

Modelo para Simulação de Limitador de Curto-Circuito de Núcleo Saturado

Mariana Moraes Oliveira Rocha*. Felipe Sass**
Guilherme Gonçalves Sotelo***

**Universidade Federal Fluminense, Niteroi-RJ
Brasil (e-mail: moraes_oliveira@id.uff.br).*

***Universidade Federal Fluminense, Niteroi-RJ
Brasil (e-mail: felipesass@id.uff.br)*

**** Universidade Federal Fluminense, Niteroi-RJ
Brasil (e-mail: gsotelo@id.uff.br)}*

Abstract: With the advent of new sources of power generation, among them the renewable ones, there has been a significant change in the power grid profile, especially for the distribution sectors. Thus, substations (SEs) with obsolete equipment find it difficult to meet the growing and diversified demands for energy, and a reflection of this problem is the significant increase in the levels of short-circuit currents. The short-circuit current limiter (SCCL) appears in this scenario as a protection equipment that can help, along with other components, in limiting the short circuit and minimize this problem. Among the several existing SCCL topologies, there is the saturated core current limiter (SCCL-SC) with its operation based on the dynamic characteristics of the ferromagnetic materials that compose its cores. This paper describes the extension of a single-phase modeling, in MATLAB software, of the LCCC-NS to simulations on three-phase electrical networks. The results prove the influence of the DC magnetic flux in the initial instants of a single-phase short circuit, due to the approximations considered for the three-phase model. However, when compared with measurements performed in the laboratory, the three types of DC current tested in the three-phase model of the limiter responded satisfactorily in the moments after the short circuit.

Resumo: Com o advento de novas fontes de geração de energia elétrica, dentre elas as renováveis, houve uma significativa mudança no perfil da rede, principalmente, para os setores de distribuição. Dessa forma, subestações (SEs) com equipamentos obsoletos encontram dificuldades para atenderem as demandas crescentes e diversificadas por energia, e um reflexo desse problema está no aumento significativo dos níveis das correntes de curto-circuito. O limitador de corrente de curto-circuito (LCCC) surge nesse cenário como um equipamento de proteção que pode auxiliar, junto a outros componentes, na limitação do curto e minimizar esse problema. Dentre as diversas topologias de LCCCs existentes, encontra-se o limitador de corrente de núcleo saturado (LCCC-NS) com seu funcionamento baseado nas características dinâmicas dos materiais ferromagnéticos que compõem seus núcleos. O presente trabalho descreve a extensão de uma modelagem monofásica, no software MATLAB, do LCCC-NS para simulações em redes elétricas trifásicas. Os resultados comprovam a influência do fluxo magnético CC nos instantes iniciais de um curto-circuito monofásico, devido às aproximações consideradas para o modelo trifásico. Todavia, quando comparados com as medições realizadas em laboratório, os três tipos de corrente CC testados no modelo trifásico do limitador responderam satisfatoriamente nos instantes posteriores ao curto-circuito.

Keywords: Short-circuit; ferromagnetic core; saturation; current limiter; simulation.

Palavras-chaves: Curto-circuito; núcleo ferromagnético; saturação; limitadores de corrente; simulação.

1. INTRODUÇÃO

A demanda por energia elétrica tem se tornado cada vez maior nos últimos anos. Segundo previsões do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), para o final de 2024 estima-se que a capacidade instalada do sistema interligado nacional (SIN) totalizará 177,4 GW, sendo que desse montante 24,9 GW serão de usinas eólicas e fotovoltaicas (ONS, 2020).

Diante desse cenário de incremento de novas fontes de energia elétrica e da micro e minigeração distribuída, principalmente nos setores de distribuição de energia, surge o problema da elevação dos níveis da corrente de curto-circuito. Sistemas de subtransmissão, 138 kV, e com valores de tensão iguais ou inferiores a 69 kV são os que mais evidenciam os efeitos nocivos das correntes de curto-circuito em suas instalações, uma vez que, a injeção de energia em níveis menores de tensão, para uma mesma potência, resultará em correntes mais elevadas, o que não seria tão relevante em configurações de rede com tensões superiores a 230 kV, por exemplo (EPE, 2017). Dessa forma, equipamentos mais antigos de subestações (SEs) ficam vulneráveis e as suas capacidades de atuação e eliminação de corrente de defeito, outrora satisfatórias, tornam-se insuficientes, logo, há superação e queima de diversos componentes de proteção.

Neste contexto e mediante aos elevados custos que são gerados pelas substituições dos equipamentos superados, além da perda de confiabilidade perante a necessidade de desligamentos na rede, os limitadores de curto-circuito (LCCCs) surgem como alternativas econômicas e eficazes para a mitigação das correntes de falha, de forma que em regime normal de operação apresentam impedância nula e, quando sob condições de curto-circuito, uma alta impedância que permite a limitação dessas correntes que podem danificar os equipamentos da rede. Dentre as diversas topologias de limitadores, tem-se o Limitador de Corrente de Curto-Circuito de Núcleo Saturado (LCCC-NS), o qual através das características ferromagnéticas de seus núcleos permite a limitação das correntes de falha e a manutenção da integridade operativa dos equipamentos de uma instalação (Santos, 2021).

