

Correntes Transitórias de *Inrush* e Forças Eletromagnéticas em Transformadores de Potência: Uma Análise Baseada em Engenharia Assistida por Computador

Gabriel C. Nogueira * Richard G. Cornelius * Leonardo H. Medeiros *
Micael M. Oliveira * Vitor C. Bender * Carlos E. G. Falcão *
Tiago B. Marchesan * Rodinei Carraro **

* Instituto de Redes Inteligentes, Universidade Federal de Santa Maria, RS, (e-mail: gabrielnog89@gmail.com).

** Companhia Estadual de Energia Elétrica - CEEE, Santa Maria, RS, (e-mail: rodineiC@ceee.com.br).

Abstract: This article performs the electromagnetic study of a transformer prototype, through the application of computer simulations with the Finite Element Method (FEM), using the ANSYS Maxwell[©] program. The study aims to analyze the transient energizing currents in transformers and the consequent Lorentz electromagnetic forces in the equipment windings. For this, the geometry of the transformer windings is designed with divisions, allowing the measurement of radial and axial Lorentz forces at different locations in the windings. Four cases were simulated, each case refers to a reclosing instant in the voltage wave angle. Two cases are recurrent in the bibliography, such as maximum and minimum *Inrush* current situations. The other two cases are intermediate and proved to be relevant for understanding the operation and design of transformers.

Resumo: O presente artigo realiza o estudo eletromagnético de um protótipo de transformador, através da aplicação de simulações computacionais com o Método dos Elementos Finitos (MEF), usando o programa ANSYS Maxwell[©]. O estudo visa analisar as correntes transitórias de energização em transformadores e as consequentes forças eletromagnéticas de Lorentz nos enrolamentos do equipamento. Para isso, a geometria dos enrolamentos do transformador é desenhada com divisões, permitindo mensurar as forças de Lorentz radiais e axiais em diferentes locais dos enrolamentos. Quatro casos foram simulados, cada caso refere-se a um instante de religamento no ângulo da onda de tensão. Dois casos, são recorrentes na bibliografia, como situações de corrente de *Inrush* máximo e mínimo. Os outros dois casos são intermediários e mostraram-se relevantes para o entendimento da operação e projeto de transformadores.

Keywords: ANSYS Maxwell[©]; Computer Aided Engineering; Electromagnetic Simulations; *Inrush* Currents; Lorentz forces; Power Transformers; Reclosing Currents.

Palavras-chaves: ANSYS Maxwell[©]; Correntes de Partida; Correntes de Religamento; Engenharia Assistida por Computador; Forças de Lorentz; Simulações Eletromagnéticas; Transformadores de Potência.

1. INTRODUÇÃO

Os transformadores são componentes importantes do sistema de distribuição e transmissão de eletricidade. Se caracterizam por apresentar elevados custos de fabricação, manutenção e monitoramento. Quando um transformador é danificado, ele não apenas incorre em altos custos de reparo ou substituição, mas também pode resultar em maiores perdas econômicas devido à perda temporária da capacidade de transmissão de energia no sistema (Zhang et al. (2021)).

Durante a operação do sistema elétrico, correntes de alta magnitude ocorrem na energização de transformadores, causadas pela saturação de seu núcleo ferromagnético.

Essas altas correntes, denominadas correntes de partida ou de energização, comumente usado o termo inglês *inrush*, podem causar diversos efeitos adversos na rede elétrica ou nos transformadores (Neves et al. (2011)).

O fenômeno das correntes de partida em transformadores é afetado por vários fatores, por exemplo, o ângulo de fase de comutação da tensão, a carga conectada ao transformador, magnetismo residual e a estrutura do transformador. Em operação sem carga, a corrente que circula no transformador tem valor reduzido e não pode ultrapassar 10% da corrente nominal. Entretanto, a operação sem carga do transformador produzirá uma grande corrente de energização, a duração dessa corrente pode chegar a dezenas de segundos e sua amplitude excede, múltiplas vezes, a

corrente nominal do transformador, superando, o pico da corrente de curto-circuito. O pico da corrente de energização pode levar à deformação do enrolamento do transformador, danificar a isolação do enrolamento e causar uma operação falsa da proteção diferencial, afetando a operação segura e estável do sistema de energia. Normalmente, os transformadores são testados quanto à resistência a curto-circuito, mas os testes relativos às correntes de energização do transformador não são abundantes (Fonseca et al. (2018), Zhang et al. (2021), Bao Doan and Phi Do (2021))).

Mesmo em casos de correntes de partida com picos 30% inferiores aos causados por correntes de curto-circuito, as forças eletromagnéticas da corrente de energização tem amplitudes semelhantes às causadas no curto-circuito. Isso, se deve ao tempo de exposição às correntes de partida ser consideravelmente maior do que a corrente de curto-circuito. Também, deve ser considerado que a presença da corrente de partida é muito mais frequente, pois se trata de uma operação normal do serviço (Neves et al. (2011)).

