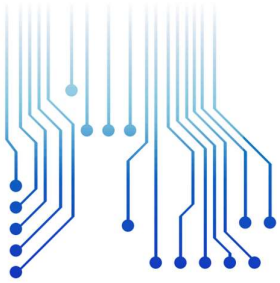


CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Universidade Federal
de Campina Grande

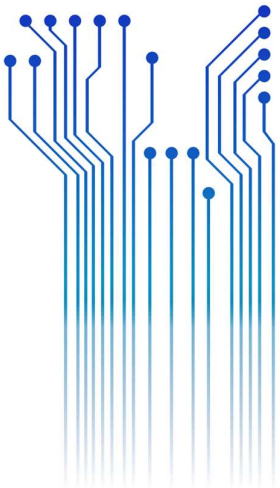
ENIO MATHEUS ANDRADE RANGEL

Centro de Engenharia
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Inrush em Transformadores de Potência: Simulação e Comparação de Técnicas de Mitigação

Departamento de
Engenharia Elétrica



Campina Grande
2018

Enio Matheus Andrade Rangel

INRUSH EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA: SIMULAÇÃO E COMPARAÇÃO DE TÉCNICAS DE MITIGAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Eletrotécnica

Professor Francisco das Chagas Fernandes Guerra, D.Sc.
Orientador

Campina Grande
2018

Enio Matheus Andrade Rangel

INRUSH EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA: SIMULAÇÃO E COMPARAÇÃO DE TÉCNICAS DE MITIGAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Eletrotécnica

Aprovado em 18 / 12 / 2018

Professor Benedito Antônio Luciano, D. Sc.

Universidade Federal de Campina Grande

Avaliador

Professor Francisco das Chagas Fernandes Guerra, D. Sc.

Universidade Federal de Campina Grande

Orientador

RESUMO

As correntes de energização de equipamentos elétricos robustos e altamente indutivos – como os transformadores de potência - são altamente nocivas ao bom funcionamento de sistemas elétricos de potência, e causam diversas consequências indesejadas. Algumas delas são: atuação indevida da proteção, afundamentos de tensão na rede elétrica, esforços eletromecânicos que danificam os enrolamentos do transformador, redução da vida útil de equipamentos elétricos, etc. O trabalho a seguir busca compreender e simular o fenômeno de *inrush* em transformadores de potência. O *software* escolhido para o desenvolvimento das simulações é o MATLAB, com auxílio do *toolbox* SIMULINK, ferramenta poderosa para modelagem de sistemas elétricos. Em seguida, busca-se validar métodos de mitigação das correntes de *inrush* já propostos na literatura. Uma análise dos resultados obtidos entre os métodos é realizada como conclusão.

Palavras-chave: *Inrush*, Transformador de Potência, Corrente de Energização, Mitigação.

ABSTRACT

Energization currents in robust, highly inductive electric equipment – such as power transformers – Are extremely noxious to the operation of power systems, causing a number of undesirable consequences: unwanted protection actuation, voltage sagging, damage to transformer coils due to electromechanical stress, reduction on lifespan of equipment, etc. The following work seeks to understand and simulate *inrush* in power transformers. The chosen software for the task is MATLAB, specifically its toolbox SIMULINK, a powerful electric system modeling tool. Then, we seek validation of different mitigation methods for *inrush* currents available in literature. An analysis of the results achieved concludes the work.

Keywords: Inrush, Power Transformer, Energization Current, Mitigation.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: CIRCUITO EQUIVALENTE PARA TRANSFORMADOR MONOFÁSICO, CURVA DE SATURAÇÃO LINEARIZADA. 10
FIGURA 2: FLUXO DE ENLACE VS TEMPO, $R \ll \omega Lm$. 11
FIGURA 3: INFLUENCIA DO FLUXO DE ENLACE NA CORRENTE DO TRANSFORMADOR, APÓS CHAVEAMENTO. 12
FIGURA 4: LINEARIZAÇÃO POR PARTES DA CURVA DE HISTERESE MAGNÉTICA. 13
FIGURA 5: TRANSFORMADOR MONOFÁSICO, CIRCUITO EQUIVALENTE. 14
FIGURA 6: CORRENTE DE INRUSH, TRANSFORMADOR MONOFÁSICO. 14
FIGURA 7: AUMENTO DA CORRENTE NA FASE A NO MOMENTO DO CHAVEAMENTO DA FASE B. 16
FIGURA 8: CORRENTE NO INDUTOR ALIMENTADO POR ONDA QUADRADA. 17
FIGURA 9: DESMAGNETIZAÇÃO PELO MÉTODO VVCF. 18
FIGURA 10: DESMAGNETIZAÇÃO PELO MÉTODO VFCV. 19
FIGURA 11: CIRCUITO EQUIVALENTE DE TRANSFORMADOR MONOFÁSICO, INRUSH PLENO. 20
FIGURA 12: INRUSH EM TRANSFORMADOR MONOFÁSICO, SEM MITIGAÇÃO. 21
FIGURA 13: CIRCUITO EQUIVALENTE DE TRANSFORMADOR MONOFÁSICO, COM AMORTECIMENTO RESISTIVO. 22
FIGURA 14: INRUSH EM TRANSFORMADOR MONOFÁSICO, COM RESISTOR DE PRÉ-INSERÇÃO. 23
FIGURA 15: INRUSH EM TRANSFORMADOR MONOFÁSICO, COM CANCELAMENTO DE FLUXO. 24
FIGURA 16: CIRCUITO EQUIVALENTE DE TRANSFORMADOR TRIFÁSICO, INRUSH PLENO. 25
FIGURA 17: INRUSH EM TRANSFORMADOR TRIFÁSICO, SEM MITIGAÇÃO. 25
FIGURA 18: CIRCUITO EQUIVALENTE DE TRANSFORMADOR TRIFÁSICO, COM RESISTOR DE PRÉ-INSERÇÃO. 26
FIGURA 19: INRUSH EM TRANSFORMADOR TRIFÁSICO, COM RESISTOR DE PRÉ-INSERÇÃO. 27
FIGURA 20: CIRCUITO EQUIVALENTE DE TRANSFORMADOR TRIFÁSICO, COM CHAVEAMENTO SEQUENCIAL. 28
FIGURA 21: INRUSH EM TRANSFORMADOR TRIFÁSICO, COM CHAVEAMENTO SEQUENCIAL. 28
FIGURA 22: INRUSH EM TRANSFORMADOR TRIFÁSICO, FLUXO RESIDUAL NULO. 29
FIGURA 23: INRUSH EM TRANSFORMADOR MONOFÁSICO, FLUXO RESIDUAL NULO + RESISTOR DE PRÉ-INSERÇÃO. 30
FIGURA 24: INRUSH EM TRANSFORMADOR TRIFÁSICO, FLUXO RESIDUAL NULO + RESISTOR DE PRÉ-INSERÇÃO. 31
FIGURA 25: INRUSH EM TRANSFORMADOR TRIFÁSICO, FLUXO RESIDUAL NULO + CHAVEAMENTO SEQUENCIAL. 32
FIGURA 26: CARACTERÍSTICA DE SATURAÇÃO, TRANSFORMADOR MONOFÁSICO. 37
FIGURA 27: CARACTERÍSTICA DE SATURAÇÃO, TRANSFORMADOR TRIFÁSICO. 38
FIGURA 28: SINAL DE ENTRADA DESMAGNETIZANTE, VFCV. 39
FIGURA 29: SINAL DE ENTRADA DESMAGNETIZANTE, VVCF. 39
FIGURA 30: FLUXO DE ENLACE VS TEMPO, VFCV. 40
FIGURA 31: CARACTERÍSTICA DE SATURAÇÃO, VFCV. 41
FIGURA 32: FLUXO DE ENLACE VS TEMPO, VVCF. 42
FIGURA 33: CARACTERÍSTICA DE SATURAÇÃO, VVCF. 43

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO ENTRE SIMULAÇÕES, TRANSFORMADOR MONOFÁSICO. 33
TABELA 2: COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO ENTRE SIMULAÇÕES, TRANSFORMADOR TRIFÁSICO. 33
TABELA 3: PARES ORDENADOS DAS CURVAS DE SATURAÇÃO. 38
TABELA 4: PARÂMETROS DO MODELO MONOFÁSICO. 44
TABELA 5: PARÂMETROS DO MODELO TRIFÁSICO. 44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
VFCV	*Variable frequency, constant voltage*
VVCF	*Variable voltage, constant frequency*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 9

1.1. OBJETIVOS 9
1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO 9

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA SOBRE *INRUSH* EM TRANSFORMADORES 10

2.1. TEMPO DE SATURAÇÃO 12
2.2. ESTIMANDO A MÁXIMA CORRENTE DE ENERGIZAÇÃO 12
2.3. CORRENTES DE *INRUSH* EM TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS 14

3. MÉTODOS DE MITIGAÇÃO DE CORRENTES DE *INRUSH* 15

3.1. RESISTOR DE PRÉ-INSERÇÃO 15
3.2. CHAVEAMENTO SEQUENCIAL COM RESISTÊNCIA DE NEUTRO 15
3.3. CANCELAMENTO DE FLUXO MAGNÉTICO RESIDUAL 17

4. SIMULAÇÕES 20

4.1. SURTO DE ENERGIZAÇÃO EM UM TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA MONOFÁSICO 20
4.2. SURTO DE ENERGIZAÇÃO EM TRANSFORMADOR MONOFÁSICO, COM O EMPREGO DE UM RESISTOR DE PRÉ-INSERÇÃO 21
4.3. SURTO DE ENERGIZAÇÃO EM TRANSFORMADOR MONOFÁSICO, COM CANCELAMENTO DE FLUXO RESIDUAL 23
4.4. SURTO DE ENERGIZAÇÃO EM UM TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA TRIFÁSICO YN-YN 24
4.5. SURTO DE ENERGIZAÇÃO EM TRANSFORMADOR TRIFÁSICO, COM O EMPREGO DE UM RESISTOR DE PRÉ-INSERÇÃO 26
4.6. SURTO DE ENERGIZAÇÃO EM TRANSFORMADOR TRIFÁSICO, COM O EMPREGO DO MÉTODO DE CHAVEAMENTO SEQUENCIAL 27
4.7. SURTO DE ENERGIZAÇÃO EM TRANSFORMADOR TRIFÁSICO, COM CANCELAMENTO DE FLUXO RESIDUAL 29
4.8. O RESULTADO DA COMBINAÇÃO DE MÉTODOS DE MITIGAÇÃO 30

5. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS 33

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS 35

REFERÊNCIAS 36

APÊNDICE A – CARACTERÍSTICAS DE SATURAÇÃO 37

APÊNDICE B –ALGORITMO PARA CANCELAMENTO DE FLUXO 39

APÊNDICE C – PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO 44

1. INTRODUÇÃO

O fenômeno denominado *inrush* em transformadores de potência é caracterizado por um surto de corrente que se origina no instante em que esses equipamentos são ligados à rede (Kovan et al., 2011). O *inrush* ocorre devido à alta saturação do núcleo dos transformadores no instante da ligação e seu impacto pode ser agravado a depender do ângulo de chaveamento da tensão ou do fluxo residual no transformador. Ignorar esse fenômeno é extremamente custoso ao sistema, pois sua ampla ocorrência acarreta em estresse mecânico nos enrolamentos do equipamento e degradação em seu material isolante, formação de transitórios de tensão no sistema, atuação indevida de dispositivos de proteção. Todos esses malefícios traduzem-se em possibilidade de perda de alimentação de cargas no sistema e redução da vida útil de equipamentos. Técnicas de mitigação do *inrush* são amplamente utilizadas na indústria e variam em custo, simplicidade de implementação e eficácia. A forma tradicional de redução do surto de corrente é o emprego do resistor de pré-inserção no lado primário. Além deste, diferentes formas de mitigação já foram propostas na literatura, como o chaveamento controlado (Bronzeado et al., 2014), a desmagnetização dos transformadores (Kovan et al. 2011), o chaveamento sequencial com resistor de neutro (Xu et al. 2005), etc. Este trabalho investigará três dessas técnicas de mitigação: o resistor de pré-inserção, o chaveamento sequencial, e a técnica de cancelamento de fluxo residual.

1.1. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é simular o fenômeno de *inrush* em transformadores de potência monofásicos e trifásicos, de modo a compreender o surto de corrente e seus efeitos. Em seguida, implementar nas simulações os métodos de mitigação de *inrush* disponíveis na literatura. Por fim busca-se estabelecer um paralelo entre os métodos simulados.

- Simular o fenômeno de *inrush* em transformadores de potência monofásicos e trifásicos, com o objetivo de compreender o surto de corrente e seus efeitos;
- Implementar nas simulações os métodos de mitigação de *inrush* disponíveis na literatura;
- Discutir a performance de cada método e comparar os resultados obtidos.

1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO

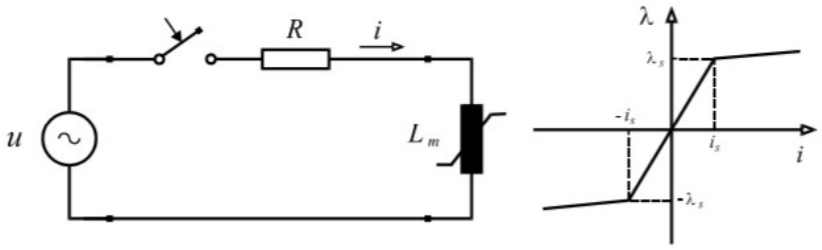
Na Seção 2 é abordada a fundamentação teórica necessária para entender-se o fenômeno de *inrush* em transformadores de potência. Na Seção 3 são caracterizados os métodos de mitigação de correntes de energização. Na Seção 4 apresentam-se os modelos utilizados para simulação, bem como os resultados obtidos por cada um deles. Na Seção 5 apresenta-se uma discussão acerca dos resultados obtidos da seção anterior. Por fim, a Seção 6 contém as considerações finais acerca do trabalho realizado e dos resultados obtidos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA SOBRE *INRUSH* EM TRANSFORMADORES

Um indutor não linear, representado na Figura 1 como a indutância de magnetização de um circuito equivalente para transformador monofásico, possui característica de magnetização $i = f(\lambda)$. Após a energização desse indutor, surge no circuito a seguinte resposta diferencial (Guerra, 2018):

$$\frac{d\lambda}{dt} + Ri_m = U_m \sin(\omega t) \tag{1}$$

Figura 1: Circuito equivalente para transformador monofásico, curva de saturação linearizada.



Fonte: Guerra (2018).

