

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E
ENGENHARIAS**

MARCELO CAPELLARI DO AMARAL

**LIMITADOR DE CORRENTE ELÉTRICA DE NÚCLEO SATURADO
(LCENS) - ESTUDO DE TOPOLOGIA DE FASE ÚNICA**

CAXIAS DO SUL

2025

MARCELO CAPELLARI DO AMARAL

**LIMITADOR DE CORRENTE ELÉTRICA DE NÚCLEO SATURADO
(LCENS) - ESTUDO DE TOPOLOGIA DE FASE ÚNICA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial
à obtenção do título de Engenheiro
Eletricista na Área do Conhecimento
de Ciências Exatas e Engenharias da
Universidade de Caxias do Sul.

Orientador: Prof. Me. Patrícia Gia-
comelli

CAXIAS DO SUL

2025

MARCELO CAPELLARI DO AMARAL

**LIMITADOR DE CORRENTE ELÉTRICA DE NÚCLEO SATURADO
(LCENS) - ESTUDO DE TOPOLOGIA DE FASE ÚNICA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial
à obtenção do título de Engenheiro
Eletricista na Área do Conhecimento
de Ciências Exatas e Engenharias da
Universidade de Caxias do Sul.

Aprovado(a) em

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Patrícia Giacomelli
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Prof. Me. André Bernardes Michel
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Prof. Me. Tiago Cassol Severo
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Dedico este trabalho a todos aqueles que este estudo possa despertar interesse.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, em especial à minha mãe, pelo apoio constante em minhas escolhas e pelo incentivo ao longo desta trajetória. À minha companheira, Andressa, pela inspiração, apoio e companheirismo durante esta jornada. Aos demais familiares e amigos, que contribuíram de alguma forma para minha caminhada.

Agradeço também à Professora Patricia Giacomelli, pela orientação, confiança e apoio durante o desenvolvimento deste trabalho.

A todos que colaboraram direta ou indiretamente para a realização deste estudo, deixo meus sinceros agradecimentos.

O que sabemos é uma gota, o que ignoramos é um oceano.

— *Paráfrase inspirada em Isaac Newton*

RESUMO

O crescimento contínuo dos sistemas elétricos de potência tem contribuído para o aumento dos níveis de corrente de curto-circuito, tornando necessária a adoção de soluções capazes de reduzir os esforços elétricos e mecânicos impostos aos equipamentos. Nesse contexto, os limitadores de corrente elétrica de núcleo saturado (LCENS) destacam-se por apresentarem baixa impedância em regime permanente e elevada capacidade de limitação durante faltas. Este trabalho propõe e avalia uma nova topologia monofásica de LCENS baseada em um núcleo ferromagnético único saturado por corrente contínua. O desenvolvimento envolveu a modelagem matemática do dispositivo a partir da Lei de Biot-Savart, da analogia entre circuitos elétricos e magnéticos, da Lei de Kirchhoff das Tensões e de métodos numéricos para solução das equações resultantes. O modelo foi implementado no *software Octave* e posteriormente validado por meio de simulações eletromagnéticas tridimensionais utilizando o *software Ansys Maxwell*. Os resultados demonstraram que a topologia proposta é capaz de limitar correntes de curto-circuito de forma eficaz, alcançando reduções próximas de 50% no valor de pico após o primeiro semiciclo de falta. Verificou-se ainda que o aumento de área de seção transversal do núcleo ferromagnético, eleva a capacidade de limitação do dispositivo, embora também aumente sua influência sobre a operação em regime permanente. A comparação entre os modelos implementados no *Octave* e no *Maxwell* indicou comportamento qualitativamente semelhante, validando a metodologia proposta. Conclui-se que a configuração de núcleo único constitui uma alternativa tecnicamente viável às topologias convencionais encontradas na literatura, apresentando potencial para simplificação construtiva e redução do número de componentes.

Palavras-chave: Limitador de corrente elétrica; núcleo saturado; curto-circuito; circuitos magnéticos; simulação computacional; sistemas elétricos de potência.

ABSTRACT

The continuous growth of electric power systems has contributed to increasing short-circuit current levels, making it necessary to adopt solutions capable of reducing the electrical and mechanical stresses imposed on equipment. In this context, Saturated Core Fault Current Limiters (SCFCLs) stand out due to their low impedance under normal operating conditions and high current-limiting capability during fault events. This work proposes and evaluates a new single-phase SCFCL topology based on a single ferromagnetic core saturated by direct current. The device was modeled using Biot-Savart's Law, the analogy between electric and magnetic circuits, Kirchhoff's Voltage Law, and numerical methods for solving the resulting equations. The mathematical model was implemented in Octave and subsequently validated through three-dimensional electromagnetic simulations performed in Ansys Maxwell. The results demonstrated that the proposed topology is capable of effectively limiting short-circuit currents, achieving reductions close to 50% in the peak current after the first fault half-cycle. It was also verified that increasing the ferromagnetic core depth significantly improved the current-limiting capability of the device, although it also increased its influence during normal operation. The comparison between the Octave and Maxwell models showed qualitatively similar behavior, validating the proposed methodology. It is concluded that the single-core configuration represents a technically feasible alternative to conventional topologies reported in the literature, offering potential advantages in terms of structural simplification and reduction of the number of components.

Keywords: Fault current limiter; saturated core; short-circuit current; magnetic circuits; computational simulation; electric power systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Configuração Núcleo EI	17
Figura 2 – Curva de indução magnética e permeabilidade para o ferro recozido.	18
Figura 3 – Diagrama LCENS.	22
Figura 4 – Comportamento da corrente elétrica durante uma falta.	23
Figura 5 – Reator de núcleo de ar.	24
Figura 6 – (a) Reator de núcleo ferromagnético (b) Reator de núcleo ferromagnético imerso em óleo.	25
Figura 7 – (a) Circuito limitador topologia indutor série chaveado em regime perma- nente (b) Circuito limitador topologia indutor série chaveado em curto-circuito.	25
Figura 8 – (a) Circuito limitador topologia ressonante em regime permanente (b) Cir- cuito limitador topologia ressonante em curto-circuito.	26
Figura 9 – Elementos supercondutores produzidos pela NEXANS.	27
Figura 10 – Topologia do limitador de correntes elétricas supercondutor híbrido.	28
Figura 11 – Estrutura do limitador de corrente elétrica supercondutor de núcleo blindado.	29
Figura 12 – Características do limitador de corrente elétrica supercondutor de núcleo sa- turado.	29
Figura 13 – Limitador de corrente elétrica de núcleo saturado.	30
Figura 14 – Configuração do limitador de corrente.	33
Figura 15 – Curva de magnetização do aço H110-27.	34
Figura 16 – Campos magnéticos no interior do núcleo ferromagnético	36
Figura 17 – Cálculos do campo magnético	36
Figura 18 – Circuito magnético do limitador	37
Figura 19 – Circuito elétrico, fonte, limitador e carga.	38
Figura 20 – Estágio de leitura de corrente e comparação de sinais	40
Figura 21 – Estágio temporizador e identificação de falta	41
Figura 22 – Estágio de travamento do sinal e sinalização de curto-circuito	42
Figura 23 – Estágio de acionamento do IGBT	42
Figura 24 – Correntes de curto-circuito	44
Figura 25 – Correntes em regime permanente	45
Figura 26 – Tensões sobre o limitador em regime permanente	46
Figura 27 – Correntes de curto-circuito	46
Figura 28 – Correntes em regime permanente	47
Figura 29 – Tensões sobre o limitador em regime permanente	48
Figura 30 – Modelo 3D do LCENS	48
Figura 31 – Circuitos de simulação	49

Figura 32 – Correntes de curto-circuito	49
Figura 33 – Correntes em regime permanente	50
Figura 34 – Tensões sobre o limitador em regime permanente	51
Figura 35 – Correntes de curto-circuito	52
Figura 36 – Correntes em regime permanente	52
Figura 37 – Tensões sobre o limitador em regime permanente	53
Figura 38 – Corrente limitada e Corrente de saturação do núcleo do LCENS	54
Figura 39 – Vetor $\vec{B}$ no marcador m1	54
Figura 40 – Vetor $\vec{B}$ no marcador m2	54
Figura 41 – Vetor $\vec{B}$ no marcador m3	55
Figura 42 – Vetor $\vec{B}$ no marcador m4	55
Figura 43 – Vetor $\vec{B}$ no marcador m5	55
Figura 44 – Vetor $\vec{B}$ no marcador m6	55
Figura 45 – Vetor $\vec{B}$ no marcador m7	56
Figura 46 – Vetor $\vec{B}$ no marcador m7 - 3D	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EPE	Empresa de Pesquisa Energética
LCE	Limitador de Corrente Elétrica
LCENS	Limitador de Corrente Elétrica de Núcleo Saturado
LCESR	Limitador de Corrente Elétrica Supercondutor Resistivo
PDE2035	Plano Decenal de Expansão de Energia 2035
SIN	Sistema Interligado Nacional
EDO	Equação Diferencial Ordinária
RK4	Runge Kutta de 4ª Ordem
SNL	Sistema de equações não lineares
SI	Sistema Internacional de Unidades
FCL	<i>Fault Current Limiter</i>
SCFCL	<i>Saturated Core Fault Current Limiter</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
THDi	<i>Total Harmonic Distortion of Current</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

n	Número de voltas de um enrolamento (adimensional)
A	Área da seção transversal (metro quadrado)
l	Comprimento do caminho magnético (metro)
l_e	Espessura do entreferro (metro)
l_f	Comprimento médio do núcleo ferromagnético (metro)
F	Fluxo de franja (adimensional)
G	Altura que compreende o enrolamento (metro)
L	Indutância (Henry)
μ_0	Permeabilidade magnético do vácuo (Henry/metro)
μ	Permeabilidade de um material (Henry/metro)
μ_r	Permeabilidade relativa do material (adimensional)
ω	Velocidade angular (radiano/segundo)
X_L	Reatância Indutiva (Ohm)
B	Indução magnética (Tesla ou Gauss)
B_r	Indução magnética remanente (Tesla ou Gauss)
H	Campo magnético (Ampere/metro)
H_c	Campo magnético coercivo (Ampere/metro)
Φ	Fluxo magnético (Weber)
$\Re$	Relutância magnética (Ampere-espira por Weber)
V	Tensão elétrica (Volt)
Z	Impedância (Ohm)
R	Resistência elétrica (Ohm)
θ	Ângulo (Radiano)
I_{cc}	Corrente contínua (Ampere)
I_{ca}	Corrente alternada (Ampere)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Delimitação dos objetivos	15
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	INDUTÂNCIA E REATÂNCIA INDUTIVA	16
2.1.1	Indutância	16
2.1.2	Reatância Indutiva	17
2.2	SATURAÇÃO MAGNÉTICA E PERMEABILIDADE DE MATERIAIS FER- ROMAGNÉTICOS	17
2.3	LEI DE BIOT SAVART	19
2.4	CONSERVAÇÃO DE FLUXO E CIRCUITO MAGNÉTICO	19
2.5	APROXIMAÇÕES DAS RELUTÂNCIAS DAS DISPERSÕES DE FLUXO	19
2.6	LEI DE KIRCHHOFF DAS TENSÕES	20
2.7	MÉTODOS NUMÉRICOS	20
2.7.1	Gauss Seidel	20
2.7.2	Runge Kutta de 4ª ordem	21
2.8	CIRCUITO DE DETECÇÃO DE CURTO-CIRCUITO	21
2.9	LIMITADORES DE CORRENTE ELÉTRICA	22
2.9.1	Limitadores indutivos	23
2.9.1.1	Limitador de núcleo de ar	24
2.9.1.2	Limitador de núcleo ferromagnético	24
2.9.2	Limitadores com semicondutores	24
2.9.2.1	Limitador série chaveado	25
2.9.2.2	Limitador ressonante	25
2.9.3	Limitadores supercondutores	26
2.9.3.1	Limitador supercondutor do tipo resistivo	26
2.9.3.2	Limitador supercondutor do tipo híbrido	27
2.9.3.3	Limitador supercondutor do tipo indutivo	27
2.9.3.4	Limitador supercondutor com núcleo blindado	28
2.9.3.5	Limitador supercondutor com núcleo saturado	28
2.9.4	Limitadores de núcleo saturado	29
2.10	TRABALHOS RELACIONADOS	30
2.10.1	Tese de Fernando Cardoso Fajoni	30
2.10.2	Dissertação de Mariana Moraes Oliveira Rocha	31

2.10.3	Dissertação de Monique Costa de Lima	31
3	METODOLOGIA	32
3.1	CRITÉRIOS GERAIS DE PROJETO	32
3.2	DIMENSÕES INICIAIS E CONFIGURAÇÕES DO LIMITADOR	33
3.3	MODELAMENTO MATEMÁTICO DO LIMITADOR	35
3.3.1	Lei de Biot-Savart	35
3.3.2	Conservação de fluxo e circuito magnético	37
3.3.3	Lei de Kirchhoff das tensões	38
3.3.4	Indutância Variável	38
3.3.5	Conjunto de equações e método de solução	39
3.4	CIRCUITO DE DETECÇÃO DE CURTO-CIRCUITO	39
3.4.1	Estágio de leitura de corrente e comparação de sinais	40
3.4.2	Estágio temporizador e identificação de falta	40
3.4.3	Estágio de travamento do sinal e sinalização de curto-circuito	41
3.4.4	Estágio de acionamento do IGBT	41
3.5	SIMULAÇÕES PROPOSTAS	43
4	RESULTADOS	44
4.1	SIMULAÇÕES NO OCTAVE	44
4.2	SIMULAÇÕES NO MAXWELL	47
4.2.1	Outros resultados	53
4.3	COMPARATIVO ENTRE CADA TIPO DE SIMULAÇÃO REALIZADA	56
4.4	COMPARATIVO ENTRE A TOPOLOGIA DE NÚCLEO ÚNICO E SEPARADO	58
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
	REFERÊNCIAS	63
	APÊNDICE A – CÓDIGO PARA SIMULAÇÃO DO LIMITADOR IMPLEMENTADO NO OCTAVE	65

1 INTRODUÇÃO

O curto-circuito no contexto de sistemas elétricos de potência é um problema inevitável que deve ser considerado no planejamento e operação. Dispositivos de proteção, barramentos e linhas, capazes de suportar essas correntes elétricas, que normalmente são muito maiores daquelas previstas em condição de operação normal, são necessários para que estes eventos sejam adequadamente tratados.

Segundo o PDE2035 (2025) (Plano Decenal de Expansão de Energia 2035) elaborado pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética), estima-se que a potência de geração centralizada no Brasil chegue a 274,5 GW em 2035, o que representa um aumento de 36,4% em relação à potência atual (2025) que é de 201,2 GW. Já em relação a potência de geração distribuída a ampliação estimada é de 101,3%, passando dos atuais 38,7 GW para 77,9 GW (PDE2035, 2025). A expansão na potência de geração em ambos os extremos do SIN (Sistema Interligado Nacional) faz com que os níveis de curto-circuito tendam a aumentar em todos os pontos, pois é comum a troca dos equipamentos existentes por novos com maior capacidade do que a construção de novos circuitos que normalmente são mais custosos.

Embora as correntes de curto-circuito sejam extintas em frações de segundo, o alto valor é danoso às instalações, causando esforços elétricos e mecânicos em linhas de transmissão, transformadores e subestações podendo ter efeitos na estabilidade do sistema, como quedas de tensão e desligamentos. Em casos mais severos de curtos, as consequências podem causar colapsos de sistemas, incêndios e explosões.

Tendo em vista o aspecto prejudicial das correntes de curto-circuito elevadas, dispositivos limitadores de corrente elétrica (LCE) são uma alternativa para redução das correntes por um curto período de tempo até que os dispositivos de proteção possam atuar com segurança. Estes limitadores são dispositivos elétricos conectados normalmente em série com os circuitos de potência. Em regime permanente os limitadores apresentam uma baixa impedância, mas no momento em que ocorre o curto-circuito, ela aumenta significativamente, reduzindo a corrente elétrica. Esta redução da corrente além de ser benéfica para a redução de esforços, possibilita o emprego de equipamentos de proteção de menor capacidade (menor valor) e também pode evitar a necessidade da troca de um equipamento já instalado.

Existem diversos tipos de LCE, porém neste trabalho eles serão classificados em dois grupos, os comerciais, consolidados e utilizados em larga escala, e os em desenvolvimento. Entre os dispositivos comerciais destaca-se o reator de núcleo de ar, já utilizado nos sistemas de distribuição e transmissão para aumentar a capacidade das linhas. Entre os LCE em desenvolvimento, existem diversas linhas de pesquisa envolvendo semicondutores, supercondutores e limitadores de corrente elétrica de núcleo saturado (LCENS). A topologia com núcleo satu-

rado vem sendo estudada e é objeto de diversos trabalhos. Como exemplo o limitador de núcleo saturado analisado por Fajoni (2015).

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral propor uma variação conceitual de topologia de um limitador de corrente elétrica de núcleo saturado (LCENS) de fase única.

Para alcançar o objetivo geral, busca-se alcançar os seguintes objetivos específicos:

1. Definir as características elétricas esperadas do limitador;
2. Variar os parâmetros a fim de encontrar o funcionamento desejado;
3. Apresentar o circuito eletrônico de detecção de curto-circuito escolhido;
4. Realizar simulações para verificar a eficácia do limitador;
5. Avaliar o desempenho da topologia proposta através de simulações numéricas computacionais, utilizando os *softwares Octave* e *Maxwell*;
6. Comparar a topologia proposta em relação ao limitador da bibliografia de referência.

1.1.1 Delimitação dos objetivos

O presente trabalho não tem como objetivo construir fisicamente um limitador de corrente elétrica de núcleo saturado, deixando esta construção de um protótipo e os testes práticos de funcionamento para trabalhos futuros. Neste trabalho serão realizados apenas testes em simulador. Outro aspecto não abordado é o desempenho térmico do dispositivo.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado em cinco capítulos. O primeiro corresponde à introdução, na qual são apresentados o tema e os objetivos do estudo. O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre limitadores de corrente elétrica e seus princípios de funcionamento, com ênfase nos dispositivos de núcleo saturado. No terceiro capítulo, apresenta-se a metodologia empregada para o desenvolvimento de uma nova topologia monofásica de limitador de corrente de núcleo saturado. O quarto capítulo reúne os resultados obtidos, bem como as comparações entre os diferentes métodos de simulação empregados e os resultados do modelo proposto em relação ao modelo de referência. Por fim, o quinto capítulo apresenta as conclusões e considerações finais do estudo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A seguir, serão apresentados alguns conceitos básicos que norteiam o trabalho proposto e fundamentam o funcionamento de limitadores de corrente elétrica que utilizam o fenômeno da indutância para a limitação. Também serão descritos os principais tipos de limitadores, tanto comerciais quanto em desenvolvimento.

2.1 INDUTÂNCIA E REATÂNCIA INDUTIVA

2.1.1 Indutância

Um dos conceitos básicos que norteiam a fundamentação dos limitadores de corrente elétrica de núcleo saturado é o conceito da indutância. Segundo Halliday, Resnick e Walker (2009), a indutância (L) perto do centro de um solenóide longo é dada pela equação 2.1.

$$L = \frac{\mu_0 \cdot n^2 \cdot A}{l} \quad (2.1)$$

Onde μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo, n é o número de espiras do solenóide, A é a área da seção transversal e l é o comprimento do solenóide.

Porém, para indutores reais com núcleo de aço silício laminado, existem espaçamentos (entreferos) entre as lâminas que devem ser considerados nos cálculos. Segundo McLyman (2011). A indutância é dada pela equação 2.2.

$$L = \frac{\mu_0 \cdot n^2 \cdot A}{l_e + \frac{l_f}{\mu_r}} \quad (2.2)$$

Onde têm as mesmas constantes e variáveis anteriores acrescentadas de l_e , a espessura do entreferro, l_f o comprimento médio do núcleo magnético e μ_r a permeabilidade relativa do material do qual é construído o núcleo.

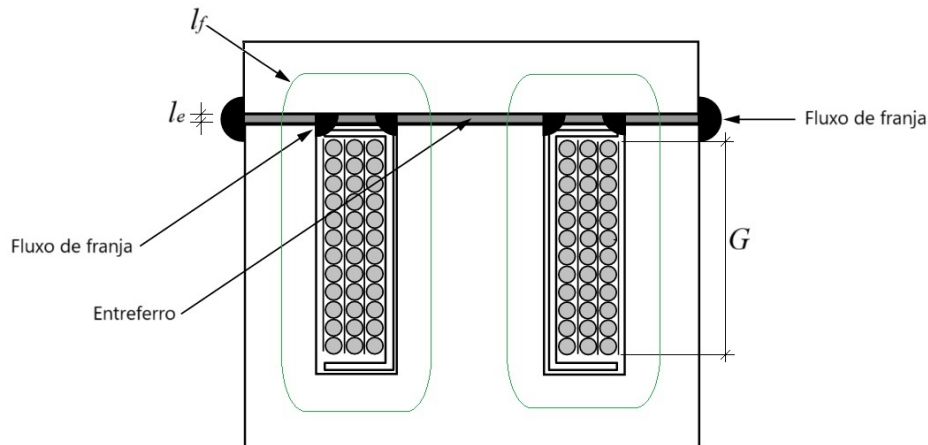
Outro efeito importante é o fluxo de franja (F), que representa a distorção nas linhas de fluxo magnético que ocorrem nas bordas dos entreferos e resultam num incremento da indutância por um fator F (McLyman, 2011), conforme apresentado nas equações 2.3 e 2.4.

$$L = F \cdot \frac{\mu_0 \cdot n^2 \cdot A}{l_e + \frac{l_f}{\mu_r}} \quad (2.3)$$

$$F = 1 + \frac{l_e}{\sqrt{A}} \cdot \ln \frac{2 \cdot G}{l_e} \quad (2.4)$$

Onde têm as mesmas constantes e variáveis anteriores acrescentadas de G , a altura que compreende o enrolamento. Na figura 1 são apresentadas as variáveis mencionadas e os fluxos de franja.

Figura 1 – Configuração Núcleo EI



Fonte: Adaptado de McLyman (2011).

2.1.2 Reatância Indutiva

Para circuitos operando em regime permanente senoidal, os elementos passivos básicos apresentam uma impedância a passagem de corrente elétrica. Impedância no domínio da frequência é a quantidade análoga à resistência, indutância e capacitância no domínio do tempo (Nilsson, 2015).

A reatância indutiva é a resposta de um indutor no domínio da frequência e contribui para a parte imaginária de uma impedância. Em regime permanente sinusoidal é dada pela equação 2.5.

$$X_L = \omega \cdot L \quad (2.5)$$

Onde ω é a velocidade angular da tensão alternada imposta no circuito.

2.2 SATURAÇÃO MAGNÉTICA E PERMEABILIDADE DE MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS

Materiais ferromagnéticos como as ligas de aço silício são utilizados em equipamentos elétricos devido a alta permeabilidade magnética μ . Eles promovem uma indução magnética (B) significativa com um campo magnético (H) aplicado de baixa intensidade (Goldman, 1999). A permeabilidade magnética é dada pela equação 2.6.

