

Universidade Estadual de Campinas
Instituto de Física “Gleb Wataghin”
F 609 – Tópicos de Ensino de Física I



Motor de Indução Trifásico

Relatório Final de Atividades

Segunda versão

21/11/2006

Aluno: Luiz Eduardo Ferreira Dias Jr.

RA: 016702

Professor Orientador: Dr. Peter Alexander Schulz

Professor Coordenador: Dr. José Joaquim Lunazzi

1 Introdução

O projeto visa mostrar uma utilização extremamente importante do conceito físico de indução eletromagnética. A indução eletromagnética foi descoberta pelo físico Michel Faraday e descreve o surgimento de uma tensão em um condutor que é atravessado por um campo magnético.

No caso do motor induzido, temos a utilização de bobinas que são percorridas por uma corrente elétrica alternada, que por sua vez geram um campo magnético dentro da mesma, sendo assim esta descrição a mesma de um eletroímã.

Desta forma um engenheiro croata de grande genialidade chamado Nicola Tesla(1856-1943) [5], teve a idéia de criar um campo magnético girante com três bobinas fixas, separadas de 120° e alimentadas por uma corrente alternada trifásica, e defasadas de 120° também. [3]

De tal forma que se no meio destas bobinas for colocado um rotor metálico, este se orientará de acordo com este campo girante. Daí a conectar um eixo neste rotor temos a conversão de energia elétrica em mecânica.

2 Fundamentos teóricos

2.1 – Indutor e Lei de Faraday

Todo dispositivo que produz um fluxo magnético a partir de uma corrente elétrica é chamado de indutor. Basicamente precisamos ter um núcleo de material ferromagnético (para aumentar a magnitude e densidade do fluxo) e uma bobina enrolada neste material. Quando a bobina é percorrida por uma corrente de intensidade i surge um fluxo em torno do núcleo que se expande por sua vizinhança.

Um indutor é linear se o fluxo magnético é diretamente proporcional à corrente, ou seja,

$$\Phi = L \times i \quad (1)$$

A constante de proporcionalidade L é chamada indutância, cuja unidade é em henry (símbolo H).

Para expressar a equação descritiva de um indutor linear em termos das variáveis tensão e corrente é necessário aplicar a Lei de Faraday. Esta lei pode ser enunciada da seguinte forma: [1] “Todo condutor atravessado pelas linhas de força de um campo magnético variável sofre a indução de uma tensão proporcional à variação do fluxo que o enlaça.”

O significado da Lei de Faraday pode ser compreendido com a ajuda da experiência ilustrada na Fig.1 abaixo:

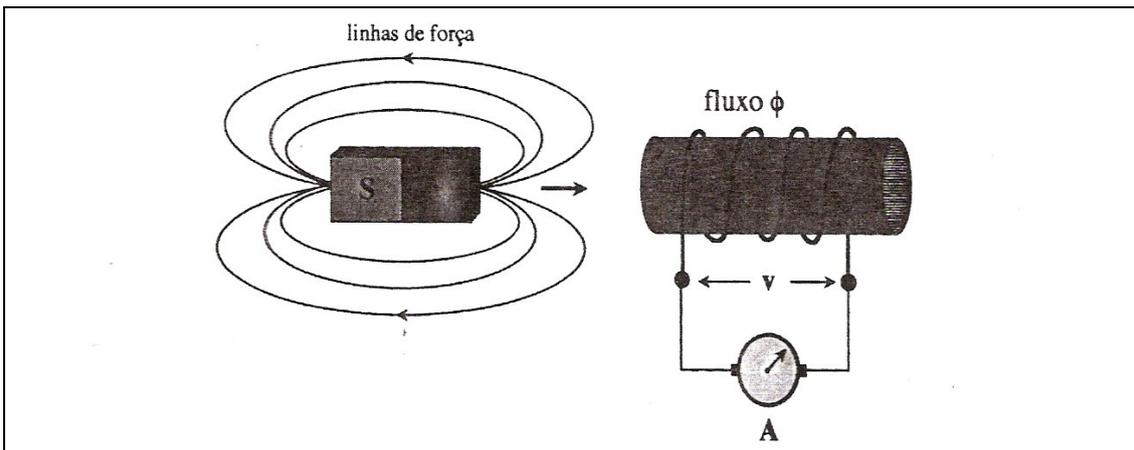


Figura 1: Experiência de Indução

Observe que, quando o ímã vai se aproximando da bobina, as linhas de força do campo magnético vão cortando cada vez mais as espiras condutoras (fluxo variável), gerando uma tensão nos terminais da bobina. Fechando-se o circuito com um amperímetro, este indicará uma corrente fluindo. O importante é a variação do fluxo que enlaça o condutor.

