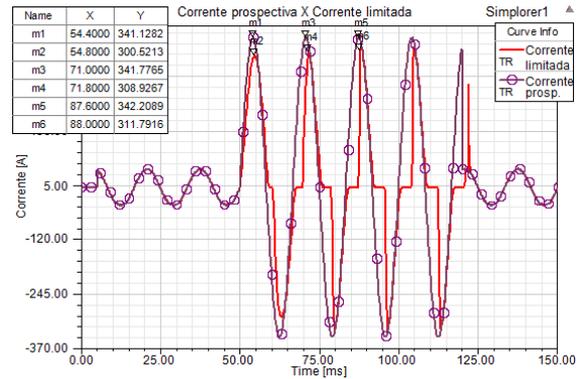
Figura 4.12: Simulação do LCENS com prospectiva de 1400A e corrente contínua de 70A

Pode-se observar para a corrente prospectiva de 1400A, na figura 4.12 que a corrente limitada assume um comportamento análogo ao do curto-circuito com corrente de falta de 1600A, atingindo no primeiro pico um valor de 1101A, reduzindo o seu valor devido à desmagnetização do núcleo, chegando a 761A no terceiro pico, tendo os fatores de limitação de 23,7% e 47,2% respectivamente.

Para as simulações com correntes prospectivas de 600 e 340A, observa-se um comportamento diferente em relação aos casos anteriores como ilustrado na figura 4.13 e na figura 4.14. No primeiro semiciclo, a corrente limitada atinge um valor de pico de 491A para a corrente prospectiva de 600A. Para a corrente prospectiva de 340A, a corrente limitada atinge 300A, tendo fatores de limitação de 23,5% e 12% respectivamente. Nos semiciclos posteriores, este valor de pico aumenta, assumindo valores próximos aos da corrente prospectiva. Isto ocorre pois o LCENS não está operando na faixa de corrente de curto-circuito para qual ele foi projetado, que é para valores acima de 1kA, portanto a sua atuação não será tão eficiente.

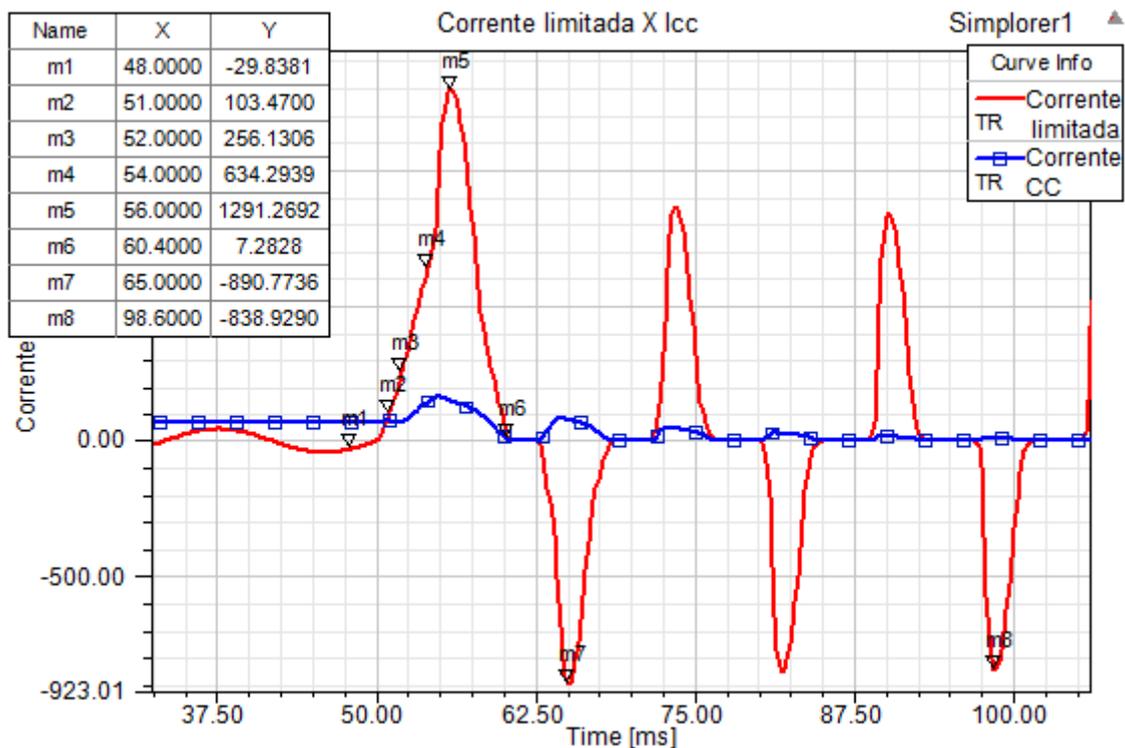


**Figura 4.13: Simulação do LCENS com prospectiva de 600A e corrente contínua de 70A**



**Figura 4.14: Simulação do LCENS com prospectiva de 300A e corrente contínua de 70A**

Utilizando o software de elementos finitos (*Maxwell*), pode-se analisar fenômenos magnéticos que ocorrem no LCENS. Dentre esses fenômenos, um de grande importância é a densidade de campo magnético no interior do núcleo magnético do limitador, que permite verificar em qual nível de saturação se encontra o material magnético do dispositivo durante sua operação.



**Figura 4.15: Corrente limitada X Corrente de saturação do núcleo do LCENS**

Para análise do comportamento do campo magnético no interior do núcleo ferromagnético do LCENS foi escolhido o caso em que a corrente prospectiva tenha amplitude de 1600A e o circuito de magnetização do núcleo tenha uma corrente contínua de 70A como pode-se observar na figura 4.15. Traçou-se o perfil do vetor indução magnética

( $\vec{B}$ ) para determinados instantes da curva de corrente limitada que estão identificados pelos marcadores de m1 a m8.

O marcador m1 se refere ao momento anterior à falta, onde a corrente elétrica de linha está em seu semiciclo negativo. Nessa condição, o circuito de corrente alternada gera um fluxo magnético concordante e um fluxo magnético inverso em cada uma das janelas do núcleo magnético em relação ao campo magnético gerado pela corrente contínua circulando na bobina de magnetização. Pela figura 4.16, que corresponde ao marcador m1 no instante de tempo 48ms, pode-se observar que o núcleo magnético encontra-se saturado em toda a sua extensão, destacando-se uma pequena diferença entre os valores de indução magnética da perna direita e da esquerda do núcleo, onde na perna direita encontra-se com uma magnitude menor, devido ao fluxo magnético inverso gerado pela corrente alternada nessa região do núcleo.

Na figura 4.17, que corresponde ao marcador m2 no instante de tempo 51ms, já ocorreu o curto-circuito e a corrente elétrica se encontra na condição do ponto m2, que é a subida do primeiro pico da corrente de falta. Observa-se que, neste momento, devido ao fato da elevação da corrente estar no semiciclo positivo, o núcleo que tem seu  $\vec{B}$  enfraquecido é o do lado esquerdo, ao contrário do caso anterior. Como o valor da corrente é maior, o valor resultante de  $\vec{B}$  é menor que o do marcador m1.

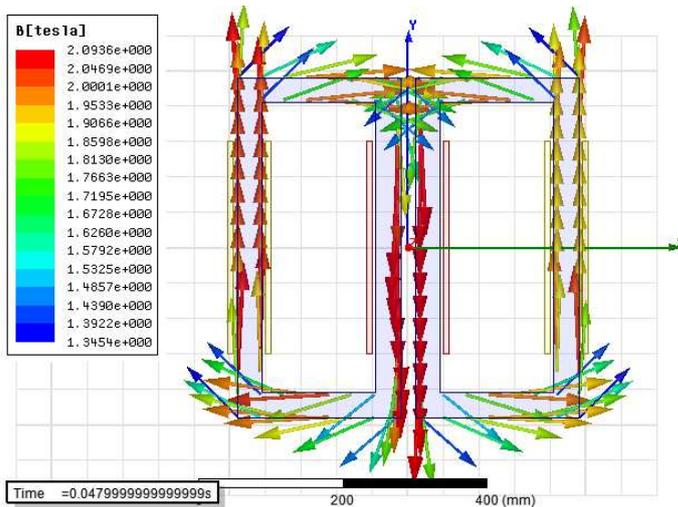


Figura 4.16: Vetor indução magnética  $\vec{B}$  no marcador m1

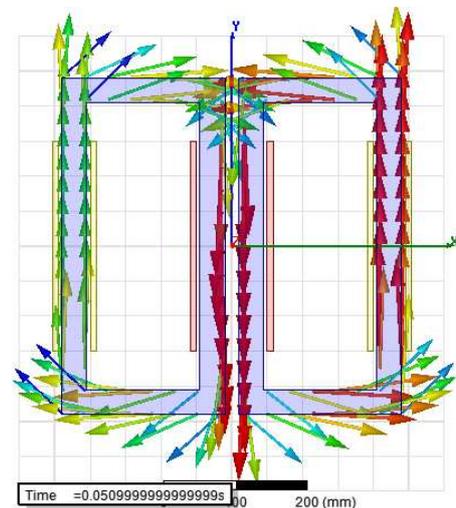


Figura 4.17: Vetor indução magnética  $\vec{B}$  no marcador m2

As figuras 4.18 e 4.19, que correspondem aos marcadores m3 e m4, nos instantes de tempo 52ms e 54 ms respectivamente, estão localizados um pouco mais à frente da região de subida da corrente de falta. Pode-se observar que no instante do marcador m3, o valor de  $\vec{B}$  se encontra muito reduzido, quase nulo. Já no marcador m4, o valor de  $\vec{B}$ , gerado pela

corrente alternada, inverte o seu sentido em relação ao valor de  $\vec{B}$  imposto pela corrente contínua, reduzindo a magnitude resultante na região central do núcleo magnético.

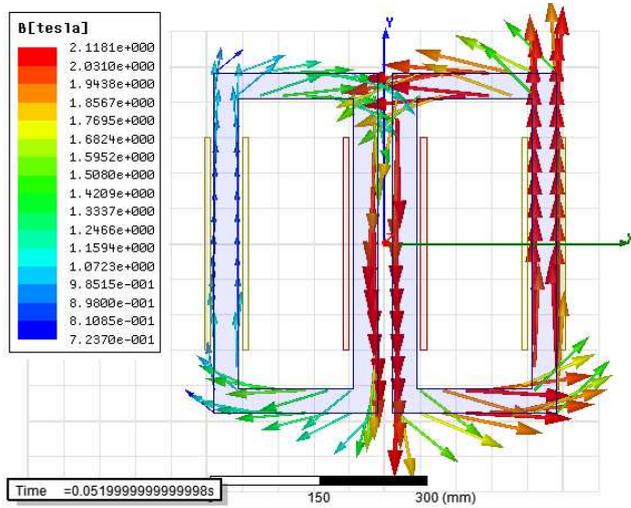


Figura 4.18: Vetor indução magnética  $\vec{B}$  no marcador m3

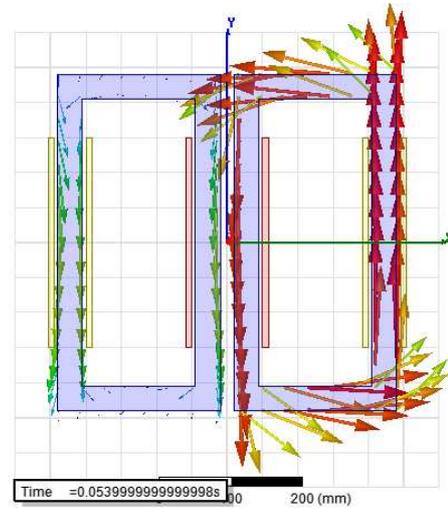


Figura 4.19: Vetor indução magnética  $\vec{B}$  no marcador m4

O valor máximo de corrente de falta é alcançado no marcador m5, que pode ser observado na figura 4.20, correspondente ao instante de tempo de 56ms. O valor de  $\vec{B}$  neste instante alcança aproximadamente 2,4T, reduzindo drasticamente o valor de  $\vec{B}$  gerado pelo circuito de magnetização e saturando inversamente a perna da janela do núcleo em que o enrolamento de corrente alternada está instalado.

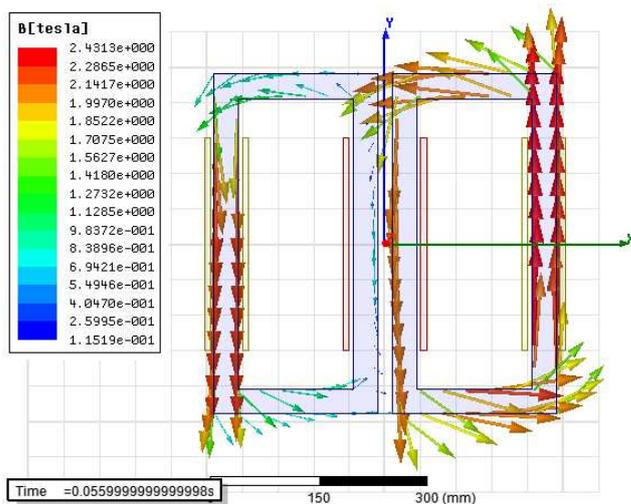


Figura 4.20: Vetor indução magnética  $\vec{B}$  no marcador m5

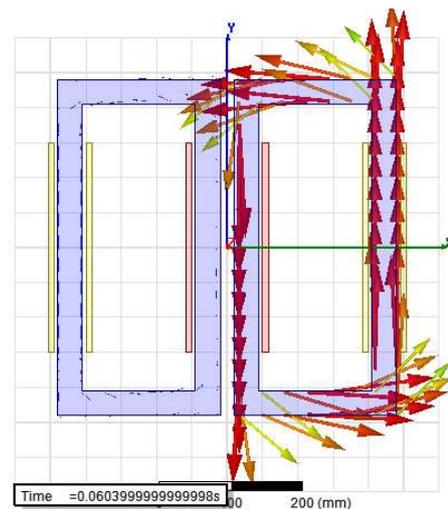


Figura 4.21: Vetor indução magnética  $\vec{B}$  no marcador m6

A figura 4.21 mostra o marcador m6, correspondente ao instante de tempo de 60,4ms que está em uma região de valor de  $\vec{B}$  próxima do zero, tanto para a corrente de fase

como para a corrente contínua do enrolamento de saturação do núcleo magnético, portanto, observa-se que o  $\vec{B}$  na janela esquerda é praticamente nulo.

Os pontos m7 e m8 tem a finalidade de mostrar a redução do valor de  $\vec{B}$  criado pelo circuito de corrente contínua ao longo do tempo, estando os marcadores nos instantes de tempo de 65ms e 98,6ms respectivamente. Observa-se que na figura 4.22 o valor de  $\vec{B}$  da parte central da janela direita do limitador é pequeno e a orientação é para baixo, enquanto que na figura 4.23, na mesma região, o valor de  $\vec{B}$  se encontra mais intenso e orientado para cima. Isto indica que no instante de m7 a energia armazenada do campo magnético no núcleo ainda não tinha se descarregado através do resistor *shunt* do circuito de proteção, enquanto, no instante de m8, apesar do valor da corrente de falta ser menor do que no marcador m7, o valor do  $\vec{B}$  resultante é maior, indicando que não há mais influência do campo magnético gerado pela corrente contínua do enrolamento de saturação.

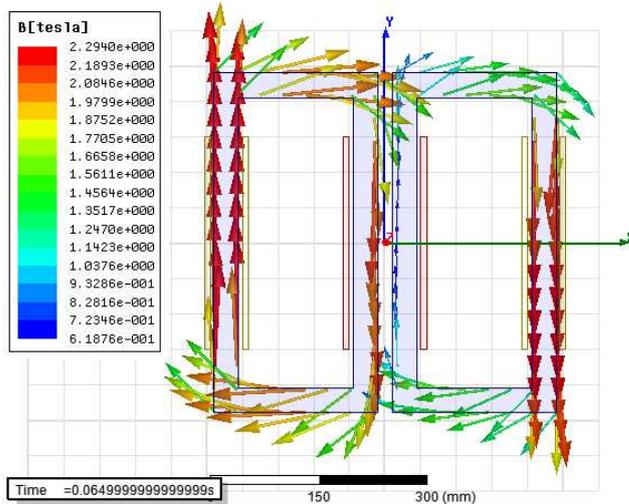


Figura 4.22: Vetor indução magnética  $\vec{B}$  no marcador m7

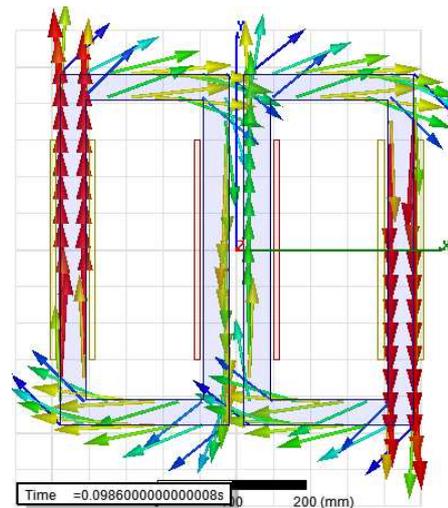


Figura 4.23: Vetor indução magnética  $\vec{B}$  no marcador m8

Nas figuras 4.24 e 4.25 é apresentado o gráfico da distribuição do campo magnético nos núcleos no momento anterior ao curto-circuito e no momento que ocorre o curto-circuito e o núcleo se desmagnetiza. Nota-se que no momento anterior ao curto-circuito os núcleos magnéticos encontram-se totalmente saturados nas regiões das bobinas de corrente alternada. No momento em que ocorre o curto-circuito, o campo da perna esquerda do núcleo magnético é enfraquecido pelo fluxo magnético inverso ao do campo magnético de corrente contínua atingindo a região linear da curva BxH do material magnético e inserindo uma impedância indutiva, limitando assim a corrente de curto-circuito.

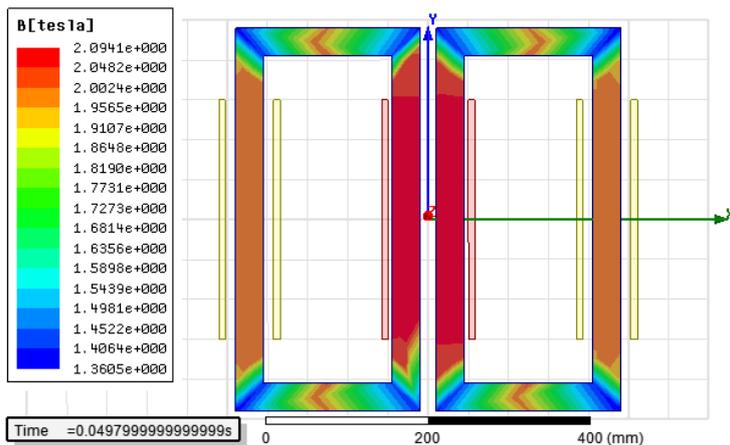


Figura 4.24: Distribuição de campo magnético antes da ocorrência do curto-circuito

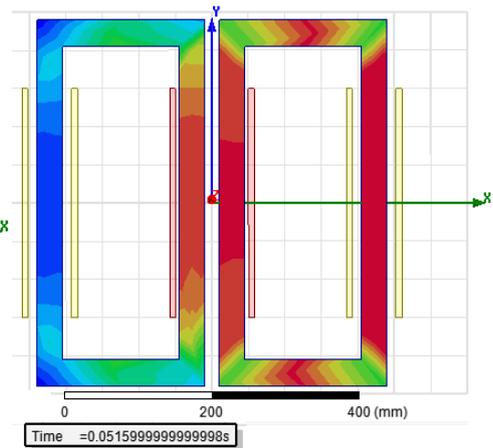


Figura 4.25: Distribuição de campo magnético no momento da ocorrência do curto-circuito

### 4.3 Simulação do LCENS com circuito de proteção

As simulações apresentadas trataram do dimensionamento e otimização do LCENS, porém, como foi dito anteriormente, deve-se levar em consideração, que a energia acumulada no enrolamento de saturação do núcleo magnético que se descarrega pelo resistor *shunt* do circuito de proteção, combinada com a tensão induzida pelo circuito de corrente alternada no momento da falta, produzem uma elevação de tensão nos terminais do enrolamento de saturação do LCENS, podendo causar danos à fonte de corrente contínua de alimentação. Portanto, é necessário a implementação de um circuito, que no momento do curto-circuito, desligue essa fonte, protegendo-a.

