

INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA

CAMPUS JOINVILLE

APOSTILA DE ELETROMAGNETISMO

PROF. ANA BARBARA KNOLSEISEN SAMBAQUI, D.ENG.
PROF. LUIS S. B. MARQUES, D.ENG.

JOINVILLE – AGOSTO, 2010

Esta apostila é um material de **apoio didático** utilizado nas aulas da unidade curricular *Eletromagnetismo*, do Instituto Federal de Santa Catarina (IF-SC), Campus Joinville. Portanto, este material não tem a pretensão de esgotar o assunto abordado, servindo apenas como primeira orientação aos alunos.

O aluno deve desenvolver o hábito de consultar e estudar a Bibliografia Referenciada original para melhores resultados no processo de aprendizagem.

Neste material estão sendo usados o sentido convencional da corrente elétrica e o Sistema Internacional de Unidades.

Prof. Ana Barbara Knolseisen Sambaqui

anabarbara@ifsc.edu.br

Prof. Luis S. B. Marques

luisbm@ifsc.edu.br

ÍNDICE

1	ELETROSTÁTICA.....	1
1.1	CARGA ELÉTRICA.....	1
1.1.1	Condutores e Isolantes.....	1
1.2	TIPOS DE ELETRIZAÇÃO.....	1
1.2.1	Eletrização por Atrito.....	1
1.2.2	Eletrização por Indução.....	2
1.2.3	Eletrização por Contato.....	2
1.3	LEI DE COULOMB.....	2
1.4	CAMPO ELÉTRICO.....	3
1.4.1	Módulo do Vetor Campo Elétrico.....	3
1.4.2	Direção e Sentido do Vetor Campo Elétrico.....	3
1.5	POTENCIAL ELÉTRICO.....	4
2	ELETROMAGNETISMO.....	6
2.1	MAGNETISMO.....	6
2.1.1	Campo Magnético e Linhas de Campo Magnético.....	6
2.1.2	Fluxo Magnético.....	7
2.1.3	Densidade de Campo Magnético.....	7
2.1.4	Permeabilidade Magnética.....	8
2.1.5	Relutância Magnética.....	9
2.2	FENÔMENOS ELETROMAGNÉTICOS.....	10
2.2.1	Descoberta de Oersted.....	10
2.2.2	Campo Magnético criado por Corrente Elétrica.....	11
2.2.3	Fontes de Campo Magnético.....	12
2.2.4	Força Magnetizante (Campo Magnético Indutor).....	14
2.2.5	Força Magneto-Motriz.....	15
2.2.6	Lei de Ampère.....	16
2.2.7	Força Eletromagnética.....	17
2.2.8	Indução Eletromagnética.....	20
2.3	CIRCUITOS MAGNÉTICOS.....	24
2.3.1	Campo Magnético e Linhas de Campo Magnético.....	24
2.3.2	Indutor.....	25
2.3.3	Perdas em Materiais Ferromagnéticos.....	26
3	TRANSFORMADORES.....	28
3.1	INTRODUÇÃO.....	28
3.2	DEFINIÇÃO.....	28
3.2.1	Princípio de funcionamento.....	29
3.3	O TRANSFORMADOR IDEAL.....	29
3.3.1	Equação Fundamental de um Transformador Ideal.....	30
3.3.2	Reflexão de Impedâncias.....	31
3.4	POLARIDADE DO TRANSFORMADOR.....	31
3.4.1	Polaridade Aditiva ou Subtrativa.....	32
3.4.2	Método da Corrente Alternada.....	33
3.5	O TRANSFORMADOR REAL.....	33
3.5.1	Simplificação do Circuito Equivalente.....	34
3.6	ENSAIO DE CURTO-CIRCUITO E CIRCUITO ABERTO.....	35
3.6.1	Ensaio de Circuito Aberto.....	35
3.6.2	Ensaio de Curto-Circuito.....	36
3.7	O DESEMPENHO DO TRANSFORMADOR.....	37
3.7.1	Características de Placa.....	37
3.7.2	Regulação de Tensão.....	37
3.7.3	Rendimento.....	38
3.8	ASSOCIAÇÃO DE TRANSFORMADORES.....	38
3.8.1	Transformadores em Paralelo.....	38
3.8.2	Banco de Transformadores Monofásicos.....	39
3.9	TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS.....	41
3.9.1	Relação de Transformação.....	42
3.9.2	Ligações de Transformadores Trifásicos.....	43
3.10	CORRENTE DE EXCITAÇÃO.....	44
3.11	AUTOTRANSFORMADOR.....	46
3.11.1	Definição.....	46
3.11.2	Vantagens e Desvantagens do Autotransformador.....	47
4	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49

1 ELETROSTÁTICA

1.1 CARGA ELÉTRICA

Cargas elétricas são partículas que compõem o átomo, podendo ser classificadas como prótons (carga positiva) e elétrons (cargas negativas). Estas cargas proporcionam forças gravitacionais entre corpos, que podem ser de atração ou repulsão, dependendo do tipo de carga presente nos corpos, positivos ou negativos:

- corpos com cargas diferentes se atraem;
- corpos com a mesma carga se repelem.

Um corpo em seu estado normal, não eletrizado, possui um número de prótons igual ao número de elétrons. Se este corpo perder elétrons, estará com excesso de prótons, isto é, apresentar-se-á eletrizado positivamente. Se ele receber elétrons, possuirá um excesso destas partículas e estará eletrizado negativamente.

1.1.1 Condutores e Isolantes

Em certos sólidos, os elétrons das camadas mais externas não permanecem ligados a seus respectivos átomos, por possuírem uma força de ligação entre si muito pequena. Portanto, adquirem liberdade de se movimentar no interior do sólido. Estes elétrons são denominados elétrons livres, e os sólidos que possuem estes elétrons são condutores de eletricidade, pois permitem que a carga elétrica seja transportada através deles. Como exemplo deste tipo de material podem ser citados os metais.

Já ao contrário dos condutores, existem sólidos nos quais os elétrons estão firmemente ligados aos respectivos átomos, isto é, estas substâncias não possuem (ou possuem poucos) elétrons livres. Portanto, não será possível o deslocamento de carga elétrica através destes corpos, que são denominados *isolantes elétricos* ou *dielétricos*. Por exemplo, a porcelana, a borracha, o vidro e etc.

O símbolo de carga elétrica é Q ou q . A letra maiúscula será empregada para denotar cargas constantes e a letra minúscula para denotar cargas variáveis no tempo ($q(t)$). A unidade de carga é Coulomb e simbolizada por C. Sendo que um Coulomb é de $6,24 \times 10^{18}$ elétrons.

1.2 TIPOS DE ELETRIZAÇÃO

1.2.1 Eletrização por Atrito

Atritando um corpo ao outro, há transferência de elétrons entre eles. Ficando um corpo eletrizado positivamente (o que perde elétrons), e o outro eletrizado negativamente (o que ganha elétrons). Perderá elétrons o átomo que exercer menor força sobre eles. Assim, um mesmo corpo poderá se eletrizar positivamente ou negativamente, dependendo do corpo com o qual for atritado.

Por exemplo: a seda quando atritada com vidro adquire carga negativa (porque retira elétrons do vidro), já quando atritada com borracha adquire carga positiva (perde elétrons para a borracha). Abaixo é apresentada uma tabela com algumas substâncias, ordenadas de tal modo que qualquer uma delas adquire carga positiva quando atritada com as substâncias que a seguem e adquire carga negativa quando atritada com as que a precedem.

Substância
Vidro
Mica
Lã
Pele de gato
Seda
Algodão
Ebonite
Cobre
Enxofre
Celulóide

Figura 1: Tabela de eletropositividade.

1.2.2 Eletrização por Indução

Aproximando um corpo eletrizado positivamente (exemplo), à um condutor não eletrizado, apoiado em um suporte isolante, pode-se observar que os elétrons livres, existentes em grande quantidade no condutor são atraídos pela carga positiva do corpo. A aproximação do corpo carregado provoca no condutor, uma separação de cargas, embora, como um todo, ele continue neutro (sua carga total é nula). Esta separação de cargas em um condutor, provocada pela aproximação de um corpo eletrizado, é denominada *indução eletrostática*.

Supondo que estabeleça uma ligação entre a parte eletrizada positivamente, à Terra, esta ligação fará com que elétrons livres passem da Terra para o condutor. Estes elétrons neutralizarão a carga positiva induzida localizada nesta extremidade. Se a ligação à terra for desfeita, e em seguida o indutor afastado, a carga negativa induzida se distribuirá pela superfície do condutor. Esta maneira de eletrizar é denominada *eletrização por indução*.

1.2.3 Eletrização por Contato

Considerando os mesmos corpos do item anterior, um corpo eletrizado positivamente e um condutor não eletrizado; ao encostar o corpo eletrizado à extremidade negativa do condutor, haverá troca das suas cargas, deixando esta extremidade neutra. Ao retirar o bastão, as cargas da extremidade contrária, se espalharão em todo condutor, ficando este eletrizado positivamente. Este processo de eletrização é denominado *eletrização por contato* ou *condução*.

1.3 LEI DE COULOMB

Considerando dois corpos eletrizados com cargas Q_1 e Q_2 , separados de uma distância r , e o tamanho destes corpos for muito pequeno em relação a distância r entre eles, a dimensão destes corpos pode ser considerada desprezível e estas cargas podem ser referidas como *cargas pontuais*.

Duas cargas pontuais, Q_1 e Q_2 , separadas por uma distância r , situadas no vácuo, se atraem ou se repelem com uma força F :

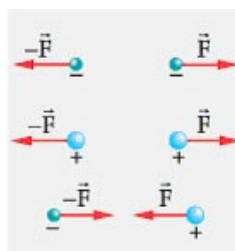


Figura 2: Lei de Coulomb.

Esta força é dada pela Lei de Coulomb:

$$F_0 = k_0 \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \quad [N] \quad (1)$$

onde $k_0 = 8,99 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2$ (constante de Coulomb no Sistema Internacional).

Se estas cargas forem mergulhadas em um meio material, o valor das forças entre elas torna-se k vezes menor:

$$F = \frac{F_0}{k} \quad [N] \quad (2)$$

onde k é a constante dielétrica do meio.

1.4 CAMPO ELÉTRICO

Considere uma carga Q fixa em uma determinada posição. Já sabemos que se uma outra carga q for colocada em um ponto P_1 , a uma certa distância de Q , aparecerá uma força elétrica atuando sobre q .

Suponha, agora, que a carga q fosse deslocada, em torno de Q , para outros pontos quaisquer, tais como P_2 , P_3 , etc. Evidentemente, em cada um destes pontos estaria também atuando sobre q uma força elétrica, exercida por Q . Para descrever este fato, dizemos que em qualquer ponto do espaço em torno de Q existe um **campo elétrico** ($\vec{E}$) criado por esta carga.

1.4.1 Módulo do Vetor Campo Elétrico

O módulo do vetor $\vec{E}$, em um dado ponto, costuma ser denominado **intensidade do campo elétrico** naquele ponto. Para definir este módulo, consideremos a carga Q , mostrada na Figura 7, criando um campo elétrico no espaço em torno dela. Colocando-se uma carga de prova q em um ponto qualquer, como o ponto P_1 , por exemplo, uma força elétrica $\vec{F}$ atuará sobre esta carga de prova. A intensidade do campo elétrico em P_1 será, por definição, dada pela expressão:

$$E = \frac{F}{q} \quad \left[\frac{N}{C} \right] \quad (3)$$

Reescrevendo:

$$F = E \cdot q \quad (4)$$

1.4.2 Direção e Sentido do Vetor Campo Elétrico

A direção e o sentido do vetor campo elétrico em um ponto são, por definição, dados pela direção e sentido da força que atua em uma carga de prova positiva colocada no ponto.

As **linhas de força**, traçadas pelos vetores campo elétrico, representam a direção e o sentido do campo elétrico. A Figura 3 apresenta a direção e o sentido do campo elétrico formado por uma carga positiva (Figura 3a) e por uma carga negativa (Figura 3b).

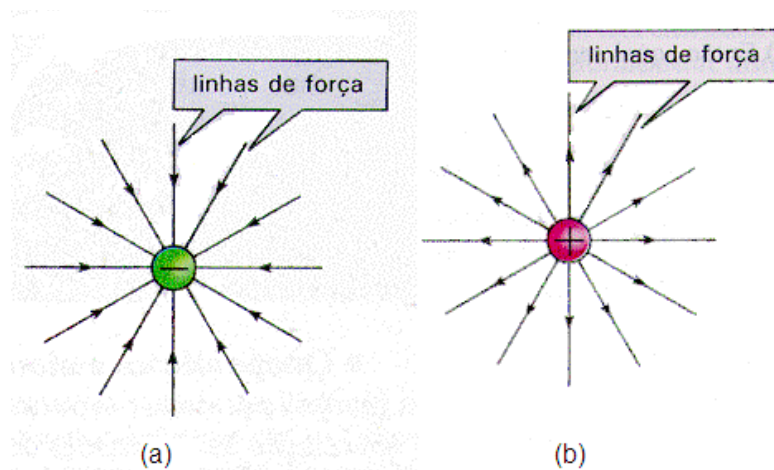


Figura 3: Direção e sentido do campo elétrico criado (a) por uma carga negativa e (b) por uma carga positiva.

1.5 POTENCIAL ELÉTRICO

Uma carga Q , estabelece em um ponto situado a uma distância d desta carga, um potencial V dado por:

$$V = \frac{k_o \cdot Q}{r} \quad (\text{para o vácuo}) \quad (5)$$

$$V = \frac{1}{k_{\text{meio}}} \cdot \frac{k_o \cdot Q}{r} \quad (\text{para outros meios}) \quad (6)$$

Suponha um corpo eletrizado criando um campo elétrico no espaço ao seu redor. Considere dois pontos A e B neste campo elétrico, como mostra a Figura 4. Se uma carga de prova positiva q for abandonada em A, sobre ela atuará uma força elétrica F devida ao campo.

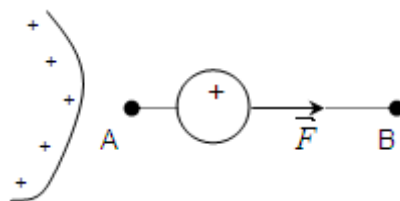


Figura 4: Partícula carregada deslocando-se de A para B.

Suponha que sob a ação desta força, a carga se desloque de A para B. Como sabemos, neste deslocamento a força elétrica estará realizando um trabalho que vamos designar τ_{AB} . Em outras palavras, τ_{AB} representa uma certa quantidade de energia que a força elétrica F transfere para a carga q em seu deslocamento de A para B.

A grandeza que relaciona o trabalho que a carga q realiza é definida como diferença de potencial ou tensão elétrica, conforme a fórmula abaixo:

$$V_{AB} = V_A - V_B = \frac{\tau_{AB}}{q} \quad [\text{V}] \quad (7)$$

$$\text{Unidade: } 1V (\text{Volt}) = \frac{1J}{1C}$$

O campo elétrico que existe entre um corpo com potencial elétrico V_A e outro corpo com potencial elétrico V_B separados por uma distância d é definido por:

$$E = \frac{V_{AB}}{d} \quad (8)$$

O campo elétrico que existe entre um corpo com potencial elétrico V_A e outro corpo com potencial elétrico V_B separados por uma distância d é definido por:

$$E = \frac{V_{AB}}{d} \quad (9)$$

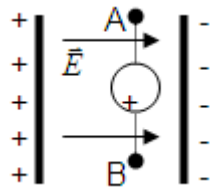


Figura 5: Campo Elétrico uniforme entre 2 placas paralelas.

A convenção de polaridade (+, -) usada, é mostrada na Figura 6. Ou seja, o terminal A é V volts positivos em relação ao terminal B. Em termos de diferença de potencial, o terminal A está V volts acima do terminal B.

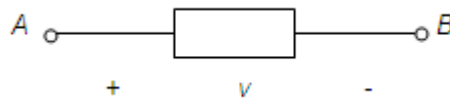


Figura 6: Convenção da polaridade da tensão.

2 ELETROMAGNETISMO

2.1 MAGNETISMO

2.1.1 Campo Magnético e Linhas de Campo Magnético

Campo magnético é a região ao redor de um ímã, na qual ocorre uma **força magnética** de atração ou de repulsão. O campo magnético pode ser definido pela medida da força que o campo exerce sobre o movimento das partículas de carga, tal como um elétron.

A representação visual do campo é feita através de **linhas de campo magnético**, também conhecidas por linhas de indução magnética ou linhas de fluxo magnético, que são linhas envoltórias imaginárias fechadas, que saem do pólo norte e entram no pólo sul. A Figura 7 mostra as linhas de campo representando visualmente o campo magnético.

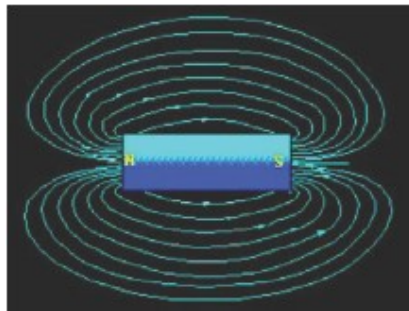


Figura 7: Linhas de campo magnético.