Utilizando-se o conceito de derivada, a Lei de Faraday, pode ser expressa da seguinte forma:

$$v = d\Phi/dt \quad (2)$$

Combinando-se com a equação (1) temos a equação descritiva de um indutor ideal.

$$v(t) = L di/dt \quad (3)$$

Sendo assim enunciada de forma completa o funcionamento da Lei de Faraday.

2.2 – Eletroímã e a Regra da mão direita

Como se sabe, um eletroímã é constituído de uma bobina enrolada em um núcleo de material ferromagnético. O primeiro princípio a ser mencionado é: [1] “Uma corrente elétrica circulando pela bobina de um eletroímã cria um fluxo magnético.”

Note que este fato será verdade se a corrente for contínua ou alternada, mas se a corrente for alternada senoidal, o sentido do fluxo magnético muda periodicamente, seguindo a mudança de sentido da corrente, fazendo a polaridade N-S do eletroímã também se inverter.

Lembrando que, por convenção, as linhas de força do fluxo magnético sempre vão do pólo Norte para o pólo Sul, no espaço externo do eletroímã. Para descobrir o sentido do fluxo magnético criado e, ao mesmo tempo, a polaridade magnética utiliza-se a regra da mão direita.

2.4 - Campo magnético girante

Este princípio do eletromagnetismo clássico é extremamente interessante e sua descoberta possibilitou o desenvolvimento dos modernos motores de corrente alternada, em particular os motores de indução. De modo sintético, seu enunciado é: [2] “Três correntes alternadas senoidais, com mesma amplitude e defasadas de 120° , circulando por três bobinas fixas, cujos eixos magnéticos distam 120° entre si, produzem um campo magnético girante de intensidade constante.”

A invenção desta engenhosa maneira de criar este campo se deve a um brilhante engenheiro croata, Nikola Tesla (1856-1943). A figura abaixo mostra como é o funcionamento do campo girante.

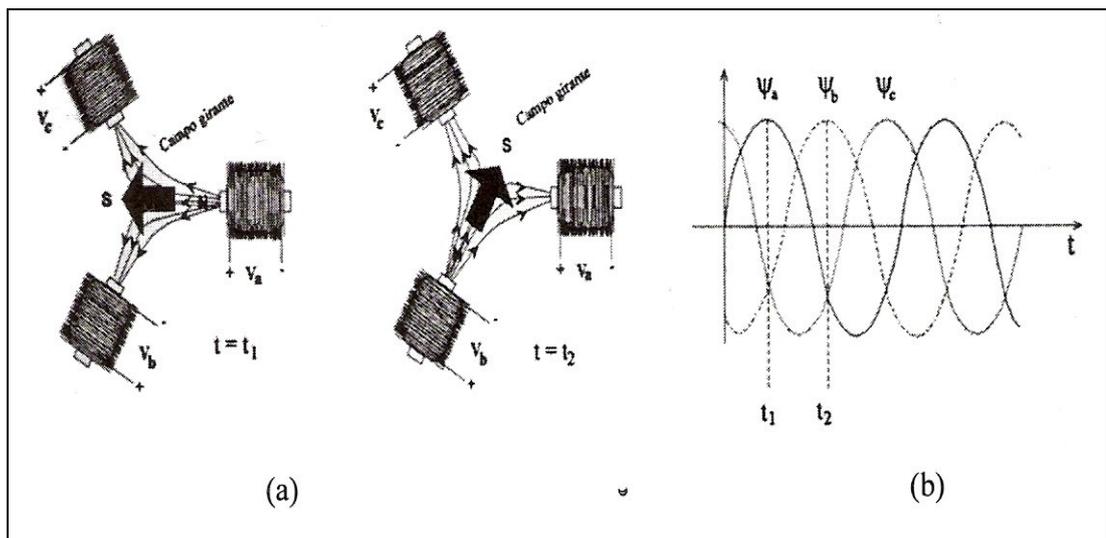


Figura 2: Campo magnético girante e tensões defasadas

Na figura observamos também a orientação do “campo resultante” e as funções de onda das tensões alternadas, todas defasadas de 120° . Vemos em dois instantes diferentes como a orientação resultante do campo muda e desta forma se percebe o movimento do mesmo.

2.5 – Motor de Indução: Princípios de funcionamento

Uma questão fundamental é entender como se produz um torque eletromecânico no rotor do motor de indução. A criação do torque no rotor baseia-se na lei de indução de Faraday e na lei de Lenz.

Segundo [4] quando temos uma variação do fluxo magnético com o tempo em uma bobina, surge uma tensão na mesma, e conseqüentemente surge uma corrente circulando por ela. Esta corrente tem o sentido de circulação definido pela Lei de Lenz (enunciada aqui de forma simplificada: “O fluxo criado pela corrente induzida deve se opor à variação de fluxo que a criou”). Deste modo surge polaridade na bobina opostas as do fluxo.