Mediante ao advento da tecnologia de limitadores de curto-circuito e sua implantação em diversas topologias de redes, o conhecimento prévio do comportamento desses equipamentos em ferramentas de simulação faz-se necessário, uma vez que aspectos relacionados à instalação, desempenho da rede e dos sistemas de proteção frente a instalação do LCCC precisam ser claramente previstos e identificados ainda na fase preliminar de estudos e planejamento (ONS, 2014).

Para tal, uma modelagem robusta (que alie a maior parte das características físicas dos componentes do limitador) mediante a cenários de curto-circuito pode trazer respostas importantes ao operador do equipamento ou da SE. O Método de Elementos Finitos (MEF) é um dos diversos exemplos de ferramentas utilizadas na literatura para a análise do LCCC-NS e que fornece dados de modelagem extremamente precisos. Todavia, em associações dessas ferramentas de análise com modelos de rede mais extensos e

complexos, pode ocorrer elevado tempo computacional para simulações (Ferreira, 2014). Neste contexto, este trabalho aborda uma modelagem computacional capaz de prever o comportamento de um LCCC-NS trifásico através de metodologias numéricas descritas por softwares como o MATLAB que representam satisfatoriamente a performance dinâmica do dispositivo.

2. LIMITADOR DE CURTO-CIRCUITO DE NÚCLEO SATURADO

Em linhas gerais, o LCCC-NS tem seu funcionamento baseado na saturação magnética dos seus núcleos ferromagnéticos em dois momentos distintos de operação da rede elétrica, regime normal e sob condições de curto-circuito. Suscintamente, em uma representação monofásica, pode-se dizer que o dispositivo é composto por duas bobinas de corrente alternada (CA) enroladas em direções contrárias em cada núcleo e ligadas em série, formando uma ligação subtrativa. São, em geral, contruídas com um material condutor convencional, como o cobre.

O enrolamento CC, também construído com cobre, é responsável pela saturação dos núcleos onde se encontram as bobinas CA e, como pode ser visto na Fig. 1, é alimentado por uma fonte de corrente que pode ser desconectada no momento do curto a fim de que altas tensões reversas não sejam induzidas nesse enrolamento. Considera-se ainda que, durante o regime normal de operação da rede, o fluxo CC é muito maior que o fluxo CA, e assim, ambos os núcleos CA encontram-se saturados (Santos, 2021).

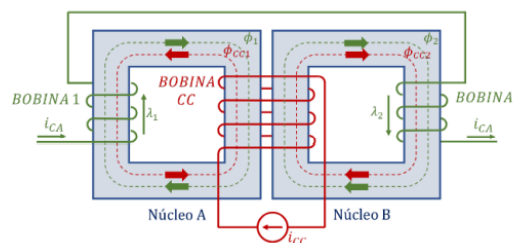


Fig. 1 Ilustração de um LCCC-NS monofásico.

2.1 Detalhes Técnicos e Construtivos

Conforme mostrado na Fig. 2, as janelas do núcleo tem dimensões internas de 160x410 mm e a espessura do núcleo em todos os seus segmentos é de 37 mm (Fajoni, 2015). O dispositivo possui enrolamentos CA formados por uma camada de fios de cobre esmaltado (4 AWG) com 5.2 mm de diâmetro com 70 espiras, permitindo a escolha de tapes para 50 ou 20 espiras. O enrolamento CC foi fabricado com duas camadas de cobre (4 AWG), totalizando uma espessura de 10.4 mm, com 300 espiras (Santos, 2021).

Os LCCC-NS podem ser monofásicos ou trifásicos, sendo permitida, na ligação trifásica, a composição de três módulos monofásicos (Ferreira, 2014).

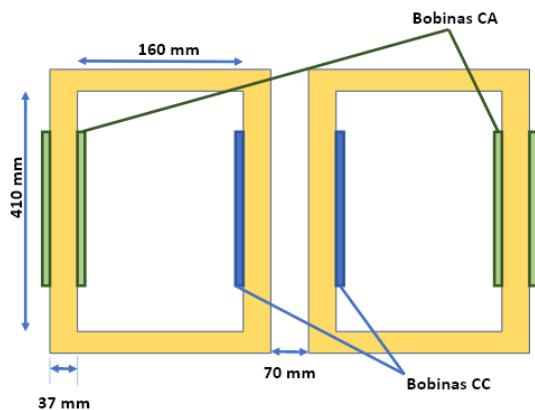


Fig. 2 Dimensões do núcleo do LCCC-NS com identificação das bobinas CA e CC.

O protótipo trifásico encontra-se localizado no Núcleo de Inovação Tecnológica em Engenharia Elétrica (NITEE) da Universidade Federal Fluminense (UFF) e apresenta seis núcleos ferromagnéticos tipo janela, no qual cada fase possui um par de núcleos diametralmente opostos (A-A', B-B' e C-C') e que contêm as bobinas CA conectadas em série (Santos, 2021). A bobina CC encontra-se no centro do dispositivo e englobando as partes centrais das janelas dos três pares de núcleo, conforme mostrado na Fig. 3.

Este protótipo possui tensão nominal de linha igual a 380 V e corrente nominal de 30 A (Santos, 2021). Tem a capacidade de limitação de correntes de curto-circuito acima de 1 kA (Fajoni, 2015).