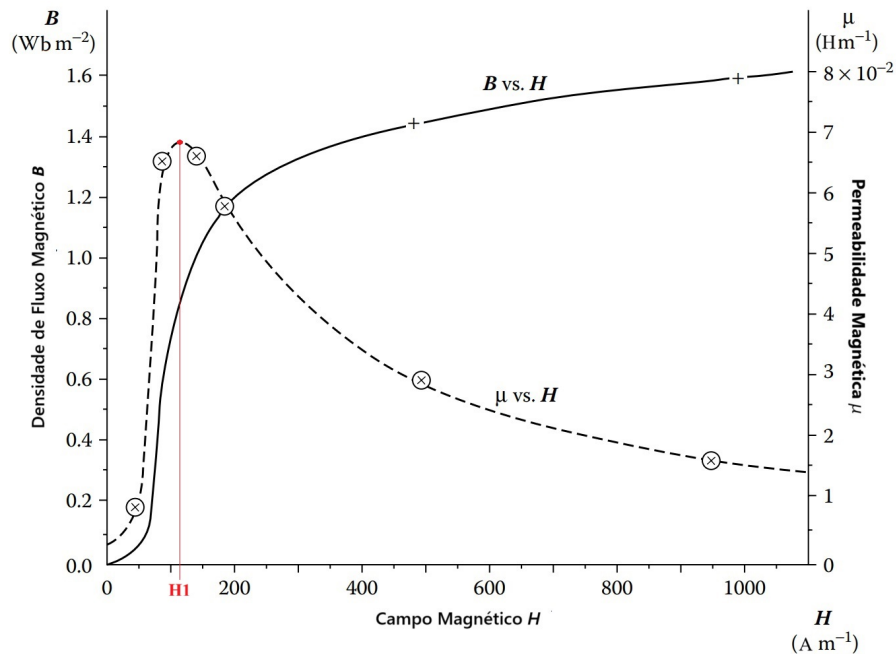
$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2.6)$$

Ou em termos da permeabilidade relativa, como apresentado em 2.7.

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 \cdot H} \quad (2.7)$$

Porém, esta permeabilidade não é constante e varia com o campo H aplicado, pois existe o fenômeno da saturação, também chamado de não linearidade do material (Bastos, 2004). Pode-se observar esta variação de μ e B em função do campo H aplicado, no gráfico da figura 2, onde são destacados dois intervalos. O primeiro compreende os valores de H a partir de zero até o ponto H_1 , onde μ possui máximo valor. Neste intervalo está contido a região linear de operação, e neste intervalo a permeabilidade somente cresce com o incremento do campo H . O segundo compreende os valores de H após H_1 , onde o material já se encontra saturado e a permeabilidade começa a reduzir com o incremento de H .

Figura 2 – Curva de indução magnética e permeabilidade para o ferro recozido.



Fonte: Adaptado de Jiles (2015).

2.3 LEI DE BIOT SAVART

A lei de Biot-Savart, que nos permite calcular o campo magnético H gerado por uma corrente elétrica, é uma das leis fundamentais do eletromagnetismo. Ela é uma constatação baseada em observações experimentais, e não uma previsão teórica. Em sua forma usual, a lei fornece a contribuição de campo gerada por uma corrente fluindo em um elemento infinitesimal de comprimento de um condutor, conforme a equação 2.8 (Jiles, 2015).

$$d\vec{H} = \frac{i \cdot d\vec{l}}{4\pi r^2} \times \vec{r} \quad (2.8)$$

Onde i é a corrente que flui em um elemento infinitesimal de comprimento $d\vec{l}$ de um condutor, $\vec{r}$ é um vetor unitário na direção radial, r é o módulo do raio e $d\vec{H}$ é a contribuição para o campo magnético no ponto devido ao elemento de corrente $i d\vec{l}$.

2.4 CONSERVAÇÃO DE FLUXO E CIRCUITO MAGNÉTICO

A conservação de fluxo magnético decorre de umas das equações de James Clerk Maxwell que afirma que o fluxo magnético total através de uma superfície fechada é igual a zero. Consequentemente conclui-se que não existem monopolos magnéticos, isto é, no campo magnético não existem fontes nem sorvedouro, as linhas de campo são sempre fechadas (Nussenzveig, 2015). Esta lei é dada pela equação 18.

$$\oint_S \vec{B} \cdot \hat{n} dS = 0 \quad (2.9)$$

Onde B é o vetor indução magnética num ponto da superfície fechada, $\hat{n}$ é o vetor unitário normal à superfície neste ponto e dS é uma região infinitesimal da superfície próxima ao ponto.

Segundo Valchev (2005) pode-se utilizar a analogia entre circuitos elétricos e magnéticos para simplificar e resolver de forma mais simples circuitos magnéticos. Tal analogia utiliza conceitos como força-magnetomotriz, relutância e fluxo magnético.

2.5 APROXIMAÇÕES DAS RELUTÂNCIAS DAS DISPERSÕES DE FLUXO

Segundo Roters (1941) as dispersões de fluxo que escapam de uma superfície e atravessam o ar, podem ser consideradas em um circuito magnético se for considerado este trecho como uma relutância em paralelo ao circuito.

Fórmulas especiais podem ser utilizadas para estimar a relutância de caminhos de fluxo prováveis. A palavra “provável”, conforme usada, significa que o caminho assumido é suficientemente semelhante ao caminho real, de modo que a permeância determinada a partir do

comprimento médio e da área do caminho assumido seja razoavelmente próxima do valor correto do caminho verdadeiro (Roters, 1941).

2.6 LEI DE KIRCHHOFF DAS TENSÕES

Em 1847, o físico alemão Gustav Robert Kirchhoff (1824–1887), formulou duas leis fundamentais que descrevem a relação entre tensão e corrente em um circuito elétrico. Uma delas, a lei de Kirchhoff das tensões (ou lei das malhas) é dada pela equação 2.10. Esta lei diz que o somatório de todas as tensões em torno de um caminho fechado é zero (Sadiku, 2013).

$$\sum_{k=1}^n V_k = 0 \quad (2.10)$$

Onde k é o número de tensões no laço e V_k é a k -ésima tensão.

2.7 MÉTODOS NUMÉRICOS

Os métodos numéricos para a aproximação de soluções de sistemas de equações lineares, não lineares, equações diferenciais, entre outros, são ferramentas para a solução e simulação computacional. Entre eles, estão os métodos de Gauss Seidel e Runge Kutta de 4ª ordem.

2.7.1 Gauss Seidel

Segundo Avila (2019), o método de Gauss Seidel para um sistema algébrico mn pode ser equacionado conforme o sistema da equação 2.11.

$$\begin{cases} x_1^j = \frac{b_1 - a_{12}x_2^{j-1} - \dots - a_{1n}x_n^{j-1}}{a_{11}} \\ x_2^j = \frac{b_2 - a_{21}x_1^j - \dots - a_{2n}x_n^{j-1}}{a_{22}} \\ \vdots \\ x_n^j = \frac{b_n - a_{n1}x_1^j - \dots - a_{n,n-1}x_{n-1}^j}{a_{nn}} \end{cases} \quad (2.11)$$

Onde j é a iteração corrente.

O erro é avaliado pela diferença percentual dos termos x a cada iteração, e o critério de parada pode ser quando este erro percentual fica abaixo de um erro pré-determinado arbitrado (Avila, 2019), conforme mostra a equação 2.12.

$$\varepsilon_{a,i} = \left| \frac{x_i^j - x_i^{j-1}}{x_i^j} \right| \cdot 100\% \leq \varepsilon_s \quad (2.12)$$

Onde x_i é a variável em estudo, j é a iteração, ε_a é o erro percentual e ε_s é um valor de erro máximo desejado (Avila, 2019).

2.7.2 Runge Kutta de 4ª ordem

O método numérico de Runge Kutta de 4ª ordem (RK4) é um método de passo único que apresenta uma ótima relação entre acuracidade versus custo computacional (Avila, 2019). De forma geral, a equação 2.13 apresenta o método de passo único.

$$x_{i+1} = x_i + \phi h \quad (2.13)$$

Onde ϕ é a função incremento e é utilizado para extrapolar x_i para x_{i+1} em uma distância h (passo de cálculo) (Avila, 2019).

A função incremento ϕ de Runge Kutta utiliza coeficientes k , no caso de RK4 são utilizados quatro coeficientes (k_1, k_2, k_3 e k_4), e determinados conforme a equação 2.14 (Avila, 2019).

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{i+1} = x_i + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)h \\ k_1 = f(t_i, x_i) \\ k_2 = f\left(t_i + \frac{1}{2}h, x_i + \frac{1}{2}k_1h\right) \\ k_3 = f\left(t_i + \frac{1}{2}h, x_i + \frac{1}{2}k_2h\right) \\ k_4 = f(t_i + h, x_i + k_3h) \end{array} \right. \quad (2.14)$$

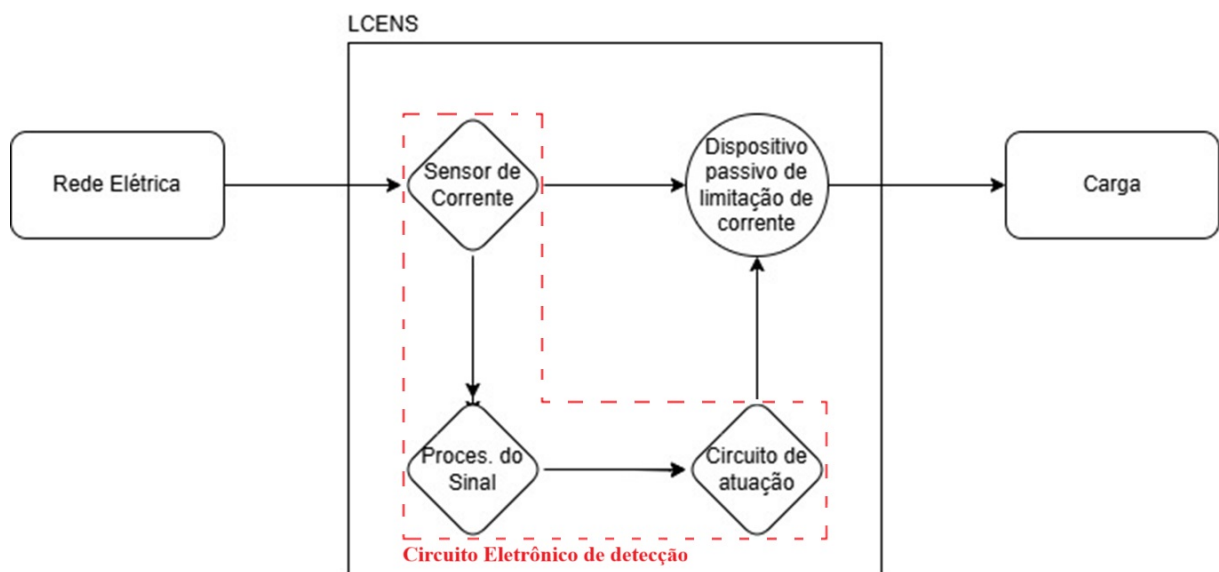
2.8 CIRCUITO DE DETECÇÃO DE CURTO-CIRCUITO

Em limitadores de corrente de núcleo saturado, além dos elementos passivos que efetivamente irão propiciar os mecanismos físicos para a limitação da corrente, há também circuitos eletrônicos capazes de detectar a ocorrência de faltas no circuito elétrico e fornecer comandos para a atuação do dispositivo. Tais dispositivos eletrônicos podem ser microprocessados ou um circuito analógico simples e pré-ajustado (Fajoni, 2015).

Os circuitos de detecção eletrônicos comumente são compostos por três estágios básicos, conforme consta na figura 3.

- Sensor de corrente elétrica: Tem a função de medir a corrente elétrica do circuito e fornecer o sinal correspondente a medida para o estágio de processamento de sinal;
- Circuito de processamento de sinal: Possui a função de avaliar se o sinal da corrente, detectar o momento da ocorrência de um curto-circuito e comandar o circuito de atuação;
- Circuito de atuação: Trata-se do circuito que atua diretamente no elemento passivo do limitador, para que este realize a limitação de corrente elétrica.

Figura 3 – Diagrama LCENS.



Fonte: Autoria própria (2025).

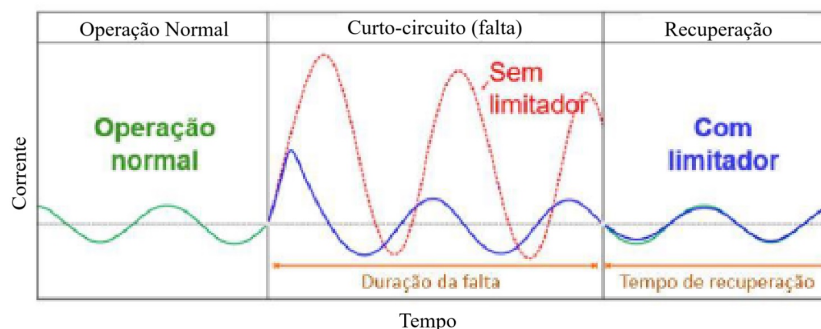
2.9 LIMITADORES DE CORRENTE ELÉTRICA

Os limitadores de corrente elétrica são uma tecnologia reconhecida na comunidade científica como uma solução promissora para limitar as correntes de falta à capacidade nominal dos equipamentos de proteção. Os limitadores de corrente elétrica (LCE) são normalmente instalados em série com a rede e, em condições normais de operação, devem possuir uma impedância baixa para que não interfiram no sistema e para que não haja perdas significativas no próprio limitador. No momento da falha, a impedância do LCE deve aumentar instantaneamente para atenuar a corrente.

Um sistema elétrico operando sem um limitador de corrente apresenta elevados níveis de corrente de curto-circuito. A figura 4 ilustra uma comparação teórica entre correntes de falta de um sistema operando sem limitador um sistema operando com limitador:

Segundo Tavares (2022) para que um limitador seja bem sucedido comercialmente, ele deve apresentar as seguintes características:

Figura 4 – Comportamento da corrente elétrica durante uma falta.



Fonte: Adaptado de Tavares (2022).

1. Baixa queda de tensão em regime permanente;
2. Suportar os níveis de tensão e corrente do sistema;
3. Pequena ou nenhuma distorção na energia a jusante;
4. Campo eletromagnético residual desprezível.

Em caso de curto-circuito, ele deve:

1. Limitar a corrente de falta;
2. Tolerar os esforços mecânicos;
3. Suportar o aumento da temperatura;
4. Possuir tempo de atuação na ordem de milissegundos;
5. Suportar uma sequência de falhas recorrentes;
6. Não interferir nos esquemas de proteção existentes.

Limitadores de corrente elétrica baseados no princípio da reatância indutiva também são comumente chamados de reatores e, desde o início do século XX, já eram utilizados. Porém, atualmente, já existem outros tipos de LCE's com princípios de funcionamento distintos.

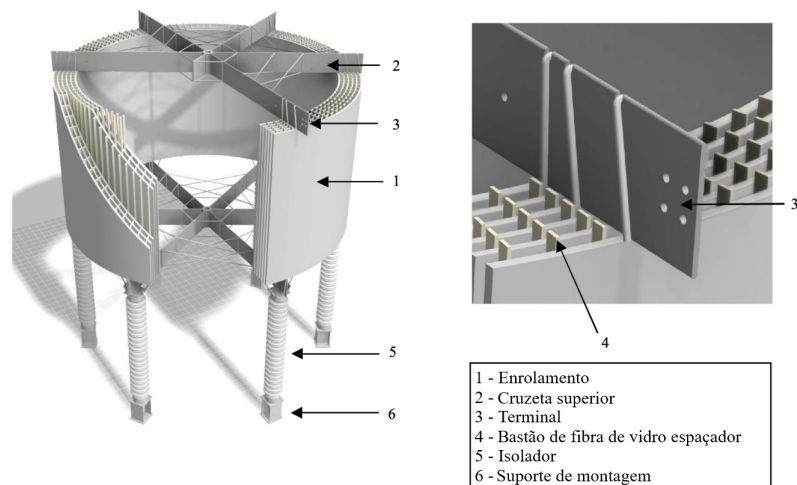
2.9.1 Limitadores indutivos

Estes limitadores são conectados em série com as linhas de transmissão e distribuição. Por possuírem indutância, inserem uma impedância no circuito, reduzindo as correntes de falta. Neste subcapítulo, são apresentados os tipos revisados em relação ao núcleo utilizado.

2.9.1.1 Limitador de núcleo de ar

Este tipo de limitador, conhecido como Reator de Núcleo de Ar, trata-se de um enrolamento, similar a um solenóide, sem um núcleo ferromagnético. É um limitador comercializado e utilizado por ser simples, barato e apresentar uma relação linear entre tensão e corrente. A desvantagem é necessitar cuidados devido ao forte campo eletromagnético gerado ao redor, que pode induzir correntes parasitas em condutores próximos (Tavares, 2022). Outro inconveniente deste dispositivo é que para um mesmo valor de indutância necessário, apresenta um volume maior em comparação aos limitadores com núcleo ferromagnético. Pode-se observar a estrutura desse limitador na figura 5.

Figura 5 – Reator de núcleo de ar.



Fonte: Adaptado de Tavares (2022).

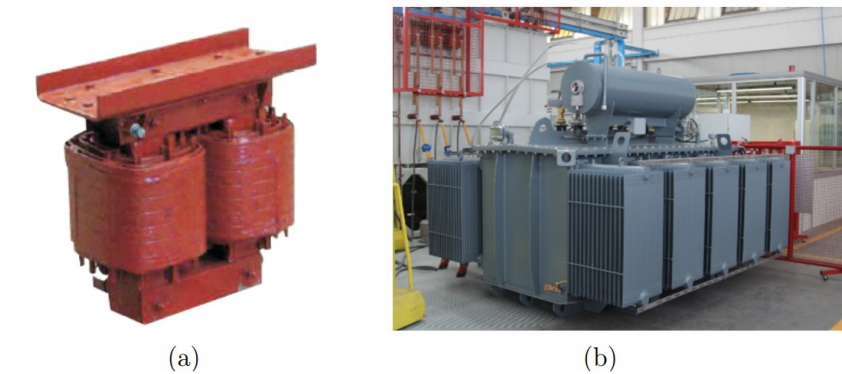
2.9.1.2 Limitador de núcleo ferromagnético

Também chamado de reator, este equipamento tem o funcionamento similar ao reator de núcleo de ar, porém possui um núcleo ferromagnético e a relação tensão-corrente é linear apenas numa faixa de valores (região linear). Apresenta menores dimensões e normalmente é um equipamento mais caro. Também são utilizados para fazer a limitação de correntes de curto-circuito. Pode-se observar dois reatores de núcleo ferromagnéticos na figura 6.

2.9.2 Limitadores com semicondutores

Já existem aplicações de limitadores de correntes que combinam os limitadores indutivos com chaves semicondutoras em paralelo, nestes o reator somente atua como limitador na abertura ou fechamento da chave semicondutora. Os limitadores do tipo série chaveado e do tipo ressonante são promissores (Tavares, 2022).

Figura 6 – (a) Reator de núcleo ferromagnético (b) Reator de núcleo ferromagnético imerso em óleo.

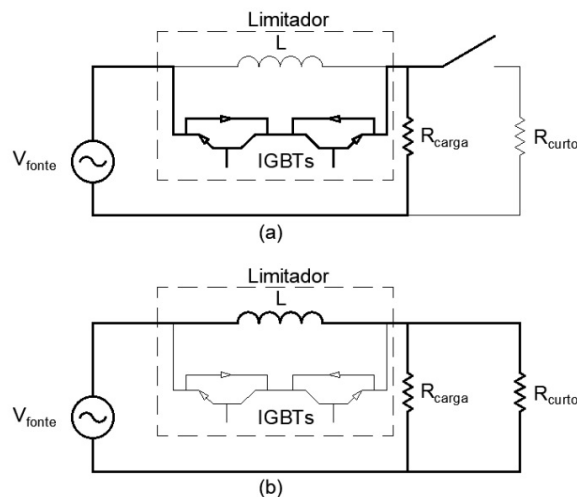


Fonte: Adaptado de Tavares (2022).

2.9.2.1 Limitador série chaveado

Este limitador em regime permanente apresenta chaves semicondutoras fechadas, isto é, conduzindo a corrente de carga. No momento do curto-circuito, as chaves abrem, desviando a corrente para um reator indutivo ou resistivo que realiza a limitação (Bitencourt *et al.*, 2020). Sua topologia está apresentada na figura 7.

Figura 7 – (a) Circuito limitador topologia indutor série chaveado em regime permanente (b) Circuito limitador topologia indutor série chaveado em curto-circuito.



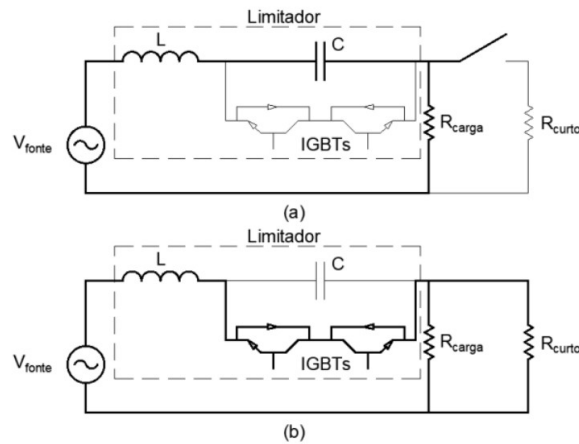
Fonte: Bitencourt *et al.* (2020).

2.9.2.2 Limitador ressonante

Este limitador em regime permanente apresenta as chaves semicondutoras abertas, isto é, não conduzindo. A corrente de carga circula pelo indutor e pelo capacitor que são dimensionados de forma com as impedâncias se anulem (ressonância). No momento do curto-circuito, as chaves semicondutoras fecham, desviando a corrente do capacitor e anulando a ressonância.

Desta forma, a impedância do indutor é inserida no circuito e realiza a limitação (Bitencourt *et al.*, 2020). Sua topologia está apresentada na figura 8.

Figura 8 – (a) Circuito limitador topologia ressonante em regime permanente (b) Circuito limitador topologia ressonante em curto-circuito.



Fonte: Bitencourt *et al.* (2020).

2.9.3 Limitadores supercondutores

Existem vários tipos de limitadores de corrente elétrica com a utilização de supercondutores sendo estudados atualmente. Entre eles destacam-se:

- Limitador supercondutor do tipo resistivo;
- Limitador supercondutor do tipo híbrido;
- Limitador supercondutor do tipo indutivo;
- Limitador supercondutor com núcleo blindado;
- Limitador supercondutor com núcleo saturado.

2.9.3.1 Limitador supercondutor do tipo resistivo

Este limitador é conectado em série com o circuito e em regime permanente é mantido sob condições de temperatura, corrente elétrica, campo elétrico e campo magnético, dentro de valores específicos para que este se comporte de maneira supercondutora, apresentando resistência quase nula à passagem de corrente elétrica. No momento da falha, o material sofre uma mudança na estrutura passando do estado supercondutor para o estado condutor, a resistência elétrica aumenta de maneira abrupta e limita a corrente elétrica (Fajoni, 2015).

Figura 9 – Elementos supercondutores produzidos pela NEXANS.



Fonte: Fajoni (2015).

Em paralelo com o limitador deve ser instalado um resistor shunt que limite a tensão máxima sobre o supercondutor. Esta proteção evita a degradação do limitador. Na figura 9 pode-se ver um limitador supercondutor resistivo.