Em um motor de indução esse fluxo variável é feito pelo campo girante descrito no item acima. Esse fluxo atravessa o rotor tipo gaiola, que é mostrado na figura abaixo;

Note que a gaiola possui aros metálicos na tampa e na base, de tal modo a curto-circuitar as varetas e permitir a circulação de correntes por elas.

Esse fluxo girante ao ir atravessando as varetas do rotor gaiola vai induzindo aí correntes que, por sua vez, devem criar fluxos (como se fossem eletroímãs de polaridade oposta ao fluxo) que tendem a se opor ao movimento do fluxo girante (Lei de Lenz). Em consequência, o rotor gaiola gira no mesmo sentido do fluxo girante, tentando alcançá-lo para reduzir a intensidade da indução, que como se sabe é proporcional à variação do fluxo (lei de Faraday). Desta maneira, estabelece-se o torque que faz o rotor gaiola girar.

2.6 – Corrente alternada [3]

A utilização da corrente alternada possibilitou a expansão do uso da energia elétrica em todo o mundo. Já foi mostrado que a energia elétrica é um excelente meio de transporte de energia à distância; todo meio de transporte para ser eficiente deve ter a menor perda possível.

A maior parte da perda no transporte de energia elétrica é devido ao efeito Joule, que aquece os fios. Esta dissipação de energia pode ser minimizada com a utilização de correntes pequenas e altas tensões (lembrando que potência é o produto de tensão pela corrente).

O uso da corrente alternada senoidal permite elevar facilmente os níveis de tensão (através de transformadores) para o transporte, e permite abaixar os níveis de tensão nos locais de consumo, tarefa esta que é impossível em corrente contínua.

A tensão alternada é apresentada da seguinte forma:

$$F(t) = A \text{ sen } (\omega t + \Phi) \quad (4)$$

Onde:

A = amplitude;

ω = velocidade angular;

f = frequência;

Φ = fase da função.

A tensão alternada é gerada por alternadores, no caso do nosso projeto utilizamos correntes alternadas trifásicas, que são geradas por um alternador trifásico.

Neste tipo de alternador temos três bobinas no estator, que são iguais, independentes e distribuídas ao longo da periferia da armadura de tal modo que seus eixos magnéticos formem ângulos de 120° entre si. Por esse motivo as tensões geradas neste tipo de alternador são defasadas de 120°. A Fig. 2 exemplifica a tensão senoidal trifásica.

3 Montagem experimental

3.1 – Materiais utilizados

Para a realização do experimento utilizamos os seguintes materiais listados abaixo. Em cada um teremos uma pequena descrição do mesmo e de que modo este foi obtido ou construído.

3.1.1 – Bobinas

Utilizamos três bobinas idênticas de 1200 espiras com núcleo reto. Suas especificações são:

- Resistência: 11-12 Ohms
- Impedância: 37 mH
- Corrente: 1A

Estas bobinas foram solicitadas no Laboratório de Eletro técnica da FEEC – Unicamp. O desenho das bobinas será mostrado mais adiante já com o esquema final montado para economizarmos espaço no relatório.

3.1.2 – Autotransformador Trifásico Variável (0-220V)

O autotransformador serve para termos controle sobre a tensão alternada. Este dispositivo permite a ligação em [3] Y ou Δ das bobinas, age como um variac, só que para tensão trifásica. Solicitamos este equipamento à FEEC por não encontrarmos este tipo de fonte no IFGW. Abaixo temos uma foto do variac trifásico.



Foto 1 : Fonte trifásica de C.A.

3.1.3 – Bússola

Sem grandes complicações obtivemos uma bússola em uma loja de equipamento de pesca e camping. A bússola foi utilizada para mostrar a orientação do campo girante, de modo a tornar o experimento mais didático.

3.1.4 – Suporte para as bobinas e rotor

O suporte para fixarmos as bobinas é feito de madeira e seu corte forma um triângulo, de modo que as bobinas fiquem separadas de 120° . As bobinas são postas sobre os vértices deste suporte de acordo com a Fig. 4. Fizemos um furo no meio do suporte, de modo que o eixo que instalamos para o rotor girar fique no ponto de encontro dos eixos magnéticos das bobinas. O eixo é cilíndrico tem a forma de uma vareta metálica e tem 12 a 15 cm de altura com um diâmetro de 0,5 cm..O eixo pode ser retirado e recolocado de forma conveniente para liberar espaço no meio do suporte.

3.1.5 – Fios

Utilizamos fios de cobre encapados para ligar as bobinas com o autotransformador, além de ligarmos as bobinas entre si, como mostra a Fig. 4.

