
GUIA DE ESTUDO

**- OBJETIVO DE APRENDIZAGEM -
REVISÃO DE ELETROMAGNETISMO**

REVISÃO DE ELETROMAGNETISMO

Objetivo de Aprendizagem

Estudar os principais conceitos e princípios do eletromagnetismo.

Objetivos parciais

- Conhecer os princípios de eletromagnetismo;
- Conhecer as principais leis do eletromagnetismo;
- Entender as principais grandezas e dispositivos eletromagnéticos.

Aulas relacionadas

Este objetivo de aprendizagem está relacionado com a aula 04 da disciplina.

Pré-requisitos

Ter estudado o objetivo de aprendizagem 03 relacionado ao projeto de instalações elétricas.

Continuidade dos Estudos

O próximo objetivo de aprendizagem será o estudo de transformadores.

Roteiro para estudos

Os estudos referentes a este objetivo de aprendizagem consistem em:

1. Estudar este documento resumo, realizando as atividades propostas no mesmo;
2. Responder o quiz relacionado a este objetivo de aprendizagem;
3. Caso perceba necessidade, estudar a apresentação deste assunto ou consultar os livros texto indicados para esta disciplina;
4. Realizar os exercícios deste tópico da matéria;
5. Realizar a avaliação final para progredir ao próximo conteúdo.

Referências

- Material disponibilizado para a disciplina de Acionamentos Eletrônicos – 2021/1.
Departamento Acadêmico de Eletrônica, Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.
- BOYLESTAD, Robert. Introdução à análise de circuitos. Tradução de Daniel Vieira, Jorge Ritter. 12ª ed. São Paulo: Pearson, 2012.

Check-list

Caro estudante, verifique se você completou as atividades deste objetivo de aprendizagem e obteve êxito para continuar seus estudos.

Assinale as atividades realizadas:

Estudo do documento resumo:

- Leitura do documento resumo;
- Exercícios do documento resumo;
- Atividade avaliativa do documento resumo.
- Obtive êxito e entendi o conteúdo deste documento;
- Ainda não entendi bem o conteúdo e estudarei o mesmo com mais profundidade.

Estou com dúvidas, irei estudar com mais detalhes este conteúdo:

- Assistir a apresentação relacionada ao conteúdo (apresentação 04);
- Ler este guia de estudo (objetivo de aprendizagem 04).

Ainda estou com dúvidas:

- Entrarei em contato com o professor.

Obtive êxito, então seguirei em frente:

- Responder ao quiz deste conteúdo no Moodle;
- Informar ao professor que estou avançando com o conteúdo.

Parabéns, continue estudando com afinco e vamos em frente!!

CONTEÚDO

**- OBJETIVO DE APRENDIZAGEM -
REVISÃO DE ELETROMAGNETISMO**

1 Introdução

O conteúdo a ser estudado neste tópico da disciplina está relacionado aos princípios básicos do eletromagnetismo, para posteriormente se estudar transformadores e motores elétricos.

Assim, o objetivo aqui será realizar uma revisão das principais grandezas do eletromagnetismo e apresentar os fundamentos para posteriormente se estudar as máquinas elétricas (transformadores e motores).

1.1 Conteúdo – O que irei estudar

Estudaremos neste tópico:

- Revisão de eletromagnetismo;
- Princípios do eletromagnetismo;
- Aspectos gerais de eletromagnetismo.

1.2 Metodologia – O que devo fazer e como fazer

Leia com atenção o conteúdo a seguir. Ao final deste tópico são apresentados exercícios resolvidos. Após são apresentados alguns exercícios propostos.

Ao realizar estas atividades e se sentir confiante para progredir, siga os passos indicados na primeira página deste documento.

Espera-se que após estudar este assunto, você consiga:

- Descrever com suas palavras as principais grandezas do eletromagnetismo;
- Entender os principais aspectos relacionados com os dispositivos eletromagnéticos.

A atividade avaliativa deste objetivo de aprendizagem consistirá em perguntar ao estudante para descrever as principais grandezas do eletromagnetismo.

Exemplo de atividade avaliativa:

1. Explicar com suas palavras o que é campo elétrico.
2. Explicar a curva $B \times H$ de um material magnético.
3. Descrever os princípios motor e gerador.
4. Explicar o que são indutores e transformadores.

2 Eletromagnetismo

2.1 Introdução

O entendimento dos dispositivos eletromagnéticos, como máquinas elétricas (transformadores e motores), contadores, relés, disjuntores, dentre outros elementos, é possível a partir da compreensão dos princípios do eletromagnetismo e seus fenômenos.

Assim, neste capítulo será realizada uma breve revisão sobre as principais grandezas do eletromagnetismo e aspectos importantes relacionados ao mesmo.

2.2 Magnetismo Atômico

Em termos eletromagnéticos, os menores elementos presentes nos materiais magnéticos são denominados de dipolos magnéticos; e em menor escala, um elétron se apresenta como um dipolo magnético, ou seja, apresenta um polo norte e um polo sul, conforme mostrado na Figura 1.

Acima do nível eletrônico (considerando o magnetismo dos elétrons), em termos de escala dimensional, se tem o magnetismo atômico (considerando o átomo), ou seja, a nível de um átomo, que conforme a quantidade de cargas na camada de valência, especialmente, poderá apresentar ou não um momento magnético, isto é, ter um pequeno campo magnético resultante dos dipolos magnéticos de cada elétron que forma o átomo, conforme mostrado na Figura 2.

Ainda subindo mais na escala dimensional, considerando agora a construção de núcleos magnéticos utilizados na implementação de dispositivos eletromagnéticos (indutores, transformadores, motores, contadores, etc.) se tem os domínios magnéticos, que são pequenas regiões do material, que podem ter orientação preferencial ou não, conforme mostra a Figura 3.

Os domínios magnéticos são os elementos que constituem o núcleo ferromagnético de um dispositivo eletromagnético, os quais devem ser orientados conforme a direção das linhas de campo magnético, para que em conjunto formem um campo magnético mais intenso ou não. Um ímã é um elemento físico no qual os domínios estão orientados em uma mesma direção, formando assim um campo magnético intenso; daí a denominação de que um ímã é um elemento magnetizado. Por sua vez, um material desmagnetizado tem os domínios orientados aleatoriamente (desorientados), ou seja, sem uma direção preferencial, fazendo com o que o campo magnético resultante seja nulo.

Em geral, os dispositivos eletromagnéticos utilizam núcleos de material ferromagnético para se ter uma orientação dos domínios magnéticos de maneira intensa, e com isso, se conseguir efeitos (fenômenos) eletromagnéticos de maior intensidade em menores volumes e pesos.

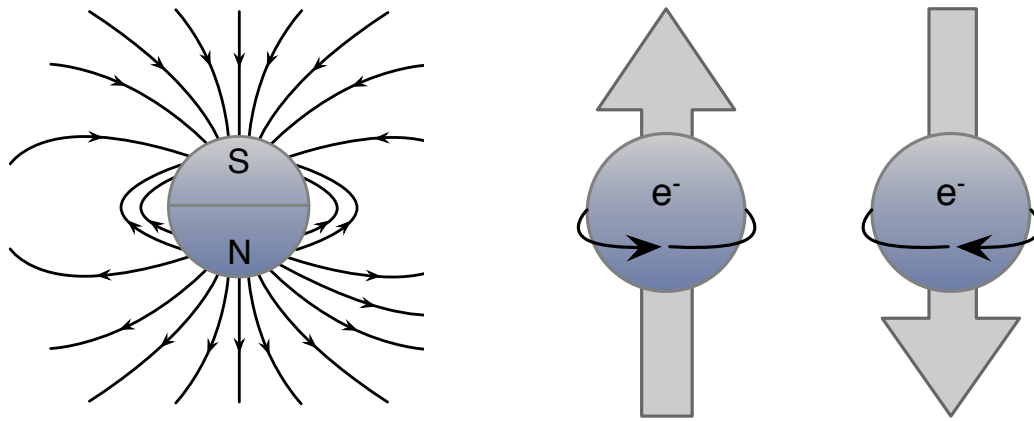


Figura 1 – Dipolos magnéticos.

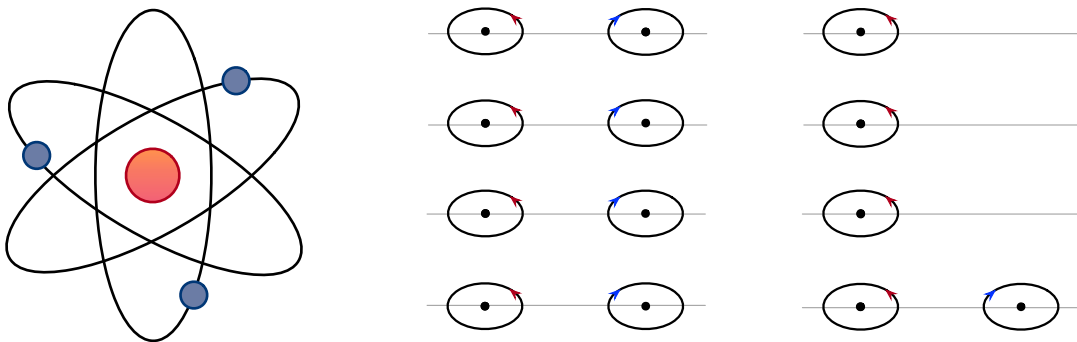


Figura 2 – Magnetismo em um átomo.

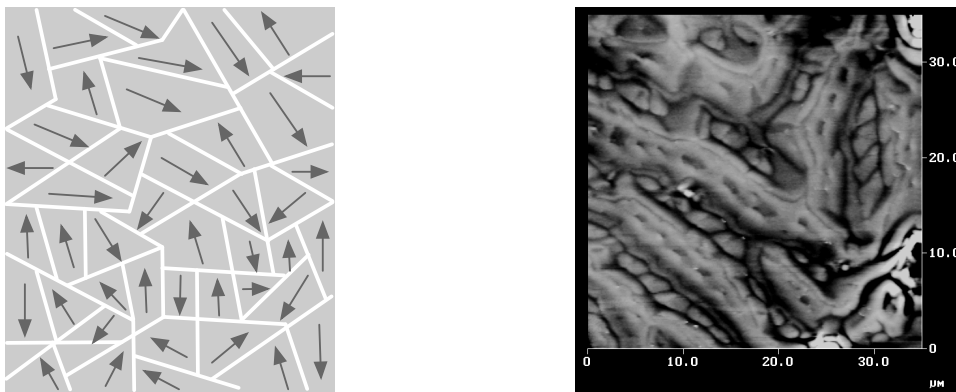


Figura 3 – Domínios magnéticos de um material.