2.9.3.2 Limitador supercondutor do tipo híbrido

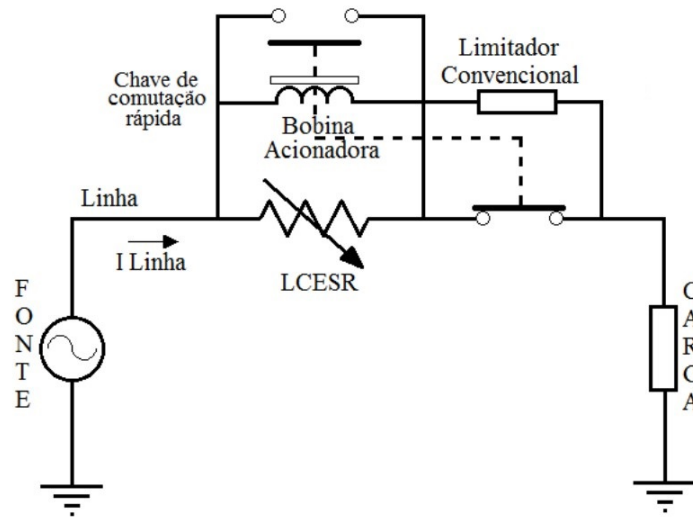
Este limitador combina o limitador supercondutor resistivo visto no item anterior, com limitadores indutivos convencionais. Com o intuito de utilizar a tecnologia supercondutora, mas também reduzir os investimentos necessários, esta topologia foi proposta.

O elemento supercondutor é ligado em série com o circuito e é o responsável pela condução em regime permanente. No momento do curto-circuito, a resistência do supercondutor aumenta, polarizando uma bobina acionadora que desvia a corrente elétrica para um limitador indutivo. O tempo de condução do supercondutor na falha fica limitado a cerca de 20 ms, o que na prática reduz a quantidade de material supercondutor necessário, reduzindo o custo (Fajoni, 2015). Pode-se observar a topologia deste limitador na figura 10.

2.9.3.3 Limitador supercondutor do tipo indutivo

Este limitador refere-se basicamente à utilização de materiais supercondutores em transformadores de potência. Nesta aplicação, como nas anteriores, é a transição de estado do supercondutor e o aumento da resistência que realiza a limitação da corrente elétrica. Esta configuração além de possibilitar a limitação de correntes, permite a construção de transformadores mais eficientes. A viabilidade econômica é somente possível para unidades com potência superior a 50 MVA (Fajoni, 2015).

Figura 10 – Topologia do limitador de correntes elétricas supercondutor híbrido.



Fonte: Adaptado de Fajoni (2015).

2.9.3.4 Limitador supercondutor com núcleo blindado

Este limitador consiste em um núcleo ferromagnético com dois enrolamentos. Um interno com o material supercondutor curto-circuitado, e um externo com condutor de cobre ligado em série com a linha. Em operação normal, o campo magnético gerado pela bobina externa é de baixa intensidade, e o material supercondutor da bobina interna blinda o núcleo, não permitindo que haja fluxo magnético. Desta forma a impedância do enrolamento de condução é baixa e não há limitação.

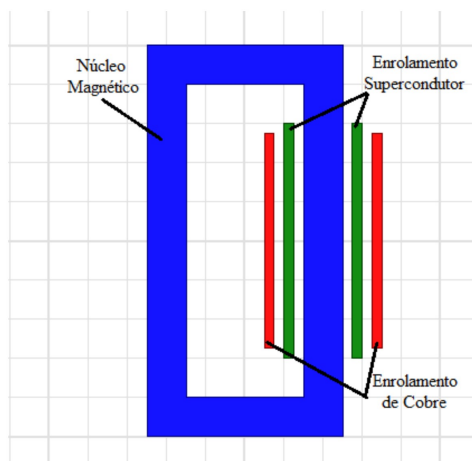
Quando ocorre uma falha e a corrente aumenta, o campo magnético gerado pela bobina externa cresce, fazendo com que o material supercondutor transite do estado supercondutor para o estado condutor, deixando de blindar o núcleo ferromagnético. Quando isto ocorre o equipamento se torna um indutor e apresenta uma impedância realizando a limitação da corrente elétrica (Fajoni, 2015). Pode-se observar a estrutura deste limitador na figura 11.

2.9.3.5 Limitador supercondutor com núcleo saturado

Este limitador consiste num núcleo ferromagnético com duas ou três bobinas, sendo uma delas em material supercondutor, na qual circula uma corrente contínua, gerando um fluxo magnético que leva o núcleo à saturação. A(s) outra(s) bobina(s) são de cobre e estão ligadas em série com a linha. Em operação normal, como o núcleo ferromagnético está em saturação, não existe uma indução magnética suficiente nos enrolamentos de cobre e desta forma a impedância é baixa, não havendo limitação de corrente (Fajoni, 2015).

No momento do curto-circuito, um circuito de detecção de corrente elétrica, detecta a ocorrência da falha e interrompe a circulação de corrente contínua no enrolamento supercon-

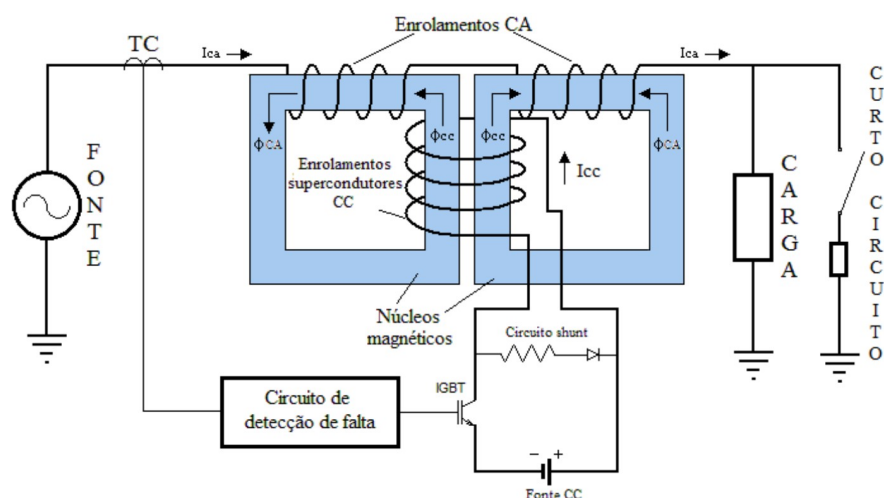
Figura 11 – Estrutura do limitador de corrente elétrica supercondutor de núcleo blindado.



Fonte: Fajoni (2015).

dutor. Neste momento o núcleo sai da saturação, e a(s) bobina(s) ligadas em série com a linha, passam a apresentar uma impedância e ocorre a limitação da corrente elétrica (Fajoni, 2015). Pode-se observar a topologia do limitador na figura 12.

Figura 12 – Características do limitador de corrente elétrica supercondutor de núcleo saturado.



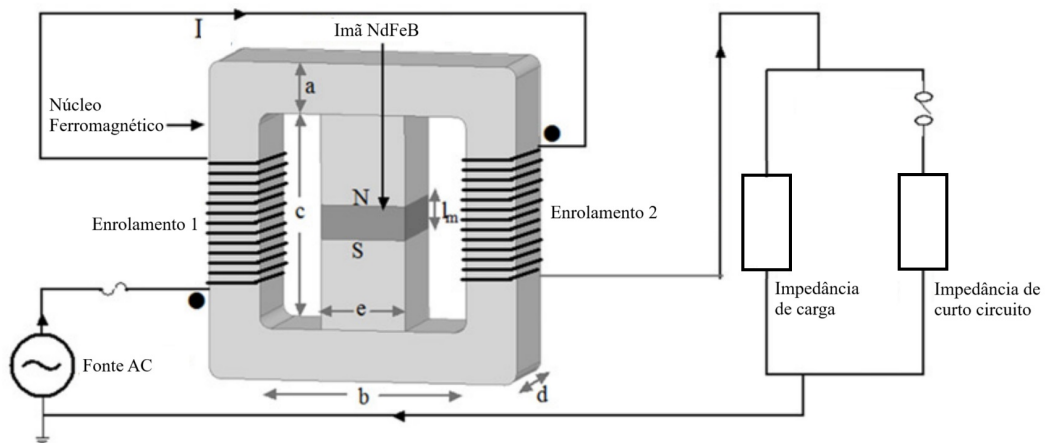
Fonte: Fajoni (2015).

2.9.4 Limitadores de núcleo saturado

Limitadores de núcleo saturado possuem o mesmo princípio de funcionamento do item anterior, porém sem o emprego de supercondutores. Utiliza-se a técnica de saturação profunda do núcleo ferromagnético para que um enrolamento conectado ao circuito de potência não apresente impedância significativa em regime permanente. No momento da falha, este núcleo é retirado da saturação para que o enrolamento comece a ter impedância e limitar a corrente elétrica (Fajoni, 2015).

Este tipo de limitador também possui variações de topologia e formas construtivas. Pode-se utilizar circuitos de corrente contínua para fazer a saturação do núcleo ferromagnético, ou podem ser utilizados ímãs permanentes. A figura 13 exemplifica um limitador de corrente elétrica de núcleo saturado com ímã permanente (Das *et al.*, 2019):

Figura 13 – Limitador de corrente elétrica de núcleo saturado.



Fonte: Adaptado de Das *et al.* (2019).

2.10 TRABALHOS RELACIONADOS

Há diversos trabalhos que tratam de limitadores de corrente elétrica. Entre eles, destaca-se a tese de doutorado de Fajoni (2015), que apresenta um limitador de núcleo saturado. Também se incluem as dissertações de mestrado Rocha (2022) e Lima (2021), que analisam o mesmo tipo de limitador, embora adotem abordagens diferentes.

2.10.1 Tese de Fernando Cardoso Fajoni

O trabalho desenvolveu, construiu e testou um protótipo de limitador de correntes elétricas com núcleo magnético saturado (LCENS). O dispositivo demonstrou capacidade eficaz de limitação, reduzindo uma corrente prospectiva de 1600 A em até 47,9% durante um curto-circuito, quando operado com uma corrente de magnetização de 70 A. Paralelamente, foi projetado e validado um circuito analógico de baixo custo para detecção de faltas, com tempo de resposta inferior a 4 ms, que protege a fonte de alimentação de corrente contínua. Os resultados experimentais obtidos foram consistentes com as simulações realizadas por elementos finitos, confirmando a metodologia de projeto. Em regime permanente, o limitador apresentou uma queda de tensão aceitável de 8,7%. Como perspectiva de melhoria, a pesquisa sugere a substituição do enrolamento de cobre por fita supercondutora de YBCO para aumentar a eficiência energética.

2.10.2 Dissertação de Mariana Moraes Oliveira Rocha

Esta dissertação propõe um modelo computacional para simulação de um LCENS em sistemas trifásicos, desenvolvido no ambiente *MATLAB/Simulink*. O trabalho estende uma modelagem previamente estabelecida para sistemas monofásicos, baseada nas características magnéticas não lineares do dispositivo, e a aplica a um protótipo trifásico real. A modelagem utiliza uma tabela de consulta (*lookuptable*) que relaciona o fluxo enlaçado e a corrente contínua de polarização com a corrente alternada do sistema, permitindo representar o comportamento do limitador tanto em regime normal quanto durante curtos-circuitos.

Os resultados da simulação foram comparados com ensaios experimentais de curto-circuito monofásico realizados em laboratório com um protótipo trifásico. Três abordagens de modelagem da corrente de desmagnetização da bobina CC foram avaliadas: representação por degrau, utilização da corrente medida experimentalmente e aproximação por um filtro de primeira ordem. Concluiu-se que o modelo que emprega um filtro para reproduzir o comportamento transitório da corrente de desmagnetização apresentou desempenho satisfatório e erros próximos aos demais modelos, demonstrando que não é necessário um modelo analítico complexo para essa corrente. O trabalho valida a eficácia da modelagem proposta e sua capacidade de prever o comportamento do LCCC-NS em estudos de sistemas elétricos, facilitando futuras análises e a aplicação desta topologia de limitador em redes de distribuição e transmissão.

2.10.3 Dissertação de Monique Costa de Lima

Este trabalho apresenta a realização de ensaios experimentais em um protótipo trifásico de um LCENS, com o objetivo de avaliar seu desempenho na limitação de correntes de falta em sistemas elétricos. A proposta central consistiu em executar ensaios de caracterização magnética dos núcleos ferromagnéticos do dispositivo e, em seguida, aplicar curtos-circuitos monofásicos com o limitador conectado de duas formas: monofásica (uma fase por vez) e trifásica (todas as fases simultaneamente). Os ensaios visaram analisar a capacidade de limitação da corrente, o comportamento das tensões no sistema e a distorção harmônica introduzida durante a atuação do limitador.

Os resultados demonstraram que o protótipo foi eficaz na limitação das correntes de curto-circuito, reduzindo o primeiro pico da corrente em até 37,96% e a corrente em regime permanente de falta em até 61,71%. Observou-se que o desempenho foi similar tanto na ligação monofásica quanto na trifásica, com valores de limitação na mesma ordem de grandeza. Além disso, verificou-se que a ocorrência de um curto em uma fase causou distorções nas tensões das demais fases, e que a distorção harmônica total da corrente durante a falta atingiu valores superiores a 46% na fase em falta, enquanto nas fases sãs a distorção foi significativamente menor. O trabalho comprovou o princípio de funcionamento do LCC-NS e destacou sua potencial aplicação como equipamento de proteção auxiliar em redes elétricas.

3 METODOLOGIA

A proposta deste trabalho consiste em projetar e simular um limitador de corrente de núcleo saturado com saturação do núcleo através de uma bobina de corrente contínua (CC). Utilizou-se como referência principal o limitador de corrente estudado por Fajoni (2015). Mesmo com o embasamento apresentado, foram realizadas algumas alterações a fim de avaliar o desempenho destas. Para isso, serão realizados os seguintes passos:

1. Definir as características elétricas do circuito elétrico onde o limitador será aplicado;
2. Definir as características elétricas esperadas do limitador;
3. Utilizar como ponto de partida, as dimensões e configurações utilizadas por Fajoni (2015);
4. Determinar o conjunto de equações que descrevem o funcionamento do circuito (Modelamento aproximado);
5. Variar os parâmetros afim de encontrar o funcionamento desejado;
6. Apresentar o circuito eletrônico de detecção de curto-circuito escolhido;
7. Realizar simulações para verificar a eficácia do limitador;

3.1 CRITÉRIOS GERAIS DE PROJETO

Neste trabalho, como na tese de referência, será realizada uma abordagem em baixa tensão, com correntes de magnitude compatível com o contexto residencial. Optou-se por essa abordagem a fim de facilitar testes práticos futuros.

O limitador proposto deverá operar em um circuito monofásico de 220 V de tensão eficaz nominal, com nível de curto-circuito máximo na entrada de 3 kA. Este circuito possui como proteção, um disjuntor termomagnético de 63 A com capacidade de interrupção compatível.

Arbitrando que o dispositivo deva reduzir a corrente instantânea de curto em até 2000 A, e que em regime permanente a indutância inserida seja a menor possível, o limitador deverá possuir os seguintes parâmetros elétricos:

1. Impedância baixa em regime permanente (considerando a frequência da rede de 60 Hz);
2. Corrente de pico máxima no curto-circuito de 2000 A;

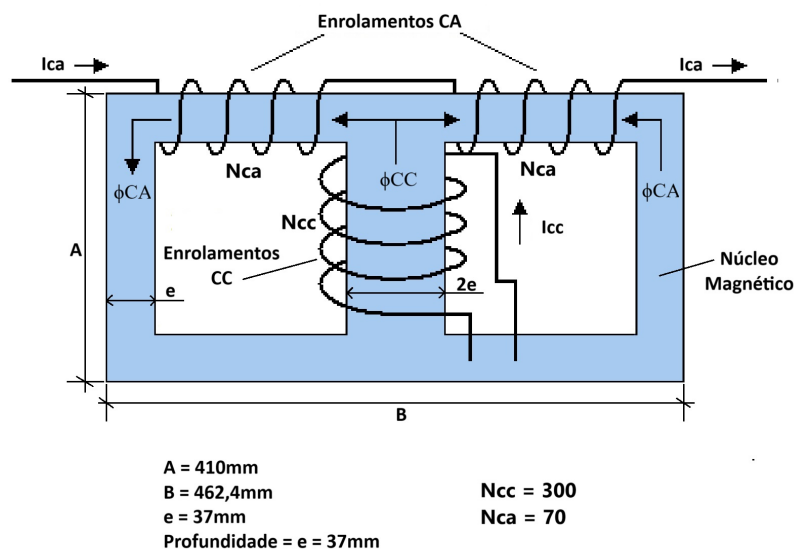
A tensão eficaz de 220 V para operação do dispositivo foi escolhida por corresponder a um dos principais níveis de tensão utilizados no fornecimento de energia em instalações residenciais. O nível de curto-circuito de 3 kA eficazes foi adotado por representar uma condição comum em circuitos terminais de baixa tensão. A corrente nominal de 63 A eficaz foi escolhida por corresponder a uma das maiores correntes nominais comumente empregadas em disjuntores termomagnéticos residenciais disponíveis comercialmente.

Como justificativa para a escolha dos parâmetros elétricos do limitador, definiu-se uma corrente máxima de pico de 2000 A, o que representa uma redução aproximada de 50% em relação à corrente prospectiva de curto-circuito. Esse índice de redução é semelhante ao obtido por Fajoni (2015), permitindo uma comparação mais direta entre os resultados. Como o objetivo principal do limitador é reduzir correntes de falta, não foi inicialmente estabelecido um valor máximo para a impedância inserida em regime permanente. Entretanto, esse parâmetro deve ser avaliado de forma a se determinar o menor valor possível que ainda permita atuação eficiente durante a falta.

3.2 DIMENSÕES INICIAIS E CONFIGURAÇÕES DO LIMITADOR

Como ponto de partida, as dimensões e configurações do limitador serão as mesmas utilizadas por Fajoni (2015), porém o limitador projetado terá um núcleo ferromagnético único, não havendo uma separação do ramo central. Desta forma a resposta deste limitador será diferente e será necessário o ajuste das dimensões para se obter o funcionamento desejado. A figura 14 apresenta as características iniciais do limitador:

Figura 14 – Configuração do limitador de corrente.

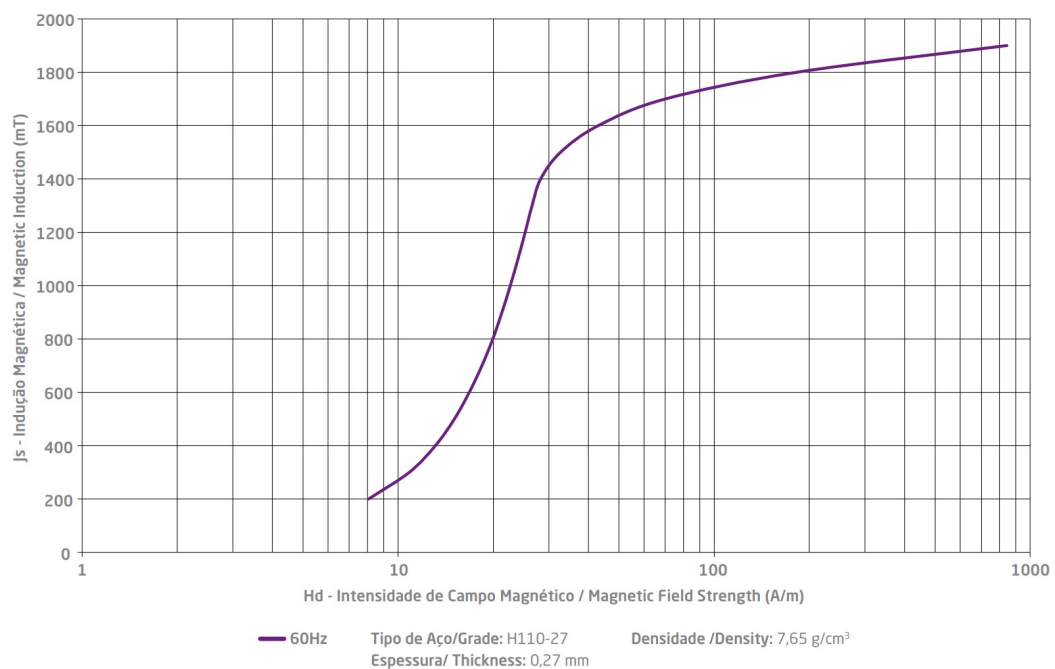


Fonte: Adaptado de Fajoni (2015).

Onde A , B e e , são dimensões do núcleo ferromagnético e N_{cc} e N_{ca} , são o número de voltas das bobinas de corrente contínua e de corrente alternada, respectivamente.

Outra característica distinta da referência, foi o material escolhido para a construção do núcleo, o aço elétrico de grão orientado H110-27 da fabricante Aperan. Contudo este apresenta uma curva BxH similar ao aço silício M125, utilizado na construção de Fajoni (2015). Analisando os dados do fabricante, além da curva de magnetização, mostrada na figura 15, o *datasheet* fornece valores tabelados para a indução magnética e permeabilidade relativa em função do campo magnético aplicado.

Figura 15 – Curva de magnetização do aço H110-27.



Fonte: Aperan (2025).

Com base nos dados extraídos do *datasheet* do material, foram obtidas duas equações para representar o comportamento da permeabilidade magnética diferencial. A primeira é válida para valores de campo magnético de até 30 A/m , faixa na qual a permeabilidade apresenta comportamento crescente. A segunda é válida para campos superiores a 30 A/m , onde a permeabilidade passa a apresentar comportamento decrescente. Essa divisão em duas regiões permite melhor representar a não linearidade da curva de magnetização do material. A figura 15 e a tabela 1 apresentam um extrato dos dados fornecidos pelo fabricante. As equações selecionadas foram aquelas que apresentaram o melhor ajuste aos dados experimentais, com base no maior coeficiente de determinação (R^2), e estão apresentadas na equação 3.1.

Tabela 1 – Dados do aço silício H110-27

	Hd (A/m)	μ_r	Bs (T)		Hd (A/m)	μ_r	Bs (T)
1	8,06	19743	0,200	12	26,53	39004	1,300
2	10,85	21999	0,300	13	28,25	39452	1,400
3	13,12	24276	0,400	14	32,66	36563	1,500
4	15,07	26426	0,500	15	43,00	29622	1,600
5	16,79	28443	0,600	16	70,15	19291	1,700
6	18,42	30264	0,700	17	182,84	7839	1,800
7	19,93	31951	0,800	18	799,18	1889	2,000
8	21,31	33620	0,900	19	842,93	1796	2,000
9	22,65	35171	1,000	20	2503,30	622	2,000
10	23,95	36583	1,100	21	4861,50	323	2,000
11	25,24	37870	1,200	22	10077,00	157	2,000

Hd - Intensidade de Campo Magnético Direto

μ_r - Permeabilidade Relativa

Bs - Indução Magnética (Valor de Pico)

Fonte: Adaptado de Aperan (2025).

$$\mu_d(H_f) = \begin{cases} (-0.8670H_f^4 + 42.69H_f^3 - 671.3H_f^2 + 5814H_f + 5789) \cdot \mu_0, & \text{se } H_f < 30A/m \\ \left(\frac{78517}{H_f}\right) \cdot \mu_0, & \text{se } H_f > 30A/m \end{cases} \quad (3.1)$$

3.3 MODELAMENTO MATEMÁTICO DO LIMITADOR

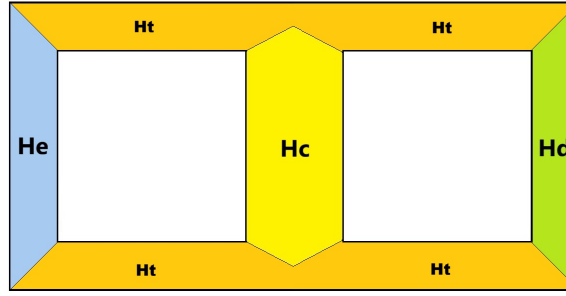
Para o modelamento matemático aproximado do limitador faz-se necessário a utilização da lei de Biot-Savart, a analogia entre circuito elétrico e circuito magnético, as aproximações das relutâncias das dispersões de fluxo, a lei de Kirchhoff das tensões, a equação que descreve a tensão sobre um indutor e equação da indutância. Estas são as equações básicas que regem o funcionamento teórico do limitador.

