



**Universidade Federal de Campina Grande**  
**Centro de Engenharia Elétrica e Informática**  
**Curso de Graduação em Engenharia Elétrica**  
**Departamento de Engenharia Elétrica**

ARTHUR FARIAS ARANHA MONTEIRO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ESTRESSE ELETROMECÂNICO CAUSADO PELAS CORRENTES DE  
ENERGIZAÇÃO (“*INRUSH*”)

Campina Grande  
Novembro 2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ESTRESSE ELETROMECHANICO CAUSADO PELAS CORRENTES DE  
ENERGIZAÇÃO (“*INRUSH*”)

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao  
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Campina Grande, em  
cumprimento parcial às exigências para obtenção do  
Grau de Engenheiro Eletricista.

Aluno

**Arthur Farias Aranha Monteiro**

Orientador

**Professor Damásio Fernandes Júnior, D. Sc.**

Campina Grande  
Novembro 2012

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Normando e Maria José, pelo grande desafio que foi guiar e educar a mim e a meu irmão André.

A minha namorada Lucilia que eu amo tanto e que tem sido uma verdadeira companheira desde que nos conhecemos.

A meu irmão André que foi meu companheiro de brincadeiras na infância e quero que o seja até o fim.

A minha Tia Dida que me acolheu como uma mãe nesses últimos anos e que trabalhou tanto para que eu conseguisse concluir a graduação.

A minha Tia Cucu que tem sido uma fonte de sabedoria e inspiração e com quem vivi momentos tão felizes no cariri.

A meus tios Gedilson e Corrinha tão bondosos e prestativos e que me recebem em sua casa com a mesma alegria de sempre.

Aos meus primos e irmãos de coração com quem compartilho momentos tão felizes e que sempre estão prontos para me ajudar.

À Vovó Ester que olha por nós lá do céu e que foi tão importante para toda a nossa família.

Ao meu avô Severino e a minha Avó Edite cuja casa eu sempre visitava.

Aos meus Tios Noaldo e Normaci que conviveram comigo em Patos.

Aos meus grandes amigos de todas as horas João, Matheus, Rafael, Victor e Túlio que me ensinaram tanto e dividiram momentos difíceis e alegres comigo.

A Maria que recebeu a mim e a meu irmão tão bem.

Ao Prof. Damásio Fernandes pela orientação e dedicação apresentados nesses últimos anos.

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe, ao meu pai e a todos os meus familiares que me ajudaram tanto nessa caminhada. A Lucília que tem me proporcionado momentos tão felizes. Aos amigos que me ajudaram a chegar aqui.

*“A vida aqui só é ruim, quando não chove no chão. Mas se chover dá de tudo. Fartura tem de montão. Tomara que chova logo. Tomara meu Deus tomara. Eu só deixo o meu cariri no último pau-de-arara.”*

*José Guimarães*

## RESUMO

Os transformadores são equipamentos fundamentais para o funcionamento do sistema elétrico. Eles realizam a conversão da tensão para que esta possa ser entregue no nível adequado ao consumidor.

Assim como qualquer equipamento, os transformadores também estão sujeitos a falhas. Neste sentido, este trabalho tem por objetivo analisar as forças e estresses eletromecânicos a que ficam submetidos os enrolamentos do transformador devido às correntes de energização, conhecidas como correntes de *inrush*.

Tal análise é de fundamental importância para a geração de medidas preventivas e recomendações operativas que busquem mitigar as solicitações impostas ao transformador.

**Palavras-chave:** Transformador, estresses eletromecânicos, forças nos enrolamentos.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Processo de magnetização de um material ferromagnético.....	4
Figura 2.	Laço de histerese.....	6
Figura 3.	Curva de magnetização de alguns materiais ferromagnéticos.....	7
Figura 4.	Curva de saturação.....	9
Figura 5.	Energização de transformador em vazio.....	9
Figura 6.	Comportamento típico de fluxo magnético durante a energização de transformador: fluxo remanescente nulo.....	10
Figura 7.	Fluxo remanescente em transformador .....	11
Figura 8.	Caso para ocorrência de máxima corrente de <i>inrush</i> .....	12
Figura 9.	Comportamento do fluxo durante a energização de transformadores: fluxo remanescente positivo.....	12
Figura 10.	Forma de onda típica da corrente transitória de energização de transformadores.....	13
Figura 11.	Corrente transitória de energização em um banco de transformadores conectado em $Y - \Delta$ .....	16
Figura 12.	Sentido da força radial no enrolamento de alta tensão em um transformador durante sua energização ( <i>inrush</i> ).....	21
Figura 13.	Representação da compressão axial em um enrolamento do transformador durante sua energização ( <i>inrush</i> ).....	22
Figura 14.	Compressão axial dos enrolamentos: (a) durante a energização e (b) durante um curto- circuito.....	23
Figura 15.	Segmento elementar de um condutor percorrido por uma corrente $I$ .....	24
Figura 16.	Transformador utilizado para os cálculos.....	29

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Parâmetros do Transformador.....	29
Tabela 2.	Forças e Estresses Eletromecânicos no Enrolamento Externo.....	30
Tabela 3.	Forças e Estresses Eletromecânicos no Enrolamento Interno.....	30

## SUMÁRIO

1.	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1	<b>APRESENTAÇÃO DO TEXTO</b> .....	1
2.	<b>CARACTERÍSTICAS MAGNÉTICAS DE UM TRANSFORMADOR</b> .....	3
2.1	<b>CURVA DE MAGNETIZAÇÃO</b> .....	3
2.2	<b>LAÇO DE HISTERESE</b> .....	5
3.	<b>CARACTERIZAÇÃO DA CORRENTE DE <i>INRUSH</i></b> .....	8
3.1	ESTIMATIVA DA AMPLITUDE DO PRIMEIRO PICO DA CORRENTE DE <i>INRUSH</i> .....	14
3.2	ESTIMATIVA DA ATENUAÇÃO DA AMPLITUDE DA CORRENTE DE <i>INRUSH</i> .....	16
4.	<b>ESTRESSES ELETROME CÂNICOS E TIPOS DE FALHAS NO TRANSFORMADORES</b> .....	19
4.1	FORÇA RADIAL.....	19
4.2	FORÇA AXIAL.....	21
5.	<b>FORÇAS ELETROMAGNÉTICAS E ESFORÇOS ELETROME CÂNICOS: ABORDAGEM ANALÍTICA</b> .....	24
5.1	CÁLCULO ANALÍTICO DAS FORÇAS RADIAIS.....	26
5.2	CÁLCULO ANALÍTICO DAS FORÇAS AXIAIS.....	27
6.	<b>EXEMPLO DE CÁLCULO DOS ESFORÇOS ELETROME CÂNICOS EM UM TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE 15 KVA SOB CORRENTE DE <i>INRUSH</i></b> .....	29
6.1	PARÂMETROS DO TRANSFORMADOR.....	29
6.2	ESFORÇOS ELETROME CÂNICOS.....	30
7.	<b>CONCLUSÃO</b> .....	31
8.	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	32

# 1 INTRODUÇÃO

As manobras de energização de transformadores de potência são corriqueiras nas subestações. Tais manobras podem produzir sobretensões e altas correntes transitórias de magnetização, podendo atingir picos de até 10 vezes a corrente nominal do transformador. Nesta situação, os enrolamentos dos transformadores estão sujeitos a elevadas forças axiais e radiais que podem danificá-los, podendo assim, interromper o fornecimento de energia elétrica para os consumidores.

Alguns dos fatores que influenciam a amplitude e o amortecimento da corrente de energização ou *inrush* são as características não-lineares do núcleo magnético, o tipo de ligação dos enrolamentos, a configuração e as características do sistema de transmissão e, também, dos instantes de fechamento dos pólos do disjuntor em relação à forma de onda da tensão imposta ao transformador.

Sendo os transformadores equipamentos de fundamental importância para o funcionamento do sistema elétrico, este trabalho tem como objetivo apresentar uma abordagem analítica para o cálculo das forças e estresses eletromecânicos que surgem nas partes ativas e estruturais dos transformadores quando da sua energização com o surgimento de elevadas correntes transitórias.

## 1.1 APRESENTAÇÃO DO TEXTO

Além deste capítulo introdutório, este trabalho é composto por seis capítulos, descritos a seguir:

O capítulo 2 descreve as características magnéticas do transformador que serão utilizadas nos capítulos posteriores.

O capítulo 3 apresenta as características da corrente de *inrush*, comentando todos os aspectos importantes para o escopo do trabalho.

O capítulo 4 apresenta os estresses eletromecânicos e tipos de falhas mais comuns nos transformadores.

O capítulo 5 apresenta a metodologia analítica para o cálculo das forças radiais e axiais.

O capítulo 6 apresenta um exemplo de cálculo dos esforços mecânicos em um transformador trifásico.

O capítulo 7 apresenta a conclusão do trabalho.

## 2 CARACTERÍSTICAS MAGNÉTICAS DE UM TRANSFORMADOR

Um transformador é constituído por dois ou mais enrolamentos acoplados por meio de um fluxo magnético. A essência do funcionamento de um transformador requer que haja um fluxo comum, variável no tempo, enlaçando os enrolamentos. Tal ação pode ocorrer entre enrolamentos acoplados pelo ar, no entanto, o acoplamento pode se tornar muito mais eficiente usando-se um núcleo de ferro ou algum material ferromagnético.