Fonte: <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx> e www.geociencias.unam.mx. Acesso em: 28/09/2014.

2.3 Campo Magnético

O campo magnético é uma região do espaço onde se tem a presença de fenômenos magnéticos, especificamente linhas de campo, conforme mostrado na Figura 4. O campo pode ser uniforme, conforme as linhas de campo estiverem distribuídas com mesma intensidade e direção, ou não-uniforme, se as linhas de campo estiverem concentradas ou espalhadas, fazendo variar sua intensidade e direção ao longo do espaço.

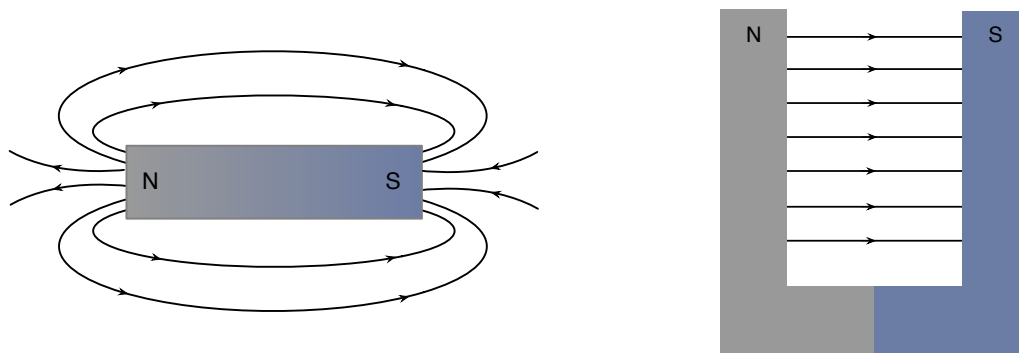


Figura 4 – Campo magnético.

Fonte: (Ramalho, 2006)¹.

Em resumo, se utilizam núcleos de material ferromagnético nos dispositivos eletromagnéticos utilizados em eletrônica para promover a concentração das linhas de campo, fazendo com que as mesmas se limitem ao volume ocupado pelo núcleo.

O campo magnético pode ser originado pela corrente elétrica circulando por um condutor retilíneo, em forma de espira (volta) ou bobina. A diferença é que o campo magnético criado por um pedaço pequeno de condutor, com um comprimento reduzido (delta de comprimento), será pequeno, enquanto que, na medida que se aumentar o comprimento do condutor (soma de vários deltas de comprimento, isto é, soma de pequenos pedaços de comprimento de condutor) se aumentará o campo resultante. Do mesmo modo, se o condutor for enrolado na forma de uma espira (volta), o campo no interior da espira será somado, ou seja, os vetores de campo magnético se somam na parte central da espira, resultando em um campo com maior intensidade e dependente da geometria da espira. Por fim, se for construída uma bobina (ou enrolamento) com diversas espiras, o efeito será novamente de soma, ou seja, o campo resultante será mais intenso conforme se aumentar o número de espiras do indutor construído.

O campo magnético pode ser gerado pela passagem da corrente elétrica em um condutor, sendo que as linhas de campo em um condutor retilíneo são perpendiculares ao mesmo, como mostrado na Figura 5. Quando se enrola o fio condutor em forma de espira (volta), se tem um efeito de somatório das linhas de força (vetores) na parte interna da espira, como mostrado na Figura 6, o que resulta em um campo mais intenso. Por sua vez, se diversas espiras forem enroladas lado a lado, como mostrado na Figura 7 se tem o somatório do campo de cada espira, resultando em uma bobina com um campo mais intenso ainda, proporcional ao seu número de espiras (N). Este efeito é usado para a construção de indutores, transformadores, eletroímãs, motores e outros dispositivos eletromagnéticos.

¹ RAMALHO, R. J. FERRARO, N. J. e SOARES, P. A. T. *Os Fundamentos da Física. Volume 3. São Paulo: Editora Moderna, 2006.*

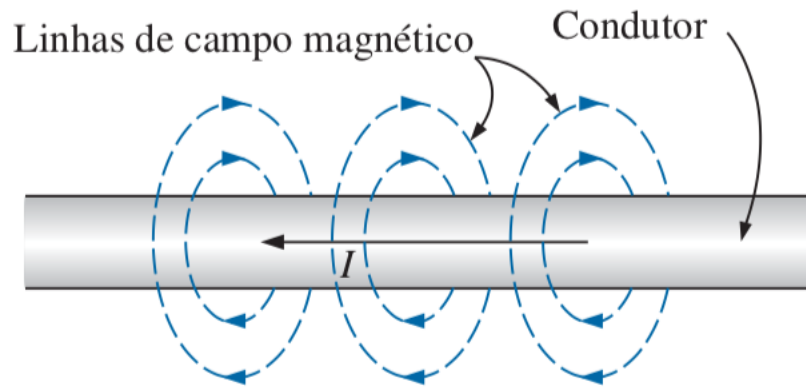


Figura 5 – Linhas de campo em um condutor percorrido por uma corrente elétrica.

Fonte: (Boylestad, 2012).

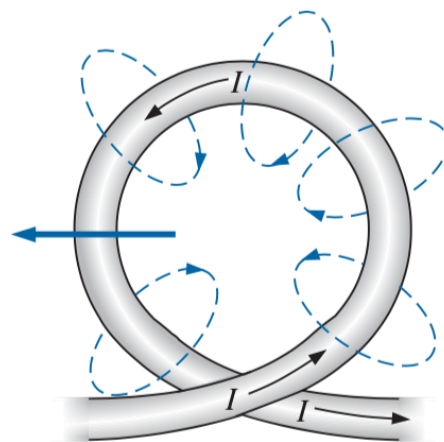


Figura 6 – Linhas de campo em uma espira (volta).

Fonte: (Boylestad, 2012).

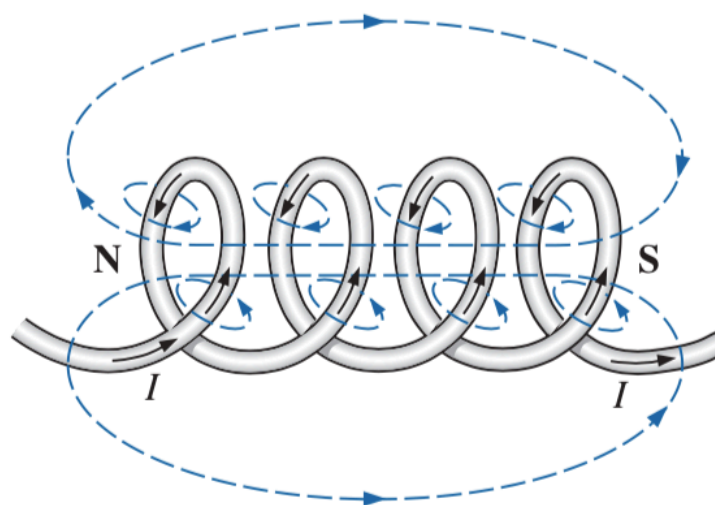


Figura 7 – Linhas de campo em uma bobina.

Fonte: (Boylestad, 2012).

O sentido das linhas de campo pode ser determinado utilizando uma regra prática, com o auxílio da mão direita, como mostrado na Figura 8. A mão e os dedos acompanham o sentido de enrolamento das espiras, neste de caso por cima do núcleo, e o sentido de circulação da corrente elétrica, entrando pelo fio no lado esquerdo. Assim, o dedo polegar da mão direita irá indicar o sentido do fluxo magnético e o polo norte do eletroímã obtido. A mesma Figura 8, ao lado direito, indica os vetores entrando e saindo, para a corrente elétrica nas espiras, respectivamente na parte superior e na parte inferior. Note que se utiliza flechas, onde a parte da frente indica o vetor apontando para o observador (um ponto), enquanto a parte traseira indica um vetor entrando no plano da figura, ou seja, saindo do observador (um x).

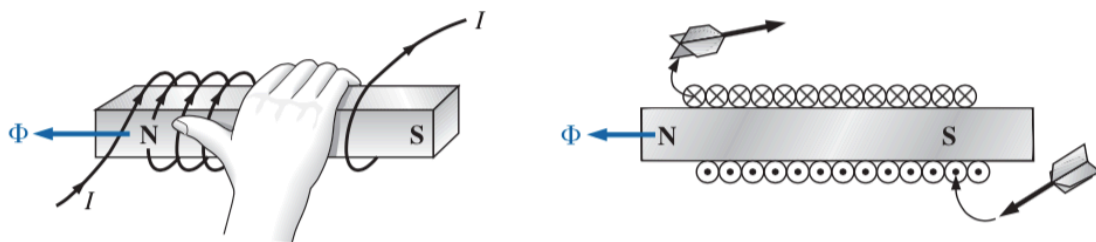


Figura 8 – Regra prática para determinar o sentido das linhas de campo.

Fonte: (Boylestad, 2012).

2.4 Densidade de Fluxo Magnético e Fluxo Magnético

A densidade de fluxo (B) é número de linhas de campo por unidade de área. Sua unidade é Tesla [T], onde um Tesla é igual a 1 Weber por metro quadrado de área.

Por sua vez, o fluxo magnético (ϕ) é o conjunto de todas as linhas de campo que atingem perpendicularmente uma área. Tem como unidade o weber [Wb], sendo que 1 Weber corresponde a 1×10^8 linhas de campo. O fluxo magnético (ϕ) em um área (A) corresponde a densidade de fluxo magnético (B), conforme mostrado na Figura 9.

A densidade de fluxo magnético é obtida por:

$$B = \frac{\phi}{A} \left[T = \frac{Wb}{m^2} \right]$$

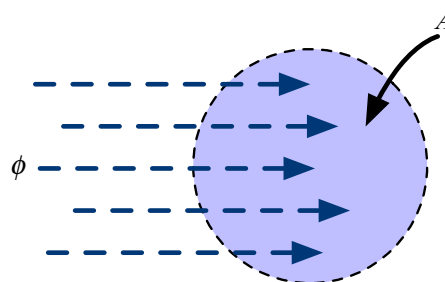


Figura 9 – Fluxo magnético (ϕ) em uma área A .

Fonte: Adaptado de (Boylestad, 2012).

