



UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

APOSTILA DE LABORATÓRIO

Conversão Eletromecânica de Energia I

Cleiton Magalhães Freitas
David Martins Vieira
Otto Wanner Ganvini Asencios

Conteúdo

I	Conceitos Importantes	1
I	Introdução	2
I.1	Elaboração do Preparatório	2
I.2	Elaboração do Relatório	2
I.3	Provas de Laboratório	2
I.4	Referências Bibliográficas	2
II	Guia de Utilização da Máquina Motriz Utilizada nos Ensaios de Geradores	3
II.1	Descrição dos Componentes Utilizados Para o Acionamento da Máquina Motriz	4
II.1.1	Painel de Força	4
II.1.2	Máquina de Indução de Rotor Bobinado	4
II.1.3	Painel de Acionamento da Máquina de Indução de Rotor Bobinado	4
II.2	Montagem da Máquina Motriz	5
II	Experiências de CEME I e CEME III	7
0	Reconhecimento do Laboratório de Conversão Eletromecânica de Energia	8
0.1	Introdução	8
0.2	objetivo	8
0.3	Preparatório	8
0.4	Roteiro da Experiência 0	9
0.4.1	Materiais e equipamentos	9
0.4.2	Execução	9
0.5	Relatório	9
1	Geração de Campo Magnético	10
1.1	Introdução	10
1.2	objetivo	10
1.3	Preparatório	10
1.4	Roteiro da Experiência 1	11
1.4.1	Materiais e equipamentos	11
1.4.2	Execução	11
1.5	Relatório	11

2	Verificação da Relutância de circuito magnético	12
2.1	Preparatório	13
2.2	Roteiro da Experiência 2	14
2.2.1	Materiais e equipamentos	14
2.2.2	Execução	14
2.3	Relatório	14
3	Indutâncias variáveis com posição mecânica	15
3.1	Conceitos básicos	15
3.2	Metodologia para o levantamento experimental das indutâncias da máquina	16
3.2.1	Cálculo da indutância mútua entre duas bobinas	17
3.2.2	Limitações da utilização da metodologia na determinação de indutâncias mútuas	17
3.2.3	Cálculo da indutância própria de uma bobina	18
3.3	Painel de conexão da máquina utilizada no ensaio	18
3.4	Preparatório	19
3.5	Roteiro da Experiência 3	20
3.5.1	Materiais e equipamentos	20
3.5.2	Execução	20
3.6	Relatório	21
4	Verificação da Saturação Magnética	22
4.1	Preparatório	22
4.2	Roteiro da Experiência 4	24
4.2.1	Materiais e equipamentos	24
4.2.2	Execução	24
4.3	Relatório	24
5	Transformadores: Conceitos Básicos	25
5.1	Preparatório	25
5.2	Roteiro da Experiência 5	27
5.2.1	Materiais e equipamentos	27
5.2.2	Execução	27
5.3	Relatório	28
6	Transformadores: Determinação da Polaridade e dos Parâmetros do Circuito Equivalente	29
6.1	Polaridade de Transformadores	29
6.2	Wattímetro	30
6.3	Determinação dos Parâmetros do Circuito Equivalente	31
6.4	Preparatório	32
6.5	Roteiro da Experiência 6	34
6.5.1	Materiais e equipamentos	34
6.5.2	Execução	34
6.6	Relatório	35
7	Transformadores: Eficiência e Regulação de Tensão	36
7.1	Preparatório	36
7.2	Roteiro da Experiência 7	37
7.2.1	Materiais e equipamentos	37
7.2.2	Execução	37
7.3	Relatório	37

8 Autotransformadores	38
8.1 Preparatório	38
8.2 Roteiro da Experiência 8	39
8.2.1 Materiais e equipamentos	39
8.2.2 Execução	39
Bibliografia	40

Parte I

Conceitos Importantes

Introdução

Esta apostila tem como objetivo servir de guia para realização das aulas de laboratório de conversão eletromecânica de energia I e III. Ela contém a descrição de alguns equipamentos do laboratório e um conjunto de roteiros para as experiências realizadas. É de suma importância a leitura prévia de cada um dos roteiros para as aulas ocorram de forma dinâmica, sem perda de tempo. As seções a seguir explicam alguns tópicos importantes.

I.1 Elaboração do Preparatório

No início de cada aula cada um dos alunos deverá entregar de forma individual o preparatório exigido para a experiência a ser realizada. A não entrega do preparatório **antes do início** da experiência acarretará grau zero a nota de laboratório desta experiência.

I.2 Elaboração do Relatório

Para cada uma das experiências deverá haver um relatório entregue até sete dias após a aula via e-mail. Diferentemente dos preparatórios, os relatórios deverão ser feitos em grupo seguindo o padrão estabelecido no manual de escrita dos relatórios de CEME ([FREITAS, 2019b](#)).

I.3 Provas de Laboratório

Ao final do semestre todos os alunos farão duas provas, uma teórica e outra prática. Na parte teórica haverá questões sobre os equipamentos utilizados, as experiências e procedimentos realizados, bem como os conhecimentos teóricos que explicam os resultados obtidos. Na parte prática os alunos deverão montar alguns dos circuitos estudados ao longo do semestre dentro de um tempo que poderá variar de 5 a 10 minutos, dependendo da complexidade do circuito.

I.4 Referências Bibliográficas

Recomenda-se a utilização dos livros-texto ([UMANS, 2014](#)) e ([CHAPMAN, 2013](#)) como referências para os conceitos teóricos das experiências, além do livro ([HAYT; BUCK, 2013](#)) como literatura complementar.

Guia de Utilização da Máquina Motriz Utilizada nos Ensaios de Geradores

Basicamente, a máquina motriz é responsável por girar o eixo de um gerador, possibilitando que este converta a energia mecânica em elétrica. Em aplicações práticas, as máquinas motrizes são turbinas hidráulicas, turbinas a vapor, turbinas a gás, turbinas eólicas ou mesmo motores a combustão de gasolina, diesel, etc. No nosso caso, a máquina motriz dos geradores de corrente contínua será um motor elétrico de indução com rotor bobinado, operando como uma máquina síncrona. O motor síncrono é uma máquina elétrica CA trifásica, cuja velocidade de rotação mecânica é função da frequência das tensões aplicadas às bobinas do estator. De uma forma geral, teremos a seguinte regra:

$$N_m = \frac{120f_e}{p} \quad (\text{II.1})$$

onde N_m é a velocidade mecânica da máquina em RPM, f_e é a frequência elétrica das tensões e p é o número de polos da máquina. Por hora não é necessário entender cada detalhe da operação desta máquina - isto será estudado em CEME II - mas é bom ter um conhecimento geral para saber qual a velocidade que a máquina desenvolverá.

A máquina síncrona é uma máquina trifásica, ou seja, possui três enrolamentos na parte estática da máquina e devemos alimentar estes enrolamentos com tensões CA trifásicas. Como explicado pela equação anterior, a frequência destas tensões influenciará a velocidade desenvolvida. O sentido de rotação da máquina, por outro lado, é definido pela sequência de fases das tensões aplicadas nas bobinas da parte estática. Sendo assim, uma ligação com sequência RST (ou ABC) fará a máquina girar em sentido contrário ao obtido com uma ligação RTS (ou ACB). A máquina síncrona também possui um enrolamento no rotor. Este enrolamento é conhecido como enrolamento de campo da máquina e deve ser alimentado com corrente contínua. Por motivos que serão estudados em cursos futuros, o motor síncrono não tem capacidade de partida autônoma. Contudo, podemos transformar a máquina síncrona em uma máquina assíncrona, simplesmente desconectando a fonte CC e curto-circuitando o circuito de campo, para permitir a partida da máquina. Neste caso, quando a máquina atingir o regime permanente, devemos retirar o curto-circuito e inserir a fonte CC no circuito de campo. A Figura II.1 apresenta a máquina utilizada como máquina síncrona no laboratório de CEME.