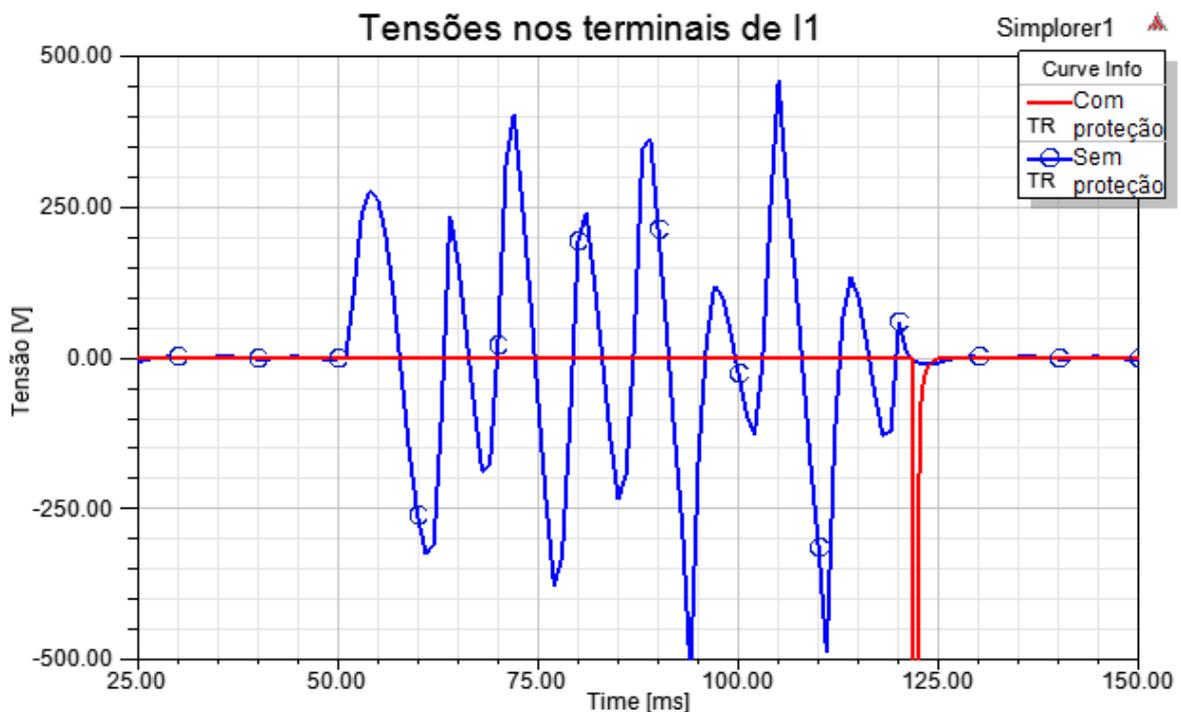
Maiores detalhes sobre este sistema de proteção da fonte de corrente contínua serão providos no capítulo 5.

Neste item serão apresentados os efeitos que comprovam a necessidade do sistema de proteção e uma análise comparativa da dinâmica do LCENS operando com e sem o sistema de proteção.

Na figura 4.5, o circuito de proteção tem 2 partes, uma delas são as chaves S3 e S7, que representam uma chave eletrônica rápida (IGBT) e têm a função de desligar a fonte de corrente contínua do circuito de magnetização do núcleo do LCENS, e a outra parte consiste nas chaves S4, S8 e o resistor R8 que têm a função de atuarem como um circuito de descarga para a energia armazenada nos enrolamentos da bobina que gera o campo magnético para o LCENS.

O funcionamento da primeira parte é o seguinte: quando ocorre o curto-circuito, a chave S3 abre e desliga a fonte I1 em aproximadamente 1ms após a ocorrência da falta, pois este é o tempo máximo estimado para que o circuito de proteção atue e faça com que o IGBT desligue a fonte de corrente contínua do circuito real. Quando o curto-circuito se extingue, após alguns milissegundos, a chave S7 se fecha restabelecendo a alimentação da fonte I1 para o circuito de magnetização do LCENS.

Na figura 4.26, são apresentados os gráficos das tensões nos terminais da fonte I1 durante a ocorrência de um curto-circuito. Esses gráficos foram construídos em duas situações: uma em que há o circuito de detecção de falta, indicado pelo traço contínuo e a outra situação, que não apresenta o circuito de detecção de falta, indicada pelo traço com símbolo circular. Percebe-se, que para o caso que tem o circuito de proteção, no momento que ocorre a falta, a tensão nos terminais da fonte I1 fica próxima de zero. Por outro lado, no caso que não tem o circuito de proteção, a tensão induzida pelos enrolamentos do LCENS chega a valores próximos de 500V, o que poderia danificar a fonte de alimentação que é de corrente contínua.



**Figura 4.26: Comparação entre tensões induzidas nos terminais da fonte de corrente contínua do LCENS adquiridas em simulações.**

No instante de tempo 125ms há uma variação de tensão que é ocasionado por um problema numérico, pois, neste instante, a fonte I1 está magnetizando novamente o núcleo do limitador. Como se trata de uma fonte ideal, ela aplica uma tensão muito elevada para que a

resposta da corrente seja rápida. No caso real isto não acontece, pois o que determina a tensão nesse ponto do circuito é a fonte de corrente contínua.

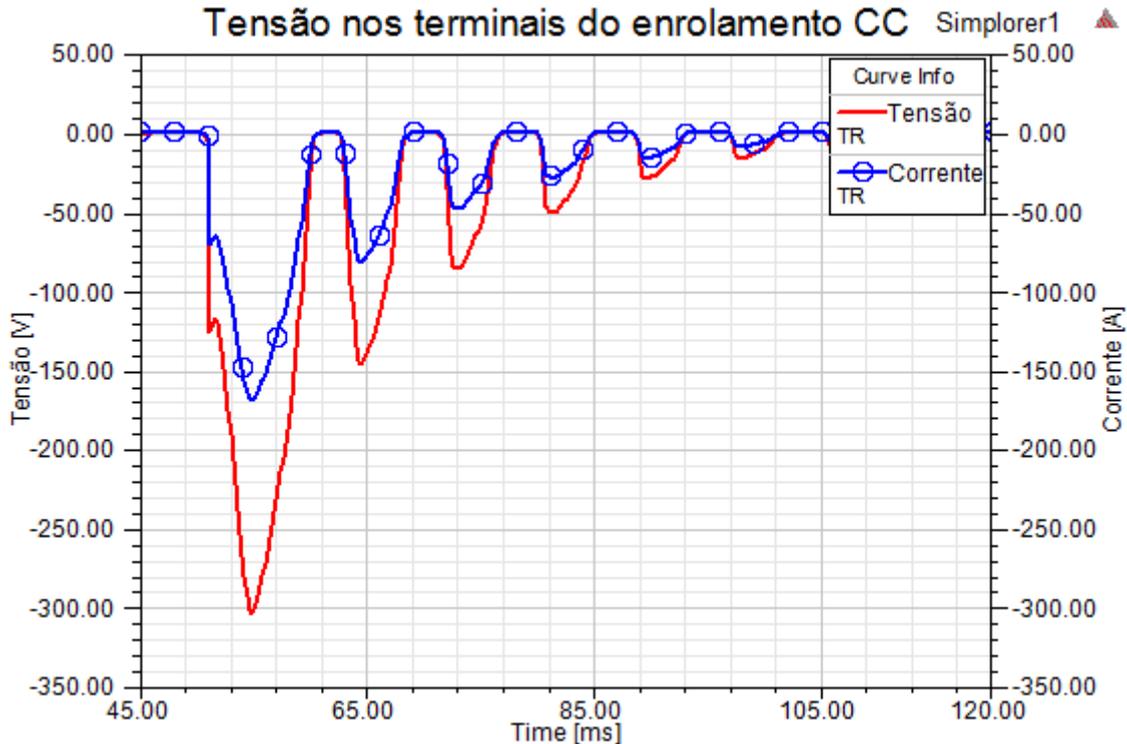


Figura 4.27: Corrente de descarga e tensão nos terminais do circuito magnético do LCENS

A segunda parte do sistema de proteção é responsável pela desmagnetização do núcleo. No seu funcionamento, quando ocorre o curto-circuito e a fonte de corrente contínua é desligada, a chave S4 se fecha, permitindo que o núcleo magnético do LCENS se descarregue através do resistor R8, que foi dimensionado para que durante esse processo de descarga a tensão lida por VM3, que é a mesma dos terminais do IGBT com a fonte I1, fique em torno de 300V. O dimensionamento foi realizado de acordo com a equação (4.1):

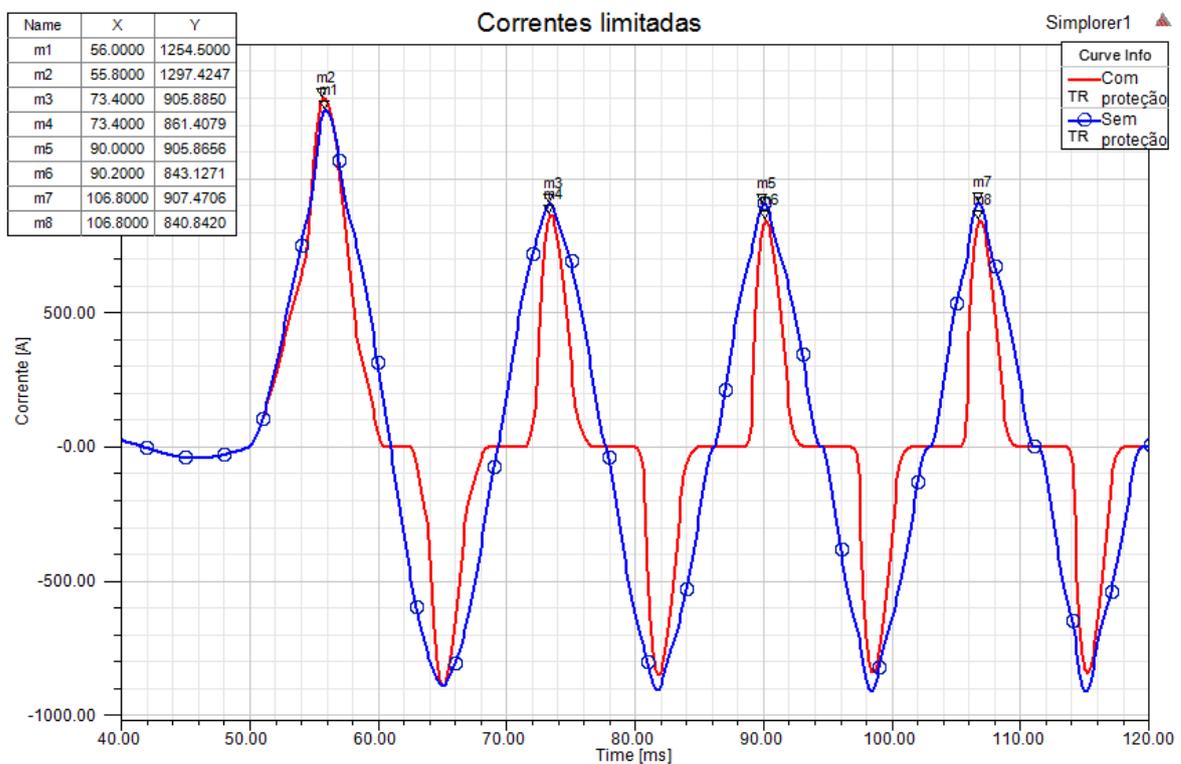
$$R8 = \frac{V_{R8}}{I_{R8}} = \frac{300}{150} = 2\Omega \quad (4.1)$$

Em (4.1)  $V_{R8}$  é a tensão máxima desejada nos terminais do resistor e  $I_{R8}$  é o valor máximo de corrente que passará por R8.

A figura 4.27 apresenta o resultado de simulação da tensão nos terminais do enrolamento de magnetização do núcleo do LCENS. Observa-se que o primeiro pico chega próximo aos 300V e, ao decorrer do tempo, com a dissipação da energia armazenada no

núcleo, essa tensão vai diminuindo, apresentando no final, uma onda pulsante que é a tensão induzida pela variação de corrente do circuito de corrente alternada.

O desligamento da fonte de corrente contínua e a desmagnetização do núcleo, fazem com que ao decorrer do tempo, a impedância do LCENS aumente ainda mais, pois o núcleo magnético sai totalmente da zona de saturação, limitando mais a corrente de curto-circuito, como pode ser visto na figura 4.28, onde são apresentadas as formas de onda de corrente limitada com o sistema de detecção de falta, indicada pelo traço contínuo e a forma de onda de corrente limitada que não tem sistema de detecção de falta, indicada pelo traço com símbolos circulares.



**Figura 4.28: Formas de onda de correntes limitadas do LCENS**

Percebe-se que, através da tabela dos valores de pico das formas de onda da figura 4.28, no caso em que há o sistema de detecção de falta e proteção da fonte de corrente contínua, que tem os valores dados pelos marcadores m1, m3 m5 e m7, o primeiro pico de corrente tem um valor quase igual ao do outro caso que não tem sistema de detecção de falta. Ao decorrer do tempo, tanto o valor de pico, como o valor eficaz da corrente limitada pelo sistema que tem detecção de falta, diminui de tal modo que o núcleo magnético do LCENS se desmagnetize, enquanto que o caso que não há sistema de detecção de falta, que tem os

valores dados pelos marcadores m2, m4, m6 e m8, o valor de sua corrente elétrica diminui sua amplitude até um certo patamar e continua o mesmo ao longo do tempo.

Estes resultados levam a concluir que para um funcionamento mais eficiente do LCENS é necessário um sistema de proteção que detecte a falta e atue durante a ocorrência de um curto-circuito. Na literatura, o sistema utilizado para proteção da fonte de corrente contínua é apresentado por alguns autores [38], [39], [40] e [41], geralmente, são utilizados sistemas de detecção de falta microprocessados, porém, os autores não expõem detalhes construtivos desses sistemas de proteção.

## **5. Desenvolvimento de um circuito eletrônico para detecção de falta e acionamento de proteção do LCENS**

A saturação profunda do núcleo magnético exige um número elevado de espiras alimentadas com corrente contínua até atingir a indução magnética de 1,8T. Para atuação do LCENS, sua conexão com o circuito alimentador é realizada através de bobinas posicionadas como ilustrado na figura 4.5 que, durante operação normal (corrente de regime permanente), são alimentadas por corrente alternada, sendo que o fluxo magnético gerado irá reduzir ou aumentar o fluxo total pela combinação com o fluxo de saturação da bobina de corrente contínua. Durante a falta, o fluxo magnético gerado pela corrente alternada retirará o núcleo da saturação, passando a operar na região linear da curva  $B \times H$ .

A tensão induzida no enrolamento de magnetização do núcleo poderá danificar a fonte de alimentação do enrolamento de corrente contínua, caso esta não seja desconectada do circuito ou protegida por um diodo associado a um resistor para descarregamento da energia armazenada na bobina rapidamente. Portanto, para funcionamento satisfatório deste tipo de LCENS, é necessário um sistema de detecção de falta e de proteção para a fonte de alimentação de corrente contínua, exigindo uma chave eletrônica de acionamento rápido para desconectar a fonte de corrente contínua do circuito em tempo de alguns milissegundos após a ocorrência da falta no circuito principal.

Na literatura, como dito anteriormente, o sistema utilizado para proteção da fonte de corrente contínua é apresentado pelos autores [38], [39], [40] e [41]. Geralmente são utilizados sistemas de detecção de falta microprocessados, porém, os autores não expõem detalhes construtivos desses sistemas de proteção.

Este estudo propõe um sistema de proteção para o limitador de corrente que utiliza um circuito simples, de baixo custo e totalmente analógico para detecção da falta e atuação da chave eletrônica de proteção.

O circuito apresentado leva em consideração somente a ação de proteção da fonte de alimentação. Trabalhos futuros serão realizados para implementação de um circuito de magnetização rápida do núcleo magnético do LCENS utilizando fitas supercondutoras de alta temperatura crítica.

## 5.1 Funcionamento do circuito de detecção de falta

A ideia do circuito é monitorar a corrente da rede elétrica trifásica do circuito a ser protegido e, na ocasião de uma falta, em um tempo muito pequeno (aproximadamente 1ms) após a falta, uma chave eletrônica rápida (IGBT) é acionada para proteger a fonte de alimentação do circuito de corrente contínua, desconectando-a da bobina de magnetização do núcleo magnético.

A parte inicial do circuito é dividida em três sub-circuitos iguais que tem a função de identificar o curto-circuito em cada uma das fases que estão sendo monitoradas (figura 5.1). Estes três sub-circuitos são constituídos de três estágios sequenciais, onde o primeiro tem a função de leitura do sinal de corrente e comparação do sinal lido com referências pré-definidas, o segundo estágio detecta a ocorrência de um curto-circuito, e o terceiro estágio trava o sinal de identificação do curto-circuito, sinaliza a ocorrência de falta e envia o comando a um próximo estágio que é comum aos três sub-circuitos. Este último estágio possui um "Gate driver" que é responsável pelo acionamento do IGBT que ao interromper a sua condução, protege o circuito da fonte de corrente contínua.

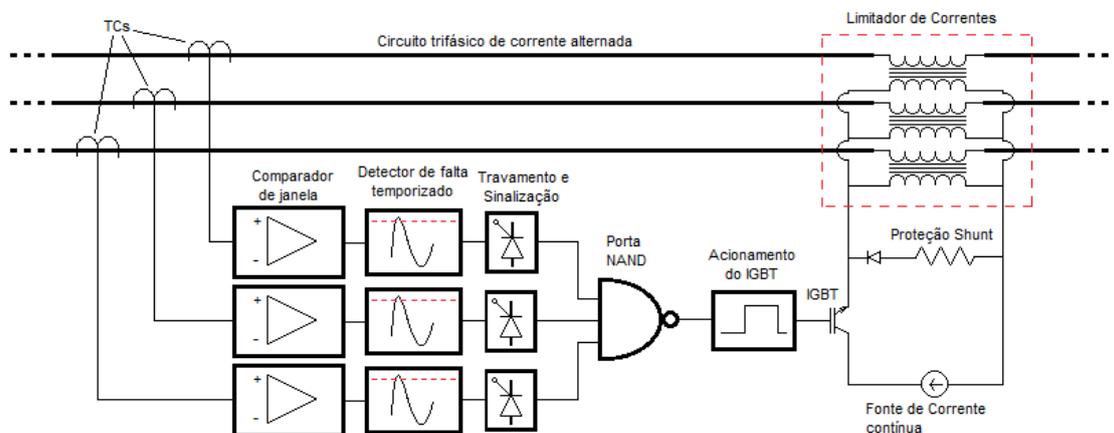


Figura 5.1: Diagrama de blocos do sistema de proteção da fonte de corrente contínua

## 5.2 Detalhamento dos estágios

Os três primeiros estágios que serão aqui apresentados fazem parte dos três sub-circuitos iguais que identificam o curto-circuito para cada fase. Cada um destes circuitos são

independentes do funcionamento dos outros. Em sequência será descrito o último estágio que é responsável pelo acionamento do IGBT.

### 5.2.1 Estágio de leitura de corrente e comparação de sinais:

A leitura de corrente em cada fase do alimentador é realizada através de um transformador de corrente com relação de transformação de 300:5A. O sinal de corrente lido é transformado em um sinal de tensão de  $\pm 5V$  através de um resistor de precisão com resistência de  $1\Omega$  em seus terminais.

O sinal de tensão proveniente do transformador de corrente passa por um filtro RC que evita que “spikes” façam o dispositivo disparar acidentalmente. Após o filtro, quatro amplificadores operacionais (LM324), montados em configuração de comparadores de janela, identificam se o sinal lido ultrapassa um limite positivo ou negativo. Se isto ocorrer, o amplificador operacional, que teve seu limite ultrapassado, emite um sinal de nível alto (figura 5.2).

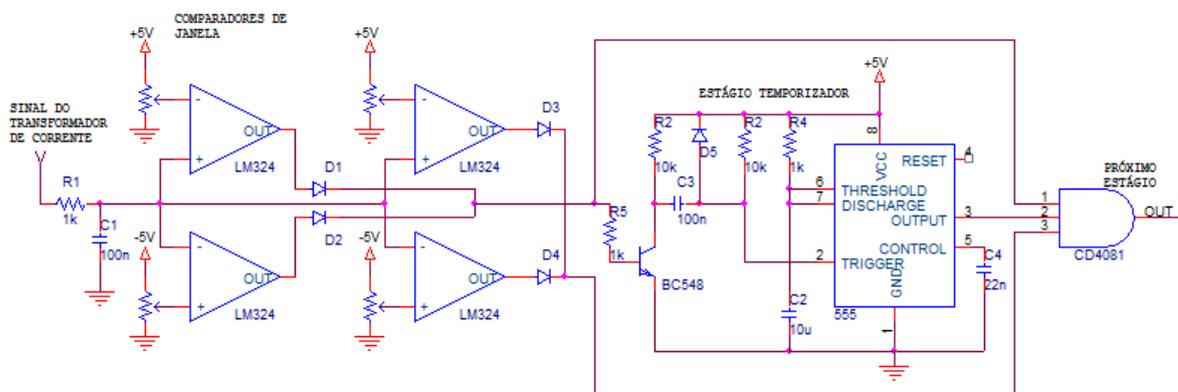


Figura 5.2: Subcircuito de identificação de falta

Foram montados dois comparadores de janela em cascata, sendo que cada um monitora uma faixa de corrente. O primeiro é acionado se o sinal ultrapassar a corrente nominal e o segundo será disparado se o sinal ultrapassar um valor de aproximadamente o dobro da corrente nominal, que caracteriza a ocorrência da falta

Para melhor entendimento, na figura 5.3 apresenta-se um sinal de corrente com amplitude de 10A. Supondo-se que esse fosse o seu valor nominal, as linhas tracejadas representam os limites de comparação tanto para os valores positivos como para valores negativos. Observa-se que essas linhas apresentam dois valores, o primeiro um pouco acima do valor nominal de corrente e o outro com o dobro desse valor de corrente. Neste exemplo

abaixo, o sinal de corrente se encontrava em regime nominal e após um tempo ultrapassou somente a primeira linha tracejada, isto significa que algum evento, como por exemplo um chaveamento de carga, fez com que a corrente ultrapassasse a corrente nominal por um certo tempo.