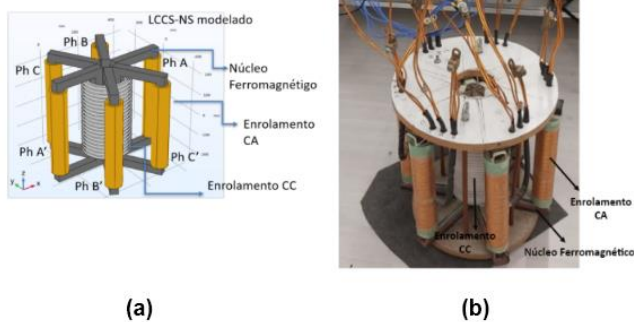


Fig. 3 Protótipo trifásico do LCCC-NS. (a) Modelagem em software; (b) Equipamento em laboratório.

Mediu-se ainda, para este trabalho, as resistências das bobinas, CA e CC, do LCCC-NS com o auxílio do instrumento *Highmed Miliohm*, sendo possível a inserção dessas informações de resistência no modelo de simulação. Os valores de resistência da bobina CA encontram-se especificados na Tabela 1. Ressalta-se que a bobina CC apresentou resistência de 126,8 mΩ.

Tabela 1. Resistências das Bobinas em Cada Fase do LCCC-NS

Fase A (mΩ)	Fase A' (mΩ)	Fase B (mΩ)	Fase B' (mΩ)	Fase C (mΩ)	Fase C' (mΩ)
6,69	6,49	7,0	6,51	6,57	6,48

2.2 Princípio de Funcionamento

Inicialmente, a Fig. 4 apresenta o núcleo ferromagnético A, onde está enrolada a bobina 1, cujo fluxo magnético foi denominado como ϕ_1 , por ter sido produzido por essa bobina. O fluxo enlaçado pela bobina 1 foi chamado de λ_1 e depende do número de espiras N_1 , conforme apresentado em (1).

$$\lambda_1 = N_1 \cdot \Phi_1 \quad (1)$$

Ainda na Fig. 4, um segundo enrolamento com N_{CC} espiras foi inserido no núcleo A com a finalidade de saturá-lo e uma corrente contínua de valor K foi aplicada. O fluxo magnético produzido pela bobina CC (ϕ_{CC}) possui sentido contrário ao de ϕ_1 , reduzindo o valor do fluxo enlaçado nesta bobina (λ_1).

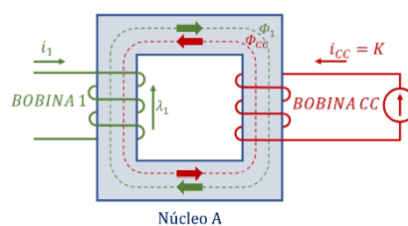


Fig. 4 Bobina 1 enrolada no núcleo ferromagnético A.

Observa-se que a bobina 1 precisa compensar a força magnetomotriz produzida pela bobina CC ($FMM_{CC} = N_{CC}K$) para voltar a apresentar $\lambda_1=0$. Neste novo cenário, a característica magnética da bobina 1 pode ser vista na Fig. 5, o qual se define uma corrente de compensação (i_{comp}), que ao ser aplicada na bobina 1 compensa os efeitos da bobina CC e pode ser calculada de acordo com o raciocínio apresentado em (2) e (3).

$$FMM_1 = FMM_{CC} \quad (2)$$

$$N_1 i_{comp} = N_{CC} K \rightarrow i_{comp} = K \frac{N_{CC}}{N_1} \quad (3)$$

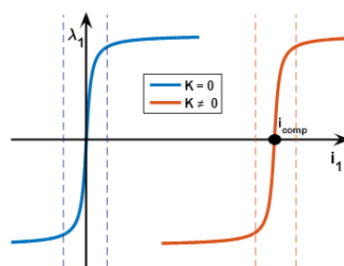


Fig. 5 Característica magnética da bobina 1 do núcleo A com acréscimo da bobina CC.

Para utilização das características magnéticas do LCCC-NS na limitação das correntes de curto, é necessária a avaliação da curva magnética característica do equipamento para diferentes pontos de operação e em dois estados da rede: no regime permanente e no curto-circuito.

A Fig. 6 apresenta os pontos de operação da curva característica magnética da bobina 1. Nesta bobina, a força magnetomotriz do enrolamento CC faz com que ela opere no ponto **A**, quando $i_1=0$; durante o regime permanente, os pequenos valores dessa corrente fazem com que a bobina 1 opere entre os pontos **B** e **C**, portanto, na região saturada que apresenta menor indutância, produzindo uma impedância invisível para a rede. Durante o curto-circuito, observa-se ainda na Fig. 6 que o valor de i_1 aumenta fazendo com que a bobina 1 opere entre os pontos **D** e **E**. Uma vez que o ponto **D** está na região não saturada, apresenta um elevado valor de indutância que será responsável por limitar a corrente de curto-circuito. O ponto **E**, por outro lado, está ainda mais saturado e não contribui para a redução da corrente de curto-circuito.

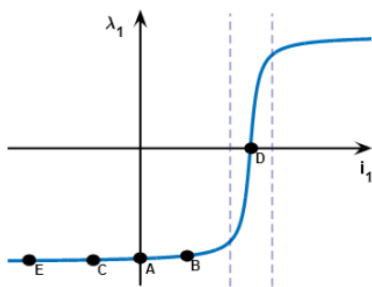


Fig. 6 Pontos de operação da bobina 1 quando utilizada como limitador de corrente.