Devido à natureza não-linear da indutância de magnetização em transformadores, essa equação não apresenta solução analítica. Porém, se ignorarmos o efeito de saturação do núcleo, observamos a relação de magnetização $i = \lambda/L_m$, sendo L_m a indutância de magnetização do transformador, que pode ser interpretada graficamente como a taxa de variação da curva de magnetização que passa pela origem. Dessa forma, podemos resolver a resposta diferencial de maneira analítica, que gera a solução:

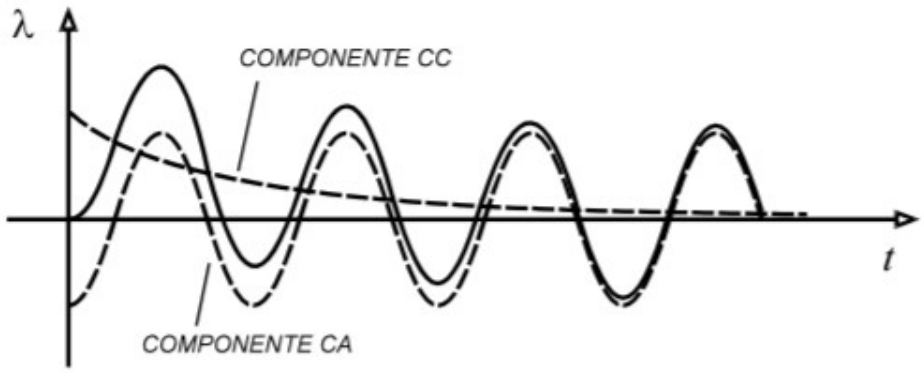
$$\lambda(t) = \frac{\omega L_m^2 U_m}{R^2 + (\omega L_m)^2}\left[e^{-R/L_m} + \frac{R}{\omega L_m}\sin \omega t - \cos \omega t\right] \tag{2}$$

Essa solução pode ser simplificada ainda mais considerando-se $R \ll \omega L_m$:

$$\lambda(t) = \frac{U_m}{\omega}\left[e^{-R/L_m} - \cos \omega t\right] \tag{3}$$

A curva lembra uma resposta sub amortecida, que oscila em torno de um valor inicial de fluxo, com uma amplitude submetida a decaimento exponencial.

Figura 2: Fluxo de enlace vs tempo, $R \ll \omega L_m$.



Fonte: Guerra (2018).

A influência da tensão no momento do chaveamento não foi considerada na análise anterior. Se agora considerarmos a tensão $u(t) = U_m \sin(\omega t + \theta)$, o valor da tensão no momento do chaveamento não será mais nulo, assumindo o valor $u(0) = U_m \sin(\theta)$. O ângulo θ é denominado ângulo de chaveamento. Dessa forma, obtém-se a relação:

$$\lambda(t, \theta) = \lambda(0) + \frac{U_m}{\omega}[cos\theta - \cos(\omega t + \theta)] \quad (4)$$

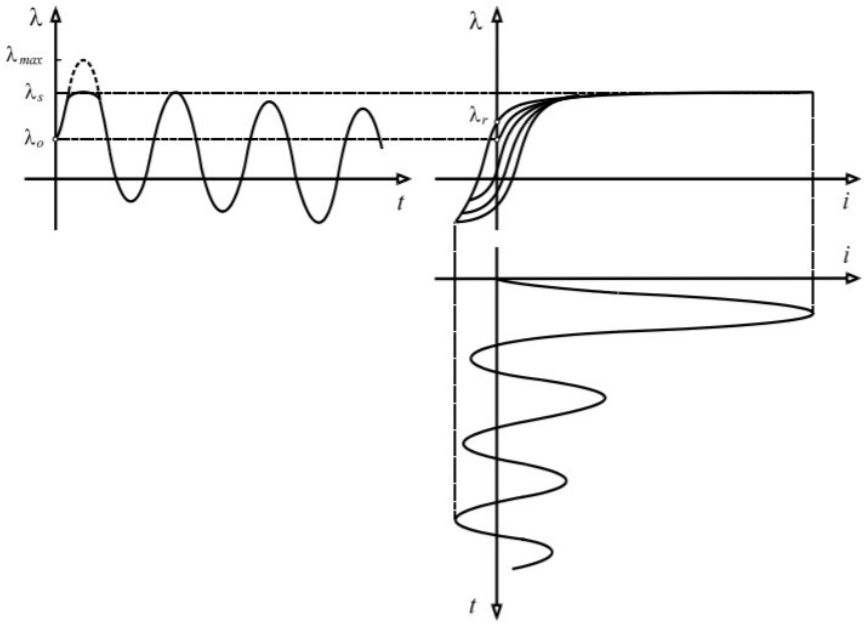
Dessa forma, dadas as simplificações da equação (4), a amplitude máxima do fluxo de enlace no momento de chaveamento ocorre quando $\omega t = k\pi,\ k$ impar e $\theta = 0$.

O valor desse fluxo máximo teórico é:

$$\lambda_{max} = \lambda(0) + 2\frac{U_m}{\omega} \quad (5)$$

Em um caso real, durante os primeiros instantes de energização, o elevado fluxo de enlace leva o núcleo do transformador à saturação, consequentemente induzindo um elevado surto de corrente momentâneo nos enrolamentos do transformador, que somente é normalizado após o decaimento exponencial do fluxo de enlace:

Figura 3: Influencia do fluxo de enlace na corrente do transformador, após chaveamento.



Fonte: Guerra (2018).

O efeito de histerese magnética do núcleo deve ser considerado no estudo de correntes de energização. Um fluxo magnético residual pode atuar no sentido tanto de agravar quanto de atenuar o *inrush*. O fluxo residual amplia a magnitude do *inrush*, se a taxa de variação do fluxo de enlace tiver o mesmo sinal do fluxo residual, no instante de chaveamento. É o que se observa na Figura 3.

Porém, se o caso contrário ocorrer, o fluxo residual pode atuar no sentido de atenuar a pico da corrente de energização, sendo assim benéfico para o sistema.

2.1. TEMPO DE SATURAÇÃO

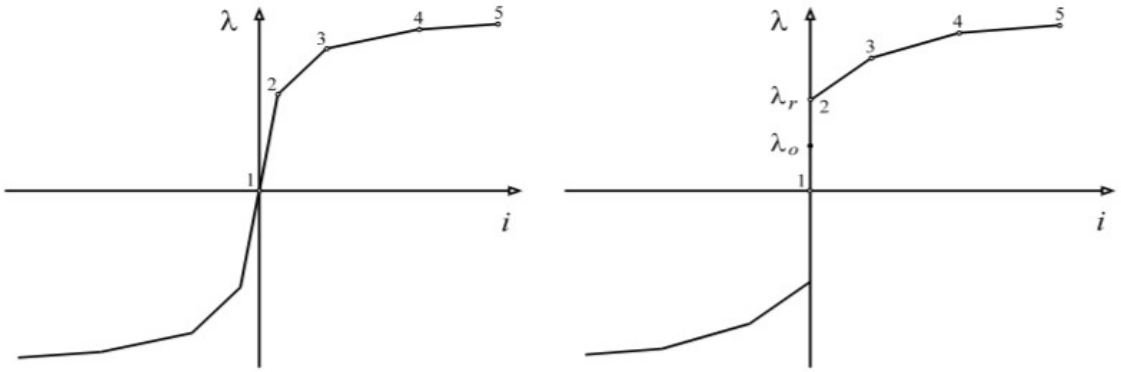
Em núcleos ferromagnéticos reais observa-se o efeito de saturação magnética. Considerando-se que o tempo de saturação t_s do núcleo é o intervalo no qual o processo leva o núcleo deλ_0 a λ_s, que é o ponto de joelho da característica de magnetização do núcleo, podemos calcular o tempo de saturação a partir da equação (Kahrobaee et al., 2012):

$$t_s = \frac{\cos^{-1}\left[(\lambda_0 - \lambda_s)\frac{\omega}{U_m} + \cos\theta\right] - \theta}{\omega} \tag{6}$$

2.2. ESTIMANDO A MÁXIMA CORRENTE DE ENERGIZAÇÃO

No estudo da energização de transformadores, uma boa aproximação da curva de saturação do núcleo facilita os esforços computacionais para o cálculo de correntes de *inrush*. Uma forma popular de aproximação é a linearização por partes. Na figura 4, apenas a aproximação da direita considera o efeito de histerese do núcleo.

Figura 4: Linearização por partes da curva de histerese magnética.



Fonte: Guerra (2018).

Na Figura 4, λ_0 é o fluxo de enlace residual no momento do chaveamento, enquanto λ_r é o fluxo de remanência, associado ao fenômeno de histerese.

Considere que a curva de magnetização seja aproximada por duas retas. A primeira sendo a indutância de magnetização L_m que corresponde à taxa de variação do fluxo de enlace λ em função da corrente $i(t)$ para a região de operação não saturada, e a segunda sendo uma aproximação da indutância de magnetização na região de saturação, L_s, de modo que:

$$\lambda(t) = \begin{cases} L_m i(t), & se\ 0 < t < t_s \\ L_s i(t), & se\ t_s < t < \dfrac{2(\pi - \theta)}{\omega} - t_s \end{cases} \tag{7}$$

Kahrobaee et al. (2012) propõem que existe uma equação que pode ser solucionada analiticamente que aproxima a máxima amplitude da corrente de energização:

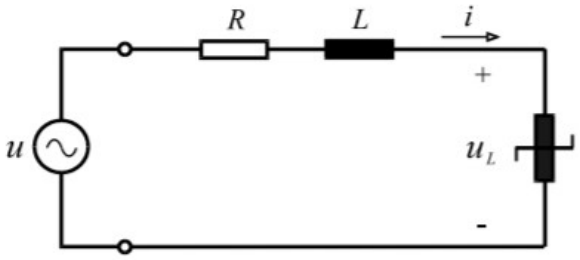
$$i_{max} = \frac{\left[(\lambda_0 - \lambda_s)\dfrac{\omega}{U_m} + \cos\theta + 1\right] U_m}{\omega L_s} \tag{8}$$

Observe que a magnitude da corrente de energização é função do ângulo de chaveamento, fluxo residual, e indutância de saturação do equipamento.

2.3. CORRENTES DE *INRUSH* EM TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

Na Figura 5 apresenta-se um circuito equivalente simplificado de transformadores monofásicos.

Figura 5: Transformador monofásico, circuito equivalente.



Fonte: Guerra (2018).

A equação do circuito da Figura 5 é a que segue:

$$\frac{d\lambda}{dt} + L\frac{di}{dt} + Ri(t) = u(t) \tag{9}$$

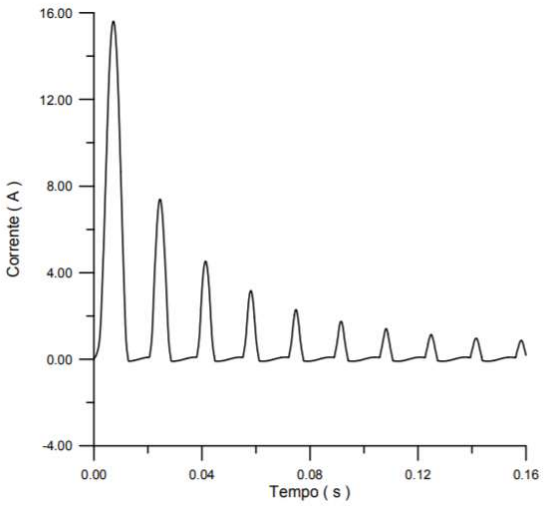
Sabemos da relação de indutância que $L_m = \frac{d\lambda}{di}$, e que o fluxo de enlace se relaciona com a corrente elétrica no enrolamento ($i = f(\lambda)$).

Aplicar a regra da cadeia na equação de circuito resulta:

$$\frac{d\lambda(t)}{dt} = \frac{u(t) - Rf(\lambda)}{1 + L/L_m} \tag{10}$$

A equação diferencial não linear acima pode ser resolvida pelos métodos de Euler ou Runge-Kutta, com um passo de tempo de 1μs (Guerra, 2018). A resposta da corrente é da forma:

Figura 6: Corrente de inrush, transformador monofásico.



Fonte: Guerra (2018).

3. MÉTODOS DE MITIGAÇÃO DE CORRENTES DE *INRUSH*

3.1. RESISTOR DE PRÉ-INSERÇÃO

O resistor de fechamento, ou pré-inserção, é instalado em câmaras auxiliares em paralelo com a câmara principal do disjuntor, podendo proporcionar amortecimento adicional no momento da energização. Após o período de surto, a conexão do resistor é retirada e o circuito volta a funcionar normalmente.

O leitor pode ser induzido a pensar que pode-se aumentar indefinidamente o valor do resistor de pré-inserção, mas é importante lembrar que no momento de fechamento dos contatos do disjuntor, surgirão transitórios de tensão proporcionais ao valor da resistência (Guerra, 2018).

Para disjuntores na faixa de 230 kV a 800 kV, os valores de resistência de pré-inserção comuns estão entre 300 Ω e 800 Ω. Os tempos de inserção flutuam na faixa de 8 ms a 12 ms, que para uma frequência de 60 Hz, equivalem à faixa de 0,48 a 0,72 ciclos.

3.2. CHAVEAMENTO SEQUENCIAL COM RESISTÊNCIA DE NEUTRO

Esse método se sustenta no fato de que correntes de *inrush* são sempre desequilibradas entre as três fases. Isso significa que para um transformador de potência com primário conectado em estrela, haverá corrente percorrendo no neutro, a partir do momento da energização. Essas correntes eventualmente são reduzidas a valores menos significativos, conforme a o transformador entra em regime permanente. Por conseguinte, o emprego de um resistor de neutro pode muito bem amortecer essas correntes de energização desbalanceadas (Cui et al., 2005).

A ideia é ainda mais eficaz quando se introduz o conceito de energização atrasada para cada fase do transformador. A mudança faz com que esse esquema de energização seja quase tão eficaz quanto o método do resistor de pré-inserção, com algumas vantagens especificas:

- É necessário apenas um resistor de amortecimento para a aplicação do método;
- As correntes de neutro às quais esse resistor é submetido são muito menores que as correntes de linha para o caso do resistor de pré-inserção.

As correntes de *inrush* em transformadores de potência apresenta natureza desequilibrada. Para um transformador conectado em estrela do lado da energização, a corrente de *inrush* percorre o caminho elétrico do neutro. Podemos então, especular se um resistor conectado no neutro do transformador seria capaz de reduzir a magnitude dessas correntes de energização de maneira semelhante a um resistor conectado em série na linha.

Essa suposição não se mostra suficiente para o caso de um chaveamento trifásico simples. Porém, a introdução da técnica de chaveamento sequenciado faz com que a corrente de *inrush* passe majoritariamente pelo caminho do neutro do transformador. Dessa forma, o comportamento do resistor de neutro se assemelha ao do resistor de pré-inserção conectado à linha.