2.5 Força Magnetizante

A alteração nos domínios magnéticos do material, quando presentes, é caracterizada pela sua reação ao campo magnético, denominada de força magnetizante (H), sendo dependente da corrente elétrica, do número de espiras e da geometria do elemento magnético. A Figura 10 mostra diferentes curvas, para diferentes tipos de materiais, podendo se observar que a inclinação da curva é dependente do material, o que significa que se consegue diferentes intensidades de campo magnético (B) para a mesma força magnética (H).

A força magnetizante é calculada por:

$$H \approx (I, N, l) [A / m]$$

A inclinação da curva pode ser alterada e ajustada usando-se diferentes materiais para construir o núcleo magnético ou então inserindo-se elementos diferentes no caminho magnético, alterando assim a relutância magnética.

Assim, quando se realiza o projeto do elemento magnético, deve-se calcular o entreferro, que é uma distância entre dois elementos ferromagnéticos (núcleo) em um caminho magnético, onde se coloca material sem propriedades ferromagnéticas, como por exemplo papel, plástico, fenolite, etc.

As curvas da Figura 10 mostram que ao aplicar no material forças magnéticas de grande intensidade, a curva de resposta do material não altera sua inclinação ou intensidade, entrando em uma região onde se aumenta a força (H) e o campo (B) não aumenta mais; neste caso se tem a saturação do material magnético, ou seja, onde todos os seus domínios magnéticos foram orientados. Ao se utilizar um indutor em um circuito prático, por exemplo, ao ocorrer sua saturação, sua indutância tenderá a zero, fazendo com que sua reatância indutiva tenda a zero também, restando apenas sua resistência ôhmica, isto é, o indutor passa a se comportar como um resistor com resistência do fio utilizado para a construção do mesmo. Assim, se este indutor estiver sendo utilizado em um conversor cc-cc, então a corrente elétrica irá aumentar, pois nestes conversores, a taxa de crescimento (derivada) da corrente elétrica é dada pela relação entre a tensão sobre indutor pela indutância ($i = V/L$); implicando que se a indutância tende a zero, a corrente tenderá a infinito.

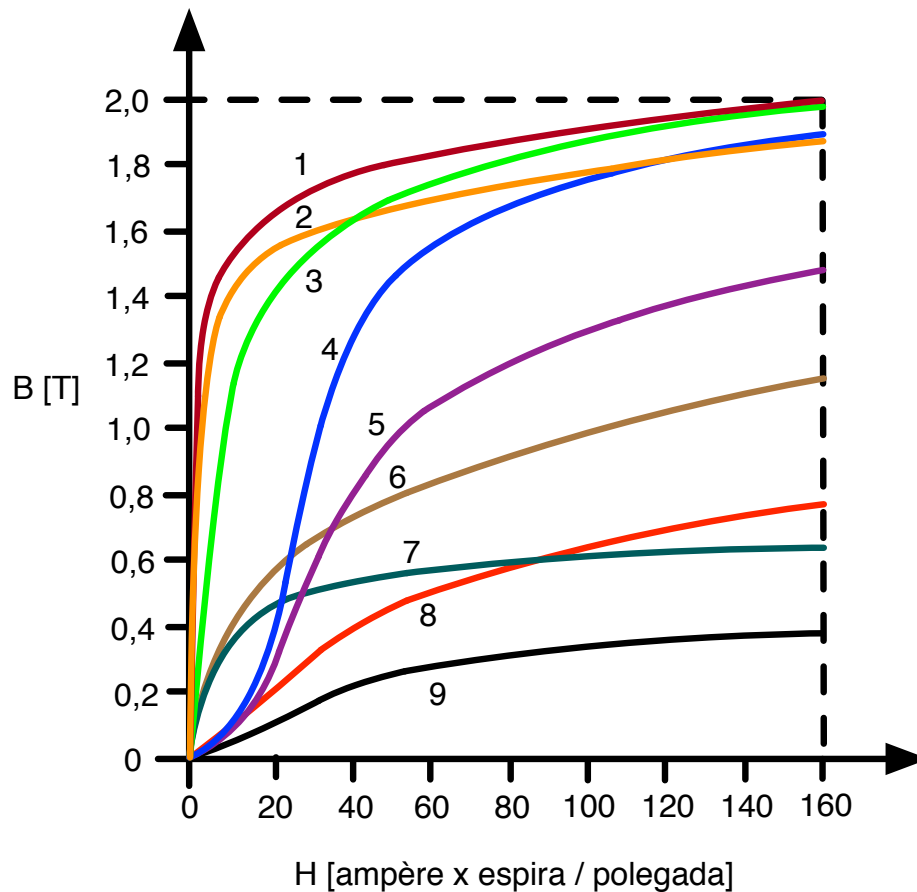


Figura 10 – Curva $B \times H$ para diferentes materiais (1 – chapa de aço, 2 – aço silício, 3 – aço fundido, 4 – aço tungstênio, 5 – aço magnético, 6 – ferro fundido, 7 – níquel, 8 – cobalto, 9 – magnetita).

Fonte: Adaptado de (Wikipédia, 2014).

2.6 Permeabilidade Magnética

A permeabilidade magnética (μ) é a relação entre a densidade de campo magnético (B) e a força magnética (H). Os materiais, magnéticos ou não, são classificados justamente conforme sua permeabilidade magnética, ou seja, seu comportamento quando imerso em um campo magnético, concentrando ou não as linhas de campo.

A permeabilidade magnética é dada por:

$$\mu = \frac{B}{H} \left[\frac{Wb}{A/m} \right]$$

Os materiais são classificados em relação a permeabilidade do vácuo, como sendo:

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_o$$

$$\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Wb}{A/m}$$

O comportamento dos domínios magnéticos dos diferentes materiais, em termos de permeabilidade magnética, pode variar muito, como está mostrado na Tabela 1, onde o uso de materiais com maior permeabilidade relativa implica em menor volume e peso, pois se obterá o mesmo fenômeno eletromagnético (indutância, por exemplo) com um número de espiras muito menor. A grosso modo, comparando-se o ar com o ferrite, pode-se estimar que seriam necessárias 2.000 espiras para obter a mesma indutância caso se utilize como núcleo o ar, ao invés do ferrite. Por sua vez, os materiais elaborados a partir das terras raras, tem permeabilidades muito altas, como o permalloy, por exemplo.

A maneira como o material se comporta quando imerso em um campo magnético é representado pela sua curva $B \times H$, como mostrado na Figura 11. Esta curva é conhecida como curva de histerese, pois mostra que as curvas de magnetização e desmagnetização do material são diferentes; pois ao se diminuir a corrente elétrica (força magnética H), os domínios devem ficar desorientados, ou seja, orientados de maneira aleatória; no entanto, alguns domínios permanecem orientados, fazendo com que mesmo com corrente zero (força H nula), o campo (B) resultante não seja zero, caracterizando a presença de magnetismo residual ou remanescente. Deste modo, a curva $B \times H$ forma um laço, chamado de laço de histerese, e representa a energia necessária para orientar e desorientar os domínios magnéticos.

Em comparação com a curva da Figura 11, o ar tem a curva na forma de uma reta, sem apresentar o efeito de saturação e de magnetismo residual.

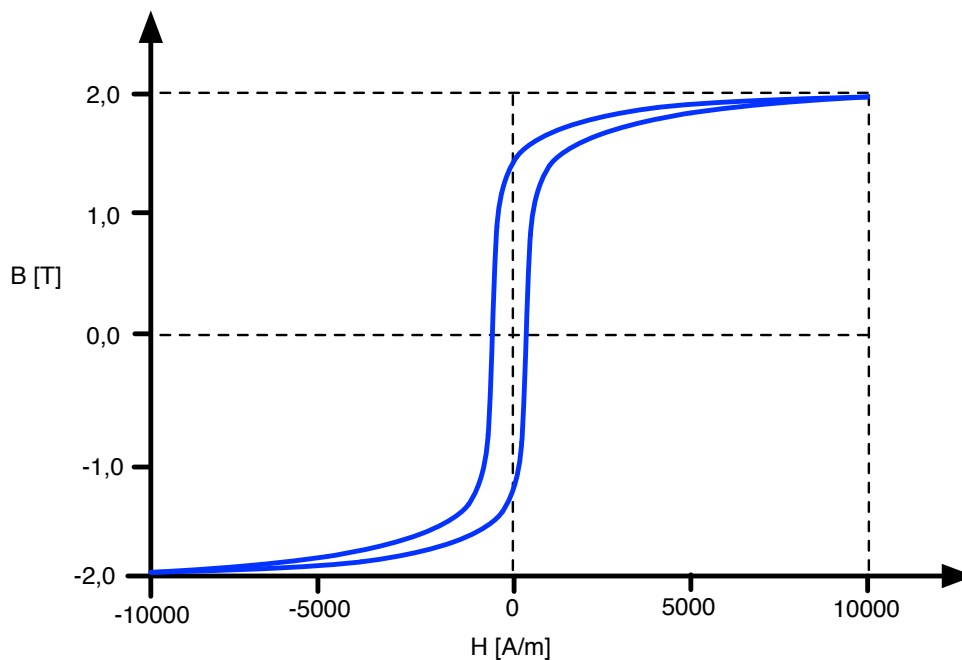


Figura 11 – Curva $B \times H$ (histerese) de um material magnético.

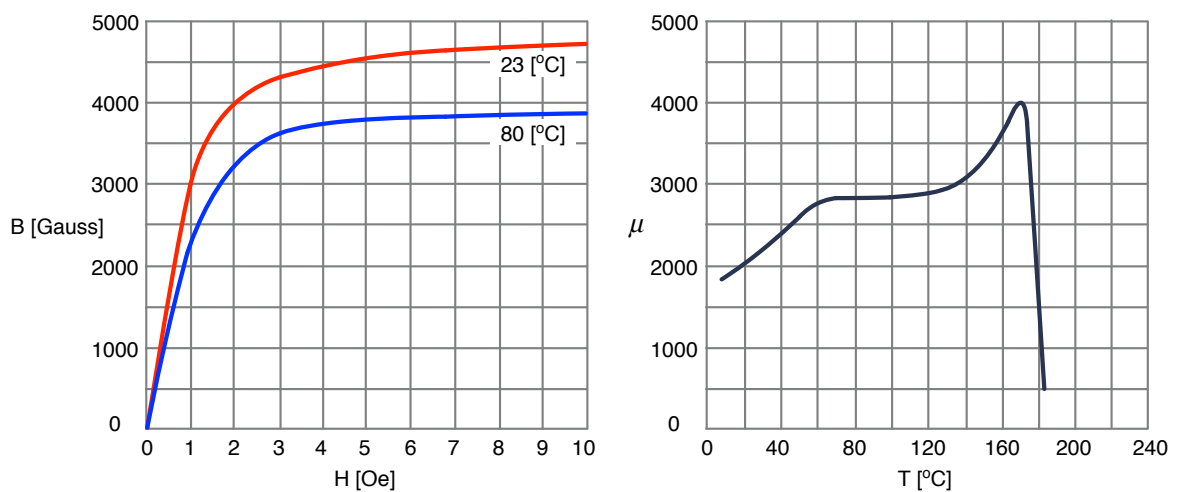
Fonte: Adaptado de (Boylestad, 2012).