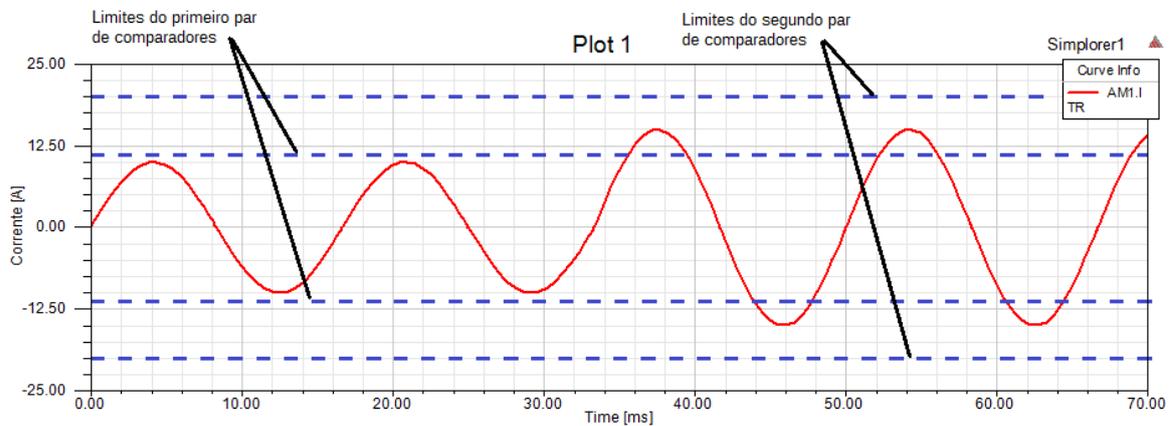


Figura 5.3: Faixas de limite corrente do estágio de comparação.

### 5.2.2 Estágio temporizador e identificação de falta:

Para identificação da falta foram utilizados os sinais dos comparadores de janela, um temporizador e uma porta AND de três entradas (CD4081). O temporizador é composto de um circuito integrado LM555 montado na configuração de Monoestável. Essa configuração faz com que o circuito integrado LM555 ao receber um sinal de nível baixo no seu gatilho emita um sinal em nível alto em sua saída por um período determinado. Essa configuração é apresentada na figura 5.2 e o período em que o sinal fica em nível alto em sua saída é determinado pela equação (5.1):

$$T = 1,1 \times R_4 \cdot C_2 \quad (5.1)$$

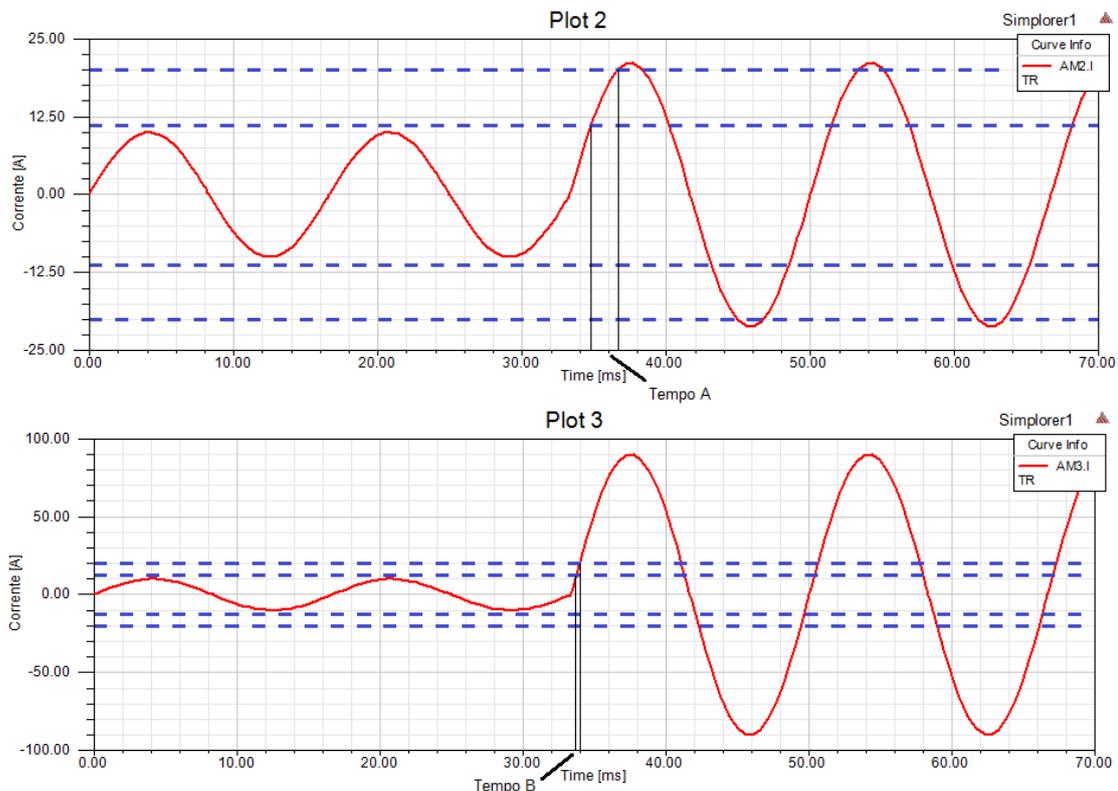
O tempo calculado com esses componentes foi de aproximadamente 1ms.

Quando o primeiro comparador de janela identifica que a corrente nominal foi ultrapassada o sinal emitido por sua saída dispara o temporizador e ao mesmo tempo habilita uma das entradas da porta AND. O temporizador ao ser disparado, envia um outro sinal de nível alto com duração de 1ms para a outra entrada da porta AND, habilitando-a.

Se o segundo comparador de janela for acionado, através da ultrapassagem do seu nível de corrente monitorado, será enviado um sinal para a entrada remanescente da porta AND. No entanto, essa porta AND só será acionada se o segundo comparador de janela for acionado antes do tempo de 1ms, caracterizando um surto de corrente muito grande como se fosse um curto-circuito.

Se o tempo de acionamento do segundo comparador de janela for maior do que 1ms, considera-se que ocorreu um curto-circuito de magnitude pequena ou aconteceu algum outro tipo de evento que não seria necessária a atuação do LECNS, então a porta AND não é acionada e o circuito de proteção não atua.

Observa-se pela figura 5.4, que há duas situações: na primeira, que é identificada pelo nome de Plot 2, o surto de corrente atinge mais do que o dobro da corrente nominal, porém a variação da corrente se dá no tempo de aproximadamente 2ms que, na figura está representado como "Tempo A". Este surto de corrente poderia ocorrer por causa da partida de um motor de indução, chaveamento de carga ou alguma manobra na rede, porém ele não se caracteriza como um curto-circuito devido ao tempo de subida da corrente ser maior do que 1ms as três entradas da porta AND não ficam em nível alto ao mesmo tempo, portanto, o circuito não dispara.



**Figura 5.4: Formas de onda da lógica de identificação de curto-circuito.**

Já na segunda situação que tem o nome de Plot 3, a variação de corrente ocorre muito rapidamente (representado por "Tempo B"). Percebe-se que este tempo é bem menor do que 1ms, portanto, como o segundo nível de comparação foi atingido antes de o temporizador parar de conduzir, as três entradas da porta AND ficam em nível alto e sua saída passa para o nível alto também, caracterizando o evento como um curto-circuito, permitindo que o sinal passe para o estágio seguinte que sinaliza em qual das fases ocorreu a falta e toma as providências necessárias para a proteção da fonte do circuito de corrente contínua.

### 5.2.3 Estágio de travamento do sinal e sinalização de curto-circuito.

Supondo que houve a ocorrência de uma falta e a porta AND do estágio de identificação de falta tenha sido acionada, em sequência é acionado um circuito de travamento da identificação do curto-circuito (figura 5.5).

O componente que permite este travamento é um tiristor de gatilho sensível (MCR100) ligado a uma das três entradas da porta NAND (CD4007), sendo uma entrada dessa porta para cada fase.

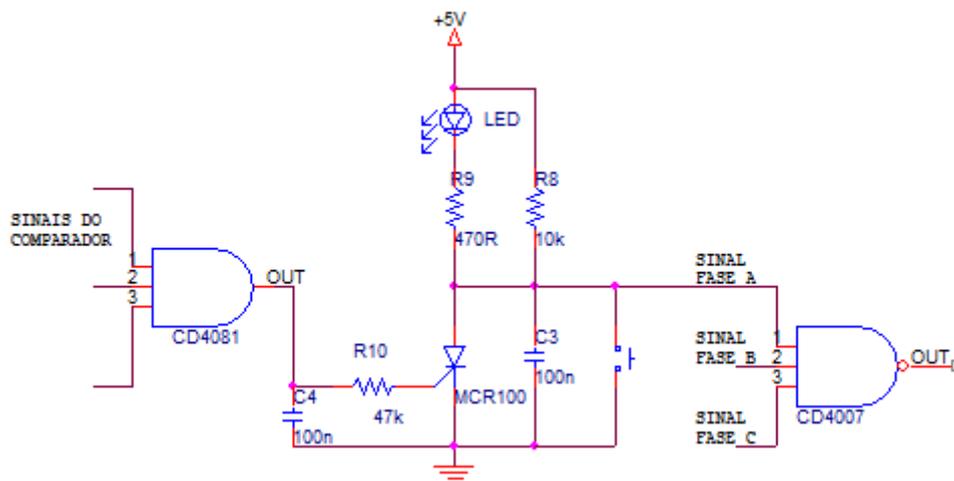


Figura 5.5: Subcircuito de travamento do sinal e sinalização de curto-circuito

Quando o tiristor recebe um sinal em seu gatilho, ele conduz, acionando um LED de sinalização. Ao mesmo tempo, a porta NAND tem uma de suas entradas levada ao nível lógico zero, pois ela está ligada ao ânodo do MCR100, fazendo com que ela passe a conduzir em sua saída e emita um sinal para o próximo estágio que é o de acionamento do IGBT de proteção.

O tiristor continuará conduzindo por tempo indeterminado, a não ser que a corrente do seu circuito principal seja menor do que 5mA ou a tensão de seu cátodo seja igual à do seu ânodo. Para interrupção de condução do tiristor, foi inserida no circuito a chave S1 que aterrada o ânodo do MCR100, fazendo com que o mesmo pare de conduzir.

#### **5.2.4 Acionamento do IGBT**

Para controle da chave eletrônica rápida (IGBT) foi utilizado o circuito integrado IR2110 devido ao fato dele permitir o controle independente de suas saídas, apresentar simplicidade no acionamento e ter isolação entre o circuito de potência e o circuito de controle.

Verifica-se na figura 5.6 as ligações do circuito integrado com a chave, onde o IGBT01 está conectado na saída LO. As entradas do IR2110 estão conectadas à porta NAND mencionada no item anterior, porém com um estágio inversor entre a saída da porta NAND e a entrada LIN.

O circuito integrado IR2110 permite o controle de duas chaves ao mesmo tempo por ter as entradas LIN e HIN e saídas LO e HO. No desenvolvimento do circuito foi utilizado somente uma chave, porém a entrada HIN foi habilitada com um sinal inverso ao da entrada LIN. Isto possibilita o acionamento de algum dispositivo no mesmo momento em que o IGBT for desligado.

Antes da falta ocorrer, a porta NAND tem sinal de nível lógico alto em suas entradas e fica com sua saída em nível lógico baixo. Sob essas condições a saída LO está ligada e o IGBT01 estará conduzindo para manter a corrente passando através do enrolamento de corrente contínua do limitador de corrente.

No momento que ocorre a falta, pelo menos uma das entradas da porta NAND deixará de receber sinal de nível lógico alto, o que faz sua saída passar para o nível lógico alto. O sinal enviado para a entrada LIN do IR2110 será invertido e o IGBT01 será comutado, retirando a alimentação de corrente contínua do circuito do limitador de correntes e protegendo a fonte de corrente contínua.



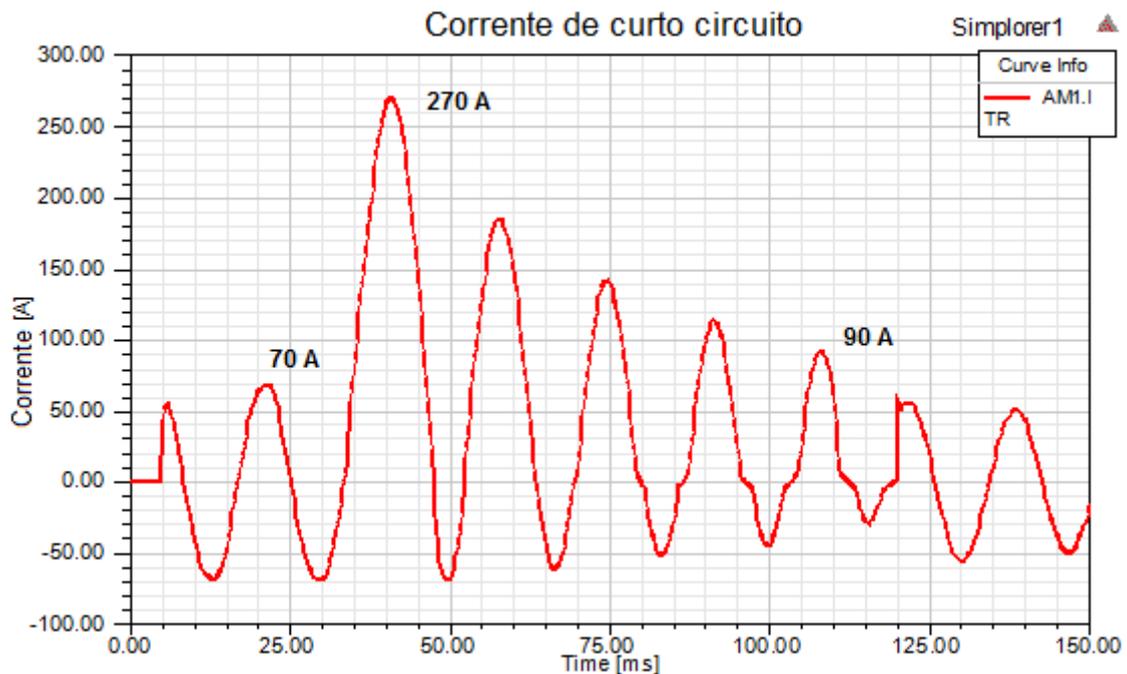


O transformador TWT1 corresponde ao transformador de corrente utilizado para leitura da corrente do circuito principal, o resistor R6 é responsável pela transformação da corrente do secundário do TC em tensão, os amplificadores operacionais fazem parte do estágio dos comparadores de janela. As fontes E2 a E17 fazem parte da alimentação do circuito eletrônico e os resistores R9 a R15 foram empregados por motivos numéricos exigidos pelo aplicativo Simplorer.

Devido ao fato da biblioteca do Simplorer não ter o circuito integrado LM555, ele foi substituído por CSx1, R8 e C2 que fazem o papel de temporizador. CSx2, CSx3 e CSx4 são chaves controladas por tensão e representam a porta AND de três entradas. Após este estágio encontra-se o THY4\_1 que é o tiristor responsável pelo travamento do circuito.

Como foi realizada a simulação do circuito monofásico, não é necessário inserir uma porta NAND de três entradas. Dessa forma, logo após o tiristor, o acionamento do IGBT é feito diretamente. As chaves S4 e S8 interrompem a condução do tiristor após o curto-circuito se extinguir.

Este circuito eletrônico pode ser considerado original para esta aplicação, pois ele não aparece na literatura e é de custo muito baixo, tendo sido aberto o processo de solicitação de patente do mesmo.



**Figura 5.8: Corrente de curto-circuito.**

Na figura 5.8 pode-se observar o gráfico da corrente de fase do circuito no momento em que ocorre um curto-circuito. O curto-circuito ocorre no instante  $t = 34\text{ms}$ . O pico de corrente de curto-circuito chega a 270A e com o passar do tempo sua amplitude

diminui devido à atuação do limitador de correntes. No instante de tempo de 120ms o curto-circuito é extinto através da abertura da chave S6 e a corrente volta ao seu valor nominal.

Na figura 5.9 são mostradas as curvas de tensão dos comparadores do circuito de proteção da fonte de alimentação do circuito de corrente contínua juntamente com a forma de onda de tensão nos terminais do secundário do transformador de corrente que corresponde à forma de onda de corrente do circuito principal com uma escala 100 vezes menor. Percebe-se que antes do curto-circuito a corrente se mantém no valor nominal não ultrapassando os valores de referência dos comparadores que são E4, E7, E10 e E13.

Quando ocorre a falta, a forma de onda correspondente à corrente do primário ultrapassa as tensões de referências superiores dos comparadores em um tempo de aproximadamente 0,7ms, que é menor do que o período em que o temporizador do circuito de controle fica em nível alto, portanto, há a atuação do circuito de proteção, protegendo a fonte de alimentação do circuito de corrente contínua do limitador de correntes elétricas.

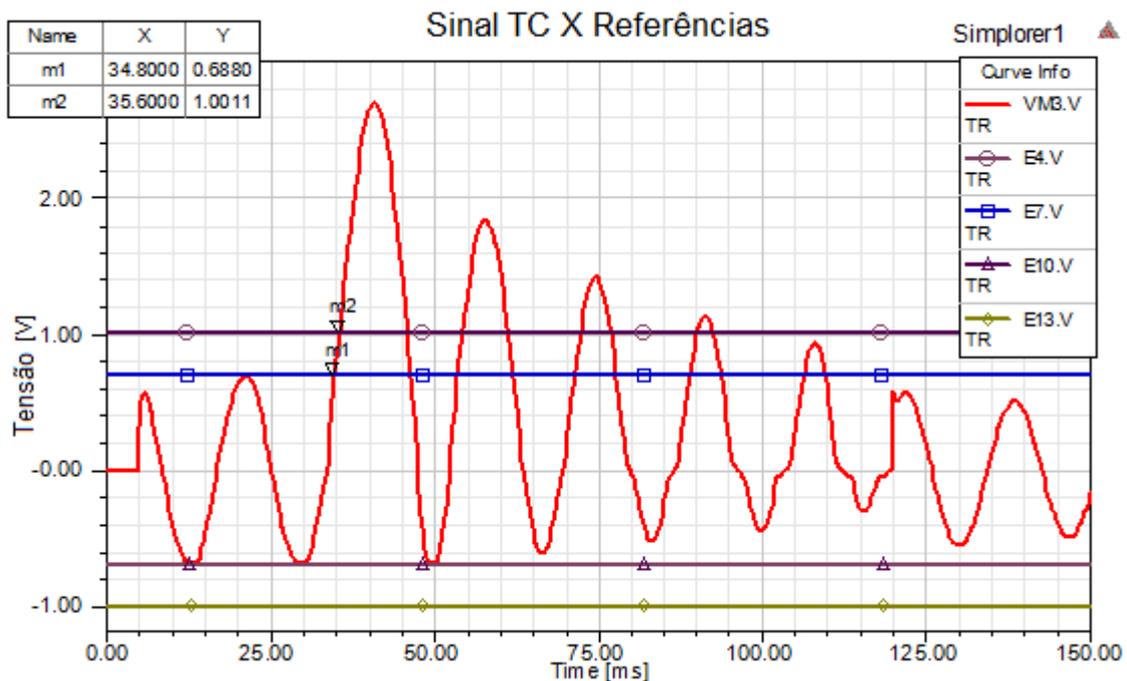


Figura 5.9: Tensões de referência dos comparadores e tensão no secundário do TC

Para um melhor entendimento da lógica do circuito de controle, na figura 5.10 tem-se a forma de onda de corrente do circuito principal, a corrente no circuito de corrente contínua junto com as tensões nas saídas dos comparadores e a tensão de saída do temporizador, que estão representadas, respectivamente nos gráficos, pelas curvas AM1, R20,

VM4, VM5 e VM6. Na figura 5.11 apresenta-se o detalhamento da figura 5.10 no momento em que ocorre o curto-circuito.

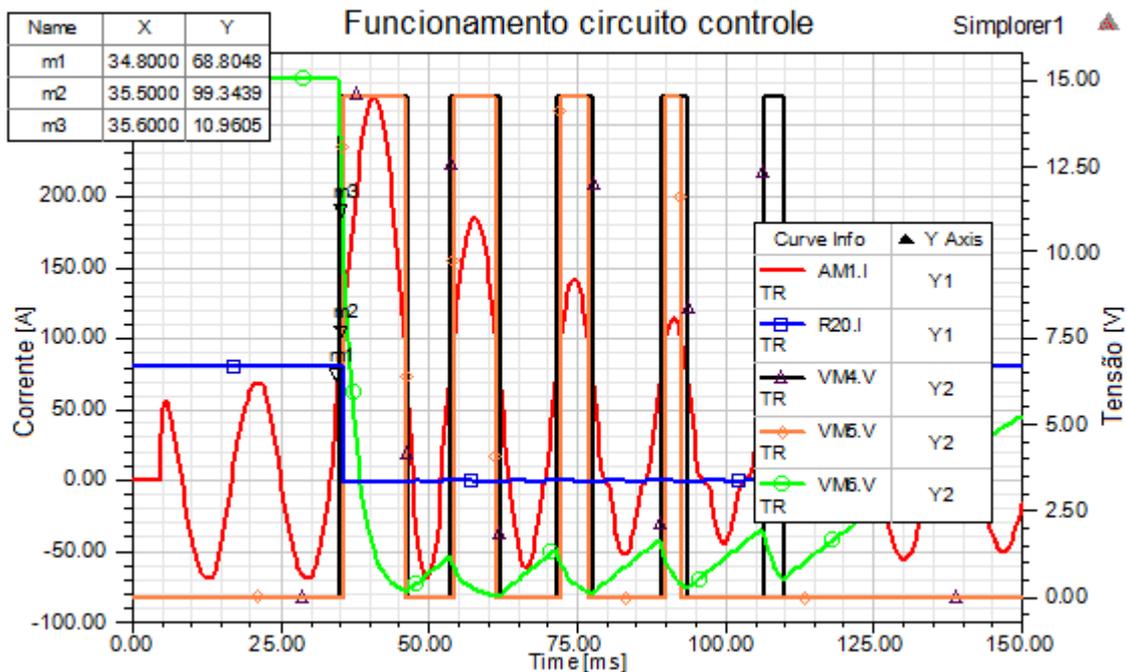


Figura 5.10: Lógica de funcionamento do circuito de controle

O marcador m1 mostra o momento em que o sinal de corrente ultrapassa a tensão de referência inferior dos comparadores. Percebe-se que a saída do comparador de baixa VM4 transita para o nível alto e a tensão do temporizador VM6 começa a cair. Foi estabelecido que o nível alto seria qualquer valor maior ou igual a 10V, portanto o resistor R8 e o capacitor C2 da figura 5.7 foram calculados para ter uma taxa de decaimento de tensão de 15 para 10V em aproximadamente 1ms conforme curva VM6.