As estatísticas mostram que os danos aos transformadores ocorrem, principalmente, na exposição dos enrolamentos às correntes de partida, em condições de estresse mecânico produzido por forças de Lorentz. As forças de Lorentz causam esforços mecânicos nos enrolamentos, simultaneamente nas direções radial e axial. Em geral, é muito difícil notar um defeito eletromecânico nos enrolamentos dos transformadores, pois mesmo com o enrolamento deformado, o equipamento pode operar normalmente. Entretanto, a ação frequente de forças nos enrolamentos resulta em um fenômeno cumulativo, reduzindo ainda mais a suportabilidade mecânica dos condutores, que pode colapsar e causar a falha irreversível do equipamento (Fonseca et al. (2016), Fonseca et al. (2018)).

Existe uma relação direta entre, correntes de partida e esforços mecânicos devido às forças eletromagnéticas, em transformadores de potência. Nesse sentido, torna-se pertinente a investigação dos principais fatores que atuam na corrente energização e suas consequências sobre os esforços eletromagnéticos nos enrolamentos do transformador. Também, é pertinente analisar as questões envolvendo os métodos de mitigação desse fenômeno, sendo embasados naqueles fatores. Nesse sentido, realizou-se uma análise que abrange o instante de religamento, as não linearidades do núcleo ferromagnético e o nível de carregamento do transformador. Para isso, um protótipo de transformador foi modelado e simulado no software ANSYS Maxwell ©, que emprega o Método dos Elementos Finitos (MEF). Através da Análise em Elementos Finitos (Finite Element Analysis - FEA), o fenômeno das correntes de religamento em diferentes instantes de tempo da tensão de alimentação foi analisado, verificando o impacto sobre a magnitude e duração da corrente de *Inrush*. Com uma modelagem discretizada, o comportamento e distribuição das forças nas bobinas do transformador são analisadas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Correntes de Partida em Transformadores

Quando um transformador é desenergizado, o núcleo permanece magnetizado devido à histerese do material magnético. Este “fluxo residual” é influenciado pelas caracte-

rísticas do material do núcleo do transformador (principalmente, a remanência), fator de folga do núcleo, capacitância do enrolamento, características de corte de corrente do disjuntor e outras capacitâncias conectadas ao transformador. O fluxo senoidal concatenado no núcleo pode ser medido pela integração da tensão do enrolamento, ou seja, é defasado 90 graus dessa tensão. Durante a energização do equipamento, o fluxo senoidal concatenado no núcleo do transformador combina-se com o fluxo residual, podendo, levar o núcleo a saturação. O caso mais crítico ocorre na energização com o cruzamento da tensão por zero, em que o fluxo senoidal concatenado é máximo. Nesse caso, mostrado na Figura 1, a combinação entre os fluxos, residual e senoidal, resulta em um pico de fluxo no núcleo, com mais de duas vezes o normal. Então, o núcleo é levado à saturação. Essa saturação assimétrica ocasiona o típico transitório de corrente de *Inrush*, caracterizado por um alto conteúdo harmônico e um componente de corrente contínua (Brunke and Frohlich (2001), Blume et al. (1938)).

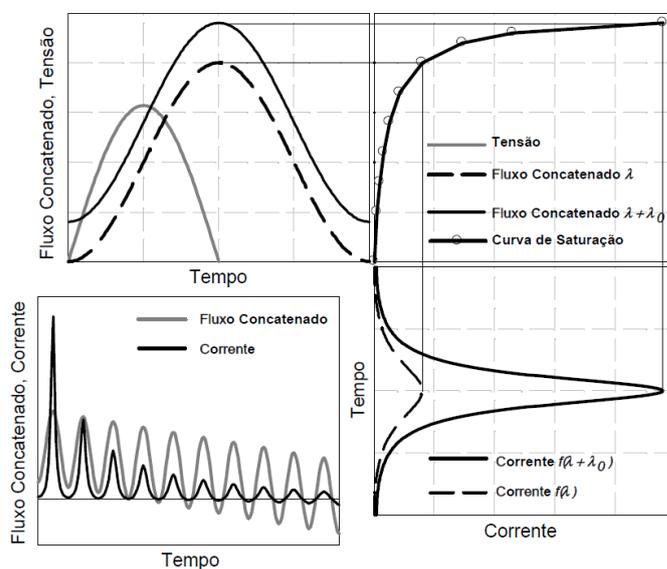


Figura 1. Representação qualitativa do fenômeno da corrente de partida e o efeito do fluxo residual (Adaptado de Chiesa (2010)).