Tabela 1 - Permeabilidade relativa de diferentes materiais.

Material	Permeabilidade relativa (μ_r)
Ar	1
Papel, plástico, fenolite	1
Ferrite	2.000
Ferro comercial	9.000
Ferro silício	55.000
Permalloy	1.000.000
Super permalloy	10.000.000

A Figura 12 apresenta a curva $B \times H$ de materiais magnéticos utilizados para implementação de dispositivos eletromagnéticos (indutores, transformadores e motores) operando em alta frequência. Nota-se pela Figura 12 que a curva $B \times H$ é alterada pela temperatura do material, devendo-se evitar temperaturas acima de 140 °C, pois a permeabilidade muda abruptamente e logo acima de 160 °C se tem a temperatura de Curie, onde a permeabilidade tende a zero, ou seja, o material perde suas propriedades magnéticas.

A partir da Figura 12, costuma-se utilizar em projetos a curva para temperatura de 80 °C, colocando-se o ponto de operação na região abaixo de 4 Oe de força magnetizante, para evitar a saturação do elemento magnético, isso quando se está projetando indutores e transformadores, por exemplo.

Figura 12 – Curva $B \times H$ para ferrites.

Fonte: Adaptado de <http://www.thornton.com.br>. Acesso em: 23/09/2020.

Em termos de curva de permeabilidade, os materiais podem ser classificados como moles ou duros, dependendo de sua curva de histerese. Os materiais com curva larga e valor alto de magnetismo residual (remanente ou remanescente) são utilizados com ímãs permanentes para a construção de motores, alto falantes, etc., mostrados na Figura 13. Já os materiais com curva

estreita e baixo valor de magnetismo residual são empregados para a construção de dispositivos com campo magnético variável, como indutores, motores de indução, etc., mostrados na Figura 14.

Além desta classificação, os materiais mais empregados atualmente para a construção de dispositivos são o ferro silício, ferrite e pós metálicos. O primeiro é obtido com a mistura de silício com o ferro. O segundo e terceiro são materiais compostos pela mistura de diferentes elementos, visando se obter as características desejadas. Os núcleos de ferro silício são laminados, enquanto os de ferrite e pós metálicos são compactos. A Figura 15 mostra exemplos destes materiais.

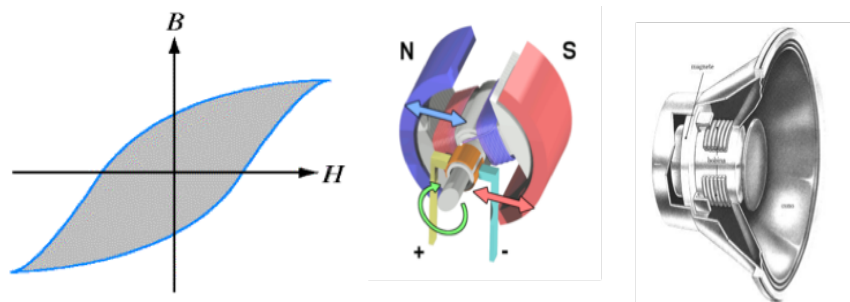


Figura 13 – Curva de histerese de materiais duros e exemplos de aplicação.

Fonte: (Boylestad, 2012).

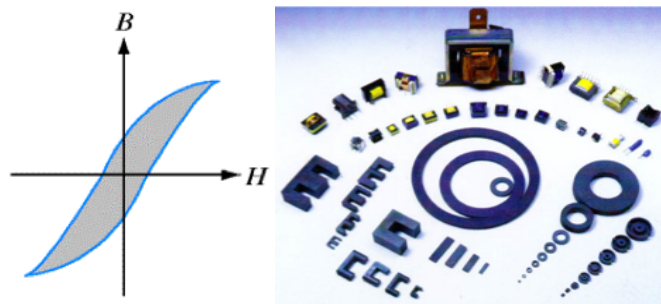


Figura 14 – Curva de histerese de materiais moles e exemplos de aplicação.

Fonte: (Boylestad, 2012).



Figura 15 – Materiais magnéticos empregados para construção de dispositivos eletromagnéticos.

Fonte: <http://www.magnoepaula.com.br>; <http://www.thornton.com.br> e <http://www.magmattec.com>.

Acesso em: 28/09/2014.

2.7 Circuitos Magnéticos

A exemplo dos circuitos elétricos, formados, por exemplo, por fontes e elementos passivos (resistores, indutores e capacitores), também se tem os circuitos magnéticos, formados pelas forças e relutâncias magnéticas.

A força magnetomotriz (\mathfrak{F}) é equivalente a tensão elétrica, representando a pressão ou força para o estabelecimento das linhas magnéticas (fluxo magnético), sendo diretamente relacionada com o número de espiras e a corrente aplicada ao elemento.

$$\mathfrak{F} = N \cdot I [Ae]$$

Onde:

- F – Força magnetomotriz em ampères-espiras (Ae);
- N – Número de espiras (e);
- I – Corrente elétrica em ampères (A).

A relutância magnética (\mathfrak{R}) é a oposição ao estabelecimento das linhas de campo, equivalente à resistência elétrica em circuitos eletroeletrônicos, sendo dada por:

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu \cdot A} [rels, ou Ae / Wb]$$

Onde:

- l – Comprimento do caminho magnético em metros (m);
- μ – Permeabilidade magnética em Wb/Am;
- A – área da seção transversal em m².

É importante destacar que a relutância do material é inversamente proporcional à permeabilidade magnética, isto é, ao se utilizar materiais com altas permeabilidades (ferromagnéticos), se terá baixas relutâncias magnéticas. Por outro lado, materiais como o ar, papel, plástico, dentre outros, terão baixas permeabilidades magnéticas (na verdade praticamente igual a permeabilidade do vácuo (1)) e, portanto, altas relutâncias magnéticas.

A relutância é utilizada em termos práticos, para ajustar a inclinação da curva $B \times H$ conforme visto anteriormente.

A força magnetizante H é a relação entre a força magnetomotriz e o comprimento do caminho magnético, conforme:

$$H = \frac{\oint \mathcal{S}}{l} [Ae/m]$$

Assim, se tem:

$$H = \frac{\oint \mathcal{S}}{l} = \frac{N \cdot I}{l} [Ae/m]$$

A título de exemplo, a Figura 16 mostra um circuito magnético, formado por um núcleo toroidal e um conjunto de espiras enrolado envolta do mesmo. Neste caso, se a corrente elétrica for de 2 A e o número de espiras for 20, considerando um comprimento de 20 cm, se terá:

$$H = \frac{N \cdot I}{l} = \frac{20 \cdot 2}{0,2} = 200 [Ae/m]$$

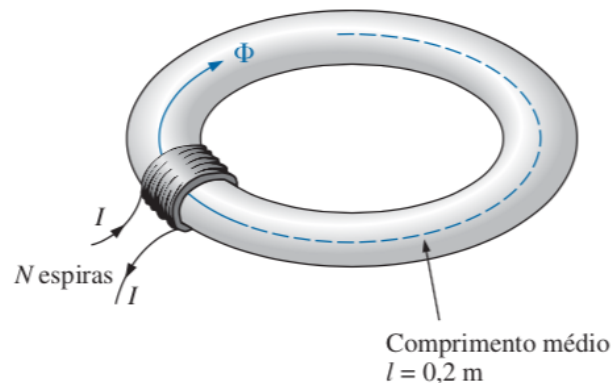


Figura 16 – Exemplo de circuito magnético e força magnetizante.

Fonte: (Boylestad, 2012).

A Lei Circuital de Ampère determina que a soma das forças magnetomotrizes ao longo de um caminho fechado deve ser nula, similarmente ao que determina a Lei de Kirchhoff das Tensões para um circuito elétrico.

Assim:

$$\sum_{\leftrightarrow} V = 0 \rightarrow (\text{para circuitos elétricos})$$

$$\sum_{\leftrightarrow} \mathcal{S} = 0 \rightarrow (\text{para circuitos magnéticos})$$

A Tabela 2 mostra a relação de causa e efeito para circuitos elétricos e circuitos magnéticos. Assim, o fluxo magnético é resultado da força magnetomotriz diminuída ou atenuada pela relutância magnética do circuito.

Assim, em termos de circuitos magnéticos, por similaridade, se pode escrever que:

$$V = R \cdot I \rightarrow (\text{para circuitos elétricos})$$

$$\mathfrak{S} = \mathfrak{R} \cdot \phi \rightarrow (\text{para circuitos magnéticos})$$

Tabela 2 – Relações de causa e efeito para circuitos elétricos e magnéticos.

	Circuitos elétricos	Circuitos magnéticos
Causa	E	\mathfrak{S}
Oposição	R	\mathfrak{R}
Efeito	I	ϕ

Fonte: (Boylestad, 2012).

A Figura 17 mostra um exemplo de circuito magnético com diferentes elementos no caminho magnético, ou seja, que tem diferentes permeabilidades magnéticas. Ao aplicar a Lei Circuital de Ampère se terá:

$$\sum_{\leftrightarrow\updownarrow} \mathfrak{S} = 0$$

$$+N \cdot I - H_{ab} \cdot l_{ab} - H_{bc} \cdot l_{bc} - H_{ca} \cdot l_{ca} = 0$$

$$N \cdot I = H_{ab} \cdot l_{ab} + H_{bc} \cdot l_{bc} + H_{ca} \cdot l_{ca}$$

A Figura 18 mostra um exemplo de dispositivo eletromagnético prático, neste caso um relé eletromecânico, onde se tem o emprego de aço fundido como material ferromagnético, e o espaço de manobra, entre a parte fixa e a parte móvel do núcleo, ocupada pelo ar, é caracterizada como um entreferro, com relutância magnética muito diferente daquela do restante do caminho magnético formado pelo aço.