Assim, as características das linhas de campo magnético:

- são sempre linhas fechadas: saem e voltam a um mesmo ponto;
- as linhas nunca se cruzam;
- fora do ímã, as linhas saem do pólo norte e se dirigem para o pólo sul;
- dentro do ímã, as linhas são orientadas do pólo sul para o pólo norte;
- saem e entram na direção perpendicular às superfícies dos pólos;
- nos pólos a concentração das linhas é maior: quanto maior concentração de linhas, mais intenso será o campo magnético numa dada região.

Uma verificação das propriedades das linhas de campo magnético é a chamada inclinação magnética da bússola. Nas proximidades do equador as linhas de campo são praticamente paralelas à superfície e a medida que se aproxima dos pólos, as linhas vão se inclinando até se tornarem praticamente verticais na região polar. Assim, a agulha de uma bússola acompanha a inclinação dessas linhas de campo magnético e se pode verificar que na região polar a agulha da bússola tenderá a ficar praticamente na posição vertical.

Se dois pólos diferentes de ímãs são aproximados haverá uma força de atração entre eles, as linhas de campo se concentrarão nesta região e seus trajetos serão completados através dos dois ímãs. Se dois pólos iguais são aproximados haverá uma força de repulsão e as linhas de campo divergirão, ou seja, serão distorcidas e haverá uma região entre os ímãs onde o campo magnético será nulo. Estas situações estão representadas na Figura 8.

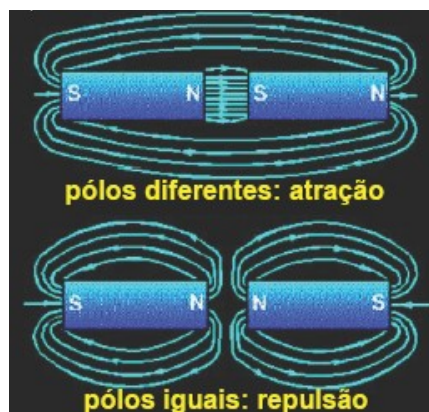


Figura 8: Distribuição das linhas de campo magnético.

No caso de um ímã em forma de ferradura, as linhas de campo entre as superfícies paralelas dispõem-se praticamente paralelas, originando um campo magnético uniforme. No campo magnético uniforme, todas as linhas de campo têm a mesma direção e sentido em qualquer ponto. A Figura 9 mostra essa situação. Na prática, dificilmente encontra-se um campo magnético perfeitamente uniforme. Entre dois polos planos e paralelos o campo é praticamente uniforme se a área dos polos for maior que a distância entre eles, mas nas bordas de um elemento magnético há sempre algumas linhas de campo que não são paralelas às outras. Estas distorções são chamadas de **espraçamento**.

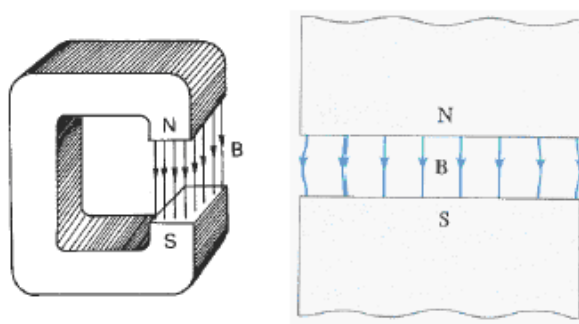


Figura 9: Campo magnético uniforme e espraçamento.

2.1.2 Fluxo Magnético

O **fluxo magnético**, simbolizado por ϕ , é definido como a quantidade de linhas de campo que atingem perpendicularmente uma dada área, como mostra a Figura 10. A unidade de fluxo magnético é o Weber (Wb), sendo que um Weber corresponde a 1×10^8 linhas do campo magnético.

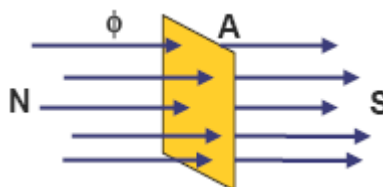


Figura 10: Fluxo magnético : quantidade de linhas de campo numa área.

2.1.3 Densidade de Campo Magnético

A **densidade de campo magnético**, **densidade de fluxo magnético** ou simplesmente **campo magnético**, cuja unidade Tesla (T), é uma grandeza vetorial representada pela letra

B é determinada pela relação entre o fluxo magnético e a área de uma dada superfície perpendicular à direção do fluxo magnético. Assim:

$$B = \frac{\phi}{A} \quad (10)$$

onde:

B : densidade fluxo magnético, Tesla [T]

Φ : fluxo magnético, Weber [Wb]

A : área da seção perpendicular ao fluxo magnético, metro quadrado [m^2]

$1T = 1Wb/m^2$

A direção do vetor B é sempre tangente às linhas de campo magnético em qualquer ponto, como mostra a Figura 11. O sentido do vetor densidade de campo magnético é sempre o mesmo das linhas de campo.

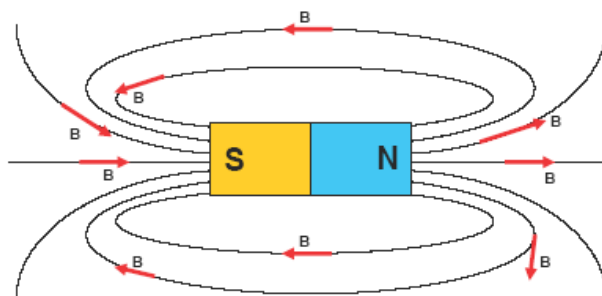


Figura 11: Vetor densidade de campo magnético: tangente às linhas de campo.

O número de linhas de campo magnético que atravessam uma dada superfície perpendicular por unidade de área é proporcional ao módulo do vetor B na região considerada. Assim sendo, onde as linhas de indução estão muito próximas umas das outras, B terá alto valor. Onde as linhas estiverem muito separadas, B será pequeno.

2.1.4 Permeabilidade Magnética

Se um material não magnético, como vidro ou cobre, for colocado na região das linhas de campo de um ímã, haverá uma imperceptível alteração na distribuição das linhas de campo. Entretanto, se um material magnético, como o ferro, for colocado na região das linhas de campo de um ímã, estas passarão através do ferro em vez de se distribuírem no ar ao seu redor porque elas se concentram com maior facilidade nos materiais magnéticos, como mostra a Figura 12. Este princípio é usado na blindagem magnética de elementos (as linhas de campo ficam concentradas na carcaça metálica não atingindo o instrumento no seu interior) e instrumentos elétricos sensíveis e que podem ser afetados pelo campo magnético.



Figura 12: Distribuição nas linhas de campo: material magnético e não magnético.

A blindagem magnética (Figura 13) é um exemplo prático da aplicação do efeito da permeabilidade magnética.

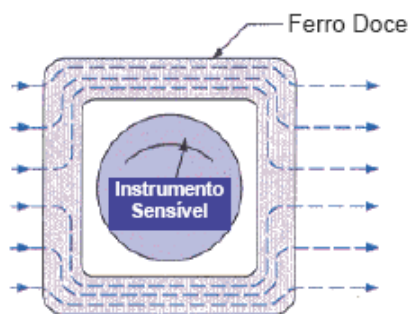


Figura 13: Efeito da blindagem magnética na distribuição das linhas de campo.

Portanto, um material na proximidade de um ímã pode alterar a distribuição das linhas de campo magnético. Se diferentes materiais com as mesmas dimensões físicas são usados, a intensidade com que as linhas são concentradas varia. Esta variação se deve a uma grandeza associada aos materiais chamada **permeabilidade magnética**, μ . A permeabilidade magnética de um material é uma medida da facilidade com que as linhas de campo podem atravessar um dado material.

A permeabilidade magnética do vácuo, μ_0 vale:

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \left[\frac{Wb}{A \cdot m} \right] \quad (11)$$

A unidade de permeabilidade também pode ser expressa por [T.m/A], ou ainda [H/m]. Assim: $H = Wb/A$.

A permeabilidade magnética de todos os materiais não magnéticos, como o cobre, alumínio, madeira, vidro e ar é aproximadamente igual à permeabilidade magnética do vácuo. Os materiais que têm a permeabilidade um pouco inferior à do vácuo são chamados **materiais diamagnéticos**. Aqueles que têm a permeabilidade um pouco maior que a do vácuo são chamados **materiais paramagnéticos**. Materiais magnéticos como o ferro, níquel, aço, cobalto e ligas desses materiais têm permeabilidade de centenas e até milhares de vezes maiores que o vácuo. Esses materiais são conhecidos como **materiais ferromagnéticos**.

A relação entre a permeabilidade de um dado material e a permeabilidade do vácuo é chamada de **permeabilidade relativa**, assim:

$$\mu_r = \frac{\mu_m}{\mu_0} \quad (12)$$

onde:

- μ_r : permeabilidade relativa de um material (adimensional)
- μ_m : permeabilidade de um dado material
- μ_0 : permeabilidade do vácuo

Geralmente, $\mu_r \geq 100$ para os materiais ferromagnéticos, valendo entre 2.000 e 6.000 nos materiais de máquinas elétricas e podendo chegar até a 100.000 em materiais especiais. Para os não magnéticos $\mu_r \cong 1$.

2.1.5 Relutância Magnética

A **relutância magnética** é a medida da oposição que um meio oferece ao estabelecimento e concentração das linhas de campo magnético. A relutância magnética é determinada pela equação:

$$\mathfrak{R} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{l}{A} \quad (13)$$

onde:

$\mathfrak{R}$: relutância magnética, [Ae/Wb];

l : comprimento médio do caminho magnético das linhas de campo no meio, [m];

μ : permeabilidade magnética do meio, [Wb/A.m];

A : área da seção transversal, [m²].

A relutância magnética é uma grandeza análoga à resistência elétrica (R) que pode ser determinada pela equação que relaciona a resistividade e as dimensões de um material:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (14)$$

Podemos notar que a resistência elétrica e a relutância magnética são inversamente proporcionais à área, ou seja, maior área menor resistência ao fluxo de cargas elétricas e ao fluxo de linhas de campo. Estas grandezas são diretamente proporcionais ao comprimento do material. Entretanto a relutância é inversamente proporcional à permeabilidade magnética, enquanto a resistência é diretamente proporcional à resistividade elétrica. Materiais com alta permeabilidade, como os ferromagnéticos, têm relutâncias muito baixas e, portanto, proporcionam grande concentração das linhas de campo magnético.

Quando dois materiais de permeabilidades diferentes apresentam-se como caminho magnético para as linhas do campo, estas se dirigem para o de maior permeabilidade. Isto é chamado de **princípio da relutância mínima**. Na Figura 14, podemos perceber que o ferro, de alta permeabilidade, representa um caminho magnético de menor relutância para as linhas de campo, concentrando-as. Já o vidro, de baixa permeabilidade, não proporciona grande concentração das linhas de campo. Isso representa um caminho magnético de alta relutância.

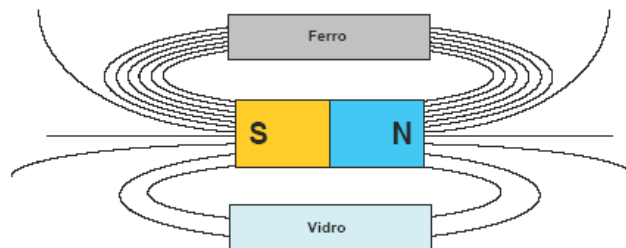


Figura 14: Campos magnéticos de alta e baixa relutância.

2.2 FENÔMENOS ELETROMAGNÉTICOS

2.2.1 Descoberta de Oersted

Em 1820, um professor e físico dinamarquês chamado Hans Christian Oersted observou que uma corrente elétrica era capaz de alterar a direção de uma agulha magnética de uma bússola. Para o experimento mostrado na Figura 15, quando havia corrente elétrica no fio, Oersted verificou que a agulha magnética se movia, orientando-se numa direção perpendicular ao fio, evidenciando a presença de um campo magnético produzido pela corrente. Este campo originava uma força magnética capaz de mudar a orientação da bússola. Este campo magnético de origem elétrica é chamado de **campo eletromagnético**. Interrompendo-se a corrente, a agulha retornava a sua posição inicial, ao longo da direção norte-sul.

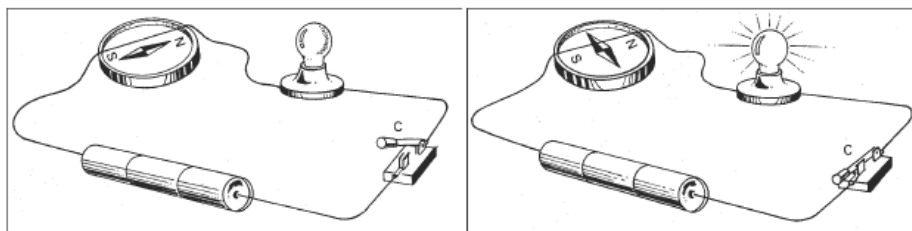


Figura 15: Experiência Oersted.

Conclusão de Oersted:

Todo condutor percorrido por corrente elétrica, cria em torno de si um campo eletromagnético.

Em decorrência dessas descobertas, foi possível estabelecer o princípio básico de todos os fenômenos magnéticos:

Quando duas cargas elétricas estão em movimento, manifesta-se entre elas uma força magnética além da força elétrica (ou força eletrostática).

2.2.2 Campo Magnético criado por Corrente Elétrica

No mesmo ano que Oersted comprovou a existência de um campo magnético produzido pela corrente elétrica, o cientista francês André Marie Ampère, preocupou-se em descobrir as características desse campo. Nos anos seguintes, outros pesquisadores como Michael Faraday, Karl Friedrich Gauss e James Clerk Maxwell continuaram investigando e desenvolveram muitos dos conceitos básicos do eletromagnetismo.

As linhas de campo magnético são linhas envoltórias concêntricas e orientadas, como mostra a Figura 16. O sentido das linhas de campo magnético produzido pela corrente no condutor é dada pela Regra de Ampère. A Regra de Ampère, também chamada de Regra da Mão Direita é usada para determinar o **sentido das linhas do campo magnético**, considerando-se o **sentido convencional da corrente elétrica**.

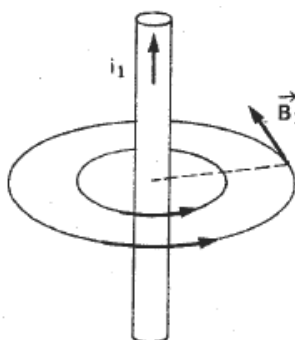


Figura 16: Linhas de campo magnético criado por uma corrente elétrica: concêntricas.

Regra de Ampère – Regra da mão direita:

Com a mão direita envolvendo o condutor e o polegar apontando para o sentido convencional da corrente elétrica, os demais dedos indicam o sentido das linhas de campo que envolvem o condutor.

Para a representação do sentido das linhas de campo ou de um vetor qualquer perpendicular a um plano (como o plano do papel) utiliza-se a seguinte simbologia:

⊙: representa um fio, uma linha de campo ou um vetor com direção perpendicular ao plano, com **sentido de saída** deste plano.

⊗: representa um fio, uma linha de campo ou um vetor com direção perpendicular ao plano, com **sentido de entrada** neste plano.

O campo magnético gerado por um condutor percorrido por corrente pode ser representado por suas linhas desenhadas em perspectiva, ou então com a simbologia apresentada, como mostra a Figura 17.

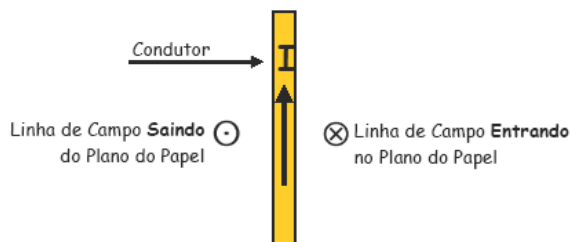


Figura 17: Simbologia para representação do sentido das linhas de campo no plano.

2.2.3 Fontes de Campo Magnético

Além dos ímãs naturais (magnetita) e os ímãs permanentes feitos de materiais magnetizados, é possível gerar campos magnéticos através da corrente elétrica em condutores. Se estes condutores tiverem a forma de espiras ou bobinas, pode-se gerar campos magnéticos muito intensos.

Campo Magnético gerado em torno de um Condutor Retilíneo

A intensidade do campo magnético gerado em torno de um condutor retilíneo percorrido por corrente elétrica depende da intensidade dessa corrente. Uma corrente intensa produzirá um campo intenso, com inúmeras linhas de campo que se distribuem até regiões bem distantes do condutor. Uma corrente menos intensa produzirá poucas linhas numa região próxima ao condutor, conforme mostrado na Figura 18.