Visto isso, a corrente de energização é afetada por vários fatores, como seguem (Ge and Wang (2018)).

- Magnitude e ângulo de fase de comutação da tensão.
- Propriedades do núcleo ferromagnético, principalmente, fluxo de saturação e fluxo remanescente.
- Impedância de alimentação/fonte.
- Carga no enrolamento secundário.
- Dimensões do transformador.

Existem várias tecnologias para mitigar as correntes transitórias de energização em transformadores. Inicialmente, as mais comuns são os resistores de pré-inserção e o fechamento controlado por ponto na onda (Point of Wave - POW). Porém, até o ano de 2002 nenhum sistema comercial considerava os fluxos residuais. Então, nos anos seguintes, a desenergização controlada é proposta para controlar os fluxos residuais. O método dos resistores de pré-inserção requer que resistores relativamente grandes sejam instalados em paralelo ao disjuntor principal e uma redução efetiva da corrente de *Inrush* é alcançada apenas

na escolha ideal do valor da resistência e do tempo de pré-inserção. Todavia, o método da comutação controlada é considerada uma alternativa econômica e confiável, comparada aos resistores de pré-inserção. A comutação controlada implica em energizar primeiro uma fase em seu pico de tensão e atrasar a energização das duas fases restantes em um quarto de período da frequência fundamental (5 ms em um sistema de 50 Hz). Por fim, o método da desenergização controlada baseia-se nos fatores que afetam o fenômeno do *Inrush*, citados anteriormente. Com base nessas considerações, é proposto um método para controlar o instante de fechamento POW e definir um valor de fluxo residual utilizando uma bobina DC (Chiesa (2010)).

2.2 Forças Eletromagnéticas em Transformadores

A parte ativa de um transformador é geralmente constituída por enrolamentos de baixa tensão (BT), envolta de um núcleo ferromagnético, e de alta tensão (AT), concêntrico e externo ao enrolamento de BT. Esses enrolamentos, quando percorridos por corrente elétrica, produzem fluxos magnéticos, os quais tem seu maior percentual concatenado no núcleo do transformador. Porém, como a permeabilidade magnética do núcleo não é infinita, uma parcela das linhas de campo magnético escapa, e circula sobre e entre os enrolamentos. Essa parcela que não está concatenada no núcleo recebe o nome de fluxo magnético disperso ou de fuga. O comportamento do fluxo magnético disperso varia ao longo dos enrolamentos.

As forças eletromagnéticas nos enrolamentos dos transformadores resultam da interação entre a corrente que circula por eles e o fluxo magnético disperso dos mesmos. A força \vec{F} (N/m^3) é calculada através da Lei de Lorentz, conforme (1), onde \vec{J} (A/m^2) é a densidade de corrente e \vec{B} (T) é a densidade de fluxo magnético (Medeiros et al. (2021)).

$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (1)$$

De acordo com (1), as componentes axiais e radiais resultam em forças radiais e axiais, respectivamente. A análise desse arranjo serve de base para arranjos mais complexos. Para enrolamentos concêntricos de mesma altura, na parte central, a componente do fluxo disperso é predominantemente axial, e nas extremidades, devido à curvatura do fluxo disperso, há componentes radiais e axiais (Arul Sathya M (2019), Medeiros et al. (2021)).

Ou seja, analisando as forças radiais, os enrolamentos internos e externos sofrem forças de repulsão F_R , comprimindo o de BT e expandindo o de AT. Do ponto de vista axial, em um caso ideal, para bobinas de mesma altura e relação equilibrada de ampères-espiras, ambos os enrolamentos sofrem forças de compressão axial F_A levando a um ponto de máxima compressão acumulada no meio dos enrolamentos, conforme a Figura 2 (Medeiros et al. (2021)).

3. SIMULAÇÕES ELETROMAGNÉTICAS

O presente trabalho analisa um protótipo de transformador trifásico com enrolamentos de AT e BT, concêntricos e de mesma altura. A geometria modelada é apresentada na

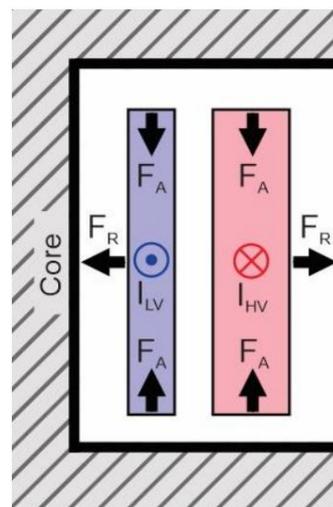


Figura 2. Forças em enrolamentos concêntricos de mesma altura (Medeiros et al. (2021)).