O marcador m2 indica o ponto em que o segundo nível de comparação é ultrapassado e a saída de alta do comparador transita para o nível alto. Como o valor da tensão do temporizador VM6 ainda está acima de 10V, como é mostrado no marcador m3, o IGBT é desligado, então a corrente do circuito da fonte de corrente contínua R20 cai para 0A.

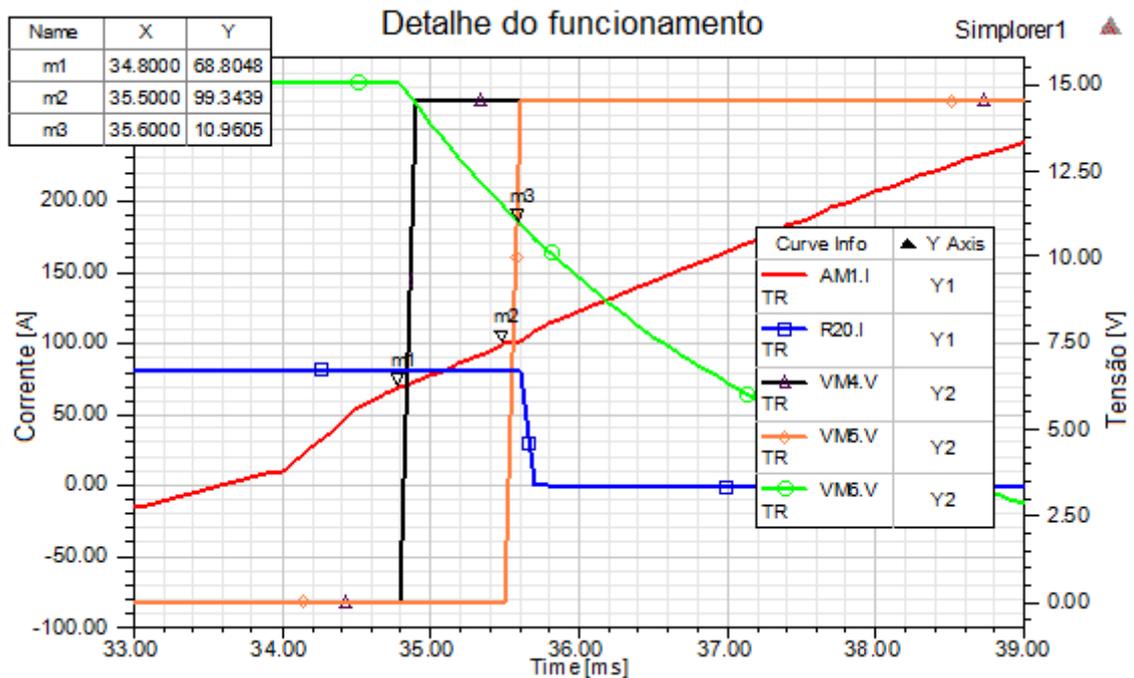


Figura 5.11: Detalhamento da lógica de funcionamento do circuito de controle no momento da falta

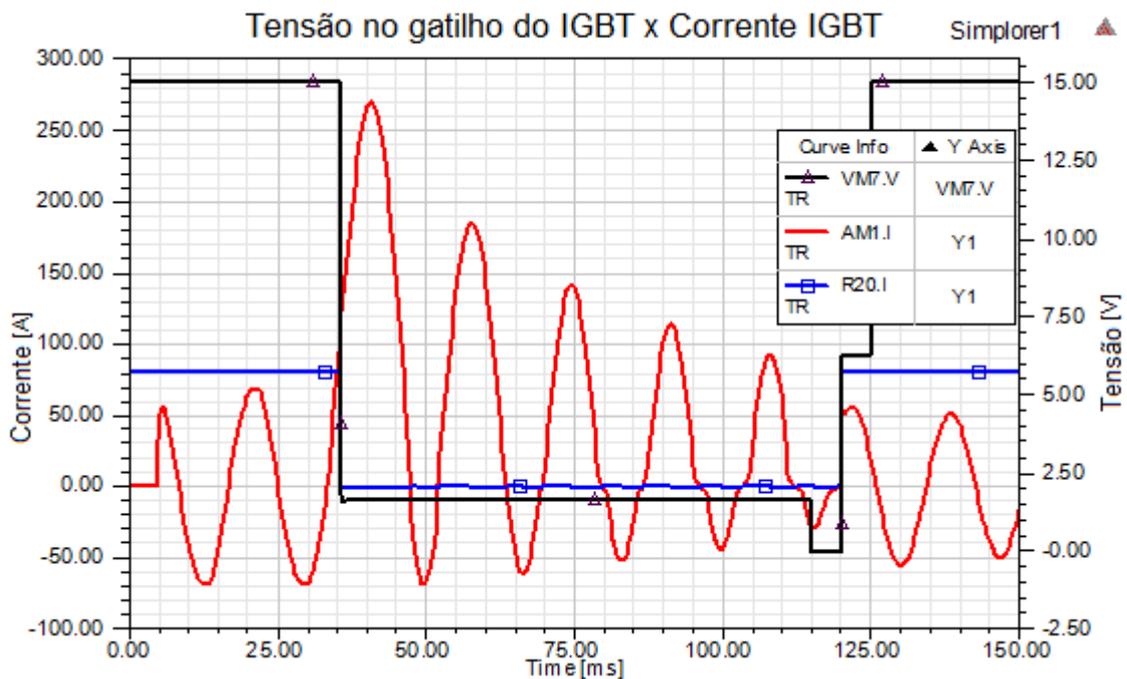


Figura 5.12: Sinal de tensão do gatilho do IGBT e corrente da fonte de corrente contínua

No gráfico da figura 5.12 observa-se a tensão no gatilho do IGBT VM7, a corrente do circuito principal AM1 e a corrente da fonte de corrente contínua R20. Nota-se que no momento em que ocorre o curto-circuito a tensão no gatilho do IGBT cai, fazendo com que ele se desligue e corte a corrente R20. Ao terminar o curto-circuito a tensão no gatilho do

IGBT é restabelecida e a corrente R20 volta ao seu valor inicial juntamente com a corrente do circuito principal.

## 6. Montagem e instrumentação do limitador de correntes elétricas de núcleo magnético saturado

Nos capítulos anteriores foram apresentados o modo de funcionamento e o dimensionamento do LCENS através de simulações com elementos finitos, assim como a descrição do desenvolvimento do circuito de detecção de falta para proteção da fonte de corrente contínua que alimenta o enrolamento de campo do LCENS. Neste capítulo, serão apresentadas as etapas de montagem de um protótipo de LCENS com o seu circuito de detecção de falta e a instrumentação para realização dos ensaios laboratoriais.

### 6.1 Montagem do núcleo do LCENS

As janelas do núcleo do LCENS foram construídas com o aço silício “Steel M125” que apresenta a curva de magnetização (BxH) apresentada na figura 5.3. Os cortes das chapas utilizadas na montagem podem ser visualizados na figura 6.1, onde são fornecidos os detalhes das dimensões das chapas em mm e o peso em kg.

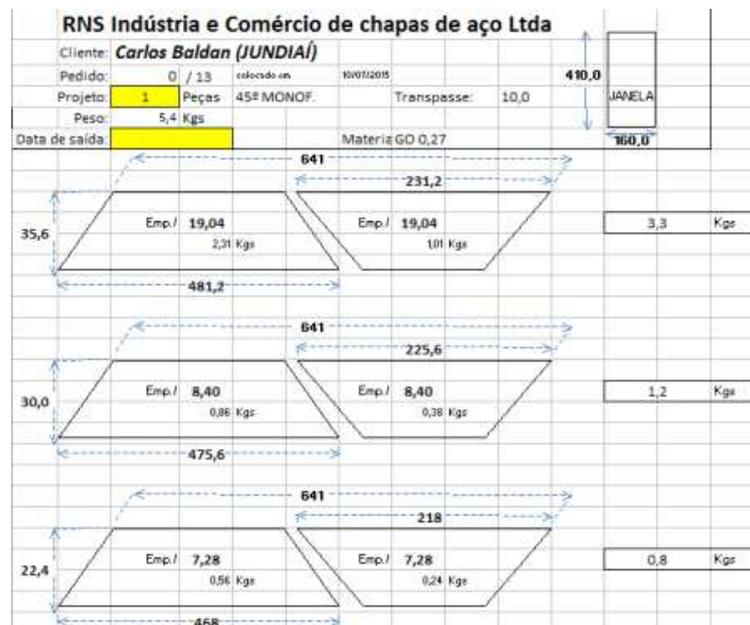
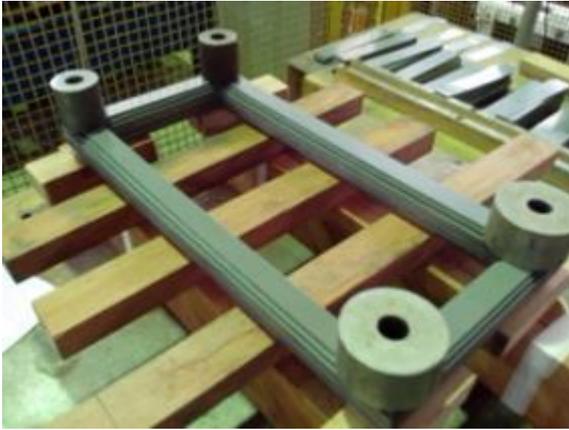


Figura 6.1: Planilha com medidas das chapas de aço do núcleo ferromagnético do LCENS

Na figura 6.2 observa-se uma das janelas do LCENS montada sob calços de madeira e com pesos em suas arestas, para manter a sua geometria. Os cantos da parte inferior foram colados antes da montagem no suporte com as 6 janelas. A figura 6.3 mostra o detalhe

da perna central de uma das janelas do núcleo, onde suas chapas são empilhadas em formato de cunha, para que na montagem final do núcleo do LCENS, as janelas se encaixem e sejam travadas de modo a aproveitar melhor o espaço entre elas e reduzir as perdas de fluxo magnético.



**Figura 6.2: Montagem de uma das janelas do núcleo magnético do LCENS**



**Figura 6.3: Detalhe do empilhamento das chapas da perna central do núcleo magnético do LCENS**

A figura 6.4 apresenta a base onde serão montados as 6 janelas do núcleo magnético e uma das janelas apoiada em cima de uma das calhas que servem de guia para manter o arranjo final desejado do núcleo. Pode-se observar na figura 6.5 o detalhe do final da construção de um dos enrolamentos de corrente alternada, que foi executado com dois fios de cobre esmaltados AWG4 em paralelo com  $21,2\text{mm}^2$  de seção transversal, totalizando  $42,4\text{mm}^2$ . Este enrolamento foi construído com 70 espiras e, para possibilitar estudos de otimização do LCENS, foi inserido uma derivação que permitiu ensaios em 50 e 20 espiras.



**Figura 6.4: Posicionamento de uma das janelas do núcleo magnético do LCENS**



**Figura 6.5: Construção de um dos enrolamentos de corrente alternada do LCENS**

O enrolamento de corrente contínua possui 300 espiras e foi construído com um fio de cobre esmaltado AWG4 de  $21,2\text{mm}^2$  de seção transversal.

Após todas as janelas do núcleo magnético serem dispostas no suporte apresentado na figura 6.4, as bobinas de corrente alternada foram encaixadas nas pernas exteriores das janelas do núcleo magnético e a bobina de corrente contínua foi encaixada envolvendo as pernas centrais dessas janelas como se pode observar pela figura 6.6.

Na figura 6.7 apresenta-se o detalhe do encaixe das pernas centrais do núcleo magnético dentro do carretel onde foi enrolada a bobina de corrente contínua.



**Figura 6.6:** Bobinas de corrente contínua e alternada encaixadas nas pernas dos núcleos magnéticos



**Figura 6.7:** Encaixe das pernas centrais das janelas do núcleo magnético do LCENS

A figura 6.8 mostra o desenho tridimensional de projeto do LCENS trifásico que foi construído. Os núcleos magnéticos estão dispostos de forma hexagonal, com os enrolamentos de corrente alternada dispostos nas pernas exteriores dos núcleos (marrom). O enrolamento de campo é o carretel amarelo que se encontra envolvendo os núcleos internos do arranjo.

Na figura 6.9 apresenta-se a montagem final do LCENS, com discos de material isolante nas partes inferior e superior do limitador.

Na parte superior estão os terminais de condutor de cobre de todos os enrolamentos, saindo através de uma tampa de fenolite, que é usada como guia e separador para os condutores. As dimensões reais são: diâmetro: 507mm e altura: 482mm.

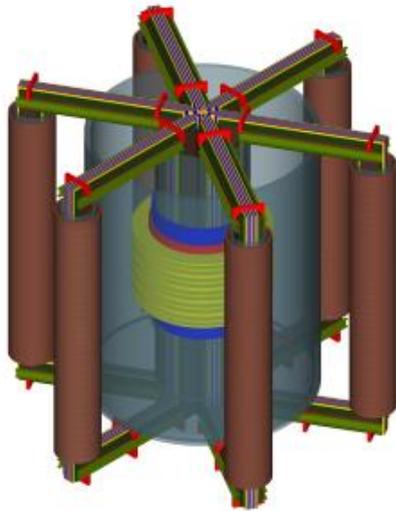


Figura 6.8: Desenho tridimensional do LCENS



Figura 6.9: Montagem final do LCENS

## 6.2 Caracterização núcleo do LCENS

Antes da realização dos ensaios do LCENS é necessário fazer a caracterização do seu núcleo magnético para se obter o valor da permeabilidade relativa do material. Também deve ser traçada a curva de magnetização do dispositivo para se verificar os valores de densidade de campo magnético médio no núcleo magnético em função da corrente de excitação.

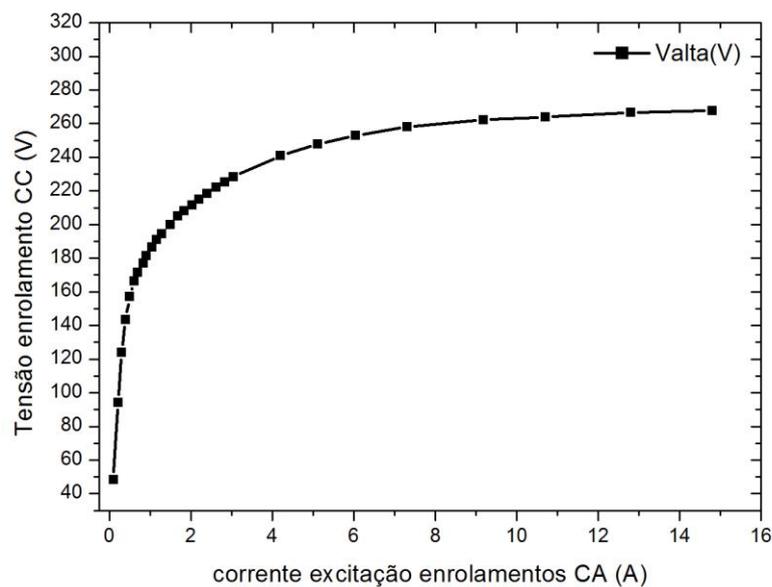


Figura 6.10: Curva de magnetização do LCENS

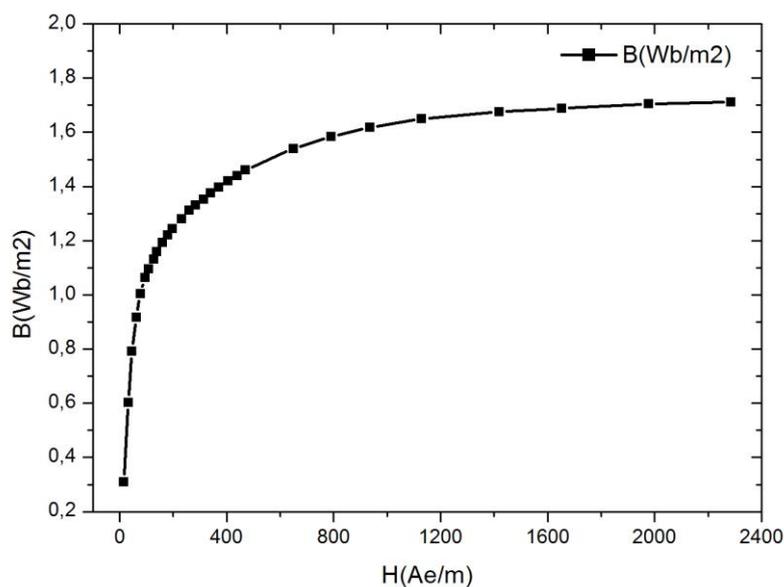
Para se obter a curva de magnetização do limitador, aplicou-se uma corrente alternada no enrolamento principal e mediu-se a tensão induzida no enrolamento que produz o campo magnético de saturação do LCENS. O resultado pode ser observado na figura 6.10.

Para se calcular a densidade de campo magnético no núcleo magnético do LCENS, utilizou-se as seguintes expressões:

$$E = 4,44B_m AfN \quad (6.1)$$

$$H_m = \frac{N}{l} I\sqrt{2} \quad (6.2)$$

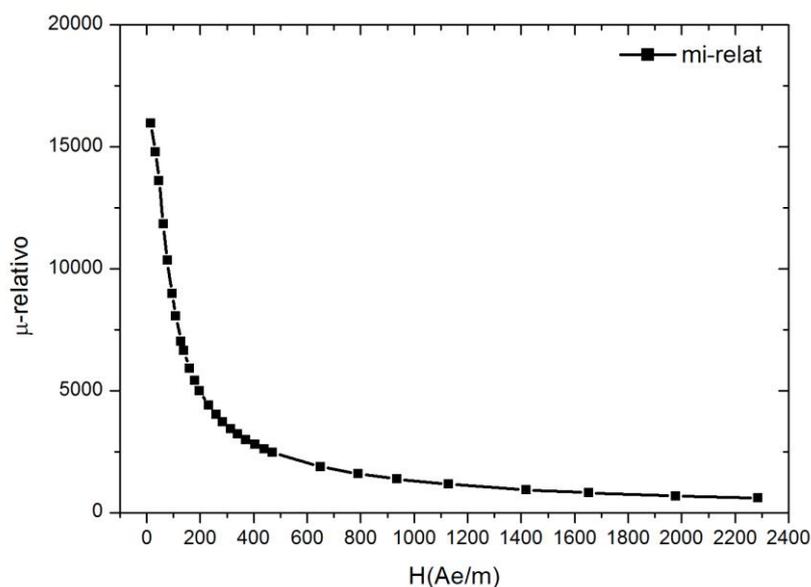
Na equação 6.1,  $E$  é a tensão induzida em volts eficaz medida no enrolamento de corrente alternada,  $B_m$  é o valor de pico da densidade de campo magnético em  $\text{Wb/m}^2$ ,  $A$  é a área líquida efetiva da janela do núcleo em  $\text{m}^2$ ,  $f$  é a frequência em Hz e  $N$  é o número de espiras do enrolamento que produz o campo magnético de corrente alternada no núcleo. Na equação 6.2,  $H_m$  é o valor de pico da intensidade de campo magnético em  $\text{Ae/m}$ ,  $I$  é a corrente que passa no enrolamento em valor eficaz e  $l$  é o caminho médio de uma janela do núcleo magnético do limitador. Portanto, para o resultado do ensaio de magnetização obteve-se a curva  $B \times H$  apresentada na figura 6.11.



**Figura 6.11: Curva B x H do LCENS**

O cálculo da permeabilidade relativa do material utilizado na fabricação do núcleo magnético do LCENS, que é apresentado na figura 6.12, se dá pela equação 6.3.

$$\mu_{rel} = \frac{B}{H4\pi10^{-7}} \quad (6.3)$$



**Figura 6.12: Curva de permeabilidade magnética do LCENS**

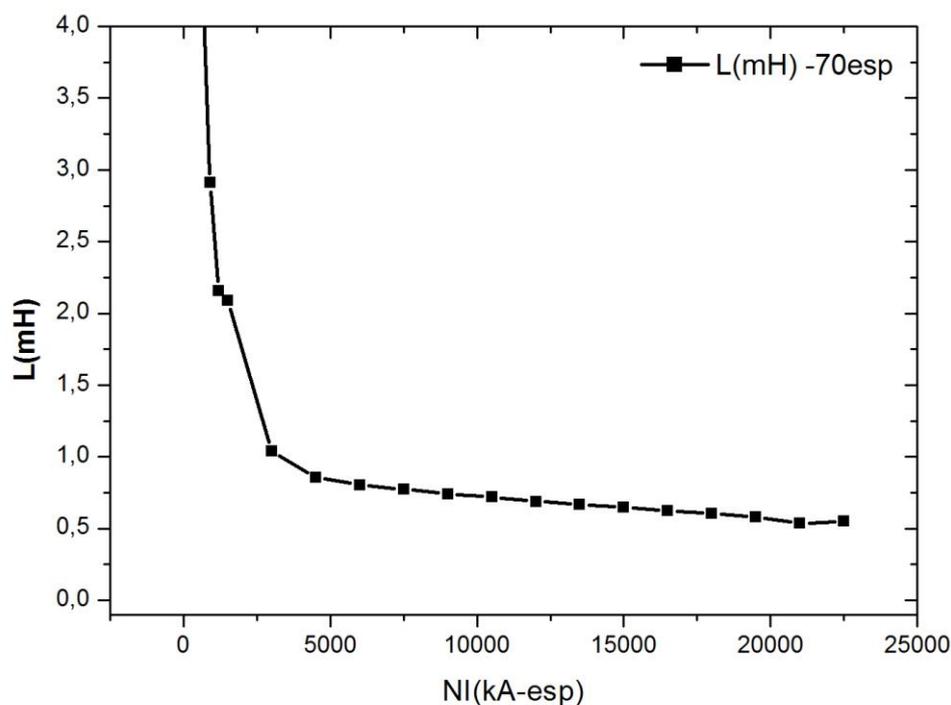
A resistência elétrica dos enrolamentos de corrente alternada foram obtidos aplicando corrente contínua nas bobinas e medindo a tensão nos terminais do limitador. O resultado pode ser observado na tabela 6.1:

**Tabela 6.1: Resistência do enrolamento de corrente alternada do LCENS**

Corrente (A)	Tensão (V)	Resistência ( $\Omega$ )
1,188	$2,077 \times 10^{-2}$	$1,748 \times 10^{-2}$
1,563	$2,744 \times 10^{-2}$	$1,755 \times 10^{-2}$
2,001	$3,522 \times 10^{-2}$	$1,760 \times 10^{-2}$

Foram realizadas medidas de indutâncias do circuito de corrente alternada em relação a vários valores de força magnetomotriz (NI), obtidos com o aumento da corrente contínua no enrolamento de saturação. Para medição da indutância variou-se a corrente de magnetização do núcleo e realizou-se medidas para cada valor de NI, utilizando-se um

multímetro que trabalha em frequência de medição de 100Hz, sendo que os resultados das medições podem ser visualizadas na figura 6.13.