3.3.1 Lei de Biot-Savart

Através da lei de Biot-Savart pode-se escrever as equações dos campos magnéticos no interior do núcleo-ferromagnético. Para se obter equações simplificadas foi considerado que o campo magnético H é diferente em quatro regiões do núcleo, porém dentro de cada região ele é constante, conforme a imagem da figura 16:

Foi considerado que no ramo central tem-se o campo magnético uniforme H_c , no ramo da direita tem-se o campo uniforme H_d , no ramo da esquerda tem-se o campo uniforme H_e e nos

Figura 16 – Campos magnéticos no interior do núcleo ferromagnético



Fonte: Autoria própria (2025)

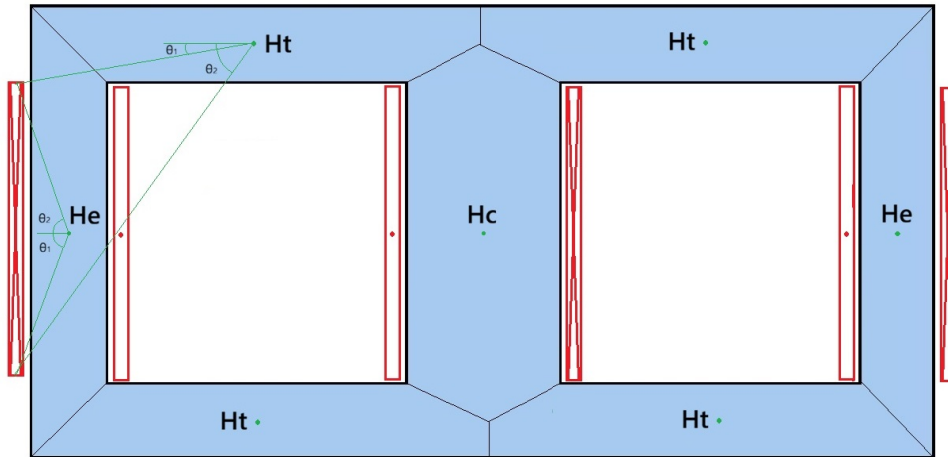
ramos que ligam os ramos verticais, temos o campo H_t . Com a premissa, pode-se escrever as equações dos campos magnéticos que cada perfil de enrolamento (laterais e central) geram nos pontos centrais de cada segmento (Biot-Savart). As equações que cada perfil de enrolamento gera num ponto localizado na linha de simetria do perfil e em um dos extremos do perfil, é dado respectivamente por 3.2 e 3.3:

$$H_y = \frac{I}{2\pi l} \cdot \int_{\theta_1}^{\theta_2} d\theta = \frac{I}{2\pi l} \cdot (\theta_2 - \theta_1) \quad (3.2)$$

$$H_x = \frac{I}{2\pi l} \cdot \int_{\theta_1}^{\theta_2} \text{tg}\theta = \frac{I}{2\pi l} \cdot (\ln(\cos(\theta_2)) - \ln(\cos(\theta_1))) \quad (3.3)$$

Onde θ_1 é o ângulo formado entre o plano horizontal e a linha que liga um das extremidades do enrolamento até o ponto onde deseja-se calcular o campo magnético, e θ_2 é o ângulo formado entre o plano horizontal e a linha que liga a outra extremidade do enrolamento até o ponto onde deseja-se calcular o campo. Tais ângulos estão explícitos na figura 17.

Figura 17 – Cálculos do campo magnético

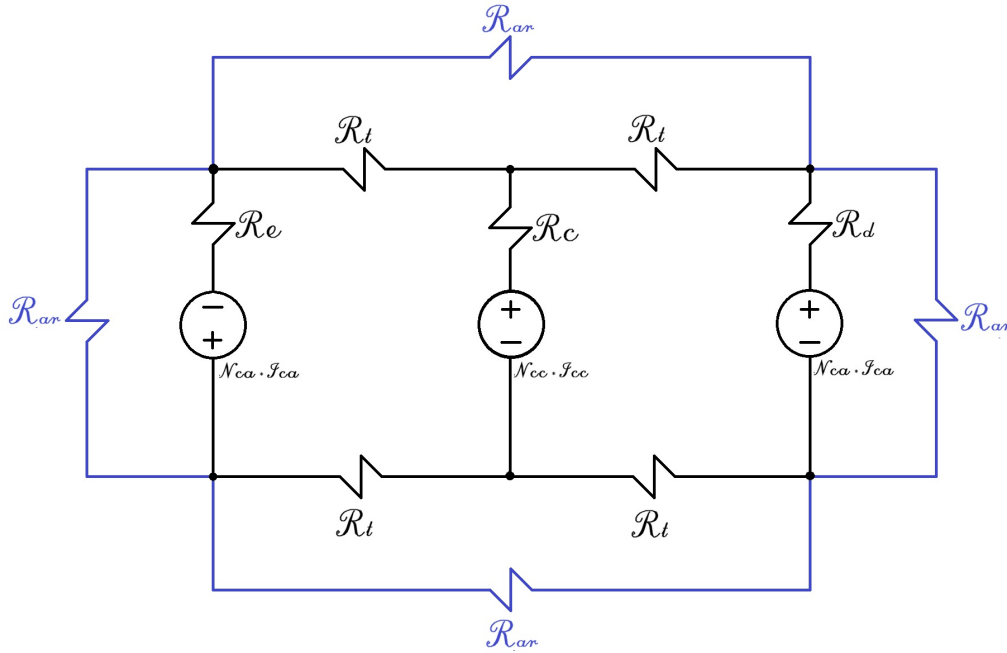


Fonte: Autoria própria (2025)

3.3.2 Conservação de fluxo e circuito magnético

Considerando a conservação de fluxo e a analogia entre circuitos elétricos e magnéticos, pode-se modelar o limitador como um circuito magnético composto de relutâncias e forças-magnetomotrizes. Como o limitador vai operar saturado, tem-se que considerar as dispersões de fluxo para obter-se uma resposta condizente com a realidade. A figura 18 ilustra o circuito magnético modelado do limitador.

Figura 18 – Circuito magnético do limitador



Fonte: Autoria própria (2025)

Onde R_e é a relutância no ramo esquerdo, R_c é a relutância no ramo central, R_d é a relutância no ramo direito, R_t são as relutâncias nos ramos transversais e R_{ar} é a relutância estimada para o ar.

As relutâncias para os ramos do núcleo ferromagnético, foram obtidas a través da equação 3.4, onde l é o comprimento médio de cada ramo, μ é a permeabilidade do ramo e A é a área deste ramo. Para estimar a relutância do ar, foi utilizada uma aproximação proposta por Roters (1941), e é dada pela equação 3.5, onde μ_0 é a permeabilidade do vácuo e ee é a profundidade do núcleo ferromagnético. A relutância da equação 3.5 é multiplicado por $\frac{1}{4}$ pois é considerado uma relutância em cada lado do ramo, resultando em quatro relutâncias em paralelo.

$$R_x = \frac{l}{\mu \cdot A} \quad (3.4)$$

$$R_{ar} = \frac{1,22}{(0,322 \cdot \mu_0 \cdot ee)} \cdot \frac{1}{4} \quad (3.5)$$

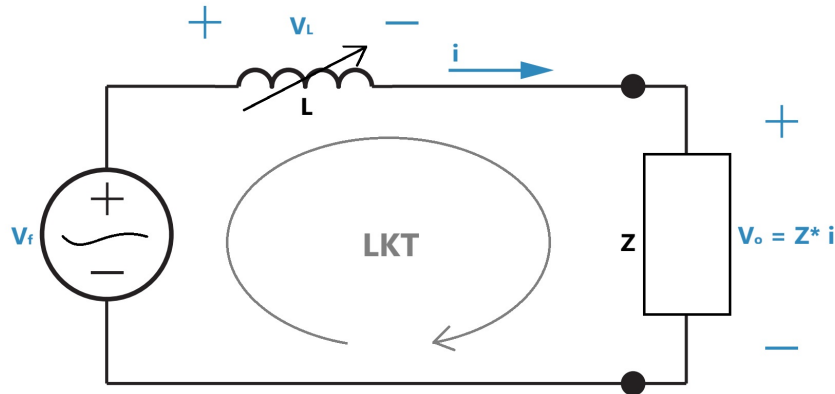
3.3.3 Lei de Kirchhoff das tensões

O limitador de corrente elétrica de núcleo saturado é descrito como um indutor de indutância variável, desta forma, o circuito no qual está inserido pode ser equacionado para verificar o funcionamento teórico. Tratando o circuito de forma simplificada, com uma fonte de tensão, o limitador (indutor variável), a impedância da carga e fazendo o uso da lei de Kirchhoff das tensões chega-se na equação 3.6:

$$V_f - V_L - Z \cdot i = 0 \quad (3.6)$$

Onde V_f é a tensão da fonte, V_L é a queda de tensão sobre o indutor variável e $Z \cdot i$ é a queda de tensão sobre a carga alimentada. A figura 19 ilustra o procedimento:

Figura 19 – Circuito elétrico, fonte, limitador e carga.



Fonte: Autoria própria (2025)

Sabe-se que a tensão sobre um indutor é dada, pela seguinte expressão: $V_L = L \frac{di}{dt}$. E a fim de simplificar a análise, este trabalho irá se limitar a verificar o comportamento do limitador em circuitos com cargas puramente resistivas. Desta forma pode-se reescrever a equação 3.7:

$$V_f - L \frac{di}{dt} - R \cdot i = 0 \quad (3.7)$$

Onde L é a indutância do indutor e R é a resistência da carga.

3.3.4 Indutância Variável

Com base no circuito magnético modelado da figura 18 e sabendo que os campos magnéticos calculados para cada ramo do núcleo ferromagnético já levam em conta as contribuições de cada enrolamento, pode-se calcular a relutância total "vista" por cada bobina de corrente alternada. Utilizando o princípio da superposição, anula-se duas fontes para o cálculo da relutância equivalente conectada à fonte magnetomotriz de interesse. Após a simplificação do circuito,

pode-se calcular a indutância de cada bobina de corrente alternada, com base na equação 2.1, obtém-se a equação 3.8.

$$L = \frac{Nca^2}{R_{eq}} \quad (3.8)$$

Onde L é a indutância da bobina considerada e R_{eq} é a relutância equivalente "vista" por essa bobina. Calculando a indutância de cada enrolamento de corrente alternada, por fim, soma-se para obter a indutância total, conforme a equação 3.9.

$$L_t = L_e + L_d \quad (3.9)$$

Onde L_t é a indutância total do limitador, L_e é a indutância apenas da bobina esquerda e L_d é a indutância apenas da bobina direita.

3.3.5 Conjunto de equações e método de solução

Agora com todas as equações que descrevem o comportamento das variáveis do circuito, pode-se utilizar um método numérico para encontrar a resposta aproximada do limitador na condição de regime permanente e também na ocorrência do curto-circuito. A equação 3.7 que trata-se de uma Equação Diferencial Ordinária (EDO) de primeira ordem, se utilizará Runge Kutta de 4º ordem (RK4) para aproximação da solução. O método de cálculo e de verificação do erro deste método numérico foi realizado de acordo com Avila (2019) e com Barroso (1987), respectivamente.

Para as equações 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5, seu cálculo é direto. Juntamente com o cálculo dos campos, é realizada a atualização da permeabilidade magnética e da relutância de cada trecho do núcleo. Por fim é calculado a indutância total do limitador através das equações 3.8 e 3.9.

No apêndice A encontra-se o código implementado em octave que aproxima o funcionamento do limitador de corrente de núcleo saturado.

3.4 CIRCUITO DE DETECÇÃO DE CURTO-CIRCUITO

Para que o LCENS opere adequadamente é necessário a atuação de um circuito de detecção de falta de forma rápida e eficaz. Neste trabalho, tal circuito não será desenvolvido detalhadamente, pois o foco são as características eletromagnéticas do limitador, porém será apresentado resumidamente a seguir.

Como já apresentado, nas simulações foi considerado o tempo de detecção e atuação do circuito desenvolvido por Fajoni (2015), assim este circuito será utilizado integralmente, porém com a ressalva que neste trabalho o circuito será para a detecção de falta de apenas uma fase.

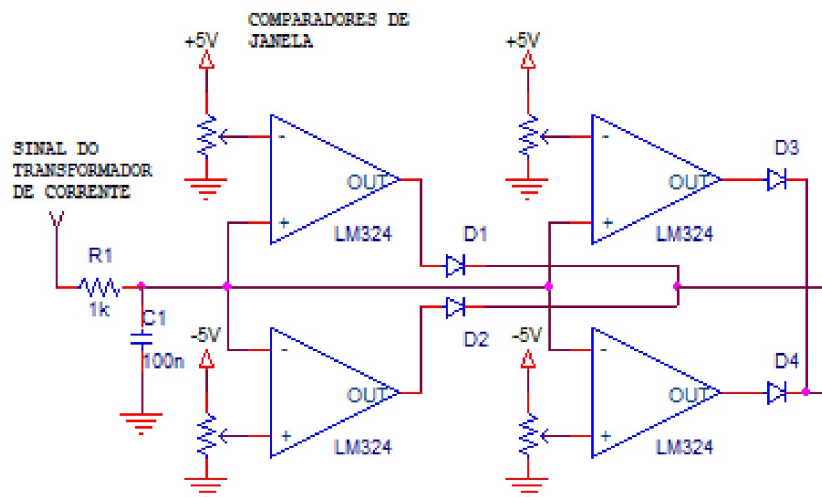
Trata-se de um circuito analógico com quatro estágios:

1. Estágio de leitura de corrente e comparação de sinais;
2. Estágio temporizador e identificação de falta;
3. Estágio de travamento do sinal e sinalização de curto-circuito;
4. Estágio de acionamento do IGBT;

3.4.1 Estágio de leitura de corrente e comparação de sinais

Este estágio faz a leitura da corrente elétrica através de um transformador de corrente acoplado na entrada do LCENS, este sinal de leitura é convertido em tensão, passa por um filtro RC que evita que *spikes* acionem indevidamente o dispositivo. Após isso, amplificadores operacionais montados em configuração de dois comparadores de janela identificam se o sinal lido ultrapassa um determinado limite positivo ou negativo. A figura 20 ilustra este circuito:

Figura 20 – Estágio de leitura de corrente e comparação de sinais



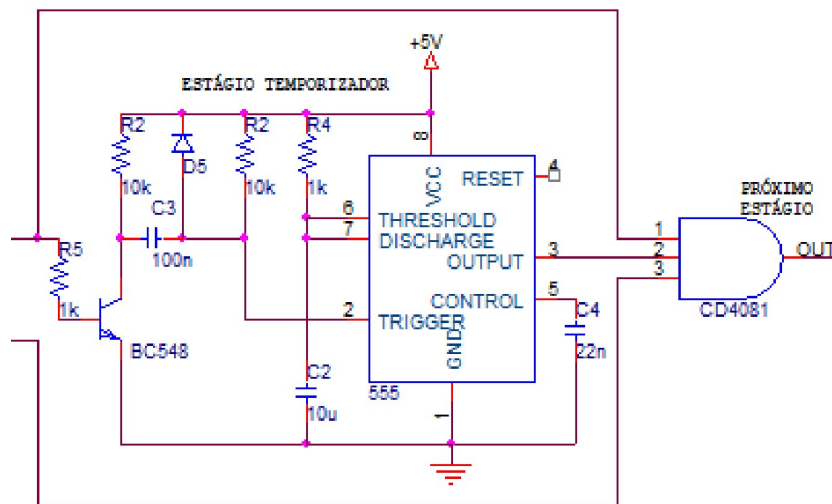
Fonte: Fajoni (2015)

3.4.2 Estágio temporizador e identificação de falta

Este estágio utiliza os sinais provenientes dos dois comparadores de janela e um sinal temporizado para diferenciar um curto-circuito de um chaveamento ou de uma partida de um motor elétrico. Para isto é utilizado um temporizador (LM555), montado na configuração monoestável, com componentes dimensionados para que após receber um sinal baixo no gatilho, este decorrente do sinal emitido pelo comparador de janela com menor limite, emita um sinal alto de duração de, aproximadamente, 1 ms na saída. Estes sinais são recebidos por uma porta *AND* de três entradas. A porta recebe o sinal dos dois comparadores de janela que indicam um limite inferior e um superior respectivamente, e o terceiro sinal é proveniente do temporizador.

Em resumo, se a corrente medida na entrada do LCENS ultrapassar os dois limites configurados nos comparadores de janela que são a corrente nominal e o dobro da corrente nominal em menos de 1 *ms*, a falta é identificada e a porta *AND* emite um sinal de nível alto para o próximo estágio. A figura 21 ilustra este circuito:

Figura 21 – Estágio temporizador e identificação de falta



Fonte: Fajoni (2015)

3.4.3 Estágio de travamento do sinal e sinalização de curto-circuito

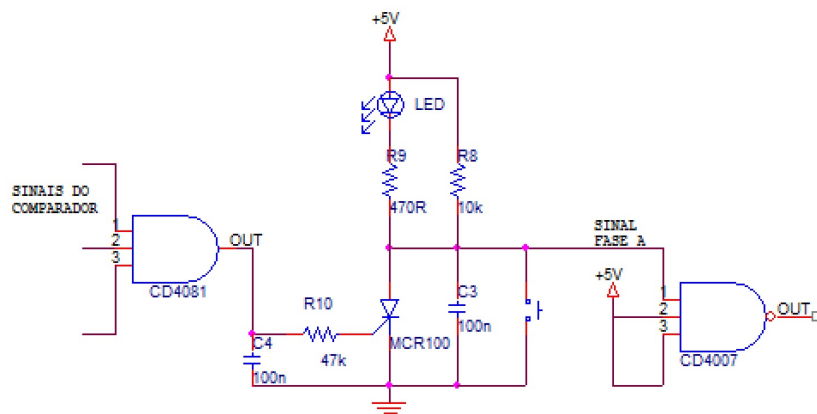
Após a identificação da falta, o sinal deve ser travado para que as passagens por zero da corrente do circuito LCENS não afetem o funcionamento do circuito de detecção. Para isto é utilizado um tiristor de gatilho sensível (MCR100) que recebe um sinal do estágio anterior, desta forma, permitindo a aplicação de um nível baixo em uma das entradas de uma porta *NAND*. No trabalho de Fajoni (2015) esta porta *NAND* recebe o sinal de detecção das três fases. Em regime permanente de operação, isto é, na ausência de um curto-circuito, o sinal fornecido pela monitoramento das três fases é de nível alto, assim será aplicado nível alto diretamente da fonte, a duas das entradas.

Quando a falta é detectada e o nível baixo é aplicado à entrada da porta *NAND*, ela emite um sinal de nível alto para o próximo estágio. A sinalização do curto-circuito é feita através do acionamento do LED após a condução do tiristor. A figura 22 ilustra este circuito:

3.4.4 Estágio de acionamento do IGBT

Para a comutação do IGBT01 que vai possibilitar o descarregamento do indutor de corrente contínua, foi utilizado o circuito integrado IR2110. Este circuito apresenta simplicidade no acionamento e isolamento entre circuito de controle e potência. Em regime normal de operação, o sinal proveniente do estágio anterior é de nível baixo, fornecendo um sinal de nível alto para a

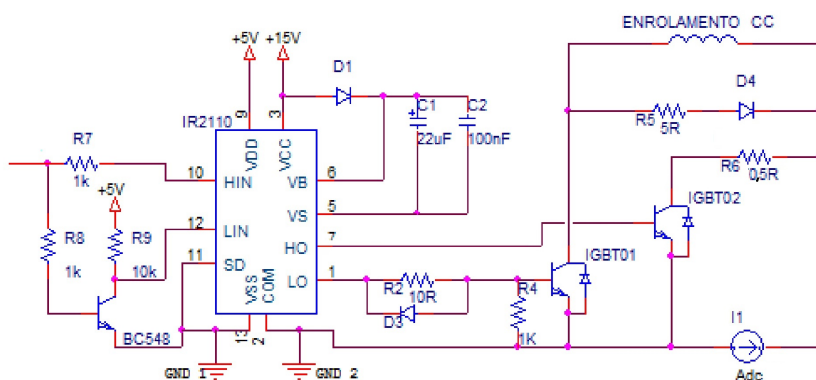
Figura 22 – Estágio de travamento do sinal e sinalização de curto-circuito



Fonte: Adaptado de Fajoni (2015)

porta LIN, através de um circuito inversor. Quando LIN recebe nível alto, LO também fornece um sinal de nível alto e mantém o IGBT01 conduzindo e a fonte de corrente impondo a corrente contínua no enrolamento CC. No momento da falta, o sinal proveniente do estágio anterior passa a ser de nível alto, o circuito inversor aplica um sinal de nível baixo na entrada LIN, a saída LO comuta para nível baixo e a chave IGBT01 entra em condição de bloqueio, retirando a fonte de corrente do circuito e fazendo com que o indutor descarregue a energia armazenada, no resistor R5. Como a fonte de corrente não pode ficar sem um caminho de circulação para a corrente imposta, será utilizado um IGBT02, e as portas HIN e HO para o acionamento deste IGBT. Como o sinal aplicado a porta HIN não é invertido, o acionamento do IGBT02 é inverso ao IGBT01, quando o IGBT01 entra em bloqueio, o IGBT02 entra em modo de condução, permitindo o fluxo da corrente imposta pela fonte através do resistor R6. A figura 23 ilustra este circuito:

Figura 23 – Estágio de acionamento do IGBT



Fonte: Adaptado de Fajoni (2015)

3.5 SIMULAÇÕES PROPOSTAS

Como método de validação, foi proposto a implementação e simulação da topologia do limitador de corrente elétrica no *software Octave* inicialmente e após uma simulação mais realista com o *software Maxwell* da fabricante *Ansys*. O objetivo é validar a simulação aproximada previamente realizada no *software Octave*, verificando o aumento de indutância do limitador com núcleo ferromagnético único. Além disso, pretende-se avaliar o comportamento das tensões e correntes mediante variações na corrente contínua de magnetização de saturação do núcleo.