No contexto dos dispositivos de conversão eletromecânica de energia, a importância dos materiais magnéticos é dupla, pois esses possibilitam obter densidades elevadas de fluxo magnético com níveis relativamente baixos de força magnetizante. E como as forças magnéticas e a densidade de energia elevam-se com o aumento da densidade de fluxo, esse efeito exerce um papel importante no desempenho dos dispositivos de conversão de energia.

As curvas mais comumente usadas para descrever um material magnético são a curva de magnetização e o laço de histerese.

### 2.1 CURVA DE MAGNETIZAÇÃO

A saturação é um fenômeno que ocorre nos materiais ferromagnéticos. O mesmo se manifesta de modo que, após certo valor de intensidade de campo magnético ( $H$ ) aplicado ao material, iguais incrementos desta grandeza implicam em acréscimos cada vez menores nos valores de densidade de fluxo magnético ( $B$ ). Na Figura 1 é mostrado o processo de magnetização de um material cujos grãos apresentam orientações espontâneas entre domínios vizinhos que formam ângulos de  $90^\circ$  entre si.

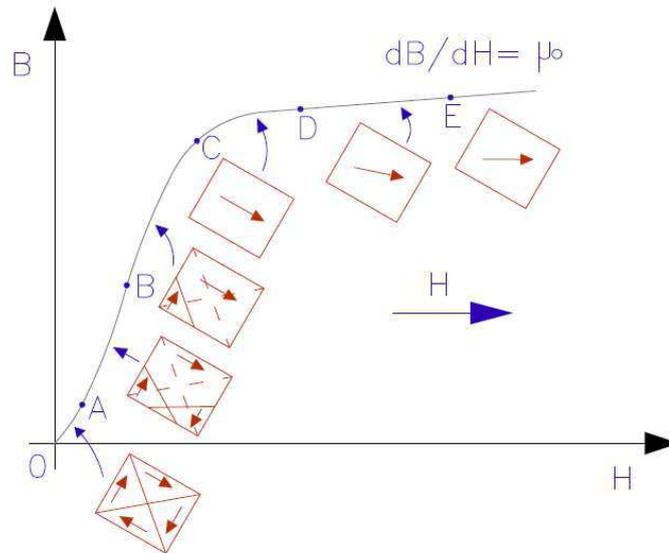


Figura 1. Processo de magnetização de um material ferromagnético.

Nos materiais ferromagnéticos existem movimentos de rotação de elétrons não balanceados e também uma tendência a que os átomos vizinhos se alinhem de modo a que seus efeitos magnéticos se somem.

A fim de explicar a curva de magnetização de um material ferromagnético, usa-se o conceito de domínios (regiões da ordem de 1 milésimo de polegada de extensão com uma orientação pré-definida). Para tanto, considere uma amostra de material ferromagnético a qual não exibe campo magnético externo resultante. Se um campo magnético externo for aplicado à amostra, haverá uma tendência para os minúsculos ímãs alinharem-se com o campo magnético aplicado ou polarizarem-se exatamente como uma agulha magnética tende a alinhar-se com o campo da terra.

Para valores de baixa intensidade de campo magnético ( $H$ ), os domínios aproximadamente alinhados com o campo aplicado crescem em detrimento dos domínios adjacentes e menos favoravelmente alinhados em uma transformação elástica reversível. Isto resulta em um aumento na densidade de fluxo magnético ( $B$ ).

A partir daí, quando o campo magnético ( $H$ ) cresce, a direção de magnetização dos domínios desalinhados resulta em uma transformação irreversível, ou seja, mesmo tornando a intensidade de campo magnético ( $H$ ) um valor nulo, o material ferromagnético não retorna ao seu estado original, contribuindo para um rápido aumento da densidade de fluxo magnético ( $B$ ). Em valores mais altos de  $H$ , as direções de magnetização giram até que as contribuições de todos os domínios estejam alinhados com o campo magnético aplicado.

A partir de certo valor, pode-se aumentar a intensidade de campo magnético ( $H$ ) sem que ocorra efeito algum dentro do material ferromagnético. Neste caso o material é dito estar saturado. Aços magnéticos comerciais tendem a saturar para valores de densidade de fluxo entre 1,4 a 2 teslas.

A densidade de fluxo em um material ferromagnético é matematicamente expressa pela soma dos efeitos devido à intensidade do campo magnético ( $H$ ) aplicado e a magnetização produzida dentro do material ( $M$ ). Esta relação pode ser expressa pela Equação 1.

$$B = \mu_0 \cdot (H + M) \quad (1)$$

Ou ainda, pela Equação 2.

$$B = \mu_0 \cdot \left(1 + \frac{M}{H}\right) \cdot H \Rightarrow B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \Rightarrow B = \mu \cdot H \quad (2)$$

Onde  $\mu_0$  é denominada de constante de permeabilidade magnética do espaço livre e tem valor de  $4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m e  $\mu_r$  é a permeabilidade relativa do material magnético.

## 2.2 LAÇO DE HISTERESE

Como a permeabilidade dos materiais magnéticos não é constante e sim uma função da intensidade do campo magnético aplicado, conclui-se que a expressão  $B = \mu \cdot H$  não pode ser calculada, devendo esta ser obtida experimentalmente, através de curvas levantadas para cada material.

Todo material ferromagnético após ter sido submetido à magnetização, quando não está mais sujeito ao campo externo, não retorna ao seu estado original [2]. Se uma amostra for saturada (ver ponto 1 na Figura 2) e depois o campo for removido, se tem o caminho de 1 a 2 representando o que irá ocorrer com  $B$  x  $H$ . A ordenada no ponto 2 é denominada de magnetismo residual ( $M_r$ ). Se um campo magnético ( $H$ ) positivo crescente for aplicado novamente, tem-se a trajetória 2-3-1.

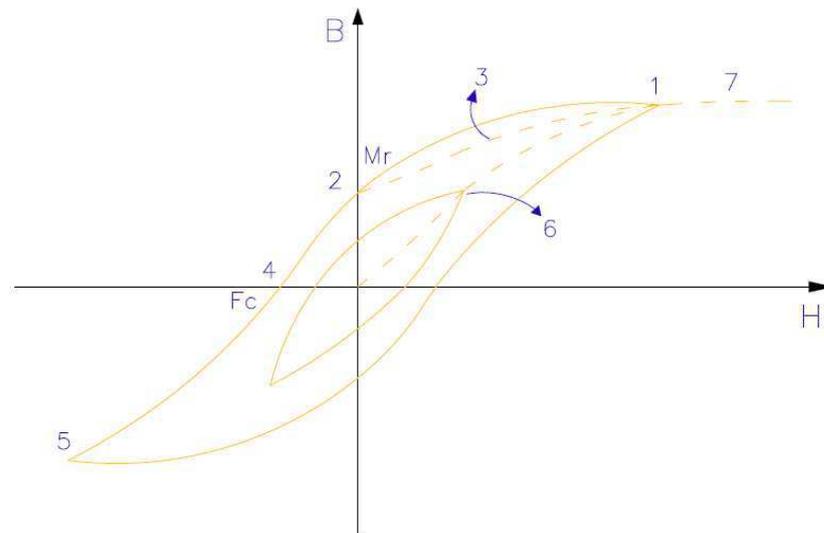


Figura 2. Laço de histerese.

Uma força magnetizante negativa, também conhecida como força coercitiva  $F_c$ , é necessária para trazer a densidade de fluxo até zero (ver ponto 4). Um valor grande da intensidade de campo magnético ( $H$ ) negativo produz saturação na direção oposta (ver ponto 5). Invertendo-se a força magnetizante tem-se a trajetória 5-1.

As curvas  $B \times H$  dos materiais magnéticos são indispensáveis nos cálculos e projetos de transformadores, sendo normalmente fornecidas pelos fabricantes como parte de suas especificações. Na Figura 3 são apresentadas as curvas de indução de alguns materiais e nela é possível identificar as principais regiões de trabalho. Observando-se as curvas de indução, pode-se notar que a mesma é sempre constituída de duas parcelas  $B_o$  (indução ocorrida no ar quando o núcleo está saturado) e  $B_i$  (indução intrínseca do material). A Figura 3 mostra também que até certo valor de  $H$  a permeabilidade pode ser considerada constante.