Figura 3. Onde, os enrolamentos de todas as fases são discretizados por cilindros, todavia, o programa faz a correta interpretação dos mesmos. Cada cilindro é fracionado em 8 divisões radiais e 12 divisões axiais, esse método torna possível verificar detalhadamente as forças de Lorentz em cada elemento do fracionamento e em todas as direções X, Y e Z, como proposto por Medeiros et al. (2021).

Quatro casos de religamento foram simulados, mostrados na Figura 4. Em que, o instante de desligamento é fixo e o instante de religamento foi variado para realizar a análise. Destaca-se, que no caso 2 ocorre o *Inrush* teórico mais severo, perante a fase BT 1. Por outro lado, o caso quatro ocorre o *Inrush* teórico menos severo, perante a fase BT 1. Assim, os casos dois e três, representam situações intermediárias.

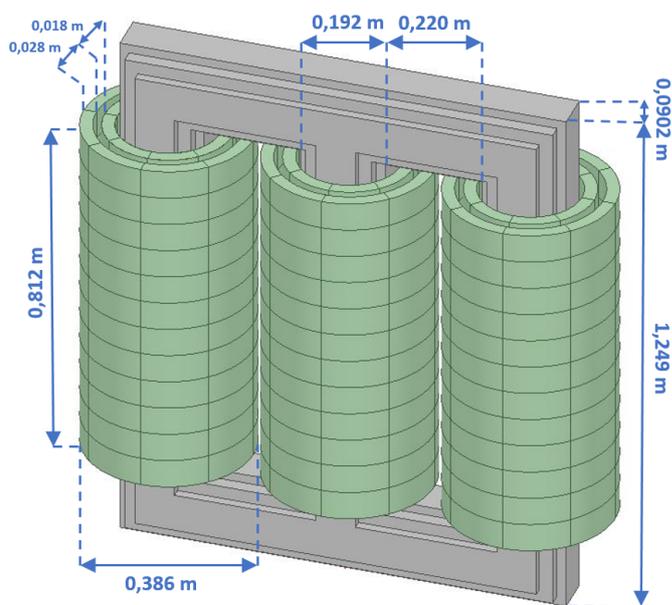


Figura 3. Geometria do transformador trifásico simulado e suas dimensões.

Com a geometria do transformador, suas características elétricas (mostradas na Tabela 1) e construtivas, foi con-

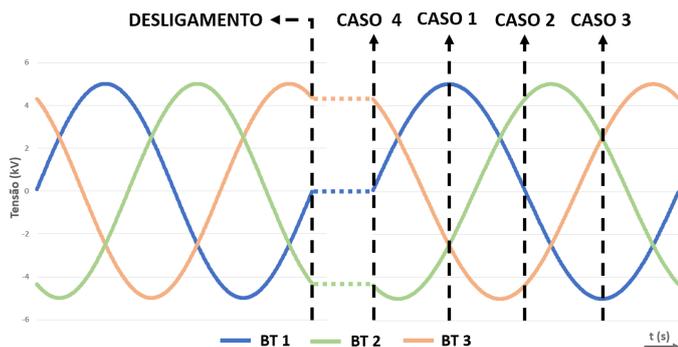


Figura 4. Esquema ilustrativo dos quatro casos simulados.

Tabela 1. Característica Elétricas do Modelo

Variável	Valor
Tensão nominal	5,0 kV / 5,0 kV
Potência nominal	140 kW
Corrente nominal	28 A
Impedância por fase	9,8 Ω
Relação de transformação	1:1

figurado o modelo no programa ANSYS Maxwell para simulações 3D. Esse programa aplica o MEF para solucionar o problema. Também, nele é configurado as condições de contorno do transformador, desde propriedades elétricas e magnéticas dos materiais, ao carregamento e operação.

Diferentes métodos matemáticos são aplicados para o projeto e a modelagem de transformadores. Um desses métodos é o Método dos Elementos Finitos. O MEF é o método conhecido mais poderoso para a solução numérica de problemas de contorno e de valor inicial caracterizados por equações diferenciais parciais. Existem duas características principais deste método que o tornam efetivo. A primeira é que ele divide o modelo em um número limitado de áreas. Em segundo lugar, os problemas de limite e valor inicial aos quais o método é aplicado são formulados por partes ou integral. Com este método, a área a ser analisada é separada em múltiplas pequenas sub-regiões chamadas elementos finitos conectados, formando a malha (ÖZÜPAK (2021)).

O transitório de corrente de partida que ocorre na energização de um transformador é um fenômeno altamente não linear. A simulação deste comportamento é bastante complexa e um transformador deve ser modelado em grande detalhe para representar o comportamento não linear dos efeitos de magnetização, perdas e saturação no núcleo (Clerici et al. (2000)).

4. RESULTADOS

Nessa seção, é realizada a análise das correntes transitórias de energização para os casos simulados e as consequentes forças de Lorentz nos enrolamentos.