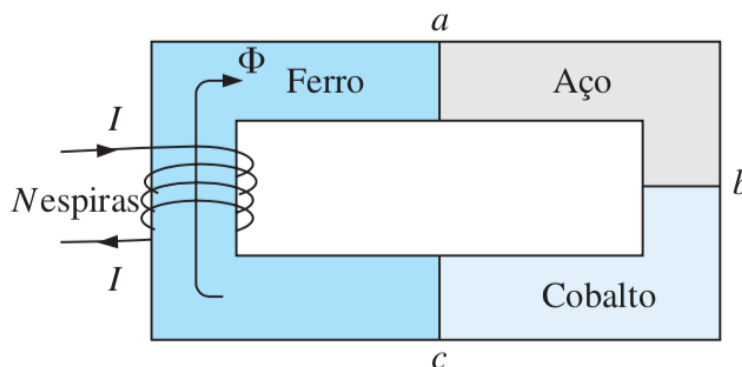


Figura 17 – Circuito magnético exemplo para aplicação da Lei Circuital de Ampère.

Fonte: (Boylestad, 2012).

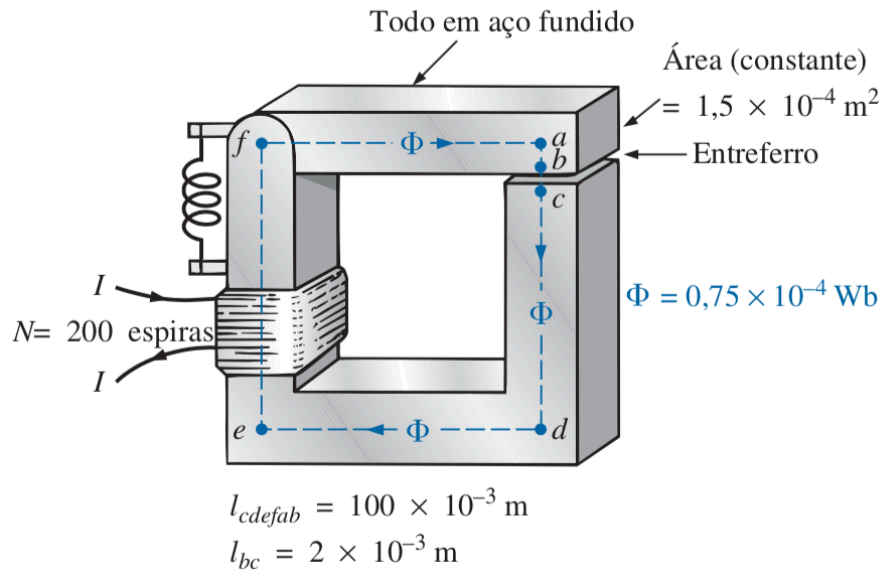


Figura 18 – Exemplo de circuito magnético em um relé eletromecânico.

Fonte: (Boylestad, 2012).

3 Indutância

3.1 Introdução

Os indutores, juntamente com os resistores e capacitores, formam os elementos de circuitos eletroeletrônicos denominados de passivos.

A seguir será apresentado, resumidamente, o conceito de indutância e o modelo equivalente para circuitos eletrônicos de um indutor.

3.2 Indutância

A Lei de Faraday explicita que em todo condutor enquanto sujeito a uma variação de fluxo magnético é estabelecida uma força eletromotriz (tensão) induzida.

$$\varepsilon = N \frac{d\phi}{dt} [V]$$

Já a Lei de Lenz impõe que o sentido da corrente induzida é tal que origina um fluxo magnético induzido, que se opõe à variação do fluxo magnético indutor.

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi}{dt} [V]$$

A partir destas duas leis pode-se definir que autoindutância é a propriedade de uma bobina de se opor a qualquer variação de corrente (L). A unidade de medida de indutância é o Henry (H).

É importante destacar que a indutância é uma propriedade dos componentes, ou seja, é um fenômeno que ocorre na presença de variação de corrente elétrica. Assim, todos os componentes apresentam indutância, sendo esta maximizada nos indutores, em virtude de suas características construtivas e pelo emprego de materiais ferromagnéticos.

A indutância de um indutor com núcleo com comprimento muito maior do que seu diâmetro será:

$$L = \frac{N^2 \cdot \mu \cdot A}{l}$$

Esta expressão pode ser utilizada para o cálculo da indutância de indutores com núcleos retilíneos ou toroidais, conforme mostrado na Figura 19.

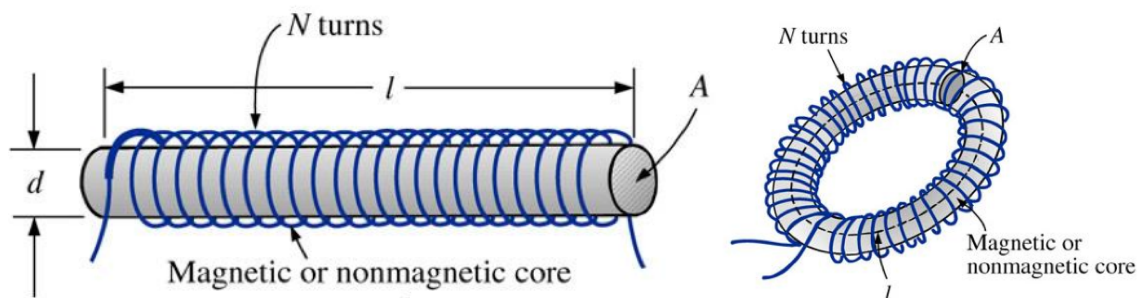


Figura 19 – Indutor com núcleo retilíneo ou toroidal.

Fonte: (Boylestad, 2012).

3.3 Modelo elétrico do indutor

O circuito elétrico equivalente de um indutor, em termos práticos, é mostrado na Figura 20. Idealmente se teria apenas a indutância L, mas na prática sempre se terá a resistência do condutor, então é comum se representar também este parâmetro.

Em circuitos que operam em frequências mais altas, por exemplo em centenas de kHz, pode ser necessário representar o indutor pelo seu circuito elétrico completo, conforme mostrado na Figura 21, pois neste caso, a capacitância parasita pode ter um efeito considerável no comportamento elétrico do componente, o que também vale para resistores e capacitores.

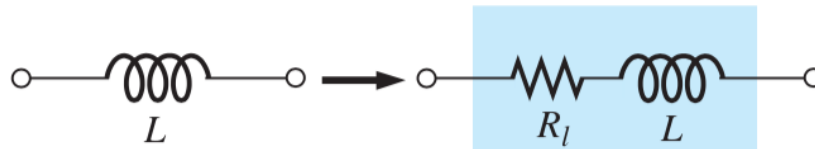


Figura 20 – Circuito elétrico equivalente prático de um indutor.

Fonte: (Boylestad, 2012).

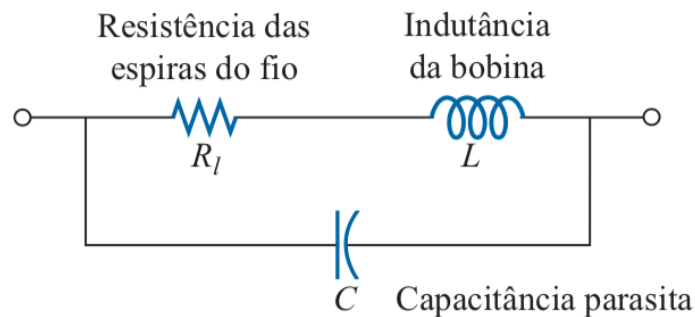


Figura 21 – Circuito elétrico equivalente completo de um indutor.

Fonte: (Boylestad, 2012).

4 Transformadores

4.1 Introdução

Uma das aplicações do eletromagnetismo é na implementação de transformadores, dispositivos utilizados para aumentar ou diminuir tensões alternadas, por exemplo.

A seguir será apresentado resumidamente o princípio da indução eletromagnética, pois na sequência deste curso serão estudados os transformadores em detalhe.

4.2 Indução eletromagnética

O cientista Hans Christian Oersted em torno de 1820 descobriu que uma corrente elétrica tinha a capacidade de gerar um campo magnético. No entanto, o fenômeno da geração de correntes elétricas a partir de campos magnéticos foi observado por Michael Faraday em 1831, permitindo, em conjunto com os estudos de Oersted, derivar conclusões importantes para o desenvolvimento da área de eletromagnetismo e seus dispositivos.

Assim, a indução eletromagnética foi estudada por Faraday, ao realizar o experimento mostrado na Figura 22, e perceber que:

- No momento 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-se a chave, o galvanômetro volta a indicar uma corrente de curta duração, em sentido oposto ao observado no momento de fechamento da chave.

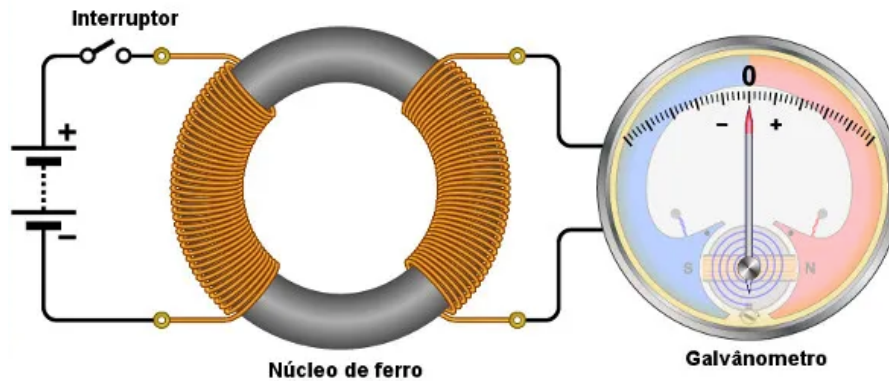


Figura 22 – Experimento de Faraday.

Fonte: <https://brasilecola.uol.com.br>. Acessado em 17/06/2021.

As Leis de Faraday e de Lenz se aplicam aos transformadores, do mesmo modo que se aplicam aos indutores e demais dispositivos eletromagnéticos.

A tensão induzida (e) sobre um número de espiras (N), a partir da variação do fluxo (ϕ) é resultado da Lei de Faraday da Indução Eletromagnética, como mostrado na Figura 23, sendo dada por:

$$e = N \cdot \frac{d(\phi)}{d(t)} [V]$$

A contribuição de Lenz foi concluir que o sentido da corrente induzida é tal que origina um fluxo magnético induzido, que se opõe à variação do fluxo magnético indutor.

$$e = -N \cdot \frac{d(\phi)}{d(t)} [V]$$

As Figura 24 e Figura 25 mostram, respectivamente, a indução de corrente elétrica em um condutor retilíneo e em uma bobina, ambos em movimento em região de presença de linhas de campo, ou seja, imersos em um campo magnético. Note que neste caso, a variação de fluxo é provocada pelo movimento do condutor ou da bobina.