Para as simulações foi considerado o seguinte cenário:

1. Início da simulação em $t = 0$ s e fim em $t = 0,1$ s;
2. Início do curto-circuito em $t = 0,0333$ s e fim em $t = 0,0833$ s;
3. Resistência de carga de $3,5 \Omega$ e resistência de curto de $0,073 \Omega$, resultando em corrente de carga de aproximadamente 63 A e corrente de curto de 3 kA, ambas eficazes;
4. *Delay* do circuito de detecção de curto-circuito de 2 ms entre o início da falta e o início do descarregamento do indutor de corrente contínua (CC) (tempo obtido por Fajoni (2015));

No *software Octave*, a simulação foi feita através de linhas de código e *loops* de repetição com base no modelamento matemático aproximado do limitador, no *software* de simulação de elementos finitos *Maxwell*, foi necessário a modelagem 3D do limitador, assim como a elaboração do circuito elétrico da parte de corrente alternada e contínua. A elaboração destes circuitos elétricos foi realizado no *Simplorer*, *software* integrado ao *Maxwell*.

Para a corrente de saturação foi utilizado um modelo em degrau, o modelo foi adotado pois conforme Rocha (2022), esta abordagem apresenta desempenho satisfatório, não sendo necessário um modelo analítico complexo para essa corrente. Esse modelo em degrau para a corrente de saturação foi utilizada também na simulação realizada no *Octave*.

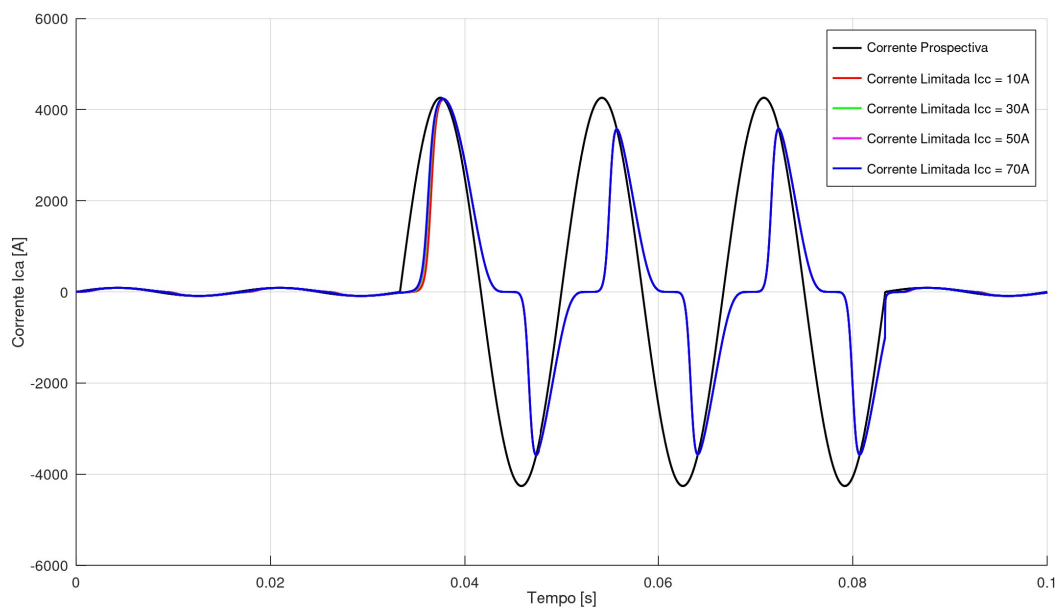
4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados das simulações realizadas no *software Octave* com base no modelamento matemático aproximado do limitador, e as simulações realizadas no *software* de elementos finitos *Maxwell*.

4.1 SIMULAÇÕES NO OCTAVE

Nesta simulação buscou-se avaliar a limitação de corrente ocorrida no momento do curto-circuito, a indutância inserida no circuito, a queda de tensão sobre o limitador e a distorção harmônica inserida pelo limitador em regime permanente. Estão apresentados os resultados nas figuras 24, 25 e 26, respectivamente:

Figura 24 – Correntes de curto-circuito

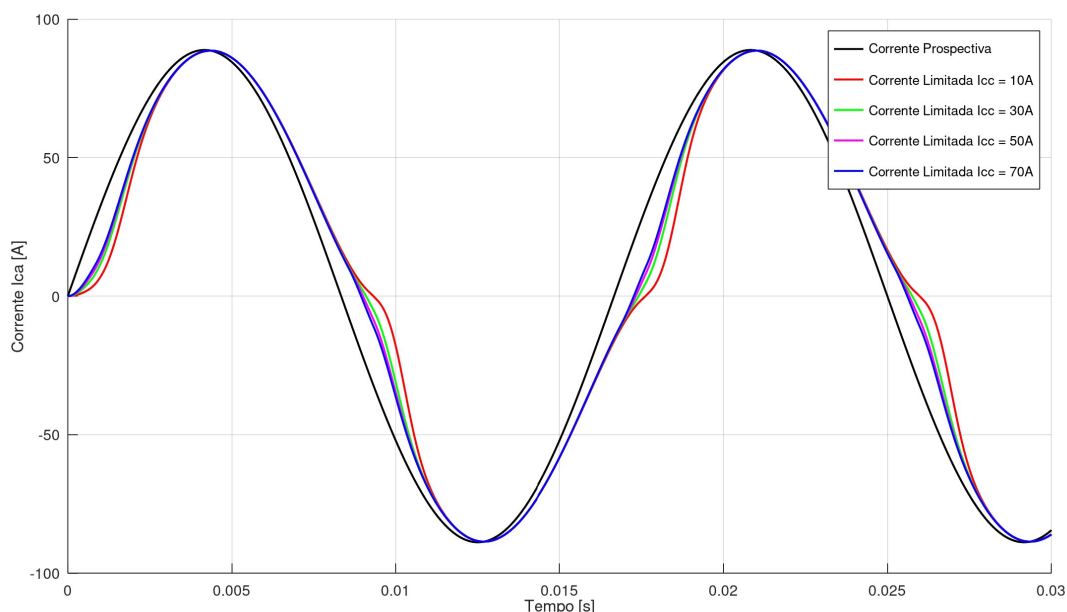


Fonte: Autoria própria (2026)

Observa-se na figura 24, que no primeiro semiciclo positivo de corrente de curto-circuito, com as mesmas dimensões utilizadas por Fajoni (2015), porém modificado para núcleo único, houve uma redução do pico da corrente de curto-circuito de 3%, e nos semiciclos posteriores a redução corrente de pico ficou em 15,6%, valor maior que o especificado no item 3.1.

Observando a figura 25, nota-se a indutância que cada corrente de magnetização do núcleo causa em regime permanente. Pode-se observar que quanto maior for a corrente de magnetização, menor é a indutância inserida no circuito. Na tabela 2 tem-se os valores de deslocamento de fase, reatância e indutância inseridos no circuito pelo limitador. Na tabela 3 observa-se

Figura 25 – Correntes em regime permanente



Fonte: Autoria própria (2026)

o módulo das componentes harmônicas para cada corrente de saturação e a distorção harmônica total de corrente inserida. As tensões sobre o limitador de corrente em regime permanente mostradas na figura 26, corroboram as indutâncias inseridas por cada corrente de magnetização.

Tabela 2 – Deslocamento de fase, reatância e indutância em regime permanente

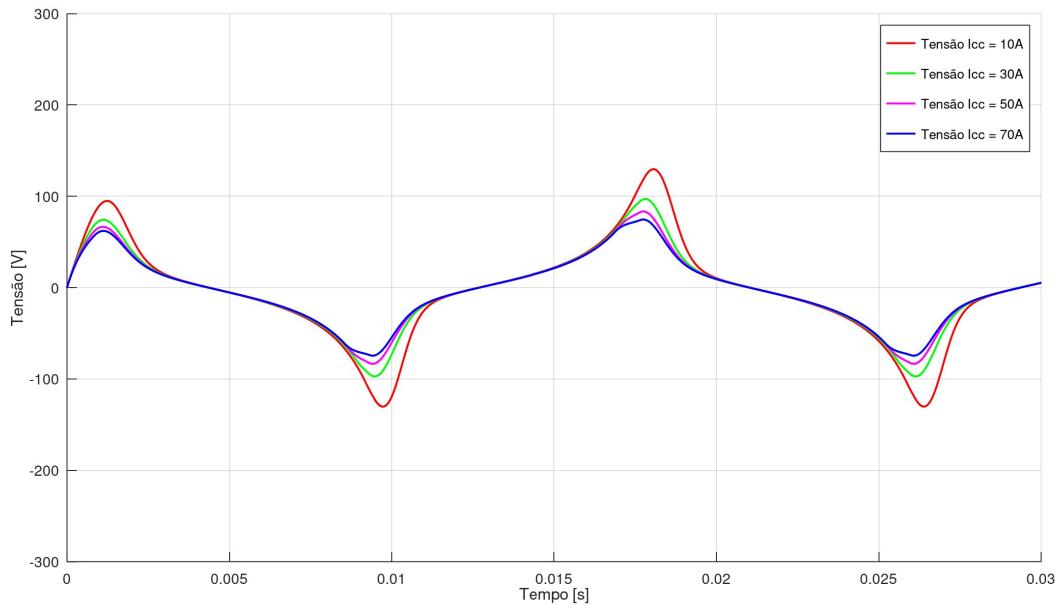
Corrente de saturação	Deslocamento de fase	Reatância	Indutância
10 A	8,49°	0,52 Ω	1,38 mH
30 A	8,49°	0,52 Ω	1,38 mH
50 A	8,06°	0,49 Ω	1,31 mH
70 A	8,06°	0,49 Ω	1,31 mH

Tabela 3 – Componentes harmônicas e distorção harmônica total de corrente

Corrente de saturação	1ª	3ª	5ª	7ª	9ª	11ª	13ª	15ª	THDi
10 A	85,0 A	8,70 A	4,70 A	2,50 A	1,30 A	0,70 A	0,30 A	0,10 A	12,1%
30 A	87,0 A	6,20 A	3,20 A	1,60 A	0,80 A	0,40 A	0,20 A	0,10 A	8,3%
50 A	87,0 A	5,20 A	2,40 A	1,20 A	0,50 A	0,02 A	0,10 A	0,08 A	6,8%
70 A	87,0 A	4,60 A	2,00 A	0,80 A	0,30 A	0,20 A	0,10 A	0,08 A	5,9%

Tendo em vista os objetivos do item 3.1, foram alteradas as dimensões do limitador para que haja uma maior limitação das correntes de curto, mas consequentemente uma maior influência do limitador no circuito em regime permanente também. O único parâmetro alterado para isso foi a profundidade do núcleo, que passou de 37 mm para 52 mm, aumento de aproximadamente 40% em área de seção transversal do núcleo ferromagnético.

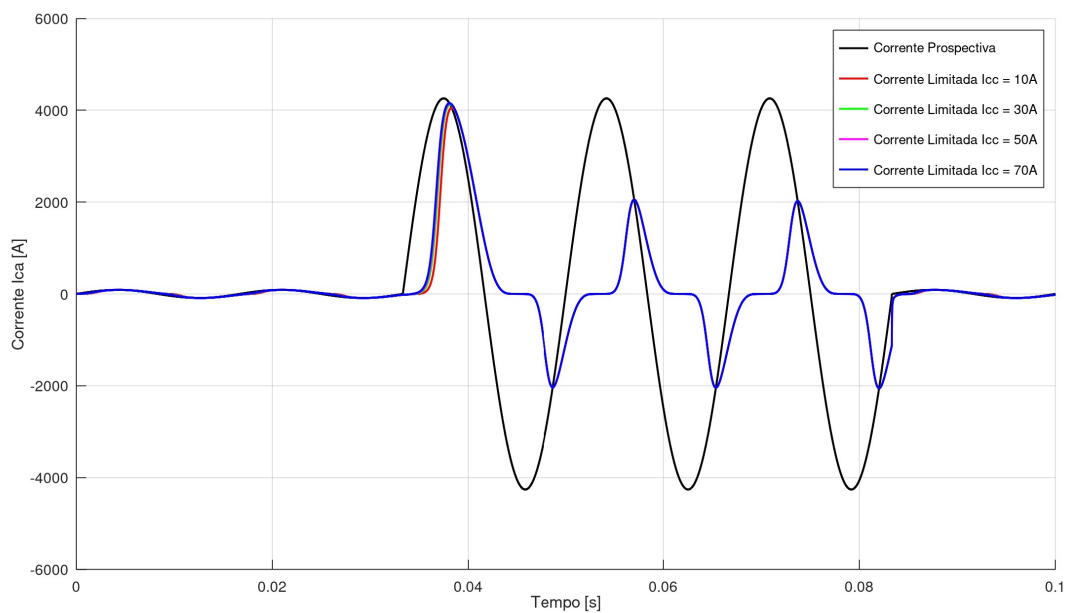
Figura 26 – Tensões sobre o limitador em regime permanente



Fonte: Autoria própria (2026)

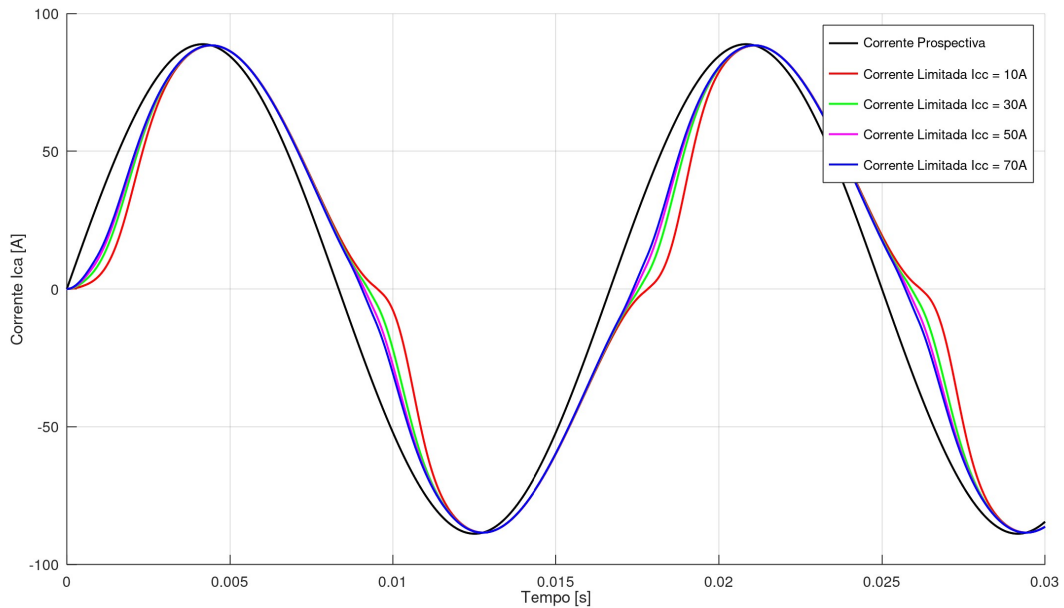
As figuras 27, 28 e 29, mostram o novo comportamento do circuito após a alteração da profundidade do núcleo. Pode-se perceber que as correntes de curto-circuito diminuíram significativamente a partir do segundo semiciclo de curto-circuito, a limitação ficou bem próxima ao limite estipulado de 2000 A. Houve uma redução de cerca de 2,9% no primeiro semiciclo positivo e nos semiciclos posteriores, obteve-se uma redução 51,6% da corrente de pico do curto-circuito.

Figura 27 – Correntes de curto-circuito



Fonte: Autoria própria (2026)

Figura 28 – Correntes em regime permanente



Fonte: Autoria própria (2026)

Com a alteração da profundidade, percebe-se um aumento da indutância inserida no circuito em regime permanente, e uma maior queda de tensão sobre o limitador. Na tabela 4, tem-se os valores de deslocamento de fase, reatância e indutância inseridos no circuito pelo limitador. Na tabela 5 observa-se o módulo das componentes harmônicas para cada corrente de saturação e a distorção harmônica total de corrente inserida.

Tabela 4 – Deslocamento de fase, reatância e indutância em regime permanente (+40% de área)

Corrente de saturação	Deslocamento de fase	Reatância	Indutância
10 A	11,9°	0,73 Ω	1,93 mH
30 A	11,5°	0,70 Ω	1,86 mH
50 A	11,1°	0,68 Ω	1,79 mH
70 A	11,1°	0,68 Ω	1,79 mH

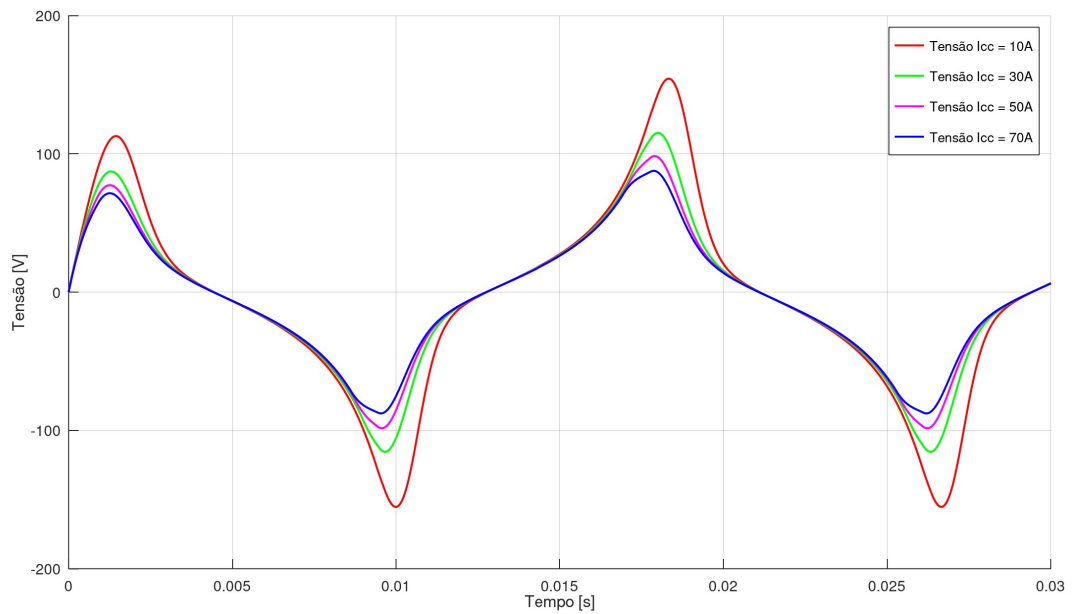
Tabela 5 – Componentes harmônicas e distorção harmônica total de corrente (+40% de área)

Corrente de saturação	1ª	3ª	5ª	7ª	9ª	11ª	13ª	15ª	THDi
10 A	83,0 A	10,0 A	5,10 A	2,50 A	1,10 A	0,50 A	0,20 A	0,00 A	13,9%
30 A	85,0 A	7,20 A	3,30 A	1,50 A	0,60 A	0,30 A	0,10 A	0,05 A	9,5%
50 A	86,0 A	5,90 A	2,50 A	1,00 A	0,40 A	0,20 A	0,08 A	0,00 A	7,6%
70 A	87,0 A	5,10 A	2,00 A	0,70 A	0,20 A	0,13 A	0,09 A	0,07 A	6,4%

4.2 SIMULAÇÕES NO MAXWELL

Nas figuras 30 e 31 respectivamente, pode-se ver o modelo 3D utilizado para as simulações e os circuitos modelados que geram a corrente prospectiva, as correntes limitadas e a

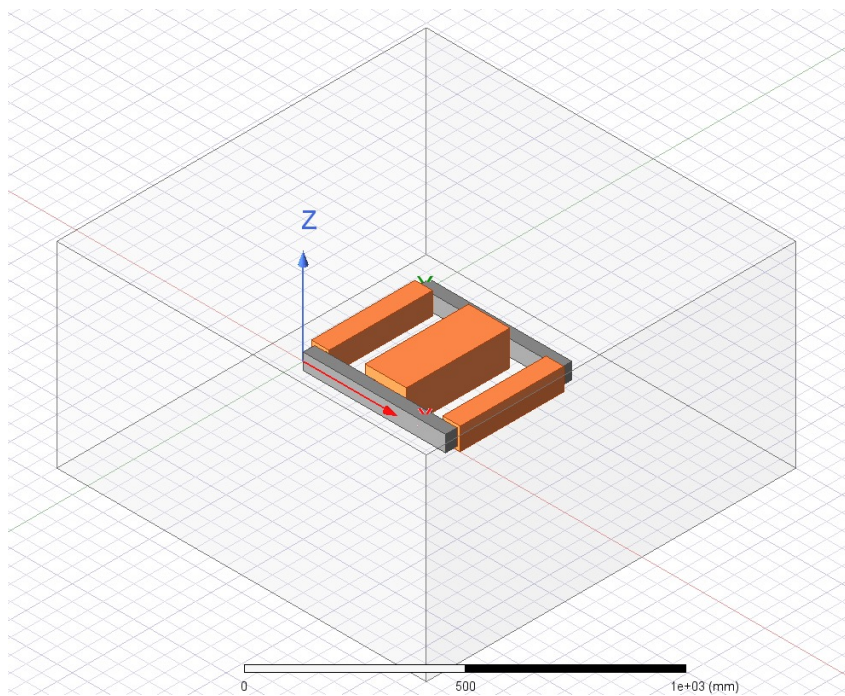
Figura 29 – Tensões sobre o limitador em regime permanente



Fonte: Autoria própria (2026)

corrente de saturação do núcleo ferromagnético. O modelo 3D é composto de núcleo ferromagnético, enrolamentos de cobre e espaço limitado de ar para simulação.