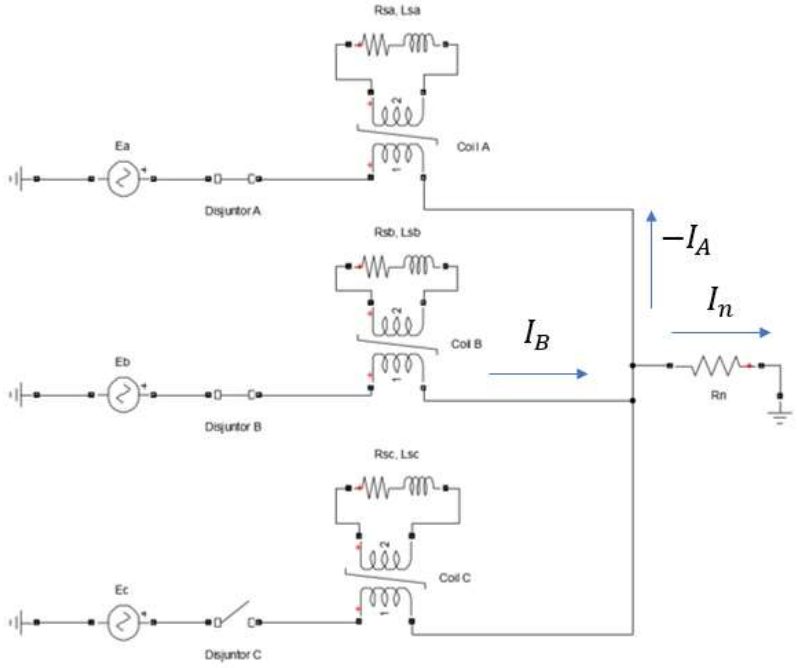
Esse conceito - de energização sequencial - tem potencial para formar uma nova classe de técnicas de mitigação de transitórios.

A corrente de *inrush* leva entre 5 a 10 ciclos para decair ao regime permanente. Como consequência, não é necessário utilizar longos atrasos no chaveamento sequenciado.

O parâmetro mais importante para um bom projeto de chaveamento sequencial é o valor da resistência de neutro. Um valor maior de resistência do neutro é capaz de reduzir o pico da corrente de *inrush* no primeiro instante de chaveamento. Isso decorre do fato de que com apenas uma fase conectada, o resistor de neutro se comporta como uma resistência em série no circuito.

Apesar disso, não podemos aumentar o valor da resistência de neutro indefinidamente. Com o chaveamento da segunda fase, um valor alto de resistência no neutro aumenta a magnitude da corrente de *inrush* da primeira fase. Isso acontece porque o percurso elétrico da fase anteriormente chaveada oferece menos resistência do que o percurso elétrico do neutro. O mesmo mecanismo se aplica para o chaveamento da terceira e última fase.

Figura 7: Aumento da corrente na fase A no momento do chaveamento da fase B.



Fonte: Autoria própria.

Portanto, conclui-se que há um conflito entre os requerimentos de resistência de neutro para o chaveamento da primeira fase, em comparação com o chaveamento das fases restantes. O valor ótimo de resistência de neutro deve ser aquele que atende todos os eventos de chaveamento de forma a reduzir satisfatoriamente a corrente de *inrush* em cada um deles.

Além do benefício de redução da magnitude das correntes de *inrush*, o emprego do resistor de neutro reduz também a duração do fenômeno de *inrush*, como demonstrado por Xu et al. (2005).

A análise do cálculo do valor de resistência do neutro não é o objetivo desse trabalho. Porém, como visto em Xu et al. (2005), o valor ótimo da resistência do neutro aproxima-se de $R_n = 0{,}085 \cdot X_{open}$, sendo X_{open} a reatância de sequência positiva em tensão primária nominal, com o secundário do transformador em aberto. Em outras palavras, X_{open} é a reatância de magnetização para o transformador em ponto de operação não saturado.

3.3. CANCELAMENTO DE FLUXO MAGNÉTICO RESIDUAL

A forca motriz do *inrush* em transformadores de potência é a diferença de potencial aplicada ao primário do transformador. Essa tensão pode induzir no núcleo magnético envolvido pelos enrolamentos um fluxo magnético máximo de até duas vezes o valor de regime permanente, somado ao fluxo magnético residual.

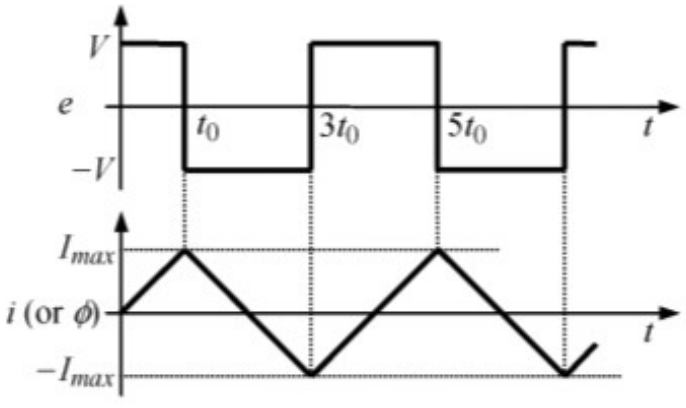
Por essa razão, é de interesse do operador do transformador energizá-lo sem fluxo residual algum, visto que o mesmo pode agravar a magnitude da corrente de energização, a depender do ponto de chaveamento do circuito.

O mecanismo de cancelamento de fluxo magnético residual proposto por Kovan (2011) pode ser compreendido pela análise da lei de Faraday para uma tensão contínua aplicada sobre indutor.

$$i(t) = \frac{1}{L}\int v(t)dt = \frac{V}{L}t \tag{11}$$

Ao aplicar-se tensão contínua sobre um indutor, a corrente que percorre o mesmo cresce linearmente para o intervalo de tempo em que a tensão está presente. Se, após determinado tempo t_0 em que a corrente no indutor atinge um valor máximo I_{max}, invertermos a polaridade da tensão contínua por um intervalo $2t_0$, obteremos ao fim do processo uma corrente no indutor igual a $-I_{max}$:

Figura 8: Corrente no indutor alimentado por onda quadrada.



Fonte: Kovan (2011).

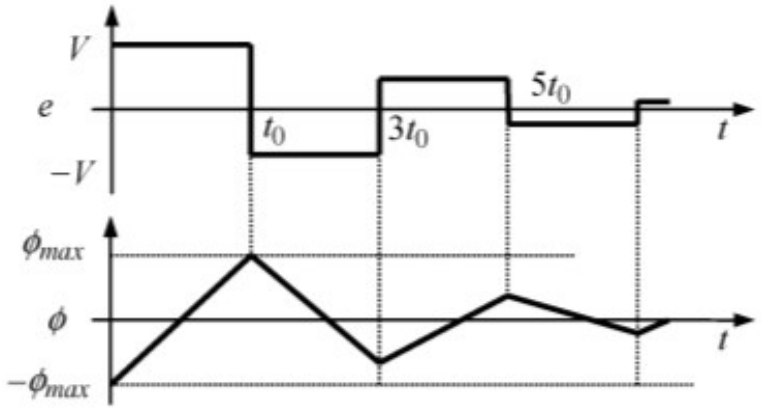
O fluxo magnético no núcleo do indutor corresponde a uma função da corrente que percorre o mesmo. Para indutores lineares essa função é simplesmente:

$$\phi = Li \tag{12}$$

3.3.1. O MÉTODO DE TENSÃO VARIÁVEL E FREQUÊNCIA CONSTANTE (*VARIABLE VOLTAGE, CONSTANT FREQUENCY* – VVCF)

Considere que, após ser desconectado, um transformador monofásico apresente fluxo residual ϕ_r. Aplicando-se uma tensão contínua que decai gradualmente em módulo a cada semiciclo, reduzimos o módulo fluxo magnético no núcleo do transformador conforme a Figura 9:

Figura 9: Desmagnetização pelo método VVCF.



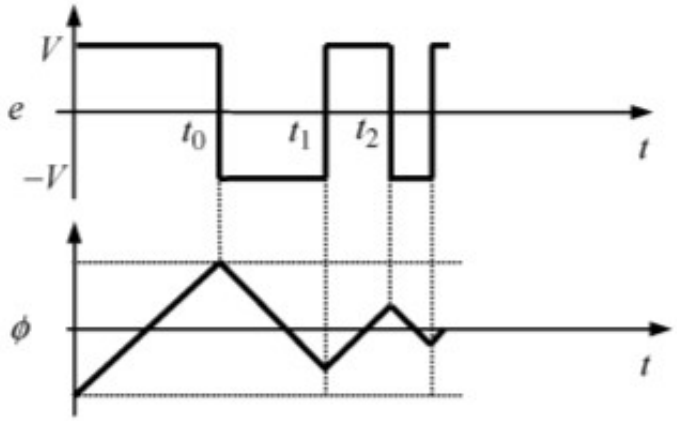
Fonte: Kovan (2011).

Para iniciar o processo de desmagnetização, o núcleo é levado à saturação positiva aplicando-se $+V_{max}$, por um intervalo de tempo t_0. Em seguida, a tensão é invertida e decai sucessivamente até que o fluxo magnético residual seja cancelado.

3.3.2. O MÉTODO DE FREQUÊNCIA VARIÁVEL E TENSÃO CONSTANTE (*VARIABLE FREQUENCY, CONSTANT VOLTAGE* – VFCV)

De maneira análoga, podemos cancelar o fluxo residual de um núcleo ferromagnético aplicando-se tensão contínua constante em módulo, porem gradualmente aumentando a frequência de reversão de polaridade, conforme Figura 10.

Figura 10: Desmagnetização pelo método VFCV.



Fonte: Kovan (2011).

Ao reduzir a duração entre reversões de polaridade, o fluxo residual também decai gradualmente.

Apesar de ambos os métodos serem eficazes no processo de cancelamento de fluxo magnético, o VFCV apresenta duas vantagens sobre a técnica anterior:

- O cancelamento de fluxo é obtido em um período de tempo menor;
- A realização do circuito eletrônico e da fonte de tensão *dc* é mais simples.

A realização dos circuitos do método não é o foco deste trabalho, mas foi discutida com detalhe em Kovan (2011).

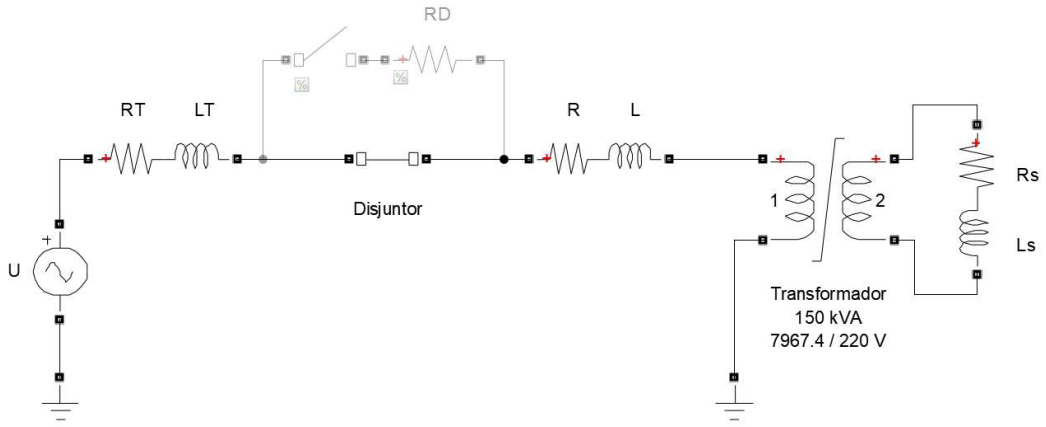
4. SIMULAÇÕES

Nesta seção é apresentada a metodologia utilizada durante a realização das simulações de cada configuração citada acima. Primeiramente, será mostrado o circuito equivalente escolhido para análise, e em seguida os métodos de mitigação serão demonstrados. A escolha dos parâmetros de cada simulação será discutida no Apêndice A.

4.1. SURTO DE ENERGIZAÇÃO EM UM TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA MONOFÁSICO

Para simular a corrente de *inrush* plena em um transformador monofásico, foi utilizado o seguinte modelo em SIMULINK:

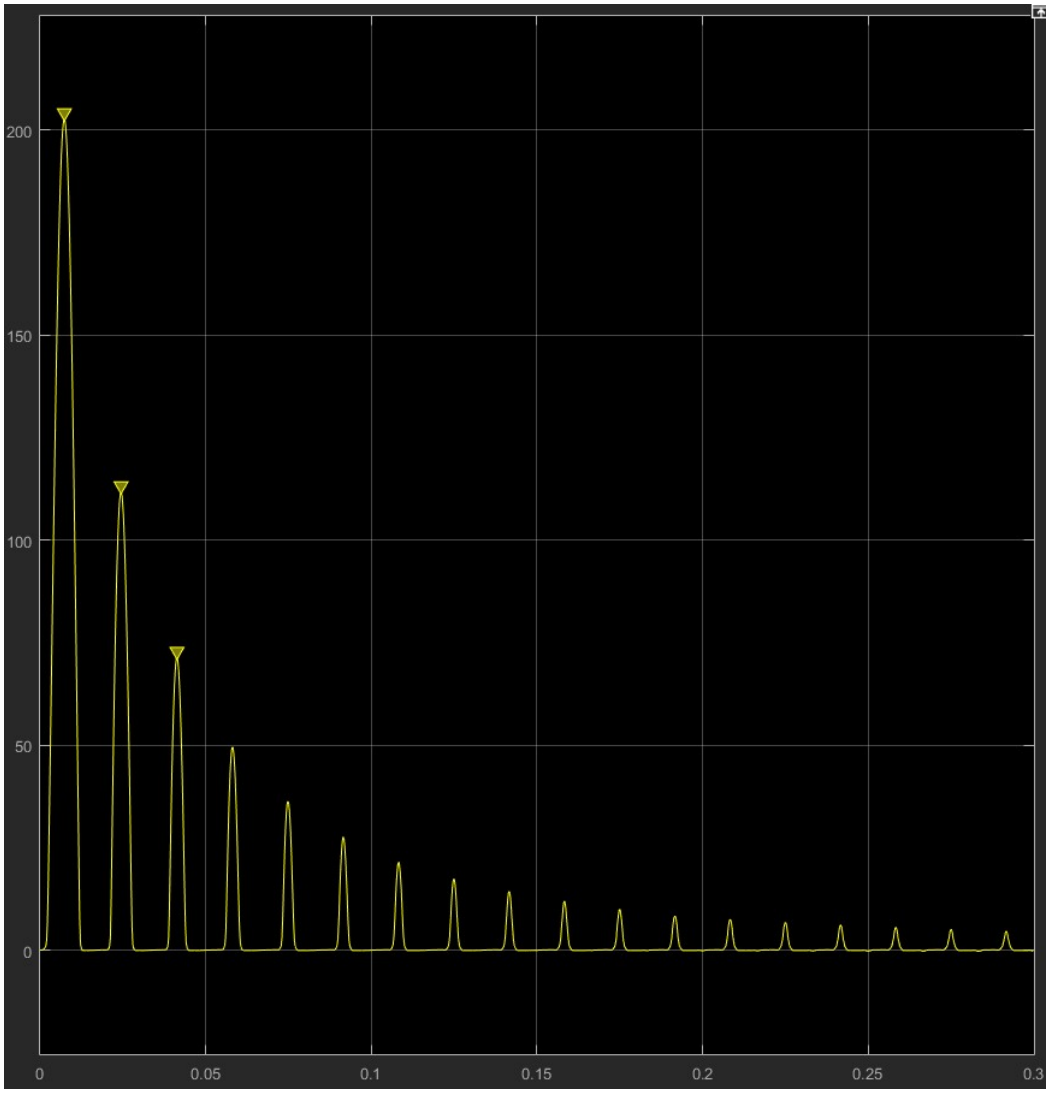
Figura 11: Circuito equivalente de transformador monofásico, inrush pleno.