2.3 Modelo Baseado nas Características Magnéticas

Os limitadores de núcleo saturado podem ser representados por uma indutância não linear no tempo, sendo esta indutância variável em função da corrente (Ferreira, 2014). As indutâncias das bobinas 1 e 2 do modelo monofásico do limitador (Fig. 1) podem ser calculadas pelas inclinações de suas respectivas curvas de característica magnética, em cada ponto de operação, conforme sugerido por (4) e (5).

$$L_1 = \frac{d\lambda_1}{di_1} = \frac{d\lambda_1}{di_{CA}} \quad (4)$$

$$L_2 = \frac{d\lambda_2}{di_2} = \frac{d\lambda_2}{di_{CA}} \quad (5)$$

A indutância equivalente (L_{eq}) pode ser calculada de acordo com (6). Em outras palavras, a característica magnética do LCCC-NS permite a determinação desta indutância para cada valor de i_{CA} aplicado. Quanto maior for a inclinação da curva $\lambda_1+\lambda_2$ maior será a indutância do dispositivo, o que ocorre entre as linhas tracejadas apresentadas na Fig. 7.

$$L_{eq} = L_1 + L_2 = \frac{d(\lambda_1+\lambda_2)}{di_{CA}} \quad (6)$$

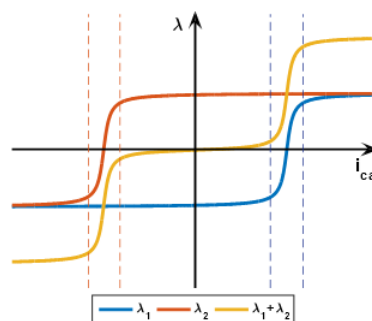


Fig. 7 Característica magnética para o LCCC-NS monofásico.

2.4 Método de Indutâncias Saturáveis

A corrente (i) é função do fluxo (λ), que por sua vez, está em função da tensão nos terminais do indutor. Logo, o indutor não linear, quando modelado como indutância saturável, pode ser representado por uma fonte de corrente controlada indiretamente pela tensão encontrada em seus terminais (Ferreira, 2014).

Dessa forma, vale-se do acréscimo de uma tabela (lookup table) cujo objetivo é interpolar uma função a partir de um segmento da mesma, permitindo a formulação da relação $i=f(\lambda)$, e introduzir a característica de saturação do limitador na simulação, como apresentado na Fig. 8. Isto é, o modelo de indutâncias saturáveis permite reproduzir a limitação da corrente através da saturação no plano λ - i e pela característica não linear do dispositivo (Ferreira, 2014).

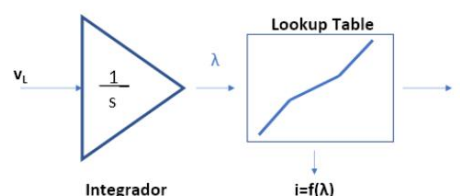


Fig. 8 Representação do modelo de indutâncias saturáveis.

Conforme pode ser visto na Fig. 8, o modelo de simulação é composto por um bloco integrador que gera o fluxo enlaçado (λ) introduzido na lookup table e que resulta na corrente CA do sistema do LCCC-NS. O fato de esse modelo utilizar as características magnéticas do dispositivo para limitação das correntes de curto faz com que o mesmo seja aplicável em qualquer caso em que se possa traçar as curvas características do equipamento no plano λ - i (Ferreira, 2014).

3. SIMULAÇÃO DINÂMICA DO LCCC-NS

Este trabalho tem como objetivo adaptar uma modelagem monofásica do LCCC-NS, abordada por Vilhena (2020), para aplicação em simulações trifásicas, destacando as

aproximações feitas nesta adaptação e refletindo sobre seus impactos na precisão dos resultados, que foram comparados com medições realizadas por Lima (2021) no protótipo trifásico do LCCC-NS.

A Fig. 9 ilustra um único par de núcleos do modelo trifásico do limitador. Neste caso, é importante ressaltar que, em um modelo trifásico, a bobina CC envolve os 6 núcleos do LCCC-NS, ou seja, o fluxo CC total é composto da soma dos fluxos CC distribuídos pelos 6 núcleos CA.

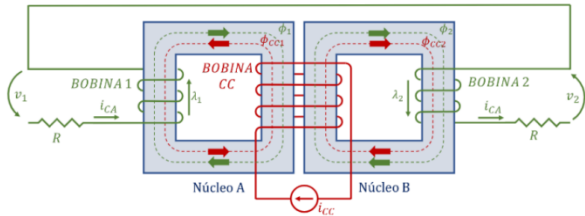


Fig. 9 Ilustração de um par de núcleos de um LCCC-NS trifásico.

Consideram-se, agora, os efeitos das resistências dos enrolamentos CA. Logo, a tensão na bobina 1 é dada por (7) e o fluxo de enlace desta bobina pode ser definido analiticamente, conforme visto em (8).

$$v_1 = Ri_{CA} + \frac{d\lambda_1}{dt} \quad (7)$$

$$\lambda_1 = \int_0^t (v_1 - Ri_{CA}) dt + A_1 \quad (8)$$

Analogamente, define-se λ_2 e a equação resultante para ambos os fluxos de enlace, apresentadas em (9) e (10), respectivamente.

$$\lambda_2 = \int_0^t (v_2 - Ri_{CA}) dt + A_2 \quad (9)$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 = \int_0^t (v_{CA} - 2 \times Ri_{CA}) dt + A \quad (10)$$

Em (10), v_{CA} é a tensão total na associação série das bobinas 1 e 2, incluindo as resistências dos enrolamentos, e $A = A_1 + A_2$, isto é, resultante da soma das constantes de integração de ambos os fluxos de enlace. Neste contexto, será apresentada uma metodologia para levantamento da característica magnética do protótipo trifásico. Posteriormente, será detalhada a implementação de (10) no software Simulink/MATLAB.