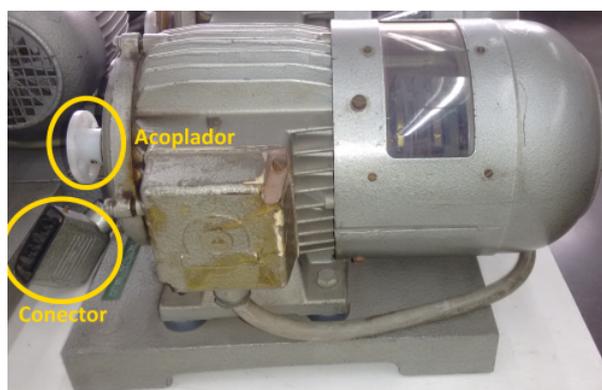


Figura II.1: Máquina de indução e rotor bobinado utilizada como máquina motriz síncrona nas aulas de laboratório de CEME I

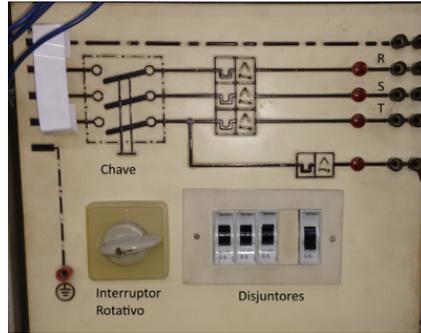


Figura II.2: Painel de Força utilizado para alimentação da máquina síncrona nas aulas de CEME I

II.1 Descrição dos Componentes Utilizados Para o Acionamento da Máquina Motriz

Nesta seção serão apresentados os componentes principais utilizados na ligação da máquina de indução de rotor bobinado como máquina síncrona para fornecer força motriz aos geradores ensaiados.

II.1.1 Painel de Força

Este painel está conectado a alimentação da bancada e fornece acesso às tensões trifásicas de 220V¹. Como pode ser observado na Figura II.2, ele é composto por um conjunto de bornes, disjuntores, uma chave e um interruptor. Os bornes são utilizados para conectar as fases, R, S e T, da rede as bobinas do estator da máquina motriz. A chave presente no painel é comandada pelo interruptor rotativo e tem a função de conectar/desconectar os bornes, R, S e T, a rede. Quando o interruptor se encontra na posição 0 a chave permanece aberta, enquanto que interruptor na posição 1 significa chave fechada.

II.1.2 Máquina de Indução de Rotor Bobinado

Esta máquina possui dois conjuntos trifásicos de enrolamentos, um deles é localizado no estator (parte estática da máquina) e o outro no rotor (parte móvel da máquina). A imagem da máquina é mostrada na Figura II.1 e seu diagrama pode ser representado de acordo com a Figura II.3. Como pode ser observado, a máquina possui um acoplador mecânico e um conector elétrico. O acoplador permite o acoplamento desta com outras máquinas, enquanto de conector é utilizado para ligar os circuitos internos ao seu painel de acionamento.

As bobinas do rotor estão ligadas em estrela, por isso temos acesso apenas aos terminais indicados pelas letras U, V e W. Por outro lado, ambos os terminais de todas as bobinas do estator são disponibilizados no painel. Cabe lembrar que o diagrama apresentado na figura está de acordo com o diagrama apresentado no painel de acionamento da máquina (mostrado a seguir). Observe a figura cuidadosamente e percebe que as bobinas do estator deverão ser conectadas a fonte de alimentação (através do painel de força) em Y ou em Δ .

II.1.3 Painel de Acionamento da Máquina de Indução de Rotor Bobinado

A máquina apresentada anteriormente é acionada através do painel mostrado na Figura II.4. Com pode ser visto, o painel apresenta um conector de conexão com a máquina, bornes para acesso aos terminais das bobinas do estator e do rotor, uma chave seletora e um par de bornes para alimentação CC. Nas nossas práticas, as bobinas do estator sempre estarão ligadas em delta, ou seja, teremos os seguintes pares de terminais conectados: U-Z, V-X e W-Y. A alimentação trifásica, vinda do painel de força, deverá ser inserida

¹Lembre que esta tensão é entre linhas, ou seja, a tensão monofásica é de 127V

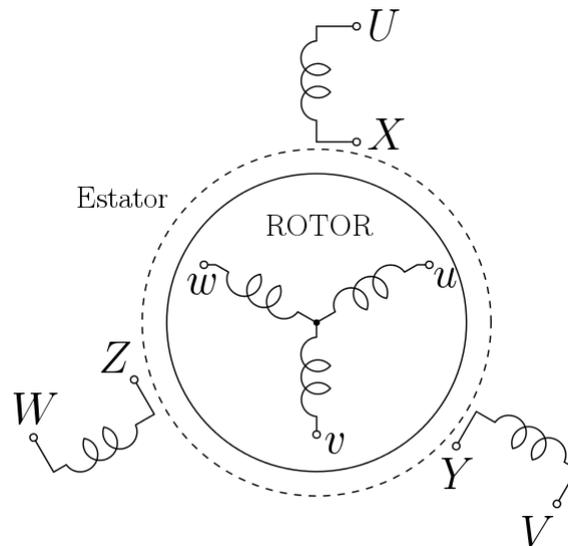


Figura II.3: Diagrama do motor de indução bobinado utilizado como máquina síncrona nas aulas de laboratório de CEME I

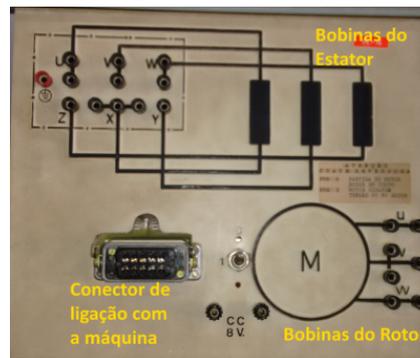


Figura II.4: Painel de conexão da máquina de indução de rotor bobinado

nos conectores U, V e W do estator.

Como mencionado anteriormente, a máquina síncrona possui torque de partida nulo e, conseqüentemente, não consegue partir sem algum auxílio. Neste caso, podemos conectar a máquina como motor de indução durante a partida e em seguida mudar a conexão para que tenhamos a máquina síncrona. Este procedimento pode ser executado com ajuda da chave seletora previamente citada. Quando selecionada a posição zero, as bobinas do rotor são curto-circuitadas e a máquina assume a configuração assíncrona, como mostrado no diagrama da esquerda na Figura II.5. Por outro lado, a seleção da posição um faz com que as bobinas do rotor sejam conectadas aos bornes onde a fonte CC será ligada², como ilustrado na porção central da mesma figura. Pode ser observado que com esta ligação uma das bobinas fica em aberto. Para inserir esta bobina no circuito e conseqüentemente aumentar a produção de campo magnético devemos curto-circuitar os terminais U e V do rotor.

II.2 Montagem da Máquina Motriz

- Verificar se os enrolamentos do estator estão ligados em delta (teremos as seguintes ligações no estator: U-Z, V-X e W-Y);
- Verificar se os terminais u e v do rotor estão curto-circuitados;

²Lembre-se que esta fonte deve estar conectada aos bornes que possuem a inscrição 8V

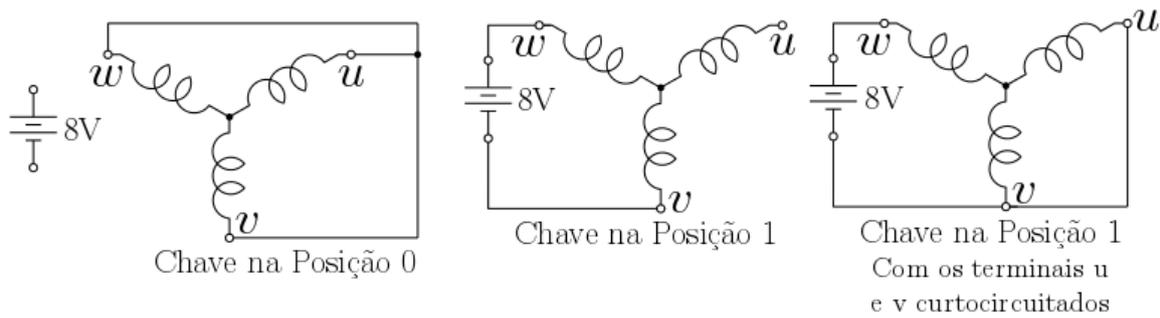


Figura II.5: Diagrama de ligação da máquina na partida e em condição de regime permanente

- c) Conectar uma fonte de 8V CC nos terminais indicados no painel de acionamento da máquina;
- d) Ligar as três fases (R, S e T) do painel de força ao estator da máquina (R no U, S no V e T no W);
- e) Posicionar a chave seletora na posição 0 (posição de partida);
- f) Energizar a máquina acionando a chave do painel de força;
- g) Quando a máquina atingir regime permanente, mudar a chave seletora do painel de acionamento da posição 0 para a posição 1.

Caso seja necessário inverter o sentido de rotação da máquina, lembrem-se que basta trocar a posição de duas das fases que alimentam o estator da máquina. Por exemplo, trocar as posições das fases S e T, conectando S no W e T no V. Não se esqueça de desligar a máquina antes de fazer este procedimento.