Fonte: Autoria própria.

RT e LT correspondem à impedância da linha de transmissão a jusante do primário transformador. Rs e Ls correspondem à impedância equivalente dos enrolamentos do secundário do transformador, enquanto R e L representam a impedância equivalente dos enrolamentos do primário do transformador. A frequência do sistema é 60 Hz e a tensão de alimentação é de 7,967 kV.

Figura 12: Inrush em transformador monofásico, sem mitigação.



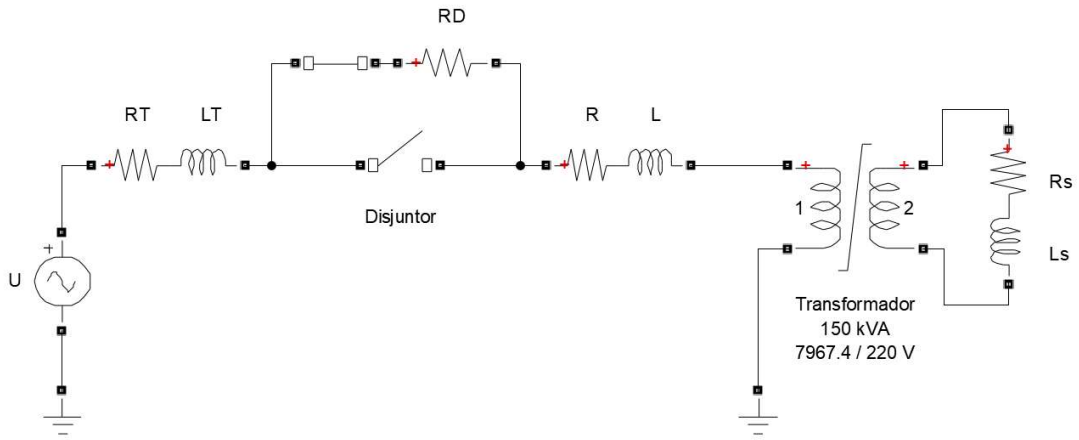
Fonte: Autoria própria.

Observe que a forma de onda é corresponde com a discutida na seção 2, Figura 6. A máxima amplitude, i_{max}, simulada foi de 203 A. A duração do surto foi de 160 ms, ou 9,6 ciclos.

4.2. SURTO DE ENERGIZAÇÃO EM TRANSFORMADOR MONOFÁSICO, COM O EMPREGO DE UM RESISTOR DE PRÉ-INSERÇÃO

O resistor de pré-inserção RD é conectado ao circuito no instante inicial, e substituído pela conexão de regime permanente após o intervalo de chaveamento t_{sw}.

Figura 13: Circuito equivalente de transformador monofásico, com amortecimento resistivo.

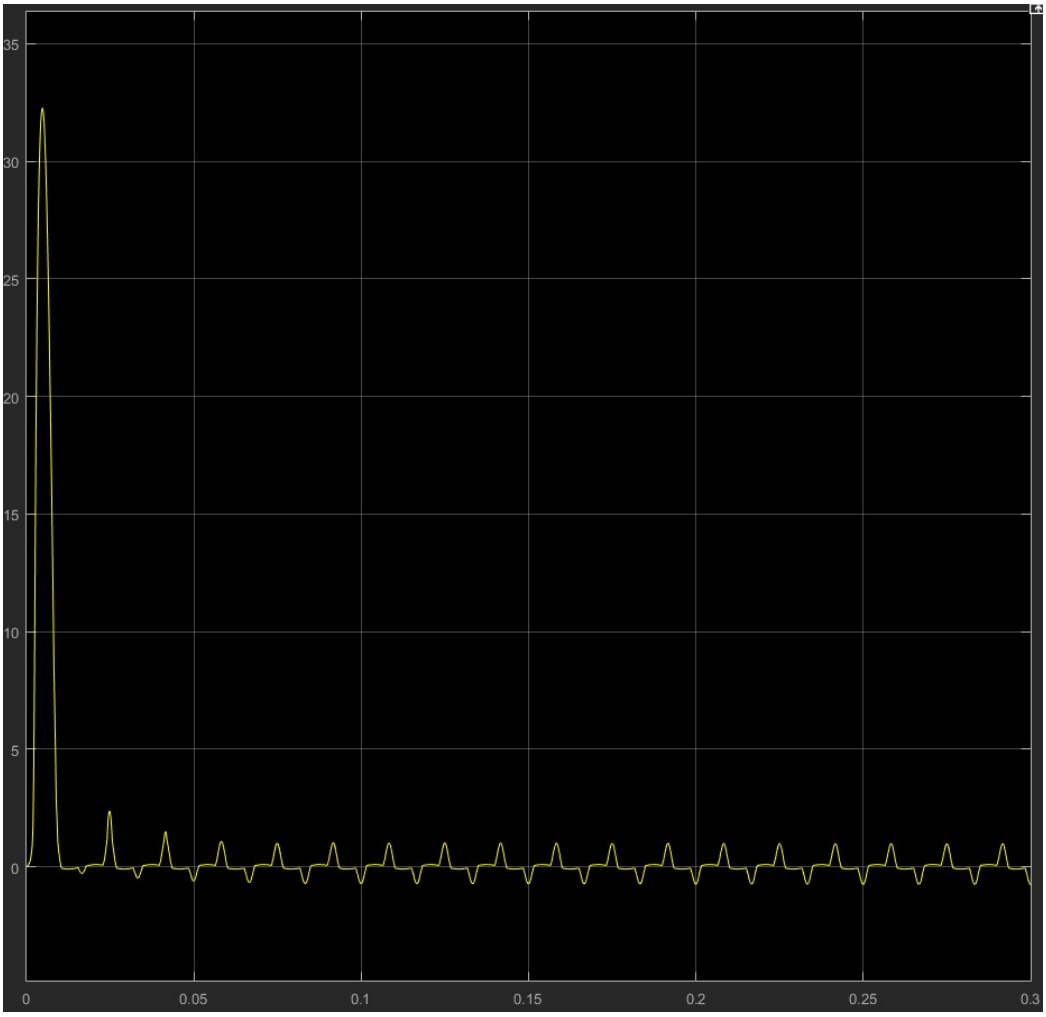


Fonte: Autoria própria.

Seguindo a metodologia de cálculo do valor do resistor RD proposta por Xu et al. (2005), $RD = 320{,}45\ \Omega$. O tempo de chaveamento do resistor de pré-inserção é o tempo de duração do surto $t_{sw} = 160$ ms.

A resposta de corrente no enrolamento primário é a que segue:

Figura 14: Inrush em transformador monofásico, com resistor de pré-inserção.



Fonte: Autoria própria.

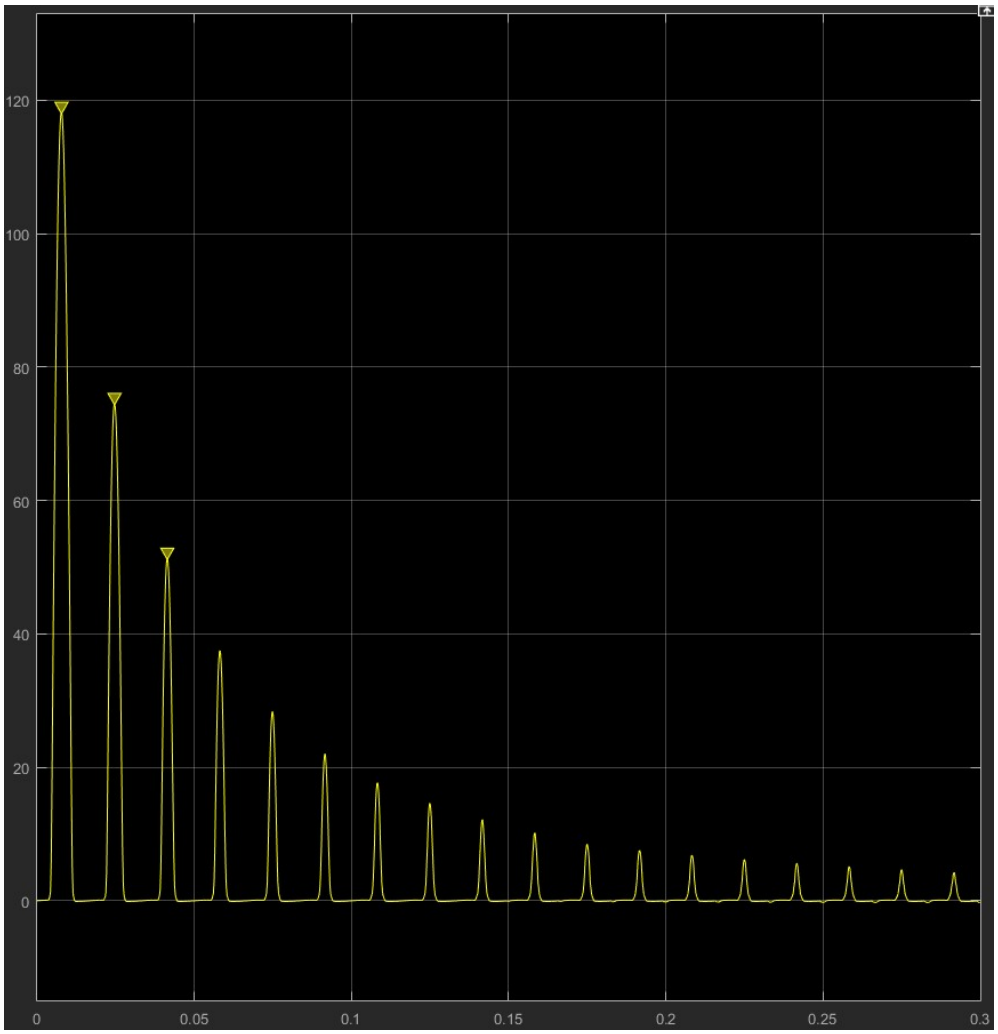
Rapidamente observa-se a redução na duração do surto, bem como a redução da amplitude máxima da corrente de energização.

Com o emprego do resistor de 320,45 Ω, a nova corrente máxima de surto é $i_{max} = 32{,}3\ A$. A duração do surto é 42 ms.

4.3. SURTO DE ENERGIZAÇÃO EM TRANSFORMADOR MONOFÁSICO, COM CANCELAMENTO DE FLUXO RESIDUAL

O circuito equivalente para a simulação do método é o mesmo encontrado na Figura 11. Para avaliar o método, simulamos o pior caso de fluxo residual, e em seguida comparamos com o caso em que o fluxo residual em todas as fases seja nulo. A reposta de corrente para o caso da existência de fluxo residual se encontra na subseção 4.1, Figura 12. A resposta de corrente para o caso de fluxo residual nulo é a que segue:

Figura 15: Inrush em transformador monofásico, com cancelamento de fluxo.



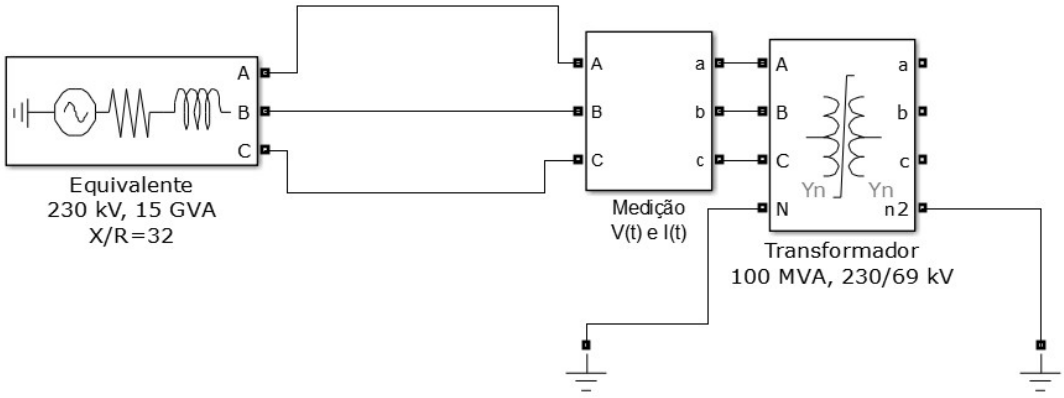
Fonte: Autoria própria.

A máxima amplitude, i_{max}, simulada foi de 118,30 A. A duração do surto foi de 160 ms, ou 9,6 ciclos.

4.4. SURTO DE ENERGIZAÇÃO EM UM TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA TRIFÁSICO YN-YN

O circuito equivalente para as simulações com transformador de potência trifásico é apresentado na Figura 16.