**Figura 6.13: Curva de Indutância x NI do núcleo magnético do LCENS**

Para determinação da indutância da bobina de magnetização do LCENS foi realizada a resposta ao degrau com uma corrente contínua de 50A e tensão de 8,83V. Pelo gráfico da figura 6.14, observa-se que houve uma taxa de variação da corrente em um intervalo de tempo, portanto, através da equação (6.4) pode-se calcular o valor da indutância neste enrolamento.

$$E_0 = L \frac{di}{dt} \quad (6.4)$$

Na equação (6.4)  $E_0$  é a tensão da fonte de corrente contínua e  $L$  é a indutância da bobina de magnetização do núcleo. O valor da indutância calculada foi de 10,25mH.

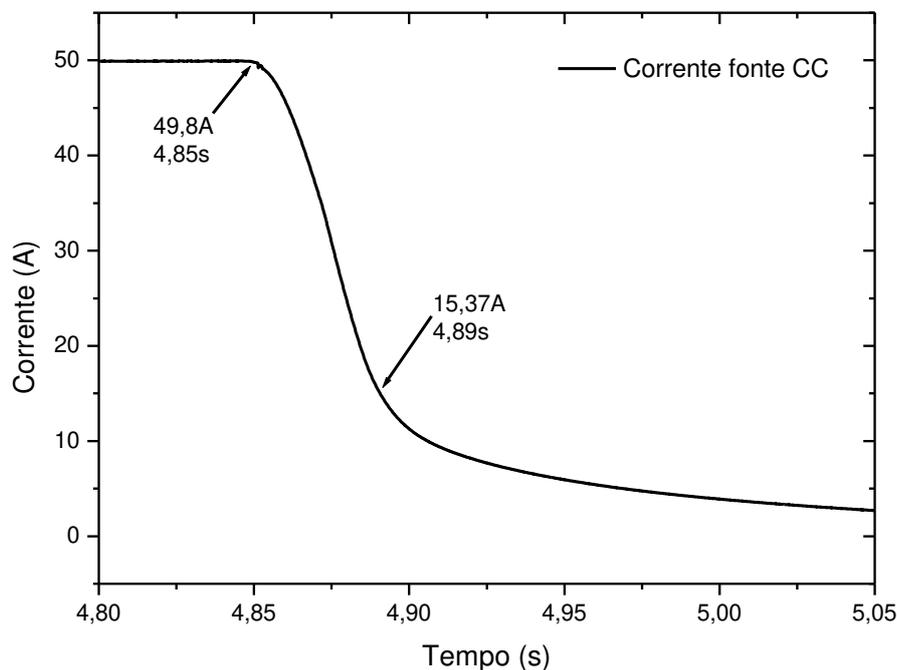


Figura 6.14: Resposta ao degrau de corrente na bobina de magnetização do LCENS

### 6.3 Circuito de detecção de faltas

Para construção da placa do circuito de detecção de falta desenvolveu-se o *layout* do circuito com a disposição dos componentes eletrônicos e o roteamento das trilhas por onde são conduzidos os sinais elétricos. Após ser desenvolvido, o *layout* foi transferido para uma placa de circuito impresso, onde foram soldados os componentes eletrônicos.

O resultado final da construção da placa deste circuito de detecção de faltas é apresentado na figura 6.15, onde o terminal 01 recebe alimentação de uma fonte de corrente contínua simétrica de  $\pm 5V$ , o sinal de corrente proveniente dos TCs é conectado nos bornes do terminal 02. Para alimentação do IGBT e seu *gate driver* utiliza-se uma fonte de alimentação de corrente contínua simples de +15V, conectada no terminal 03, e o terminal 04 tem as saídas que acionam o IGBT.

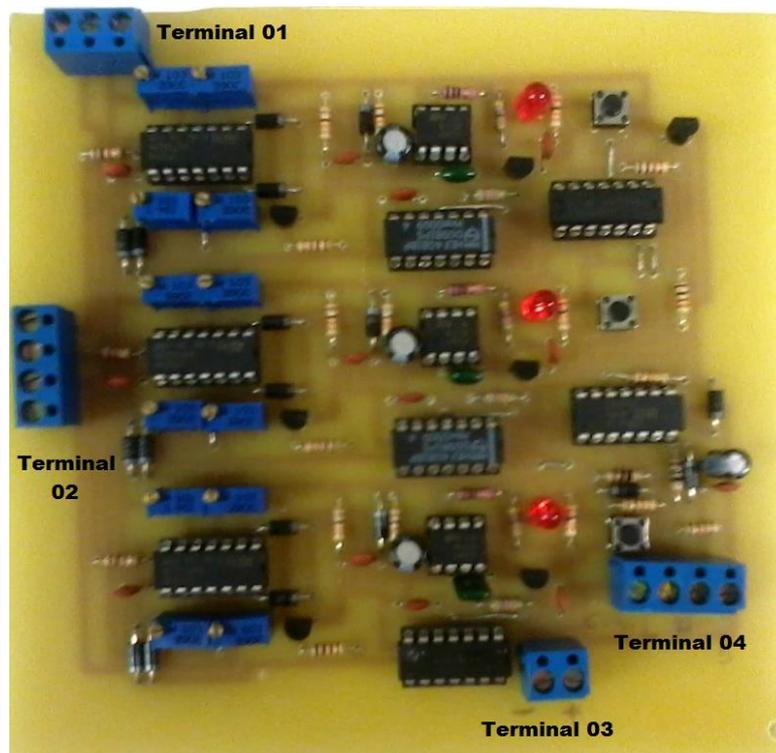
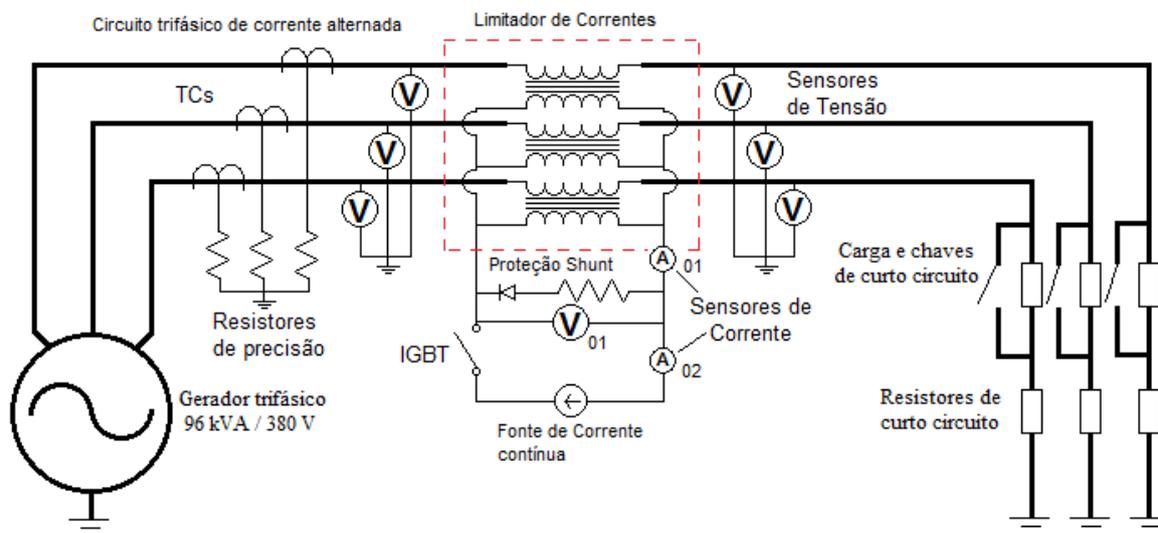


Figura 6.15: Circuito de detecção de faltas e acionamento de proteção do LCENS

## 6.4 Montagem e instrumentação para ensaios do LCENS

A montagem foi realizada no laboratório de supercondutividade aplicada do Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de Lorena - USP usando um sistema motor-gerador síncrono, trifásico, 96kVA/380V, 60Hz, 4 polos, ligado em série com o LCENS e com uma carga resistiva trifásica, de acordo com o diagrama da figura 6.16. As correntes prospectivas de falta foram obtidas sem o LCENS no circuito, curto-circuitando a carga resistiva através de uma chave estática.

Para medição das correntes e tensões nos testes realizados no LCENS (figura 6.16) foram utilizados os seguintes equipamentos: 3 transformadores de corrente (TCs) com relação 300/5A modelo TP-23 CIRCUITOR, 3 resistores de precisão de  $0,33\Omega$ , 2 sensores de corrente por efeito *Hall* modelo LA 55-P, 7 sensores de tensão por efeito *Hall* modelo LV 25-P, placas condicionadoras de sinais, ponte retificadora trifásica não controlada modelo 90MT.KB, 2 capacitores de 60mF/40V - General Electric, 1 IGBT modelo GA100TS60U, 1 Diodo modelo SKR 100/12, resistores de fio de NiCr (não indutivo), chave estática 220V/2,4kA, sistema de aquisição de dados NI USB 6216 da *National Instruments*.



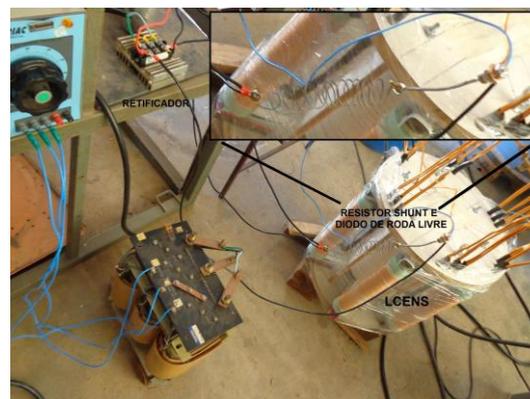
**Figura 6.16: Montagem para realização dos ensaios no LCENS**

Nas figuras 6.17 e 6.18 podem ser observados respectivamente o sistema motor-gerador utilizado nos ensaios, o LCENS, o retificador trifásico não controlado e o circuito *shunt* de proteção da fonte de corrente contínua.

A alimentação do retificador foi feita por um VARIAC trifásico ligado a um transformador abaixador com a relação 200:20V. O circuito *shunt* de proteção, é composto por um diodo de roda livre e um resistor de NiCr.



**Figura 6.17: Motor-gerador para ensaio na EEL/USP.**



**Figura 6.18: LCENS, retificador e circuito *shunt* de proteção.**

A figura 6.19 mostra a chave estática que possibilita o curto-circuito controlado do gerador durante 80ms, através de tiristores ligados em antiparalelo que, quando recebem um pulso em seu gatilho, permitem a passagem da corrente senoidal. Sua capacidade de corrente é de 2,4kA e a eletrônica do dispositivo permite uma regulação para que os tiristores fiquem fechados de 1 a 5 ciclos da rede.

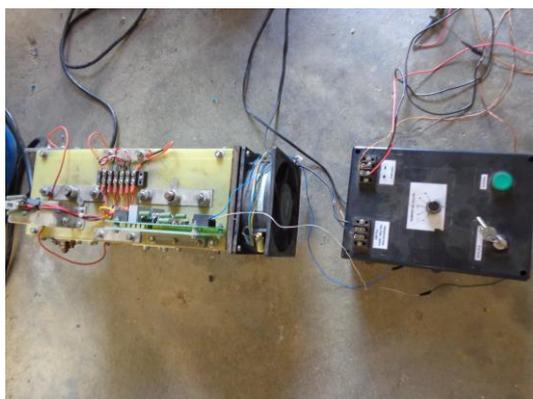


Figura 6.19: Chave estática 220V/2,4KA

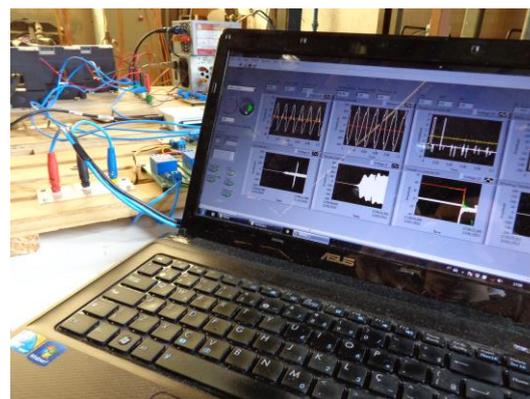


Figura 6.20: Micro computador e interface de programação em Labview durante execução de ensaio.

Para aquisição dos dados de ensaio, foi utilizado um micro-computador conectado ao sistema de aquisição de dados (DAQ NI USB 6216 da *National Instruments*). A programação foi realizada em *Labview* e recebe os valores medidos pelo sistema de aquisição de dados, desenha as formas de onda em gráficos em sua tela e gera tabelas com os valores de tensões e correntes lidos pelos sensores, mostrados na Figura 6.20.

Na Figura 6.21 pode-se identificar os transformadores de corrente utilizados nos ensaios que estão ligados em seus respectivos resistores de precisão. Estes transformam os valores de corrente em sinal de tensão que são enviados para o sistema de aquisição de dados. Também pode-se observar o IGBT que é a chave eletrônica rápida responsável pelo desligamento da fonte de corrente contínua no momento do curto-circuito.

Na parte inferior da Figura 6.21 são mostrados os sensores de tensão por efeito Hall, onde 6 deles são utilizados para medir as tensões antes e depois do LCENS e um outro que realiza a medição da tensão induzida no circuito de descarga. Ao lado destes estão montados os sensores de corrente por efeito *Hall* que medem as correntes de descarga do circuito de descarga e a corrente do IGBT.

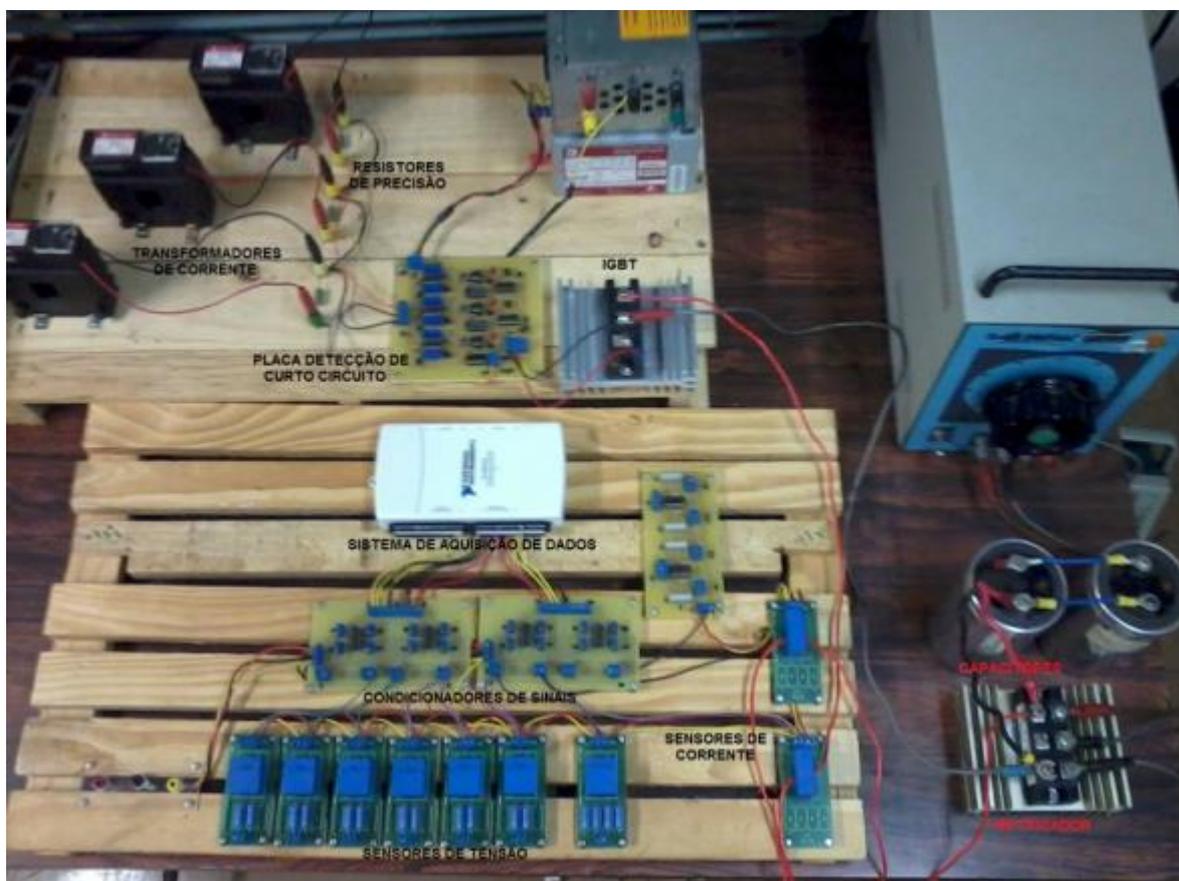
As placas de condicionamento de sinais estão ligadas aos sensores e, através de ganhos ajustáveis, permitem a leitura dos sinais por um sistema de aquisição de dados.

O variador de tensão, o retificador trifásico e seus capacitores eletrolíticos que têm a função de filtragem de corrente contínua, são mostrados no lado direito da Figura 6.21.

No centro da figura se encontra o sistema de aquisição de dados, que envia os sinais lidos em suas entradas analógicas ao micro computador responsável pelo tratamento dos dados aquisitados.

A placa responsável pela detecção do curto-circuito e acionamento do circuito de proteção está identificada no centro da Figura 6.21. Ela recebe os sinais dos resistores de

precisão que estão ligados aos TCs. Na ocorrência de um curto-circuito, envia o comando para abrir o IGBT.



**Figura 6.21: Instrumentação para realização de testes no LCENS**

## **7. Ensaio do limitador de correntes elétricas com núcleo magnético saturado**

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios do LCENS construído durante a pesquisa com a finalidade de verificar o seu comportamento dinâmico quando submetido a vários níveis de curto-circuito e diferentes condições de carga. Os ensaios foram realizados no laboratório de supercondutividade da Escola de Engenharia de Lorena – EEL/USP, utilizando a configuração com apenas uma das fases do limitador de correntes elétricas construído.

### **7.1 Ensaio de detecção de falta e de corrente de descarga do LCENS**

Na operação do LCENS é fundamental que, após a detecção da falta, a fonte de alimentação de corrente contínua, que mantém o núcleo saturado, seja desligada e protegida contra a tensão induzida em seus terminais devido ao aumento da corrente de falta. Para verificar se o sistema de detecção e proteção satisfaz este requisito foram realizados ensaios de curto-circuito em diversas condições de carga do gerador utilizado para tal.

#### **7.1.1 Análise do tempo de resposta do circuito de detecção de curto-circuito**

O tempo de resposta do circuito de detecção de falta tem grande importância no funcionamento do LCENS. Quanto mais rápida for a detecção da falta, menor será o risco de danos à fonte de alimentação de corrente contínua. A limitação de corrente será mais efetiva, devido ao fato do núcleo do LCENS se desmagnetizar rapidamente.

A localização dos instrumentos de medição utilizados no ensaio, como visto no capítulo anterior, pode ser observada na Figura 7.1, onde a corrente de curto-circuito é medida através dos transformadores de corrente (TCs). A tensão induzida nos terminais do circuito de corrente contínua é medida pelo sensor de tensão V01, a corrente de descarga do circuito magnético é medida pelo sensor de corrente A01 e a corrente no IGBT é medida pelo sensor de corrente A02.