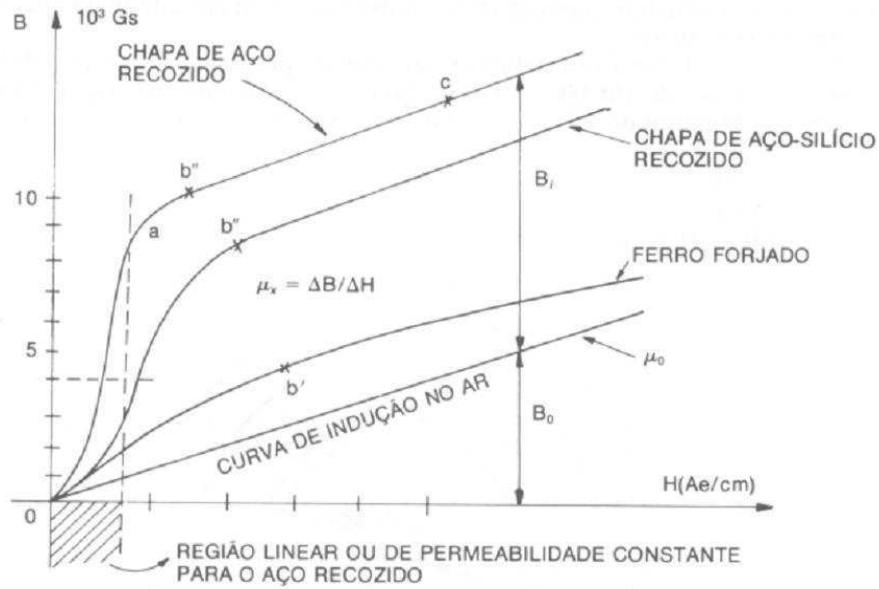


Figura 3. Curva de magnetização de alguns materiais ferromagnéticos [14].

A indução após a saturação, quando se aumenta ainda mais a intensidade do campo magnético  $H$ , provoca um aumento da densidade de fluxo magnético  $B$  devido ao fechamento de fluxo pelo ar, razão pela qual, os trechos das curvas após a saturação são paralelos à curva de indução no ar.

### 3 CARACTERIZAÇÃO DA CORRENTE DE *INRUSH*

Empresas que trabalham com transformadores e principalmente concessionárias de energia elétrica geralmente estão interessadas em conhecer o comportamento da corrente de *inrush*, principalmente o seu valor máximo e, por vezes, a sua taxa de decaimento. Para a análise dessa situação, é conveniente se fazer algumas considerações sobre a operação em vazio de transformadores [3], como por exemplo:

- Admitir, inicialmente, que não existem perdas no transformador;
- Sendo a tensão aplicada ao primário do transformador  $v(t)$ , e o fluxo  $\phi(t)$ , enlaçado pelo enrolamento primário, estas grandezas estão matematicamente relacionados pela Equação 3.

$$v(t) = \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (3)$$

- Admitir, também, que para a tensão  $v(t) = V_m \cdot \cos \omega t$  em regime permanente, a forma de onda do fluxo produzido no enrolamento primário é definida pela Equação 4.

$$\phi(t) = \int v(t).dt \Rightarrow \phi(t) = \frac{V_m}{\omega} \text{sen} \omega t \quad (4)$$

- Além disso, por razões econômicas, os transformadores operam em torno do ponto de joelho da curva de saturação  $(\Phi_{m\acute{a}x}, i_m)$ . A corrente de magnetização  $(i_m)$  está na faixa de 0,1 a 5% da corrente nominal do transformador. Graficamente, o primeiro quadrante da curva de saturação do transformador é mostrado na Figura 4.

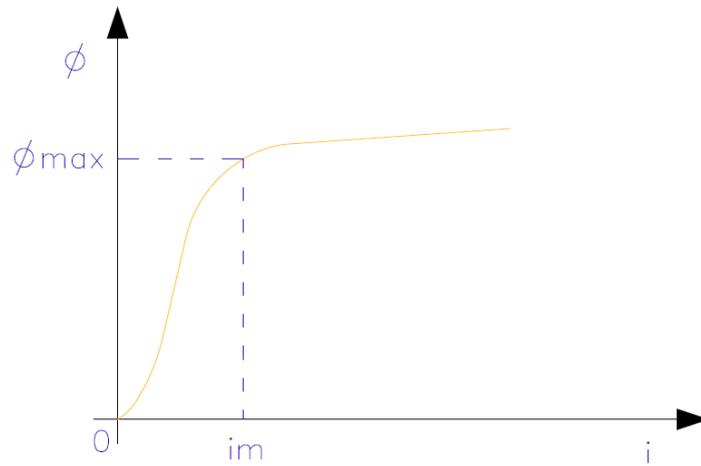


Figura 4. Curva de saturação.

Supondo que o transformador seja energizado em vazio, ou seja, sem uma carga conectada ao secundário, por intermédio da chave S, conforme esquema apresentado na Figura 5, então o fluxo  $\phi(t)$ , logo após o fechamento da chave em  $t_0$ , será definido pela Equação 5.

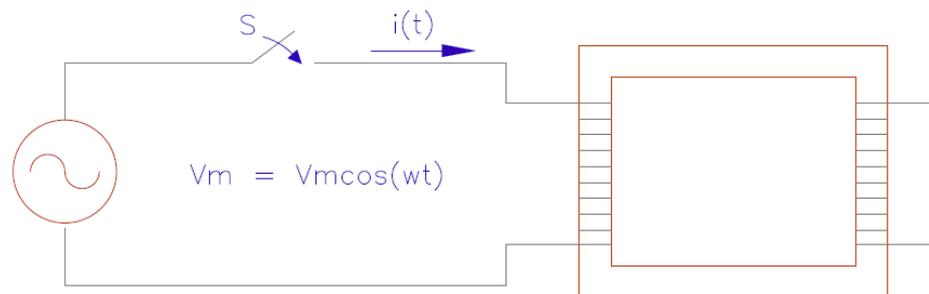


Figura 5. Energização de transformador em vazio.

$$\phi(t) = \int_{t_0}^t v(t).dt \quad (5)$$

Ou seja,

$$\phi(t) = \int_{t_0}^t V_m \cos \omega t .dt \Rightarrow \phi(t) = \frac{V_m}{\omega} (\text{sen} \omega t - \text{sen} \omega t_0) \quad (6)$$

$$\phi(t) = \Phi_{m\acute{a}x} (\text{sen} \omega t - \text{sen} \omega t_0) \quad (7)$$

onde,  $\Phi_{m\acute{a}x} = \frac{V_m}{\omega}$ .

De acordo com a Equação 7, o fluxo no tempo consiste de uma componente senoidal acrescido de um nível constante que depende do instante  $t_0$  de fechamento da chave  $S$ , podendo atingir até  $2 \times \Phi_{m\acute{a}x}$  quando  $t_0 = \frac{3\pi}{2\omega}$ .

Analisando a curva de magnetização apresentada na Figura 4, nota-se que, embora o fluxo máximo possa ser apenas duas vezes o fluxo normal de operação, o primeiro pico da corrente pode atingir valores muito elevados. Situações mais adversas podem ocorrer se houver fluxo remanescente no núcleo do transformador, pois o fluxo máximo pode atingir valores superiores a  $2 \times \Phi_{m\acute{a}x}$ , o que implica um aumento ainda maior da corrente de energização.

Na prática, a componente não-periódica do fluxo produzido no enrolamento que está sendo energizado decai exponencialmente, conforme é ilustrado na Figura 6. Esse decaimento depende da curva de magnetização, das perdas ôhmicas do sistema e do enrolamento do transformador, bem como das perdas no seu núcleo.

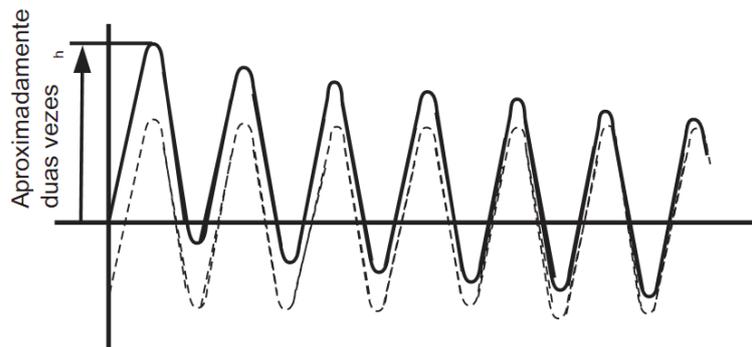


Figura 6. Comportamento típico do fluxo magnético durante a energização de transformador: fluxo remanescente nulo [3].

Quando um transformador é desligado, um fluxo remanescente,  $\phi_r$ , permanece no seu núcleo ferromagnético. Em regime permanente, a relação entre a corrente e o fluxo é expressa pelo ciclo de histerese, mostrado na Figura 7 (a). Nota-se que quando a corrente passa por zero, o fluxo não se anula, mantendo um valor residual, valor este que afeta o próximo religamento do transformador, conforme é ilustrado na Figura 7 (b).

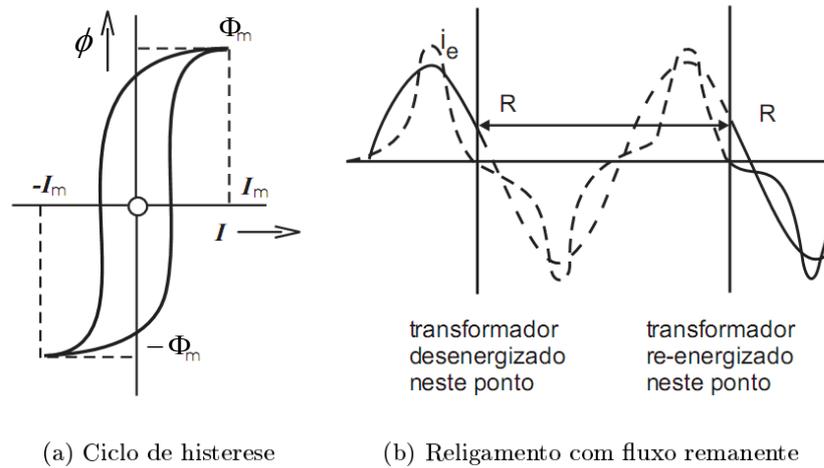


Figura 7. Fluxo remanescente em transformadores [3].