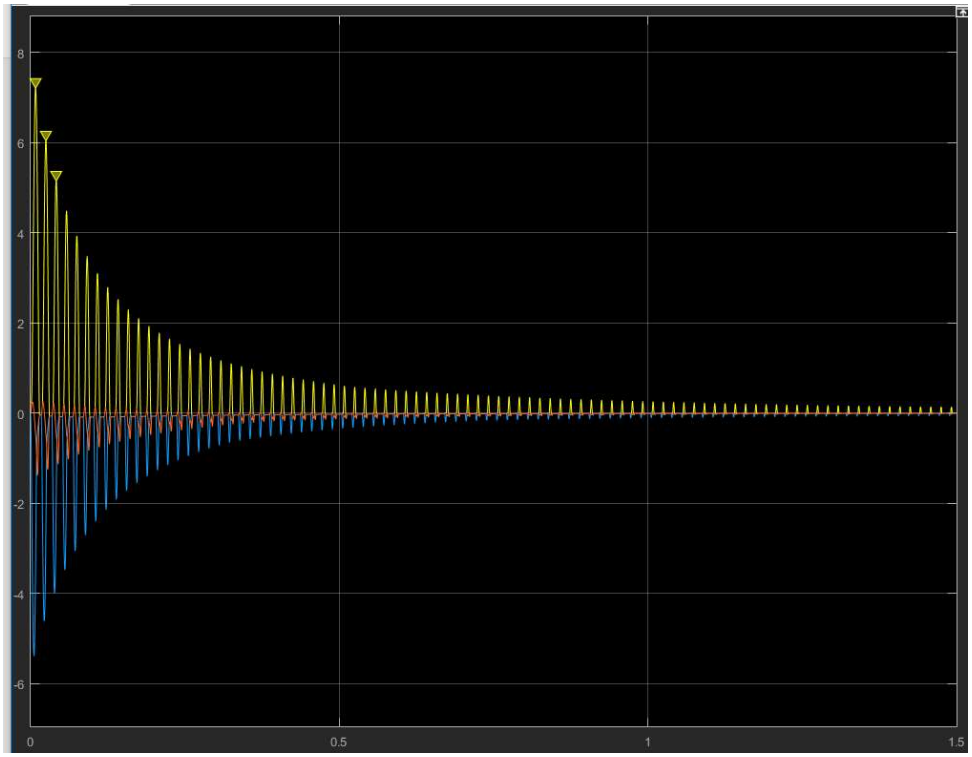
Figura 16: Circuito equivalente de transformador trifásico, inrush pleno.



Fonte: Autoria própria.

A resposta da corrente nos enrolamentos primários está demonstrada na Figura 17. A corrente máxima de energização é $i_{max} = 7{,}24\ pu$. A duração do surto, 325 ms ou 19,5 ciclos.

Figura 17: Inrush em transformador trifásico, sem mitigação.

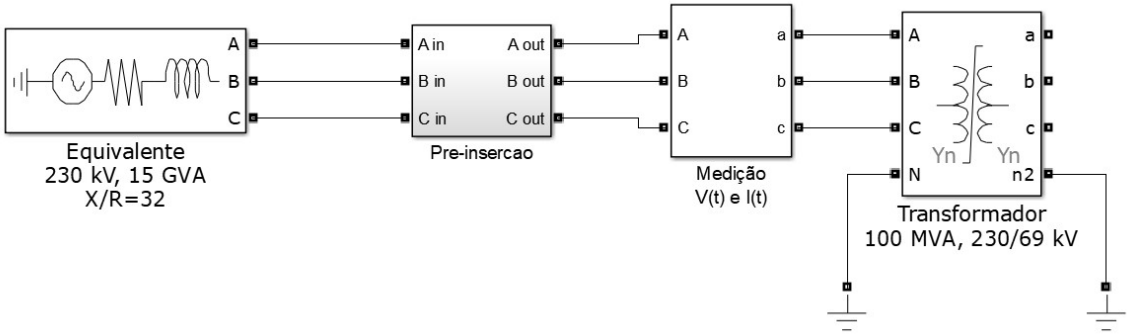


Fonte: Autoria própria.

4.5. SURTO DE ENERGIZAÇÃO EM TRANSFORMADOR TRIFÁSICO, COM O EMPREGO DE UM RESISTOR DE PRÉ-INSERÇÃO

De maneira análoga ao transformador monofásico, insere-se um resistor em série com cada fase do enrolamento primário, que é removido do circuito após o instante de surto inicial. O circuito equivalente para esse caso é o demonstrado na Figura 18:

Figura 18: Circuito equivalente de transformador trifásico, com resistor de pré-inserção.

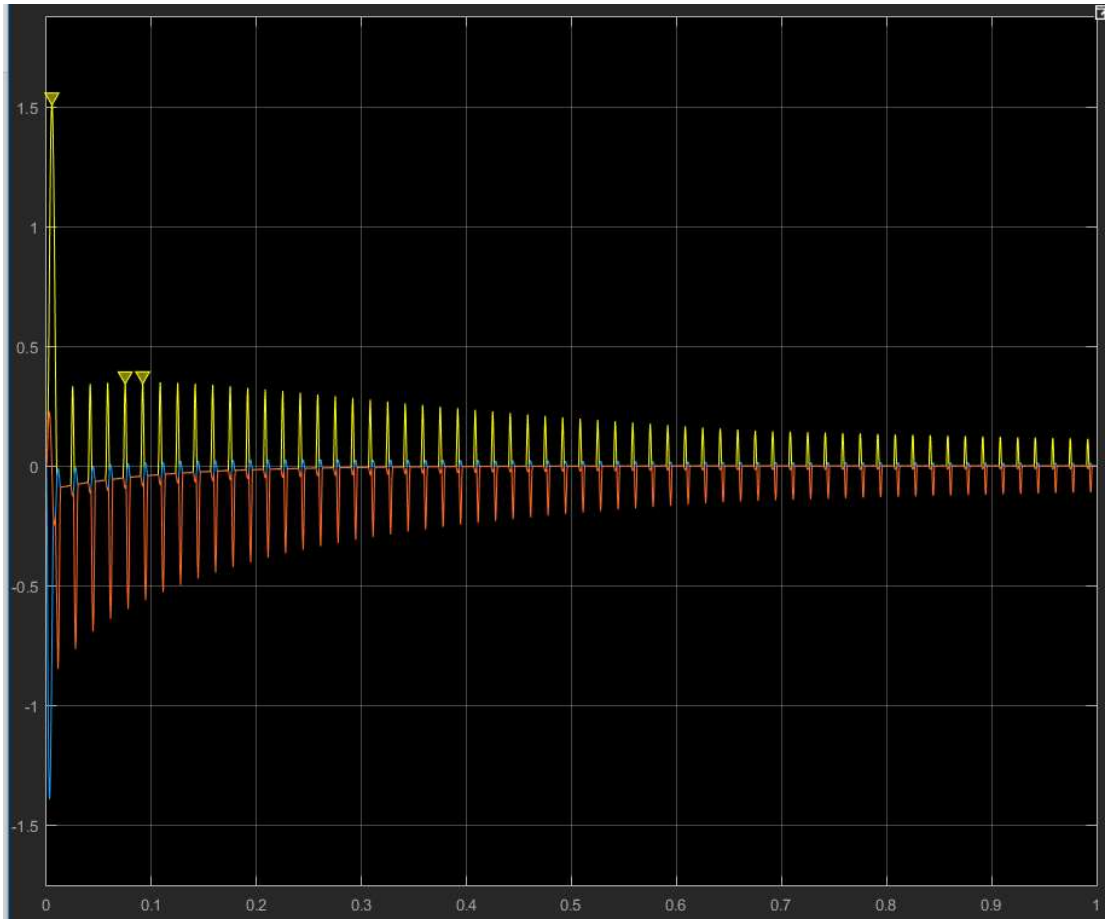


Fonte: Autoria própria.

A estrutura do bloco de pré-inserção está detalhada no Apêndice A. De modo a comparar o desempenho dos resistores de pré-inserção com o resistor de neutro do método de chaveamento sequencial que será validado na subseção seguinte, calculamos o valor das três resistências com a mesma metodologia recomendada por Xu et al. (2005). Deste modo, o valor das três resistências em série é $311\ \Omega$.

A resposta da corrente nas três fases obtida é a demonstrada pela Figura 19:

Figura 19: Inrush em transformador trifásico, com resistor de pré-inserção.



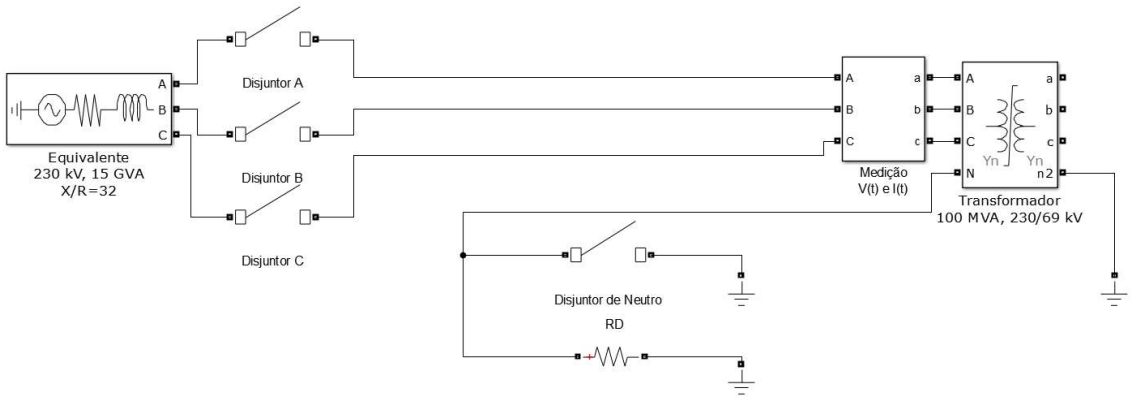
Fonte: Autoria própria.

O pico de corrente foi observado pela fase A, com amplitude igual a $i_{max} = 1{,}52\ pu$. A duração do surto foi substancialmente reduzida, visto que apenas a primeira oscilação assumiu valores superiores a 1 pu.

4.6. Surto de Energização em Transformador Trifásico, com o Emprego do Método de Chaveamento Sequencial

O mesmo modelo equivalente das subseções anteriores foi modificado para acomodar o método de chaveamento sequencial:

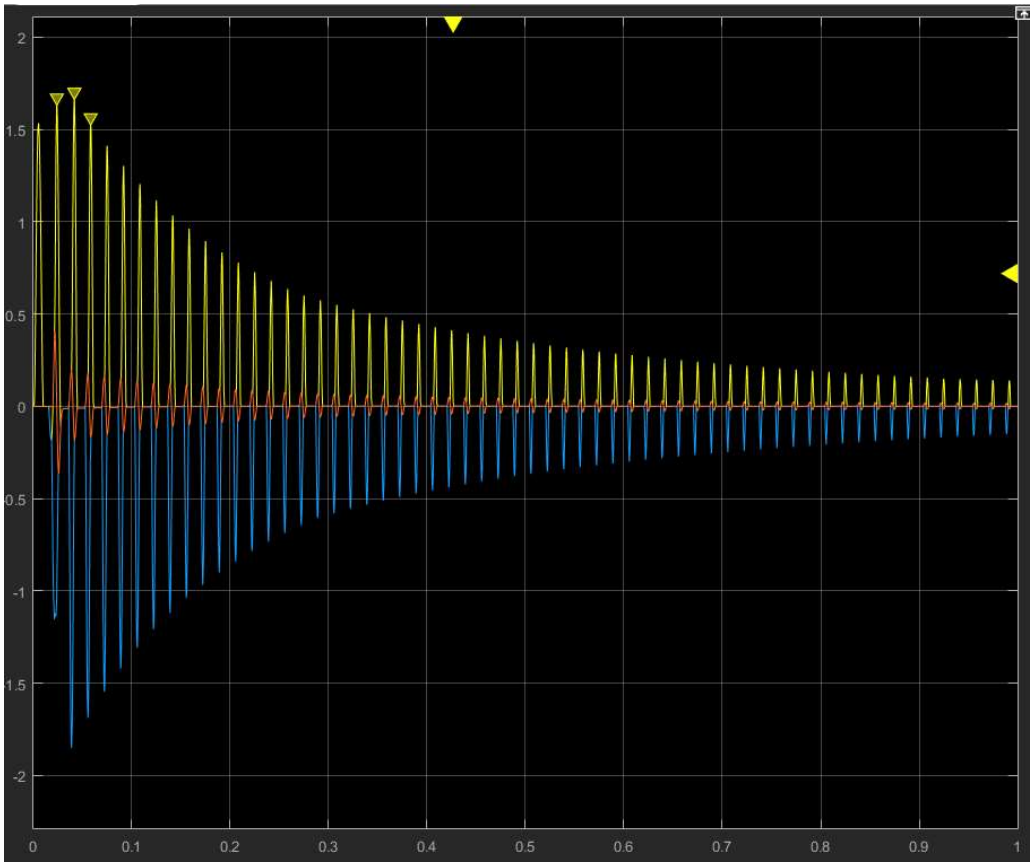
Figura 20: Circuito equivalente de transformador trifásico, com chaveamento sequencial.



Fonte: Autoria própria.

O resistor de neutro tem 311 Ω e a sequência de chaveamento tem a ordem: A, B, C, neutro. Os intervalos de chaveamento são de 10ms por manobra. A resposta de corrente obtida foi:

Figura 21: Inrush em transformador trifásico, com chaveamento sequencial.



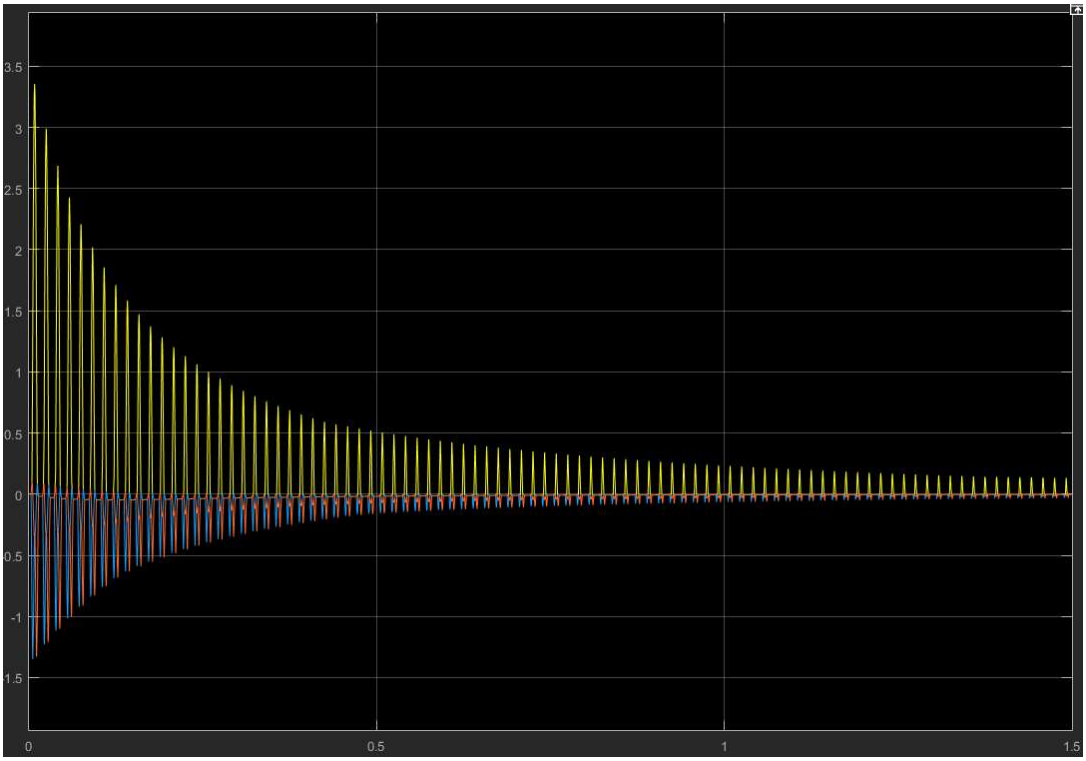
Fonte: Autoria própria.