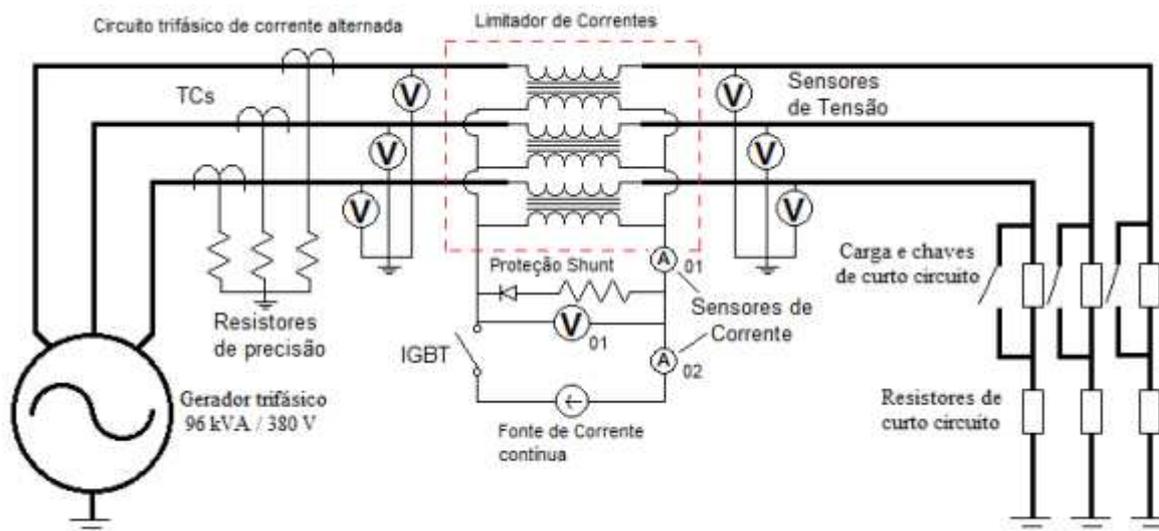


Figura 7.1: Circuito elétrico para realização dos ensaios no LCENS

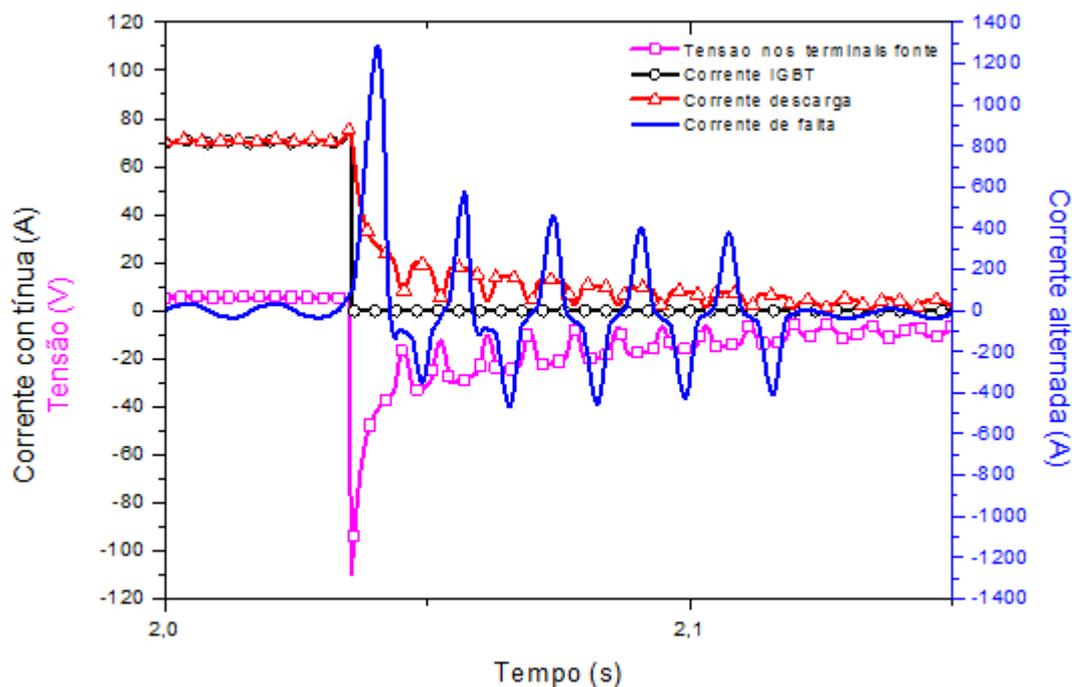
No gráfico da figura 7.2 pode-se observar a forma de onda da corrente de curto-circuito em comparação com a corrente e a tensão do circuito de corrente contínua nas seguintes condições: tensão de fase 220V, corrente de linha 25A, corrente prospectiva de curto-circuito 1,6kA, resistor *shunt* 2 $\Omega$  e corrente contínua de saturação núcleo magnético do limitador de 70A.

Quando ocorrer o curto-circuito, a corrente do IGBT sofre um pequeno aumento em seu valor, devido à corrente induzida pelo curto-circuito e, em seguida o IGBT se abre, através do comando enviado pelo sistema de detecção de curto-circuito e a sua corrente decai do patamar de 70A tendendo a zero.

A corrente de descarga tem o mesmo comportamento inicial da corrente do IGBT porém, quando o IGBT abre, o decaimento de corrente é de acordo com a constante de tempo devido à resistência *shunt* que está em série com o diodo de roda livre. Pode-se observar também que a corrente de descarga tem o comportamento oscilante em seu decaimento. Isto ocorre porque a corrente de curto-circuito induz uma tensão no enrolamento de corrente contínua, agora fechado pelo diodo e resistor, fazendo com que a corrente de descarga varie juntamente com a corrente de curto-circuito.

Na curva da tensão induzida nos terminais da bobina de magnetização do LCENS, vista na figura 7.2, nota-se que a tensão no início apresentava valor positivo, pois o circuito era alimentado pela fonte de corrente contínua. No momento em que o IGBT se abre a corrente contínua é interrompida, e a tensão nos terminais do enrolamento de corrente contínua inverte-se abruptamente devido à passagem da corrente de descarga pelo circuito contendo o diodo e o resistor (circuito de descarga).

Observa-se que, no decorrer do tempo, as curvas da corrente de descarga e da tensão nos terminais da fonte, apresentam um comportamento combinado da corrente contínua que magnetizava o núcleo com a corrente alternada induzida durante o curto-circuito.

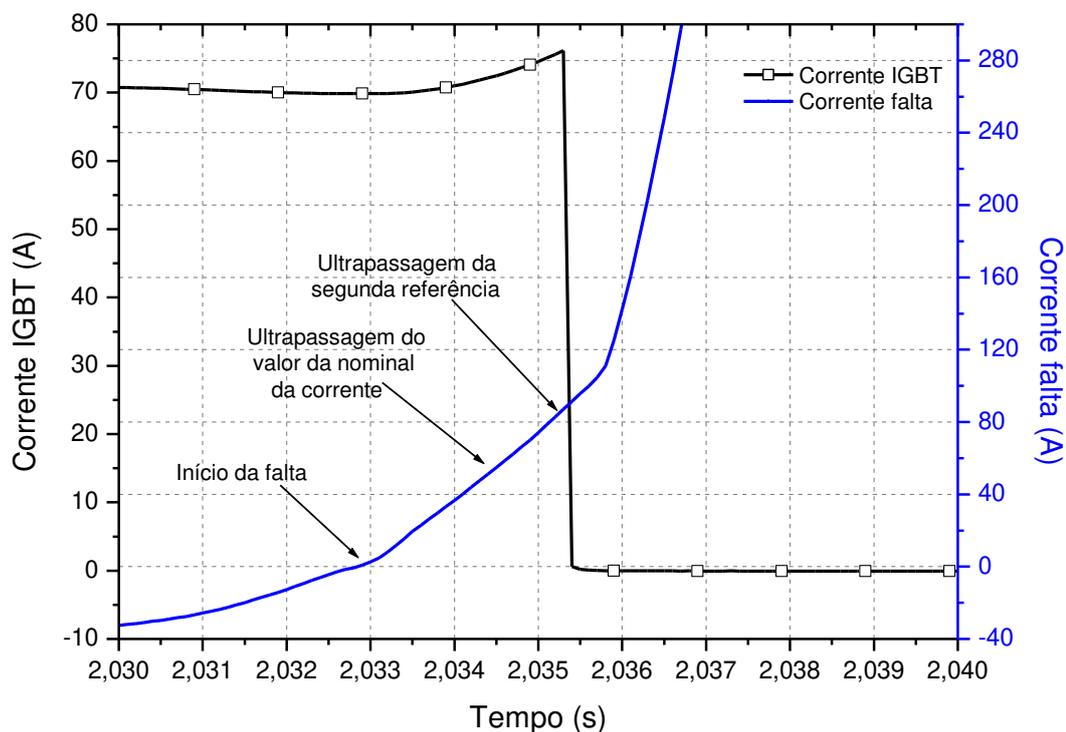


**Figura 7.2: Comparação entre corrente de falta e correntes do circuito de corrente contínua**

Na figura 7.3 apresenta-se uma ampliação do gráfico da figura 7.2, mostrando o momento exato em que ocorre a falta, no instante 2,0329s, em que a corrente cruza o zero. Nessa figura são mostradas somente a corrente de falta e a corrente do IGBT, para ficar mais clara a demonstração da atuação do circuito de detecção de falta.

A corrente de falta, a partir do início do curto-circuito, começa a aumentar e ultrapassa o valor nominal no instante 2,0344s, fazendo com que o primeiro comparador operacional do circuito de detecção de falta seja acionado e comece a contar o tempo de 1ms no temporizador.

No instante de tempo de aproximadamente 2,0353s a corrente de curto-circuito atinge o valor do segundo comparador operacional do circuito de detecção de falta. Como este tempo é menor do que 1ms (0,9ms), a lógica do circuito eletrônico detecta o curto-circuito, fazendo com que o IGBT seja aberto e corte a corrente que passava por ele, desconectando a fonte de corrente contínua.



**Figura 7.3: Comparação entre corrente de falta e corrente no IGBT**

Através da curva da figura 7.3, pode-se observar que o tempo decorrido desde o início da falta até a atuação do IGBT foi de 2,3ms, e o intervalo de tempo em que a corrente ultrapassa o valor nominal e o IGBT é acionado é de 0,9ms. Isto mostra a rápida atuação do dispositivo na detecção e intervenção para proteção da fonte de corrente contínua, cortando a corrente elétrica que mantinha o núcleo saturado e iniciando seu descarregamento.

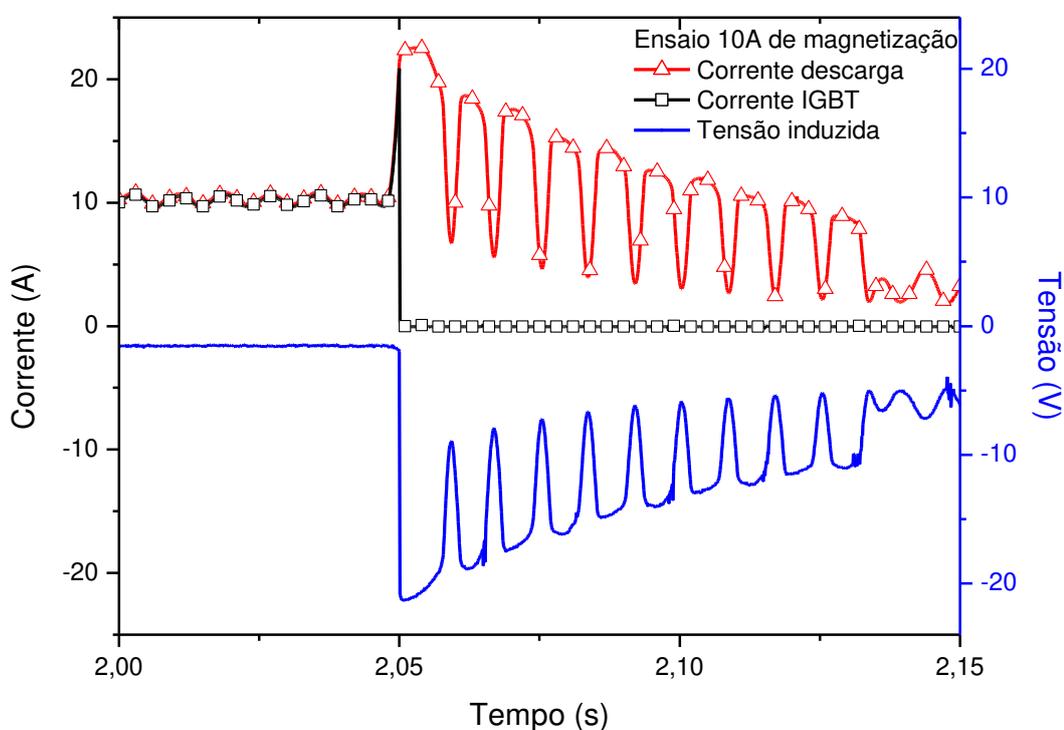
## **7.2 Análise da variação da corrente contínua no circuito de magnetização do LCENS.**

Um dos fatores que determina o custo da operação deste equipamento são as perdas sob condições normais de operação de funcionamento do LCENS. Portanto, em regime permanente, é desejável o menor valor de queda de tensão possível no limitador, o que significa um valor de impedância muito baixo do dispositivo.

Para que isto aconteça, os núcleos magnéticos devem estar profundamente saturados (2T) e isto só ocorre quando se aumenta o valor da corrente contínua que gera o campo magnético responsável por essa saturação.

Nestes ensaios foram verificados os efeitos causados pelo aumento da corrente contínua na bobina de campo, levando em consideração o valor das correntes e tensões do núcleo magnético.

Para a realização deste ensaio foram utilizadas as seguintes condições: tensão de fase 220V, corrente de linha 25A, corrente prospectiva de curto-circuito 1,6kA, resistor *shunt* de 1 $\Omega$ , corrente contínua do circuito de magnetização do limitador variável entre 10 a 70A.

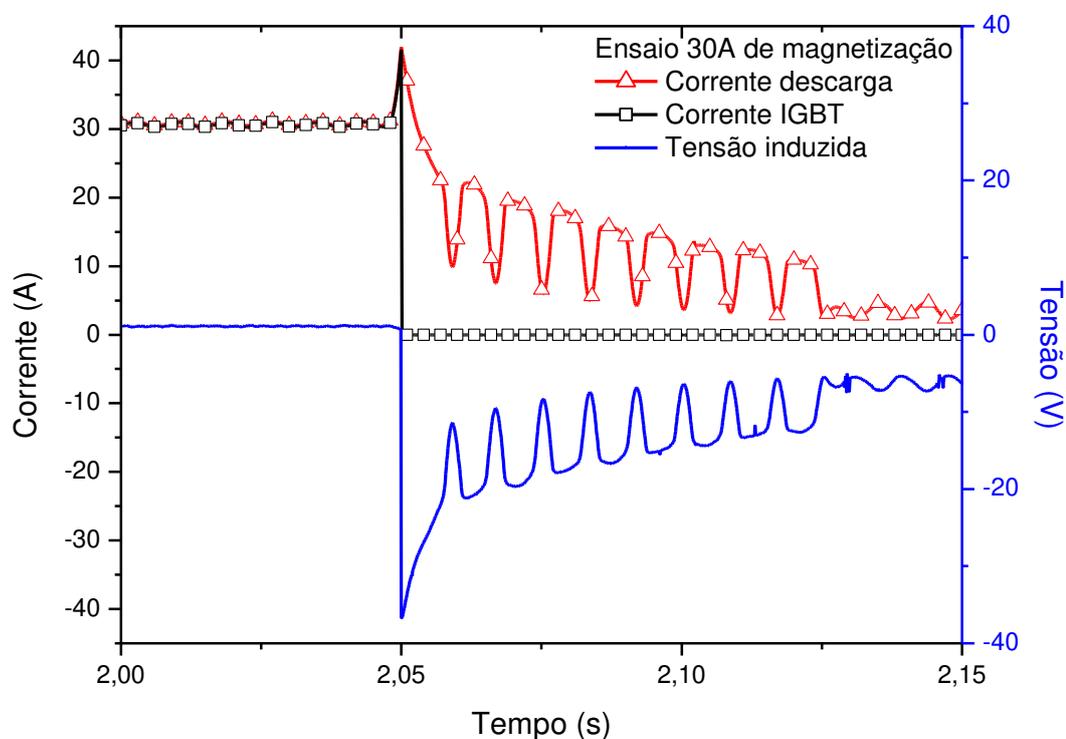


**Figura 7.4: Correntes e tensão no LCENS para ensaio com corrente contínua de 10A**

Na Figura 7.4 verifica-se que: as correntes de descarga e do IGBT, antes do momento de falta, apresentam um valor próximo de 10A com uma pequena ondulação e, no momento que ocorre o curto-circuito, ambas as correntes apresentam uma elevação por causa da tensão induzida neste circuito. Porém, quando o IGBT se abre, sua corrente cessa quase que instantaneamente, sendo que a corrente de descarga diminui de acordo com a constante de tempo do circuito, tendo somente a variação causada pela tensão induzida em seus terminais.

A tensão nos terminais da bobina de magnetização, antes da falta, é constante. Devido à regulação de *offset* nos sensores ela apresenta sinal negativo, porém seu valor é positivo e muito baixo. No momento em que ocorre a falta ela aumenta negativamente para um valor proporcional à corrente induzida no circuito e depois diminui de acordo com a constante de tempo do circuito de descarga.

Na Figura 7.5, as correntes no IGBT e do circuito de descarga apresentam comportamento semelhante ao descrito anteriormente, com corrente de magnetização do núcleo de 30A e, no momento do curto-circuito, os valores das correntes apresentam uma elevação devido à tensão induzida pelo curto-circuito.



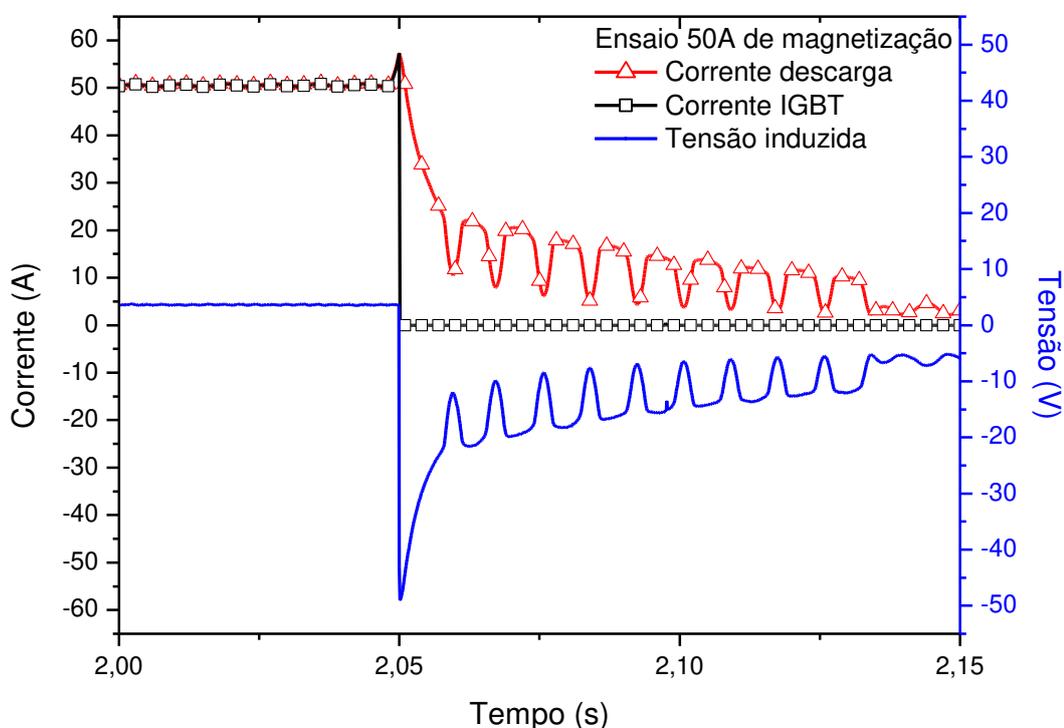
**Figura 7.5: Correntes e tensão no LCENS para ensaio com corrente contínua de 30A**

Diferente do ensaio anterior, a tensão da fonte de corrente contínua não apresenta valor negativo antes da falta. O valor da tensão da fonte de corrente contínua é maior do que a do ensaio com 10A no enrolamento de campo, ultrapassando a regulação de *offset* dos sensores. No momento em que ocorre a falta, a tensão induzida tem o mesmo comportamento descrito anteriormente, aumentando abruptamente, com polaridade negativa para um valor

proporcional à corrente induzida no circuito e diminuindo ao longo do tempo com a descarga do circuito magnético.

Na figura 7.6 apresenta-se o resultado do ensaio com corrente contínua de saturação de 50A. Nota-se que, no momento da falta a variação das correntes de descarga e do IGBT são ligeiramente inferiores aos dos ensaios anteriores, porém o valor da corrente de descarga não sofre alteração significativa.

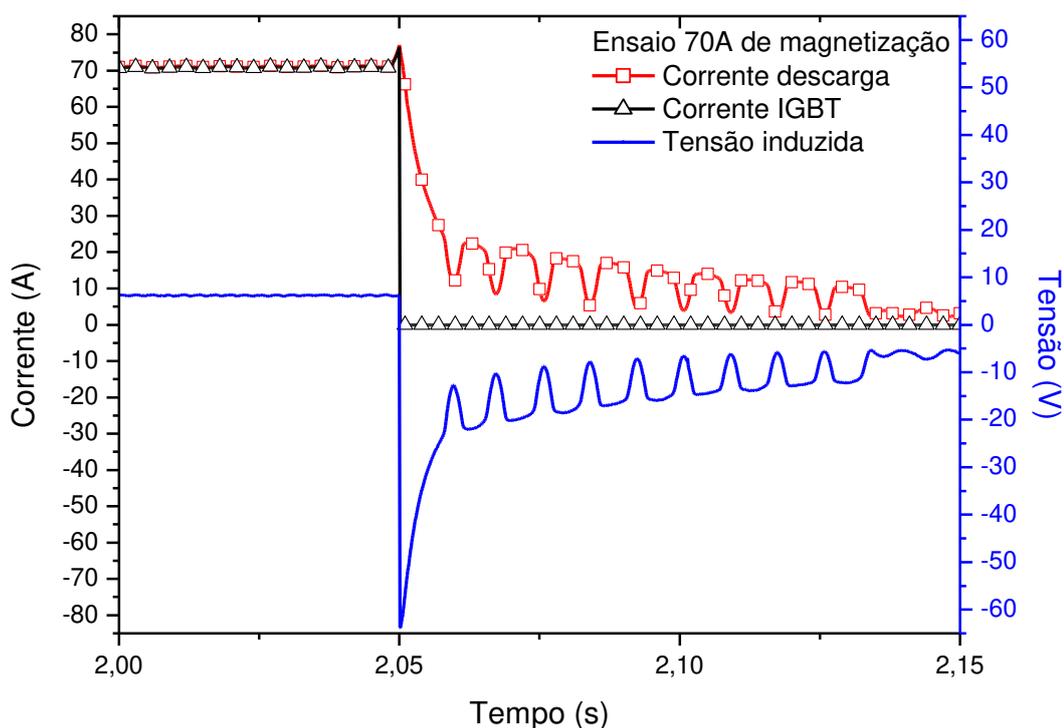
A tensão nos terminais do circuito de magnetização do núcleo também desenvolve um comportamento semelhante ao anterior, com diferença da magnitude do primeiro pico.