3.1 Levantamento da Característica Magnética do LCCC-NS Trifásico

A Fig. 10 apresenta uma ilustração da bancada experimental montada para levantamento da característica magnética do LCCC-NS trifásico. O procedimento consiste em aplicar uma tensão v_1 na bobina 1 e medir i_1 e v_{CC} . Em seguida, calcula-se o valor de λ_1 que pode ser encontrado através de (11).

$$\lambda_1(t) = N_1 \phi_1 = \frac{N_1}{N_{CC}} \int_0^t v_{CC} dt + B_1 \quad (11)$$

onde B_1 é uma constante de integração que neste trabalho foi ajustada para que λ_1 tenha valor médio nulo.

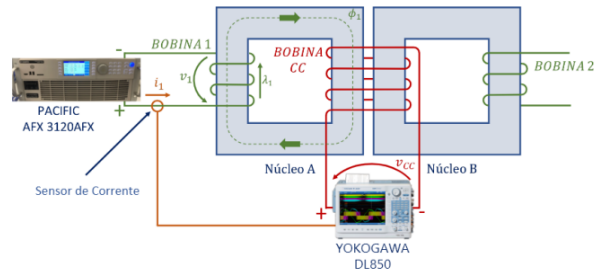


Fig. 10 Bancada experimental montada para levantamento da característica magnética do LCCC-NS trifásico.

O ensaio ilustrado na Fig. 10 foi realizado diversas vezes, para diferentes valores de v_1 . Mais especificamente, os seguintes valores de tensão eficaz (senoidal/60 Hz) foram aplicados: 5,0 V; 10,0 V; 15,0 V; 20,0 V; 25,0 V; 30,0 V; 35,0 V; 35,5 V; 36,0 V; 36,5 V; 37,0 V; 37,5 V; 38,0 V; 38,5 V; 39,0 V e 39,5 V. Para cada um destes valores, foram levantadas curvas como as apresentadas na Fig. 11 e Fig. 12.

O caso mostrado na Fig. 11 (b) (para tensão de 5 V (RMS)) é interessante por resultar em um laço de histerese não simétrico, o que se deve, possivelmente, ao efeito das correntes induzidas geomagneticamente (GICs, do inglês *Geomagnetically Induced Currents*) explicado por Yagoub et al. (2018). Este efeito não ocorre quando tensões maiores são aplicadas na bobina 1, como pode ser visto na Fig. 12.

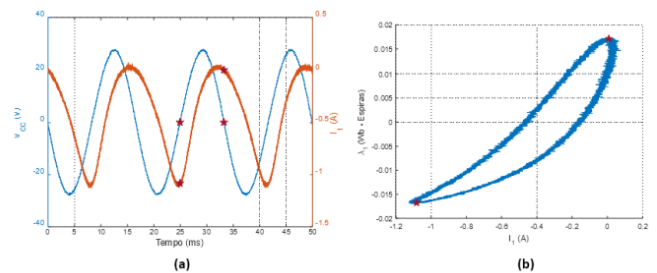


Fig. 11 Resultados obtidos no ensaio para levantamento da característica magnética do LCCC-NS trifásico para tensão eficaz de 5,0 V (senoidal/60 Hz) aplicada na bobina 1. (a) Tensão CC e corrente CA processadas em MATLAB; (b) Laço de histerese correspondente.

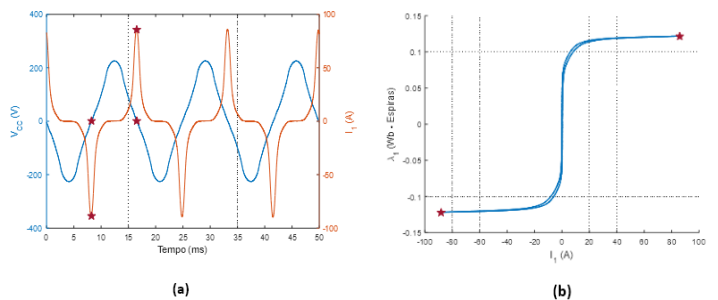


Fig. 12 Resultados obtidos no ensaio para levantamento da característica magnética do LCCC-NS trifásico para tensão eficaz de 39,5 V (senoidal/60 Hz) aplicada na bobina 1. (a)

Tensão CC e corrente CA processadas em MATLAB; (b) Laço de histerese correspondente.

Os marcadores em formato de estrela, destacados na Fig. 11 e Fig. 12, indicam os pontos do laço de histerese que foram utilizados para a construção da característica magnética da bobina 1, quando nenhuma corrente é aplicada na bobina CC. Foram selecionados os pontos onde $v_{CC} = 0$, ou seja, onde o valor de λ_1 deve ser máximo.