A amplitude máxima foi observada para a fase B no valor $i_{max} = 1{,}83\ pu$. O surto apresentou duração de 140 ms (8,4 ciclos) do momento do chaveamento até o ponto em que todas as fases assumem corrente menor ou igual a 1 pu.

4.7. Surto de Energização em Transformador Trifásico, com Cancelamento de Fluxo Residual

O circuito equivalente para a simulação do método é o mesmo encontrado na Figura 16. Para avaliar o método, simulamos o pior caso de fluxo residual, e em seguida comparamos com o caso em que o fluxo residual em todas as fases seja nulo. A reposta de corrente para o caso da existência de fluxo residual se encontra na subseção 4.3, Figura 17. A resposta de corrente para o caso de fluxo residual nulo é a que segue:

Figura 22: Inrush em transformador trifásico, fluxo residual nulo.



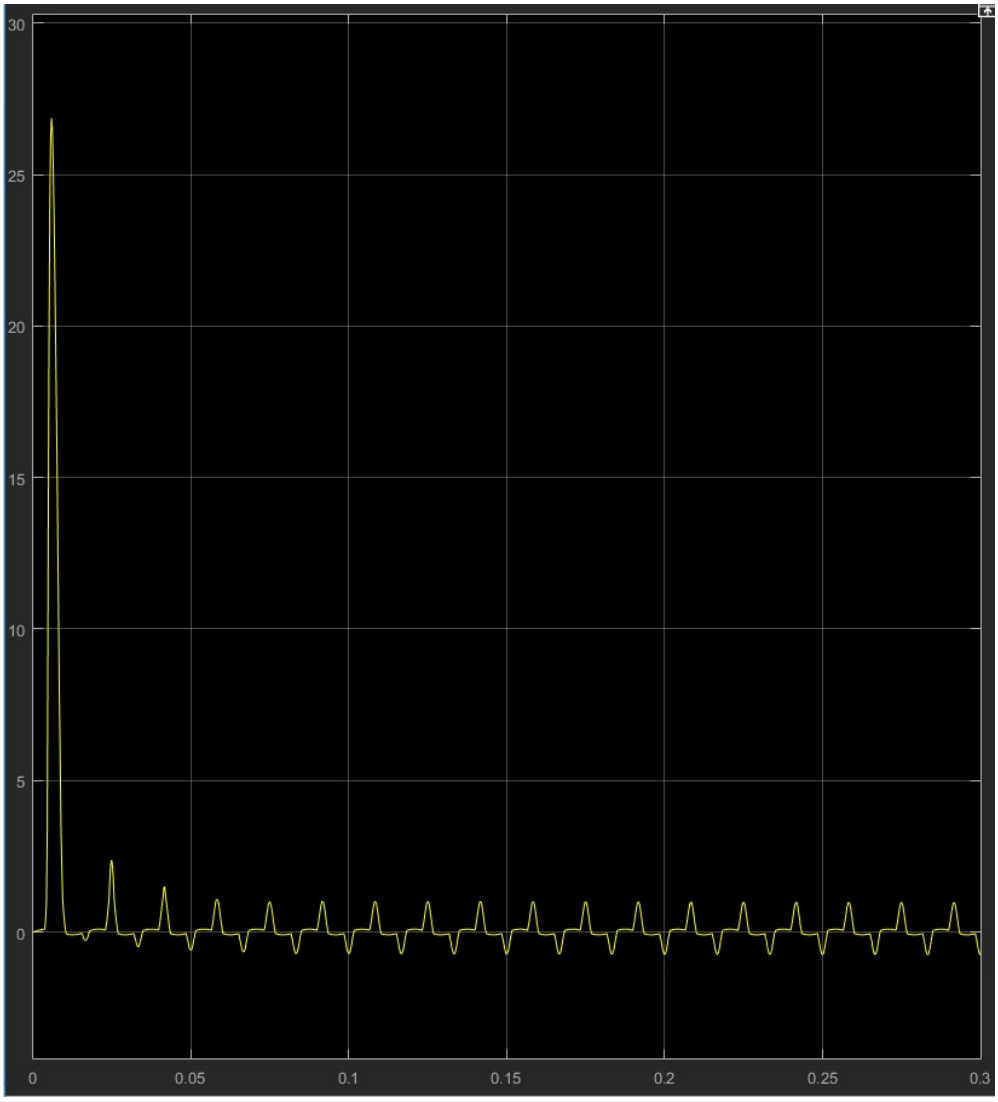
Fonte: Autoria própria.

Foi observada uma amplitude de corrente máxima $i_{max} = 3{,}35\ pu$. O surto apresentou duração de 240 ms até o momento em que todas as correntes de linha sejam menores ou iguais a 1pu.

4.8. O Resultado da Combinação de Métodos de Mitigação

É possível obter resultados ainda mais satisfatórios na redução das correntes de *inrush*, combinando os métodos de cancelamento de fluxo com uma das técnicas de amortecimento resistivo. A Figura 23 mostra a resposta da corrente no transformador monofásico, aplicando-se os dois métodos de mitigação discutidos.

Figura 23: Inrush em transformador monofásico, fluxo residual nulo + resistor de pré-inserção.

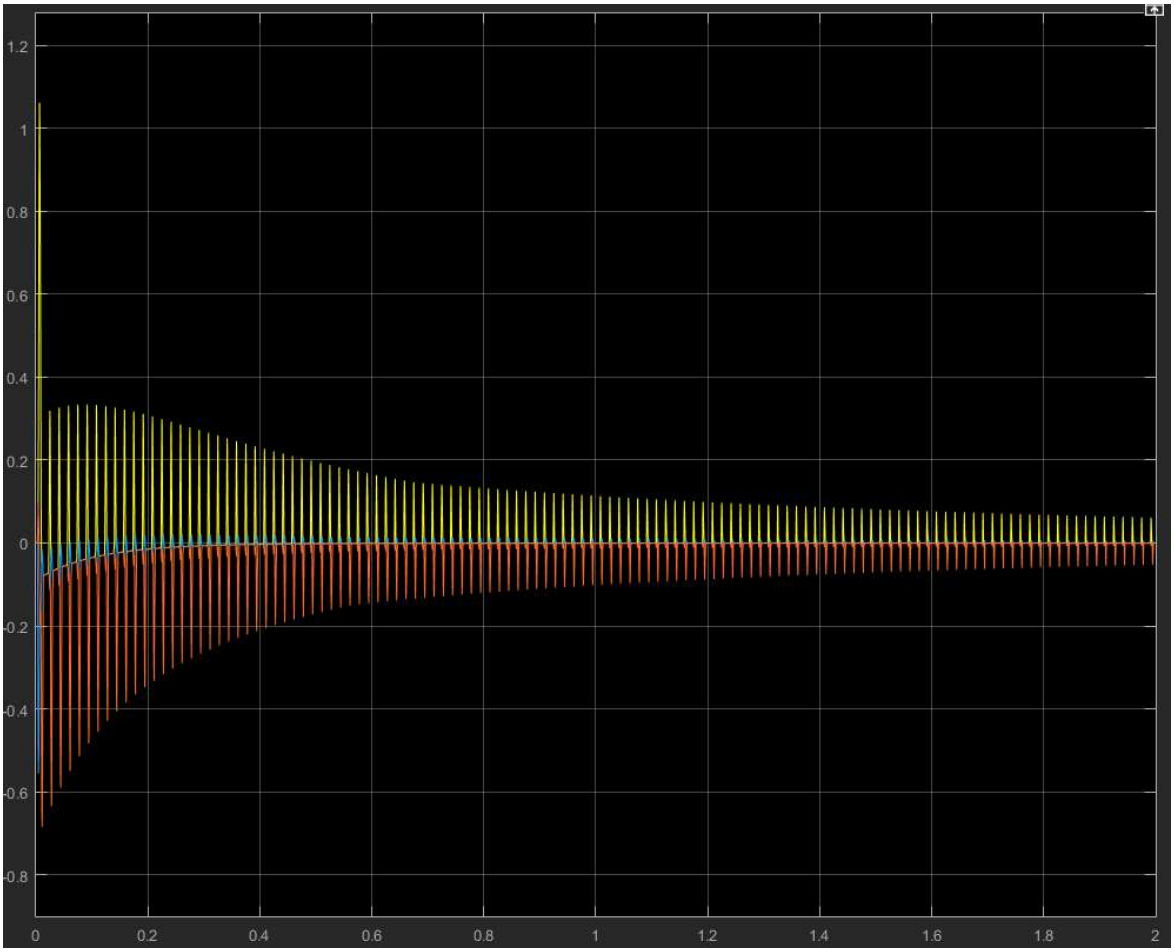


Fonte: Autoria própria.

Foi observada uma amplitude de corrente máxima $i_{max} = 26{,}9\ A$. O surto apresentou duração de 42 ms.

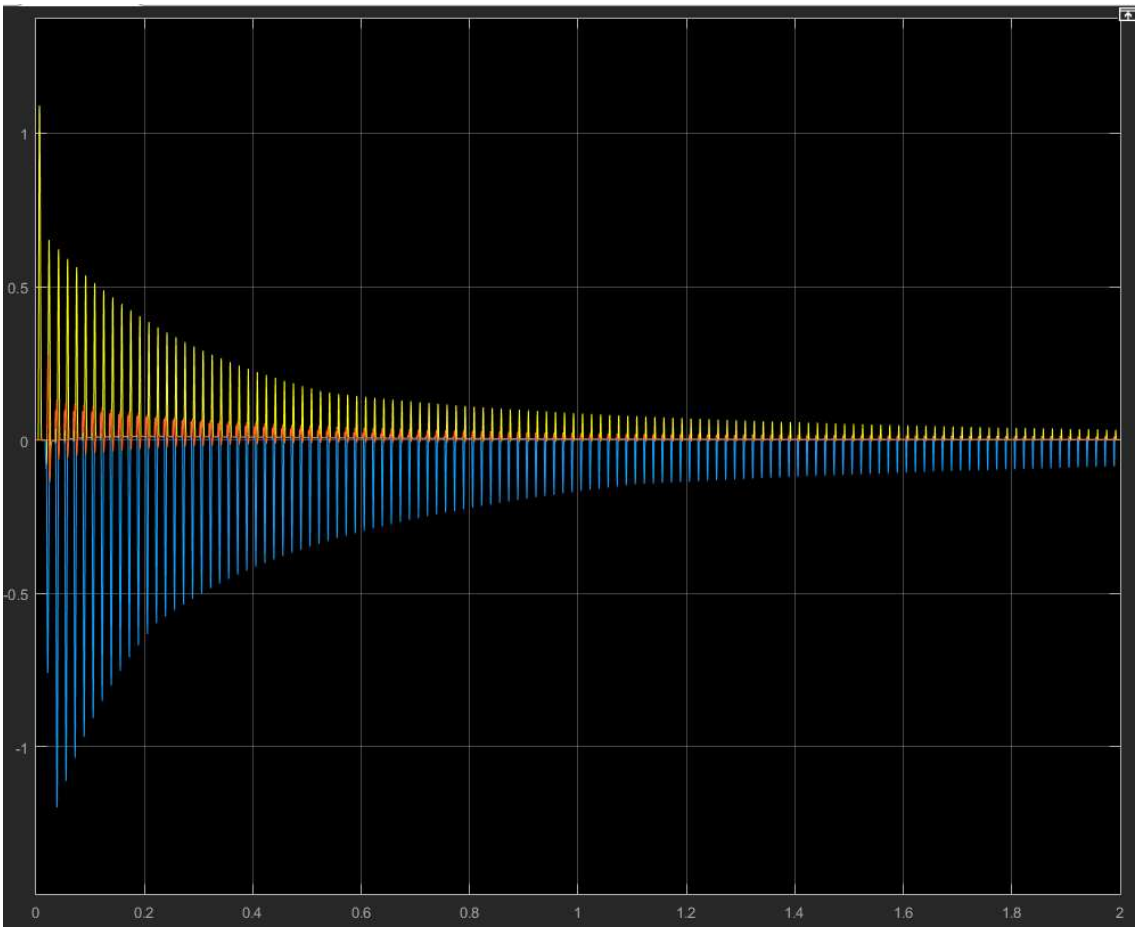
Repetindo o mesmo procedimento para o transformador trifásico, obtemos os seguintes resultados:

Figura 24: Inrush em transformador trifásico, fluxo residual nulo + resistor de pré-inserção.



Fonte: Autoria própria.

Figura 25: Inrush em transformador trifásico, fluxo residual nulo + chaveamento sequencial.



Fonte: Autoria própria.

A combinação dos métodos de cancelamento de fluxo e resistor de pré-inserção promoveu um pico de corrente máxima $i_{max} = 1{,}06\ pu$, enquanto que o uso simultâneo das técnicas de cancelamento de fluxo e chaveamento sequencial apresentou uma resposta de corrente máxima $i_{max} = 1{,}09\ pu$.

5. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Da seção anterior, observa-se que todos os métodos de mitigação se mostraram eficazes na redução da amplitude máxima da corrente de *inrush*, i_{max}.

Além da redução na amplitude, os métodos que empregam alguma forma de amortecimento resistivo apresentam também redução substancial na duração do surto. Podemos deduzir essa relação entre a duração da corrente de energização e o amortecimento resistivo da equação explicitada na seção 2:

$$\lambda(t) = \frac{U_m}{\omega}\left[e^{-R/L_m} - \cos \omega t\right] \tag{13}$$

Observe que quão maior a resistência equivalente do percurso elétrico, maior o decaimento exponencial do fluxo de enlace.

A tabela abaixo compara os resultados obtidos das simulações com o modelo de transformador monofásico:

Tabela 1: Comparação do desempenho entre simulações, transformador monofásico.