**Figura 7.6: Correntes e tensão no LCENS para ensaio com corrente contínua de 50A**

Na figura 7.7 pode-se observar que as formas de onda obtidas no ensaio com corrente de magnetização de 70A tiveram um comportamento semelhante às dos três ensaios anteriores, havendo diferença somente pela magnitude dos valores da tensão e das correntes.

Pode-se observar também que, através da corrente e da tensão da fonte de corrente contínua que apresentam valores de 70A e 8,31V, a potência dissipada para geração do campo magnético de saturação do núcleo foi de 581,7W.



**Figura 7.7: Correntes e tensão no LCENS para ensaio com corrente contínua de 70A**

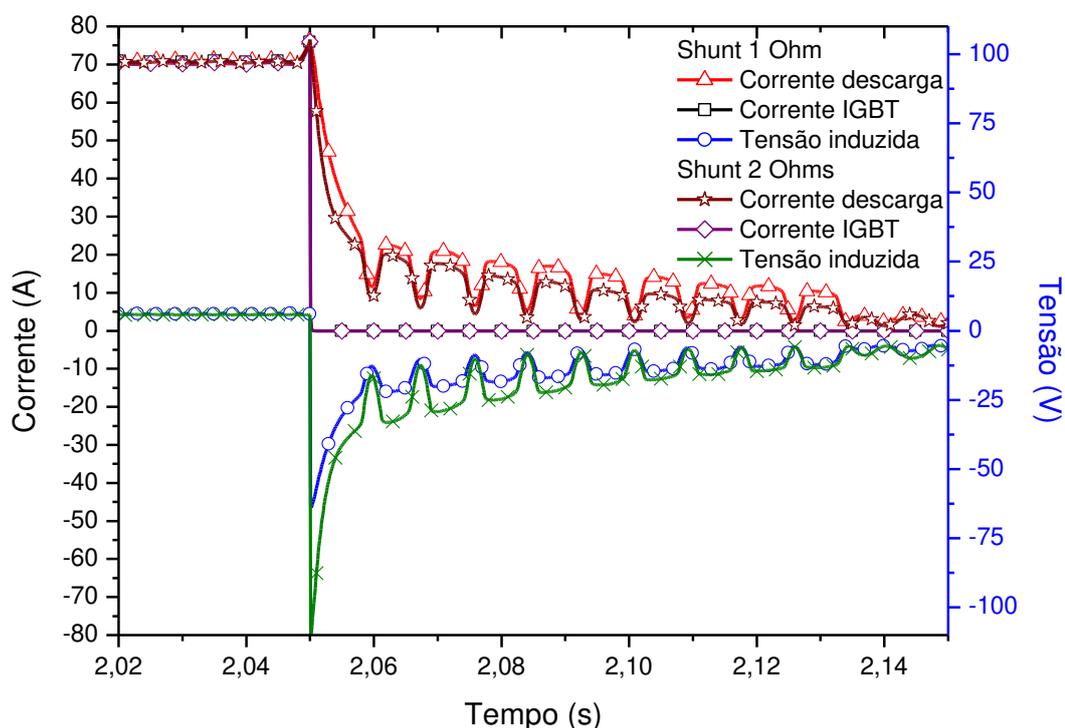
Quanto mais rápida for descarregada a energia armazenada no núcleo magnético, melhor será o desempenho do LCENS para limitação da corrente elétrica.

O circuito de descarga do LCENS apresenta um resistor que, se tiver o valor alterado, reduzirá a variação do tempo de descarga.

Para a realização deste ensaio, foram utilizadas as seguintes condições: tensão de fase 220V, corrente de linha 25A, corrente prospectiva de curto-circuito 1,4kA, corrente contínua do circuito de magnetização do limitador 70A, resistores *shunt* de 1 $\Omega$  e de 2 $\Omega$ .

Se o valor deste resistor for muito alto, dependendo da corrente de descarga, o valor da tensão nos terminais da bobina de corrente contínua pode causar ruptura em seu isolamento. Dessa forma, deve-se dimensioná-lo de maneira que a corrente de descarga decaia rapidamente sem ultrapassar o valor de tensão de isolamento dos componentes utilizados no LCENS.

Para o caso mostrado na (figura 7.8) foi utilizado resistor de 2 $\Omega$ . Como a indutância do enrolamento de corrente contínua é de 10,25mH e sua resistência é desprezível, a constante de tempo deste circuito de descarga mudou de 10,25ms para 5,12ms.



**Figura 7.8:** Comparação entre correntes e tensões do circuito de magnetização do LCENS mudando o resistor *shunt*

Comparando as correntes limitadas para os casos de diferentes valores de resistor *shunt*, observa-se na Figura 7.9, que a diferença entre os valores de pico das correntes medidas é de 27A no primeiro pico, 18A no segundo pico e 16A no terceiro pico. Evidenciando uma pequena diminuição entre as correntes limitadas quando se aumenta o valor do resistor *shunt*.

Com a análise dessas curvas, conclui-se que o dimensionamento do resistor *shunt* do circuito de descarga do LCENS tem importância para determinar a velocidade de desmagnetização do núcleo ferromagnético, melhorando seu desempenho quando a constante de tempo do decaimento da corrente de campo for reduzida. Entretanto, deve-se tomar o devido cuidado para que o valor da tensão não cause ruptura do isolamento dos condutores deste enrolamento, nem ocorra a ultrapassagem do valor nominal de tensão entre o coletor e o emissor da chave IGBT quando esta estiver aberta.

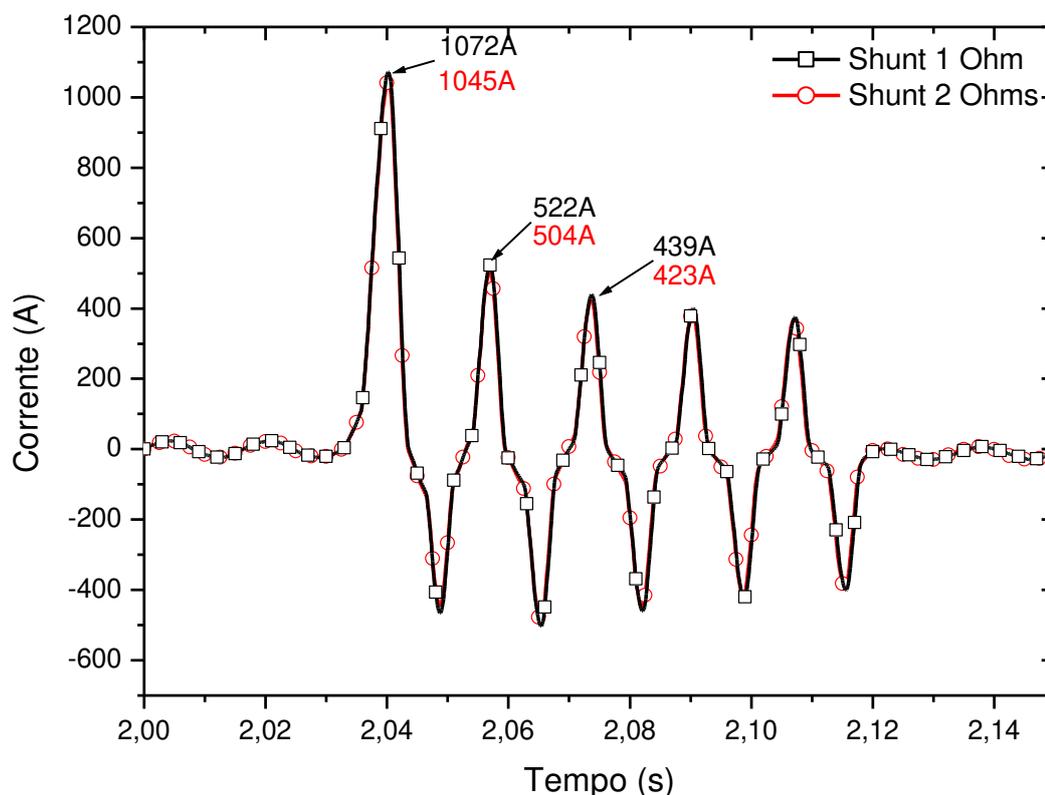


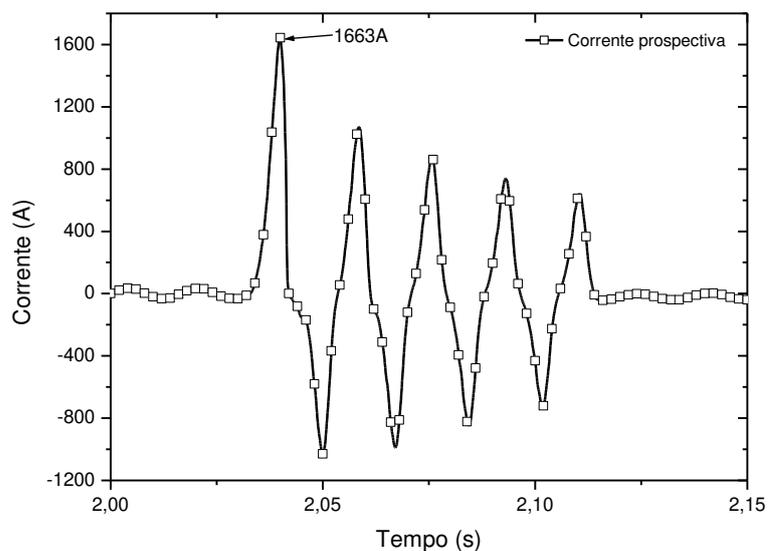
Figura 7.9: Comparação entre correntes limitadas no LCENS variando o resistor *shunt*

### 7.3 Ensaios de curto-circuito no LCENS

Os ensaios de curto-circuito foram realizados utilizando uma das fases de um gerador trifásico de 96kVA/380V ligado em série com uma carga resistiva variável (figura 7.1).

Para se obter a máxima corrente de curto-circuito foi utilizada uma chave estática eletrônica em paralelo com a carga resistiva do circuito. A chave estática, constituída de dois tiristores em antiparalelo, tem capacidade de suportar um curto-circuito de até 2,4kA, em uma tensão de linha de 220V.

O gerador utilizado apresenta corrente nominal de aproximadamente 145A. Estima-se, então, que em condição de falta, a corrente de curto-circuito atinja aproximadamente 10 vezes o valor da corrente nominal deste gerador. A figura 7.10 mostra a curva obtida no ensaio de determinação da corrente de curto-circuito máxima do gerador utilizado. Nota-se que o primeiro pico da forma de onda atinge um valor próximo de 1600A.

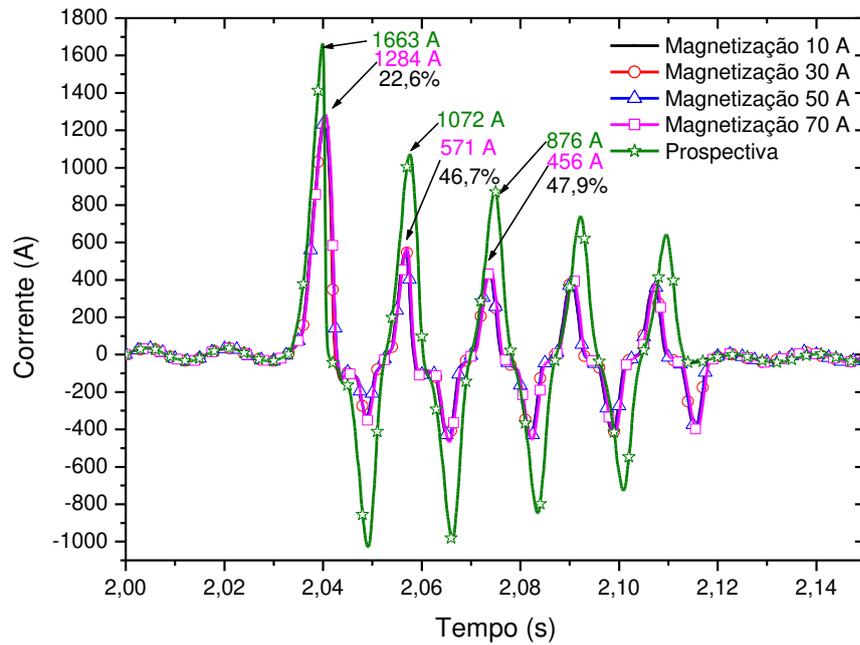


**Figura 7.10: Corrente de curto-circuito monofásico pleno no gerador trifásico de 96kVA/380V**

Inserindo o LCENS no circuito foram realizados vários ensaios com diferentes valores de corrente contínua em seu enrolamento de magnetização do núcleo. As condições de ensaio foram as seguintes: tensão de fase 220V, corrente nominal de fase 30A, correntes contínuas do circuito de campo 10, 30, 50 e 70A. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 7.11.

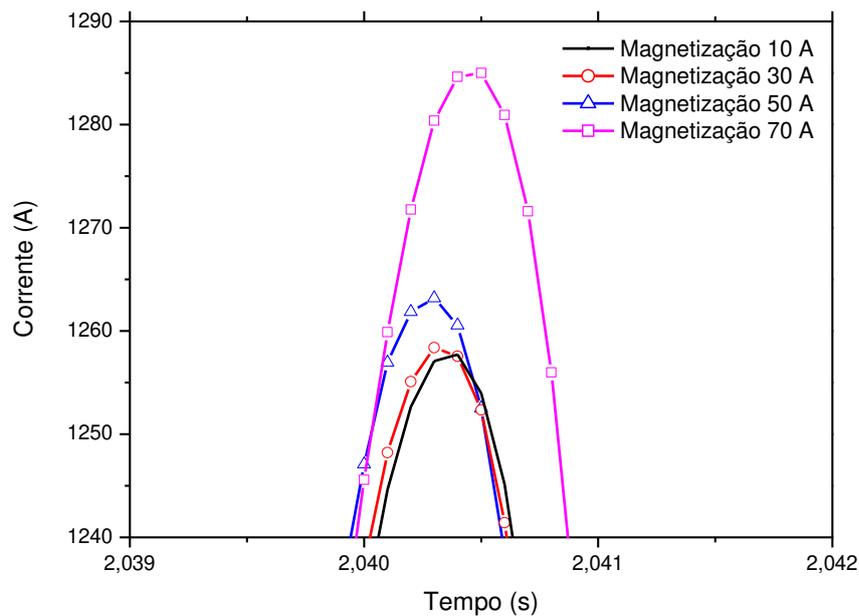
A forma de onda da corrente prospectiva, no seu primeiro semiciclo positivo atinge amplitude de 1663A, 1072A no segundo e 876A no terceiro, sendo que essa redução dos picos de corrente ocorre devido à desmagnetização do gerador síncrono durante a ocorrência do curto-circuito, apresentando um decaimento da amplitude da corrente de falta ocorrida, portanto, este decaimento deve ser considerado no cálculo do fator de limitação do LCENS. Outra observação a ser levada em conta é que na obtenção desta curva prospectiva de falta, o gerador também tem a sua velocidade angular reduzida, fazendo com que sua forma de onda fique ligeiramente atrasada em relação à forma de onda limitada para os últimos ciclos do curto-circuito

Nas curvas de correntes limitadas com o LCENS inserido no circuito, obteve-se no primeiro pico da corrente prospectiva de 1663A, o valor da corrente limitada foi de 1284A, no segundo pico obteve-se 571A e no terceiro 456A, mostrando uma redução na amplitude da corrente de curto-circuito de 22,6%, 46,7% e 47,9% do primeiro para o terceiro pico, respectivamente.



**Figura 7.11: Comparação entre corrente prospectiva de 1600A e corrente limitada no LCENS**

Apesar de ter sido obtido o maior fator de limitação para a corrente de magnetização de 10A, deve-se considerar que é necessário ter-se quedas de tensão razoáveis durante a operação nominal do circuito protegido.



**Figura 7.12: Detalhe do primeiro pico das correntes limitadas com diferentes correntes de magnetização para corrente prospectiva de falta de 1600A.**

O núcleo magnético encontra-se mais profundamente saturado no caso em que a corrente contínua tem maior valor, portanto, a corrente que passa no enrolamento de corrente alternada é limitada por uma impedância menor do que a que corresponde a uma corrente contínua de 10A no circuito de magnetização (figura 7.12). Deste modo no momento do curto-circuito a corrente limitada correspondente a uma corrente contínua de 70A tende a um valor ligeiramente maior do que as outras onde o núcleo magnético está menos saturado, assim como visto nas simulações apresentadas no capítulo 5.

O projeto do limitador de corrente elétrica, foi elaborado para ter 70 espiras em cada enrolamento de corrente alternada, porém, em sua construção foi inserida uma derivação nestes enrolamentos que permitiu a realização de testes com 20, 50 ou 70 espiras nos enrolamentos de corrente alternada.

Para testar o limitador em diversas condições de corrente prospectiva, utilizou-se um resistor variável em série com a carga do circuito principal. Isto permitiu a realização de testes com curtos-circuitos de magnitudes variadas de 300, 600 e 1400A.

Estes testes adicionais foram realizados com o objetivo de se verificar o comportamento do LCENS sob várias condições de curto-circuito. Um sumário dos resultados obtidos nos testes laboratoriais e nas simulações pode ser observado na tabela 7.1, onde se pode perceber que o LCENS tem melhor desempenho para correntes de curto-circuito que apresentam valores acima de 1kA e com 70 espiras nos enrolamentos de corrente alternada. Estas são as condições de projeto elaborado usando aplicativos computacionais e a consequente construção do limitador. Nota-se também que os resultados das simulações são próximos dos obtidos nos testes laboratoriais.

**Tabela 7.1: Comparação entre fatores de limitação do LCENS obtidos com 70 espiras no enrolamento de corrente alternada.**

	<b>Fator de limitação máximo para cada nível de curto-circuito (%)</b>			
	<b>300A</b>	<b>600A</b>	<b>1400A</b>	<b>1600A</b>
<b>Ensaio</b>	20	31,5	51	47,9
<b>Simulações</b>	12	23,5	47,2	50,5

## 7.4 Queda de tensão nos terminais do LCENS

Para dimensionamento do LCENS, foi considerada como fator importante o valor da queda de tensão nos terminais do LCENS em função da corrente nominal de linha e da corrente contínua de magnetização do núcleo ferromagnético, sendo os valores experimentais obtidos apresentados a seguir.

Na figura 7.13, são apresentados os gráficos das quedas de tensões do LCENS em regime permanente. Nesses gráficos foi analisado o valor da queda de tensão mantendo-se 70 espiras nos enrolamentos de corrente alternada, variando a condição de carga nominal em 17, 25 e 30A e variando-se a corrente contínua no limitador para se obter correntes de 10, 30, 50 e 70A.

Através dessa análise foi possível traçar um perfil de impedância aparente do LCENS em função das correntes nele aplicadas, permitindo a otimização das condições de trabalho em regime permanente e a avaliação das perdas de operação do equipamento. Os valores obtidos podem ser visualizados na Tabela 7.2.

Os valores eficazes da tensão foram calculados através da raiz quadrada da média aritmética dos quadrados dos valores da onda medida, que se dá pela fórmula (7.1):

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_N^2}{N}} \quad (7.1)$$

Onde  $N$  é o número de amostras do intervalo de dados medido.

Sendo assim, verifica-se que, à medida que se aumenta a corrente de magnetização do LCENS o valor da queda de tensão em seus terminais e sua impedância aparente diminuem, por outro lado, ao se aumentar a corrente da carga, a queda de tensão nos terminais de corrente alternada do LCENS aumenta. Portanto, para se encontrar o ponto ótimo de operação desse equipamento em relação às perdas de regime permanente, deve-se ajustar a corrente de magnetização a um valor que, sob condições nominais de operação, o limitador de corrente elétrica não apresente uma impedância muito grande sob o ponto de vista da rede elétrica.