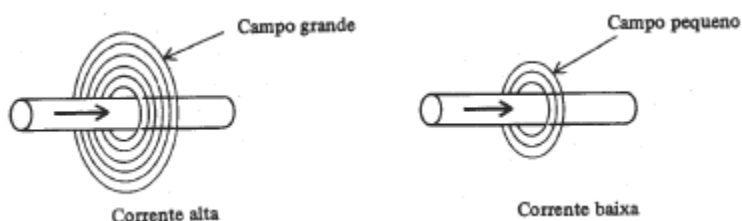


Figura 18: Representação do campo magnético em função da corrente elétrica.

O vetor B que representa a **densidade de campo magnético ou densidade de fluxo**, em qualquer ponto, apresenta direção sempre tangente às linhas de campo no ponto considerado. Isso pode ser comprovado pela observação da orientação da agulha de uma bússola em torno de um condutor percorrido por corrente elétrica, como mostra a Figura 19.

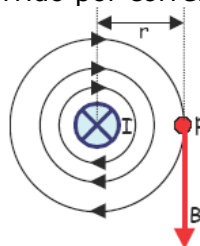


Figura 19: Vetor campo magnético tangente às linhas de campo.

A densidade de campo magnético B num ponto p considerado é diretamente proporcional à corrente no condutor, inversamente proporcional à distância entre o centro do condutor e o ponto e depende do meio, conforme mostrado na equação matemática:

$$B = \frac{\mu \cdot I}{2\pi \cdot r} \quad (15)$$

onde:

B: densidade de campo magnético num ponto p , [T];
 r : distância entre o centro do condutor e o ponto p considerado, [m];
 I : intensidade de corrente no condutor, [A];
 μ : permeabilidade magnética do meio, [T.m/A].

Permeabilidade magnética no vácuo:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \quad [T \cdot m / A] \quad (16)$$

Esta equação é válida para **condutores longos**, ou seja, quando a distância r for bem menor que o comprimento do condutor ($r \ll \ell$).

Campo Magnético gerado no centro de uma Bobina Longa ou Solenóide

Um solenóide é uma bobina longa obtida por um fio condutor isolado e enrolado em espiras iguais, lado a lado, e igualmente espaçadas entre si, como mostra a Figura 20. Quando a bobina é percorrida por corrente, os campos magnéticos criados em cada uma das espiras que formam o solenóide se somam, e o resultado final é idêntico a um campo magnético de um ímã permanente em forma de barra. Podemos observar que as linhas de campo são concentradas no interior do solenóide.

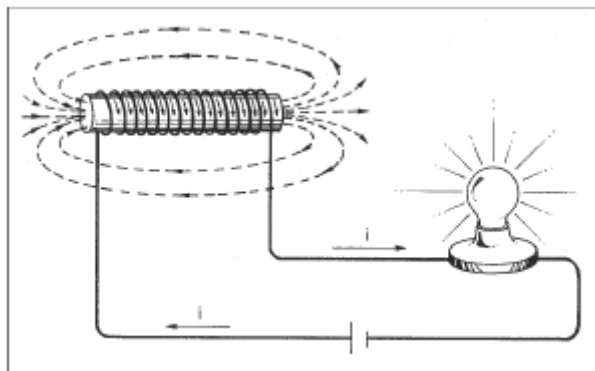


Figura 20: Representação do campo magnético gerado por um solenóide percorrido por corrente.

Entre duas espiras os campos se anulam pois têm sentidos opostos. No centro do solenóide os campos se somam e no interior do solenóide o campo é praticamente uniforme. Quanto mais próximas estiverem as espiras umas das outras, mais intenso e mais uniforme será o campo magnético.

A densidade do campo magnético (densidade de fluxo magnético) no centro de um solenóide é expresso por:

$$B = \frac{\mu \cdot N \cdot I}{l} \quad (17)$$

onde:

B: densidade de campo magnético no centro da espira circular, [T];
 N : número de espiras do solenóide;
 I : intensidade de corrente no condutor, [A];
 l : comprimento longitudinal do solenóide, [m];
 μ : permeabilidade magnética do meio, [T.m/A].

O sentido das linhas de campo pode ser determinado por uma adaptação da regra da mão direita, como ilustra a Figura 21.

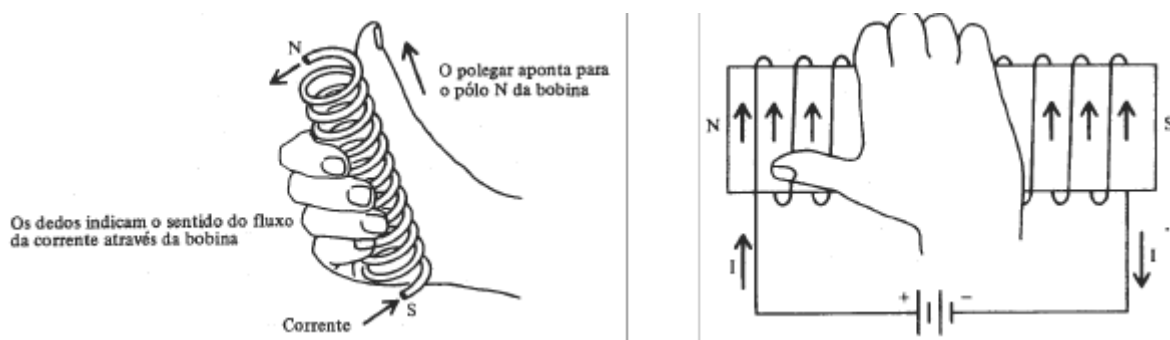


Figura 21:Regra da mão direita aplicada a uma bobina.

Um **Eletroímã** consiste de uma bobina enrolada em torno de um núcleo de material ferromagnético de alta permeabilidade (ferro doce, por exemplo) para concentrar o campo magnético. Cessada a corrente ele perde a magnetização, pois o magnetismo residual é muito baixo.

2.2.4 Força Magnetizante (Campo Magnético Indutor)

Se em uma dada bobina for mantida a corrente constante e mudado o material do núcleo (permeabilidade μ do meio), a densidade de fluxo magnético no interior da bobina será alterada em função da permeabilidade magnética do meio. Pode ser chamado de **vetor campo magnético indutor ou vetor força magnetizante (H)** ao campo magnético induzido (gerado) pela corrente elétrica na bobina, independentemente da permeabilidade magnética do material do núcleo (meio).

O vetor densidade de campo magnético na bobina pode ser dado por:

$$B = \frac{\mu \cdot N \cdot I}{l}$$

resolvendo,

$$\frac{B}{\mu} = \frac{N \cdot I}{l}$$

definindo:

$$H = \frac{B}{\mu}$$

O módulo do vetor campo magnético indutor ou vetor força magnetizante H numa bobina pode ser dado por:

$$H = \frac{N \cdot I}{l} \quad (18)$$

onde:

- H: campo magnético indutor, [Ae/m];
- N: número de espiras do solenóide;
- I: intensidade de corrente no condutor, [A];
- l: comprimento do núcleo magnético, [m].

O vetor H tem as mesmas características de orientação do vetor densidade de campo magnético (B), porém independe do tipo de material do núcleo da bobina. Portanto, pode-se

concluir que os vetores densidade de campo magnético e campo magnético indutor se relacionam pela equação:

$$B = \mu \cdot H \quad (19)$$

Isso significa que uma dada bobina percorrida por uma dada corrente produz uma dada força magnetizante ou campo magnético indutor. Ao variar o valor da permeabilidade magnética do meio (alterando o material do núcleo da bobina, por exemplo) a densidade de campo magnético varia para esta mesma bobina. Quanto maior a permeabilidade magnética μ do meio, o efeito da força magnetizante no núcleo será tanto maior, ou seja, maior a densidade de campo magnético induzida no núcleo. Portanto:

A densidade de fluxo magnético B é o efeito da força magnetizante H num dado meio μ .

Analogamente, podemos determinar a força magnetizante H produzida por um condutor retilíneo:

$$H = \frac{I}{2\pi \cdot r} \quad (20)$$

Deve-se ter em mente que a permeabilidade magnética de um material ferromagnético **não é constante**, é uma relação entre a força magnetizante e a densidade de fluxo magnético resultante, sendo esse comportamento dado pela **curva de magnetização** do material.

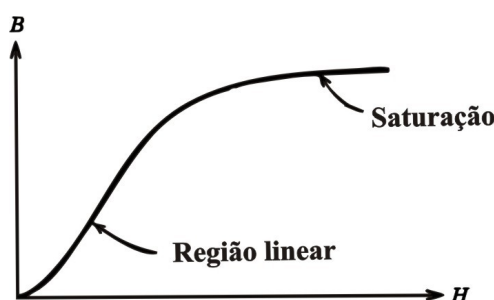


Figura 22: Curva de magnetização para um determinado material ferromagnético.

2.2.5 Força Magneto-Motriz

A **força magneto-motriz** (fmm) é definida como a causa da produção do fluxo no núcleo de um circuito magnético. Assim, a força magneto-motriz produzida por uma bobina é dada pelo produto,

$$fmm = N \cdot I \quad (21)$$

onde:

- fmm: força magneto-motriz, [Ae];
- N: número de espiras do solenóide;
- I: intensidade de corrente no condutor, [A].

Se uma bobina, com um certo número de Ampère-espira (fmm), for esticada até atingir o dobro do seu comprimento original (dobro do valor de l), a força magnetizante (H) e a densidade de fluxo (B), terá a metade do seu valor original, pois:

$$B = \frac{\mu \cdot N \cdot I}{l}$$

e,

$$H = \frac{N \cdot I}{l}$$

como $fmm = N \cdot I$, então:

$$H = \frac{fmm}{l}$$

finalmente,

$$fmm = H \cdot l \quad (22)$$

onde:

H: força magnetizante ou campo magnético indutor, [Ae/m];

l: comprimento médio do caminho magnético, [m].

A relutância magnética é dada por:

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu \cdot A}$$

e,

$$\mu = \frac{B}{H}$$

Substituindo uma na outra,

$$\mathfrak{R} = \frac{H \cdot l}{B \cdot A}$$

e sendo o fluxo magnético,

$$\phi = B \cdot A$$

tem-se:

$$\phi = \frac{fmm}{\mathfrak{R}} \quad (23)$$

onde:

fmm: força magneto-motriz, [Ae];

ϕ : fluxo magnético, [Wb];

$\mathfrak{R}$: relutância magnética, [Ae/Wb].

2.2.6 Lei de Ampère

A Lei de Ampère expressa a relação geral entre uma corrente elétrica em um condutor de qualquer forma e o campo magnético por ele produzido. Esta lei é válida para qualquer situação onde os condutores e os campos magnéticos são constantes e invariantes no tempo e sem a presença de materiais magnéticos.

Para um condutor retilíneo, equação é a mesma que determina a densidade de campo magnético em um dado ponto p em torno de um condutor retilíneo:

$$B = \frac{\mu \cdot I}{2\pi \cdot r} \quad (24)$$

2.2.7 Força Eletromagnética

Cargas elétricas em movimento (corrente elétrica) criam um campo eletromagnético, o que é visualizado pois este campo exerce uma força magnética na agulha de uma bússola. No sentido reverso, Oersted confirmou, com base na terceira lei de Newton, que um campo magnético de um ímã exerce uma força em um condutor conduzindo corrente.

Quando cargas elétricas em movimento são inseridas em um campo magnético, há uma interação entre o campo e o campo originado pelas cargas em movimento. Essa interação é manifestada por forças que agem na carga elétrica, denominadas **forças eletromagnéticas**.

Um condutor percorrido por corrente elétrica, dentro de um campo magnético, sofre a ação de uma força eletromagnética.

Força Eletromagnética sobre um Condutor Retilíneo

Para um condutor retilíneo colocado entre os pólos de um ímã em forma de ferradura (Figura 23), quando este condutor for percorrido por corrente uma força é exercida sobre ele. Esta força não age na direção dos pólos do ímã, mas na direção perpendicular às linhas do campo magnético. Se o sentido da corrente for invertido, a direção da força continua a mesma, mas há uma inversão no sentido da força exercida sobre o condutor.

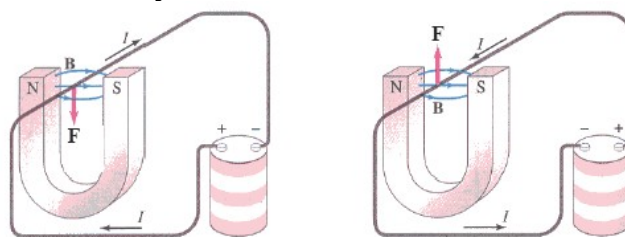


Figura 23: Sentido da força eletromagnética sobre o condutor.

Assim, um condutor percorrido por corrente elétrica submetido a um campo magnético sofre a ação de uma força eletromagnética. Se aumentarmos a intensidade da corrente I , aumentaremos a intensidade da força F exercida sobre o condutor. Da mesma forma, um campo magnético mais intenso (maior densidade B) provoca uma intensidade de força maior. Também pode ser comprovado que se o comprimento (l) ativo do condutor (atingido pelas linhas de campo) for maior, a intensidade da força sobre ele será maior.

A intensidade da força eletromagnética exercida sobre o condutor também depende do ângulo entre a direção da corrente e a direção do vetor densidade de campo magnético, como mostra a Figura 24.

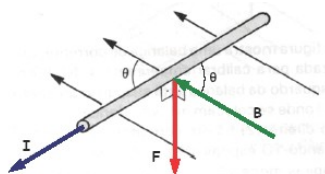


Figura 24: Força eletromagnética sobre um condutor retilíneo.

Portanto, considerando um condutor retilíneo de comprimento l sob a ação de um campo magnético uniforme B , percorrido por uma corrente elétrica de intensidade I e sendo θ o ângulo entre B e a direção do condutor, o **módulo do vetor força magnética** que age sobre o condutor pode ser dado por:

$$F = I \cdot l \cdot B \cdot \sin\theta \quad (25)$$

onde:

F : força eletromagnética, [N];

I : corrente elétrica, [A];

l : comprimento ativo do condutor sob efeito do campo magnético, [m];

B: densidade de campo magnético ou densidade de fluxo magnético [T];
 θ : ângulo entre as linhas de campo e a superfície longitudinal do condutor [$^\circ$ ou rad].

Pela equação (25), quando o campo for perpendicular à corrente ($\theta=90^\circ$) a força exercida sobre o condutor será máxima, e quando o campo e a corrente tiverem a mesma direção ($\theta=0^\circ$) a força sobre o condutor será nula. Assim, a direção da força é sempre perpendicular à direção da corrente e também perpendicular à direção do campo magnético.

A direção e o sentido da força que o condutor sofre, são determinados com os dedos da mão direita dispostos ortogonalmente entre si para determinar a direção e o sentido da força eletromagnética. O polegar aponta na direção da corrente, o indicador na direção do campo magnético, o dedo médio irá apontar a direção da força, desde que esses três dedos façam um ângulo de noventa graus entre si. A figura 25 ilustra a situação descrita.

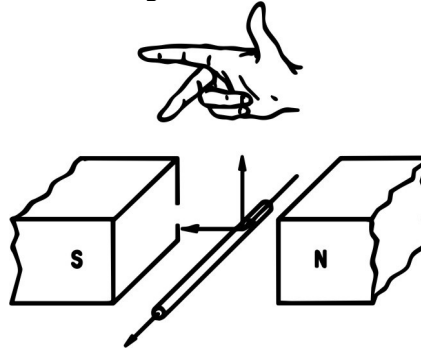


Figura 25: Determinação do sentido da força eletromagnética.

Força Eletromagnética sobre uma Partícula Carregada

Se um condutor percorrido por corrente elétrica e inserido num campo magnético sofre a ação de uma força eletromagnética, e sendo a corrente provocada pelo movimento de cargas elétricas, verifica-se que um movimento livre de partículas carregadas eletrostaticamente também sofrem a ação de forças eletromagnéticas quando atravessam um campo magnético.

Uma partícula carregada eletrostaticamente e em movimento dentro de um campo magnético sofre a ação de uma força eletromagnética.

A corrente elétrica pode ser dada pela relação entre carga e tempo:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

e a distância é dada pela relação,

$$l = \Delta v \cdot \Delta t$$

Sendo a força eletromagnética,

$$F = I \cdot l \cdot B \cdot \sin\theta$$

a intensidade da força magnética sobre uma partícula carregada em movimento dentro de um campo magnético pode ser dada pela expressão:

$$F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin\theta \quad (26)$$

onde:

F: força eletromagnética, [N];
q: quantidade de carga elétrica da partícula, [C];
v: velocidade de deslocamento, [m/s];

B – densidade de campo magnético ou densidade de fluxo magnético [T];
 θ : ângulo entre as linhas de campo e a superfície longitudinal do condutor [$^\circ$ ou rad].

Desta equação podemos depreender que a força eletromagnética será máxima quando as partículas incidirem perpendicularmente às linhas de campo, e quando as partículas se deslocam na mesma direção das linhas de campo a força eletromagnética será nula.