Para uma densidade de fluxo residual positiva, quando o transformador é energizado no instante em que a tensão aplicada passa por zero com derivada positiva, obtém-se a máxima corrente de *inrush*, conforme mostrado na Figura 8. Caso o transformador permanecesse energizado, a corrente de excitação ( $i$ ) e a densidade de fluxo seriam conforme as curvas tracejadas [3].

Sabe-se que o fluxo magnético em um circuito indutivo não pode variar instantaneamente, o fluxo imediatamente após o fechamento da chave (em  $t = 0^+$ ) deve ser igual ao fluxo anterior ao fechamento (em  $t = 0^-$ ). Conseqüentemente, a densidade de fluxo inicia-se de  $+B_r$  e, teoricamente, alcança o valor positivo de pico de  $(B_r + 2B_{mp})$  dirigindo-se para saturação do núcleo.

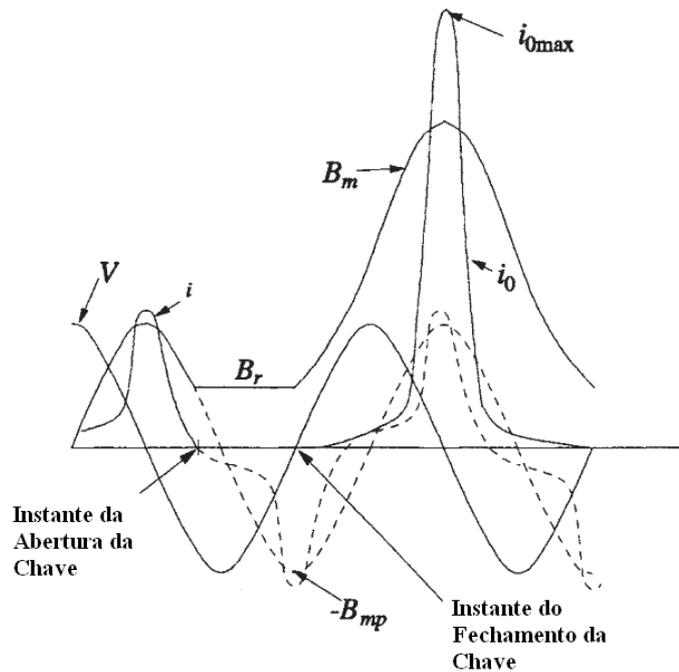


Figura 8. Caso para ocorrência de máxima corrente de “inrush” [4].

Com relação ao demonstrado na Figura 7 (b), o valor de pico do fluxo transitório é, então, maior que o anterior, causando uma corrente também maior, conforme é ilustrado na Figura 9.

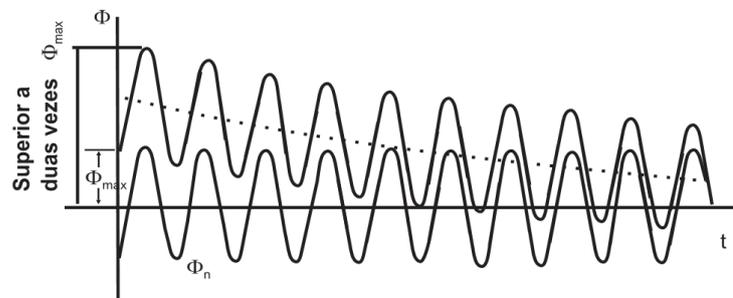


Figura 9. Comportamento do fluxo durante a energização de transformadores: fluxo remanescente positivo [3].

Para uma tensão senoidal aplicada, a densidade de fluxo é senoidal e a corrente de magnetização apresenta vários picos em sua forma de onda. O mesmo resultado pode ser obtido resolvendo a Equação 8 [4]:

$$V_p \text{sen}(\omega t + \theta) = i_0 R_1 + N_1 \frac{d\phi_m(t)}{dt} \quad (8)$$

Onde:

$V_p$ : Valor de pico da tensão aplicada;

- $\theta$ : Ângulo no qual a tensão é chaveada;  
 $i_0$ : Valor instantâneo da corrente de magnetização;  
 $\phi_m(t)$ : Valor instantâneo do fluxo em um tempo  $t$  ;  
 $R_1$ : Resistência do enrolamento primário;  
 $N_1$ : Número de espiras do enrolamento primário.

A solução da equação é direta quando as características magnéticas são consideradas lineares. A solução é obtida usando as condições iniciais  $t = 0$ ,  $\phi_m = \pm\phi_r$ . Assim:

$$\phi_m = (\phi_{mp} \cos \theta \pm \phi_r) e^{\frac{-R_1}{L_1} t} - \phi_{mp} \cos(\omega t + \theta) \quad (9)$$

Para  $\theta = 0^\circ$  e fluxo residual de  $+\phi_r$ , a forma de onda do fluxo (densidade de fluxo) é mostrada na Figura 9. Pode ser observado da Equação 9 e da forma de onda do fluxo que há uma componente DC, a qual decresce em uma taxa determinada pela relação entre resistência e indutância do enrolamento primário e uma componente de regime permanente AC  $[-\phi_{mp} \cos(\omega t + \theta)]$ .

De forma ilustrativa, na Figura 10, é mostrada uma forma de onda típica da corrente transitória de energização de transformadores.

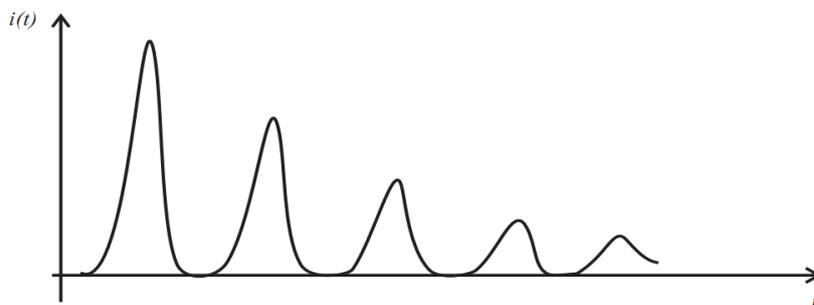


Figura 10. Forma de onda típica da corrente transitória de energização de transformadores [3].

### 3.1 ESTIMATIVA DA AMPLITUDE DO PRIMEIRO PICO DA CORRENTE DE *INRUSH*

Admitindo que os aços magnéticos empregados em transformadores tendam a saturar quando a densidade de fluxo ( $B$ ) assume 2,0 T, o fluxo magnético ( $\phi_{saturado}$ ) contido no núcleo pode ser calculado pela Equação 10.

$$\phi_{saturado} = \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (10)$$

Ou ainda,

$$\phi_{saturado} = \vec{B} \oint_S d\vec{S} \Rightarrow \phi_{saturado} = \vec{B} \cdot A_{núcleo} \quad \therefore \oint_S d\vec{S} = A_{núcleo} \quad (11)$$

Onde  $A_{núcleo}$  é a área do núcleo em [m<sup>2</sup>].

O fluxo magnético de dispersão está predominantemente no ar, logo, o ampère-espira necessário para produzi-lo é elevado. Para o pior instante de chaveamento, o fluxo magnético de dispersão ( $\phi_{ar}$ ) pode ser escrito de acordo com a Equação 12 [4].

$$\phi_{ar} = \mu_0 H A_m \Rightarrow \phi_{ar} = 2\phi_{mp} + \phi_r - \phi_{saturado} = 2\phi_{mp} + \phi_r - 2,0 A_{núcleo} \quad (12)$$

Sendo  $A_m = \left( \frac{\pi \cdot D_m^2}{4} \right)$  representando assim, a área média enlaçada por uma espira do

enrolamento,  $D_m$  neste caso é o diâmetro médio em [m] do enrolamento.  $\phi_{mp}$  é o fluxo instantâneo de pico e  $\phi_r$  o fluxo residual (ou remanescente).

Assim, pode-se estimar o primeiro pico da corrente de *inrush* no enrolamento de um transformador monofásico energizado, com  $N_{espiras}$  espiras e altura  $h_{enrolamento}$ , considerando o pior instante de chaveamento através da Equação 13 (Lei Circuital de Ampère).

$$H = \frac{N_{espiras} i_{0máx}}{h_{enrolamento}} \Rightarrow i_{0máx} = \frac{H h_{enrolamento}}{N_{espiras}} \quad (13)$$

Isto é,

$$i_{0máx} = \frac{H h_{enrolamento}}{N_{espiras}} \Rightarrow i_{0máx} = \frac{(2\phi_{mp} + \phi_r - 2,0 A_{núcleo}) h_{enrolamento}}{\mu_0 A_m N_{espiras}} \quad (14)$$

Ou ainda,

$$i_{0m\acute{a}x} = \frac{(2B_{mp} + B_r - 2,0)A_{n\acute{u}cleo} h_{enrolamento}}{\mu_0 A_m N_{espiras}} \quad (15)$$

Onde,  $i_{0m\acute{a}x}$  é o pico da corrente de “*inrush*” em [A],  $H$  é intensidade de campo magnético em [A/m],  $N_{espiras}$  é o número de espiras do enrolamento energizado e  $h_{enrolamento}$  é altura do enrolamento energizado em [m].