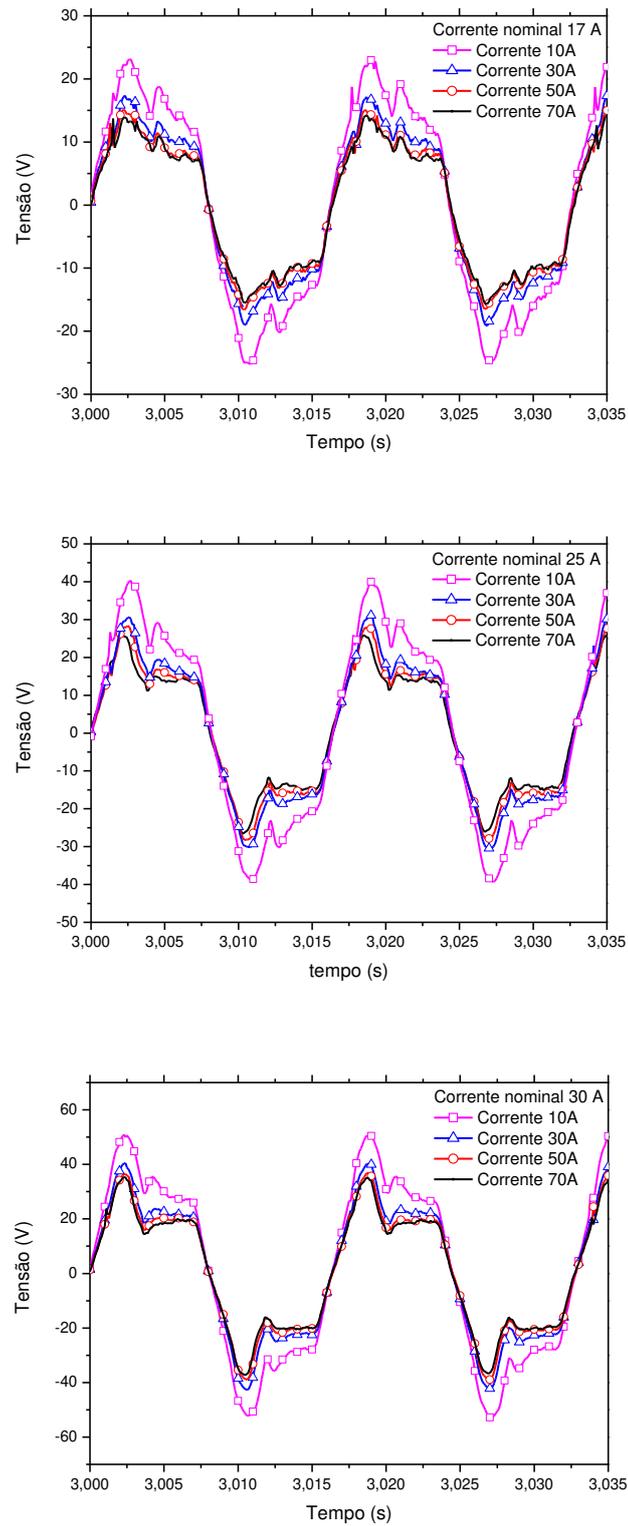


Figura 7.13: Queda de tensão no LCENS sob diversas condições de carga

Tabela 7.2: Impedância aparente do LCENS sob várias condições de carga

Condição dos parâmetros		Resultados dos ensaios		
Corrente de magnetização (A)	Corrente CA (A)	Queda de tensão em uma fase do LCENS (V)	Queda de tensão em uma fase do LCENS (%)	Impedância aparente do enrolamento de uma fase ( $\Omega$ )
<b>10</b>	17	14,75	6,7	0,867
	25	23,06	11,84	0,922
	30	29,76	13,52	0,992
<b>30</b>	17	11,21	5,09	0,659
	25	17,07	7,75	0,682
	30	22,44	10,2	0,748
<b>50</b>	17	9,69	4,4	0,570
	25	15,60	7,09	0,624
	30	20,02	9,1	0,667
<b>70</b>	17	9,38	4,2	0,551
	25	14,35	6,5	0,574
	30	19,18	8,7	0,639

Pode-se observar que o melhor desempenho do LCENS foi confirmado para corrente alternada de 30A, com uma corrente de magnetização de 70A, para corrente prospectiva de falta de 1,6kA. A queda de tensão do LCENS operando em regime permanente obtida experimentalmente de 19,18V (8,7%), ultrapassou o valor previsto pela norma, porém esta impedância elevada deve-se às dificuldades construtivas de unidade de pequeno porte do LCENS, sobretudo na montagem e alinhamento do núcleo magnético, com seção transversal reduzida e alto comprimento de janela, possivelmente aumentando a dispersão magnética e consequentemente as perdas.

## 8. Conclusões e trabalhos futuros

Neste trabalho foram realizadas as etapas de projeto, construção e ensaios laboratoriais de um limitador de corrente elétrica de núcleo magnético saturado (LCENS). Para o projeto básico, foram realizados os cálculos para o dimensionamento dos circuitos magnéticos, definindo as dimensões dos núcleos magnéticos, assim como das bobinas que possibilitam a saturação profunda do núcleo magnético (bobinas de corrente contínua) durante operação em regime permanente (para pequena queda de tensão no circuito) e durante a falta, para limitar a corrente de curto-circuito que circula nas bobinas de corrente alternada que fazem parte do LCENS.

Com as dimensões básicas do núcleo magnético e dos enrolamentos de saturação e de limitação de corrente já definidos, o dimensionamento refinado foi realizado utilizando um software de elementos finitos (Maxwell – Ansys), acoplado ao software de circuitos elétricos (Simplorer – Ansys) para simulação do LCENS inserido na rede elétrica.

Foram simuladas diversas condições de operação, variando-se os parâmetros construtivos e de operação tais como: número de espiras nas bobinas de corrente contínua e de corrente alternada, corrente de saturação, corrente de regime permanente, corrente prospectiva de falta e tempo de duração de falta. Pode-se dizer que toda a tecnologia do projeto e simulação do LCENS foi dominada, inclusive permitindo futuramente a troca do enrolamento de saturação do núcleo magnético construído em condutor de cobre por fita supercondutora de YBCO, já considerando o espaço necessário para o criostato de resfriamento com nitrogênio líquido.

Para detecção de falta foi projetado e construído um circuito analógico específico com tempo de atuação inferior a 4ms. Este circuito detecta curtos-circuitos através de comparadores de janela em conjunto com um temporizador. Sua atuação foi simulada através do aplicativo computacional Simplorer, durante as simulações realizadas para diferentes condições de curto-circuito na rede elétrica.

Também foi desenvolvido um circuito elétrico para controlar a fonte de corrente contínua que alimenta a bobina de saturação durante operação em regime permanente, e que durante a falta deve ser desconectada do circuito através de um IGBT, cujo gatilho é acionado pelo circuito detector de falta. Para evitar a sua queima, pela elevada tensão induzida em seus terminais, a fonte de corrente contínua é isolada do circuito e a energia armazenada no enrolamento é dissipada em um resistor externo em menos de 50ms após a ocorrência da falta.

Para permitir a aquisição dos valores das grandezas obtidas nos ensaios foi desenvolvido um sistema contendo sensores de tensão e de corrente, cujos sinais elétricos foram adquiridos através do sistema de aquisição de dados DAQ-NI USB-6216, cujo sistema de controle foi escrito e executado através de programação em Labview.

Comparando-se os resultados das simulações com os resultados dos ensaios laboratoriais, observou-se que a utilização do software de elementos finitos permitiu atingir resultados muito próximos aos obtidos nos ensaios realizados, comprovando sua eficiência para o projeto de LCENS.

Através dos valores das quedas de tensão nos terminais do LCENS, obtidos durante ensaios de regime permanente, observou-se que quanto maior for a corrente de magnetização do núcleo magnético, menor será a queda de tensão em seus terminais de corrente alternada. Portanto, é necessária a profunda saturação do núcleo deste limitador para que, durante operação normal, ele apresente uma impedância aparente de valor baixo para o sistema elétrico em que está inserido. Nos ensaios realizados, observou-se que o melhor desempenho do LCENS foi obtido para corrente de falta de 1600A, que operando com corrente contínua de saturação em 70A, permitiu limitar a corrente de curto-circuito em 47,9%. Com o LCENS operando em regime permanente, a menor queda de tensão eficaz obtida experimentalmente foi de 19,18V (8,7%) conforme a forma de onda mostrada na figura 7,13.

Como todo gerador apresenta um amortecimento de corrente quando submetido a ensaio de curto circuito, a avaliação do fator de limitação da unidade, para as diversas correntes de falta ensaiadas, foi feita comparando-se os três primeiros picos da corrente limitada com os respectivos picos da corrente prospectiva, obtida através do chaveamento da carga para controlar o curto circuito no gerador. Obtiveram-se os fatores de limitação de 22,6%, 46,7% e 47,9% para os três primeiros picos de corrente, durante o ensaio realizado para corrente prospectiva de 1600A e a corrente de saturação do núcleo de 70A.

O sistema de detecção de falta e desligamento da fonte de corrente contínua do LCENS foi projetado e construído para atuar em menos de 4ms, garantindo a proteção da fonte de corrente contínua. Trata-se de um circuito inédito para esta aplicação, sobretudo com respeito ao tempo de detecção e atuação.

O circuito construído é analógico e tem baixo custo de produção, apresentando funcionamento rápido e sendo mais confiável se comparado com outros sistemas microprocessados, que tem uma complexidade maior em seu funcionamento.

Para trabalhos futuros, poderá ser executada a substituição, utilizando o mesmo protótipo, do enrolamento de magnetização de núcleo executado em cobre com material supercondutor, utilizando-se fita de YBCO de 0,2 x 4mm operando em corrente de 70A, que irá reduzir significativamente as perdas no enrolamento operando em corrente contínua para saturação do núcleo magnético do LCENS.

Outra sugestão para trabalhos futuros é desenvolver um novo circuito que, além de detectar o curto circuito e desligar a fonte de corrente contínua de alimentação, como o desenvolvido faz, permitisse nova magnetização do núcleo do LCENS após a extinção da falta, viabilizando a operação para ensaios de curtos-circuitos subsequentes.

## REFERÊNCIAS

- [1] MINISTÉRIO DE MINAS DE ENERGIA. In: EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2015. p. 69 e p. 182. 2015. Disponível em: [https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2015.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2015.pdf). Acesso em: 23 julho 2015.
- [2] EPRI, "Superconducting Fault Current Limiters", *Technology Watch*, Dec. 2009. Product ID: 1017793
- [3] SERWAY, Raymond. A. e JEWETT Jr., John W. Física 4, Física moderna, Relatividade, Física atômica e nuclear. Vol 4, 3. ed. São Paulo: LTC, 2004
- [4] SOUSA, Wescley Tiago Batista de. Simulações e ensaios com limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores do tipo resistivo. Dissertação (Mestrado em Engenharia elétrica) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.
- [5] BALDAN, Carlos Alberto. Dimensionamento, construção e teste de magneto supercondutor para gerar 12 T (Nb<sub>3</sub>Sn + NbTi). Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.
- [6] LAMAS, Jérika Suely. Projeto e construção de limitador de corrente supercondutor utilizando fitas de YBCO. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2009.
- [7] WILLIS, J. O. WTECH Hyper-Librarian. HTS conductor technology. Set. 1997. Disponível em: [http://www.wtec.org/loyola/scpa/05\\_02.htm](http://www.wtec.org/loyola/scpa/05_02.htm). Acesso em: 28 jul 2015.
- [8] RUPICH, M. W. Workshop, DoE wire development. A robust low-cost 2G HTS wire architecture, 2006. Disponível em: <http://events.energetics.com/wire06/pdfs/session1/rupich.pdf> . Acesso em: 28 jul. 2015.
- [9] CATÁLOGO American Superconductor. Disponível em: [http://www.amsc.com/library/BRSAMP8700\\_DS\\_A4\\_0514\\_WEB.pdf](http://www.amsc.com/library/BRSAMP8700_DS_A4_0514_WEB.pdf), [http://www.amsc.com/library/CPRAMP8501\\_8502\\_DS\\_A4\\_0414\\_WEB.pdf](http://www.amsc.com/library/CPRAMP8501_8502_DS_A4_0414_WEB.pdf), [http://www.amsc.com/library/SSAMP8602\\_DS\\_A4\\_0414\\_WEB.pdf](http://www.amsc.com/library/SSAMP8602_DS_A4_0414_WEB.pdf) e [http://www.amsc.com/library/SSAMP8612\\_DS\\_A4\\_0614\\_WEB.pdf](http://www.amsc.com/library/SSAMP8612_DS_A4_0614_WEB.pdf) . Acesso em: 22 jul. 2015.

- [10] CATÁLOGO Superpower inc. Disponível em: [http://www.superpower-inc.com/system/files/SP\\_2G+Wire+Spec+Sheet\\_2014\\_web\\_v1\\_0.pdf](http://www.superpower-inc.com/system/files/SP_2G+Wire+Spec+Sheet_2014_web_v1_0.pdf) . Acesso em: 22 jul. 2015.
- [11] EHTS BSCCO, Data sheet. Germany: European High Temperature Superconductors, 2003.
- [12] YIM, S. W. et al. "Quench and recovery behaviors of Bi-2223/Ag HTS tapes under pulsed over-currents", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 15, n. 2. p. 2482-2487, 2005.
- [13] MONTEIRO, A. M. "Um estudo de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito com ênfase no IPC (Interphase Power Controller)", Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, Fev. 2005.
- [14] BALDAN, C.A., et al.: Test of modular fault current limiter for 220V line using YBCO coated conductor tapes with shunt protection. *IEEE Transactions on applied Superconductivity*, vol. 21, n. 3, p 1242–1245, June 2011.
- [15] - Catálogo IBT – Industria Brasileira de Transformadores LTDA. Disponível em: <http://www.ibtind.com.br/produto05.pdf> . Acesso em: 24 junho 2015.
- [16] IEEE STANDARDS ASSOCIATION. IEEE Std C57.16™.2011: IEEE Standard for requirements, Terminology, and Test Code for Dry-Type Air-Core Series-Connected Reactors. USA, 2012.
- [17] OLIVEIRA, F. D. C, "Limitador de corrente de falta supercondutor", Tese de mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, Brasil, 2005.
- [18] ABB, "IS-limiter, the world fastest limiting and switching device", Catálogo, Alemanha, 2014.
- [19] DOMMERQUE, R. et al, "First commercial medium voltage superconducting fault-current limiters: production, test and instalation", *Superconductor Science and Technology*, Vol. 23, Fevereiro 2010. doi: 10.1088/0953-2048/23/3/034020
- [20] HOBL, A. et al, "Design and production of the ECCOFLOW resistive fault current limiter", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 23, n. 3, June, 2013.

- [21] SOUSA, W. T. B. et. al, "Comparison between the fault current limiting performance of Bi-2212 bifilar components and 2G YBCO coils", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 23, n. 3, June, 2013.
- [22] EHTS BSCCO, Data sheet. Germany: European High Temperature Superconductors, 2003.
- [23] YIM, S. W. et al. "Quench and recovery behaviors of Bi-2223/Ag HTS tapes under pulsed over-currents", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 15, n. 2. p. 2482-2487, 2005.
- [24] ANH, M. C. et al. "Current limiting characteristics of coated conductors with various stabilizers" *Cryogenics*. Vol. 47, p. 425-430, 2007.
- [25] SCHMIDT, W. et al. "Investigation of YBCO coated conductors for fault current limiter applications", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 17n. 2 p. 3471-3474, June 2007.
- [26] ELSCHNER, S. et al. "Design, manufacturing and test of a 3-phase resistive fault current limiter based on coated conductors for medium voltage application", *Physica C: Superconductivity*, vol. 482, p. 98-104, November 2012.
- [27] LEE, G. -H. et al, "Hybrid superconducting fault current limiter of the first half cycle non-limiting type", *IEEE transactions on applied superconductivity*, Vol. 19, p. 1888-1891, no. 3, June 2009.
- [28] HYUN, O. -B. et al. "Introduction of a hybrid SFCL in KEPCO grid and local points as issue", *IEEE transactions on applied superconductivity*, Vol. 19, p. 1946-1949, no. 3, June 2009.
- [29] BERGER, A. et al. "Test results of 60 kVA current limiting transformer with full recovery under load", *IEEE transactions on applied superconductivity*, Vol. 21, p. 1384-1387, no. 3, June 2011.
- [30] MCCONNELL, B. W. et al: HTS transformers. *Power engineering Review*, Vol. 20, n. 6, p 7–11, Jun 2000. doi: 10.1109/39.846102
- [31] KOTARI, M. et al, "Development of 2 MVA class superconducting fault current limiting transformer (SFCLT) with YBCO coated conductors", 9th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 09), 2010. doi: 10.1088/1742-6596/234/3/032070.

- [32] BÄUML, K. et al. "Inductive shielded superconducting fault current limiter - a new cost effective solution for industrial network applications", Conference publication *Petroleum and Chemical Industry Conference Europe Conference Proceedings*, p. 1-7 Italy - Rome, June 2011.
- [33] XIN, Y. et al. "Development of saturated iron core HTS fault current limiters", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 17, n. 2, p 1760-1763, June 2007.
- [34] MORICONI, F. et al. "Development and deployment of saturated-core fault current limiters in distribution and transmission substations", *IEEE Transactions on Superconductivity*, vol. 21, n. 3, p. 1288-1292, June 2011.
- [35] ZHAO, C. et al. "Transient simulation and analysis for saturated core high temperature superconducting fault current limiter", *IEEE Transactions on Superconductivity*, vol. 43, n. 4, p. 1813-1816, April 2007.
- [36] RAJU, B. P. et al. "A current limiting device using superconducting D.C bias applications and prospects", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-101, n. 9, p. 3173-3177, September 1982.
- [37] FAJONI, F. et al.: Study of Superconducting Fault Current Limiter Using Saturated Magnetic Core. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, vol. 28, n. 2, p 685–690, Feb 2015. doi: 10.1007/s10948-014-2871-y
- [38] HONG, H., et al.: "DC magnetization system for a 35kV/90MVA superconducting saturated iron-core fault current limiter". *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 19, 1851–1854 (2009)
- [39] XIN. Y., et. al.: "Manufacturing and test of a 35 kV/90 MVA saturated iron-core type superconductive fault current limiter for live-grid operation". *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 19, 1934 - 1937, June 2009.
- [40] XIN. Y., et. al.: "Factory tests of a 220 kV/300 MVA saturated iron-core superconducting fault current limiter". *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 23, June 2013.
- [41] CUI, J. et. al. "Study on field suppression unit in DC excitation system for saturated iron-core superconducting fault current limiter", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 24, n. 5, October 2014.

## ANEXO I

A partir da equação (6.1), dimensionou-se o núcleo magnético do LCENS para permitir sua completa saturação com ( $B_m = 2T$ ) quando operando em regime permanente e na região linear da curva  $B \times H$  do material, durante o curto circuito. Foram consideradas as seguintes condições: tensão de fase de 220V, indução magnética de 2T, frequência elétrica de 60Hz, e enrolamento de corrente alternada com 70 espiras em cada perna do núcleo.

$$E = 4,44BAfN \quad (6.1)$$

Com os valores já fixados foi possível calcular o diâmetro interno da bobina de corrente alternada de 61,2mm e na sequência o diâmetro do núcleo magnético de 37mm.

Para o cálculo da quantidade de espiras da bobina de corrente contínua foram utilizadas as equações (3.8) e (3.9). Da equação (3.8) obtém-se o valor da densidade de campo magnético durante o semiciclo em que o campo magnético, gerado pelo enrolamento de corrente alternada, se soma com o campo magnético gerado pelo enrolamento de corrente contínua, condição de núcleo profundamente saturado. A equação (3.9) dá o valor da intensidade de campo magnético durante o semiciclo que o campo magnético gerado pelo enrolamento de corrente alternada subtrai o valor do campo magnético gerado pelo enrolamento de corrente contínua.

$$N_d I_d + N_c I_c = H_1 l \quad (3.8)$$

$$N_d I_d - N_c I_c = H_2 l \quad (3.9)$$

Em condições nominais de operação a corrente nominal do circuito é de 30A, em cada um dos enrolamentos de corrente alternada há 70 espiras, portanto, o valor de H gerado por cada uma dessas bobinas é de aproximadamente  $\pm 1640 \text{ Ae/m}$ , onde seu sinal positivo ou negativo, depende de qual semiciclo esteja a rede elétrica.

Levando em consideração que o núcleo magnético deve estar profundamente saturado, sob condições nominais de operação, considerou-se que a densidade de campo magnético gerada pela corrente contínua deveria ser de pelo menos 10 vezes maior do que a

gerada pela corrente alternada. Sendo assim, o enrolamento de corrente contínua deve ter 300 espiras.

Com estes valores definidos, pode-se definir a altura da perna dos núcleos que será função das dimensões dos enrolamentos de corrente alternada. Para este enrolamento foram utilizados dois condutores de cobre esmaltado em paralelo, com diâmetro de 5,2mm (AWG 4) e área de  $2 \times 21,2\text{mm}^2$ , sendo a bobina enrolada em 2 camadas de 35 espiras. A altura da janela do núcleo foi calculada para 410mm com altura da bobina de 364mm, deixando o espaçamento superior e inferior de 23mm de cada.

A bobina de corrente contínua, alojada na outra perna do núcleo magnético, foi construída com 4 camadas de 75 espiras cada com o mesmo fio de 5,2mm de diâmetro, com a mesma altura da bobina de corrente alternada. O diâmetro interno desta bobina foi definido a partir do arranjo das seis pernas do LCENS como ilustrado nas figuras 6.6, 6.8 e 6.9.

A largura da janela do núcleo foi dimensionada para receber os enrolamentos de corrente contínua e de corrente alternada, permitindo futuramente a substituição do enrolamento de cobre para saturação do núcleo por fita supercondutora. A largura da janela do núcleo foi fixada em 160mm, totalizando um comprimento magnético médio de 1282,4mm em cada janela.

Com estes dados, O campo magnético  $H$  do limitador em cada semiciclo da rede elétrica pôde ser calculado.

$$H_1 = \frac{300 \times 70 + 70 \times 30}{1,2824} = 18013 \text{ Ae/m}$$

$$H_2 = \frac{300 \times 70 - 70 \times 30}{1,2824} = 14737 \text{ Ae/m}$$

Deste modo, o núcleo magnético permanece em estado de saturação enquanto o sistema elétrico estiver em regime permanente, conforme curva  $B \times H$  (figura 4.3).