Força Eletromagnética sobre Condutores Paralelos

Quando dois condutores próximos e paralelos são percorridos por corrente elétrica, surge uma força devido à interação entre os campos eletromagnéticos por eles gerados. Essa força poderá ser de atração ou de repulsão conforme os sentidos das correntes nos condutores. Aplicando a Regra da Mão Esquerda, é possível verificar que a força é de atração quando os condutores são percorridos por correntes de mesmo sentido e de repulsão quando percorridos por correntes de sentidos contrários. A Figura 26 ilustra essas situações.

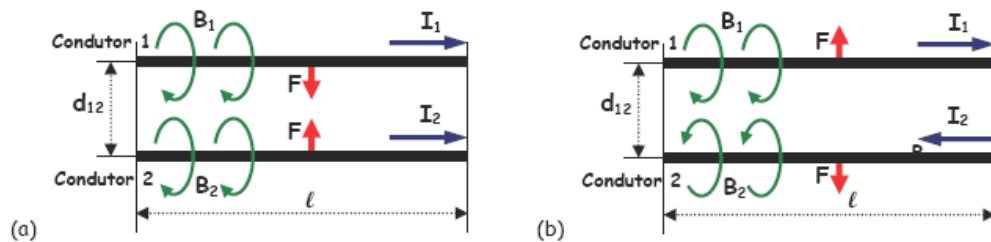


Figura 26: Força eletromagnética entre condutores paralelos: (a) atração e (b) repulsão.

Sabemos que um condutor percorrido por corrente elétrica cria um campo magnético de intensidade dada por:

$$B = \frac{\mu \cdot I}{2\pi \cdot r}$$

No condutor 1 a corrente I_1 cria um campo magnético B_1 que atua no condutor 2 que está a uma distância d_{12} do primeiro e pode dado por,

$$B_1 = \frac{\mu \cdot I_1}{2\pi \cdot d_{12}}$$

As linhas de campo geradas por um condutor atingem o outro condutor e como o vetor densidade de campo é sempre tangente às linhas de campo, este vetor é perpendicular à superfície longitudinal do condutor. Desta forma, a força elétrica que atua no condutor 2 devido ao campo gerado pelo condutor 1, é dada por:

$$F_{12} = I_2 \cdot l_2 \cdot B_1 \cdot \sin(90^\circ)$$

Substituindo uma expressão na outra:

$$F_{12} = \frac{\mu \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot l_2}{2\pi \cdot d_{12}} \quad (27)$$

onde:

F : força eletromagnética, [N];
 μ : permeabilidade magnética do meio, [C];
 I_1, I_2 : corrente elétrica nos condutores, [A];
 l : comprimento dos condutores, [m];
 d : distância entre os centros dos condutores, [m].

A força que age no condutor 1 devido ao campo gerado pelo condutor 2 é análoga, devido à lei da ação e da reação de Newton. Assim:

$$F_{12} = F_{21} = F \quad (28)$$

2.2.8 Indução Eletromagnética

Como visto, em 1820 Oersted descobriu que uma corrente elétrica produz campo magnético. A partir dessa descoberta, o inglês Michael Faraday e o americano Joseph Henry se dedicaram a obter o efeito inverso, ou seja, obter corrente elétrica a partir do campo magnético.

A Figura 27 mostra um dos dispositivos usados por Faraday, onde o enrolamento 1, chamado de primário, é uma bobina com N_1 espiras de condutor isolado e está conectado, através de uma chave interruptora, à bateria (fonte de tensão contínua) que faz circular uma corrente contínua e esta gera um campo magnético. Este campo magnético é intensificado pois as linhas de campo são concentradas pelo efeito caminho magnético do núcleo de material ferromagnético de alta permeabilidade.

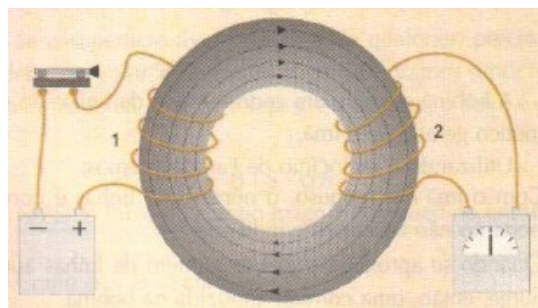


Figura 27: Força eletromagnética entre condutores paralelos: (a) atração e (b) repulsão.

As linhas de campo geradas pelo enrolamento 1 passam por dentro do enrolamento 2, chamado de secundário, que é uma bobina com N_2 espiras de condutor isolado. O secundário está monitorado por um galvanômetro que detecta qualquer corrente que circular no enrolamento. É importante salientar que não haja contato elétrico entre os enrolamentos primário e secundário e nem destes com o material do núcleo, pois são bobinas de condutores isolados.

Em 1831, ao acionar sucessivas vezes a chave interruptora no circuito do enrolamento primário, Faraday fez as seguintes observações:

- no momento em que a chave é fechada, o galvanômetro acusa uma pequena corrente de curta duração;
- após a corrente cessar e durante o tempo em que a chave permanecer fechada, o galvanômetro não mais acusa corrente;
- ao abrir a chave, o galvanômetro volta a indicar uma corrente de curta duração, em sentido oposto.

Esses três momentos podem ser explicados da seguinte maneira:

- enquanto o campo magnético criado pela corrente no enrolamento primário cresce é gerada uma corrente no enrolamento secundário, que ocorre logo após a chave ser fechada pois a corrente é crescente, sendo que quando o campo no enrolamento primário se estabiliza (se torna constante) a corrente cessa no enrolamento secundário;
- enquanto o campo magnético permanece constante no enrolamento primário, não há corrente no enrolamento secundário;
- enquanto o campo magnético diminui no enrolamento primário, é gerada uma corrente no enrolamento secundário, com sentido oposto à anterior, pois logo após a chave ser aberta o campo magnético se anula no enrolamento primário.

Conclusão de Faraday:

A simples presença do campo magnético não gera corrente elétrica.

Para gerar corrente é necessário variar fluxo magnético.

O experimento de Faraday mostra que se numa região próxima a um condutor, bobina ou circuito elétrico houver uma variação de fluxo magnético, aparecerá nos seus terminais uma diferença de potencial (*ddp*), chamada de **força eletromotriz induzida (*fem*)** ou **tensão induzida**. Caso o circuito elétrico esteja fechado, esta força eletromotriz induzida fará circular uma **corrente elétrica induzida**.

Michael Faraday enunciou a lei que rege este fenômeno, chamado de **indução eletromagnética** e que relaciona a *tensão elétrica induzida (*fem*)* devida à variação do fluxo magnético num circuito elétrico. A **Lei de Faraday** diz o seguinte:

Em todo condutor enquanto sujeito a uma variação de fluxo magnético é estabelecida uma força eletromotriz (tensão) induzida.

Assim, a Lei de Faraday diz que a tensão induzida em um circuito é igual ao resultado da taxa de variação do fluxo magnético no tempo e é dada pela divisão da variação do fluxo magnético pelo intervalo de tempo em que ocorre, com sinal trocado. Ou seja, quanto mais o fluxo variar num intervalo de tempo, tanto maior será a tensão induzida, que numa bobina é diretamente proporcional ao número de espiras,

$$fem = -N \cdot \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (29)$$

onde:

ε : força eletromotriz induzida (tensão induzida), [V];

$\Delta\phi/\Delta t$: taxa de variação do fluxo magnético no tempo, [Wb/s]

N: número de espiras na bobina.

Contudo, pela análise do experimento de Faraday é possível observar que quando o fluxo magnético variante era crescente a corrente induzida tinha um sentido. Quando o fluxo magnético variante era decrescente a corrente induzida assumiu um sentido contrário. Esse fenômeno observado é explicado pela **Lei de Lenz**. Assim, a Lei de Lenz é expressa pelo sinal negativo na equação da Lei de Faraday.

Lei de Lenz:

O sentido da corrente induzida é tal que origina um fluxo magnético induzido, que se opõe à variação do fluxo magnético indutor.

Devemos lembrar que a corrente induzida circula num determinado sentido devido à polaridade da força eletromotriz induzida (tensão induzida). Em um condutor imerso em um fluxo magnético variável, chamado de fluxo magnético indutor, é induzida uma força eletromotriz. A polaridade dessa força eletromotriz induzida será tal que, se o circuito elétrico for fechado, circulará uma corrente que, ela própria criará um fluxo magnético, chamado de fluxo magnético induzido, que se oporá à variação do fluxo magnético indutor causador da tensão (*fem*) induzida.

Na Figura 28 a aproximação do ímã provoca um aumento do fluxo magnético perto da bobina. Conseqüentemente começa a circular, na bobina, uma corrente que cria um campo magnético com polaridade inversa ao do ímã. O campo criado tenta impedir a aproximação do ímã, tenta parar o ímã para manter o fluxo magnético constante (variação de fluxo nula). Quando o ímã se afasta, o efeito é contrário.

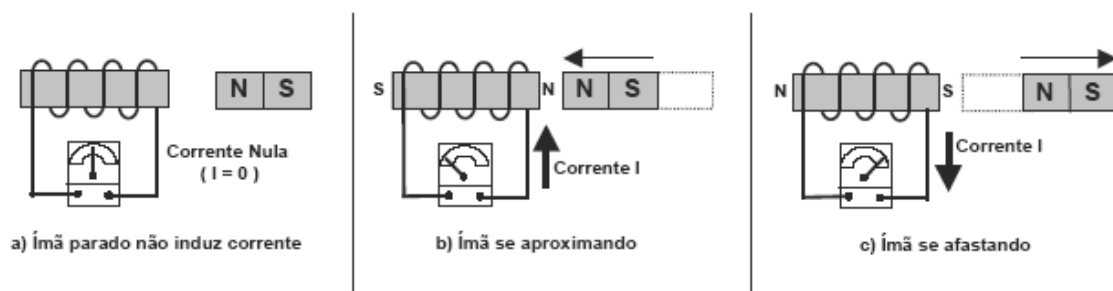


Figura 28: Indução eletromagnética.

Tensão Induzida em Condutores que cortam um Campo Magnético

Quando um ímã se movimenta nas proximidades de um condutor ou bobina induz força eletromotriz (tensão). Conseqüentemente, um condutor se movimentando dentro de um campo provoca variação de fluxo magnético sobre sua superfície longitudinal (corta linhas de campo) e sofre, portanto, indução de força eletromotriz (tensão), como mostra a Figura 29. Se o circuito estiver fechado, circula uma corrente induzida provocada pela força eletromotriz induzida.

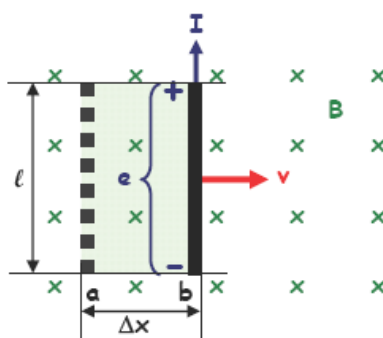


Figura 29: Condutor em movimento dentro de uma campo magnético.

Sendo o fluxo magnético,

$$\phi = B \cdot A \cdot \sin\theta$$

O fluxo magnético depende da densidade do campo magnético, da área do condutor atingida pelas linhas do campo magnético e do ângulo em que estas linhas atingem o condutor. Há, portanto, uma relação ortogonal entre as direções do fluxo magnético, do movimento relativo do condutor (ou bobina) e da corrente induzida. O sentido da corrente induzida num condutor em movimento dentro de um campo magnético pode ser dado pela Regra da Mão Direita.

A Figura 30 indica o sentido da corrente induzida num condutor, em função da polaridade magnética e do sentido do movimento do condutor. Em (a) não há indução porque o condutor não corta linhas de campo e, portanto, não há variação de fluxo magnético sobre a sua superfície longitudinal ($\theta=0^\circ$). Em (b) a indução é máxima, pois $\theta=90^\circ$. Em (c) ocorre uma situação intermediária, pois $0^\circ < \theta < 90^\circ$. Se o condutor estiver parado, não atravessa linhas de campo, não sofre variação de fluxo magnético e, portanto, não há corrente induzida.

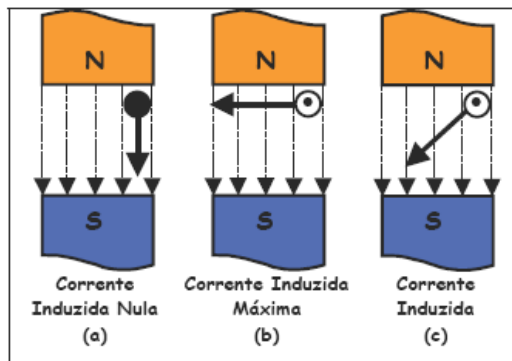


Figura 30: Movimento de um condutor dentro de um campo magnético.

Com base na Lei de Faraday, é possível encontrar uma equação particular para determinar a tensão induzida em condutores que se movimentam no interior de um campo magnético. Supondo que o condutor tenha comprimento l e percorre uma distância Δx , com velocidade constante v , no interior de um campo com densidade de fluxo B , pela Lei de Faraday:

$$fem = - \frac{\Delta \phi}{\Delta t}$$

Sendo $\theta = 90^\circ$,

$$\Delta \phi = B \cdot \Delta A \cdot \sin 90^\circ$$

então,

$$fem = - \frac{B \cdot \Delta A}{\Delta t}$$

mas a área ΔA é função de Δx e do comprimento do condutor l , assim:

$$fem = - \frac{B \cdot (\Delta x \cdot l)}{\Delta t}$$

e sendo a velocidade média no intervalo é dada por,

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

então,

$$fem = -B \cdot l \cdot v \quad (30)$$

onde:

- fem: força eletromotriz induzida num condutor que corta um campo magnético, [V];
- B: densidade de fluxo magnético, [T];
- l: comprimento ativo do condutor no campo magnético, [m];
- v: velocidade do condutor (perpendicular ao campo), [m/s].

Dessa forma podemos concluir que a corrente pode ser induzida em um condutor através de três maneiras:

- a) o condutor é movido através de um campo magnético estacionário. Este princípio se aplica nos geradores de corrente contínua, por exemplo.
- b) o condutor está estacionário e o campo magnético se movimenta. Este princípio se aplica nos geradores de corrente alternada, por exemplo.
- c) o condutor e o eletroímã que gera o campo magnético estão estacionários e a corrente alternando do estado ligado para desligado causa a pulsação do campo magnético. Este princípio se aplica nas bobinas das velas de ignição nos motores dos automóveis e também nos transformadores.

2.3 CIRCUITOS MAGNÉTICOS

2.3.1 Campo Magnético e Linhas de Campo Magnético

O estudo dos circuitos magnéticos estabelece uma ponte entre o eletromagnetismo e sua aplicação no funcionamento das máquinas elétricas: transformadores, motores de corrente contínua, motores de corrente alternada, etc.

Seja um circuito magnético (Figura 31) composto por uma bobina com N espiras enroladas sobre um núcleo de material ferromagnético:

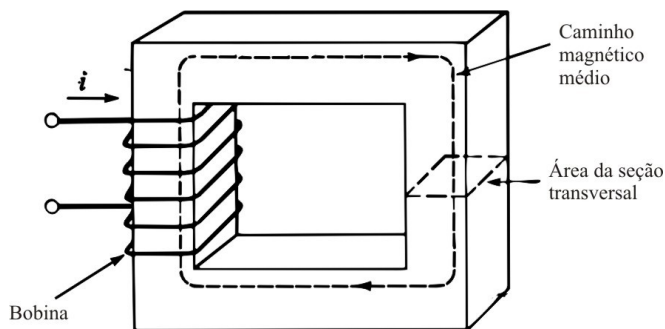


Figura 31: Elementos de um circuito magnético.

Aplicando a lei de Ampère e resolvendo para o circuito magnético mostrado na Figura 31, é obtida a equação 31, que relaciona a força magneto motriz e o fluxo magnético:

$$N \cdot i = H \cdot l \quad (31)$$

onde,

H: intensidade de campo magnético (A esp/m);

B: Densidade de fluxo (Tesla);

N: Número de espiras (espiras);

i: Corrente elétrica (A);

μ : Permeabilidade do meio (H/m);

l: Caminho magnético médio (m).

Na verdade o fluxo magnético não percorre um caminho magnético médio, como mostra a linha pontilhada na Figura 31, este se estabelece por toda a secção transversal do material ferromagnético. Entretanto, para facilitar o equacionamento matemático, e sabendo que esta simplificação não incorre em grandes erros, é utilizado o conceito de caminho magnético médio. Desta forma, para determinar este caminho magnético médio, é necessário imaginar que todo o fluxo está concentrado em um único ponto determinado pela intersecção de duas diagonais traçadas sobre a área da secção transversal do núcleo.

A força magneto motriz se relaciona com o fluxo magnético e a relutância magnética através da equação 32, que é análoga a lei de Ohm para a eletricidade.

$$N \cdot i = \phi \cdot \mathfrak{R} \quad (32)$$

Portanto, a força magneto motriz é o análogo magnético para a diferença de potencial, o fluxo magnético o análogo magnético para a corrente elétrica e a relutância está para um circuito magnético, assim como a resistência está para um circuito elétrico. A Figura 32 permite visualizar esta analogia através de um circuito esquemático.