Para o cálculo da corrente de “*inrush*” em transformadores trifásicos é necessário avaliar cada caso particularmente [4]:

- Se o primário do transformador é ligado em delta, cada bobina está conectada a duas fases e a corrente de *inrush* correspondente para cada bobina tem comportamento semelhante à corrente de *inrush* de um transformador monofásico. Porém, em termos de corrente de linha o efeito é menor. É válido lembrar que sob condições de operação normal a corrente de linha é  $\sqrt{3}$  vezes a corrente de fase. Durante a energização apenas uma fase será submetida a uma elevada corrente de *inrush* (a fase em que ocorre o pior instante de chaveamento), assim a corrente de linha é praticamente igual a corrente de fase. Desta forma, a corrente de *inrush* de linha de um transformador trifásico com primário ligado em delta é  $0,577 (1/\sqrt{3})$  vezes a correspondente corrente de *inrush* de um transformador monofásico [4];
- Para um banco de transformadores, constituído por três unidades monofásicas, deverão ser analisados os três circuitos magnéticos de forma independente. Considerando que o primário do banco esteja conectado em estrela e o secundário em delta, a distribuição da corrente entre os enrolamentos pode ser expressa em termos do máximo pico de corrente de *inrush* ( $i_{0m\acute{a}x}$ ) de um transformador monofásico. Na Figura 11 é esquematizada a distribuição de corrente de energização do banco de transformadores assumindo que a fase **a** tem a máxima corrente transitória. Assim, para este caso tem-se que a máxima corrente *inrush* será aproximadamente o equivalente a  $2/3$  da corrente  $i_{0m\acute{a}x}$  correspondente para um transformador monofásico [4];

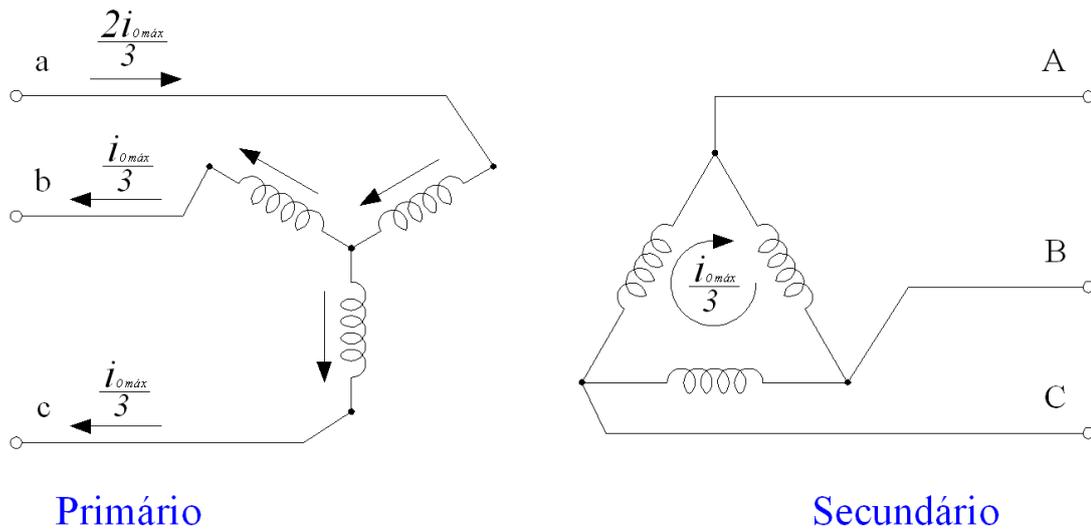


Figura 11. Corrente transitória de energização em um banco de transformadores conectado em  $Y - \Delta$ .

- Para um transformador trifásico de três colunas, no qual as três fases estão magneticamente interligadas, o fenômeno em decorrência da corrente de *inrush* pode ser tratado da mesma forma que banco de transformadores, constituído por três unidades monofásicas. Assim, se o primário estiver conectado em estrela, o fenômeno de *inrush* é similar ao Caso 2, independente do secundário está conectado em estrela ou triângulo. Logo, o máximo pico de corrente de *inrush* será aproximadamente o equivalente a  $2/3$  da corrente  $i_{0máx}$  correspondente para um transformador monofásico [4].

### 3.2 ESTIMATIVA DA ATENUAÇÃO DA AMPLITUDE DA CORRENTE DE *INRUSH*

A Equação 15 é uma fórmula aproximada que fornece a máxima corrente de *inrush* possível. Contudo, os engenheiros de projeto podem estar interessados no conhecimento dos valores de pico para os primeiros ciclos ou tempo depois do qual a corrente de *inrush* se reduz até seu valor nominal. Os procedimentos para estimar os picos da corrente de *inrush* para os primeiros ciclos são desenvolvidos em [4]. Tais procedimentos são geralmente aplicáveis para os ciclos iniciais. A seguir, segue uma síntese de tais procedimentos para o cálculo da corrente de *inrush*:

- Após a saturação do núcleo, a corrente de *inrush* é limitada pela reatância do ar,  $X_s$ , a qual pode ser calculada pela Equação 16:

$$X_s = \frac{\mu_0 \cdot N_{\text{espiras}}^2 \cdot A_m}{h_{\text{enrolamento}}} \times 2 \cdot \pi \cdot f \quad [\Omega] \quad (16)$$

- A seguir, o ângulo  $\theta$  é calculado pela Equação 17, o qual corresponde ao instante no qual o núcleo satura:

$$\theta = K_1 \cdot \cos^{-1} \left\{ \frac{B_s - B_{mp} - B_r}{B_{mp}} \right\} \quad [rad] \quad (17)$$

Onde,

- $K_1$  representa o fator de correção do ângulo de saturação e é igual a 0,9;

$$- B_{mp} = \frac{U}{4,44 \cdot f \cdot N_{\text{espiras}} \cdot A_{\text{nucleo}}} \quad [T];$$

- $B_s$  é a densidade de fluxo de saturação em [T] e é igual a 2,03 T, ou  $1,25 \times B_{mp}$  [5];

- $B_r$  é a densidade de fluxo residual em [T] e é igual a  $0,8 \times B_{mp}$ .

- Em seguida, é calculada a corrente de *inrush* pela Equação 18 para o primeiro ciclo:

$$i_{0\max} = \frac{K_2 \cdot U \cdot \sqrt{2}}{X_s} \cdot (1 - \cos \theta) \quad (18)$$

Onde,

- $U$  representa a tensão eficaz aplicada em [V];

- $K_2$  representa fator de correção do valor de pico e é igual a 1,15.

- Após ter calculado o valor de pico da corrente de *inrush* do primeiro ciclo, a densidade de fluxo residual ao final do primeiro ciclo é então calculada. A componente residual da densidade de fluxo é reduzida devido às perdas no circuito. O novo valor para a densidade de fluxo residual é calculado pela Expressão 19:

$$B_{r(novo)} = B_{r(antigo)} - B_{mp} \cdot \frac{K_3 \cdot R}{X_s} [2(\text{sen} \theta - \theta \cdot \cos \theta)] \quad (19)$$

Onde,

-  $R$  é a soma da resistência do enrolamento com a resistência do sistema em  $[\Omega]$ ;

-  $K_3$  é o fator de correção para atenuação da corrente de *inrush*, o qual é igual a 2,26.

## 4 ESTRESSES ELETROMECHANICOS E TIPOS DE FALHAS NOS TRANSFORMADORES

Segundo [6], as falhas em transformadores de potência muitas vezes são originadas pelas correntes de *inrush*. Nesse contexto, os autores investigam como forças eletromecânicas, originadas pela energização do transformador, se distribuem no interior dos enrolamentos do mesmo, e em seguida é feita uma comparação com as forças originadas pela ocorrência de um curto-circuito.

Resultados mostram que, embora os picos da corrente de *inrush* sejam 70% da corrente de curto-circuito, as forças podem provocar danos semelhantes às provocadas pelo curto-circuito, uma vez que o tempo de duração das correntes de *inrush* é maior que o tempo de duração das correntes de curto-circuito. Além disso, a situação de corrente de *inrush* é muito mais frequente, podendo ser considerada como uma operação normal de serviço. Desta forma, um cuidado deve ser tomado de forma a evitar as altas correntes de energização.

A força local que age em um ponto particular no enrolamento do transformador depende da densidade total de campo. Esta densidade total, em uma situação de curto-circuito, representa uma superposição das componentes de campo produzidas pela corrente nos condutores do primário e secundário, além daquelas produzidas como resultado do fluxo de dispersão.

Por outro lado, em um evento de alta corrente de *inrush*, o núcleo satura-se e sua permeabilidade efetiva reduz bastante. Assim, na investigação das forças devido à corrente de *inrush*, apenas a componente de campo produzida pela corrente no condutor do enrolamento primário é considerada [7].