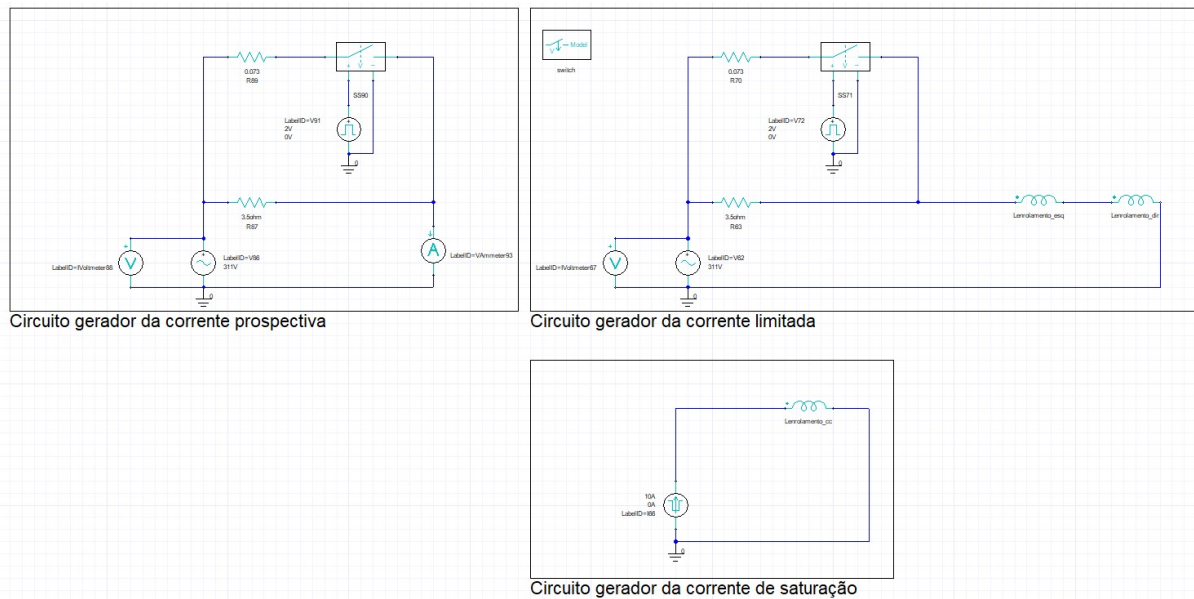
Figura 30 – Modelo 3D do LCENS



Fonte: Autoria própria (2026)

Para a realização das simulações no software *Maxwell* foi considerado o mesmo cenário de simulação proposto no item 3.5, e buscou-se avaliar também as mesmas características

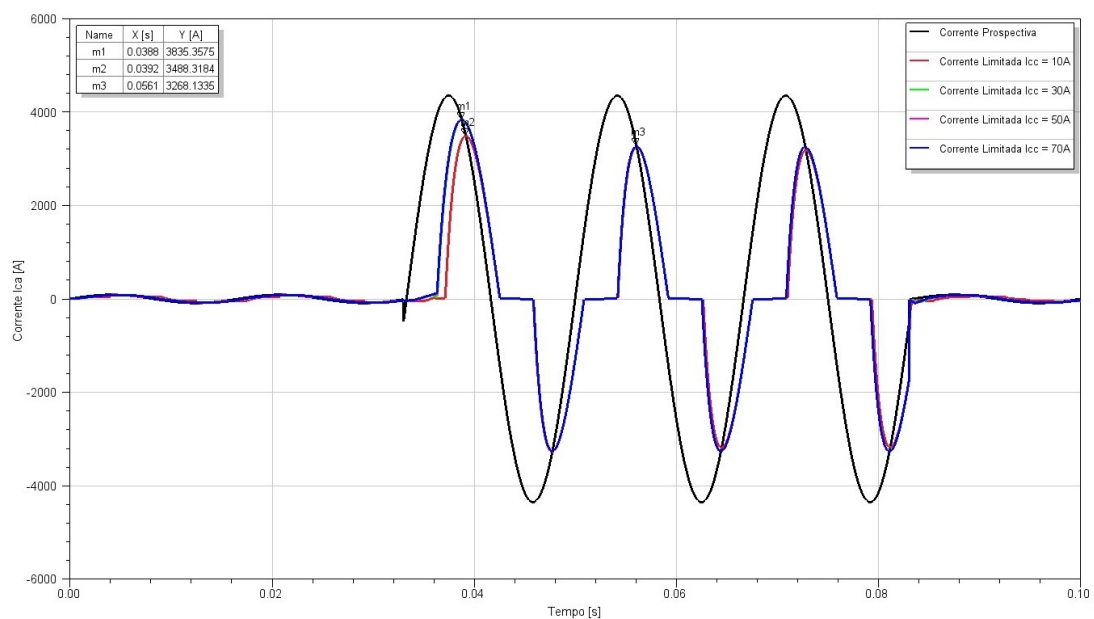
Figura 31 – Circuitos de simulação



Fonte: Autoria própria (2026)

avaliadas no item 3.5. Observa-se que no primeiro semiciclo positivo de corrente de curto-circuito, com as mesmas dimensões utilizadas por Fajoni (2015), porém modificado para núcleo único, houve uma redução do pico da corrente de curto-circuito de 9,6% para as correntes de saturação de 30, 50 e 70 A, e uma redução de 17,7% para a corrente de saturação de 10 A. Nos semiciclos posteriores a redução corrente de pico ficou em 22,9%, valor maior que o especificado no item 3.1. Pode-se verificar essa redução na figura 32.

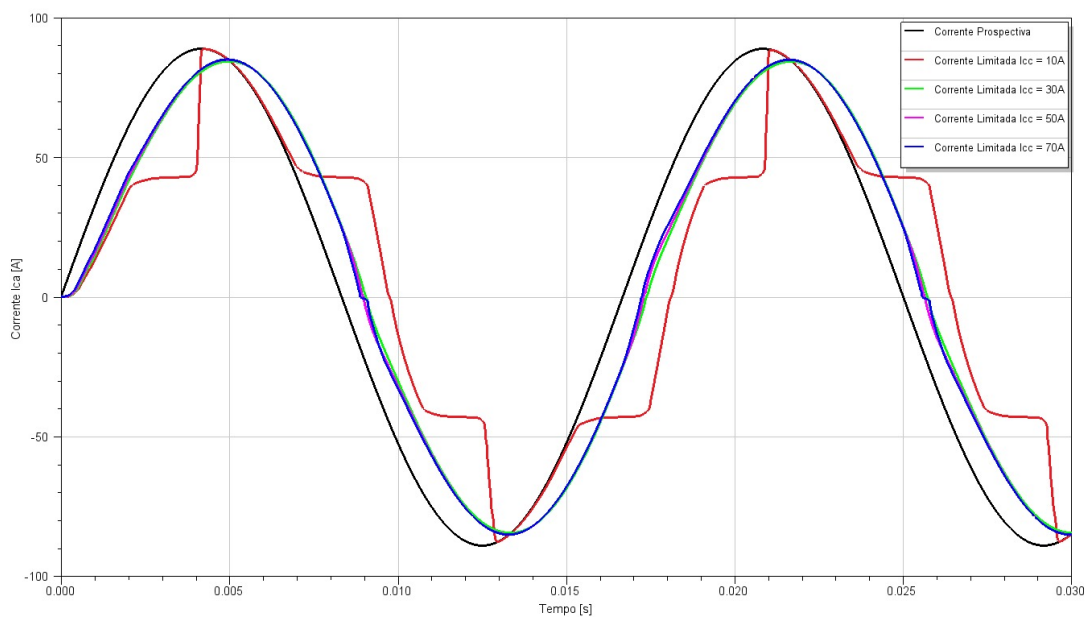
Figura 32 – Correntes de curto-circuito



Fonte: Autoria própria (2026)

Observando a figura 33, nota-se a indutância que cada corrente de magnetização do núcleo causa em regime permanente. Neste gráfico pode-se verificar que a indutância inserida no circuito pelo limitador com corrente de saturação de 30, 50 e 70 A, são semelhantes, porém a corrente de saturação de 10 A destoa das demais, inserindo uma indutância indesejável e distorcendo a corrente. Na tabela 6 tem-se os valores de deslocamento de fase, reatância e indutância inseridos no circuito pelo limitador, não foi possível determinar esses valores para a corrente de saturação de 10 A, pois pela distorção da curva, não é possível verificar o deslocamento de fase. Na tabela 7 observa-se o módulo das componentes harmônicas para cada corrente de saturação e a distorção harmônica total de corrente inserida.

Figura 33 – Correntes em regime permanente



Fonte: Autoria própria (2026)

Tabela 6 – Deslocamento de fase, reatância e indutância em regime permanente

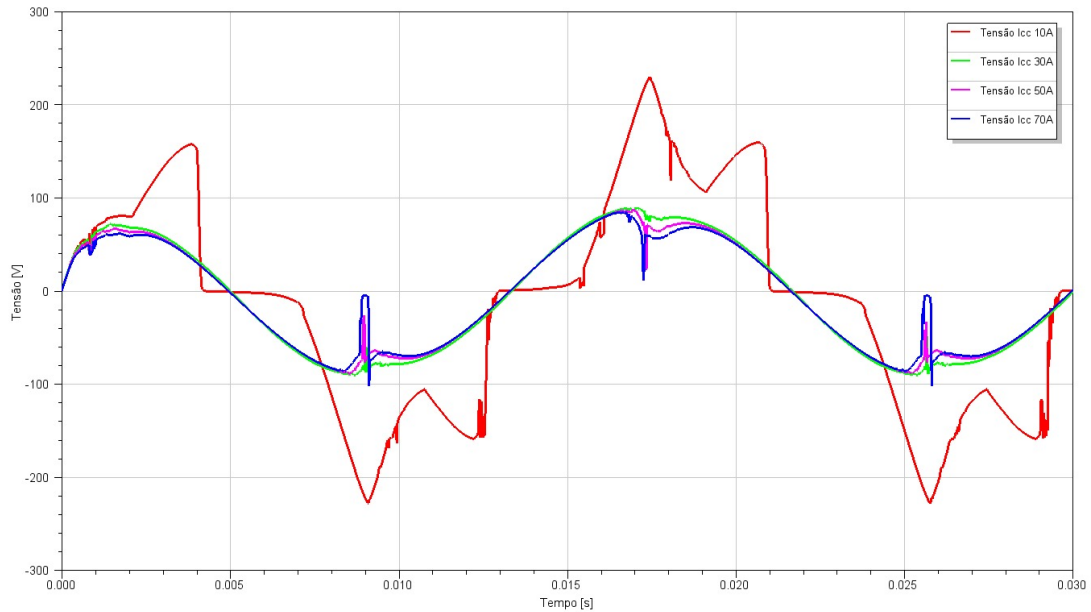
Corrente de saturação	Deslocamento de fase	Reatância	Indutância
10 A	-	-	-
30 A	18,14°	1,15 Ω	3,04 mH
50 A	16,85°	1,06 Ω	2,81 mH
70 A	16,85°	1,06 Ω	2,81 mH

Tabela 7 – Componentes harmônicas e distorção harmônica total de corrente

Corrente de saturação	1ª	3ª	5ª	7ª	9ª	11ª	13ª	15ª	THDi
10 A	72,2 A	5,60 A	13,4 A	4,70 A	2,40 A	3,20 A	1,40 A	2,20 A	22,2%
30 A	85,0 A	1,40 A	0,60 A	0,50 A	0,30 A	0,25 A	0,22 A	0,14 A	2,0%
50 A	85,5 A	1,85 A	1,25 A	0,90 A	0,60 A	0,45 A	0,33 A	0,24 A	3,0%
70 A	85,7 A	2,30 A	1,42 A	0,84 A	0,48 A	0,24 A	0,11 A	0,08 A	3,4%

Na figura 34, pode-se ver a tensão sobre o limitador em regime permanente. Neste gráfico também pode-se notar que o limitador quando operando com corrente de saturação de 10 A, apresenta uma resposta distorcida em relação as demais.

Figura 34 – Tensões sobre o limitador em regime permanente



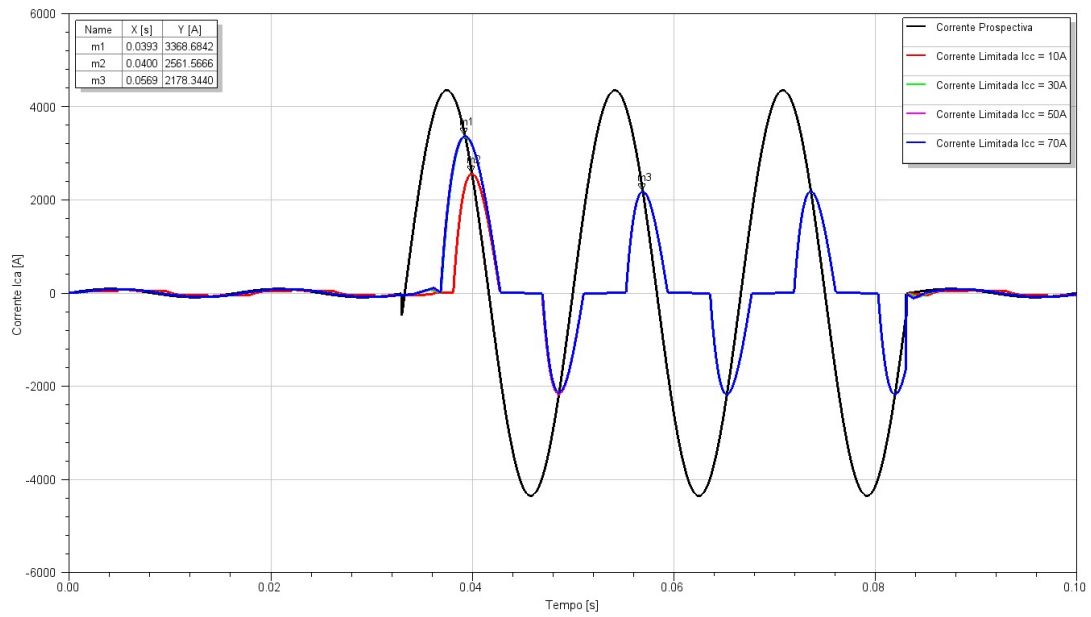
Fonte: Autoria própria (2026)

Assim como realizado nas simulações no *Octave*, no *Maxwell* também foi alterada a profundidade de de 37 mm para 52 mm do núcleo do limitador, para verificar se obtém-se a limitação definida no item 3.1. As figuras 35, 36 e 37, mostram o novo comportamento do circuito após a alteração da profundidade. Observa-se que no primeiro semiciclo positivo de corrente de curto-circuito, houve uma redução do pico da corrente de curto-circuito de 20,6% para as correntes de saturação de 30, 50 e 70 A, e uma redução de 39,6% para a corrente de saturação de 10 A. Nos semiciclos posteriores, a redução da corrente de pico ficou em 48,7%, valor próximo especificado no item 3.1. Pode-se verificar essa redução na figura 35.

Na figura 36, pode-se notar a indutância que cada corrente de magnetização do núcleo causa em regime permanente. Neste gráfico pode-se verificar que a indutância inserida no circuito pelo limitador com corrente de saturação de 30, 50 e 70 A, continuam semelhantes entre si, e a corrente de 10 A, continua com comportamento distinto das demais. Na tabela 8 tem-se os valores de deslocamento de fase, reatância e indutância inseridos no circuito pelo limitador. Na tabela 9 observa-se o módulo das componentes harmônicas para cada corrente de saturação e a distorção harmônica total de corrente inserida.

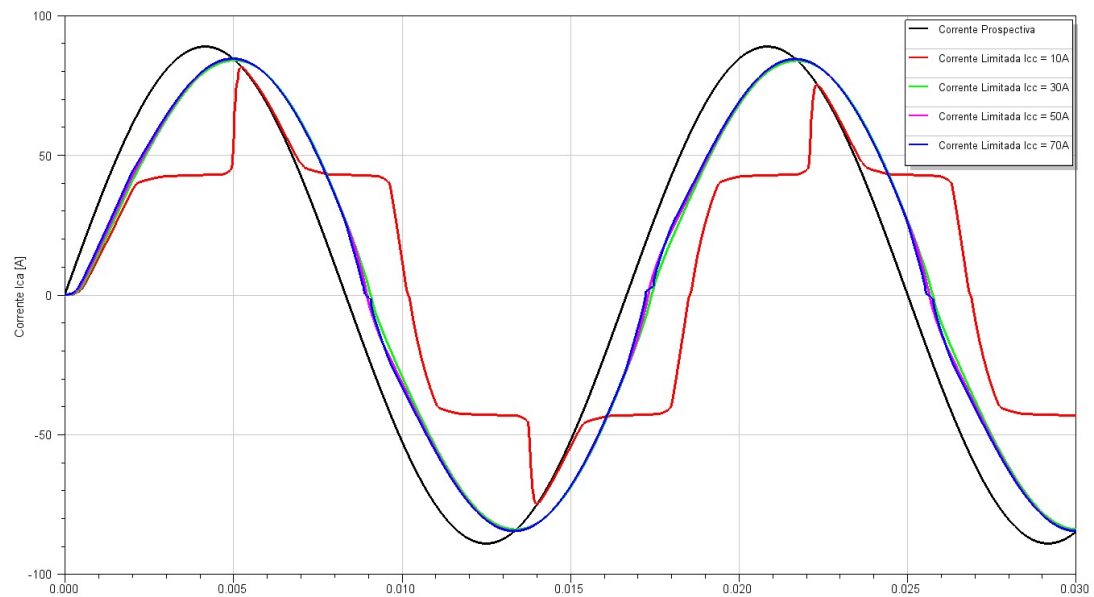
A figura 37, mostra que as tensões sobre o limitador em regime permante aumentaram, isso corrobora o aumento de indutância inserida por cada corrente de saturação do núcleo.

Figura 35 – Correntes de curto-circuito



Fonte: Autoria própria (2026)

Figura 36 – Correntes em regime permanente



Fonte: Autoria própria (2026)

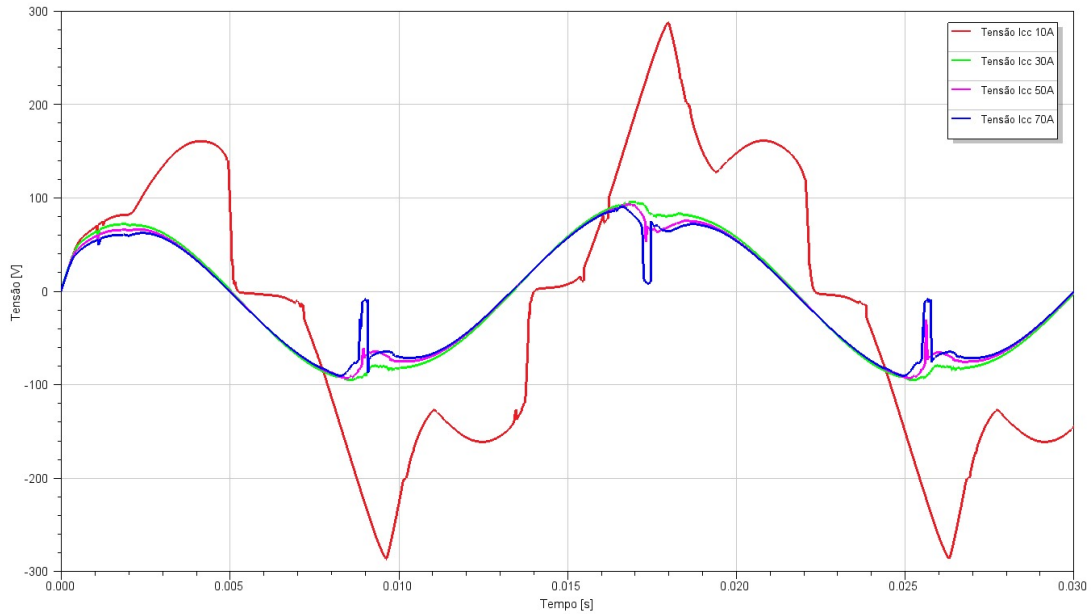
Tabela 8 – Deslocamento de fase, reatância e indutância em regime permanente

Corrente de saturação	Deslocamento de fase	Reatância	Indutância
10 A	-	-	-
30 A	19,44°	1,24 Ω	3,28 mH
50 A	17,71°	1,12 Ω	2,97 mH
70 A	17,71°	1,12 Ω	2,97 mH

Tabela 9 – Componentes harmônicas e distorção harmônica total de corrente

Corrente de saturação	1ª	3ª	5ª	7ª	9ª	11ª	13ª	15ª	THDi
10 A	61,6 A	9,00 A	13,1 A	0,45 A	4,70 A	1,05 A	2,00 A	0,70 A	27,2%
30 A	84,6 A	1,60 A	0,80 A	0,55 A	0,35 A	0,30 A	0,22 A	0,15 A	2,3%
50 A	85,1 A	2,35 A	1,50 A	1,00 A	0,73 A	0,55 A	0,40 A	0,30 A	3,7%
70 A	85,3 A	2,60 A	1,45 A	0,76 A	0,35 A	0,11 A	0,11 A	0,10 A	3,6%

Figura 37 – Tensões sobre o limitador em regime permanente



Fonte: Autoria própria (2026)

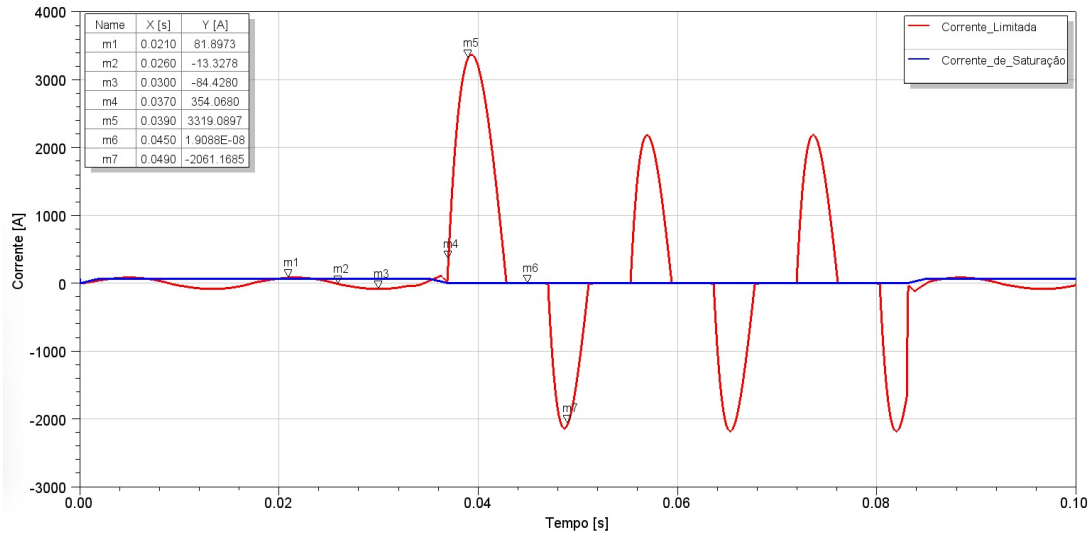
4.2.1 Outros resultados

Através do *software Maxwell*, pode-se analisar outros fenômenos envolvidos na simulação, um deles, a densidade de indução magnética no interior do núcleo, que é de importância significativa, pois permite avaliar o nível de saturação magnética de cada ramo do núcleo ao longo de sua operação. Para essa análise, foi escolhido o caso em que tem-se a profundidade do núcleo ferromagnético de 52 mm e corrente de saturação de 70 A. Traçou-se o perfil de indução magnética $\vec{B}$ para determinados instantes da curva de corrente limitada, esses instantes estão identificados pelos marcadores m1 a m7 na figura 38.

O marcador m1 refere-se a um instante que antecede a falta, onde a corrente em regime permanente está próximo ao seu maior valor positivo. Neste instante pode-se notar na figura 39 que a região central e esquerda do núcleo encontram-se saturadas com uma densidade de indução magnética de aproximadamente 2 T, enquanto o ramo direito apresenta valores abaixo de 0,6 T. Isso deve-se ao fato que o campo magnético produzido pelo enrolamento direito nessa região, se opõe ao campo gerado pelo enrolamento central.