Método aplicado	$\boldsymbol{i_{max}}$ **(A)**	**Duração do surto (ms)**
Nenhum	203,0	160
Pré-inserção	32,3	42
Cancelamento de fluxo	118,3	160
Pré-inserção + cancelamento de fluxo	26,9	42

Fonte: Autoria própria.

A técnica de pré-inserção apresenta uma redução de 84,09% na amplitude de corrente máxima, e uma redução de 73,75% na duração do surto.

O método de cancelamento de fluxo apresenta uma redução de 41,72% na amplitude de corrente máxima, mas não trouxe melhorias na duração do surto.

A combinação das duas técnicas apresenta uma redução de 86,75% na amplitude de corrente máxima.

A tabela 2 compara os resultados obtidos com o modelo de transformador trifásico.

Tabela 2: Comparação do desempenho entre simulações, transformador trifásico.

Método aplicado	$\boldsymbol{i_{max}}$ **(pu)**	**Duração do surto (ms)**
Nenhum	7,24	325
Pré-inserção	1,52	-
Sequencial	1,83	140
Cancelamento de fluxo	3,35	240
Pré-inserção + cancelamento de fluxo	1,06	-
Sequencial + cancelamento de fluxo	1,09	-

Fonte: Autoria própria.

Considerando agora os resultados obtidos das simulações com o transformador trifásico, chega-se às seguintes conclusões:

O emprego do resistor de pré-inserção reduziu em 79,01% a máxima corrente de surto. A duração do surto foi reduzida a valores desprezíveis.

A técnica de chaveamento sequencial mostrou uma redução na corrente de *inrush* de 74,72%. A duração do surto apresentou redução de 56,92%.

Já o método de cancelamento de fluxo apresentou redução de 53,73% em i_{max}, e 26,15% na duração do surto.

As duas formas de combinação de técnicas testadas apresentaram resultados semelhantes, com reduções na corrente de surto máxima de 85,36%, e 84,94%, respectivamente.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante o trabalho realizado verificou-se a eficácia de variados métodos de mitigação de correntes de energização em transformadores de potência. Reduções de até 84% na corrente máxima de *inrush* foram simulados, para métodos aplicados individualmente. Além disso, também mostrou-se a possibilidade de aplicação de métodos diferentes simultaneamente, para resultados ainda mais satisfatórios na redução da magnitude do *inrush* e da duração do surto. Combinando-se o método de cancelamento de fluxo com métodos de amortecimento resistivo, uma redução de até 86,75% na magnitude do *inrush* foi observada.

Dessa forma, valida-se a teoria de correntes de energização e as técnicas de mitigação disponíveis na literatura, provando serem estratégias valiosas para o bom funcionamento de transformadores de potência, equipamentos essenciais para sistemas elétricos de potência. Acredita-se que com o emprego das técnicas discutidas na seção 3 do trabalho, vários benefícios são alcançados: redução do número de manobras de proteção indevidas, aumento da vida útil de equipamentos elétricos, sobretudo dos transformadores de potência em questão, redução da intensidade dos afundamentos de tensão, etc.

REFERÊNCIAS

GUERRA, F. das C. F. "**Distúrbios de Correntes em Redes Elétricas: Notas de aula**". 2018.

ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O. "**Fundamentals of Electric Circuits**". New York, NY: McGraw-Hill, 2013. ISBN 0073380571.

MARDEGAN, C. "**Proteção dos Transformadores - Parte 1**". O Setor Elétrico, p. 11, setembro 2010.

UMANS, S. D. "**Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley**". 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014. ISBN 978-85-8055-373-4.

BRONZEADO, H. et al. "**Benefícios Operacionais da Aplicação de Manobras Controladas de Equipamentos de Alta Tensão**". 2014.

BRONZEADO, H. et al. "**Transformer Inrush is Over: An Experience with a 100MVA, 230/138 kV Three-phase Transformer Controlled Energizing**". 2009.

CUI, Y. et al. "**A Sequential Phase Energization Technique for Transformer Inrush Current Reduction - Part I: Simulation and Experimental Results**". IEEE Transactions on Power Delivery, v. 20, n. 2, p. 943-949, April 2005. ISSN 0885- 8977.

XU, W. et al. "**A Sequential Phase Energization Technique for Transformer Inrush Current Reduction - Part II: Theoretical Analysis and Design Guide**". IEEE Transactions on Power Delivery, v. 20, n. 2, p. 950-957, April 2005. ISSN 0885- 8977.

KOVAN, B. et al. "**Mitigation of Inrush Currents in Network Transformers by Reducing the Residual Flux with an Ultra-low-frequency Power Source**". IEEE Transactions on Power Delivery, v. 26, n. 3, p. 1563-1570, July 2011. ISSN 0885-8977.

BRUNKE, J, FROHLICH K. "**Elimination of Transformer Inrush Currents by Controlled Switching – Part I: Theoretical Considerations**". IEEE Transactions on Power Delivery, v. 16, n. 2, p. 276-280, April 2001. ISSN 0885-8977.

BRUNKE, J, FROHLICH K. "**Elimination of Transformer Inrush Currents by Controlled Switching – Part II: Application and Performance Considerations**". IEEE Transactions on Power Delivery, v. 16, n. 2, p. 281-285, April 2001. ISSN 0885-8977.

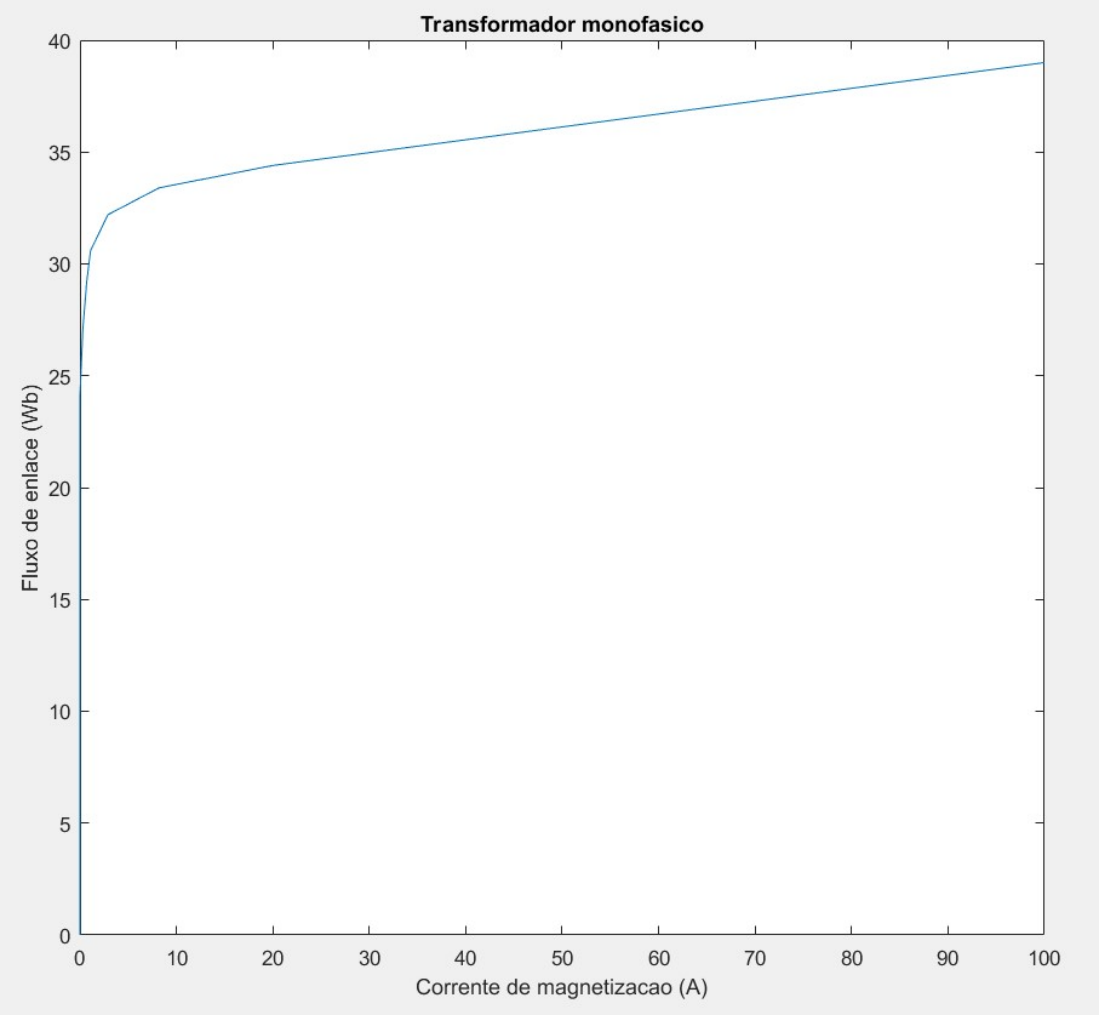
MORK, B. et al. "**Hybrid Transformer Model for Transient Simulation: Part I - Development and Parameters**". In: 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting. [S.l.: s.n.], 2007. p. 1-1. ISSN 1932-5517.

KAHROBAEE, S, ALGRAIN, M, ASGAPOOR, S. "**Investigation and Mitigation of Transformer Inrush Current During Black Start of an Independent Power Producer Plant**". University of Nebraska – Lincoln. Lincoln, Nebraska, 2012.

APÊNDICE A – CARACTERÍSTICAS DE SATURAÇÃO

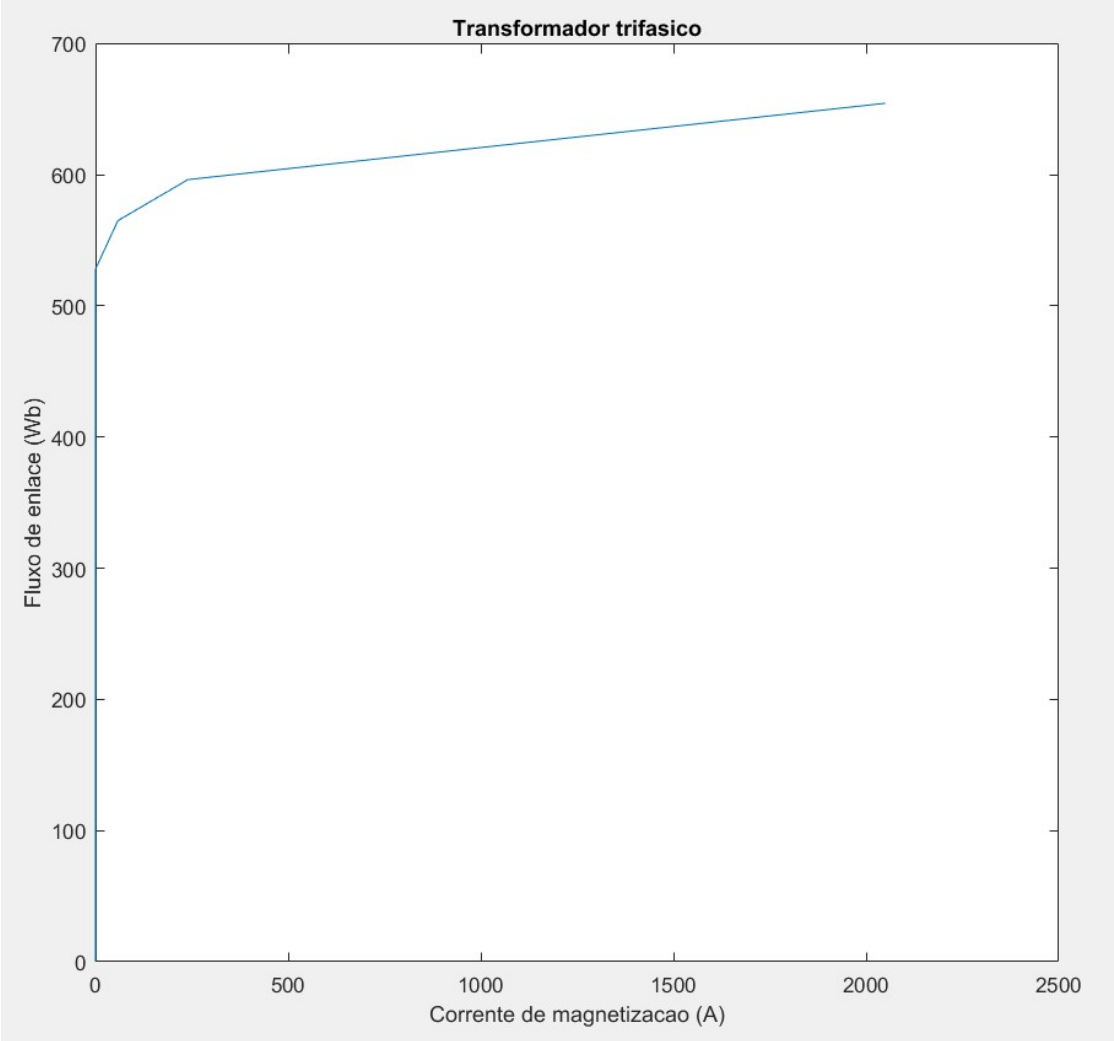
Os modelos de transformador utilizados em SIMULINK tiveram suas características de saturação definidas a partir da técnica de linearização por partes, técnica amplamente utilizada na literatura (Guerra). A Figura 26 mostra a curva de saturação do transformador monofásico. Para o transformador trifásico, foi utilizada a curva de saturação verificada na figura 27.

Figura 26: Característica de saturação, transformador monofásico.



Fonte: Autoria própria.

Figura 27: Característica de saturação, transformador trifásico.



Fonte: Autoria própria.

A tabela abaixo traz os pontos utilizados para construir as curvas:

Tabela 3: Pares ordenados das curvas de saturação.