Parte II

Experiências de CEME I e CEME III

Reconhecimento do Laboratório de Conversão Eletromecânica de Energia

0.1 Introdução

Ao longo do semestre utilizaremos diversos equipamentos, tais como máquinas rotativas, voltímetros, amperímetros e etc, nas aulas de laboratório de conversão eletromecânica de energia. Dominar a utilização destes é necessário para que o tempo de aula de laboratório não seja desperdiçado aprendendo utilizar equipamentos básicos. Esta prática visa exclusivamente a familiarização com estes equipamentos e com o laboratório de conversão eletromecânica de energia.

0.2 objetivo

Familiarizar o aluno com o laboratório de conversão eletromecânica de energia e seus equipamentos.

0.3 Preparatório

Por ser a primeira aula de laboratório, esta prática não exigirá preparatório.

0.4 Roteiro da Experiência 0

0.4.1 Materiais e equipamentos

- Fonte CC variável (Leybold);
- Reostato de $110\Omega/2,2A$.
- Voltímetro;
- Amperímetro.

0.4.2 Execução

I - Reconhecimento do laboratório e de seus equipamentos

- Esboce uma planta baixa do laboratório com a indicação das bancadas, das janelas, da porta, das mesas e da região com as cadeiras. As medidas podem ser aproximadas.
- Esboce um desenho da fonte Leybold indicado cada um dos itens do seu painel.

II - Teste do fonte CC com reostato

- Ajuste o reostato para máxima resistência;
- Utilizando a saída de 0-17V CC da fonte Leybold e o reostato, monte o circuito da Figura 1. Os círculos com A e com V representam voltímetros e amperímetros;

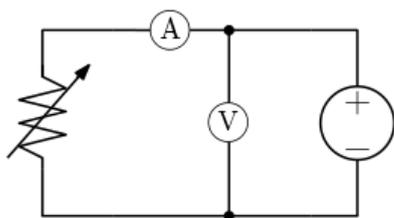


Figura 1: Circuito da segunda parte da experiência 0

- Ajuste a fonte para a tensão máxima e energize o circuito;
- Reduza gradativamente a resistência do reostato até que a corrente alcance 2A. Neste caminho, anote os valores medidos de tensão e corrente (anote pelo menos 10 pares).

III - Teste CA/CC da fonte CC

- ligue um voltímetro CC/CA na saída CC de 0 a 200V da fonte Leybold.
- Zere a fonte e aumente gradativamente a tensão. Neste caminho, meça a tensão produzida utilizando os modos CC e CA do voltímetro. Use a maior escala e interrompa o teste quando alcançar o fundo de escala em qualquer um dos modos (CC ou CA).

0.5 Relatório

- Desenhar (no computador) a planta baixa do laboratório com as devidas cotas;
- Desenhar (no computador) o painel da fonte Leybold indicando o significado de cada um de seus elementos (explique o que tiver que explicar sobre a fonte);
- Apresentar os resultados, discussões e conclusões dos experimentos realizados.
- Calcular a resistência interna da fonte CC de 0-17V.

Geração de Campo Magnético

1.1 Introdução

A lei de Ampere indica que o fluxo de corrente através de um condutor gera um campo magnético ao redor do mesmo e que a intensidade deste campo é proporcional a amplitude da corrente. De forma análoga, ao alimentarmos uma bobina, a corrente que flui por ele gera um campo magnético com intensidade proporcional ao número de espiras e à amplitude da corrente. Além disso, o meio ao qual o condutor ou a bobina está inserido influencia diretamente produção de campo magnético. Neste contexto, esta primeira experiência vise avaliar de maneira qualitativa a produção de campo magnético.

1.2 objetivo

A experiência tem como objetivo a verificação qualitativa das propriedades dos campos magnéticos gerados por correntes contínuas e alternadas.

1.3 Preparatório

Na Figura 1.1 é apresentado um circuito magnético cujo núcleo tem profundidade de 2cm. Este circuito possui uma bobina com 1000 espiras e resistência interna de 10Ω .

- Calcule a indutância da bobina caso o núcleo seja de ar.
- Calcule a indutância da bobina caso o núcleo seja de ferro com $\mu_r = 1000$?
- Compare os resultados obtidos nos itens anteriores.
- Qual a corrente que fluirá pela bobina do circuito da Figura 1.1 se ela for alimentada por uma fonte de 20V CC? Qual a corrente se ela for alimentada por uma fonte de 20V CA (com 60Hz)? Qual conclusão você pode tirar analisando esses resultados?
- Calcular a tensão induzida em uma bobina estática, com 1000 espiras, submetida a um fluxo magnético estático de $10mWb$.
- Repita o caso anterior considerando desta vez um fluxo magnético com comportamento senoidal. Considere a amplitude $10mWb$ e a frequência $60Hz$.
- Considere a mesma bobina do caso anterior submetida desta vez a um fluxo com padrão de degrau: $\phi = 0$, para $t < 1s$, e $\phi = 10mWb$, para $t \geq 1s$. Esboce o gráfico da tensão induzida (não precisa calcular os valores). Que conclusão é possível tirar?

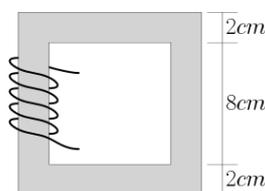


Figura 1.1: Bobina com núcleo quadrado. Profundidade igual a 2cm.

1.4 Roteiro da Experiência 1

1.4.1 Materiais e equipamentos

- Duas Bobinas de 1000 espiras cada;
- Multímetro;
- Núcleo de Ferro em I;
- Prendedor metálico (Clips).

1.4.2 Execução

I - Identificação do material

- Identificar o material utilizado;
- Anotar as grandezas elétricas informadas pelos fabricantes da bobina, da fonte e dos multímetros.

II - Ensaio com corrente contínua

- Montar o circuito da Figura 1.2 utilizando a fonte de tensão contínua de 0-17V. Inicialmente, mantenha a chave da fonte desligada e o volante de ajuste na posição de "zero volt";

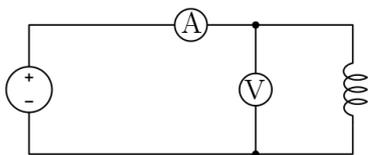


Figura 1.2: Primeiro circuito da experiência 1.

- Ligue a fonte e, girando o volante de ajuste, aumente a tensão até que a corrente atinja o valor de $1,2A$. Anote a tensão da fonte;
- Aproxime o prendedor metálico (clips) do centro da bobina e observe o que acontece. Na sequência, aproxime o prendedor das bordas e da região externa da bobina;
- Sem mexer na fonte, insira o núcleo em formato I no meio da bobina. Observe o que aconteceu com a corrente;
- Repita o procedimento de aproximação do prendedor metálico e tente compara o resultado com o anterior.
- Desligue a fonte na chave, sem alterar a posição do volante, e coloque uma outra bobina sobre a bobina anterior (sem o núcleo).

Rearranje o circuito para que ele fique do jeito da Figura 1.3. Neste caso, coloque o voltímetro na menor escala possível.

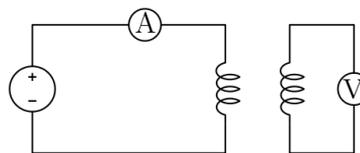


Figura 1.3: Segundo circuito da experiência 1

- Ligue a fonte na chave e observe o voltímetro (procure observar o que acontece justamente no instante em que a chave da fonte é mudada de posição). Desligue a fonte na chave, sem mexer no volante, e observe novamente o voltímetro. Ligue e desligue quantas vezes for necessário para entender o que está acontecendo.
- Coloque novamente o núcleo e repita o item anterior.

III - Ensaio com corrente alternada

- Monte o circuito da Figura 1.2 sem o núcleo, mas desta vez alimentando-o com corrente alternada. Ajuste novamente a corrente para $1,2A$ e meça a tensão necessária para isso. Notou alguma diferença em relação a caso CC?
- Sem mexer na fonte, insira o núcleo e observe o que acontece com a corrente.
- Retire o núcleo, desligue a fonte na chave, sem alterar a posição do volante, coloque novamente a segunda bobina sobre a primeira e monte o circuito da Figura 1.3. Inicialmente coloque o voltímetro na escala mais alta.
- Meça a tensão sem o núcleo. Em seguida, coloque o núcleo e meça novamente a tensão. O que aconteceu?

1.5 Relatório

Descrever e explicar tudo o que foi observado na aula.