3.1.6 – Rotor tipo gaiola

O rotor é feito de alumínio, tendo dimensões de 8 a 12 cm de altura e 4 a 6 cm de diâmetro. A figura abaixo mostra de forma esquemática o rotor, juntamente com uma foto do mesmo para ilustração.

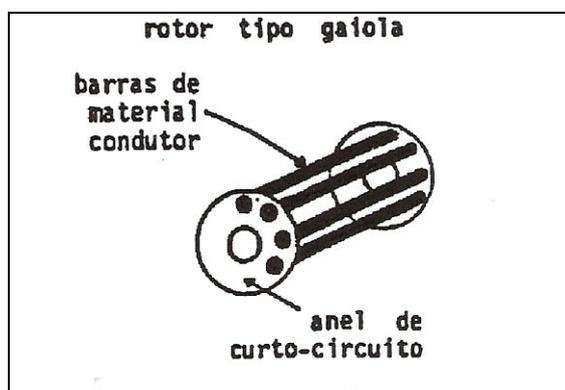


Figura 3: Rotor que será utilizado



Foto 2: Rotor tipo gaiola

3.2 – Desenho esquemático da montagem

A figura abaixo mostra o esquema de montagem que foi realizado. Esta mostra a disposição das bobinas e a ligação entre elas, além de mostrar o ponto de encontro dos eixos magnéticos. Neste ponto foi instalado o eixo metálico para o rotor.

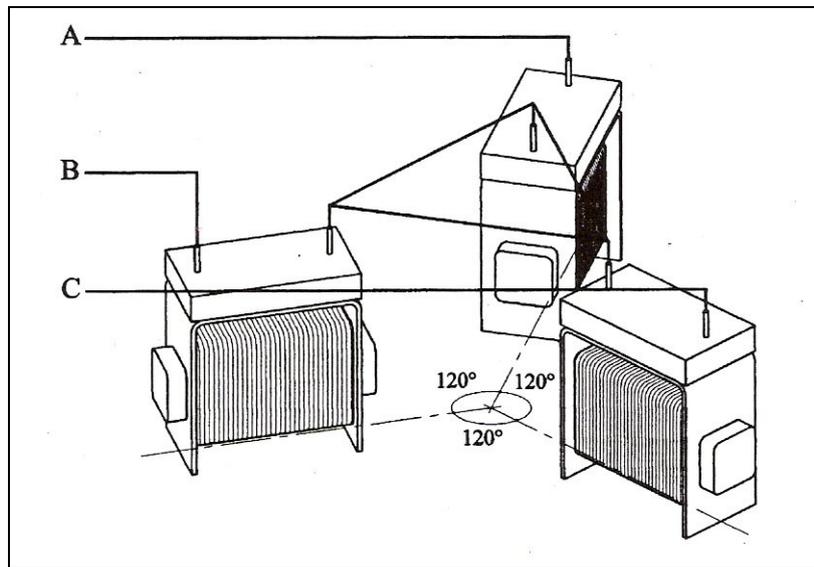


Figura 4: Montagem das bobinas

3.3 Montagem em laboratório

A montagem do experimento no laboratório seguiu de acordo com o planejado. A tensão que foi utilizada nas bobinas foi da ordem de 10 a 12 volts. Chegamos neste valor pois a corrente máxima das bobinas é de 1 A, e sua resistência é da ordem de 10 ohms.

As fotos abaixo mostram a montagem feita. Na foto 3 observamos o suporte, as bobinas colocadas sobre o mesmo e o eixo no meio do mesmo. A ligação entre as bobinas foi feita em Δ , como mostra a Fig. 4.

Na foto 4 temos a mesma montagem só que com o rotor tipo gaiola colocado no eixo para sofrer o efeito de indução do campo magnético girante. Tentamos bater uma foto com o rotor em movimento, mas a imagem do rotor ficou borrada e concluíamos que a foto do rotor parado já é suficiente para ilustrar a montagem.