A título de exemplo, assumindo, que a corrente de *inrush* seja tão alta quanto à de curto-circuito, o campo magnético local nas extremidades das derivações das bobinas é até 80% mais alto na situação de energização comparado com a condição de curto-circuito [6].

A seguir são descritas as características das forças radiais e axiais durante a energização de um transformador, ou seja, as forças causadas pela corrente de *inrush*.

### 4.1 FORÇA RADIAL

Para analisar a contribuição da corrente de *inrush* no aparecimento da componente radial da força que atua no enrolamento, [9] analisa quatro situações de um transformador

operando em sistema de potência e examina o problema da influência da corrente de *inrush* e de curtos-circuitos.

A princípio, considera-se um transformador com dois enrolamentos, sendo o enrolamento de baixa tensão mais próximo do núcleo. Inicialmente, o transformador está desenergizado, sendo energizado posteriormente pelo lado de baixa tensão durante o curto-circuito no lado de alta tensão. Durante o transitório, componentes aperiódicas aparecem nos enrolamentos de alta e de baixa tensão, que compõem a corrente de *inrush*, elevando a amplitude da corrente apenas no enrolamento de baixa tensão, podendo o pico desta corrente ser maior que duas vezes o pico da corrente de curto-circuito.

Segundo [9], o caso acima citado é o único que aumenta a amplitude da corrente de curto-circuito no enrolamento mais próximo do núcleo. A corrente de *inrush* diminui a compressão radial do enrolamento interno, em virtude da presença da componente radial do campo magnético que aparece durante a saturação do núcleo.

Com elevados valores de corrente circulando pelo enrolamento mais próximo do núcleo, há compressão radial e produção de instabilidade no enrolamento. Assim, a presença da corrente de *inrush* neste caso, seria benéfica, pois reduziria a compressão radial.

As forças radiais são mais bem caracterizadas em termos da pressão radial a que os enrolamentos ficam submetidos. No trabalho de [6] é apresentada uma metodologia para obter a pressão radial, sendo esta análise possível já que pressão é a relação entre força e área, em uma determinada altura do enrolamento a partir do seccionamento do enrolamento, ao longo de sua espessura, em níveis discretos. Desta forma, somando numericamente os valores das pressões calculadas, isto é,  $p_{r1}(z), p_{r2}(z), \dots, p_{rn}(z)$  em  $N$  pontos equidistantes por elemento diferencial, tem-se então a distribuição total na direção radial, ou seja:

$$p_r(z) = p_{r1}(z) + p_{r2}(z) + \dots + p_{rn}(z) \quad (20)$$

As forças radiais sob *inrush* produzirão efeito apenas em um enrolamento, ou seja, aquele que for energizado. A tendência dos esforços eletrodinâmicos é expandir (estresses de tração) o enrolamento [6], [7] e [10], podendo prejudicar a isolação do condutor.

Na Figura 12 é ilustrado o sentido da força no enrolamento de alta tensão do transformador sendo energizado, assim como, o fluxo magnético no núcleo e de dispersão e a densidade de corrente no enrolamento. Pode-se observar na Figura 12 e com o auxílio da regra da mão direita, o sentido da força radial atuando no enrolamento que tende a tracioná-lo.

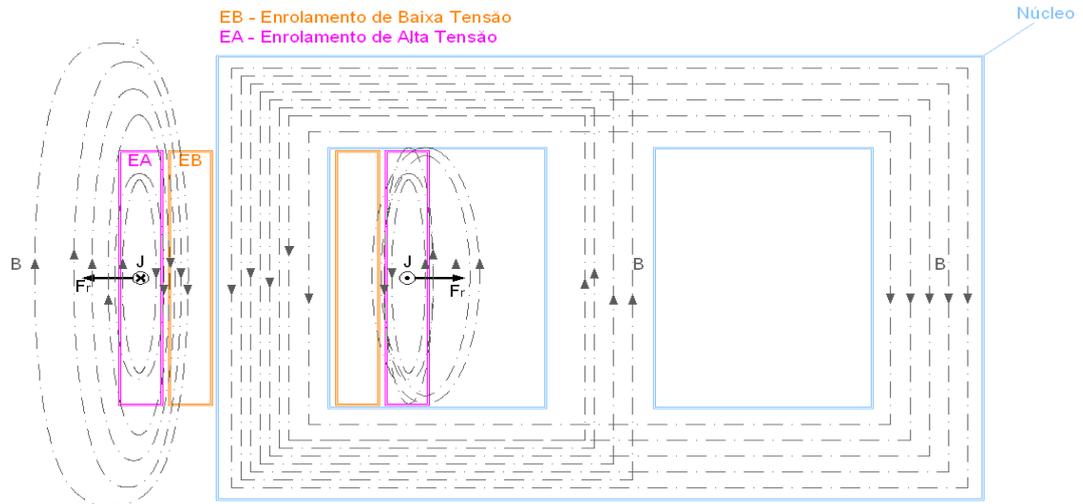


Figura 12. Sentido da força radial no enrolamento de alta tensão em um transformador durante sua energização (*inrush*).

## 4.2 FORÇA AXIAL

Analogamente, a situação de curto-circuito, a força axial originada durante a energização se configura conforme é mostrado na Figura 13, onde se pode observar a deformação ocorrida pelos condutores, além de enfatizar a deformação. Ainda na Figura 13 é ilustrado o possível atrito que se dá no contato entre os condutores, danificando a isolamento destes, e a compressão dos espaçadores. Fazendo uma comparação desta força com aquela devida ao curto-circuito (assumindo a mesma corrente para ambos os efeitos), a força axial devido à corrente de *inrush* é bem maior [6], [7] e [9].

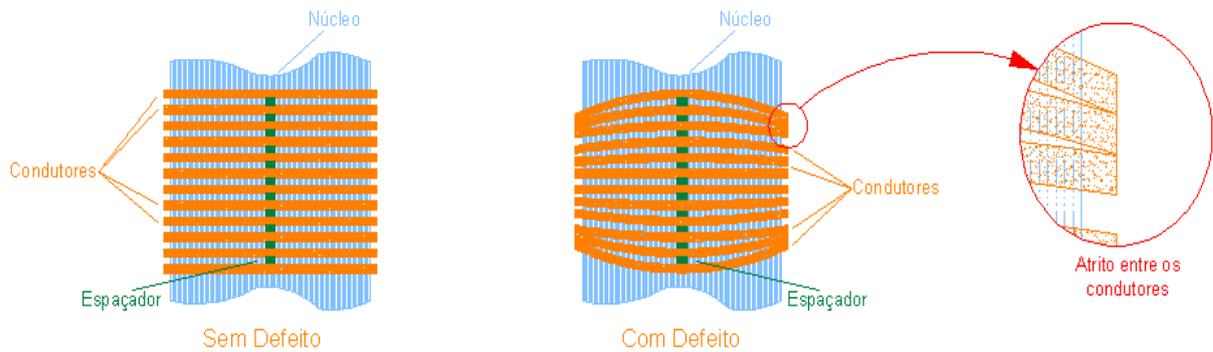


Figura 13. Representação da compressão axial em um enrolamento do transformador durante sua energização (“*inrush*”).

Desta forma, conclui-se que o fluxo magnético de dispersão quando o transformador está em vazio, é maior comparado com a situação em que o transformador opera em curto-circuito. Isto se deve ao fato de que em situações de curto-circuito, as distribuições das densidades de corrente em ambos os enrolamentos são opostas e praticamente iguais, assim, considera-se que o núcleo está bem abaixo da saturação, conduzindo a um elevado valor de permeabilidade. Já em eventos envolvendo correntes de *inrush*, os núcleos tornam-se saturados e sua permeabilidade efetiva reduz-se drasticamente [8].

Outra explicação plausível é que estando o transformador operando em curto-circuito, ambos os enrolamentos estarão sendo percorridos por correntes com sentidos contrários. Isto fará com que a metade superior de cada enrolamento interaja forçando para baixo a metade inferior do outro enrolamento, diminuindo assim, a compressão axial dos enrolamentos.

No caso da ocorrência do fenômeno de *inrush* com o transformador em vazio, apenas um enrolamento estará sendo percorrido por corrente e a atenuação da compressão axial como no caso do curto-circuito não existirá. Isto evidencia a afirmação de que para correntes de mesma amplitude, as forças axiais devidas ao fenômeno de *inrush* serão mais elevadas que no caso de curto-circuito.

Na Figura 14 é ilustrado o caso da compressão axial durante a energização e durante um curto-circuito do transformador. No caso do curto-circuito, a interação da metade superior de cada enrolamento com a metade inferior do outro enrolamento é representada pelas forças  $F_{ea}$ ,  $F_{eb'}$ ,  $F_{ea''}$  e  $F_{eb''}$ .