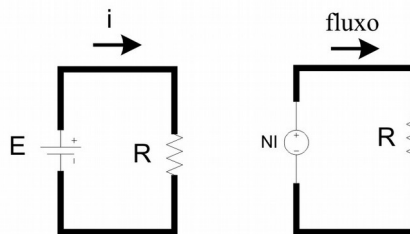


Figura 32: Analogia entre circuito elétrico e circuito magnético.

Como visto, o fluxo magnético ϕ é obtido pelo produto da densidade de fluxo pela área da seção transversal. A relutância magnética $\mathcal{R}$ é o elemento que oferece oposição à circulação do fluxo magnético no circuito magnético, e quanto maior a relutância, para uma mesma força magneto motriz, menor o fluxo magnético.

Nas máquinas elétricas o estator e o rotor estão separados através de um espaço vazio, preenchido com ar. A este espaço vazio dá-se o nome de **entreferro**. A razão para esta nomenclatura reside no fato deste se encontrar entre duas peças fabricadas com material ferromagnético: **o rotor e o estator**. Nos circuitos magnéticos que estamos estudando, o entreferro é introduzido fazendo-se um corte no núcleo e retirando uma fatia de material ferromagnético. A Figura 33 ilustra o que foi dito. Após a introdução do entreferro no circuito, este passa a possuir duas relutâncias: a do material ferromagnético e a do entreferro. O fato da permeabilidade magnética do entreferro ser muito menor que a permeabilidade magnética do núcleo, faz com que a relutância do entreferro seja muito superior à relutância do ferro. Desta forma, comumente se despreza a relutância do material ferromagnético.

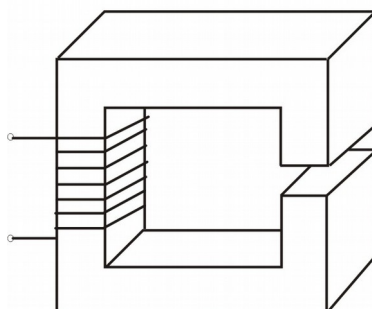


Figura 33: Circuito magnético com entreferro.

2.3.2 Indutor

Um capacitor é um componente passivo que possui como característica a capacidade de armazenar cargas elétricas e produzir um campo elétrico na região do espaço localizada entre as placas onde as cargas estão armazenadas. Um indutor, de maneira análoga, é um componente que possui a capacidade de armazenar energia de campo magnético e produzir um determinado campo magnético na região do espaço próxima onde se encontra o indutor. A Figura 34 apresenta a simbologia utilizada para representar o indutor.

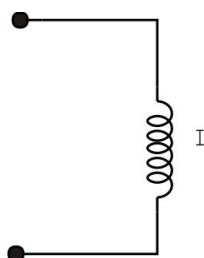


Figura 34: Simbologia adotada para representar o indutor.

Ao circular uma corrente elétrica por um indutor, em cada uma de suas espiras é estabelecido um fluxo magnético ϕ , devido a esta corrente. Diz-se que as espiras estão concatenadas por um fluxo partilhado. A indutância de um indutor é dada pela equação 33, e sua unidade é o Henry (H).

$$L = \frac{N \cdot \phi}{i} \quad (33)$$

A energia armazenada no indutor é dada pela equação 34. A unidade de energia no sistema internacional de unidade é o Joule (J).

$$E_L = \frac{1}{2} \cdot L \cdot i^2 \quad (34)$$

2.3.3 Perdas em Materiais Ferromagnéticos

Quando em um determinado circuito magnético, um campo é produzido devido a uma corrente elétrica alternada, o comportamento para a densidade de fluxo B em função da intensidade de campo magnético H , que é proporcional à corrente elétrica, assume a forma de um laço, como mostra a Figura 35. Esse laço, denominado laço de histerese, evidencia o comportamento não linear do material ferromagnético.

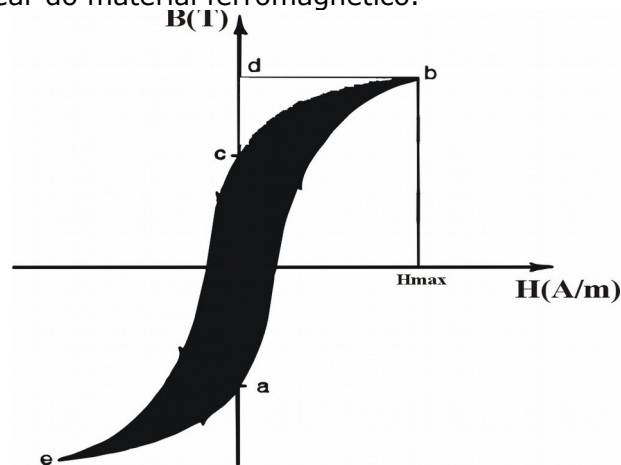


Figura 35 – Laço de histerese.

A área delimitada pelo laço de histerese é proporcional às perdas por histerese no material ferromagnético. Estas perdas são devidas à energia necessária para rotação dos domínios magnéticos na direção de um campo magnético externo. A equação 35 é uma aproximação experimental que permite calcular as perdas por histerese. As perdas no material ferromagnético são compostas por perdas por histerese e perdas por correntes parasitas. Estas últimas são devidas ao fenômeno de indução magnética, relativa ao fato do núcleo de material ferromagnético estar submetido a um campo magnético variável.

$$P_H = K_H \cdot B_{\max}^n \cdot f \quad (35)$$

A equação 36 permite calcular as perdas por correntes parasitas. É possível perceber que estas perdas são diretamente proporcionais ao quadrado da frequência. Portanto, ao duplicar a frequência da corrente elétrica, as perdas são quadruplicadas.

$$P_e = K_e \cdot B_{\max}^2 \cdot f^2 \quad (36)$$

O coeficiente n na equação 35 varia entre 1,25 e 1,5. A densidade de fluxo máxima depende do material ferromagnético, a frequência depende da frequência do campo magnético aplicado. A constante K_H depende do material ferromagnético e do volume do núcleo.

3 TRANSFORMADORES

3.1 INTRODUÇÃO

A primeira pessoa a escolher 60 Hz como frequência para a rede foi o engenheiro sérvio naturalizado americano Nikola Tesla, na década de 80 do século XIX. Escolheu este valor após chegar à conclusão que era a menor frequência para a qual a cintilação da luz, devido à variação da corrente alternada, não era visível. Além disso, esta frequência não era demasiado elevada para produzir quedas de tensão significativas nas reatâncias. Uma outra limitação para a frequência refere-se às perdas no material ferromagnético. As perdas por histerese e por correntes parasitas são diretamente proporcionais à frequência. Um aumento da frequência implica em aumento nas perdas em transformadores e outros equipamentos que utilizam materiais ferromagnéticos.

3.2 DEFINIÇÃO

A ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) define o transformador como:

Um dispositivo que por meio da indução eletromagnética, transfere energia elétrica de um ou mais circuitos (primário) para outro ou outros circuitos (secundário), usando a mesma frequência, mas, geralmente, com tensões e intensidades de correntes diferentes.

Então, o **transformador** é um conversor de energia eletromagnética, cuja operação pode ser explicada em termos do comportamento de um circuito magnético excitado por uma corrente alternada. Embora não seja um componente de conversão de energia propriamente dito, ele é indispensável em muitos sistemas que realizam transformam um tipo de energia em outra.

Dois tipos construtivos são normalmente empregados. A Figura 36 mostra a construção em que as bobinas são enroladas em torno da perna central. Este tipo construtivo é denominado núcleo envolvente.

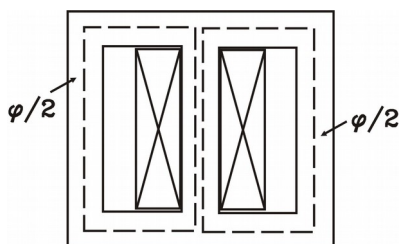


Figura 36: Transformador tipo núcleo envolvente.

A Figura 37 mostra outro tipo construtivo, em que uma bobina é enrolada em uma coluna lateral do núcleo e a outra bobina é enrolada na outra. Este tipo construtivo é denominado núcleo envolvido. O núcleo de material ferromagnético é composto por chapas finas cobertas por uma camada de óxido de modo a minimizar o efeito das correntes parasitas, responsáveis pelas perdas que aquecem o equipamento.

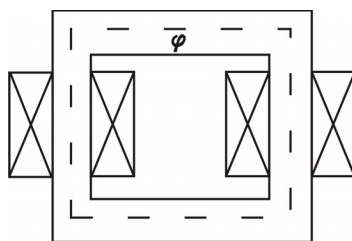


Figura 37: Transformador tipo núcleo envolvido.

3.2.1 Princípio de funcionamento

Todo transformador é uma máquina elétrica cujo princípio de funcionamento está baseado nas Lei de Faraday e Lei de Lenz. É constituído de duas ou mais bobinas de múltiplas espiras enroladas no mesmo núcleo magnético, isoladas deste, mas acopladas através de um campo magnético mútuo, não existindo conexão elétrica entre a entrada e a saída do transformador. Uma tensão variável aplicada à bobina de entrada (primário) provoca o fluxo de uma corrente variável, criando assim um fluxo magnético variável no núcleo. Devido a este, é induzida uma tensão na bobina de saída (ou secundário), que varia de acordo com a razão entre os números de espiras dos dois enrolamentos (Figura 38). Núcleos feitos com material ferromagnético são utilizados para melhor aproveitamento do fluxo e para obtenção de maiores densidades de fluxo.

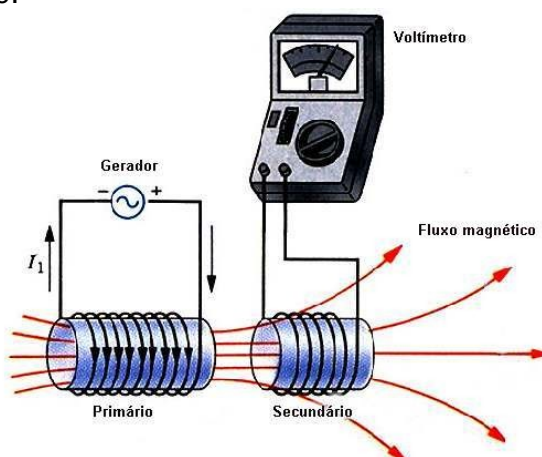


Figura 38: Princípio de funcionamento de um transformador.

3.3 O TRANSFORMADOR IDEAL

O transformador ideal não existe na prática. Ele foi idealizado de modo a facilitar o entendimento do funcionamento deste equipamento eletromagnético. Para realizar o estudo do transformador ideal, que simplifica enormemente as equações e a análise matemática dos problemas que envolvem este componente elétrico, estabelecem-se as seguintes **suposições**:

- todo o fluxo deve estar confinado ao núcleo e enlaçar os dois enrolamentos;
- as resistências dos enrolamentos devem ser desprezíveis;
- as perdas no núcleo devem ser desprezíveis;
- a permeabilidade do núcleo deve ser tão alta que uma quantidade desprezível de força magneto motriz é necessária para estabelecer o fluxo.

A Figura 39 mostra um transformador, desenhado de uma forma didática, com dois enrolamentos. Uma bobina é dita primária e a outra secundária. A bobina dita primária é conectada à fonte de alimentação e a bobina dita secundária é conectada à carga. As tensões e as correntes de entrada e de saída do transformador se relacionam através da relação entre

o número de espiras do enrolamento primário e o número de espiras do enrolamento secundário.

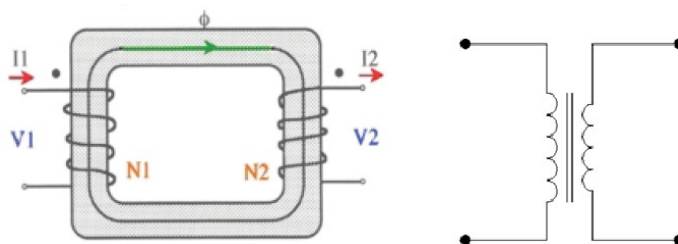


Figura 39: Transformador com duas bobinas.

3.3.1 Equação Fundamental de um Transformador Ideal

Como o fluxo que enlaça os enrolamentos primário e secundário é o mesmo e induz uma força eletromotriz (*fem*) nestes. Aplicando a lei de Faraday nos dois enrolamentos,

$$V_1 = N_1 \cdot \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

e,

$$V_2 = N_2 \cdot \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

onde:

- V_1, V_2 : tensão nos enrolamentos primário e secundário, [V];
- $\Delta\phi/\Delta t$: taxa de variação do fluxo magnético no tempo, [Wb/s];
- N_1 : número de espiras no enrolamento primário;
- N_2 : número de espiras no enrolamento secundário.

Dividindo as duas relações e considerando as tensões no primário e secundário, é obtida a chamada **equação fundamental dos transformadores**:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (37)$$

$$a = \frac{N_1}{N_2} \quad (38)$$

onde:

a: **relação de transformação**.

Ou seja, as tensões estão entre si na relação direta do número das espiras dos respectivos enrolamentos, sendo **a** denominada de relação de espiras de um transformador. Conectando ao transformador ideal uma carga Z_2 ao seu secundário, conforme mostra a Figura 40.

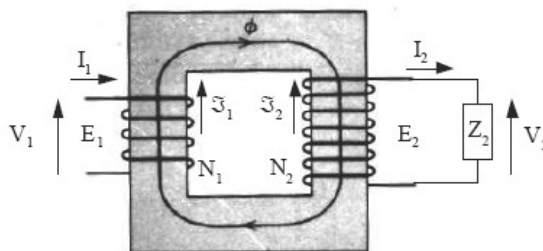


Figura 40: Transformador ideal com carga.

O fato de se colocar a carga Z_2 no secundário fará aparecer uma corrente I_2 tal que:

$$I_2 = \frac{V_2}{Z_2}$$

Esta corrente irá produzir uma força magneto motriz (fmm_2) no sentido mostrado. Uma força magneto motriz (fmm_1) de mesmo valor mas contrária a 2 deve aparecer no enrolamento 1 para que o fluxo não varie. Desta maneira tem-se:

$$fmm_2 = N_2 I_2 = N_1 I_1 = fmm_1$$

então,

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a} \quad (39)$$

o que indica que as correntes no primário e secundário de um transformador ideal estão entre si, na relação inversa do número de espiras.

3.3.2 Reflexão de Impedâncias

É possível refletir uma impedância do primário do transformador para o secundário e vice-versa. Em algumas situações este artifício facilita a solução de um problema específico, tornando sua solução mais simples. Em outras, é possível determinar a relação de transformação de um transformador capaz de realizar o casamento de impedâncias entre a fonte e a carga, possibilitando obter a máxima transferência de potência. A equação 40 permite refletir uma impedância do secundário (Z_2) para o primário.

$$Z_1 = a^2 Z_2 \quad (40)$$

3.4 POLARIDADE DO TRANSFORMADOR

Os enrolamentos do transformador são marcados para indicar os terminais de mesma polaridade. Assim, as **marcas de polaridade (ponto)** são os símbolos utilizados para identificar as polaridades dos terminais de um transformador. O ponto que aparece no símbolo do transformador mostrado na Figura 41 indica que no instante de tempo em que a tensão é positiva no terminal que está marcado com o ponto, no enrolamento primário, as demais tensões também serão positivas em todos os demais terminais dos enrolamentos secundários que estão marcados com o ponto.

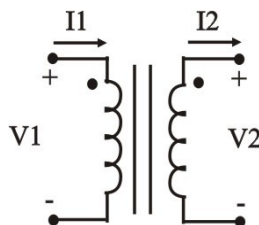


Figura 41: Marcas de polaridade para um transformador.

A polaridade dos transformadores depende de como são enroladas as bobinas dos enrolamentos primário e secundário. A Figura 42 mostra um transformador monofásico com enrolamento do primário no sentido anti-horário e o do secundário no sentido horário. Considerando a corrente instantânea I_1 crescente entrando no terminal superior do enrolamento primário, criará um fluxo magnético Φ crescente, que circulará no núcleo no sentido horário (regra da mão direita). Para que a lei de Lenz seja satisfeita, a corrente

secundária I_2 deverá sair do terminal superior do enrolamento secundário. Como o fluxo resultante se concatena também com o enrolamento primário, surge neste enrolamento uma tensão induzida, denominada força contra eletromotriz (*fcem*).

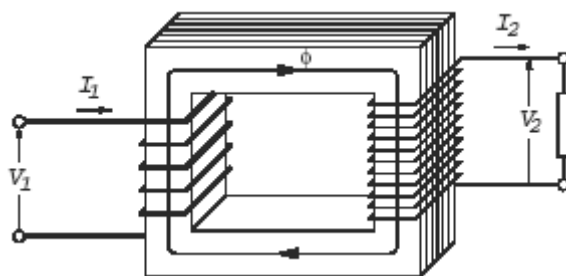


Figura 42: Transformador – enrolamento secundário no sentido horário.