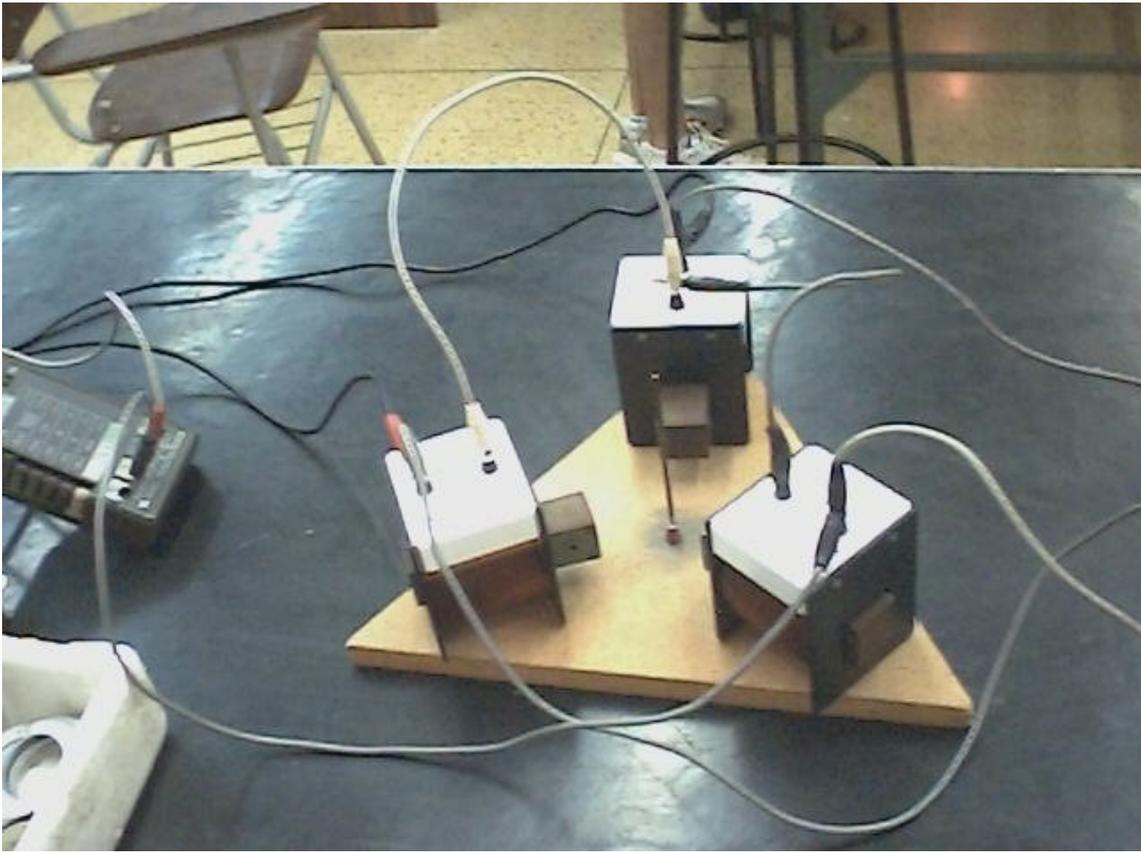


Foto 3 : Montagem em laboratório sem o rotor

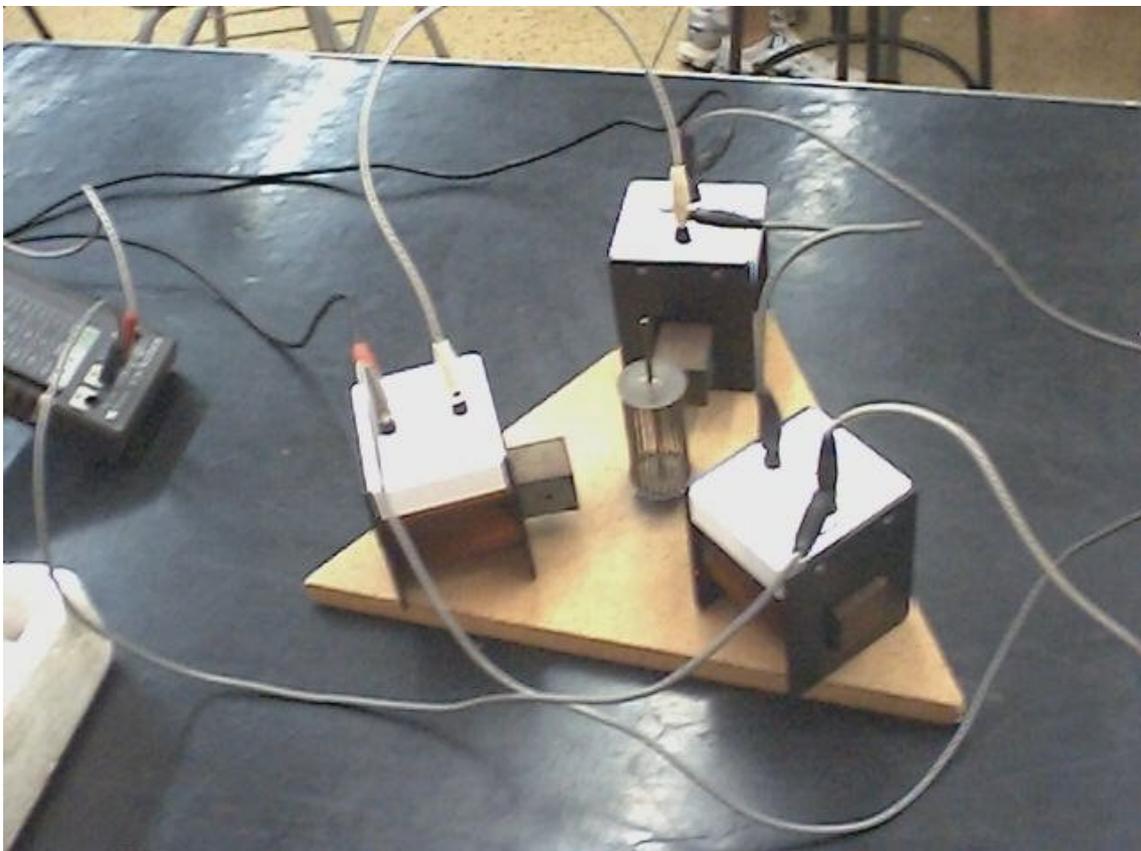


Foto 4 : Montagem com o rotor

Após toda a montagem estar pronta ligamos a fonte de modo a aumentar a tensão gradativamente. Observamos então o início do movimento do rotor. Quando estabilizamos a tensão o rotor ficou girando em velocidade constante síncrona, como era o esperado.

A bússola foi utilizada antes apenas para ver a orientação do campo magnético, como a orientação estava correta colocamos o rotor no eixo para verificar o fenômeno da indução, que é o objetivo principal do projeto.

4 Conclusão

Concluimos sem grandes problemas o projeto, talvez o maior delas tenha sido encontrar a fonte variável trifásica c.a.

Acreditamos que a demonstração tem uma grande importância para que os alunos entendam melhor o fenômeno da indução, além de mostrar a genialidade de Tesla. Bem como exemplifica o funcionamento de muitos motores elétricos atuais, a noção de tensão alternada e a conversão de energia.

Sendo assim concluimos que o projeto foi bem sucedido.

5 Agradecimentos

Agradecemos a colaboração do Prof. Dr. Carlos Alberto Murari, da FEEC, por ter cedido o material e ajudado para um melhor entendimento do fenômeno. Sem esta ajuda com certeza o projeto seria inviável.

Agradecemos também o pessoal de manutenção eletro técnica do IFGW, em especial o Sr. João Vitor, pela atenção e pela ligação trifásica necessária.

E por fim, agradecemos ao coordenador Prof. Dr. José Joaquim Lunazzi por ser atencioso nos atendimentos e ceder materiais necessários para o registro de atividades.

6 Referências

[1] Halliday, D., Resnick, R. e Walker, J. – Fundamentos da Física – Vol. 3 – LTC Ed. SA – 4ªed. – 1996

[2] A.E. Fitzgerald, C. Kingsley Jr., e A. Kusko - Máquinas Elétricas – McGraw-Hill do Brasil Ltda.