Na figura 40, correspondente ao marcador m2, refere-se a um instante que antecede

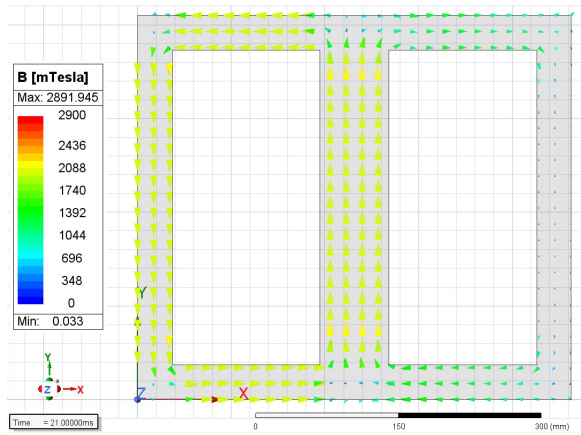
Figura 38 – Corrente limitada e Corrente de saturação do núcleo do LCENS



Fonte: Autoria própria (2026)

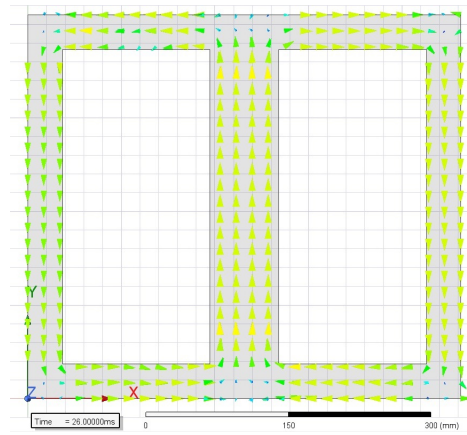
a falta, onde a corrente em regime permanente está próximo a zero. Neste instante pode-se notar que todos os ramos do núcleo encontram-se saturados com uma indução magnética de aproximadamente 2 T . Isso deve-se ao fato que o enrolamento central é o único que está gerando campo magnético no momento.

Figura 39 – Vetor $\vec{B}$ no marcador m1



Fonte: Autoria própria (2026)

Figura 40 – Vetor $\vec{B}$ no marcador m2



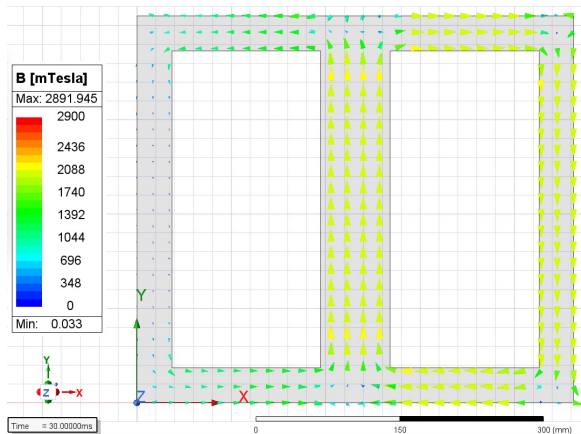
Fonte: Autoria própria (2026)

O marcador m3 refere-se a um instante que antecede a falta, onde a corrente em regime permanente está próximo ao seu maior valor negativo. Neste instante pode-se notar na figura 41 que a região central e direita do núcleo encontram-se saturadas com uma indução magnética de aproximadamente 2 T , enquanto o ramo esquerdo apresenta valores abaixo de $0,6\text{ T}$, isso deve-se ao fato que o campo magnético produzido pelo enrolamento esquerdo nessa região, se opõe ao campo gerado pelo enrolamento central.

As figuras 42 e 43, que correspondem aos marcadores m4 e m5, nos instantes 37 ms e 39 ms respectivamente, já encontram-se na região de ocorrência da falta, nestes instantes

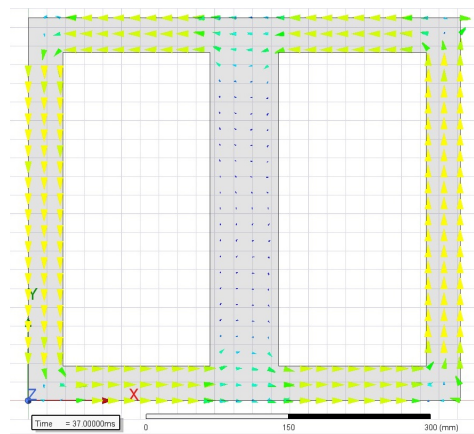
pode-se notar nas figuras que a região central já encontra-se desmagnetizada, pois a corrente de saturação já foi a zero. Os ramos externos são os únicos saturados. No marcador m4 tem-se uma indução magnética de aproximadamente 2 T , devido ao campo magnético gerado pelos enrolamentos esquerdo e direito. No marcador m5 tem-se uma indução magnética de aproximadamente 2 T nos ramos transversais e nos ramos laterais tem-se uma indução de $2,9\text{ T}$ neste instante.

Figura 41 – Vetor $\vec{B}$ no marcador m3



Fonte: Autoria própria (2026)

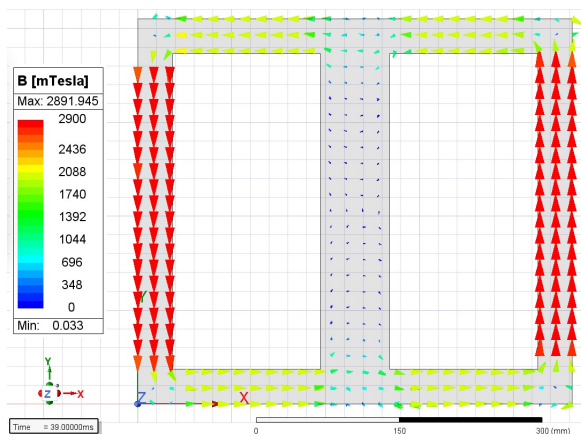
Figura 42 – Vetor $\vec{B}$ no marcador m4



Fonte: Autoria própria (2026)

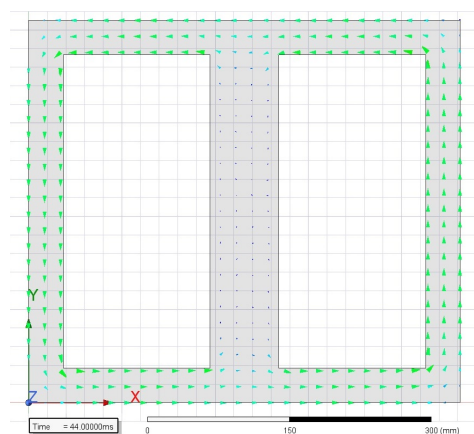
O marcador m6 refere-se ao instante 44 ms , onde a corrente de falta está próximo a zero. Neste instante pode-se notar na figura 44 que o ramo central continua apresentando baixa densidade de indução magnética, porém os ramos externos ainda apresentam densidade próxima de 1 T , como não há correntes produzindo campo magnético essa indução é remanente do núcleo.

Figura 43 – Vetor $\vec{B}$ no marcador m5



Fonte: Autoria própria (2026)

Figura 44 – Vetor $\vec{B}$ no marcador m6

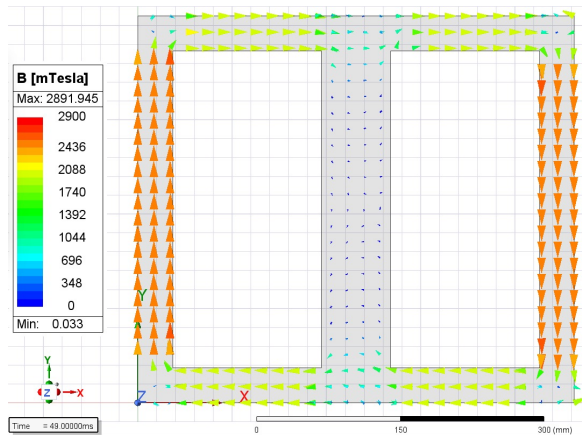


Fonte: Autoria própria (2026)

Na figura 45 que corresponde ao marcador m7, têm-se o primeiro pico negativo de corrente de falta. Neste instante, a densidade de indução magnética nos ramos transversais é de aproximadamente 2 T , enquanto nos ramos laterais temos cerca de $2,4\text{ T}$.

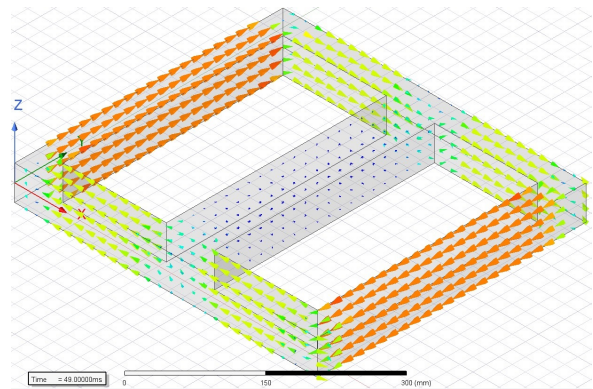
As figuras referentes aos marcadores m1 ao m7, representam o a densidade de indução magnética do núcleo no plano xy , pois dessa forma fica fácil evidenciar a intensidade, direção e sentido de $\vec{B}$, porém essas induções foram obtidas da simulação em três dimensões que foi realizada. A figura 46 mostra uma vista isométrica dos vetores de densidade de indução magnética no interior do núcleo. O instante representado é referente ao marcador m7.

Figura 45 – Vetor $\vec{B}$ no marcador m7



Fonte: Autoria própria (2026)

Figura 46 – Vetor $\vec{B}$ no marcador m7 - 3D



Fonte: Autoria própria (2026)

4.3 COMPARATIVO ENTRE CADA TIPO DE SIMULAÇÃO REALIZADA

Os resultados obtidos por meio das simulações realizadas nos *softwares Octave* e *Maxwell* apresentaram diferenças no comportamento das correntes em regime permanente e em condição de falta. Enquanto as respostas em regime permanente mostraram divergências mais significativas, as correntes de curto-circuito apresentaram resultados semelhantes entre os dois modelos. Nas simulações realizadas no *Octave*, as correntes em regime permanente para os casos de saturação em 30, 50 e 70 A, apresentaram valores de indutância inserida aproximadamente 50% inferiores aos obtidos no *Maxwell*. Além disso, para a corrente de saturação de 10 A, o *Maxwell* previu uma elevada distorção harmônica na corrente de regime permanente, fenômeno que não foi observado no modelo implementado no *Octave*. Essa diferenças entre os resultados deve-se ao fato que o modelo do limitador simulado no *Octave* trata-se de uma tentativa de simplificação do modelo real, oque pode levar a estas imprecisões.

Apesar dessas diferenças quantitativas e qualitativas no regime permanente de operação, ambos os modelos indicaram que o aumento da profundidade do núcleo de 37 mm para 52 mm, elevou significativamente a capacidade de limitação de corrente do dispositivo, produzindo resultados similares entre si e alcançando valores próximos ao objetivo estipulado para os semiciclos posteriores ao primeiro no curto-circuito.

Na tabela 10, pode-se ver um resumo das limitações das correntes de curto-circuito, após o primeiro semiciclo, para cada tipo de simulação realizada. A corrente de magnetização não foi

levada em conta pois após a desmagnetização, o limitador apresenta o mesmo comportamento, independentemente da corrente de saturação inicial.

Tabela 10 – Redução percentual do pico de corrente de curto-circuito

	<i>Octave</i> prof.: 37 mm	<i>Octave</i> prof.: 52 mm	<i>Maxwell</i> prof.: 37 mm	<i>Maxwell</i> prof.: 52 mm
Corrente de Pico	3581 A	2053 A	3271 A	2176 A
Redução Percentual	15,6%	51,6%	22,9%	48,7%

Além da obtenção das formas de onda de corrente e tensão, o *software Maxwell* possibilitou uma análise dos fenômenos eletromagnéticos internos do limitador de corrente, fornecendo informações que não podem ser obtidas diretamente por meio de modelos baseados em circuitos equivalentes. Entre os resultados extraídos, destacam-se a distribuição espacial da densidade de indução magnética, a identificação das regiões saturadas do núcleo e a avaliação da evolução temporal desses fenômenos durante a operação em regime permanente e sob condições de falta. Essas informações permitem compreender com maior profundidade o comportamento físico do dispositivo.

No que se refere aos métodos de simulação empregados, é importante destacar as particularidades de cada ferramenta utilizada neste trabalho. O modelo desenvolvido em *Octave* baseia-se em equações matemáticas concentradas que representam o comportamento eletromagnético do limitador por meio de aproximações analíticas e numéricas. Essa abordagem apresenta como principal vantagem o baixo custo computacional, permitindo a realização de análises paramétricas de forma rápida. Dessa forma, o modelo mostrou-se adequado para a avaliação preliminar da influência de parâmetros geométricos e elétricos sobre o desempenho do dispositivo na ocorrência do curto-circuito.

Por outro lado, as simulações realizadas no *software Maxwell* utilizam o Método dos Elementos Finitos para representar o comportamento eletromagnético do sistema. Essa técnica possibilita uma descrição mais detalhada dos fenômenos físicos envolvidos, considerando a distribuição espacial dos campos magnéticos no interior do núcleo ferromagnético. Consequentemente, efeitos como saturação localizada, exata dispersão de fluxo magnético e não uniformidades na distribuição da densidade de fluxo podem ser avaliados de forma mais precisa, contribuindo para uma representação mais próxima das condições reais de operação.

As diferenças verificadas entre os resultados obtidos nas duas plataformas podem ser atribuídas às simplificações inerentes ao modelo matemático. Enquanto o modelo implementado no *Octave* considera circuitos magnéticos equivalentes e relutâncias concentradas, o modelo de elementos finitos resolve numericamente o comportamento do campo magnético em toda a geometria do dispositivo. Dessa forma, fenômenos tridimensionais e efeitos secundários que não são contemplados no modelo simplificado podem influenciar os valores obtidos para indutância, corrente e distorção harmônica.

Embora tenham sido observadas diferenças quantitativas entre os resultados, observou-se que ambos os modelos apresentaram comportamento qualitativamente semelhante em relação ao processo de limitação de corrente de curto-circuito. Em especial, verificou-se a mesma tendência de redução da corrente após a desmagnetização parcial do núcleo ferromagnético, indicando que o modelo matemático desenvolvido é capaz de representar adequadamente os principais mecanismos físicos envolvidos no funcionamento do limitador. Assim, os resultados obtidos demonstram que as duas abordagens possuem caráter complementar, sendo o modelo matemático mais indicado para estudos preliminares e o modelo por elementos finitos mais adequado para validações detalhadas de projeto.

4.4 COMPARATIVO ENTRE A TOPOLOGIA DE NÚCLEO ÚNICO E SEPARADO

Apesar das diferenças nas condições de simulação adotadas, é possível identificar pontos de convergência e divergência entre os resultados obtidos no presente trabalho e aqueles apresentados por Fajoni (2015). Considerando exclusivamente as simulações realizadas no *Maxwell*, observa-se que, em ambos os estudos, a condição de corrente de saturação de 10 A resultou em níveis de distorção harmônica significativamente superiores aos verificados para as demais correntes de saturação, evidenciando a forte influência da saturação magnética sobre o comportamento da corrente em regime permanente.

Outra semelhança observada refere-se ao comportamento da corrente durante a ocorrência da falta. Em ambos os trabalhos, a corrente limitada apresentou seu maior valor de pico no primeiro semiciclo após a aplicação do curto-circuito, seguido por picos de menor amplitude nos semiciclos subsequentes. Esse comportamento está associado ao processo de desmagnetização do núcleo e ao consequente aumento da impedância inserida pelo limitador após a ocorrência da falta. Como principal diferença entre os resultados, destaca-se que, no presente trabalho, níveis de limitação da corrente de curto-circuito próximos de 50% somente foram alcançados após o aumento da profundidade do núcleo ferromagnético, de 37 mm para 52 mm. Tal modificação elevou a área da seção transversal do núcleo, permitindo maior capacidade de armazenamento de fluxo magnético e resultando em um desempenho mais próximo ao obtido por Fajoni (2015).

Adicionalmente, verificou-se que o desempenho do limitador está diretamente relacionado às dimensões geométricas do núcleo ferromagnético. O aumento da profundidade do núcleo resultou em maiores níveis de limitação da corrente de curto-circuito, evidenciando que a capacidade de armazenamento e condução do fluxo magnético exerce influência significativa sobre o comportamento do dispositivo. Entretanto, observou-se também que o aumento das dimensões do núcleo pode elevar a indutância apresentada pelo limitador durante a operação normal, estabelecendo um compromisso entre capacidade de limitação de corrente e impacto

sobre as condições permanentes do sistema elétrico.

Dessa forma, os resultados obtidos indicam que a configuração de núcleo único constitui uma alternativa tecnicamente viável às topologias convencionais encontradas na literatura. Embora estudos adicionais sejam necessários para avaliar aspectos construtivos, térmicos e econômicos, a proposta apresentou comportamento compatível com os princípios físicos esperados para limitadores de corrente de núcleo saturado, demonstrando potencial para aplicações futuras em sistemas elétricos de potência.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O crescimento contínuo dos sistemas elétricos de potência e o consequente aumento dos níveis de curto-circuito tornam cada vez mais relevante o desenvolvimento de tecnologias capazes de mitigar os efeitos das correntes de falta. Nesse contexto, os limitadores de corrente elétrica de núcleo saturado apresentam-se como uma alternativa promissora, pois combinam baixa impedância durante a operação normal com elevada capacidade de limitação em situações de curto-circuito. Diante desse cenário, este trabalho teve como objetivo propor e avaliar uma variação conceitual de um limitador de corrente elétrica de núcleo saturado monofásico, utilizando uma configuração de núcleo único e corrente contínua para saturação magnética.

Para atingir os objetivos propostos, foi realizado inicialmente um estudo dos fundamentos teóricos relacionados à indutância, saturação magnética, circuitos magnéticos, métodos numéricos e tecnologias de limitação de corrente elétrica. A revisão bibliográfica permitiu compreender os diferentes princípios de funcionamento empregados nos limitadores existentes, bem como identificar as vantagens e limitações das topologias de núcleo saturado já descritas na literatura. A partir desse embasamento, foi desenvolvida uma metodologia de projeto baseada em modelagem matemática aproximada e posteriormente validada por meio de simulações computacionais.

O modelo proposto utilizou como referência o trabalho desenvolvido por Fajoni (2015), porém introduziu modificações relevantes na estrutura magnética do dispositivo, especialmente pela adoção de um núcleo ferromagnético único em substituição à configuração tradicional com núcleo separado. Além disso, foi empregado o aço elétrico de grão orientado H110-27 como material magnético, sendo suas características de permeabilidade e saturação incorporadas ao modelo matemático desenvolvido. A formulação do problema envolveu a aplicação da Lei de Biot-Savart, da analogia entre circuitos elétricos e magnéticos, da Lei de Kirchhoff das Tensões e de métodos numéricos para solução das equações diferenciais e não lineares resultantes.

Os resultados obtidos demonstraram que a topologia proposta é capaz de realizar a limitação das correntes de curto-circuito, comprovando a viabilidade conceitual do dispositivo. Nas simulações iniciais, utilizando as mesmas dimensões adotadas por Fajoni (2015), observou-se uma redução relativamente modesta das correntes de falta. Entretanto, a partir da alteração da profundidade do núcleo ferromagnético, aumentando sua área transversal em aproximadamente 40%, foi possível alcançar níveis significativamente superiores de limitação. Os resultados indicaram reduções próximas de 50% nas correntes de pico após o primeiro semiciclo de curto-circuito, aproximando-se da meta de desempenho estabelecida para o projeto.

As simulações realizadas no software *Octave* permitiram avaliar rapidamente o comportamento global do sistema, possibilitando a variação de parâmetros e a análise da influência

das correntes de magnetização sobre a indutância inserida em regime permanente. Verificou-se que correntes de saturação mais elevadas reduzem a impedância introduzida pelo limitador durante a operação normal, minimizando quedas de tensão e distorções harmônicas. Por outro lado, correntes de saturação insuficientes, como no caso de 10 A, provocaram aumento expressivo da distorção harmônica da corrente, indicando uma saturação inadequada do núcleo magnético.

As simulações por elementos finitos realizadas no *Ansys Maxwell* complementaram as análises ao fornecer uma representação mais detalhada dos fenômenos eletromagnéticos envolvidos. Além das formas de onda de tensão e corrente, foi possível visualizar a distribuição espacial da densidade de fluxo magnético no interior do núcleo, permitindo compreender o processo de saturação, desmagnetização e redistribuição dos fluxos durante a ocorrência da falta. Essas informações contribuíram para validar qualitativamente os mecanismos físicos considerados no modelo matemático e forneceram uma visão mais aprofundada do funcionamento do dispositivo.

A comparação entre os resultados obtidos nos dois ambientes de simulação revelou diferenças quantitativas em regime permanente, especialmente nos valores de indutância equivalente e na previsão das distorções harmônicas. Contudo, em relação à capacidade de limitação de corrente, ambos os modelos apresentaram tendências semelhantes e resultados compatíveis, indicando que o modelo matemático desenvolvido é adequado para análises preliminares. Ao mesmo tempo, os resultados evidenciam a importância do emprego de ferramentas de elementos finitos quando se busca maior precisão na representação dos fenômenos magnéticos não lineares.

Quando comparada à topologia de referência apresentada por Fajoni (2015), a configuração de núcleo único proposta neste trabalho apresentou comportamento coerente com os princípios físicos esperados para limitadores de corrente de núcleo saturado. Foram observadas semelhanças importantes, como a influência da corrente de magnetização sobre a distorção harmônica e o comportamento transitório da corrente durante a desmagnetização do núcleo após a ocorrência da falta. Embora as condições de simulação não permitam uma comparação direta dos valores absolutos de desempenho, os resultados indicam que a nova configuração possui potencial para aplicações futuras e merece investigação adicional.

Por fim, conclui-se que os objetivos estabelecidos para este trabalho foram alcançados. Foi possível desenvolver uma nova proposta de topologia para um limitador de corrente elétrica de núcleo saturado monofásico, implementar um modelo matemático representativo, realizar simulações computacionais e avaliar o desempenho do dispositivo em diferentes condições de operação. Como trabalhos futuros, recomenda-se a construção de um protótipo experimental para validação prática dos resultados obtidos, o refinamento do modelo matemático para melhor representação das não linearidades magnéticas, a investigação de diferentes materiais ferromagnéticos e geometrias construtivas, a ampliação dos estudos para sistemas trifásicos, aplicações

em níveis de potência mais elevados e simulações contemplando cargas indutivas e capacitivas. Tais desenvolvimentos poderão contribuir para a consolidação desta tecnologia como uma alternativa viável para a mitigação dos elevados níveis de curto-circuito presentes nos sistemas elétricos modernos.

REFERÊNCIAS

- Aperan. **Aços Elétricos de Grão Orientado Ficha Técnica**. [S.l.], 2025. Disponível em: <https://www.aperam.com/sites/default/files/documents/GO_PerformanceCurves.pdf>. Acesso em: 14 de Mar. 2025.
- Avila, S. L. **Cálculo Numérico aplicado á Engenharia Elétrica com Matlab, Primeira edição**. IFSC, 2019. Disponível em: <https://GITHUB.COM/PECCE-IFSC/CALCULO_NUMERICO_MATLAB>.
- Barroso, L. C. **Cálculo Numérico (com aplicações), Segunda edição**. [S.l.]: HARBRA, 1987.
- Bastos, J. P. A. **Eletromagnetismo para Engenharia: Estática e Quase-Estática**. 1. ed. [S.l.]: Editora da UFSC, 2004. 396 p.
- Bitencourt, A. *et al.* Análise técnica e operacional de limitadores de correntes de curto circuito. **Revista Eletrônica de Potência**, 2020.
- Das, S. *et al.* Transient modeling and performance analysis of a passive magnetic fault current limiter considering ja hysteresis model. **Electric Power Components and Systems**, Taylor & Francis, v. 47, n. 4-5, p. 396–405, 2019.
- Fajoni, F. C. **Estudos, desenvolvimento e construção de um limitador de correntes elétricas com núcleo magnético saturado**. Tese (Doutorado) — UNICAMP, 2015.
- Goldman, A. **Handbook of Modern Ferromagnetic Materials**. 1. ed. [S.l.]: Springer US, 1999. (The Springer International Series in Engineering and Computer Science 505).
- Halliday, D.; Resnick, R.; Walker, J. **Fundamentos de Física, volume 3: eletromagnetismo**. [S.l.]: Jearl Walker: tradução e revisão técnica Ronaldo Sérgio de Biasi. Rio de Janeiro: LTC, 2009. 395 p.
- Jiles, D. **Introduction to Magnetism and Magnetic Materials**. 3. ed. [S.l.]: CRC Press, 2015.
- Lima, M. C. de. **Ensaio de magnetização e curto-circuito em um protótipo de Limitador de Corrente de Núcleo Saturado**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal Fluminense, 2021.
- McLyman, C. W. T. **Transformer and Inductor Design Handbook, Fourth Edition**. 4. ed. [S.l.]: CRC Press, 2011. (Electrical and Computer Engineering).
- Nilsson, J. W. **Circuitos Elétricos**. 10ª ed. ed. [S.l.]: Pearson, 2015.
- Nussenzveig, H. M. **Curso de Física básica**. Blücher, 2015. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521208020/>>. Acesso em: 22 de Out. 2025.
- PDE2035: Plano decenal de expansão de energia 2035. Brasília: EPE, 2025. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2035>>. Acesso em: 21 Jun. 2026.