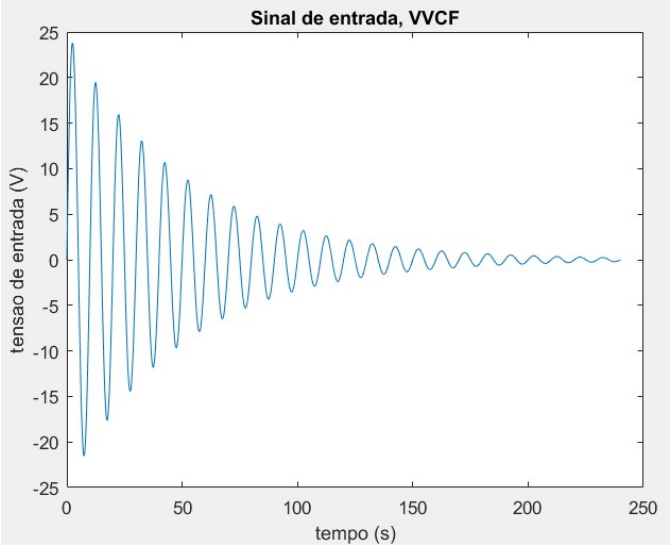
Tipo de transformador	**Pares ordenados (x,y)**
Transformador monofásico	[0 0; 0 24.1; 0.3 27.1; 0.7 29.2; 1.1 30.6; 2.9 32.2; 8.2 33.4; 20 34.4; 100 39]
Transformador trifásico	[0 0;0 528.03;58.132 565;239.8 596.3;2049.6 654.5]

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE B –ALGORITMO PARA CANCELAMENTO DE FLUXO

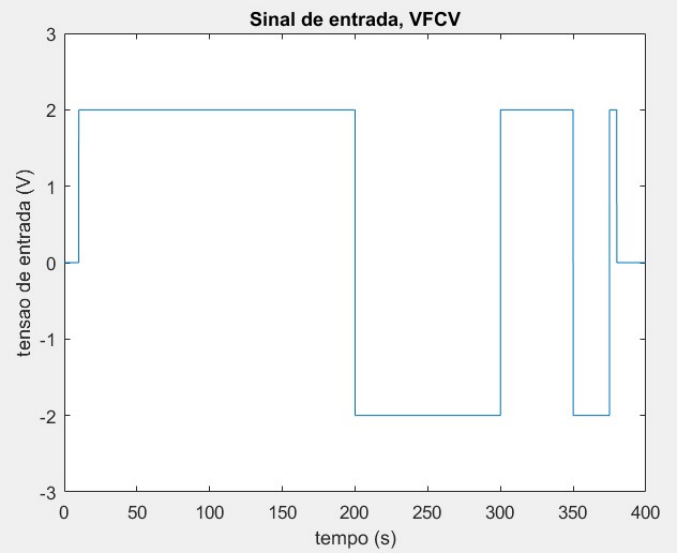
Em MATLAB, foram desenvolvidos dois métodos de cancelamento de fluxo, baseados na obra de Kovan et al. O primeiro aplica a técnica VVCF exatamente como a discutida na subseção 3.3.1, enquanto o segundo aplica a técnica VFCV adaptada, onde o sinal da tensão de entrada desmagnetizante é senoidal, com frequência constante de 0.1Hz e decaimento exponencial. Os sinais de entrada desmagnetizante utilizados são mostrados nas Figuras 28 e 29:

Figura 28: Sinal de entrada desmagnetizante, VVCF.



Fonte: Autoria própria.

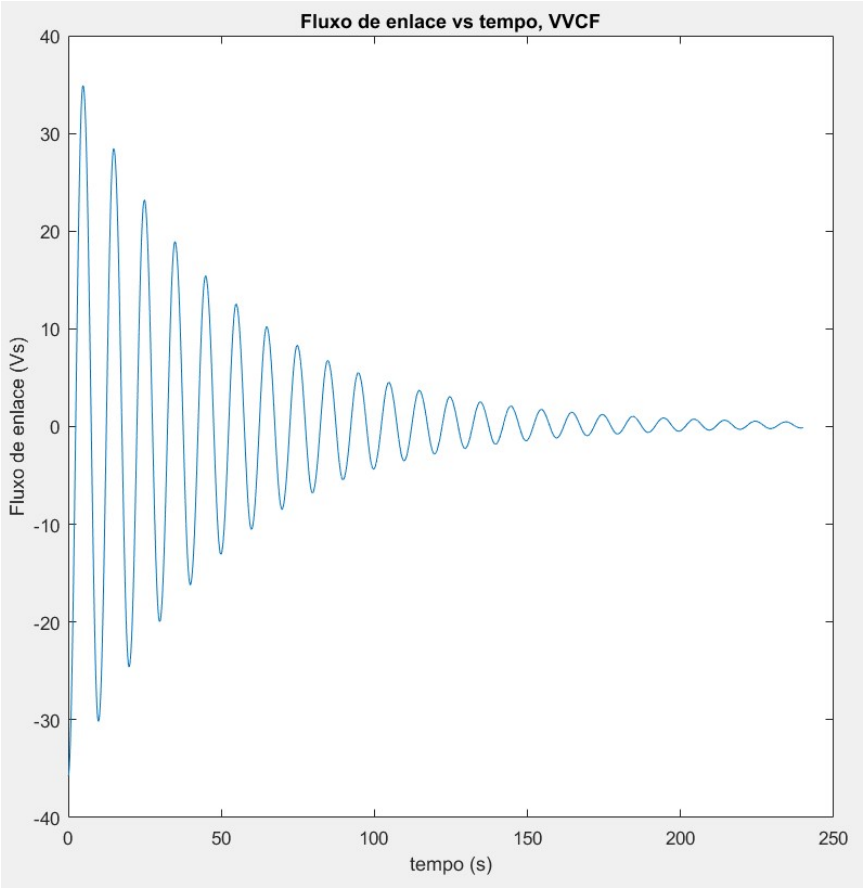
Figura 29: Sinal de entrada desmagnetizante, VFCV.



Fonte: Autoria própria.

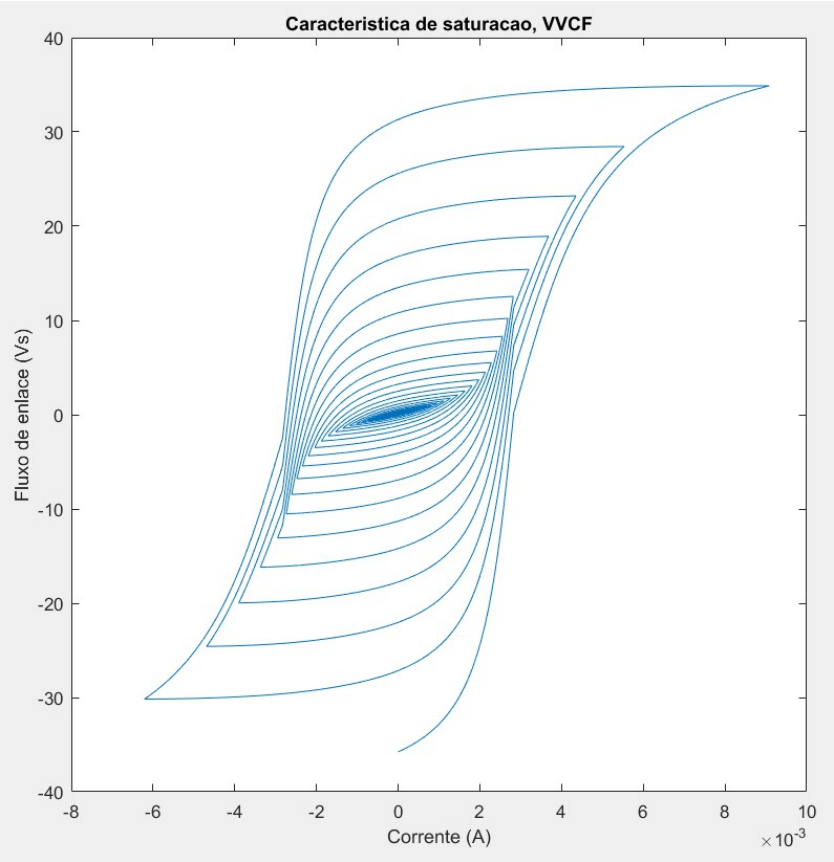
Os resultados no cancelamento de fluxo magnético encontram-se nas Figuras 30, 31, 32 e 33:

Figura 30: Fluxo de enlace vs tempo, VVCF.



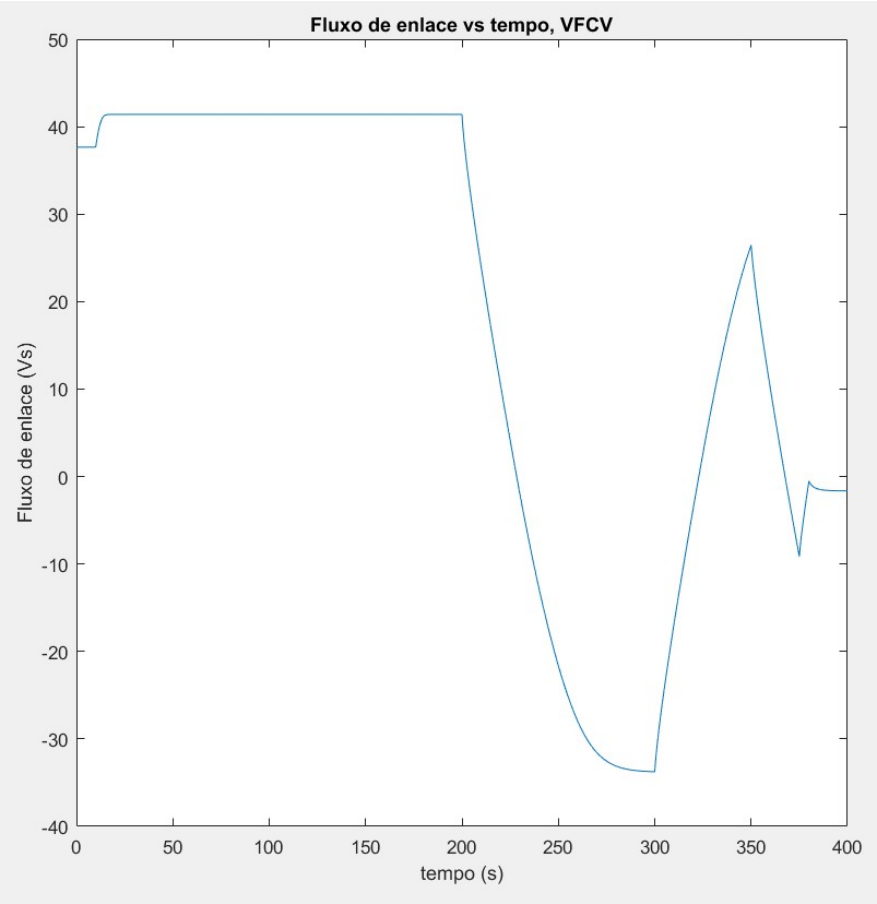
Fonte: Autoria própria.

Figura 31: Característica de saturação, VVCF.



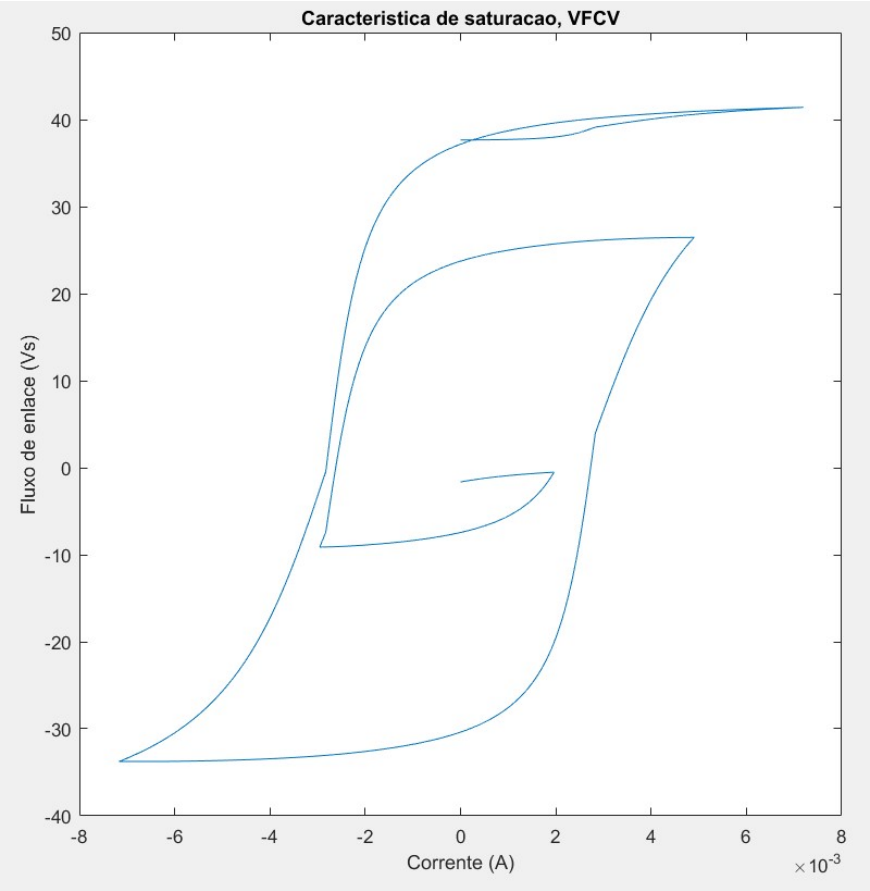
Fonte: Autoria própria.

Figura 32: Fluxo de enlace vs tempo, VFCV.



Fonte: Autoria própria.

Figura 33: Característica de saturação, VFCV.



Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE C – PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO

Os parâmetros do modelo monofásico utilizado para a realização deste trabalho são os que seguem:

Tabela 4: Parâmetros do modelo monofásico.

Parâmetro	**Valor**
Tensão de pico	11267,6 V
Frequência	60 Hz
RT	0,06 Ω
LT	0,24/377 H
RD	320,45 Ω
R	10,1 Ω
L	20,1/377 H
Potência nominal (Transformador)	150 kVA
Tensão nominal (primário)	7967,4 V_{rms}
R1 (primário)	10,44 Ω
L1 (primário)	23,5/377 H
Tensão nominal (secundário)	220 V_{rms}
R2 (secundário)	$8{,}8 \cdot 10^{-4}$ Ω
L2 (secundário)	$2 \cdot 10^{-3}/377$ H
Resistência de magnetização	120000 Ω
RS	$0{,}32 \cdot 10^{10}$ Ω
LS	0,09/377 H

Fonte: Autoria própria.

Os parâmetros do modelo trifásico utilizado para a realização deste trabalho são os que seguem:

Tabela 5: Parâmetros do modelo trifásico.

Parâmetro	**Valor**
Tensão de linha	230 kV_{rms}
Frequência	60 Hz
Característica X/R	32
Nível de curto-circuito trifásico a tensão nominal	$15 \cdot 10^9$ VA
Potência nominal (Transformador)	150 MVA
Tensão nominal (primário)	230 kV_{rms}
R1 (primário)	8,062 Ω
L1 (primário)	0,27742 H
Tensão nominal (secundário)	69 kV_{rms}
R2 (secundário)	0,7251 Ω
L2 (secundário)	0,024967 H
Resistência de magnetização	$1.0104 \cdot 10^6$ Ω
L0	0,70161 H

Fonte: Autoria própria.