Verificação da Relutância de circuito magnético

Na experiência 1 foi verificado que uma bobina é capaz de gerar campo magnético quando alimentada por uma corrente elétrica. Contudo, este experimento não permitiu uma análise mais profunda no que diz respeito à influência do circuito magnético em si na geração do fluxo magnético. Na experiência 2, por outro lado, o foco será o circuito magnético e para tanto realizaremos medidas indiretas do fluxo magnético em diferentes circuitos.

Medir diretamente o fluxo magnético de um circuito é algo complicado, uma vez que exige um sensor apropriado em formato de película para ser disposto em algum entreferro do circuito. Mesmo se esta solução fosse possível, a própria utilização do sensor poderia interferir no funcionamento do circuito aumentando a distância do entreferro, por exemplo. Por este motivo, realizaremos a medição indiretamente, ou seja, veremos o efeito do fluxo magnético na tensão induzida de uma bobina. Vejamos um exemplo:

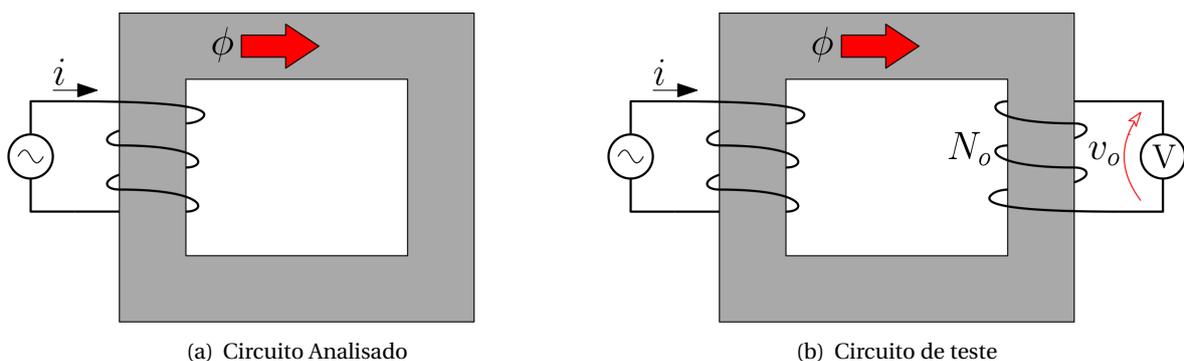


Figura 2.1: Exemplo de circuito magnético

Digamos que o objetivo da prática seja medir o fluxo magnético no circuito da figura 2.1(a). Observe que o circuito não possui entreferro, o que vetaria a opção de um possível sensor em forma de película. No entanto, podemos enrolar um fio ao redor no núcleo e medir indiretamente o fluxo através da tensão induzida nesta nova bobina (figura 2.1(b)). Os únicos pré-requisitos são que a corrente i da bobina principal seja alimentada com corrente alternada e que a bobina de medição seja mantida em aberto para não interferir no funcionamento do circuito. Na figura 2.1(b) apenas um voltímetro, cuja resistência é elevada, é ligado na saída da bobina de teste possui N_o espiras, teremos:

$$v_o = N_o \frac{d\phi}{dt} \Rightarrow \phi = \frac{1}{N_o} \int v_o dt$$

Uma vez que v_o é senoidal (ou próximo disso), ou seja, $v_o = V_p \text{sen}(\omega t)$, teremos o seguinte resultado:

$$\phi = -\frac{V_p}{N_o \omega} \cos(\omega t)$$

Considerando apenas o valor eficaz do fluxo, teremos o seguinte resultado:

$$\Phi_{rms} = \frac{V_p}{\sqrt{2} N_o \omega} = \frac{V_{rms}}{N_o \omega}$$

Sabendo o fluxo magnético que passa por um circuito, é possível calcular a relutância deste circuito através de:

$$\mathcal{R} = \frac{N I_{rms}}{\Phi_{rms}}$$

onde N é o número de espiras da bobina que provem a força magnetomotriz no circuito.

2.1 Preparatório

- a) Ainda sobre a metodologia apresentada, o que acontece se a bobina de teste não estiver em aberto?
- b) Segundo o método de medição de fluxo apresentado na introdução, poderia ser utilizado a mesma bobina de alimentação para realizar a mediação indireta do fluxo magnético? Justifique.
- c) O que é o fluxo magnético disperso e como ele pode atrapalhar a metodologia apresentada?
- d) No circuito da figura a seguir, uma corrente CA de 1A e 60Hz foi injetada na bobina de alimentação do circuito. A bobina de teste foi mantida em aberto e um volímetro indicou 20V CA. Calcule a permeabilidade magnética relativa do material do núcleo do circuito.

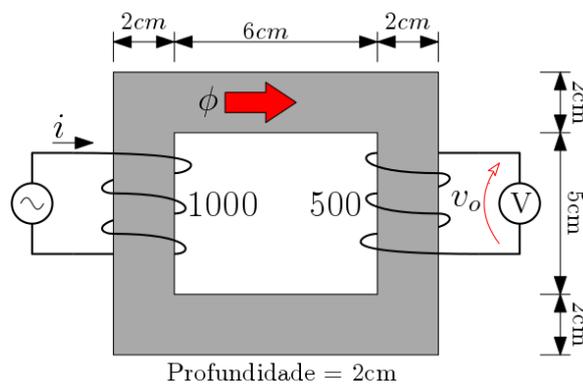


Figura 2.2: Circuito para o item d

- e) O circuito magnético da figura a seguir tem um núcleo feito do mesmo material do anterior. Calcule os fluxos ϕ_1 , ϕ_2 e ϕ_3 se a corrente for de 1A CA.

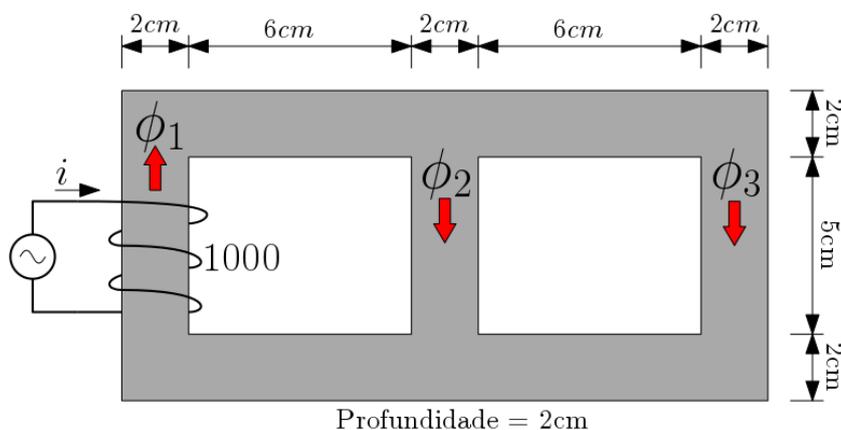


Figura 2.3: Circuito para o item e

2.2 Roteiro da Experiência 2

2.2.1 Materiais e equipamentos

- Duas Bobina de 1000 espiras cada;
- Voltímetro CA;
- Amperímetro CA;
- Núcleo de Ferro em **I** pequeno;
- Núcleo de Ferro em **I** grande;
- Núcleo de Ferro em **U**;
- Núcleo de Ferro em **E**;

2.2.2 Execução

I - Identificação do material

- Identificar o material utilizado;
- Medir e anotar as dimensões dos núcleos;

II - Primeira parte do ensaio

- Montar o seguinte circuito utilizando o núcleo em **U**, a fonte de tensão alternada e as duas bobinas.

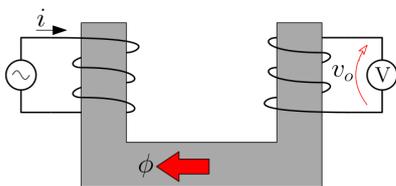


Figura 2.4: Circuito para o item II -

- Ajuste a fonte de forma que a bobina de alimentação do circuito seja alimentada com 15V CA. Meça a corrente que flui por essa bobina.
- Meça a tensão CA na bobina de teste e calcule o fluxo magnético no circuito.

III - Segunda parte do ensaio

- Montar o seguinte circuito utilizando os núcleos em **U** e em **I**, a fonte de tensão alternada e as duas bobinas.