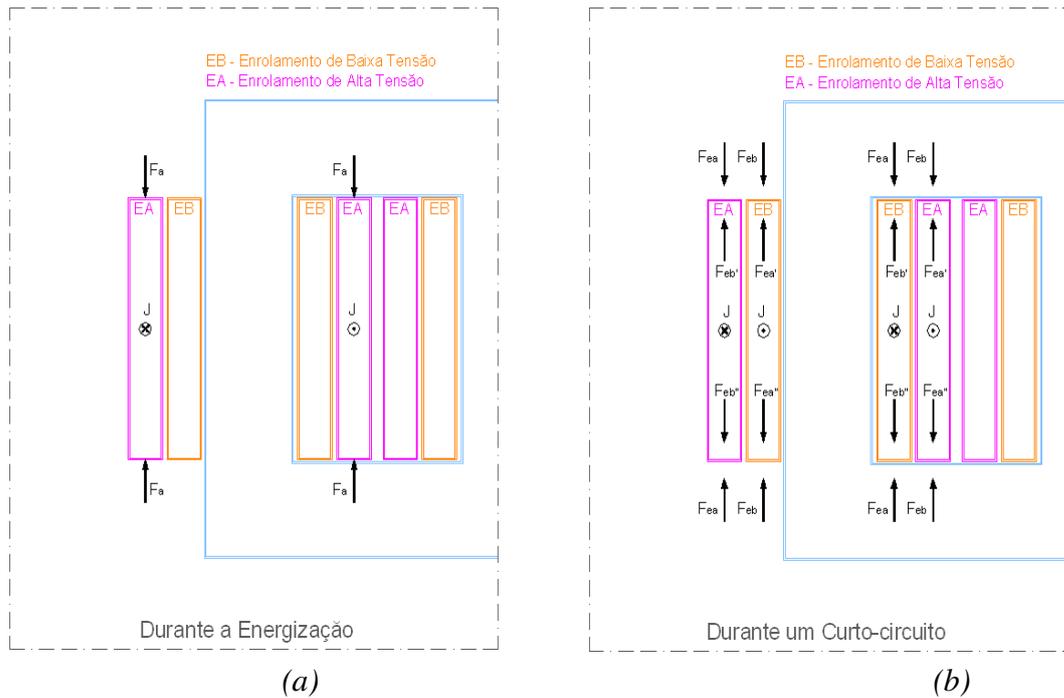


Figura 14. Compressão axial dos enrolamentos: (a) durante a energização e (b) durante um curto-circuito.

Apesar de geralmente a corrente de *inrush* possuir amplitude menor que a corrente de curto-circuito, o fenômeno de *inrush* ocorre com uma frequência maior que os eventos de curto-circuito. Assim, a constante manobra de conectar o transformador ao sistema de potência, provoca a atuação de forças axiais causando deformações sucessivas (fenômeno cumulativo) no enrolamento, tendendo a danificá-lo.

De forma análoga para as forças radiais, o trabalho de [6] também apresenta uma metodologia para obter a força axial em uma determinada altura do enrolamento, mediante o seccionamento do enrolamento em níveis discretos. Assim, ao somar os valores das forças calculadas ( $F_{z1}(z), F_{z2}(z), \dots, F_{zn}(z)$ ) nos  $N$  pontos equidistantes por elemento diferencial, tem-se então a distribuição total na direção axial, isto é:

$$F_z(z) = F_{z1}(z) + F_{z2}(z) + \dots + F_{zn}(z) \quad (21)$$

## 5 FORÇAS ELETROMAGNÉTICAS E ESFORÇOS ELETROMECAÑNICOS: ABORDAGEM ANALÍTICA

A técnica no domínio do tempo empregada em [8] e [10] permite a modelagem de transformadores utilizando forças magnetomotrizes e relutâncias magnéticas para calcular as forças eletromagnéticas e os estresses mecânicos.

O cálculo das forças eletromagnéticas no domínio do tempo é realizado de acordo com o postulado pela Equação 22, fundamentada na força de Lorentz [12].

$$\vec{f} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (22)$$

Para determinar a força média que atua nos enrolamentos, algumas manipulações devem ser efetuadas na Equação 22. Primeiramente, considere que um segmento elementar ( $dl$ ) do condutor percorrido por uma corrente  $I$ , está sob a ação de uma densidade de fluxo magnético vetorial  $\vec{B}$ , conforme é ilustrado na Figura 15.

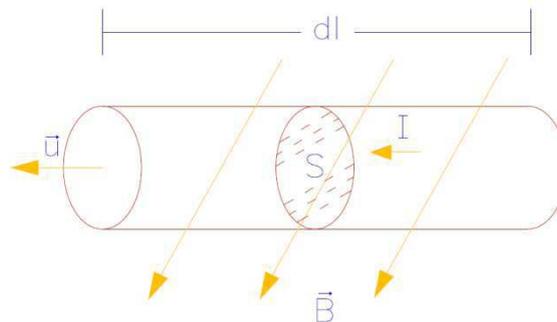


Figura 15. Segmento elementar de um condutor percorrido por uma corrente  $I$ .

Considerando que o vetor  $\vec{J}$  densidade superficial de corrente, pode-se defini-lo, na direção do vetor unitário, pela Equação 23.

$$\vec{J} = \frac{I}{S} \vec{u} \quad (23)$$

Onde,  $I$  é valor eficaz da corrente que percorre o condutor,  $S$  é a seção transversal do condutor, e  $\vec{u}$  é o vetor unitário na direção da corrente  $I$ . O segmento  $dl$  pode ser expresso pela Equação 24.

$$d\vec{l} = dl \vec{u} \quad (24)$$

Sendo,  $dl$  o comprimento elementar do condutor. Então, pode-se escrever que:

$$\vec{u} = \frac{d\vec{l}}{dl} = \frac{\vec{J}}{J} \quad (25)$$

A força atua sobre o segmento do condutor é dada pela Equação 26.

$$d\vec{F} = \vec{f} dV \quad (26)$$

onde,  $dV$  é o elemento diferencial de volume dado por  $dV = S dl$ . Substituindo  $dV$  na Equação 26, tem-se:

$$d\vec{F} = \vec{f} S dl \quad (27)$$

Substituindo a Equação 25 do vetor unitário na Equação 27 obtém-se:

$$d\vec{F} = \frac{d\vec{l}}{dl} \times \vec{B} I dl \quad (28)$$

Finalmente, chega-se a Equação 29 que exprime a força experimentada pelo condutor de comprimento  $dl$ .

$$d\vec{F} = d\vec{l} \times \vec{B} I \quad (29)$$

Do conceito de produto vetorial sabe-se que a força resultante é perpendicular ao plano formado pelos vetores  $d\vec{l}$  e  $\vec{B}$ , cujo módulo é obtido pela Equação 30.

$$dF = B I dl \sin\theta \quad (30)$$

Onde,  $\theta$  é o ângulo formado pelos vetores  $d\vec{l}$  e  $\vec{B}$ . A partir da Equação 30, determinam-se as forças eletromagnéticas atuando em um enrolamento de  $n$  espiras, percorridas por uma corrente  $I$ , lembrando-se que  $\theta = 90^\circ$ . Dessa maneira, integrando-se a Equação 30, o módulo da força que atua nas bobinas do transformador pode ser obtido pela Equação 31.

$$F = n I B l \quad (31)$$

Sendo,  $n$  o número de espiras do enrolamento, e  $l$  o comprimento da espira.

Considerando que o comprimento de uma espira circular é igual a  $l = \pi D$ , a Equação 31, que define a força radial total atuando sobre o enrolamento, pode ser reescrita na forma da Equação 32.

$$F = n I B \pi D_m \quad (32)$$

Onde,  $D_m$  é o diâmetro médio do enrolamento.

## 5.1 CÁLCULO ANALÍTICO DAS FORÇAS RADIAIS

Substituindo a densidade de fluxo na Equação 32, a força radial resultante pode ser reescrita pela Equação 33. Contudo, a força de interesse é aquela denominada de força radial média. Dessa forma, a partir da Equação 33, dividida pelo valor de  $\pi$ , obtém-se a expressão que permite determinar o valor da força radial média, conforme Equação 34.

$$F_r = \frac{2\pi^2 (n \cdot i_{0\max})^2 D_m}{h} 10^{-7} [N] \quad (33)$$

$$F_{r\text{med}} = \frac{F_r}{\pi} = \frac{2\pi \cdot (n \cdot i_{0\max})^2 D_m}{h} 10^{-7} [N] \quad (34)$$

Sendo,  $F_{r\text{med}}$  a força radial média no enrolamento que será energizado.

O estresse de tração é calculado a partir da força radial média e das dimensões físicas do condutor, de acordo com a Equação 35 [11].

$$\sigma_{\text{medio}} = \frac{(i_{0\max})^2}{h} \frac{n \cdot \pi \cdot D_m}{a_c} 10^{-7} \left[ \frac{N}{m^2} \right] \quad (35)$$

Onde  $a_c$  é a área do condutor em  $[m^2]$ .

Para o caso de o enrolamento ser em camada, deve-se considerar um fator de multiplicação no cálculo do estresse, levando em conta a camada mais próxima do ducto do transformador, já que esta receberá o maior estresse. Este fator é dado pela Equação 36.

$$f_c = 2 - \frac{1}{C_e} \quad (36)$$

Onde  $C_e$  é o número de camadas do enrolamento.

No domínio do tempo, a força radial média pode ser obtida conforme a Equação 37.

$$f_{r_{med}}(t) = n i(t) B(t) D_m \quad (37)$$

## 5.2 CÁLCULO ANALÍTICO DAS FORÇAS AXIAIS

Em condições ideais, as forças magnetomotrizes estão uniformemente distribuídas nos enrolamentos concêntricos de igual comprimento de um transformador [4].