[3] http://pt.wikipedia.org/wiki/Sistema_trif%C3%A1sico

[4] http://pt.wikipedia.org/wiki/Motor_de_indu%C3%A7%C3%A3o

[5] http://pt.wikipedia.org/wiki/Nikola_Tesla

7 Comentários do Coordenador

Abaixo segue os comentários feitos pelo coordenador da disciplina, desde o projeto até o relatório parcial:

Projeto aprovado. Bom trabalho!A corrigir no RP: Detalhar como faz as peças. Não mostra atividade experimental no RP. Conversou comigo e sei que está tentando, nota 4.

8 Anexos

Abaixo segue os textos retirados da Internet, de acordo com os links citados nas referências:

[3] Sistemas polifásicos de transmissão de energia elétrica

[[editar](#)] Introdução

O sistema responsável pelo transporte de energia elétrica das unidades geradoras para as unidades consumidoras é composta basicamente por três subsistemas:

Sistema de geração de energia

composta pelos elementos responsáveis pela conversão da energia de alguma fonte primária em energia elétrica e quaisquer outros componentes das unidades de geração.

Sistema de transmissão

composta pelos elementos responsáveis pelo transporte da energia obtida dos vários sistemas de geração para o(s) sistema(s) de distribuição interligados pelo sistema de transmissão.

Sistemas de distribuição

composta pelos elementos responsáveis pela adequação da energia para o uso de consumidores de grande, médio e pequeno porte.

A transmissão de energia elétrica é feita por meio de um sistema de [transformadores](#) e [condutores](#) elétricos também chamados de linhas de transmissão os quais transmitem a energia elétrica gerada nas unidades geradoras para as unidades consumidoras ou cargas.

O sistema de transmissão permite que a [tensão](#) elétrica proveniente dos terminais dos [geradores](#) localizados nas unidades de geração alcance a alimentação das unidades de consumo atendidas pelo sistema.