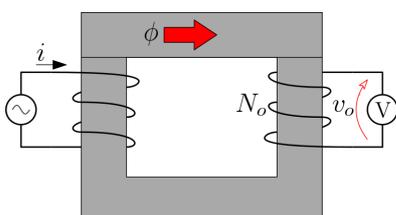


Figura 2.5: Circuito para o item III -

- Ajuste a fonte de forma que a bobina de alimentação do circuito seja alimentada com 15V CA. Meça a corrente que flui por essa bobina.
- Meça a tensão CA na bobina de teste e calcule o fluxo magnético no circuito.
- Calcule a permeabilidade relativa do material. Que fatores contribuem para redução da acurácia desta medida?
- Ainda em aula, compare o resultado com o obtido no ensaio anterior. O que justifica a diferença?

IV - Terceira parte do ensaio

- Montar o seguinte circuito utilizando os núcleos em **E** e em **I**, a fonte de tensão alternada e uma das bobinas.

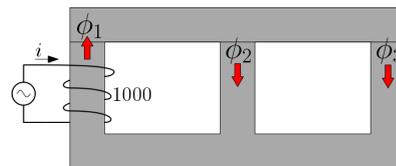


Figura 2.6: Circuito para o item IV -

- A bobina de teste deverá ser colocada em cada um dos ramos (1, 2 e 3) do circuito. A troca de posição deverá ser feita com a fonte desligada.
- Uma vez que a bobina de teste estiver posicionada, ajuste a fonte de forma que a bobina de alimentação do circuito seja alimentada com 15V CA.
- Meça as tensões para cada uma das posições da bobina e calcule os fluxos ϕ_1 , ϕ_2 e ϕ_3 .
- Repita os procedimentos colocando a bobina de alimentação no ramo central.
- Compare os fluxos magnéticos obtidos nos dois casos.

2.3 Relatório

Descrever e explicar tudo o que foi observado na aula.

Indutâncias variáveis com posição mecânica

Esta aula prática tem como objetivo mostrar que as indutâncias de uma máquina elétrica podem variar com a posição do rotor¹. A máquina utilizada na aula é apresentada no capítulo II desta apostila e poder ser configurada para funcionar tanto como máquina síncrona, quanto como máquina assíncrona. Na configuração síncrona (utilizada nesta prática), a máquina possui três bobinas no estator² e uma bobina no rotor, resultando em quatro indutâncias próprias e doze mútuas. Embora o estudo da máquina síncrona fuja o escopo de CEME I e CEME III, é recomendado a leitura das seções relacionadas as indutâncias desta máquina no capítulo 5 do livro texto utilizado no curso (UMANS, 2014). Nesta experiência, utilizaremos uma versão adaptada da metodologia apresentada na experiência 2 para calcular as indutâncias de uma máquina rotativa (a máquina síncrona).

3.1 Conceitos básicos

Uma versão simplificada de uma máquina síncrona de dois polos é apresentada na Figura 3.1(a)³. Na figura é apresentada a vista de corte de máquina e cada par de círculos vermelhos (aa' , bb' , cc' e ff') representa uma das bobinas da máquina⁴, a parte central representa o rotor e a parte externa o estator. Observe que são apresentados os eixos magnéticos (direções em que o fluxo fluirá) da bobina da fase **a** e da bobina do rotor, **f** e que o ângulo θ depende da posição do rotor.

Para entender a característica das indutâncias desta máquina, considere inicialmente que a bobina na fase **b** é alimentada com corrente e as demais são mantidas em aberto, como mostrado na figura 3.1(b). Neste caso, as linhas tracejadas em azul representam o fluxo magnético produzido por esta bobina. Como o entreferro entre o rotor e o estator é praticamente uniforme, é possível dizer que o fluxo não varia com a posição do rotor. Ainda nesta figura, observe que as linhas de fluxo mais externas enlaçam, ou seja, concatenam, a bobina da fase **a**, mas as demais não. Novamente, esta condição não é alterada pela posição do rotor. Generalizando a análise para as demais bobinas do estator, podemos concluir que as indutâncias próprias e mútuas delas são constantes independentemente da posição do rotor.

Considere agora que a bobina do rotor é alimentada e as demais são mantidas em aberto. Se o rotor estiver na posição $\theta = 0^\circ$, como na figura 3.1(c), todas as linhas de fluxo geradas pela bobina **f** enlaçam a bobina da fase **a** do estator. No entanto, as bobinas das fases **b** e **c** são enlaçadas apenas pelas linhas mais externas. Contudo, se movermos o rotor de tal forma que $\theta = 90^\circ$, como mostrado na figura 3.1(d), nenhuma linha de fluxo enlaça a bobina da fase **a**. Nas fases **b** e **c**, por outro lado, ocorre um aumento do número de linhas de fluxo enlaçando as bobinas. Consequentemente, podemos concluir que as indutâncias mútuas entre as bobinas do estator e a bobina do rotor (L_{af} , L_{bf} e L_{cf}) variam com a posição do rotor. A indutância própria da bobina do rotor, por outro lado, é constante, independentemente da posição angular.

Tendo compreendido a lógica, podemos ir para a equação de fluxo concatenado da máquina:

$$\begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \\ \lambda_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & L_{af} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bf} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & L_{cf} \\ L_{fa} & L_{fb} & L_{fc} & L_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_f \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

¹Parte móvel de uma máquina rotativa.

²Parte estática da máquina.

³A máquina do laboratório possui quatro polos, mas a característica das indutâncias é similar a da máquina de dois polos.

⁴Caso tenha dificuldade em visualizar o sistema, visualize o vídeo disponibilizado por (Catarinense Motores Elétricos, 2013): a estrutura do estator desta máquina é similar a da máquina da figura 3.1(a)

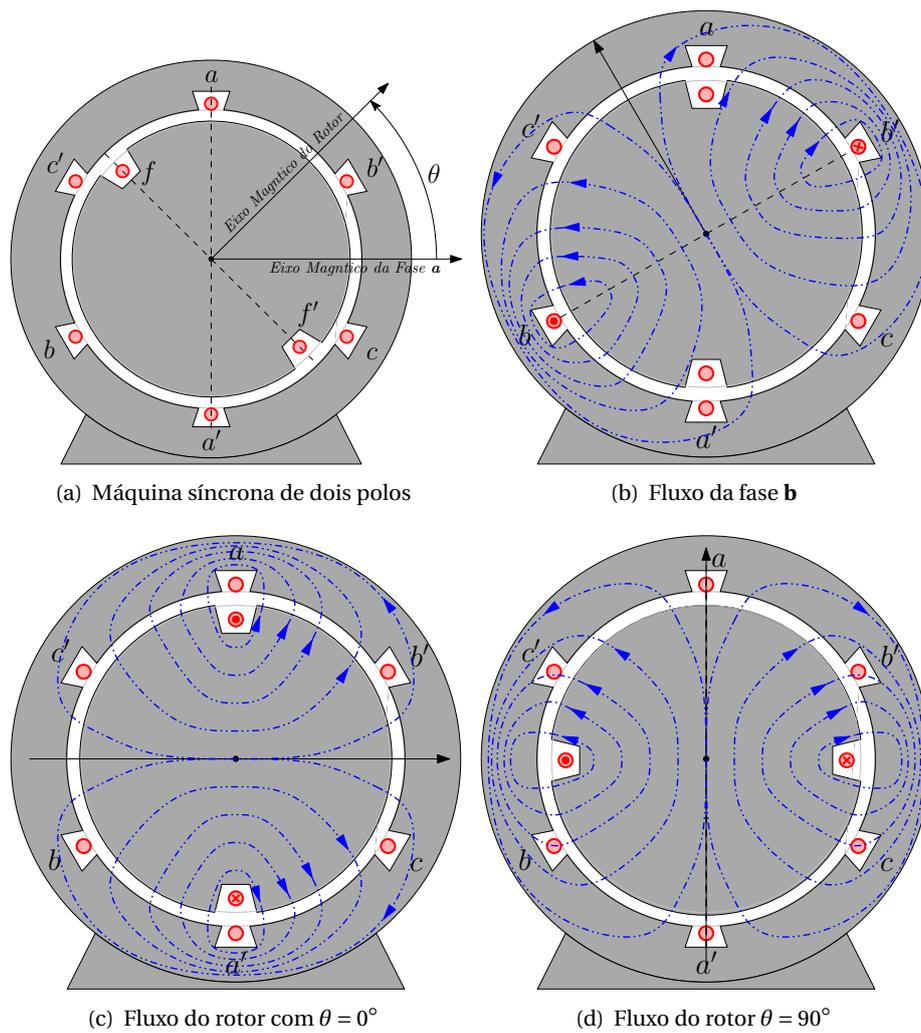


Figura 3.1: Vista frontal de uma máquina síncrona simplificada de dois polos.