Por outro lado, a Figura 23 mostra a indução de corrente elétrica em uma bobina imersa em um campo magnético variável, isto é, neste caso, as linhas de campo é que estão variando de intensidade ou de direção, por exemplo.

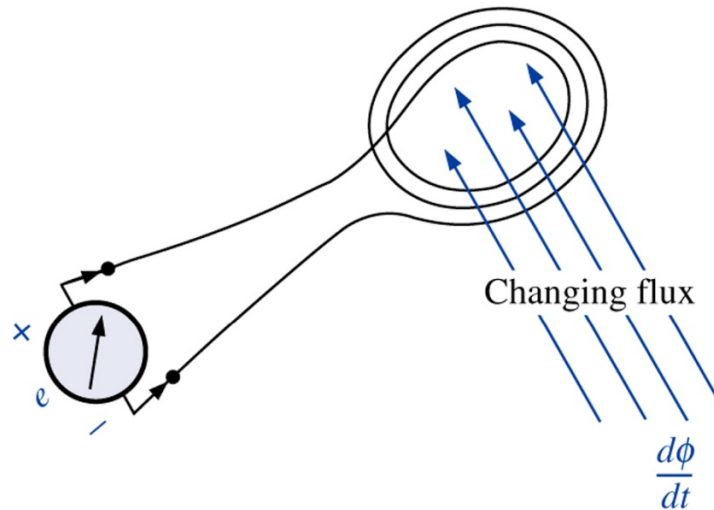


Figura 23 – Indução em uma bobina imersa em um campo magnético variável.

Fonte: (Boylestad, 2012).

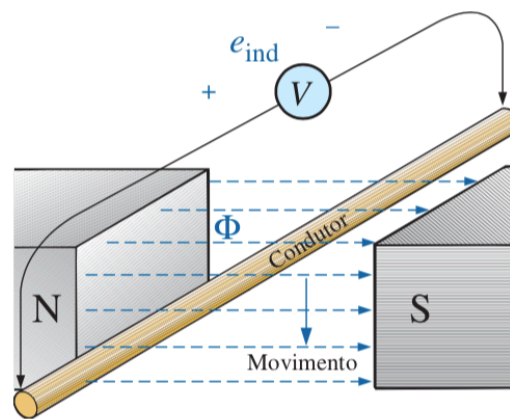


Figura 24 – Indução de corrente elétrica em um condutor em movimento em um campo magnético.

Fonte: (Boylestad, 2012).

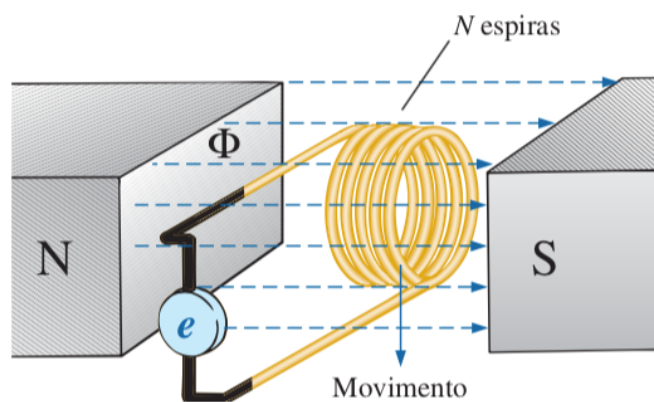


Figura 25 – Indução de corrente elétrica em uma bobina em movimento em um campo magnético.

Fonte: (Boylestad, 2012).

4.3 Transformadores

A Figura 26 mostra um transformador com núcleo de material ferromagnético, como ferro-silício, por exemplo.

O fluxo criado pelo enrolamento primário, a partir da corrente elétrica aplicada neste enrolamento, é denominado de Φ_p e o fluxo que envolve o secundário é denominado de fluxo mútuo Φ_m . Idealmente pode-se considerar que todo o fluxo criado no enrolamento primário passará pelo enrolamento secundário, isto é, que o acoplamento entre os fluxos, provocado pela presença do núcleo ferromagnético, é unitário.

Assim, a partir da Lei de Faraday, tem-se que a tensão induzida sobre o enrolamento primário será:

$$e_p(t) = N_p \frac{d\phi_p}{dt}$$

Por sua vez, a tensão induzida no enrolamento secundário será dada por:

$$e_s(t) = N_s \frac{d\phi_p}{dt}$$

As expressões anteriores serão utilizadas na próxima aula para se estudar o transformador e se obter a relação entre as tensões nos dois enrolamentos, que seria:

$$\begin{cases} e_p(t) = N_p \cdot \frac{d\phi_p}{dt} \rightarrow \frac{d\phi_p}{dt} = \frac{e_p(t)}{N_p} \\ e_s(t) = N_s \cdot \frac{d\phi_p}{dt} \rightarrow \frac{d\phi_p}{dt} = \frac{e_s(t)}{N_s} \end{cases} \rightarrow \frac{e_p(t)}{N_p} = \frac{e_s(t)}{N_s}$$

$$\frac{e_p(t)}{e_s(t)} = \frac{N_p}{N_s}$$

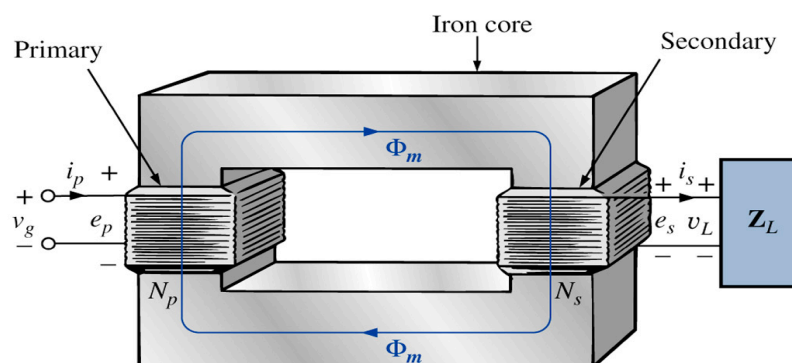


Figura 26 – Transformador com núcleo ferromagnético.

Fonte: (Boylestad, 2012).

4.4 Modelo elétrico do transformador

O circuito elétrico equivalente simplificado e representando um transformador ideal é mostrado na Figura 27, onde se tem a tensão do primário (v_p) e a tensão do secundário (v_s), relacionadas pela relação de transformação entre o número de espiras do primário e do secundário do elemento (T_1).

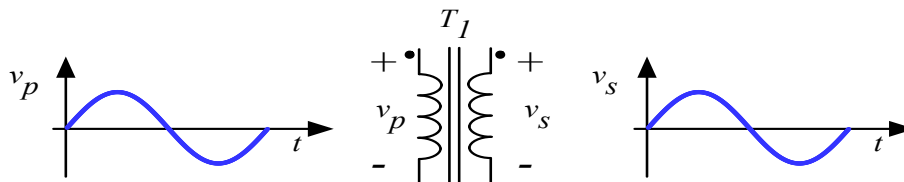


Figura 27 – Circuito elétrico equivalente e simplificado de um transformador.

5 Força Eletromagnética

5.1 Introdução

A força produzida sobre cargas, condutores ou elementos, na presença de campos magnéticos, é um fenômeno importante de ampla utilidade prática na área de eletroeletrônica.

Este tópico apresentará de maneira resumida os princípios envolvidos na geração de forças e que possibilitam a construção de motores e geradores.

5.2 Força Eletromagnética

Um condutor percorrido por uma corrente elétrica e imerso em um campo magnético sofre a ação de uma força eletromagnética.

A Figura 28 mostra a força resultante (F_B) sobre cargas elétricas em movimento com velocidade (v) em um campo magnético (B).

A força poderá ocorrer sobre:

- Uma partícula (carga);
- Um condutor retilíneo;
- Condutores paralelos;
- Em uma espira.

A força é perpendicular aos vetores velocidade (v) e campo magnético (B). O vetor velocidade está associado ao movimento das cargas elétricas, isto é, a corrente elétrica. Assim, onde se tem o vetor velocidade, pode-se inserir a corrente elétrica, como observado na Figura 29.

Deste modo, a força sobre um condutor retilíneo, em termos de módulo, será:

$$F = B \cdot I \cdot l \cdot \text{seno}(\theta)$$

Onde:

- F – Intensidade da força eletromagnética (N);
- B – Densidade de campo magnético (T);
- l – Comprimento do condutor inserido no campo magnético (m);
- θ – Ângulo entre as linhas de campo e a superfície longitudinal do condutor (rad).

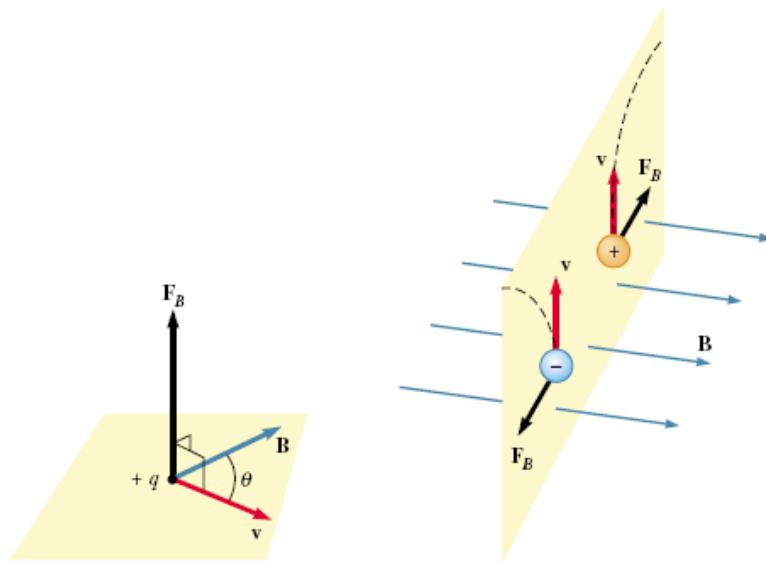


Figura 28 – Força sobre cargas elétricas. Regra para cargas positivas.

Fonte: (Halliday, 1984)².