Por fim, a Fig. 13 apresenta a característica magnética do LCCC-NS quando a corrente no circuito CC do limitador (I_{CC}) assume o valor de 63 A. Esta curva pode ser gerada para diferentes valores de I_{CC} , conforme apresentado na Fig. 14. Definidos esses parâmetros, na simulação realizada neste trabalho, criou-se um código que gera uma tabela de consulta considerando I_{CC} variando de 0 à 63 A, em passos de 1 A.

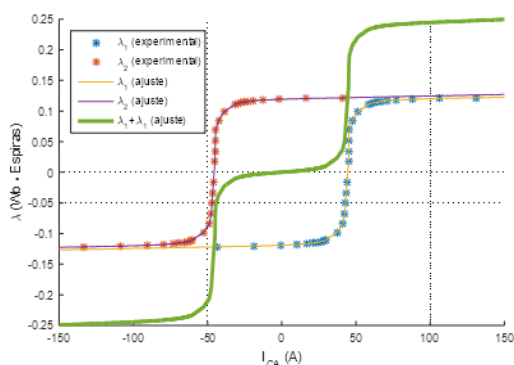


Fig. 13 Característica magnética do LCCC-NS trifásico para $I_{CC} = 63$ A.

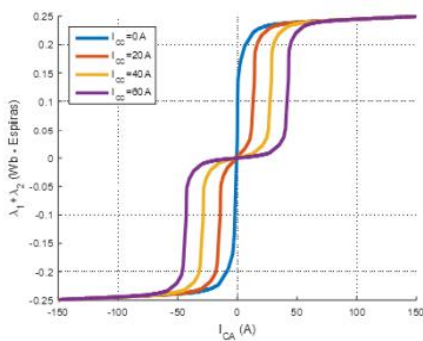


Fig. 14 Característica magnética do LCCC-NS trifásico para diferentes valores de I_{CC} .

3.2 Aproximações Realizadas para a Simulação do LCCC-NS Trifásico

Nesta seção, serão discutidas as aproximações realizadas neste trabalho para a implementação do modelo de simulação dinâmica de um LCCC-NS trifásico. Diferenças construtivas entre os núcleos e os enrolamentos serão ignoradas. Além disso, é importante lembrar que com os núcleos saturados o fluxo magnético produzido pelas bobinas CA (ϕ_{CA}) se dispersa, percorrendo seu caminho pelo ar. Em outras

palavras, não se tem um acoplamento magnético efetivo entre as bobinas CA.

Durante o regime permanente, pode-se considerar que o fluxo magnético CC (ϕ_{CC}) se divide de forma igualitária entre os 6 núcleos do LCCC-NS. Ainda que os núcleos não estejam exatamente no mesmo ponto de operação, as pequenas amplitudes de corrente exigidas pela rede fazem com que estes pontos de operação sejam relativamente próximos. A grande questão é: as aproximações realizadas são válidas durante o curto-circuito?

Considere a ocorrência de um curto-circuito monofásico. A corrente de curto que passa no enrolamento da fase afetada do LCCC-NS eleva o fluxo produzido pelos enrolamentos CA. Em um dos núcleos CA, ϕ_{CA} está em oposição a ϕ_{CC} e, mediante ao curto-circuito, ϕ_{CA} passa a ser de maior magnitude e rompe com a condição de saturação, o que impactará na redistribuição de ϕ_{CC} entre os núcleos e em uma alteração da característica magnética do limitador não prevista pelo modelo estudado neste trabalho. Porém, como explicado, o protótipo que está sendo analisado funciona desligando a fonte CC quando detecta um curto-circuito, ou seja, não haverá ϕ_{CC} .

Fica ainda uma questão: até que a fonte CC seja de fato desligada, a aproximação realizada poderá resultar em erros na predição do comportamento do LCCC-NS. Será que estas diferenças são significativas? A resposta para esse questionamento será apresentada na Seção 4.

3.3 Ensaio Trifásico

Para a ligação trifásica do LCCC-NS, todas as três fases do protótipo do limitador foram ligadas na rede e foram avaliados por Lima (2021) os efeitos da aplicação do curto-circuito nas 3 correntes de fase. No lado CC, foi medida a corrente de desmagnetização do circuito (I_{dmg}).

O circuito de desmagnetização da bobina CC é mostrado na Fig. 15 sendo formado por um diodo de roda livre (D_{dmg}) e por uma resistência (R_{dmg}). Foram utilizados, também, uma fonte de alimentação de corrente contínua (i_{CC}) que provê uma corrente responsável por saturar os 6 núcleos durante a operação normal do sistema e uma chave de abertura rápida (S_1), sendo utilizado um IGBT (Lima, 2021). No momento do curto-circuito, para evitar que altas tensões reversas sejam induzidas na bobina CC, é necessário desconectar a fonte de alimentação deste enrolamento através do IGBT que, uma vez aberto, faz com que essa energia armazenada na bobina CC seja consumida por D_{dmg} e por R_{dmg} (Lima, 2021).

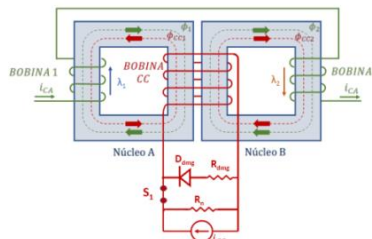


Fig. 15 Esquemático de uma fase do LCCC-NS apresentando o circuito de desmagnetização da bobina CC utilizado por Lima (2021) na etapa de testes de curto-circuito do limitador.