Neste caso, teremos as seguintes indutâncias:

$$\begin{cases} L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L_e \\ L_{ab} = L_{bc} = L_{ca} = -M_e \\ L_{ff} = L_r \\ L_{af} = M_{er} \cos(\theta + \delta_0) \\ L_{bf} = M_{er} \cos(\theta - 2\pi/3 + \delta_0) \\ L_{cf} = M_{er} \cos(\theta + 2\pi/3 + \delta_0) \end{cases} \quad (3.2)$$

onde L_e , M_e , L_r , M_{er} e δ_0 são constantes.

3.2 Metodologia para o levantamento experimental das indutâncias da máquina

Sabemos que a tensão induzida em uma bobina é dada por:

$$e = \frac{d\lambda}{dt} \quad (3.3)$$

onde $\lambda = N\phi$ é o fluxo concatenado de uma determinada bobina. Também sabemos que a indutância em um circuito com uma única bobina é dada por:

$$L = \frac{\lambda}{i} \quad (3.4)$$

Se a tensão induzida de uma bobina for senoidal, ou seja, $e = E_p \text{sen}(\omega t)$, podemos obter:

$$\lambda = \int E_p \text{sen}(\omega t) dt = -\frac{E_p}{\omega} \text{cos}(\omega t) \quad (3.5)$$

É possível observar que o valor eficaz do fluxo concatenado é dados por:

$$\Lambda_{rms} = \frac{E_p}{\omega\sqrt{2}} = \frac{E_{rms}}{\omega} \quad (3.6)$$

Conseqüentemente, a indutância da bobina poderá ser aproximada por:

$$L \approx \frac{\Lambda_{rms}}{I_{rms}} \quad (3.7)$$

Para uma máquina com mais de uma bobina, é necessário garantir que haja corrente em apenas uma das bobinas, caso contrário os resultados apresentados aqui não são válidos.

3.2.1 Cálculo da indutância mútua entre duas bobinas

O procedimento para medir uma indutância mútua é fácil: injeta-se corrente alternada em uma bobina e mede-se a tensão induzida na outra. Garantindo que haja corrente em apenas uma bobina (as demais em aberto) é possível utilizar (3.7) da seguinte forma:

$$L_{12} = \frac{\Lambda_{rms2}}{I_{rms1}} = \frac{E_{rms2}}{\omega I_{rms1}} \quad (3.8)$$

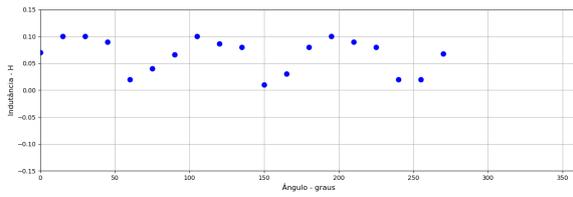
onde I_{rms1} é a corrente que flui pela bobina 1 e E_{rms2} é a tensão induzida na bobina 2.

3.2.2 Limitações da utilização da metodologia na determinação de indutâncias mútuas

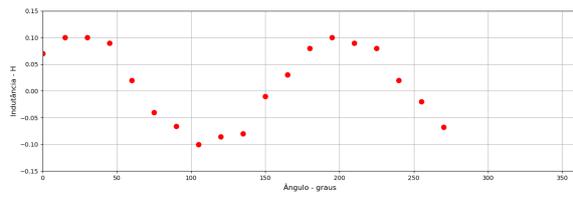
Como estudado em aula, se o aumento da corrente de uma bobina causa redução do fluxo concatenado em outra bobina, teremos uma indutância mútua negativa entre as duas. A metodologia proposta não consegue observar este efeito porque é baseada nos valores eficazes de tensão e corrente. Neste caso, utilizaremos o conhecimento que adquirimos sobre a máquina para interpretar os resultados:

- As indutâncias mútuas entre as bobinas do estator são negativas;
- As indutâncias mútuas entre as bobinas do estator e a bobina do rotor variam senoidalmente com a posição.

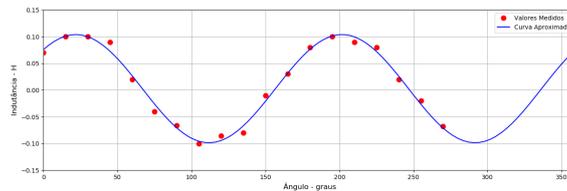
No primeiro caso, basta assumir valor negativo para as indutâncias. No segundo caso é preciso observar que durante meio ciclo a indutância será positiva e noutro ela será negativa, embora as medidas não sejam capazes de mostrar isso. Utilizando a metodologia até agora descrita, obteremos um gráfico de indutância em função da posição angular como o mostrado na Figura 3.2(a). Com um pouco de bom senso e do conhecimento fornecido por (3.2) é possível atribuir o sinal negativo a alguns dos pontos, como mostrado na Figura 3.2(b). Finalmente, é possível utilizar esses resultados para levantar as indutâncias da máquina, como mostrado na Figura 3.2(c).



(a) Valores de indutância obtidos usando a metodologia descrita



(b) Valores de indutância corrigidos



(c) Gráfico no formato que deve aparecer no relatório

Figura 3.2: Indutância Mútua entre uma das fases do estator e o roto. os valores utilizados são ilustrativos.

3.2.3 Cálculo da indutância própria de uma bobina

A Figura 3.3 é o circuito equivalente de uma determinada bobina. O resistor neste circuito representa a resistência dos condutores que formam a bobina. Se alimentarmos esta bobina com tensão senoidal V aparecerá uma corrente senoidal I . Sabemos que:

$$\frac{V_{rms}}{I_{rms}} = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \tag{3.9}$$

Assim, se mediarmos V_{rms} e I_{rms} e soubermos o valor de R ⁵ será possível determinar a indutância própria L da bobina.

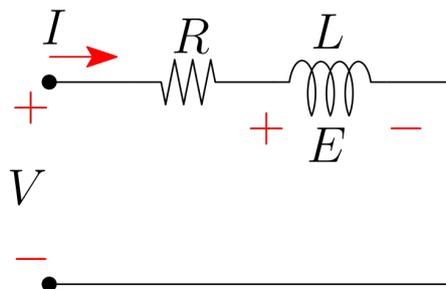


Figura 3.3: Circuito equivalente de uma bobina

3.3 Painel de conexão da máquina utilizada no ensaio

Como explicado anteriormente, a máquina utilizada possui três bobinas no estator e uma no rotor⁶. Essas bobinas poderão ser acessadas através do painel de conexões mostrado na Figura 3.4, para maiores detalhes, vide o capítulo II. As bobinas do estator são representadas por retângulos pretos, mas a bobina do rotor não é representada no painel. Os seis bornes da parte superior dão acesso às três bobinas no estator. Observe que os bornes **U** e **X**, por exemplo, são os terminais da bobina mais à esquerda. A bobina do rotor será acessada pelo par de bornes na parte inferior (onde está indicado 8 V CC). **IMPORTANTE:** para o devido funcionamento da experiência, a chave localizada sobre os bornes na bobina do rotor deverá estar na **posição 1**.

⁵Será determinado no ensaio em CC

⁶Na verdade ela possui três bobinas no rotor, mas será ligada de forma que estas três sejam combinadas em uma

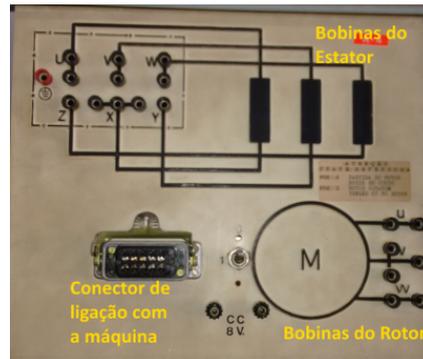


Figura 3.4: Painel de conexão da máquina de indução de rotor bobinado

3.4 Preparatório

- Como podemos medir a resistência interna de uma bobina usando apenas uma fonte CC, um amperímetro e um voltímetro?
- É correto afirmar que se a indutância mútua entre duas bobinas é nula, o fluxo gerado por uma nunca alcançará a outra? Justifique.
- A máquina apresentada na Figura 3.1(a) tem um par polos. Se a máquina possuir mais de um par de polos, como ficarão as equações em (3.2).
- Considere um circuito magnético com duas bobinas, cujas indutâncias próprias são L_{11} e L_{22} e a indutância mútua é M . Se injetarmos uma corrente CA de 5A e 60Hz na bobina 1, qual será a tensão induzida na bobina 2 (bobina 2 em aberto)?