Nos primórdios da implementação do sistema de transmissão de energia de longa distância, graças ao avanço tecnológico principalmente devido ao trabalho de [Nikola Tesla](#) foi utilizado o sistema [alternado](#) para as tensões e correntes, de forma a permitir o transporte de energia a longas distâncias sem perdas significativas a ponto de inviabilizar o processo.

Para a geração de tensões e correntes alternadas, utiliza-se [geradores síncronos](#) ou de [indução](#) que em teoria poderiam fornecer qualquer número de sinais de tensões e correntes alternadas igualmente defasadas entre si dependendo da construção dos [geradores](#).

Por questões de praticidade, econômicas (economia de material) e técnicas (qualidade da energia fornecida), optou-se por utilizar o sistema trifásico.

[[editar](#)] Sistema trifásico

[editar] Definição

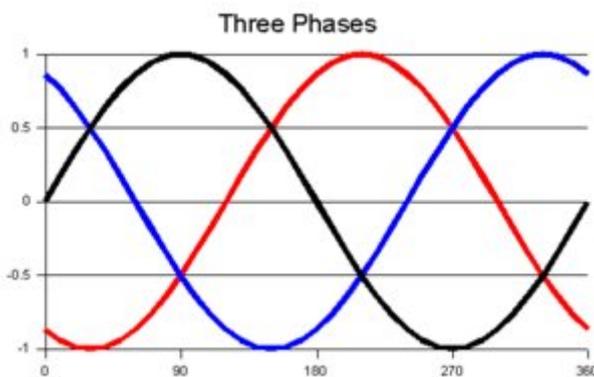
Os sistemas trifásicos de [energia elétrica](#) são compostos de 3 [tensões alternadas](#), no qual a [energia elétrica](#) é transmitida por meio da composição dos três sinais de tensão

$\frac{2\pi}{3}$
defasados de $\frac{2\pi}{3}$ radianos (120°, 1/3 de um ciclo) defasados entre si.

A cada sinal de tensão [alternada](#) utilizado no sistema atribui-se o nome de fase, e portanto no sistema com 3 sinais temos um sistema **trifásico**

Originalmente o sistema é projetado para fornecer sinais de tensão [senoidais](#) no tempo, mas como aumento das cargas eletrônicas (não [lineares](#)) a forma de onda do sinal de tensão sofre deformações o que causa o surgimento de [harmônicos](#) no sinal de tensão.

[editar] Configuração variável e definições básicas



Uma ciclo da tensão de um sistema trifásico, nomeado de 0 a 360° (2π radianos) sobre o eixo do tempo. As três linhas coloridas representam a variação da tensão ou corrente instantânea em seu respectivo tempo. Este ciclo repete-se 50 ou 60 vezes por segundo, dependendo da frequência da fonte de alimentação. As cores das linhas representam o código de cores padrões americanas para elementos trifásicos e cada linha ou fase, está "defasada" em 120°, ou seja, estão atrasadas ou adiantadas 120° em relação uma da outra. O preto= V_{L1} vermelho= V_{L2} azul= V_{L3}

Ao se trabalhar com sistemas trifásicos, é comum se definir algumas variáveis relacionadas a tensão e a corrente, para facilitar e o cálculo da [potência](#) elétrica transmitida. Considerando um sistema trifásico com uma distribuição [simétrica](#) de cargas nas 3 fases^[1] e supondo que as formas de onda da tensão são [senoidais](#) temos:

Definindo

$$x = 2\pi ft$$

onde t é o [tempo](#) e f é a [frequência](#).

Utilizando x, as formas de onda para sistemas trifásicos são:

$$V_a = \sqrt{2}v \sin x,$$

$$V_b = \sqrt{2}v \sin \left(x - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$V_c = \sqrt{2}v \sin \left(x - \frac{4\pi}{3} \right)$$

onde V é valor eficaz dos sinais de tensão.

Quando se mede as tensões que estão aplicadas diretamente sobre as cargas temos o sinal de '**tensão de fase**'. V_a , V_b e V_c são as tensões de fase.

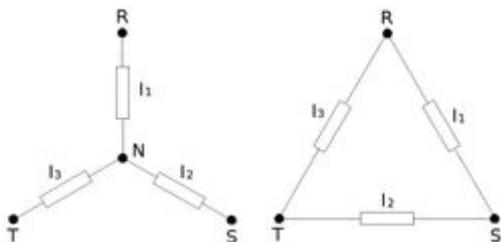
Quando se mede a diferença entre os sinais de duas '**tensões de fase**' temos a '**tensão de linha**'.

Da mesma forma podemos associar as definições aos sinais de corrente, a corrente que circula por uma das cargas conectadas ao sistema é a '**corrente de fase**' enquanto que a corrente que circula por uma das fases é a '**corrente de linha**'.