Com relação ao lado CA, cada fase foi ligada a um banco de resistores onde todos apresentavam resistência equivalente de 18 Ω. Foram aplicados por Lima (2021) apenas curtos-circuitos monofásicos, utilizando uma impedância de curto indutiva de 0,15 Ω.

3.4 Implementação do LCCC-NS Trifásico em Simulink/MATLAB

Nesta seção será apresentado o modelo de simulação do LCCC-NS utilizado neste trabalho. A Fig. 16 representa a modelagem do LCCC-NS que é formado por uma lookup table que permite a entrada das informações de fluxo enlaçado, corrente na bobina CC e, retorna como saída, a corrente CA correspondente, resultante da tabela de variação do fluxo de enlace para cada valor de I_{CC} , e que controla a operação do limitador.

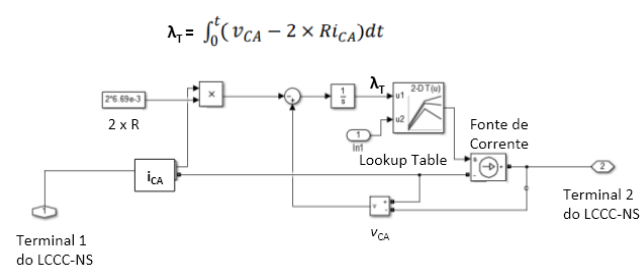


Fig. 16 Sistema de funcionamento e controle do LCCC-NS das fases A, B e C.

4. RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados obtidos com a simulação em Simulink/MATLAB. Serão abordados os resultados comparativos entre o que foi medido por Lima (2021) e os três modelos de simulação, sendo, para cada um desses modelos, coletados os dados de corrente limitada na Fase A (a mesma fase de aplicação do curto-circuito monofásico).

Lima (2021) identificou a corrente prospectiva no sistema cuja medida foi de 1225 A (Pico) para o primeiro pico e 1110 A (Pico) em regime de curto. Os mesmos valores foram tomados por base para conclusões sobre o percentual de limitação no sistema trifásico.

Uma vez que, a fonte CC é desligada no momento do curto-circuito e nesse instante, em que a corrente não transita para zero de forma imediata, o modelo pode apresentar falhas, foram utilizadas 3 diferentes formas da corrente CC nos modelos de simulação a fim de verificar a validade das aproximações consideradas na extensão da modelagem monofásica para a trifásica.

As simulações foram feitas considerando: (i) que a corrente na bobina CC muda seu valor de forma brusca, sendo representada por um degrau com transição de estados em 1μs; (ii) o comportamento da corrente de desmagnetização (I_{dmg}) medida por Lima (2021) e (iii) que o comportamento da corrente na bobina CC durante uma transição é similar ao de um circuito de primeira ordem, sendo implementado com o auxílio de um filtro, conforme mostrado na Fig. 17.

Observa-se, ainda pela Fig. 17, que há uma diferença no tempo de recuperação pós curto-circuito entre a corrente CC representada pela I_{dmg} medida e simulada por um filtro. Enquanto o modelo que considera a I_{dmg} leva cerca 0,2 s (após o curto) para retomar a energização da bobina CC, a simulada por filtro leva cerca de 0,1 s para voltar a saturar os núcleos CA. Efeito esse, possivelmente, associado ao sistema de controle da fonte utilizada, que acaba sendo responsável por determinar o comportamento de subida de I_{CC} .

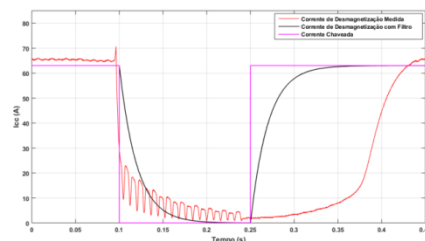


Fig. 17 Representação das correntes CC utilizadas nas simulações.

4.1 Correntes na Fase A

4.1.1 Método Degrau

A corrente limitada na fase A encontrada na simulação pelo método da corrente CC representada por um degrau e comparada com a corrente limitada medida por Lima (2021) pode ser vista na Fig. 18.

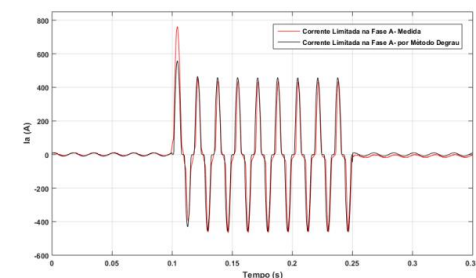


Fig. 18 Corrente na fase A com curto-circuito monofásico aplicado nessa fase- Comparativo entre a medição e o modelo chaveado.

4.1.2 Método pela I_{dmg} medida

O modelo simulado com I_{dmg} medida pode ser observado na Fig. 19. Destaca-se ainda que, esse modelo foi utilizado com o objetivo de obter resultados mais próximos das medições realizadas por Lima (2021).

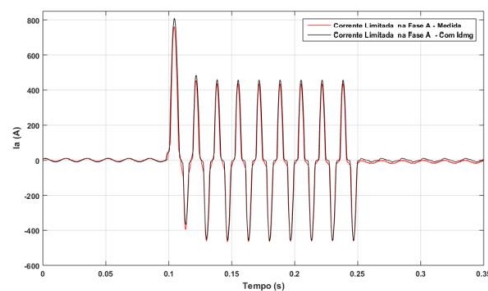


Fig. 19 Corrente na fase A com curto-circuito monofásico aplicado nessa fase- Comparativo entre a medição e o modelo com I_{dmg} medida.