A Figura 43 mostra também um transformador monofásico, com uma única diferença em relação à figura anterior: o enrolamento do secundário está no sentido anti-horário. Para este caso, a corrente secundária I_2 deverá sair do terminal inferior do enrolamento secundário.

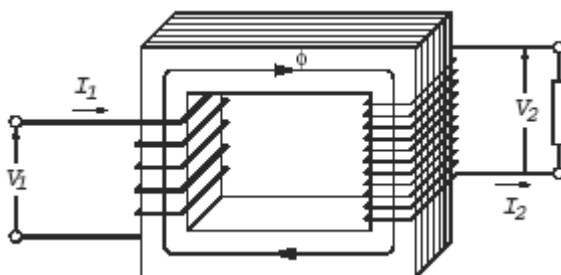


Figura 43: Transformador – enrolamento secundário no sentido anti-horário.

Regra de Polaridade:

No enrolamento primário a corrente entra pela marca de polaridade, enquanto que no enrolamento secundário a corrente sai pela marca de polaridade.

3.4.1 Polaridade Aditiva ou Subtrativa

Polaridade subtrativa: é quando os fluxos dos enrolamentos primário e secundário se subtraem. Na Figura 44, ao ligar os terminais 1 e 1' em curto, e colocando um voltímetro entre 2 e 2', é possível verificar que as tensões induzidas $fcem_1$ e fem_2 irão se subtrair. Neste caso, as marcas de polaridade representam um transformador com polaridade subtrativa.

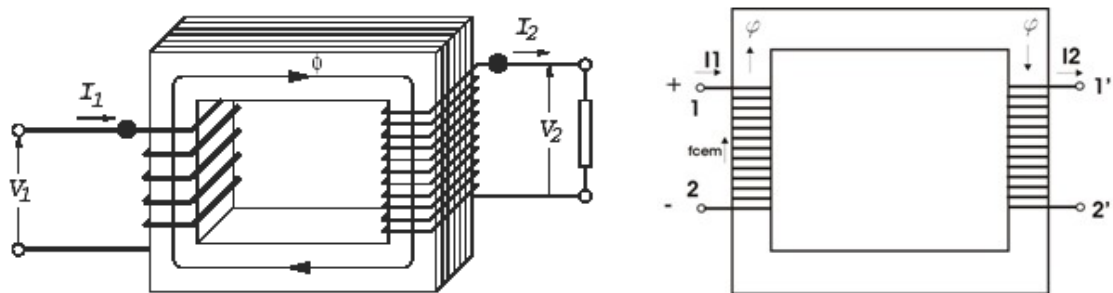


Figura 44: Transformador com polaridade subtrativa.

Polaridade aditiva: é quando os fluxos dos enrolamentos primário e secundário se somam. Na Figura 45, ao ligar os terminais 1 e 1' em curto, e colocando um voltímetro entre 2 e 2', é

possível verificar que as tensões induzidas f_{cem_1} e f_{em_2} irão se somar. Neste caso, as marcas de polaridade representam um transformador com polaridade aditiva.

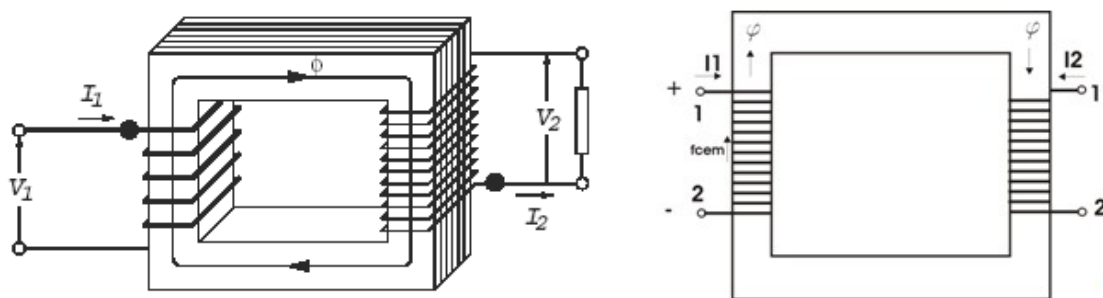


Figura 45: Transformador com polaridade aditiva.

A ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) recomenda que os terminais de tensão superior sejam marcados com as letras H_1 e H_2 , e os de tensão inferior com as letras X_1 e X_2 . Ainda segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas, os métodos de ensaio utilizados para determinação da polaridade de transformadores são: método do golpe indutivo, método da corrente alternada e o método do transformador padrão.

3.4.2 Método da Corrente Alternada

Apenas para ilustrar, será apresentado sucintamente o método da corrente alternada para determinação da polaridade de transformadores. Os terminais de tensão superior são ligados a uma fonte de tensão alternada. Um voltímetro para medição de tensão alternada é instalado, como mostrado na Figura 46, de modo a se obter a leitura da tensão entre os terminais de alta tensão. Em seguida, a chave é mudada para a posição 2. Se a primeira leitura for maior que a segunda a polaridade será subtrativa, caso contrário será aditiva.

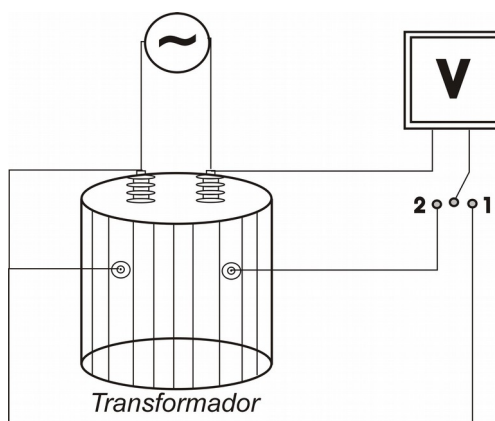


Figura 46: Método da corrente alternada para determinação da polaridade.

3.5 O TRANSFORMADOR REAL

Ao contrário do transformador ideal, os transformadores reais apresentam perdas que devem ser consideradas, pois nem todo o fluxo está confinado ao núcleo, havendo fluxo de dispersão nos enrolamentos. Da mesma forma, há perdas ôhmicas nos enrolamentos e há perdas magnéticas (histerese magnética) no núcleo:

1. *Perdas no cobre:* resultam da resistência dos fios de cobre nas espiras primárias e secundárias. As perdas pela resistência do cobre são perdas sob a forma de calor (Perdas Joule) e não podem ser evitadas.
2. *Perdas no ferro:*

- por histerese*: energia transformada em calor na reversão da polaridade magnética do núcleo transformador.
- por correntes parasitas*: quando uma massa de metal condutor se desloca num campo magnético, ou é sujeita a um fluxo magnético móvel, circulam nela correntes induzidas. Essas correntes produzem calor devido às perdas na resistência do ferro (perdas por correntes de Foucault).

A Figura 47 representa as perdas no transformador real, que graças às técnicas com que são fabricados, os transformadores apresentam grande eficiência, permitindo transferir ao secundário cerca de 98% da energia aplicada no primário:

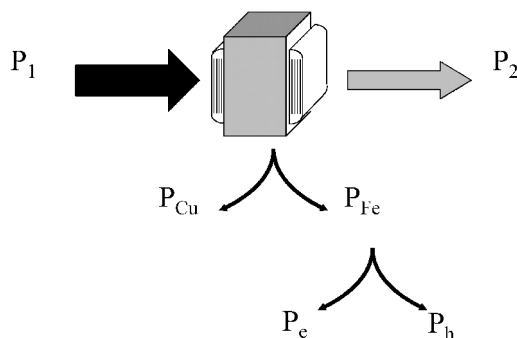


Figura 70: Perdas no transformador real.

Assim, no transformador real a resistência de condução dos condutores existe, nem todo o fluxo se encontra confinado no núcleo, existindo fluxos dispersos, a permeabilidade do núcleo não é infinita e as perdas no núcleo existem, quando o mesmo é submetido a um campo magnético variável no tempo. A Figura 48 apresenta o circuito elétrico equivalente para um transformador real. As resistências de condução dos condutores R_1 e R_2 foram consideradas, as reatâncias X_1 e X_2 representam o efeito devido aos fluxos de dispersão no primário e no secundário, respectivamente, a resistência G_c representa as perdas no núcleo e a reatância B_m o efeito devido à magnetização do núcleo.

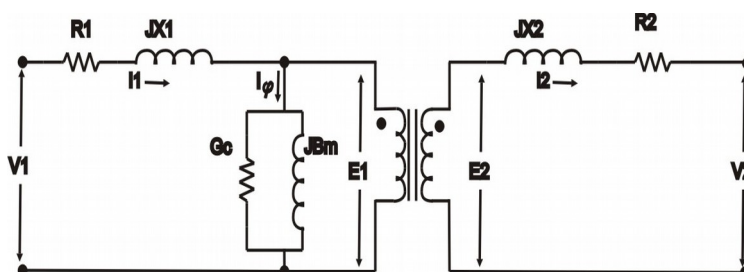


Figura 48: Circuito equivalente do transformador real.

3.5.1 Simplificação do Circuito Equivalente

Em estudos em que a precisão não é tão rigorosa, algumas simplificações podem ser feitas face às seguintes evidências:

- as resistências próprias dos enrolamentos são reduzidas, na medida em que o cobre é bom condutor;
- a impedância resultante do paralelo entre a resistência de perdas no ferro e a reatância de magnetização é muito maior que as demais impedâncias do circuito equivalente do transformador.

O circuito equivalente elétrico simplificado é apresentado na Figura 49:

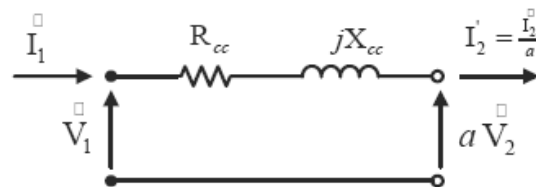


Figura 49: Circuito equivalente simplificado.

Na qual,

$$R_{CC} = R_1 + a^2 R_2 = r_1 + a^2 r_2 \quad (41)$$

$$X_{CC} = X_1 + a^2 X_2 = x_1 + a^2 x_2 \quad (42)$$

Para determinação dos elementos que compõe o circuito elétrico equivalente para o transformador real, se todos os dados de projeto estão disponíveis, é possível utilizar as dimensões e as propriedades dos materiais utilizados. Por exemplo, as resistências de condução podem ser calculadas a partir da resistividade dos fios de cobre, do comprimento total e da área da seção transversal. A indutância de magnetização B_m pode ser calculada através do número total de espiras e da relutância do circuito magnético. As indutâncias de dispersão envolvem a parcela de fluxo disperso, sendo este cálculo de difícil solução. Estes parâmetros podem ser mais facilmente determinados através de ensaios que envolvem um pequeno consumo de potência.

3.6 ENSAIO DE CURTO-CIRCUITO E CIRCUITO ABERTO

Dois ensaios, o ensaio de circuito aberto e o de curto-circuito, geram informações suficientes para determinação dos elementos que compõe o circuito elétrico equivalente para o transformador real.

3.6.1 Ensaio de Circuito Aberto

Este ensaio é realizado aplicando uma tensão no enrolamento de alta ou de baixa tensão, de acordo com a conveniência. Como as correntes envolvidas nesse ensaio são desprezíveis, uma vez que o transformador está a vazio, apenas a corrente de excitação, devido à magnetização e devido às perdas no núcleo, circulam pelo transformador. A Figura 50 apresenta as ligações e os instrumentos utilizados para realização do ensaio de circuito aberto.

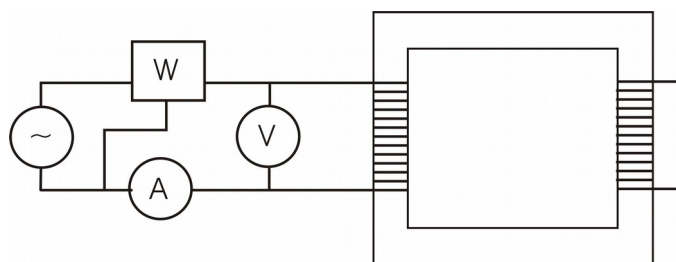


Figura 50: Montagem para realização do ensaio de circuito aberto.

O objetivo deste ensaio é obter a admitância de excitação (Y_{CA}) do transformador sob ensaio, as perdas no ferro e a relação de transformação (a). Com o secundário em aberto, aplicar tensão nominal ao primário e medir a potência de circuito aberto (P_{CA}), a corrente de circuito aberto (I_{CA}) e a tensão de circuito aberto (V_{CA}). A corrente será então reduzida, de 2 a 6 % do valor nominal, o que permite desprezar as perdas nos enrolamentos.

Com este procedimento é possível determinar os parâmetros a vazio, que dizem respeito ao núcleo:

$$Y_{CA} = \frac{I_{CA}}{V_{CA}}$$

$$G_f = \frac{P_{CA}}{V_{CA}^2}$$

$$B_m = \sqrt{Y_{CA}^2 - G_f^2}$$

$$R_f = \frac{1}{G_f} \quad (43)$$

$$X_m = \frac{1}{B_m} \quad (44)$$

onde:

G_f : condutância (considera a perda de potência no núcleo por histerese e correntes parasitas), $[\Omega^{-1}]$;

B_m : suscetância (considera o armazenamento de energia), $[\Omega^{-1}]$;

P_{CA} : perdas no núcleo do transformador, [W];

R_f : perdas no ferro, $[\Omega]$;

X_m : reatância de magnetização, $[\Omega]$.

3.6.2 Ensaio de Curto-Circuito

Neste ensaio é conveniente aplicar a tensão ao enrolamento de alta tensão. A tensão aplicada é tal que a corrente nominal circule pelo enrolamento. Com o enrolamento de baixa em curto, a impedância do ramo paralelo pode ser desprezada e considerada apenas a resistência de condução e a impedância devido ao fluxo de dispersão. A Figura 51 apresenta as ligações e os instrumentos utilizados para realização do ensaio de curto circuito.

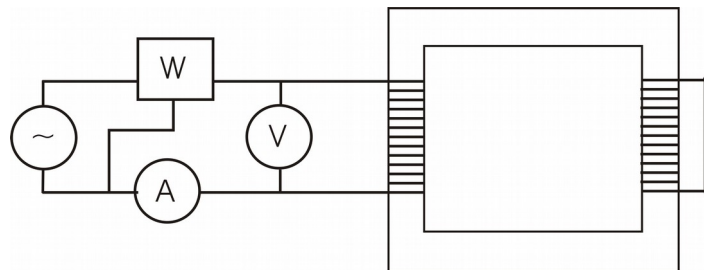


Figura 51: Montagem para realização do ensaio de curto circuito.

O objetivo deste ensaio é obter a resistência efetiva (R_{cc}) a reatância de dispersão (X_{cc}) equivalentes do transformador sob ensaio. Com o secundário curto-circuitado (menor tensão), aplicar corrente nominal ao primário através de uma fonte de tensão reduzida (1 a 6% da tensão nominal). Com este procedimento são medidas a corrente de curto circuito (I_{cc}), a tensão de curto-circuito (V_{cc}) e a potência de curto circuito (P_{cc}).

Neste ensaio, o fluxo magnético do núcleo é bastante baixo. Dessa forma, as perdas no núcleo são praticamente desprezíveis e com as medidas realizadas é possível determinar os parâmetros de curto-circuito, ou seja, as perdas nos enrolamentos e as perdas por dispersão, desprezando-se as perdas no núcleo:

$$Z_{cc} = \frac{V_{cc}}{I_{cc}}$$

$$R_{cc} = \frac{P_{cc}}{I_{cc}^2}$$

$$X_{cc} = \sqrt{Z_{cc}^2 - R_{cc}^2}$$

$$R_1 = R_2 = \frac{R_{cc}}{2} \quad (45)$$

$$X_1 = X_2 = \frac{X_{cc}}{2} \quad (46)$$

onde:

R_1, R_2 : resistência das bobinas, $[\Omega]$;

X_1, X_2 : indutância de dispersão, $[\Omega]$.

O ensaio de curto-circuito permite calcular o valor para a impedância percentual do transformador. Este dado é de extrema importância quando se pretende colocar transformadores em paralelo, pois para que mais de uma unidade transformadora seja colocada em paralelo é desejável que os transformadores possuam uma mesma impedância percentual. Conhecendo a tensão de curto-circuito e a tensão nominal do enrolamento, a impedância percentual é dada pela relação entre estas tensões, como mostra a equação 47.

$$Z\% = \frac{V_{cc}}{V_N} \times 100 \quad (47)$$

3.7 O DESEMPENHO DO TRANSFORMADOR

O desempenho de um transformador deve ser levado em consideração em aplicações práticas. Neste caso, são importantes as relações de tensões, a potência de saída, o rendimento e a variação da tensão com a carga. Estes dados podem ser obtidos seja das especificações do fabricante (características de placa), seja de medidas experimentais ou ainda de cálculos baseados em um modelo de circuito.