Então, da-se início ao tratamento e análise de dados. Onde, a primeira variável a ser investigada é a amplitude da corrente de *Inrush*. Para isso, a Tabela 2 mostra os dados de corrente de *Inrush* em cada fase do transformador, durante o primeiro e segundo ciclo, e o decaimento percentual de corrente entre os ciclos.

Tabela 2. Dados de corrente de inrush

<i>Inrush</i>	Fase	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Correntes no primeiro ciclo [A]	BT 1	-68	-132	-80	6
	BT 2	-58	93	89	-8
	BT 3	91	123	-35	5
Correntes no segundo ciclo [A]	BT 1	-21	-35	-18	5
	BT 2	-16	24	31	-7
	BT 3	32	23	-15	5
Decaimento de corrente [%]	BT 1	69	73	77	16
	BT 2	72	74	65	12
	BT 3	65	81	57	0

Analisando os dados durante o primeiro ciclo, na tabela 2, valida-se os casos 2 e 4 como a maior e menor magnitude de correntes de *Inrush*, respectivamente. Por outro lado, analisando os casos 1 e 3, verificam-se correntes de *Inrush* com magnitudes significativas, que superam diversas vezes a nominal. Também, é possível verificar a característica exponencial do transitório, onde, o decaimento dos picos de corrente entre os ciclos é proporcional a amplitude do primeiro ciclo. Ou seja, as fases com as maiores amplitudes de corrente durante o primeiro ciclo, possuem um decaimento mais significativo no segundo ciclo, comparado ao restante.

Seguindo a análise, a Figura 5 e Figura 6 visam demonstrar de modo geral como as indutâncias próprias e mútuas nos enrolamentos de AT e BT são afetadas pelo fenômeno mais severo (caso 2) e menos severo (caso 4). Assim, é possível observar na Figura 5 do caso 2 que a indutância é extremamente deformada em comparação a Figura 6 do caso 4. Com isso é possível compreender em detalhes o fenômeno eletromagnético que acontece durante o *inrush*. Assim, visto que a indutância é a capacidade de uma bobina em instaurar um fluxo magnético de oposição a uma corrente que nela percorre, quando após o religamento do transformador ocorre a profunda saturação do núcleo ferromagnético, ou seja, a permeabilidade relativa diminui drasticamente. Esse fenômeno faz com que o ocorra o pico de corrente de *inrush*, pois o sistema busca suprir a corrente necessária para estabelecer o fluxo. Então, como a corrente elétrica aumenta de modo desproporcional e superior ao fluxo estabelecido pelas bobinas, a indutância tende a zero. Após isso acontecer, a corrente alternada reduz sua magnitude, o que ameniza o fenômeno da saturação do núcleo ferromagnético e restabelece a indutância. Porém, isso é temporário, e quando a magnitude da corrente alternada cresce, o ciclo se repete. Todo esse fenômeno fica visível na Figura 5.

A próxima variável analisada é a força de Lorentz nos enrolamentos. Assim, os valores das forças de Lorentz foram calculados em todas as partes dos enrolamentos fracionados, durante o intervalo do primeiro ao segundo ciclo. Em que, as forças de Lorentz nas direções X e Y, são usadas para encontrar as forças radiais e as forças na direção Z, são usadas para determinar as forças axiais.

Inicialmente, visando demonstrar como ocorre a distribuição geral das forças radiais e axiais, foi escolhido a situação mais crítica (caso 2), durante os dois primeiros ciclos de transitório. Assim, as Figuras 7 e 8 mostram as forças em todos os elementos das bobinas do transformador, em que cada linha é um elemento dos enrolamentos. É possível

observar, em ambas figuras, que as forças concentram-se de forma simultânea ao pico de corrente nos elementos de cada fase, para as três bobinas BT, conforme indicado na figura. Ou seja, durante o transitório de energização, as forças internas nos enrolamentos tem picos concentrados e sequenciais. Além disso, é notável a sobreposição das forças radiais na BT 1 e BT 3 (Figura 7), que também ocorre nas forças axiais (Figura 8).

Para verificar a localização dos elementos submetidos às forças críticas, consideremos para a análise, denominar as oito divisões radiais por letras de A a H no sentido anti-horário (partindo da primeira divisão simétrica ao núcleo ferromagnético pelo lado direito) e as doze divisões axiais numeradas de 1 a 12 partindo do topo. Assim, é possível combinar a localização radial e axial, por exemplo, A1 para a primeira divisão axial e radial. Também, seja a AT 1 e BT 1 os enrolamentos da perna central, AT 2 e BT 2 os enrolamentos da perna esquerda, e AT 3 e BT 3 os enrolamentos da perna direita. Conforme mostra a Figura 9.