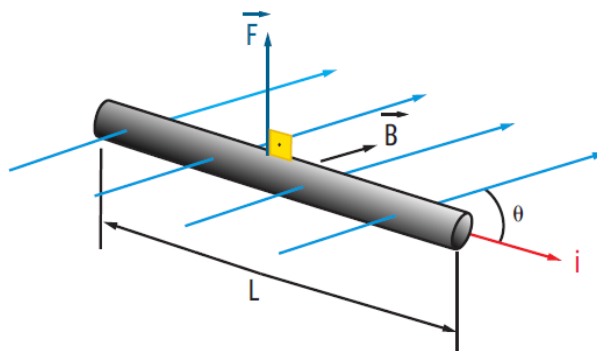


Figura 29 – Força em um condutor retilíneo.

Fonte: <https://guiadoestudante.abril.com.br>. Acessado em 17/06/2021.

² HALLIDAY D. e RESNICK R. Física III. 4. Ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos S.A., 1984.

5.3 Regra de Fleming

A Regra de Fleming permite obter a relação entre os vetores da força magnética, do campo magnético e da corrente elétrica, conforme mostrado na Figura 30. A Regra de Fleming é considerada para cargas positivas. Assim, caso a carga seja negativa, deve-se inverter o sentido da força resultante.

Pode-se ter duas situações distintas, denominadas de ação motora e ação geradora:

- Ação motora – ao circular corrente elétrica em um condutor imerso em um campo elétrico, resultará em uma força sobre este condutor. Aplica-se a Regra de Fleming utilizando a mão esquerda;
- Ação geradora – o movimento de um condutor em um campo magnético resulta em uma corrente elétrica. Aplica-se a Regra de Fleming utilizando a mão direita.

A Figura 31 mostra a aplicação da Regra de Fleming em um condutor imerso em um campo magnético, onde se tem três situações: sem corrente circulando, corrente circulando da direita para a esquerda e corrente circulando da esquerda para a direita. Para determinar a força aplica-se a Regra de Fleming, considerando que a corrente elétrica é representada pelo sentido convencional de circulação das cargas elétricas, isto é, no sentido inverso ao da circulação dos elétrons de fato. Note que se for aplicada a regra da mão direita da Figura 30, de maneira invertida, isto é, aplicando-a com a mão esquerda, por exemplo.

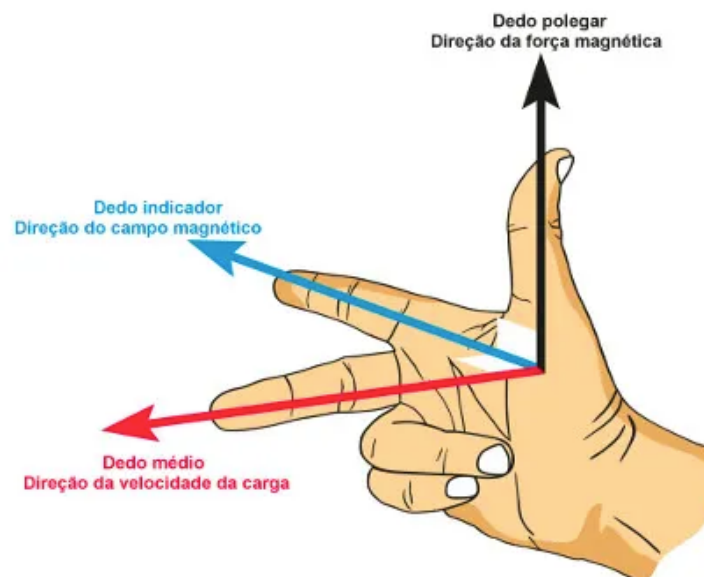


Figura 30 – Regra de Fleming para cargas negativas.

Fonte: <https://brasilecola.uol.com.br>. Acessado em 17/06/2021.

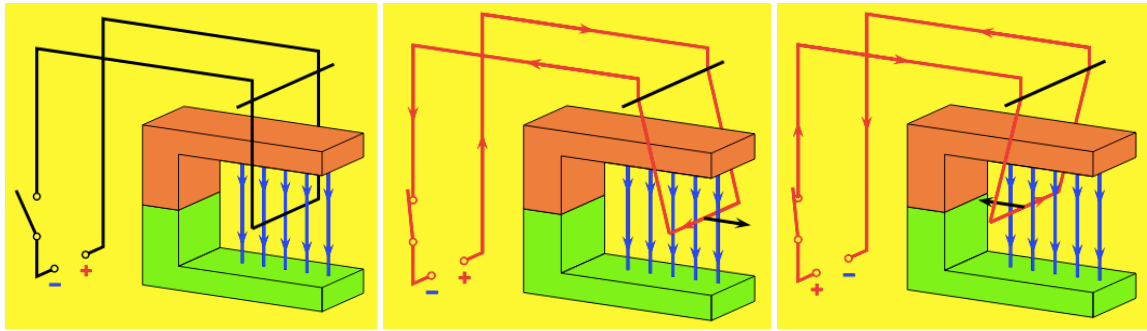


Figura 31 – Força sobre um condutor imerso em um campo magnético.

Fonte: <https://www.walter-fendt.de>. Acessado em 17/06/2021.

5.4 Princípio motor e o princípio gerador

A relação entre o campo magnético e as cargas elétricas (corrente elétrica) pode gerar uma força ou a partir da variação do campo se gerar uma corrente elétrica. Estes efeitos são utilizados para se construir motores e geradores.

Assim, o princípio motor determina que um conjunto de espiras imerso em um campo magnético estará sujeito a uma força, denominada de Força de Lorentz, em decorrência dos estudos e descobertas de Hendrik Antoon Lorentz, por volta do ano 1892.

A força resultante sobre uma espira ou conjunto de espiras pode ser observada na Figura 32, onde se nota que próximo ao polo norte do ímã permanente a força apontará para baixo, enquanto que nas proximidades do polo sul a força apontará para cima. Deste modo, observando a espira como um elemento único, com a devida rigidez mecânica, se terá um movimento da espira no sentido anti-horário, pois em um lado a força a empurra para baixo, enquanto do outro lado a força a empurra para cima. Assim, uma espira imersa em um campo magnético, ao ser submetida a circulação de corrente elétrica, irá girar, caracterizando o funcionamento do motor de corrente contínua, conforme mostrado na Figura 33.

Ao se observar a Figura 33 se nota que ao ocorrer alinhamento entre a espira e as linhas do campo magnético, se terá a força máxima, enquanto que, ao estarem perpendiculares entre si, a espira e o campo magnético, a força resultante será nula. Neste caso, como se utilizam comutadores e escovas para conexão da parte móvel (espiras e bobinas) com o circuito externo (parte fixa, fonte de alimentação), se configura o sistema para se ter a conexão mais efetiva durante os instantes em que se tem alinhamento entre o campo e a espira, para se ter força e torque máximo no rotor.

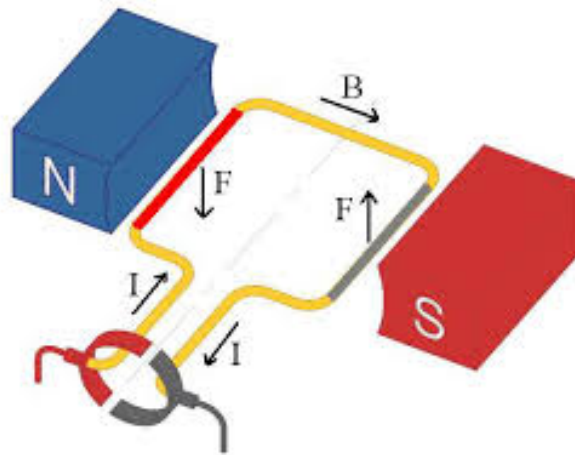


Figura 32 – Espira imersa em um campo magnética.

Fonte: <https://www.dt.fee.unicamp.br>. Acessado em 17/06/2021.

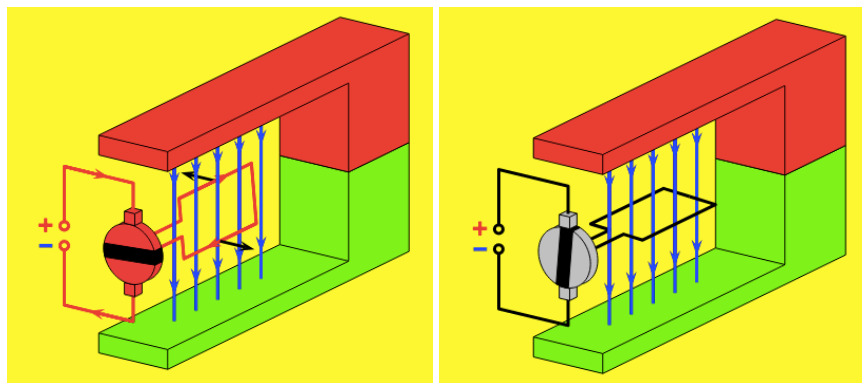


Figura 33 – Funcionamento do motor de corrente contínua.

Fonte: <https://www.walter-fendt.de>. Acessado em 17/06/2021.

O princípio gerador, por sua vez, determina que uma espira ou bobina, imersa em um campo magnético variante no tempo, estará sujeita a uma corrente induzida, constituindo um gerador eletromagnético, como mostrado nas Figura 34 e Figura 35.

O gerador mostrado nas Figura 34 e Figura 35 tem o campo magnético constante e fixo, mas a espira é movimentada, o que origina a variação de fluxo magnético na mesma, conforme sua posição relativa às linhas de campo magnético. Assim, ao se conectar os terminais da espira ao circuito externo e se medir a tensão induzida, se terá a geração de uma forma de onda senoidal, conforme se observa nas figuras.

As Figura 34 e Figura 35 mostram que ao se ter a espira em posição perpendicular às linhas de campo magnético, se terá tensão induzida nula, observada pela passagem por zero na forma de onda das figuras. Por outro lado, quando se tem o alinhamento entre a espira e as linhas de campo magnético, se tem indução máxima, caracterizada pelos valores máximos (picos) na amplitude da tensão gerada. Além disso, é importante observar pelas Figura 34 e Figura 35 que conforme a

posição da espira, visto não se estar utilizando comutadores e escovas, mas escovas e anéis de conexão fixos, se tem ora tensão positiva, ora tensão negativa, ou seja, ocorre a inversão da corrente induzida, conforme o alinhamento entre espira e campo magnético.