3.7.1 Características de Placa

O fabricante de uma máquina elétrica indica normalmente nas características de placa as condições de operação normal do transformador. Uma característica típica de placa pode ser:

Transformador 4400/220V, 10kVA, 60Hz.

Estas características indicam que com uma frequência de 60Hz as tensões nominais representam a operação próxima do joelho da curva de magnetização (região que separa a região considerada linear da região onde ocorre a saturação) e a corrente de excitação e as perdas no núcleo não são excessivas. Neste caso, as tensões 4400 e 220V são ditas tensões eficazes nominais, em volts, das duas bobinas, sendo que qualquer uma pode ser o primário ou secundário. Usando qualquer lado como secundário a saída nominal será 10kVA, o que é importante para avaliar a corrente máxima permitida.

3.7.2 Regulação de Tensão

A maioria das cargas conectadas ao secundário dos transformadores é projetada para funcionarem com tensão constante. Entretanto, à medida que corrente é fornecida à carga, a tensão nos terminais do transformador cai devido à queda de tensão na impedância interna do transformador. Uma variação grande de tensão é indesejável para a maioria das cargas. Para reduzir a variação de tensão na saída do transformador, este é projetado com uma pequena impedância interna. A equação 47 define matematicamente a regulação de tensão, onde V_{2sc} é a tensão de secundário sem carga, e V_{2cc} é a tensão de secundário com carga.

$$RT(\%) = \frac{|V_{2sc}| - |V_{2cc}|}{|V_{2cc}|} \cdot 100 \quad (48)$$

Assim, para manter na saída de um transformador, sob carga variável, um nível de tensão constante, é empregado um regulador que pode estar presente no próprio transformador, através de derivações na bobina do primário (Figura 52).

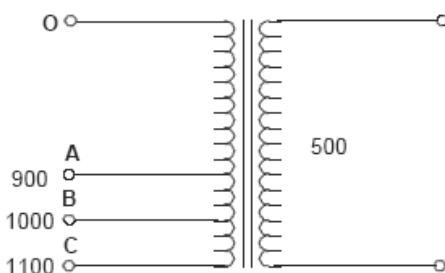


Figura 52: Transformador com tap variável.

A regulação pode ser positiva ou negativa e está ligada a uma diminuição ou aumento do número de espiras (para o regulador atuando no primário). Importante:

Para se determinar a regulação, deve-se considerar a tensão V_2 como sendo a nominal, ou seja, $V_2 = (N_2/N_1)V_1$ e então calcular V_1 para o V_2 estabelecido, utilizando-se o circuito equivalente do transformador.

3.7.3 Rendimento

O transformador é projetado para funcionar com eficiência elevada. Felizmente, as perdas no transformador são pequenas. Como o transformador é um componente estático, perdas por atrito ou rotacionais são inexistentes. Assim sendo, um transformador bem projetado pode ter eficiência tão elevada quanto 99%. A eficiência do transformador é dada:

$$\eta(\%) = \frac{\text{potência na saída}}{\text{potência na entrada}} \cdot 100 = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{P_2}{P_2 + \text{perdas}} \cdot 100 = \frac{P_2}{P_2 + P_{\text{núcleo}} + P_{\text{cobre}}} \cdot 100 \quad (49)$$

3.8 ASSOCIAÇÃO DE TRANSFORMADORES

3.8.1 Transformadores em Paralelo

A ligação de duas ou mais unidades transformadoras em paralelo é uma importante aplicação para estes equipamentos. Esta ligação é feita para aumentar a confiabilidade de fornecimento de energia, aumentar a potência do sistema elétrico ou até mesmo para facilitar as operações de manutenção no sistema.

A Figura 53 mostra o esquema para uma subestação industrial típica com dois transformadores. No caso de um defeito no transformador 1, ou devido à necessidade de uma operação de manutenção de rotina, é possível atuar nos disjuntores D_1 e D_2 , retirando o referido transformador do circuito, mantendo ainda a condição de fornecimento de energia.

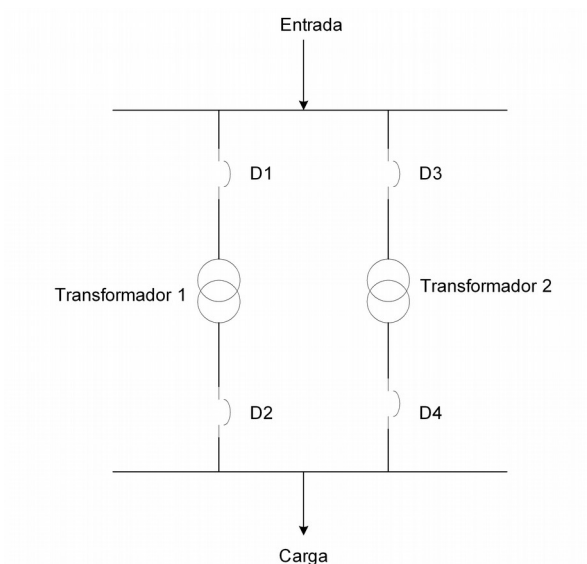


Figura 53: Subestação industrial típica.

Existem duas condições essenciais para que dois ou mais transformadores possam ser colocados em paralelo:

1. Possuir a mesma relação de transformação
2. Pertencer ao mesmo grupo de defasagem angular.

Existe uma condição que não é essencial, porém desejável. Esta condição é que os transformadores que serão colocados em paralelo possuam a mesma impedância percentual. A razão é que se as impedâncias percentuais não forem iguais um transformador irá fornecer mais potência do que o outro.

3.8.2 Banco de Transformadores Monofásicos

Os enrolamentos primários podem estar conectados em triângulo (Δ) ou estrela (Y). Existem quatro possibilidades para esta conexão:

- Y Δ :** Esta conexão é normalmente utilizada para abaixar uma determinada tensão. O neutro no primário pode ser aterrado, o que é desejável na maioria dos casos.
- Δ Y:** Esta conexão é normalmente utilizada para elevar uma determinada tensão.
- $\Delta\Delta$:** Esta conexão possui a vantagem de um transformador do banco poder ser retirado para manutenção, e os dois restantes continuarem fornecendo tensões trifásicas, com uma capacidade de potência igual a 58% da capacidade nominal do banco. Esta situação é conhecida como ligação delta aberto ou ligação V.
- YY:** Esta conexão é raramente utilizada devido aos problemas com a corrente de excitação e tensões induzidas.

Conexão Estrela-Estrela

A Figura 54 mostra um banco trifásico constituído por três transformadores monofásicos, cujos enrolamentos primário e secundário são conectados em estrela (Y). O único cuidado nesta conexão é observar que os terminais da estrela são os terminais de mesma polaridade das unidades monofásicas.

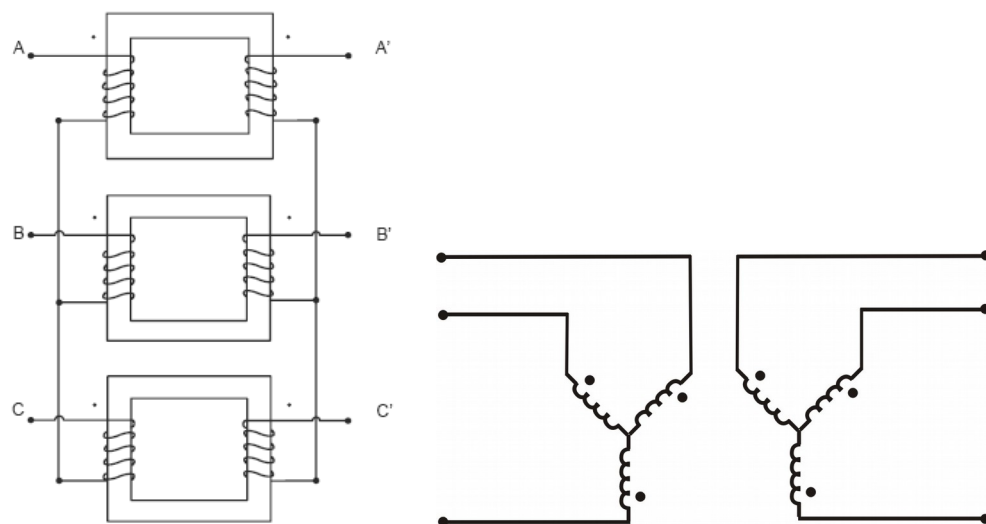


Figura 54: Conexão Y-Y para um banco de transformadores.

Sejam os valores do transformador monofásico:

S_{nom} : potência nominal

V_{1nom} : tensão nominal do primário

V_{2nom} : tensão nominal do secundário

Os valores nominais do banco trifásico de transformadores resultam:

Potência nominal do banco: $S_{banco} = 3 \times S_{nom}$

Tensão nominal de linha do primário: $V_{B1} = \sqrt{3} \times V_{1nom}$

Tensão nominal de linha do secundário: $V_{B2} = \sqrt{3} \times V_{2nom}$

Conexão Triângulo-Triângulo

A Figura 55 mostra um banco trifásico constituído por três transformadores monofásicos, cujos enrolamentos primário e secundário são conectados em triângulo ou delta (Δ).

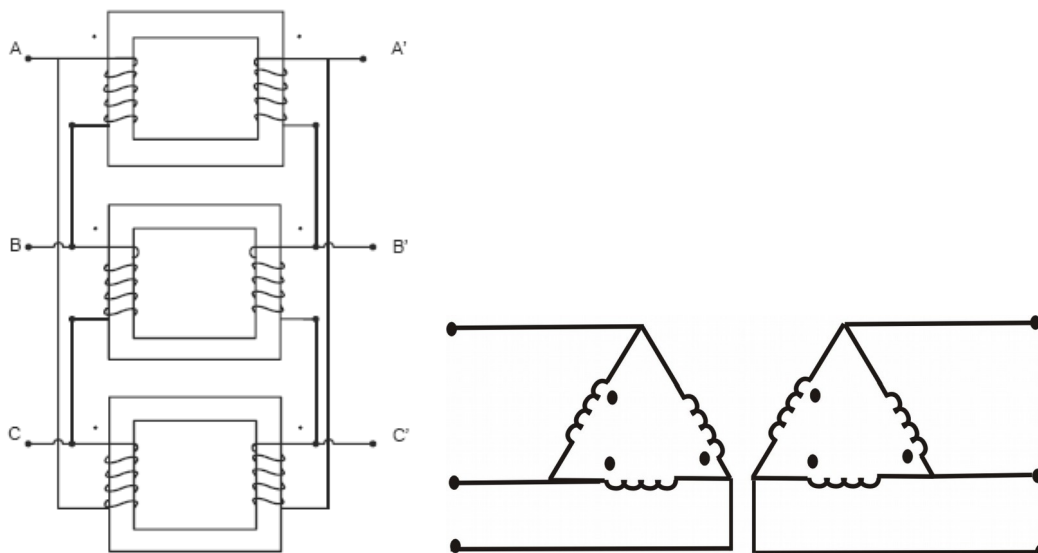


Figura 55: Conexão Δ - Δ para um banco de transformadores.

Os valores nominais do banco trifásico de transformadores resultam:

Potência nominal do banco: $S_{banco} = 3 \times S_{nom}$

Tensão nominal de linha do primário: $V_{B1} = V_{1nom}$

Tensão nominal de linha do secundário: $V_{B2} = V_{2nom}$

Conexão Estrela-Triângulo

A Figura 56 mostra um banco trifásico constituído por três transformadores monofásicos, cujos enrolamentos do primário estão conectados em estrela (Y) e os enrolamentos do secundário conectados em triângulo (Δ).

Os valores nominais do banco trifásico de transformadores resultam:

Potência nominal do banco: $S_{\text{banco}} = 3 \times S_{\text{nom}}$

Tensão nominal de linha do primário: $V_{B1} = \sqrt{3} \times V_{1\text{nom}}$

Tensão nominal de linha do secundário: $V_{B2} = V_{2\text{nom}}$

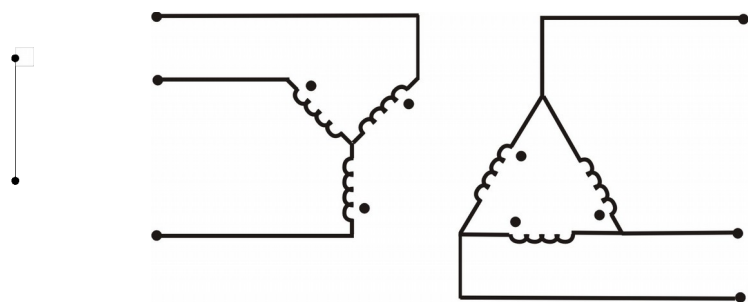


Figura 56: Conexão Y- Δ para um banco de transformadores.

3.9 TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

Devido ao maior rendimento, e considerável economia de cobre, a geração e a transmissão de energia elétrica são realizadas por circuitos trifásicos. Por razões físicas, as tensões de saída dos geradores são geralmente limitadas a 25kV. Desta forma, a transmissão de grande quantidade de energia resultaria em perdas que seriam inaceitáveis, tornando o sistema inviável. Os transformadores trifásicos são utilizados para elevar e abaixar as tensões nos vários estágios de transmissão de energia, permitindo assim a transmissão em tensões da ordem de 230kV. Uma transformação trifásica pode se dar através de um transformador trifásico propriamente dito, que se utiliza de uma estrutura magnética comum, ou de um banco de transformadores monofásicos.

Tudo o que foi apresentado sobre transformadores monofásicos se aplica a transformadores trifásicos ou banco trifásicos, desde que se trabalhe **por fase** e se adote a relação de transformação para tensão e corrente, **por fase**. Sempre que se representar transformadores ou banco trifásicos, os enrolamentos de mesma fase serão desenhados paralelos entre si.

Um **transformador trifásico** é constituído de pelo menos três enrolamentos no primário e três enrolamentos no secundário, os quais podem estar conectados tanto em Y (estrela) quanto em Δ (triângulo ou delta). A ligação em Y ou Δ dos enrolamentos é estabelecida através da conexão dos seus terminais, conforme mostra a Figura 57.

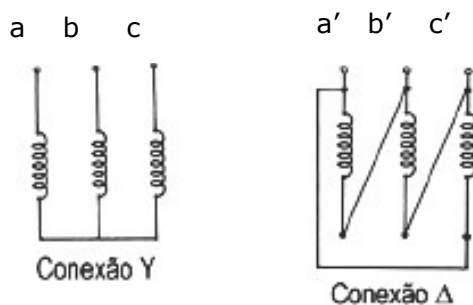


Figura 57: Conexão Y ou Δ .

A ligação triângulo tem aplicação muito favorável em tensões baixas e altas correntes, enquanto a ligação estrela tem aplicação muito favorável em altas tensões e baixas correntes pois dessa forma minimizam-se os problemas com a isolamento. Assim, estas conexões dão origem aos quatro tipos de ligação dos transformadores trifásicos: Y-Y, Y- Δ , Δ -Y e Δ - Δ . Cada um desses tipos possui propriedades diferentes que determinam o uso mais adequado conforme a aplicação.

Os transformadores trifásicos são normalmente construídos de duas maneiras: em banco ou mononuclear. A escolha da associação adequada depende de diversos fatores como: acesso a neutro, bitola dos condutores por fase, sistema de aterramento, nível de isolamento, etc.

Se for feito um comparativo, uma única unidade de transformação trifásica possui a vantagem de ser mais leve, ocupar menos espaço, possuir menor custo de aquisição e ser ligeiramente mais eficiente. Entretanto, a favor do banco de transformadores monofásicos, tem-se que a área superficial maior propicia uma melhor troca de calor com o ambiente. Além disso, na fase de implantação do sistema, é possível adquirir apenas duas unidades, caso a demanda inicial seja menor que a demanda nominal estipulada. Uma unidade reserva pode ser adquirida para uma eventual substituição em caso de falha, bem como, se não houver esta unidade reserva, o sistema pode funcionar apenas com duas unidades, como dito anteriormente. Portanto, a escolha por um ou outro sistema passa a ser uma decisão que dependerá da circunstância.

A Figura 57 mostra uma forma construtiva frequentemente utilizada na fabricação de transformadores trifásicos.

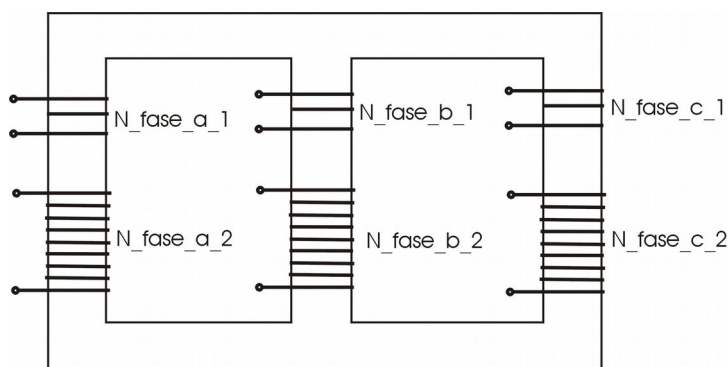


Figura 57: Forma construtiva para transformadores trifásicos.