Seguindo a análise, as Tabelas 3 e 4 tratam das maiores magnitudes de forças radiais e axiais, respectivamente. Onde, é apresentado a localização do elemento sujeito à maior magnitude de força, no primeiro ciclo, para cada bobina BT.

Tabela 3. Elemento com máxima magnitude de força radial

		Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
BT 1	Magnitude [N]	14	75	26	0.5
	Localização	H9	F6	H9	C9
BT 2	Magnitude [N]	8	27	35	0.4
	Localização	C6	C6	C6	E1
BT 3	Magnitude [N]	33	44	3	0.2
	Localização	H8	H8	H3	G7

Tabela 4. Elemento com máxima magnitude de força axial

		Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
BT 1	Magnitude [N]	25	-50	26	-0.3
	Localização	D12	D1	A12	H2
BT 2	Magnitude [N]	14	-31	34	-0.4
	Localização	H12	G1	D12	E3
BT 3	Magnitude [N]	-41	-57	7	0.25
	Localização	H1	H1	D12	H12

Analisando as Tabelas 3 e 4, é possível observar que a localização de alguns elementos é recorrente entre os casos, principalmente, na altura dos elementos. Nesse sentido, na Tabela 3 é visível que os elementos críticos concentram-se próximo à metade dos enrolamentos. Também, na Tabela 4, é pertinente analisar que as forças se concentram no topo e na base dos enrolamentos. Esse comportamento, é muito similar ao descrito na bibliografia, todavia, existe a necessidade de avaliar a existência de forças pontuais, visto que, em ambos casos houve elementos com forças significativas e distintas, principalmente, na mesma altura do enrolamento. Por fim, comparando as magnitudes das forças axiais e radiais entre os casos, o caso 2 tem as maiores magnitudes, por outro lado, a intensidade das forças nos casos 1 e 3 devem ser consideradas, principalmente, por haver forças pontuais com magnitudes significativas.

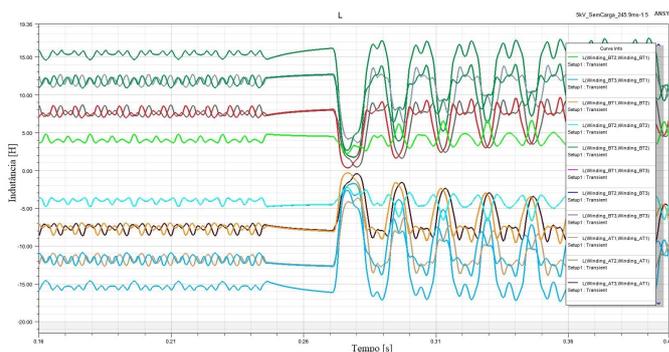


Figura 5. Indutâncias próprias e mútuas nos enrolamentos de AT e BT, para o *inrush* mais severo (caso 2).

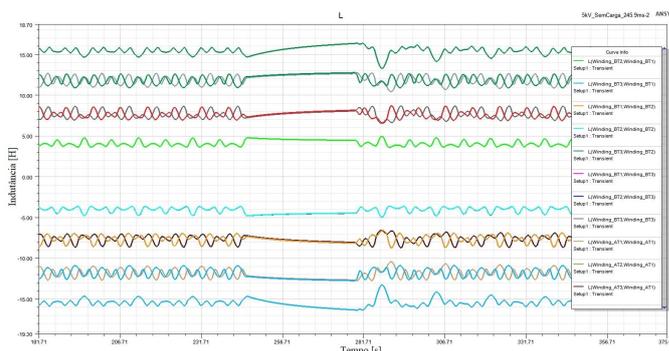


Figura 6. Indutâncias próprias e mútuas nos enrolamentos de AT e BT, para o *inrush* menos severo (caso 4).

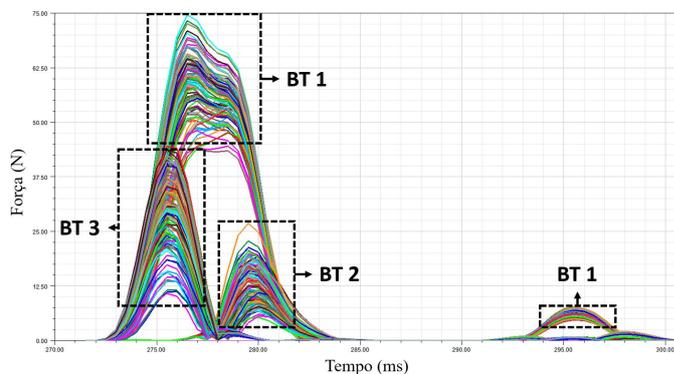


Figura 7. Forças de Lorentz radiais em todos os elementos dos enrolamentos, simulação do caso 2 durante o primeiro e segundo ciclo.