Rocha, M. M. O. **Modelo para Simulação de Limitador de Curto-Circuito de Núcleo Saturado**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal Fluminense, 2022.

Roters, H. C. **ELECTROMAGNETIC DEVICES**. [S.l.]: John Wiley Sons. INC., 1941.

Sadiku, C. K. A. M. N. O. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. [S.l.]: MC Graw Hill, 2013. 874 p.

Tavares, T. V. **Otimização de um reator com núcleo de ar para limitadores de corrente de curto circuito do tipo série chaveado**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal Fluminense, 2022.

VALCHEV, A. V. d. B. V. C. **Inductors and Transformers for Power Electronics**. 1. ed. [S.l.]: CRC Press, 2005.

APÊNDICE A – CÓDIGO PARA SIMULAÇÃO DO LIMITADOR IMPLEMENTADO NO OCTAVE

```
clc;
clear;
close all;

% Constantes

mi_0 = (4*pi*1e-7);

% parâmetros de cálculo

erro_GS = 0.0001;
inicio_do_curto = 0.0333;
fim_do_curto = 0.0833;

% Parâmetros construtivos do limitador

Ncc = 300;
Nca = 70;
lc = 0.373;
l = 0.7984;
ee = 0.037;
A = (ee^2);

lw = 0.410 - 2*ee;

ll = 0.373;
lt = 0.4254;

R_ar_l = (1.22)/(mi_0*0.322*ee*4);
R_ar_t = (1.22)/(mi_0*0.322*ee*3);
```

```

%caracterização do material ferromagnético

a6 = 0;
a5 = 0;
a4 = -0.8669965525;
a3 = 42.69108532;
a2 = -671.2680422;
a1 = 5814.479156;
a0 = 5789.087258;

% Parâmetros do circuito de detecção

delay = 0.002;

counter = 0;
while counter < 4

    % Condições Iniciais

    Ica = 0;
    if counter == 0
        Icc_inicial = 10
    elseif counter == 1
        Icc_inicial = 30
    elseif counter == 2
        Icc_inicial = 50
    elseif counter == 3
        Icc_inicial = 70
    end

    Hc = ((Ncc*Icc_inicial)/(2*pi*lw))*2.87*2;
    Hd = ((Ncc*Icc_inicial)/(2*pi*lw))*(2*(0.75-0.64));
    He = ((Ncc*Icc_inicial)/(2*pi*lw))*(2*(0.75-0.64));
    Ht = ((Ncc*Icc_inicial)/(2*pi*lw))*((log(cos(0)) -
    ↪ log(cos(1.32))) - (log(cos(0)) - log(cos(1.2))));

```

```

if Hc >30
    mi_c = ((10^6)*(Hc^(-0.948)))*mi_0;
else
    mi_c = (0*Hc^6 + 0.0061*Hc^5 + (-0.7097)*Hc^4 +
    ↪ 28.644*Hc^3 + (-508.04)*Hc^2 + 5012.2*Hc +
    ↪ 0)*mi_0;
end

if Hd >30
    mi_d = ((10^6)*(Hd^(-0.948)))*mi_0;
else
    mi_d = (0*Hd^6 + 0.0061*Hd^5 + (-0.7097)*Hd^4 +
    ↪ 28.644*Hd^3 + (-508.04)*Hd^2 + 5012.2*Hd +
    ↪ 0)*mi_0;
end

if He >30
    mi_e = ((10^6)*(He^(-0.948)))*mi_0;
else
    mi_e = (0*He^6 + 0.0061*He^5 + (-0.7097)*He^4 +
    ↪ 28.644*He^3 + (-508.04)*He^2 + 5012.2*He +
    ↪ 0)*mi_0;
end

if Ht >30
    mi_t = ((10^6)*(Ht^(-0.948)))*mi_0;
else
    mi_t = (0*Ht^6 + 0.0061*Ht^5 + (-0.7097)*Ht^4 +
    ↪ 28.644*Ht^3 + (-508.04)*Ht^2 + 5012.2*Ht +
    ↪ 0)*mi_0;
end

% Parâmetros do circuito
R = 3.5; % resistência em ohms em operação
R_curto = 0.073; % resistência em ohms em curto
L_inicial = ((Nca*2)^2)/((lw/(mi_d*(A)))+(lw/(mi_e*(A)))) +
    ↪ 4*(0.2/(mi_t*(A))); % indutância do limitador (CA)
R_desmag = ee * 6 * Ncc * 0.000815; %fio AWG4
R_shunt = 2; %resistência que dissipa energia armazenada no
    ↪ campo magnético central

```

```

Lcc = (Ncc^2)/((1/(mi_c * 2 * A))+(lc/(mi_d * 2 * A)));
↳ %Indutância da bobina CC
tau_L = Lcc/(R_desmag + R_shunt); %constante de tempo de
↳ descarregamento da bobina CC
Vp = 311; % tensão de pico da fonte em volts
f = 60; % frequência da rede em Hz
omega = 2*pi*f; % frequência angular

% Função de tensão senoidal
V = @(t) Vp * sin(omega * t);

% Função da EDO: di/dt = (V(t) - R*i)/L
f_edo = @(t, Ica, R, L) (V(t) - R*Ica)/L;

% Parâmetros de integração
t0 = 0; % tempo inicial
tf = 0.2; % tempo final em segundos (aprox. 5 ciclos)
h = 1e-5; % passo de integração (pequeno para alta
↳ frequência)
N = (tf - t0)/h; % número de passos

% Inicialização dos vetores
t = zeros(1, N+1);
Ica = zeros(1, N+1);
if counter == 0
    Ica_prospectiva = zeros(1, N+1);
end
Icc = zeros(1, N+1);
Hd = zeros(1, N+1);
He = zeros(1, N+1);
Hc = zeros(1, N+1);
Ht = zeros(1, N+1);
L = zeros(1, N+1);
R = zeros(1, N+1);
V_limitador = zeros(1, N+1);
V_in = zeros(1, N+1);

t(1) = t0;
Ica(1) = 0;

```

```

L(1) = L_inicial;
R(1) = 3.5;

%Gauss Seidel

count = 0;

for n = 1:N

    R_ferro_e = ll/(mi_e * A);
    R_ferro_d = ll/(mi_d * A);
    R_ferro_t = lt/(mi_t * A);

    P_e = (R_ferro_e^(-1) + R_ar_l^(-1))^(-1);
    P_d = (R_ferro_d^(-1) + R_ar_l^(-1))^(-1);
    P_t = (R_ferro_t^(-1) + R_ar_t^(-1))^(-1);

    R_geral_d = ((2*P_t + P_d)^(-1) + (R_ar_l)^(-1))^(-1) +
        ⇨ R_ferro_e;
    R_geral_e = ((2*P_t + P_e)^(-1) + (R_ar_l)^(-1))^(-1) +
        ⇨ R_ferro_d;

    L(n) = ((Nca*2)^2)/(((R_geral_d)^(-1) +
        ⇨ (R_geral_e)^(-1))^(-1));

    %curto circuito

    if t(n) > inicio_do_curto && t(n) < fim_do_curto
        R(n) = R_curto;
    else
        R(n) = 3.5;
    end

    if t(n) < (inicio_do_curto + delay)
        Icc(n) = Icc_inicial;
    else
        if t(n) < (fim_do_curto + delay)
            %%Icc(n) = Icc_inicial * e^(-(t(n)-(inicio_do_curto
            ⇨ + delay))/tau_L);
            Icc(n) = 0;
        end
    end
end

```

```

else
    %% Icc_recuperacao = Icc(n-1);
    %%Icc(n) = Icc_inicial - ((Icc_inicial -
    ↪ Icc_recuperacao) * (e^(-(t(n)-(fim_do_curto +
    ↪ delay)))/tau_L));
    Icc(n) = Icc_inicial;
end
end

%Corrente prospectiva

Ica_prospectiva(n) = V(t(n))/R(n);

%Tensão sobre o Limitador

if counter == 0
    V_in (n) = V(t(n));
endif

V_limitador(n) = V(t(n)) - Ica(n) * R(n);

%RK4

k1 = f_edo(t(n), Ica(n), R(n), L(n));
k2 = f_edo(t(n) + h/2, Ica(n) + h/2 * k1,R(n) , L(n));
k3 = f_edo(t(n) + h/2, Ica(n) + h/2 * k2,R(n) , L(n));
k4 = f_edo(t(n) + h, Ica(n) + h * k3,R(n) , L(n));

Ica(n+1) = Ica(n) + (h/6)*(k1 + 2*k2 + 2*k3 + k4);
t(n+1) = t(n) + h;
n;
Ica(n);

if t(n) > 0.018 && Ica(n+1) > Ica(n) && t(n+1) < 0.028
    I_max_reg = Ica(n+1);
    t_I_max_reg = t(n+1);
end

%Gauss Seidel

errol = 1;

```

```

erro2 = 1;
erro3 = 1;

p = abs(k2-k3)/abs(k1-k2); % verifica se o passo deve ser
↪ reduzido para reduzir o erro de truncamento

if p > 100
    break;
    mi_0
end

count++;

% calculo de novos valores de campo H

Hd(n) = (((Ncc*Icc(n))/(2*pi*lw))*(2*(0.75-0.64))) -
↪ (((Nca*Ica(n))/(2*pi*lw))*3*2) -
↪ (((Nca*Ica(n))/(2*pi*lw))*(2*(0.4-0.38))));

if Hd(n)>0
    if Hd(n)>30
        mi_d = ((78516.76178)/Hd(n))*mi_0;
    else
        mi_d = (a6*Hd(n)^6 + a5*Hd(n)^5 + a4*Hd(n)^4 +
↪ a3*Hd(n)^3 + a2*Hd(n)^2 + a1*Hd(n)+
↪ a0)*mi_0;
    end
else
    if Hd(n)<-30
        mi_d = ((78516.76178)/-Hd(n))*mi_0;
    else
        mi_d = (a6*Hd(n)^6 + a5*(-Hd(n))^5 + a4*Hd(n)^4
↪ + a3*(-Hd(n))^3 + a2*Hd(n)^2 + a1*(-Hd(n))+
↪ a0)*mi_0;
    end
end
end

```

```

He(n) = (((Ncc*Icc(n))/(2*pi*lw))*(2*(0.75-0.64))) +
↪ ((Nca*Ica(n))/(2*pi*lw))*3*2) +
↪ (((Nca*Ica(n))/(2*pi*lw))*(2*(0.4-0.38))));

if He(n)>0
    if He(n)>30
        mi_e = ((78516.76178)/He(n))*mi_0;
    else
        mi_e = (a6*He(n)^6 + a5*He(n)^5 + a4*He(n)^4 +
↪ a3*He(n)^3 + a2*He(n)^2 + a1*He(n)+
↪ a0)*mi_0;
    end
else
    if He(n)<-30
        mi_e = ((78516.76178)/-He(n))*mi_0;
    else
        mi_e = (a6*He(n)^6 + a5*(-He(n))^5 + a4*He(n)^4
↪ + a3*(-He(n))^3 + a2*He(n)^2 + a1*(-He(n))+
↪ a0)*mi_0;
    end
end

Hc(n) = (((Nca*Ica(n))/(2*pi*lw))*(2*(0.72-0.66))) +
↪ (((Ncc*Icc(n))/(2*pi*lw))*3*2) -
↪ (((Nca*Ica(n))/(2*pi*lw))*(2*((0.72-0.66)))));

if Hc(n)>0
    if Hc(n)>30
        mi_c = ((78516.76178)/Hc(n))*mi_0;
    else
        mi_c = (a6*Hc(n)^6 + a5*Hc(n)^5 + a4*Hc(n)^4 +
↪ a3*Hc(n)^3 + a2*Hc(n)^2 + a1*Hc(n)+
↪ a0)*mi_0;
    end
else
    if Hc(n)<-30
        mi_c = ((78516.76178)/-Hc(n))*mi_0;
    else
        mi_c = (a6*Hc(n)^6 + a5*(-Hc(n))^5 + a4*Hc(n)^4
↪ + a3*(-Hc(n))^3 + a2*Hc(n)^2 + a1*(-Hc(n))+
↪ a0)*mi_0;
    end
end

```

```

        end
    end

    Ht(n) = (((Ncc*Icc(n))/(2*pi*lw))*((log(cos(0)) -
    ↪ log(cos(1.32))) - (log(cos(0)) - log(cos(1.2)))) -
    ↪ ((Nca*Ica(n))/(2*pi*lw))*((log(cos(0)) -
    ↪ log(cos(1.32))) - (log(cos(0)) - log(cos(1.26)))) -
    ↪ ((Nca*Ica(n))/(2*pi*lw))*((log(cos(0)) -
    ↪ log(cos(0.84))) - (log(cos(0)) - log(cos(0.8)))));

    if Ht(n)>0
        if Ht(n)>30
            mi_t = ((78516.76178)/Ht(n))*mi_0;
        else
            mi_t = (a6*Ht(n)^6 + a5*Ht(n)^5 + a4*Ht(n)^4 +
            ↪ a3*Ht(n)^3 + a2*Ht(n)^2 + a1*Ht(n) +
            ↪ a0)*mi_0;
        end
    else
        if Ht(n)<-30
            mi_t = ((78516.76178)/-Ht(n))*mi_0;
        else
            mi_t = (a6*Ht(n)^6 + a5*(-Ht(n))^5 + a4*Ht(n)^4
            ↪ + a3*(-Ht(n))^3 + a2*Ht(n)^2 + a1*(-Ht(n)) +
            ↪ a0)*mi_0;
        end
    end
end

end

if counter == 0
    Ica_0 = Ica;
    I_max_reg_10A = I_max_reg;
    t_I_max_reg_10A = t_I_max_reg;
    Icc_0 = Icc;
elseif counter == 1
    Ica_1 = Ica;
    I_max_reg_30A = I_max_reg;

```

```

t_I_max_reg_30A = t_I_max_reg;
Icc_1 = Icc;
    elseif counter == 2
        Ica_2 = Ica;
        I_max_reg_50A = I_max_reg;
        t_I_max_reg_50A = t_I_max_reg;
        Icc_2 = Icc;
        elseif counter == 3
            Ica_3 = Ica;
            I_max_reg_70A = I_max_reg;
            t_I_max_reg_70A = t_I_max_reg;
            Icc_3 = Icc;
        end

    if counter == 0
        V_limitador_0 = V_limitador;
    elseif counter == 1
        V_limitador_1 = V_limitador;
    elseif counter == 2
        V_limitador_2 = V_limitador;
    elseif counter == 3
        V_limitador_3 = V_limitador;
    end

    counter = counter + 1
count
end

t_aux = 5/240;
t_aux_1 = 1/240;

I_max_reg_10A
t_I_max_reg_10A
z_0 = Vp/I_max_reg_10A;
teta_0 =(180*(t_I_max_reg_10A-t_aux))/t_aux_1
x_0 = sin(teta_0*(pi/180))*z_0
L_0 = x_0/omega

I_max_reg_30A

```

```

t_I_max_reg_30A
z_1 = Vp/I_max_reg_30A;
teta_1 =(180*(t_I_max_reg_30A-t_aux))/t_aux_1
x_1 = sin(teta_1*(pi/180))*z_1
L_1 = x_1/omega

I_max_reg_50A
t_I_max_reg_50A
z_2 = Vp/I_max_reg_50A;
teta_2 =(180*(t_I_max_reg_50A-t_aux))/t_aux_1
x_2 = sin(teta_2*(pi/180))*z_2
L_2 = x_2/omega

I_max_reg_70A
t_I_max_reg_70A
z_3 = Vp/I_max_reg_70A;
teta_3 =(180*(t_I_max_reg_70A-t_aux))/t_aux_1
x_3 = sin(teta_3*(pi/180))*z_3
L_3 = x_3/omega


%fft

fs = 100000;

%pega apenas valores em regime permanente

n = length(Ica_0); % tamanho do
    ↳ vetor
t2 = t(floor(n/2)+1 : end);
Ica_0_segunda_metade = Ica_0(floor(n/2)+1 : end);
Ica_1_segunda_metade = Ica_1(floor(n/2)+1 : end);
Ica_2_segunda_metade = Ica_2(floor(n/2)+1 : end);
Ica_3_segunda_metade = Ica_3(floor(n/2)+1 : end);

% Cálculo da FFT
ICA_0_fft = abs(fftshift(fft((Ica_0_segunda_metade) /
    ↳ (length(Ica_0_segunda_metade)/2))));

```

```

ICA_1_fft = abs(fftshift(fft((Ica_1_segunda_metade) /
↪ (length(Ica_1_segunda_metade)/2))));
ICA_2_fft = abs(fftshift(fft((Ica_2_segunda_metade) /
↪ (length(Ica_2_segunda_metade)/2))));
ICA_3_fft = abs(fftshift(fft((Ica_3_segunda_metade) /
↪ (length(Ica_3_segunda_metade)/2))));

% Frequências correspondentes
N = length(ICA_0_fft);
freq = (-N/2:N/2-1)*fs/N;

% Plot do espectro exponencial
figure;
hold on;
plot(freq, ICA_0_fft);
xlabel('Frequência (Hz)');
ylabel('Magnitude');
title('Espectro Exponencial Corrente Limitada Icc = 10A');

figure;
hold on;
plot(freq, ICA_1_fft);
xlabel('Frequência (Hz)');
ylabel('Magnitude');
title('Espectro Exponencial Corrente Limitada Icc = 30A');

figure;
hold on;
plot(freq, ICA_2_fft);
xlabel('Frequência (Hz)');
ylabel('Magnitude');
title('Espectro Exponencial Corrente Limitada Icc = 50A');

figure;
hold on;
plot(freq, ICA_3_fft);
xlabel('Frequência (Hz)');
ylabel('Magnitude');
title('Espectro Exponencial Corrente Limitada Icc = 70A');
%
```

```

% Plot da corrente
figure;
hold on;
plot(t(t>=0 & t<=0.1), Ica_prospectiva(t>=0 & t<=0.1), 'k',
     ⇨ 'LineWidth', 1);
plot(t(t>=0 & t<=0.1), Ica_0(t>=0 & t<=0.1), 'r', 'LineWidth', 1);
plot(t(t>=0 & t<=0.1), Ica_1(t>=0 & t<=0.1), 'g', 'LineWidth', 1);
plot(t(t>=0 & t<=0.1), Ica_2(t>=0 & t<=0.1), 'm', 'LineWidth', 1);
plot(t(t>=0 & t<=0.1), Ica_3(t>=0 & t<=0.1), 'b', 'LineWidth', 1);
hold off;
grid on;
xlabel('Tempo [s]');
ylabel('Corrente Ica [A]');
%titulo_1 =title('Correntes de curto circuito');
%set(titulo_1, 'fontsize', 22);
legend('Corrente Prospectiva','Corrente Limitada Icc =
⇨ 10A','Corrente Limitada Icc = 30A','Corrente Limitada Icc =
⇨ 50A','Corrente Limitada Icc = 70A');
set(gca, 'fontsize', 20);

% Plot da corrente (somente regime permanente)
figure;
hold on;
plot(t2, Ica_0_segunda_metade, 'r', 'LineWidth', 1);
plot(t2, Ica_1_segunda_metade, 'g', 'LineWidth', 1);
plot(t2, Ica_2_segunda_metade, 'm', 'LineWidth', 1);
plot(t2, Ica_3_segunda_metade, 'b', 'LineWidth', 1);
hold off;
grid on;
xlabel('Tempo [s]');
ylabel('Corrente Ica [A]');
%titulo_1 =title('Correntes de curto circuito');
%set(titulo_1, 'fontsize', 22);

```

```

legend('Corrente Limitada Icc = 10A','Corrente Limitada Icc =
↪ 30A','Corrente Limitada Icc = 50A','Corrente Limitada Icc =
↪ 70A');
set(gca, 'fontsize', 20);

figure;
hold on;
plot(t(t>=0 & t<=0.03), Ica_prospectiva(t>=0 & t<=0.03), 'k',
↪ 'LineWidth', 1);
plot(t(t>=0 & t<=0.03), Ica_0(t>=0 & t<=0.03), 'r', 'LineWidth',
↪ 1);
plot(t(t>=0 & t<=0.03), Ica_1(t>=0 & t<=0.03), 'g', 'LineWidth',
↪ 1);
plot(t(t>=0 & t<=0.03), Ica_2(t>=0 & t<=0.03), 'm', 'LineWidth',
↪ 1);
plot(t(t>=0 & t<=0.03), Ica_3(t>=0 & t<=0.03), 'b', 'LineWidth',
↪ 1);
hold off;
grid on;
xlabel('Tempo [s]');
ylabel('Corrente Ica [A]');
%titulo_1 =title('Correntes em regime permanente');
%set(titulo_1, 'fontsize', 22);
legend('Corrente Prospectiva','Corrente Limitada Icc =
↪ 10A','Corrente Limitada Icc = 30A','Corrente Limitada Icc =
↪ 50A','Corrente Limitada Icc = 70A');
set(gca, 'fontsize', 20);

figure;
hold on;
plot(t(t>=0 & t<=0.03), V_limitador_0(t>=0 & t<=0.03), 'r',
↪ 'LineWidth', 1);
plot(t(t>=0 & t<=0.03), V_limitador_1(t>=0 & t<=0.03), 'g',
↪ 'LineWidth', 1);
plot(t(t>=0 & t<=0.03), V_limitador_2(t>=0 & t<=0.03), 'm',
↪ 'LineWidth', 1);
plot(t(t>=0 & t<=0.03), V_limitador_3(t>=0 & t<=0.03), 'b',
↪ 'LineWidth', 1);

```

```
hold off;  
grid on;  
xlabel('Tempo [s]');  
ylabel('Tensão [V]');  
%titulo_1 =title('Tensões sobre o limitador em regime  
↪ permanente');  
%set(titulo_1, 'fontsize', 22);  
legend('Tensão Icc = 10A', 'Tensão Icc = 30A', 'Tensão Icc =  
↪ 50A', 'Tensão Icc = 70A');  
set(gca, 'fontsize', 20);
```

Fonte: Autoria própria (2026)