Para os próximos itens, considere uma máquina com as seguintes indutâncias:

$$L_{11} = 3mH \quad L_{22} = 4mH \quad L_{12} = 2\text{sen}(\theta) mH$$

onde θ é a posição angular do rotor da máquina.

- Se $i_1 = 5A$, $\theta = 90^\circ$ e $i_2 = 0$, qual será a tensão induzida na bobina 2? E na bobina 1?
- Se a bobina 1 for alimentada novamente com 5A, mas desta vez CA (60Hz), e a bobina 2 for mantida em aberto, quais serão os valores eficazes das tensões induzidas nas duas bobinas para cada um dos ângulos θ a seguir:

$$0^\circ \quad 45^\circ \quad 90^\circ \quad 135^\circ \quad 180^\circ \quad 225^\circ \quad 270^\circ \quad 315^\circ$$

- Se a bobina 1 for alimentada com 5A CC, a bobina 2 for mantida em aberto e o rotor da máquina estiver girando, quais serão as tensões induzidas nas bobinas (valor eficaz e frequência) para as seguintes velocidades mecânicas:

$$100\pi \text{ rad/s} \quad 120\pi \text{ rad/s} \quad 140\pi \text{ rad/s}$$

3.5 Roteiro da Experiência 3

3.5.1 Materiais e equipamentos

- Máquina de indução de rotor bobinado;
- Painel de conexão da máquina;
- Voltímetro CC/CA;
- Amperímetro CC/CA;
- Fonte CC/CA.

3.5.2 Execução

I - Identificação do material

- a) Identificar o material utilizado;
- b) Anotar os dados da máquina utilizada.

II - Exame qualitativo;

- a) Ligue a fonte de corrente alternada em uma das bobinas do estator e ajuste a corrente para 1A;
- b) Meça a tensão induzida nas demais bobinas (não precisa anotar o valor);
- c) Mude a posição do rotor algumas vezes e meça as tensões induzidas novamente. O que aconteceu?
- d) Repita o processo, desta vez alimentado a bobina do rotor com 0,5A.
- e) O que podemos concluir nesta parte da experiência?

III - Ensaio CC para determinação das resistências das bobinas

- a) Usando a fonte de 0 - 17V CC, alimente uma bobina do estator com corrente CC de 0.75A;
- b) Meça a tensão CC no terminal desta bobina;
- c) Calcule a resistência interna desta bobina⁷;
- d) Repita o processo para a bobina do rotor, desta vez alimentado com 0.5A (usando a mesma fonte).

IV - Ensaio CA para determinação das indutâncias próprias⁸

- a) Usando a fonte de 0 - 250V CA, alimente uma das bobinas do estator com 1A;
- b) Meça a tensão a tensão da fonte;
- c) Calcule as indutâncias próprias das bobinas do estator⁷ usando (3.9).
- d) Repita o processo para a bobina do rotor, desta vez injetando 0,5A usando a fonte de 0 - 17 V CA.

V - Ensaio CA para determinação das indutâncias mútuas do estator⁸.

- a) Usando a fonte de 0 - 250V CA, alimente uma das bobinas do estator com 1A;
- b) Meça a tensão induzida em uma das outras bobinas do estator;
- c) Calcule as indutâncias mútua entre as bobinas usando (3.8)⁷.

VI - Ensaio CA para determinação das indutâncias mútuas entre estator e rotor.

- a) Marque com um lápis uma linha de referência na extremidade do eixo da máquina. Esta linha servirá de referencial para medir o ângulo do rotor;
- b) Posicione o rotor em 0°. Escolha um referencial como posição 0° e utilize para todos os casos.
- c) Alimente uma das bobinas do estator com 1A usando a fonte de 0 a 250 V CA;
- d) Meça a tensão nos terminais da bobina do rotor;
- e) Mova de 10° em 10° até completar 180°, repetindo o processo de medição da tensão;
- f) Calcule as indutâncias mútua entre a bobina do estator e a do rotor usando (3.8).

⁷Considerando que a máquina não possui assimetrias significantes, é possível assumir que a resistência/indutância das demais bobinas do estator são iguais.

⁸Nesta máquina, estas indutâncias não variam com a posição do rotor.

3.6 Relatório

- Descrever e explicar tudo o que foi observado na aula;
- A resistência calculada no ensaio CC é igual a resistência CA? Discuta esta questão.
- Calcular as indutâncias próprias e mútuas para cada posição do rotor.
- Determinar os valores de L_e , M_e , L_r e M_{er} (vide equação (3.2)).
- Obtenha um conjunto de formulas, como o apresentado em (3.2), para as indutâncias próprias e mútuas da máquina.

Verificação da Saturação Magnética

Nas experiências anteriores consideramos que a permeabilidade magnética de um núcleo é constante, embora isso nem sempre seja verdade. A permeabilidade magnética de alguns materiais, conhecidos como materiais ferromagnéticos, varia com a intensidade de campo magnético a que eles são submetidos. Neste sentido, a experiência 4 tem como objetivo utilizar a técnica de medição indireta de variáveis magnéticas, apresentada na experiência 2, para verificar o comportamento variável da permeabilidade magnética dos materiais ferromagnéticos.

4.1 Preparatório

Neste preparatório consideraremos o circuito magnético mostrado na Figura 4.1. Todo o preparatório deverá ser feito em [Python](#) e os códigos e figuras gerados deverão ser apresentados impressos.

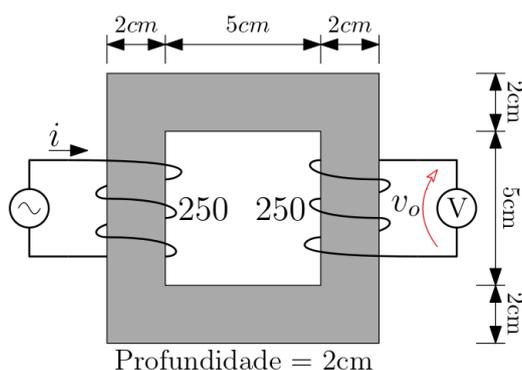


Figura 4.1: Circuito para seção 4.1

- Usando [Numpy](#) defina um vetor tempo. Considere para este vetor $t_{max} = 100ms$ e $\Delta t = 100\mu s$.
- Faça uma função produza um sinal de corrente como $i(t) = I_p \text{sen}(\omega t)$ ¹. As entradas da função serão a amplitude, a frequência e o vetor de tempo e a saída será o vetor de corrente.
- Usando a função do item anterior e o vetor de tempo, compute quatro vetores de corrente, cada um com um valor diferente de amplitude I_p : 0, 1A; 0, 25A; 0, 45A e 0, 6A. Considere frequência de 60Hz.
- Usando [Matplotlib](#), plote² as três correntes em um mesmo gráfico e verifique se estão corretas.
- Faça uma função que calcule a derivada numérica de um vetor. Considere que as entradas são o vetor que se deseja derivar e o vetor de tempo e a saída é um vetor com a derivada^{3,4}.
- Teste a função do item anterior com as correntes definidas anteriormente para verificar se a função está correta.
- Usando a função de derivação numérica, compute a tensão induzida na bobina de teste para cada uma das correntes anteriormente definidas. Neste caso, considere que $\mu_r = 200$. Dica: calcule a

¹A internet está repleta de tutoriais sobre como fazer isso: este [daqui](#) poderá ser útil.

²Tem exemplos de como fazer isto na referência ([FREITAS, 2019b](#)).

³A referência ([NEVES; NERI, 2013](#)) mostra um vídeo explicando a derivação numérica.

⁴A derivação numérica do vídeo anterior faz com que o vetor com a derivada tenha um elemento a menos que o vetor a ser derivado: insira um zero no início ou no fim para que o vetor de resultados fique com o mesmo tamanho do vetor de tempo.

indutância do circuito na mão. Então, usando Python, faça $\lambda_1 = L_{11}i_1$ (esse resultado é válido para $i_2 = 0$) e calcule λ_2 . Finalmente, usando a função de derivação criada no item anterior, faça $e_2 = d\lambda_2/dt$ ⁵.

- h) Plote das tensões induzidas para cada um dos casos em um mesmo gráfico.
- i) Faça uma função para calcular o valor RMS⁶ de um vetor e calcule os valores RMS das tensões anteriores.