4.1.3 Método pela I_{dmg} simulada por filtro

O modelo simulado com filtro pode ser visto na Fig. 20. Inicialmente já se pode observar que o primeiro pico da corrente limitada medida tem maior magnitude do que a simulada, sendo perceptível o efeito no fator de limitação, comparação essa que será realizada a seguir.

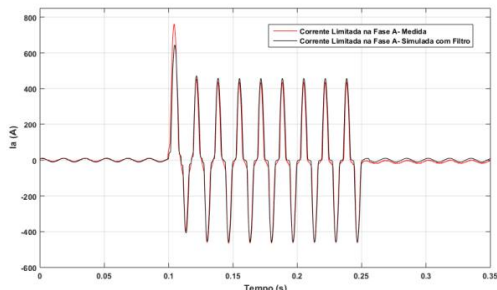


Fig. 20 Corrente na fase A com curto-circuito monofásico aplicado nessa fase- Comparativo entre a medição e o modelo com filtro.

A Tabela 2 traz dados de fatores de limitação de cada modelo simulado para a corrente limitada na Fase A, comparados aos valores medidos e encontrados por Lima (2021).

Tabela 2. Comparativo dos resultados das correntes limitadas na fase A

Corrente	1º Pico	Limitação	Regime de Curto	Limitação
$I_{prospectiva}$	1225 A	-	1110 A	-
Medida	760 A	38 %	436,5 A	60,7 %
Degrau	557,3 A	54,5 %	457,7 A	58,8 %
I_{dmg}	809,5 A	34 %	457,7 A	58,8 %
Filtro	644,2 A	47,4 %	457,7 A	58,8 %

Em regime de curto não houve diferenças significativas para todos os modelos (menos de 2% de erro) se comparados com o fator de limitação apresentado por Lima (2021). Logo, apesar do comportamento da I_{dmg} prejudicar os resultados de simulação no primeiro pico, em termos de regime permanente esse fato não é significativo.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma análise de modelos de simulação que podem ser utilizados em estudos de um protótipo limitador de corrente de curto-circuito de núcleo saturado (LCCC-NS) em sistemas trifásicos. Com o objetivo de reproduzir as características magnéticas do LCCC-NS no circuito de simulação foi necessário, inicialmente, o entendimento do princípio de funcionamento deste dispositivo até a obtenção da curva magnética característica do limitador, que permite a definição de pontos de operação baseados no comportamento do fluxo enlaçado (λ) pela corrente CA do sistema (i) e assim, a associação da curva $\lambda \times i$ do LCCC-NS em seus dois momentos de operação em uma rede elétrica, no regime permanente e no curto-circuito.

Com relação aos resultados obtidos, o modelo que utiliza a I_{dmg} medida por Lima (2021) se destacou apenas no primeiro semiciclo do curto-circuito. Após o regime transitório, ainda sob influência do curto-circuito, todas as representações para a corrente da bobina CC levaram a resultados de simulação satisfatórios. Conclui-se, portanto, que a menos que os erros no primeiro pico, após a aplicação do curto-circuito, sejam relevantes, não há necessidade de aprimoramento da representação do comportamento da corrente CC. Vale destacar que este aprimoramento aumentaria a complexidade do modelo computacional, e teria que levar em consideração o algoritmo de controle da fonte de corrente conectada à bobina CC, uma informação de difícil acesso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, a CAPES pelo apoio financeiro e aos professores Felipe Sass e Guilherme Sotelo que tornaram essa pesquisa possível.

REFERÊNCIAS

- EPE. Empresa de Pesquisa Energética (2017). *Desafios da Expansão de Rede Elétrica na Região Metropolitana do Rio de Janeiro-Níveis de Curto-Circuito*. 1-5 p.
- Ferreira, F. (2014). *Desenvolvimento de um Modelo Computacional para Simulação de Limitadores de Corrente Supercondutores Indutivos*. Dissertação de Mestrado. Universidade NOVA de Lisboa, Lisboa, 2014.
- Fajoni, F. (2015). *Estudos, Desenvolvimento e Construção de um Limitador de Correntes Elétricas com Núcleo Magnético Saturado*. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.
- Lima, M. (2021). *Ensaio de Magnetização e Curto-Circuito em um Protótipo de Limitador de Corrente de Núcleo Saturado*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2021.
- ONS. Operador Nacional do Sistema Elétrico (2014). *Critérios para Análise de Superação de Equipamentos e Instalações de Alta Tensão*.
- ONS. Operador Nacional do Sistema Elétrico (2017). *Sumário Executivo ONS PAR-PEL-2021-2025*.
- Vilhena, N. M. G. (2020). *Contribution for the Study of the Integration of Inductive Superconducting Fault Current Limiters in Electrical Distribution Grids*. Tese de Doutorado. Universidade NOVA de Lisboa, Lisboa, 2020.
- Yagoub, M. A., Tao, Z. (2018). *Modeling mitigation of geomagnetically induced currents (gics) for single-phase power transformer*, p. 1–6. ICCCEE, International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronic Engineering.