3.9.1 Relação de Transformação

Em transformadores trifásicos, a **relação de transformação** é dada pelo quociente entre a tensão de linha do primário e a tensão de linha do secundário. De acordo com o tipo de conexão, a relação de transformação pode **não ser igual à relação de espiras**. Isso

acontece nas formas de conexão Y-Δ e Δ-Y. Contudo, a relação de transformação e a relação de espiras coincidem no caso das conexões Y-Y e Δ-Δ.

3.9.2 Ligações de Transformadores Trifásicos

Ligação Estrela-Triângulo (Y-Δ)

Esta ligação é comumente usada para transformar altas tensões em médias ou baixas tensões (**transformador abaixador**), já que permite a utilização de um neutro para aterrar o lado de alta tensão, garantindo maior segurança e possibilitando um caminho fechado para as harmônicas geradas no transformador. Além disso, a tensão de fase no lado de alta tensão é menor que a tensão de linha, exigindo menos isolamento com um componente mais barato.

Seja um banco trifásico de três transformadores monofásicos ideais, conectados na forma Y-Δ, conforme mostrado na Figura 58.

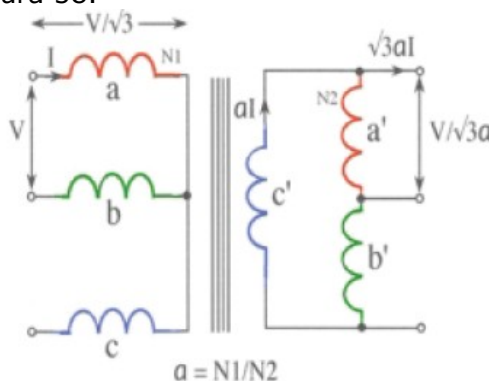


Figura 58: Transformador trifásico com ligação Y-Δ.

Nesta figura, os enrolamentos **aa'** (em vermelho) correspondem ao primeiro transformador monofásico, os enrolamentos **bb'** (em verde) correspondem ao segundo transformador monofásico e os enrolamentos **cc'** (em azul) correspondem ao terceiro transformador monofásico do banco. A relação de espiras $a = N_1/N_2$ se refere aos enrolamentos **aa'**, **bb'**, **cc'**.

Se o primário está conectado em Y e a tensão de linha é V_1 , então a tensão de fase é $V_{f1} = V_1/\sqrt{3}$. Essa tensão de fase está aplicada no enrolamento primário **a** e utilizando a equação fundamental das tensões, é obtida a tensão de fase no enrolamento secundário **a'** como: $V_{f2} = V_1/a\sqrt{3}$

Lembrando que na conexão Δ a tensão de fase é igual a tensão de linha, então a relação de transformação fica:

$$\frac{V_{\text{primário}}}{V_{\text{secundário}}} = \frac{V_1}{V_1/a\sqrt{3}} = a\sqrt{3} \quad (50)$$

Evidentemente a relação de transformação é diferente da relação de espiras. O mesmo raciocínio é utilizado para obter a relação entre as correntes de linha no primário e no secundário.

Assim, para a ligação Y-Δ:

- as tensões e correntes de fase no lado Δ estão em fase com as respectivas tensões de fase e correntes do lado Y;
- as tensões e correntes de linha no lado Δ estão 30° atrasadas em relação às respectivas tensões de linha e corrente no lado Y;
- a relação de transformação é definida para tensões de fase, e neste caso, normalmente é maior que a unidade: $a\sqrt{3}$;

- as fases correspondentes são facilmente obtidas, colocando-se as letras que dominam as fases nas marcas de polaridade das bobinas acopladas;
- os ângulos das impedâncias não dependem do lado (não variam).

Ligação Estrela-Triângulo (Δ -Y)

Esta ligação, conforme mostra a Figura 59, é comumente usada em transformador **elevador de tensão**, usando-se o neutro aterrado para se obter um caminho fechado para as harmônicas. Aqui também a tensão na fase no lado de alta tensão (Y) é menor que a linha, permitindo um menor isolamento com maior proteção. Por este motivo, este tipo de ligação é normalmente utilizado nos transformadores de distribuição (transformadores de poste), como *abaixadores de tensão nas redes urbanas de distribuição*, em que os alimentadores primários ficam conectados no lado primário (Δ) e do lado secundário (Y) saem os alimentadores secundários de distribuição com neutro (220V e 127V), os quais chegam aos consumidores.

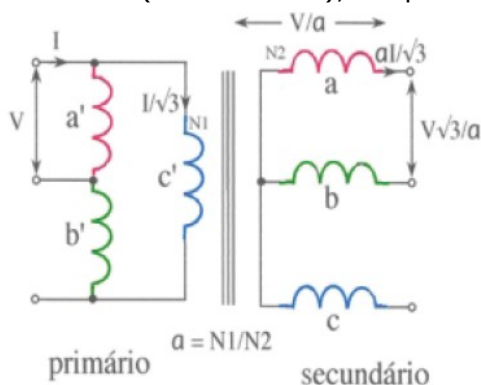


Figura 59: Transformador trifásico com ligação Δ -Y.

Nesse caso, a relação de transformação é dada por:

$$\frac{V_{\text{primário}}}{V_{\text{secundário}}} = \frac{V_1}{\sqrt{3} V_1/a} = a / \sqrt{3} \quad (51)$$

Assim, para a ligação Δ -Y:

- as tensões de fase e as correntes no lado Y estão em fase com as respectivas tensões e correntes de fase no lado Δ ;
- as tensões de linha no lado Y estão 30° adiantadas em relação às respectivas tensões no lado Δ (lado de baixa tensão, neste caso);
- a relação de transformação é definida para tensões de fase, e neste caso é normalmente menor que a unidade: $a / \sqrt{3}$.

Importante:

Uma característica da associação Y- Δ é o deslocamento angular de $\pm 30^\circ$ que resulta entre as *tensões terminais* correspondentes do primário e do secundário, mostrado no Anexo II.

3.10 CORRENTE DE EXCITAÇÃO

A forma de onda para a corrente de excitação é não senoidal, principalmente devido à característica não linear do núcleo de material ferromagnético. A Figura 60 mostra a forma de onda para esta corrente.

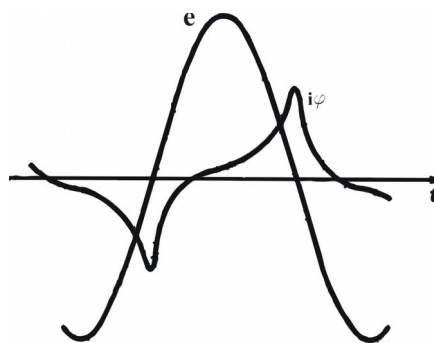


Figura 60: Forma de onda para a corrente de excitação.

A forma de onda mostrada é distorcida devido à presença de uma componente fundamental e uma componente de terceira harmônica. A Figura 61 mostra estas componentes, que somadas resultam na corrente de excitação real i_ϕ .

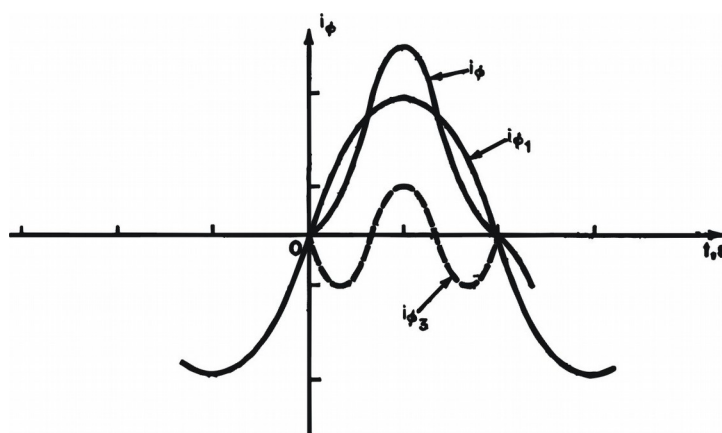


Figura 61: Componente fundamental e terceira harmônica.

A corrente de excitação é a soma vetorial das correntes de magnetização, necessária para orientar os domínios magnéticos no núcleo, e a corrente que circula pela resistência G_c , representando as perdas no núcleo por correntes parasitas e por histerese.

Nos transformadores monofásicos a corrente de magnetização é pequena, o que torna a amplitude da componente harmônica desprezível quando se compara com a amplitude da corrente de carga. Assim, a forma de onda para a corrente resultante é apenas levemente distorcida. Entretanto, em transformadores trifásicos, as três correntes de magnetização têm suas fundamentais defasadas de 120° , mas as terceiras harmônicas estão em fase. Quando existe um caminho fechado, as harmônicas são eliminadas e não há distorção na tensão no secundário. Caso contrário surge uma componente com amplitude três vezes maior que cada terceira harmônica da corrente de magnetização, capaz de distorcer as tensões em cada um dos enrolamentos secundários.

O fato de não haver nenhum caminho fechado para as correntes harmônicas, resultando na distorção da tensão no secundário do transformador, limita a utilização da configuração YY para transformadores trifásicos. Para suprimir o efeito das harmônicas de tensão e de corrente, quando em uma transformação YY, aterra-se o neutro no primário e/ou no secundário. O neutro é fundamental para supressão das harmônicas em uma transformação YY.

3.11 AUTOTRANSFORMADOR

3.11.1 Definição

É um transformador com um só enrolamento, com derivações, ou com vários enrolamentos sobre um mesmo núcleo em série, conforme mostra a Figura 62.

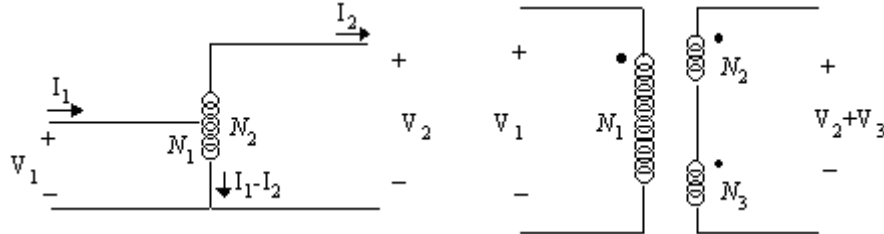


Figura 62: Autotransformador.

Os parâmetros do autotransformador são:

$$V_1^A = V_{ad} = V_{ab} + V_{cd} \quad (52)$$

$$V_2^A = V_{cd} \quad (53)$$

Sendo para o transformador,

$$a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (54)$$

$$V_1 = V_{ab} \quad (55)$$

$$V_2 = V_{cd} \quad (55)$$

Então,

$$a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_{ad}}{V_{cd}} = \frac{V_{ab} + V_{cd}}{V_{cd}} = \frac{V_1 + V_2}{V_2} \quad (56)$$

$$a = \frac{V_1 + V_2}{V_2} = \frac{N_1 + N_2}{N_2}$$

onde:

a: relação de transformação;

V_1 : tensão no enrolamento primário do transformador, [V];

V_2 : tensão no enrolamento secundário do transformador, [V];

N_1 : número de espiras no enrolamento primário do transformador, [e];

N_2 : número de espiras no enrolamento secundário do transformador, [e].

A Figura 63 ilustra um autotransformador, que é um tipo particular de transformador, onde o enrolamento primário ou secundário é uma derivação do outro. Neste tipo de transformador, não há isolamento elétrico entre primário e secundário. Parte da potência transferida do primário para o secundário é dada por condução e não por acoplamento magnético. Normalmente é utilizado quando a relação de transformação do transformador é pequena, próxima de 1:1, pois apresenta vantagens como relação custo benefício e perdas menores.

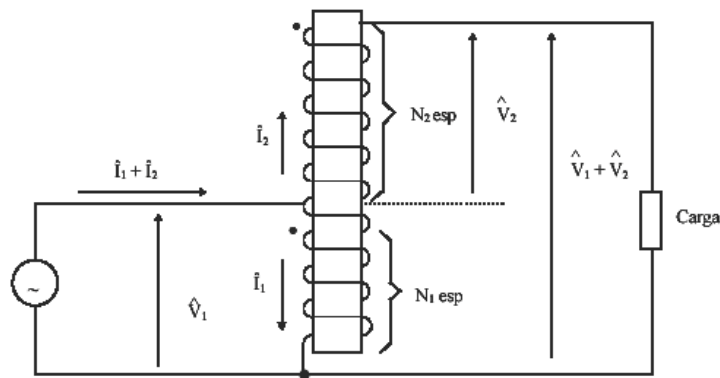


Figura 63: Autotransformador com derivação do mesmo enrolamento.

O autotransformador é do tipo rebaixador quando o número de espiras do secundário é inferior ao do primário (Figura 64a) e do tipo elevador no caso contrário (Figura 64b). Em qualquer dos casos, a relação de transformação é dada pelo cociente entre o número de espiras.

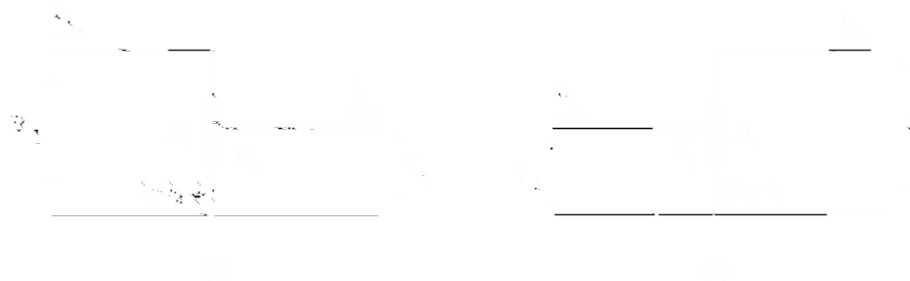


Figura 64: Autotransformador rebaixador (a) e elevador (b).

Algumas aplicações para o autotransformador podem ser:

- em eletrônica, quando se deseja várias tensões diferentes;
- como regulador de tensão, que é um autotransformador com várias derivações;
- como elevador e redutor de tensão em redes de distribuição de energia elétrica;
- na sintonia e adaptação entre antenas e pré-amplificadores em receptores de telecomunicações.

3.11.2 Vantagens e Desvantagens do Autotransformador

O autotransformador apresenta algumas vantagens quando comparado ao transformador, dentre as quais:

- Mais barato que o transformador comum de mesma capacidade;
- Melhor rendimento;
- Menores dimensões para a mesma capacidade, em relação a um transformador comum;
- Menor corrente de excitação, considerando de mesma capacidade.

Contudo, mesmo apresentando muitas vantagens, o autotransformador também apresenta algumas desvantagens:

- Ligação metálica direta entre os lados de alta tensão (AT) e baixa tensão (BT);
- Necessidade de isolamento adicional;
- A grande desvantagem: em caso de abertura do enrolamento na porção comum entre os circuitos de alta e de baixa tensão, a tensão do lado do gerador automaticamente aparece no lado da carga, conforme mostra a Figura 65.

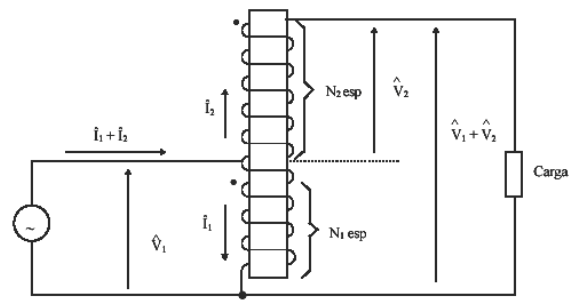


Figura 65: Autotransformador com defeito.

Conclusão:

O autotransformador só é usado com segurança quando a relação de tensão entre os dois lados não difere muito de 1 para 1.

4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Halliday, D.; Resnick, R.; Walker, J. ***Fundamentos da Física 3: Eletromagnetismo***. Livros Técnicos e Científicos, 1996.
- [2] Sadiku, M. N. O. ***Elementos do Eletromagnetismo***. Bookman, 2004.
- [3] Bastos, J. P. A., ***Eletromagnetismo para engenharia***. Editora da UFSC, 2004.
- [4] Carvalho, G. ***Máquinas Elétricas, teoria e ensaios***. Editora Érica, 2006.
- [5] Oliveira, J. C.; Cogo, J. R.; Abreu J. P. G. ***Transformadores, teoria e ensaios***. Editora Edagard Blucher, 2006.
- [6] Fitzgerald, A. E.; Kingsley C.; Umans, S. D. ***Electric Machinery***. McGraw-Hill, 1990.
- [7] Kosow, I. I. ***Máquinas Elétricas e Transformadores***. Editora Globo, 2000.
- [8] Sen, P. C. ***Principles of Electric Machines and Power Electronics***. John Wiley, 1997.
- [9] Toro, V. D. ***Fundamentos de Máquinas Elétricas***. Livros Técnicos e Científicos, 1999.
- [10] Martignoni, A. ***Transformadores***. Editora Globo, 1969.