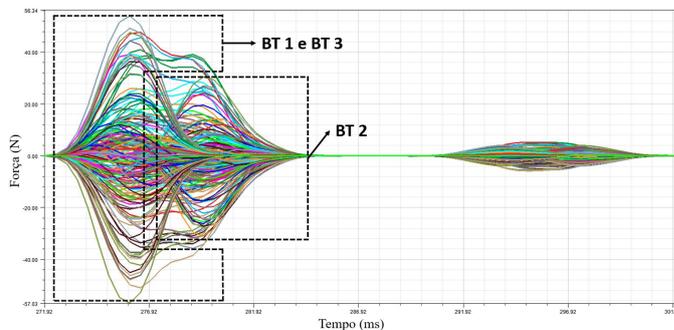


Figura 8. Forças de Lorentz axiais em todos os elementos dos enrolamentos, simulação do caso 2 durante o primeiro e segundo ciclo.

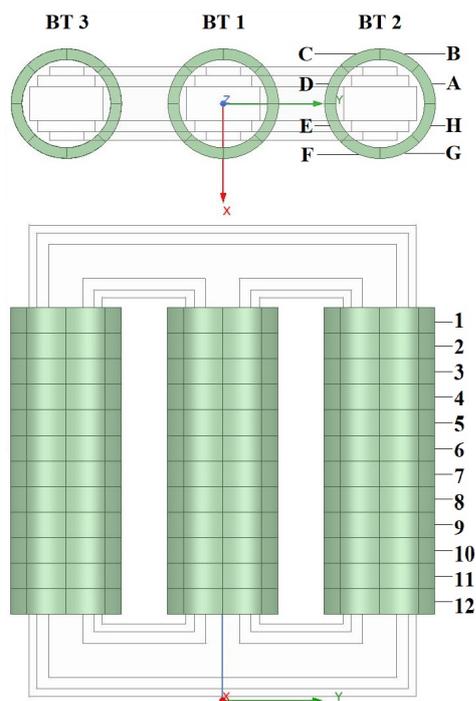


Figura 9. Nomenclatura dos elementos.

5. CONCLUSÃO

Os transformadores de potência são essenciais para sistema elétrico de transmissão e distribuição, onde estão sujeitos a operações em situações distintas. A operação de transformadores, suas características construtivas e características do sistema elétrico, tem profundo impacto nos transitórios de energização. Esses, são recorrentes no sistema elétrico e ocasionam forças eletromagnéticas que podem danificar o transformador e a rede elétrica. O detalhamento das correntes de inrush perante as variáveis elétricas e magnéticas tem profunda importância no projeto e operação de transformadores.

A seguir, são sumarizados os principais pontos de análise e contribuições do presente estudo.

- Validação da simulação dos transitórios de corrente de energização para os casos 2 e 4, com o previsto na bibliografia.
- Com os casos 2 e 4 validados, foi possível estender a análise para situações com diferentes parâmetros, como, nos casos 1 e 3.
- Os casos 2 e 4 apresentaram correntes de *inrush*, mais crítica e menos crítica, respectivamente. Os casos 1 e 3, mostraram-se intermediários e similares, em magnitude e duração das correntes de *inrush*.
- Também, na análise de correntes de *inrush*, foi possível verificar o comportamento das variáveis elétricas e magnéticas. Onde, para o caso 2, a elevada deformação da indutância é apresentada como uma consequência direta da profunda saturação do núcleo ferromagnético e da queda drástica da permeabilidade relativa, buscando restabelecer o fluxo magnético. Além disso, são apresentados os contornos do fluxo magnético no núcleo durante primeiro ciclo de corrente de *inrush*, em que é possível visualizar e verificar o fenômeno da saturação do núcleo.