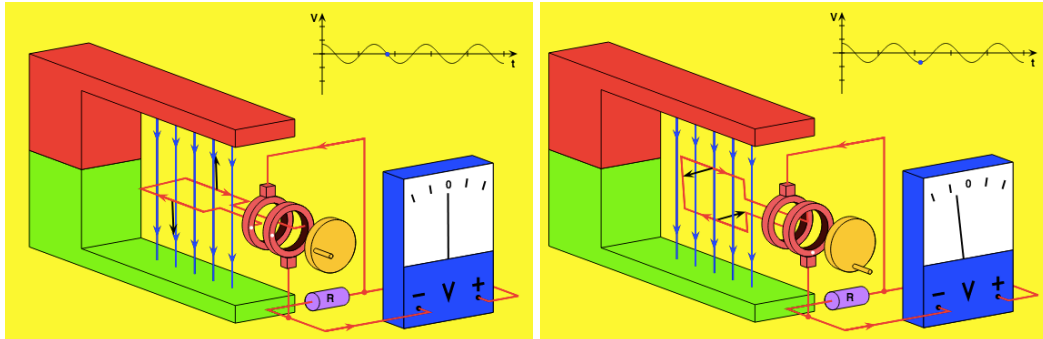


Figura 34 – Funcionamento do gerador de corrente alternada.

Fonte: <https://www.walter-fendt.de>. Acessado em 17/06/2021.

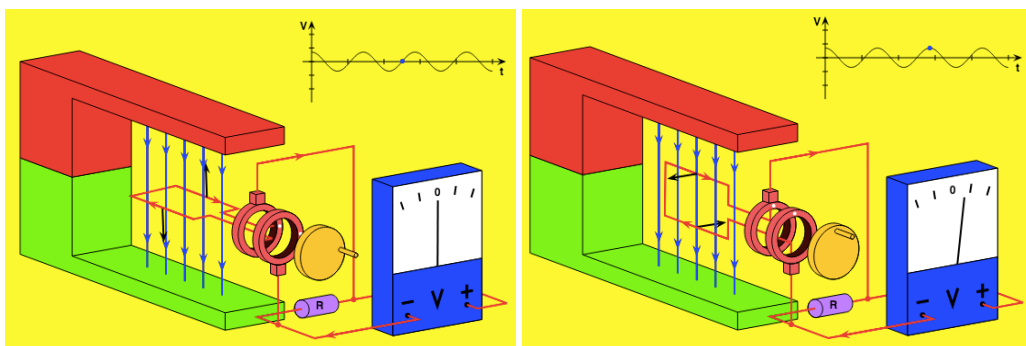


Figura 35 – Funcionamento do gerador de corrente alternada.

Fonte: <https://www.walter-fendt.de>. Acessado em 17/06/2021.

6 Características de Elementos Magnéticos

6.1 Introdução

Este tópico tem por objetivo apresentar alguns aspectos importantes de elementos magnéticos, como por exemplo os tipos de núcleos magnéticos e os efeitos que devem ser levados em conta em termos de escolha de condutores para os diferentes dispositivos eletromagnéticos.

6.2 Tipos de núcleos magnéticos

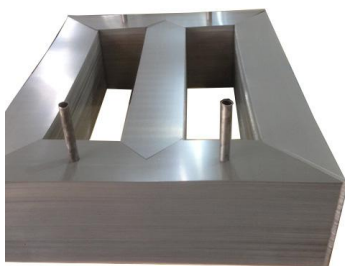
Os núcleos magnéticos mais utilizados na área eletroeletrônica são ferro-silício, ferrite e pós-metálicos. A Figura 36 mostra alguns exemplos dos diferentes materiais utilizados como núcleos magnéticos, onde se nota que o núcleo de ferrite é do tipo E, enquanto o núcleo de pós-metálicos é do tipo toroidal.

O material a ser utilizado em cada núcleo é escolhido em função da frequência de operação do elemento magnético e das perdas no mesmo, pois a medida que a frequência aumenta as perdas, em geral, devem aumentar também. Assim, em baixas frequências (da ordem de 60 Hz), se utilizam núcleos de ferro-silício, que possuem alta permeabilidade, mas tem maiores perdas em alta frequência inviabilizando seu uso em conversores cc-cc, por exemplo. Por outro lado, em baixas frequências não é vantajoso usar núcleos de ferrite, pois estes tem permeabilidade menor que os núcleos de ferro-silício. Já em altas frequências se utilizam os núcleos de ferrite e pós-metálicos, que tem permeabilidade menor que o ferro-silício, mas apresentam menores perdas em alta frequência.

Assim, os materiais magnéticos podem ser utilizados em baixas e altas frequências, no entanto, a escolha do material mais adequado levará a um projeto com menor peso e volume, implicando também em redução de custo e conseqüentemente um produto final mais competitivo.

Em resumo, os principais materiais empregados para construção de núcleos magnéticos e suas características são:

- Ferro: alta permeabilidade, ciclo histerético estreito e baixa resistividade;
- Ligas de ferro-silício: até 6,5% de silício, mas se torna quebradiço. Máquinas estáticas usam mais Si do que máquinas girantes;
- Imãs permanentes: devem ter elevado magnetismo residual, por isso usam materiais duros;
- Ferrites: sinterização de óxidos metálicos possuindo alta resistividade. Usados em altas frequências devido a alta resistividade;
- Ligas ferro-níquel: permalloy (78,5% de Ni) tem alta permeabilidade, baixas perdas por histerese e força magnetizante fraca. Deltamax – orthonic (48% de Ni) tem alta permeabilidade e laço de histerese retangular na direção da laminação.



núcleo de ferro-silício



núcleos de ferrite



núcleos de pós-metálicos

Figura 36 – Tipos de núcleos magnéticos.

Fonte: <http://www.tessin.com.br>; <http://www.thornton.com.br> e <http://www.magmattec.com>.

Acesso em: 22/09/2020.

6.3 Perdas nos dispositivos eletromagnéticos

As perdas em um elemento magnético, por exemplo um indutor ou transformador, serão no núcleo e no enrolamento, sendo conhecidas como perdas no núcleo e perdas no fio.

As perdas no núcleo se devem a energia necessária para orientar os domínios magnéticos durante as fases de magnetização e desmagnetização do material magnético e também devido as correntes parasitas, pois se o núcleo for de material condutor ou semicondutor, se terá correntes induzidas no mesmo e conseqüentemente circulação de corrente e efeito Joule, provocando também aquecimento no material magnético.

As espiras que constituem o enrolamento (bobinado) do dispositivo magnético (indutor, transformador, motor, relé, etc.) terão resistência ôhmica e dissiparão potência na forma de calor, devido ao efeito Joule que irá ocorrer em função da circulação das cargas elétricas nos condutores.

Assim, em síntese se tem que as perdas em um dispositivo magnético são:

- Perdas no enrolamento – perdas por efeito Joule nos condutores (espiras);
- Perdas no núcleo:
 - Perdas por histerese – perdas para a orientação dos domínios magnéticos;
 - Perdas por correntes parasitas – perdas por efeito Joule pela indução de correntes no próprio núcleo.

6.4 Efeitos nos condutores dos elementos magnéticos

A escolha dos condutores para a construção do elemento magnético não é apenas realizada em função da corrente que irá circular pelo mesmo, mas levando em conta também outros efeitos que podem ocorrer na presença de campos magnéticos e/ou altas frequências.

O campo magnético produzido nas espiras do elemento magnético origina o efeito de proximidade, que representa a força a qual as cargas elétricas ficam submetidas devido às espiras que estão próximas a esta. Em correntes da ordem de centenas de ampères o efeito de proximidade se torna significativo e deve ser levado em conta.

Por sua vez, o efeito pelicular (*skin*) faz com que a corrente se concentre na periferia do condutor quando se opera em frequências altas. Este efeito restringe a seção do condutor para frequências elevadas. O efeito pelicular restringe a área útil do condutor em relação à frequência de operação. Isso significa que se deve utilizar condutores com seção menor do que a profundidade de penetração da corrente, dada pela expressão a seguir, que especifica o raio máximo que o condutor deverá possuir para que a corrente ocupe toda a sua área útil.

7 Exercícios

Exercícios Resolvidos

ER 01. Cite dois exemplos de dispositivos eletromagnéticos.

Indutores e transformadores.

ER 02. Em geral se utilizam materiais magnéticos de alta permeabilidade para a construção de dispositivos eletromagnéticos. Qual a razão para isso?

Para que se tenha campos magnéticos mais intensos com menor número de espiras, menor peso e volume.

ER 03. Quais são as principais perdas em um elemento magnético?

As perdas no núcleo (histerese e correntes parasitas) e as perdas nos condutores.

ER 04. A Lei de Faraday determina que todo condutor imerso em um campo magnético que está variando fica sujeito a uma força eletromotriz. Cite elementos práticos onde se aplica a Lei de Faraday.

Indutores, transformadores e motores.

ER 05. Como é chamada a relação entre o número de espiras do primário e do secundário de um transformador?

Relação de transformação.

Exercícios Propostos

EP 01. Explique com suas palavras o que é campo magnético?

EP 02. Cite tipos de materiais utilizados para fabricação de núcleos magnéticos.

EP 03. Explique com suas palavras o que é relutância magnético?

EP 04. O que é o princípio motor?

EP 05. Qual unidade de medida de indutância?

8 Atividade Avaliativa

8.1 Introdução – O que preciso saber

Ao final deste objetivo de aprendizagem são apresentadas cinco questões, que devem ser respondidas sem consultar o material. Se você conseguir responder as questões e conferir as respostas com o gabarito abaixo, parabéns, você concluiu com êxito este tópico. Caso tenha errado alguma questão, revise o conteúdo relacionado com a mesma e refaça a questão, procurando se concentrar mais desta vez, para acertar o exercício e fixar bem o conteúdo.

AA 01. O que é campo magnético?

AA 02. Cite exemplos de dispositivos onde se utiliza a força eletromagnética.

AA 03. A tensão induzida sobre um elemento a partir da variação do fluxo magnético é expressa por qual Lei?

AA 04. O que são perdas de histerese?

AA 05. O que significa a saturação de um elemento magnético?

AA 01. Campo magnético é a região do espaço onde se tem a presença de linhas de campo e fenômenos magnéticos.
AA 02. Motores elétricos, geradores elétricos, relés, contadores, campainhas, etc.
AA 03. Lei de Faraday.
AA 04. As perdas por histerese representam a energia necessária para orientar e desorientar os domínios magnéticos do material.
AA 05. A saturação do material magnético ocorre quando todos os domínios estão orientados. Neste caso, ao se aumentar a corrente, a densidade de campo magnético não aumenta proporcionalmente.