[editar] Estrela e Triângulo

As cargas trifásicas podem ser interligadas ao sistema de dois modos distintos:

- em **estrela**: um dos terminais das cargas é conectado a uma das fases do sistema enquanto o outro terminal é conectado a um ponto comum que é o neutro utilizado para se medir as tensões de fase.
- em **triângulo**, também chamado de **delta**: nesta configuração um dos terminais das cargas é conectado a um outro terminal de outra carga e as fases do sistema são interligadas nos pontos de junção dos terminais da carga.



Estrela (símbolo: Y) Triângulo ou delta (símbolo: Δ)

[4] Motor de indução

Motores de Indução Trifásicos (MIT) Um motor de indução é composto basicamente de duas partes: Estator e Rotor. O espaço entre o estator e o rotor é denominado entreferro. O estator constitui a parte estática e o rotor a parte móvel. O estator é composto de chapas finas de aço magnético tratadas termicamente para reduzir ao mínimo as perdas por correntes parasitas e histerese. Estas chapas têm o formato de um

anel com ranhuras internas (vista frontal) de tal maneira que possam ser alojados enrolamentos, os quais por sua vez, quando em operação, deverão criar um campo magnético no estator. O rotor também é composto de chapas finas de aço magnético tratadas termicamente, com o formato também de anel (vista frontal) e com os enrolamentos alojados longitudinalmente. O motor de indução é o motor de construção mais simples. Estator e rotor são montados solidários, com um eixo comum aos “anéis” que os compõem. A aplicação de tensão nos enrolamentos do estator irá fazer com que apareça uma tensão nos enrolamentos do rotor. Assim, o estator pode ser considerado como o primário de um transformador e o rotor como seu secundário. Este tipo de motor quando acionado por uma turbina e operando com uma rotação acima da síncrona pode gerar potencia ativa e entrega-la ao sistema onde está conectado.

[5] Nikola Tesla (Nicolas Tesla)

([Smiljan](#), [Croácia](#), [9 de julho](#) de [1856](#) — [Nova Iorque](#), [7 de Janeiro](#) de [1943](#)) foi um [engenheiro eletricista](#), [físico](#) e [inventor sérvio-americano](#).

Foi o inventor da [bobina de Tesla](#). Foi responsável, também, pela invenção dos circuitos trifásicos, utilizados na distribuição de energia elétrica. A unidade de medida de densidade de fluxo magnético do sistema MKS foi denominada Tesla, em 1956, em sua homenagem.

[[editar](#)] Biografia

Tesla nasceu por volta da meia noite, entre 9 e 10 de julho de 1856, na vila de [Smiljan](#) perto de [Gospić](#), [Áustria-Hungria](#), hoje [Croácia](#). O seu [nome de baptismo](#) foi Николай (Nikola). O seu nome completo é Никола Тесла.

O seu pai, o reverendo [Milutin Tesla](#), foi um [padre](#). A sua [mãe Đuka Mandić](#), fazia [ferramentas](#) especiais, como inventora. Nikola Tesla foi um dos cinco filhos do casal, teve um irmão e três irmãs. Diz-se que Nikola Tesla possuía memória fotográfica e foi um excepcional estudante, que após perder uma bolsa de estudos após um ano, retomou os estudos de forma autodidata frequentando bibliotecas.

Tesla estudou em [Karlovac](#) (nesse tempo [Áustria-Hungria](#), hoje [Croácia](#)), e depois estudou engenharia elétrica na Escola Politécnica em [Graz](#), [Áustria](#) ([1875](#)). Enquanto esteve aí, estudou também o uso de [corrente alternada](#), Matemática e Física, graduando-se posteriormente na Universidade de [Praga](#).

Trabalhou como engenheiro eletricista na companhia telefônica de [Budapeste](#), [Hungria](#), onde iniciou estudos sobre aplicações da correntes elétricas e motores elétricos, em ([1882](#)).

Após de uma temporada morando em Paris, Tesla mudou-se para os Estados Unidos da América em [1884](#), estabelecendo-se em Nova Iorque e tornando-se um Assistente do famoso cientista da época [Thomas Alva Edison](#). Após um sério desentendimento com este por não haver recebido pagamento por algumas de suas aplicações, aprimoramentos e descobertas ([1886](#)), Tesla perde o emprego e passa por um período difícil, realizando

trabalho braçal. Em [1887](#), consegue realizar um contrato com um grande investidor e vende sua patente da corrente alternada para George [Westinghouse](#), que convence o Governo Americano a adotar o modelo-padrão de corrente alternada como meio mais eficiente para a distribuição de energia elétrica, contrariando interesses de seu antigo empregador Thomas Edison.