- Frente as técnicas de mitigação das correntes de *inrush* apresentadas na seção 2.3.3, o método de comutação controlada por ponto de onda (POW) considerando o fluxo residual, mostra-se alternativa eficiente para mitigar as correntes de *inrush*, perante os casos simulados. Todavia, visto que apenas o caso 4 obteve redução significativa das correntes de *inrush*, e os casos restantes tiveram correntes com magnitudes e duração elevadas perante a corrente nominal, é pertinente analisar que o instante de chaveamento deve ser de elevada precisão, fato que é desafiador perante as tecnologias de comutação.
- Perante a análise de forças eletromagnéticas, realizando uma observação dinâmica, verifica-se que esses transitórios ocasionam forças sequenciais e concentradas em cada enrolamento, ao longo dos ciclos da corrente de *inrush*.
- Também, é visível que forças com diferentes magnitudes estão distribuídas ao longo dos enrolamentos, então, os pontos mais críticos para cada caso foram sumarizados. Essas forças pontuais, axiais e radiais, foram classificadas quanto a sua localização e entre os casos.
- Tratando da distribuição das forças, observa-se que elas se concentraram na área central dos enrolamentos, para as forças radiais. Também, verificou-se a existência de forças concentradas nas extremidades dos enrolamentos, para as forças axiais.
- Tratando da magnitude das forças, destacam-se os casos intermediários, caso 1 e caso 3. Pois, na bibliografia são poucos os estudos que citam a possibilidade de haver situações com correntes e forças significativas para casos de chaveamento, diferente da situação mais crítica de *inrush* (caso 2). Todavia, o presente estudo, demonstra que a intensidade da força nesses casos intermediários pode ser pertinente, principalmente tratando-se de pontos localizados nos enrolamentos.
- Abordando as simulações eletromagnéticas com o método dos elementos finitos, compreender o funcionamento eletromagnético através de simulações é um método viável e eficiente de otimizar o projeto e operação do transformador.
- A metodologia de simulação apresentada no presente trabalho, com suas configurações e condições de contorno, mostrou-se prática e eficiente para a investigação de transitórios de corrente de *inrush*.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES/PROEX) - Código de Financiamento 001. Os autores agradecem ao Programa de Pesquisa e Desenvolvimento do Setor Elétrico através do projeto PD-05785-2119/2021 - DE2119: "Ferramenta computacional para estudo, análise e diagnóstico de transitórios de alta frequência em transformadores de potência", regulado pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, em parceria com a CPFL Transmissão, ao mesmo tempo agradecem também o apoio técnico e financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da UFSM, Instituto de Redes Inteligentes (INRI) da UFSM,

Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Geração Distribuída (INCT-GD).

REFERÊNCIAS

- Arul Sathya M, U.S. (2019). Electromagnetic force and deformation in transformer winding. *International Journal of Applied Engineering Research*, 14, 790–796.
- Bao Doan, T. and Phi Do, C. (2021). Calculation of the magnetic field and inrush current in a three-phase transformer. In *2020 Applying New Technology in Green Buildings (ATiGB)*, 94–99. doi:10.1109/ATiGB50996.2021.9423111.
- Blume, L., Camilli, G., Bayajian, A., and Montsinger, V. (1938). Transformer engineering: A treatise on the theory. In *Operation, and Application of Transformers*. Wiley.
- Brunke, J. and Frohlich, K. (2001). Elimination of transformer inrush currents by controlled switching. i. theoretical considerations. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 16(2), 276–280. doi:10.1109/61.915495.
- Chiesa, N. (2010). Power transformer modeling for inrush current calculation.
- Clerici, A., Ardito, A., Rioual, M., Shperling, B., Sybille, G., der Merwe, C., V., Volker, O., Wahlstrom, B., and Zaima, E. (2000). Temporary overvoltages test case results. In *Electra*, 188, 70–87.
- Fonseca, W.S., Lima, D.S., Lima, A.K.F., Nunes, M.V.A., Bezerra, U.H., and Soeiro, N.S. (2018). Analysis of structural behavior of transformer's winding under inrush current conditions. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(3), 2285–2294. doi:10.1109/TIA.2018.2808273.
- Fonseca, W., Lima, D., Nunes, M., Soeiro, N., and Lima, A. (2016). Analysis of electromagnetic stresses and structural integrity on the winding of a transformer under inrush currents conditions. In *2016 12th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, 1–8. doi:10.1109/INDUSCON.2016.7874578.
- Ge, W. and Wang, Y. (2018). Simulation and impact analysis of remanent flux on power transformer inrush current. In *2018 IEEE International Magnetics Conference (INTERMAG)*, 1–5. doi:10.1109/INTMAG.2018.8508352.
- Medeiros, L.H., Maschio, G., Oliveira, M.M., Kaminski Junior, A.M., Bueno, D.M., Bender, V.C., and Marchesan, T.B. (2021). Finite element analysis applied to electromagnetic forces calculation on power transformers. *SEPOC 2021*.
- Neves, W., Fernandes, D., Baltar, F.J.A., Rosentino, A.J.P., Saraiva, E., Delaiba, A.C., Guimarães, R., Lynce, M., and De Oliveira, J.C. (2011). A comparative investigation of electromechanical stresses on transformers caused by inrush and short-circuit currents. In *11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*, 1–6. doi:10.1109/EPQU.2011.6128805.
- ÖZÜPAK, Y. (2021). Performing structural design and modeling of transformers using ansys-maxwell. *Journal of Brilliant Engineering*, 2, 38–42.
- Zhang, C., Ge, W., Xie, Y., and Li, Y. (2021). Comprehensive analysis of winding electromagnetic force and deformation during no-load closing and short-circuiting of power transformers. *IEEE Access*, 9, 73335–73345. doi:10.1109/ACCESS.2021.3068054.