A força axial que ocorre devido ao campo radial nas extremidades das bobinas estará dirigida para o ponto médio do enrolamento a ser energizado.

Segundo [11], a soma das compressões axiais próximo ao ponto médio em ambos os enrolamentos interno e externo é definido pela Equação 38.

$$F_{cTotal} = \frac{2\pi^2 (n \cdot i_{omáx})^2 D_{mt}}{h^2} \cdot 10^{-7} \cdot \left[ d_0 + \frac{d_i + d_e}{3} \right] \quad (38)$$

Onde,  $d_0$  é o espaço entre os enrolamentos e  $d_i$  e  $d_e$  são as espessuras radiais dos enrolamentos.

De acordo com [13], pode-se considerar que cerca de 2/3 a 3/4 desta força é aplicada no enrolamento interno e os 1/3 a 1/4 restantes estão aplicados no enrolamento externo.

Contudo, como apenas uma bobina é submetida pela corrente de *inrush*, tal divisão não é necessária, sendo, portanto a força compressiva total dirigida apenas ao enrolamento energizado.

A força axial total nas extremidades do enrolamento é dada pela Equação 39:

$$F_a = 1,25 \cdot 0,366 \cdot q \cdot F \cdot \log \left( 1 + \frac{4 \cdot d_1^2}{w^2} \right) [\text{N}] \quad (39)$$

Onde:

- $q$  : é o ampère-espira do final da bobina ou da espira;
- $w$ : representa a dimensão axial do condutor, considerando sua isolamento;

- $d_1$  : é a largura equivalente do ducto  $d_0 + \frac{1}{3}(d_i + de)$  do transformador;
- $h$  : comprimento do enrolamento;
- $F = \frac{2\pi^2 (n \cdot i_{0\max})^2 D_{mt}}{10^7 \times h}$  [N] .

## 6 EXEMPLO DE CÁLCULO DOS ESFORÇOS ELETROMECAÂNICOS EM UM TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE 15 kVA SOB CORRENTE DE *INRUSH*

O transformador selecionado é do tipo convencional trifásico de 15 kVA, com enrolamentos concêntricos, sendo o enrolamento externo e o enrolamento interno do tipo camada.



Figura 16. Transformador utilizado para os cálculos.

### 6.1 PARÂMETROS DO TRANSFORMADOR

A Tabela 1 apresenta as características do transformador utilizado para o cálculo dos esforços eletromecânicos.

Tabela 1. Parâmetros do transformador.

Grandeza	Valor
Potência do Transformador (kVA)	15 kVA
Frequência (Hz)	60 Hz
Tensão Nominal do Enrolamento Interno (V)	220 V
Tensão Nominal do Enrolamento Externo (V)	220 V
Número de Camadas do Enrolamento	2
Número de Espiras	66
Largura do Ducto (m)	0,013 m
Largura do Enrolamento Interno (m)	0,0095 m

Largura do Enrolamento Externo (m)	0,0095 m
Altura do Enrolamento (Interno/Externo) (m)	0,167 m
Diâmetro médio do Enrolamento Interno (m)	0,0965 m
Diâmetro médio do Enrolamento Externo (m)	0,1415 m
Área do Condutor do Enrolamento Interno (m <sup>2</sup> )	0,00001575 m <sup>2</sup>
Área do Condutor do Enrolamento Externo (m <sup>2</sup> )	0,00001575 m <sup>2</sup>
Dimensão axial do condutor considerando a isolação (m)	0,00506 m

## 6.2 ESFORÇOS ELETROMECAÑICOS

Tomando como base os cálculos apresentados no capítulo 5, as Tabelas 2 e 3 apresentam os valores das forças e estresses mecânicos nos enrolamentos do transformador em questão.

Tabela 2. Forças e estresse no enrolamento externo do transformador.

Grandeza	Valor
Força Radial Total (N)	15944,73 N
Força Radial Média (N)	5075,36 N
Estresse Radial Médio (N/m)	$3,662 \times 10^6$ N/m
Força Axial Compressivo Total (N)	1552,11 N
Força Axial na Extremidade do Enrolamento (N)	326,42 N

Tabela 3. Forças e estresse no enrolamento interno do transformador.

Grandeza	Valor
Força Radial Total (N)	48035,17 N
Força Radial Média (N)	15290,1 N
Estresse Radial Médio (N/m)	$11,03 \times 10^6$ N/m
Força Axial Compressivo Total (N)	6856,37 N
Força Axial na Extremidade do Enrolamento (N)	1441,93 N

## 7 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentados os aspectos da corrente de *inrush* e como esta corrente pode submeter as partes ativas e estruturais dos transformadores a elevados esforços mecânicos, podendo danificá-los permanentemente.

Foram apresentadas as características do núcleo magnético dos transformadores, descrevendo o processo de ocorrência do *inrush* através da curva de magnetização do núcleo. Foi descrito também o efeito de se ter fluxo remanescente no núcleo do transformador no momento da sua energização e como esse fluxo pode levar o núcleo rapidamente à saturação.

As forças foram tratadas separadamente, explicitando os esforços devido às forças radiais e axiais. Para cada tipo de força foi desenvolvida uma abordagem analítica. Também foi apresentada uma metodologia analítica para a estimativa do primeiro pico da corrente de *inrush*, visando estudar os esforços no pior caso que é quando ocorre o maior valor de corrente. As forças radiais tendem a tracionar, ou seja, expandir o enrolamento. Enquanto que as forças axiais tendem a comprimir o enrolamento.

Foi ilustrado também como as deformações nos enrolamentos e estruturas de fixação quando submetidos aos esforços devido à energização do transformador podem levar a falhas na isolação dos condutores, podendo ocasionar um curto-circuito entre espiras.

Por fim, foram calculados os esforços mecânicos para um transformador de 15 kVA utilizando a metodologia analítica desenvolvida. Esses valores são importantes para a geração de medidas preventivas e recomendações operativas que busquem mitigar as solicitações impostas ao transformador.

## 8 REFERÊNCIAS

- [1] COSTA, J. M. S. C.; FREIRE A. R. F.; BARROS, S. A.; GUIMARÃES, A. C. S. L.; CASADO, L. M.; SILVA, R. F. “Metodologia e Critérios para Estudos de Energização de Transformadores de Potência: Experiência da Chesf”. *Décimo Terceiro Encontro Regional Iberoamericano de Cigré*, Puerto Iguazú – Argentina, maio 2009.
- [2] GUY, A. G. *Ciências dos Materiais*. Rio de Janeiro: LTC/EDUSP. Ed., 1980.
- [3] ARAÚJO, A. E. A.; NEVES, W. L. A. *Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia*. Belo Horizonte: UFMG, 1. Ed., 2004.
- [4] KULKARNI, S. V.; KHAPARDE, S. A. *Transformer Engineering – Design and Practice*. 1. ed. [S.l.]: Marcel Dekker, Inc, New York, 2004.
- [5] LASZLO, P.; GYORGY, B.; GABOR B.; PETER, B. “Reducing the Magnetizing Inrush Current by Means of Controlled Energization and De-Energization of Large Power Transformers”. *International Conference on Power System Transients (IPST 2003)*, New Orleans.
- [6] STEURER, M.; FROHLICH, K. “The Impact of Inrush Currents on the Mechanical Stress of High Voltage Power Transformer Coils”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 17, n. 1, p. 155-160, January 2002.
- [7] ADDLY, A. A. “Computation of Inrush Current Forces on Transformer Windings”. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 37, n. 4, p. 2855 – 2857, July 2001.
- [8] APOLÔNIO, R. *Modelagem e Chaveamento Controlado de Transformadores: Análise Computacional e Validação Experimental*. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Dezembro 2004.
- [9] A. I. L'URE. “Transformer Connection Under No-Load and Short-Circuit Events”. *Russian Electrical Engineering*, v. 79, n. 2, p. 57-70, 2008.
- [10] APOLÔNIO, R.; CHAVES, M. L. R.; OLIVEIRA, J. C.; BROZEADO, H. S. *Projeto Chesf de P&D (CHESF/FAU/UFU). Chaveamento Controlado de Transformadores*.

Relatório 08/10. Estudos Computacionais das Energizações da SE-Eunápolis. Uberlândia, 2004.

[11] AZEVEDO, A. C. *Estresse Eletromecânico em Transformadores Causado por Curtos-Circuitos “Passantes” e Correntes de Energização*. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Fevereiro, 2007.

[12] BASTOS, J. P. A. *Eletromagnetismo e Cálculo de Campos*. 2. Ed. [S.1.]: UFSC, 1992.

[13] MINHAS, M.; REYNDERS, J.; KLERK, P. D. “Failures in Power System Transformers and Appropriate Monitoring Techniques”. *Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering*, Conf. Publ. No. 467, v. 1, 1999.

[14] ESTRESSE eletromecânico em transformadores causado pelas altas correntes de energização (“*inrush*”) e de curto-circuitos passantes: impacto dos fenômenos da corrente de energização no transformador. **Relatório do Projeto Chesf de Pesquisa e Desenvolvimento**, Uberlândia outubro, 2009.