Considere agora que o núcleo do circuito magnético tem a seguinte característica magnética:

$H - Ae/m$	0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250
$B - T$	0.0000	0.0157	0.0314	0.0471	0.0628	0.0707	0.0785	0.0864	0.0943	0.1021	0.1037
$H - Ae/m$	275	300	325	350	375	400	425	450	475	500	500
$B - T$	0.1052	0.1068	0.1084	0.110	0.1107	0.1115	0.1123	0.1131	0.1139	0.1147	0.1150

- j) Crie dois vetores para armazenar os valores de H e B da curva de magnetização do material.
- k) Plote a curva $B \times H$.
- l) Calcule as tensões induzidas, desta vez considerando a característica não linear apresenta na tabela. Dicas: como o núcleo é uniforme e simétrico, podemos fazer $H = N_1 i_1 / \ell$. Como i_1 é um vetor, H também será. Se você fosse resolver o problema na mão, para cada ponto deste vetor você teria que ver o correspondente valor de B na curva de magnetização. Como vamos fazer de forma automática, usaremos a função `interp` do `Numpy` dentro de um `loop for`⁷.
- m) Plote as tensões induzidas em um mesmo gráfico.
- n) Calcule os novos valores RMS das tensões induzidas.
- o) Discuta os resultados.

⁵Você pode pensar, se tivesse feito tudo na mão sairia mais rápido e não teria que programar uma linha de código se quer. Contudo, a resolução de problemas na mão é limitada a alguns casos muito simples. Os próximos itens mostrarão isso.

⁶Tente fazer sozinho, isso ajuda a desenvolver a capacidade de programação. Se mesmo assim não conseguir, dê uma olhada na referência ([Rosetta Code, 2019](#))

⁷Muitos destes procedimentos são utilizados no código da referência ([FREITAS, 2019a](#)) (embora não da mesma forma). Para rodar este código é preciso ter instalado no computador o Python e o `Jupyter`

4.2 Roteiro da Experiência 4

4.2.1 Materiais e equipamentos

- Duas Bobina de 1000 espiras cada;
- Duas Bobina de 250 espiras cada;
- Voltímetro CA;
- Amperímetro CA;
- Núcleo de Ferro em I pequeno;
- Núcleo de Ferro em U;

4.2.2 Execução

I - Identificação do material

- Identificar o material utilizado;
- Medir e anotar as dimensões dos núcleos;

II - Primeira parte da experiência

- Utilizando o núcleo de formato **I**, montar o circuito da Figura 4.2. Utilize duas bobinas de 1000 espiras;

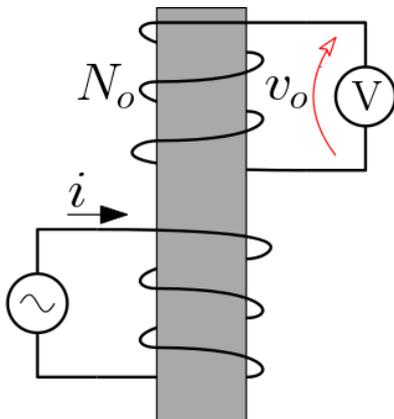


Figura 4.2: Circuito para o item II -

- Varie a corrente na bobina de alimentação de 0 a 1 A e leia a tensão induzida na bobina de teste para cada um dos pontos;

III - Segunda parte da experiência

- Utilizando os núcleos em formato de **U** e **I**, montar o circuito da Figura 4.3. Utilize duas bobinas de 250 espiras;

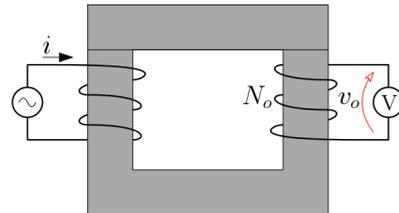


Figura 4.3: Circuito para o item III -

- Varie a corrente na bobina de alimentação de 0 a 2 A e leia a tensão induzida na bobina de teste para cada um dos pontos;

4.3 Relatório

- Descrever e explicar tudo o que foi observado na aula;
- Traçar os gráficos $V \times I$ obtidos na aula;
- Traçar as curvas de $\Phi \times I$ para os dois circuitos;
- Traçar as curvas $B \times H$ para os dois circuitos;
- Traçar as curvas de permeabilidade magnética relativa para os dois circuitos em função de H .

Transformadores: Conceitos Básicos

O transformador é um dispositivo eletromagnético composto por duas¹ ou mais bobinas magnanamente acopladas. Seu princípio de funcionamento é simples: uma bobina é alimentada com tensão alternada, gerando um fluxo magnético alternado no circuito magnético. Parte deste fluxo magnético concatena a segunda bobina e, de acordo com a lei de Faraday, induz a tensão do secundário. Neste caso, os dois circuitos (ou as duas bobinas se preferir) estão eletricamente isolados um do outro: o acoplamento entre os dois é realizado pelo campo magnético.

A partir desta experiência utilizaremos transformadores do tipo mostrado na Figura 5.1. É possível observar na foto da Figura 5.1(a) que tanto o lado primário, quanto o secundário, possui quatro bornes de conexão. Os dois bornes intermediários são chamados de TAPs da bobina e sevem para acessar um número menor de espiras. O diagrama da Figura 5.1(b) ilustra essa situação.

Observe que em nenhuma parte da Figura 5.1 foi apresentado o número de espiras na bobina. Este é o padrão comum, as bobinas são especificadas por tensão, não por espiras. Por exemplo, ao alimentar o primário usando os bornes de 0 e 220V e medir a tensão secundária entre os bornes 0 e 110V, o usuário observará uma relação de transformação de 2 : 1.

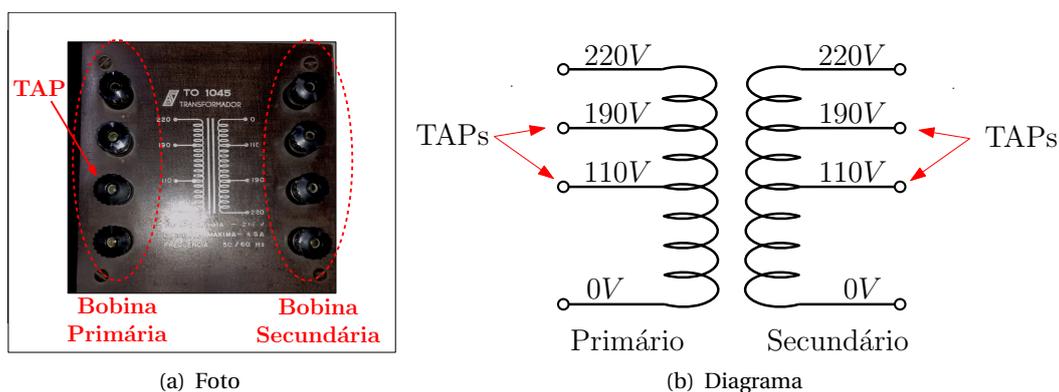


Figura 5.1: Transformador monofásico utilizado nas aulas de laboratório

5.1 Preparatório

Considere neste preparatório um transformador ideal com estrutura igual ao da Figura 5.1(b). Para cada um dos quatro casos calcule as tensões e correntes no primário e no secundário.

- Uma fonte de 220V é ligada aos terminais 0 e 220V e um voltímetro é ligado aos terminais 0 e 120V do secundário.
- Uma fonte de 220V é ligada aos terminais 0 e 220V do primário e uma carga de 50Ω é ligada aos terminais 0 e 110V do secundário. Repita o item considerando cargas de 25Ω e 100Ω.
- Uma fonte de 50V é ligada aos terminais 0 e 110V do primário e uma carga de 50Ω é ligada aos terminais 0 e 220V do secundário. Repita o item considerando cargas de 25Ω e 100Ω.

¹Na verdade, existem transformadores de bobina única. O transformador de corrente (TC) do tipo janela é um exemplo (PFIFNER, ; ABB, 2005).

- d) Uma fonte de $150V$ é ligada aos terminais 0 e $190V$ do primário e uma carga de 50Ω é ligada aos terminais 0 e $220V$ do secundário. Repita o item considerando cargas de 25Ω e 100Ω .
- e) Simule cada um dos circuitos no PSIM e compare os resultados de simulação com os resultados teóricos.
- Agora responda as seguintes questões:
- f) Se alimentarmos o primário com $100V$ através dos terminais 0 e $110V$, qual será a tensão medida por um voltímetro ligado entre os terminais 0 e $220V$ da mesma bobina?
- g) Se alimentarmos o primário com $100V$ através dos terminais 0 e $110V$, qual será a tensão medida por um voltímetro ligado entre os terminais 190 e $220V$ da bobina secundária?
- h) Considere que um transformador foi ligado em série em um circuito como mostrado na Figura 5.2. Ainda considerando o transformador ideal, calcule as correntes no primário e no secundário se a fonte for ajustada para $100V$, a resistência de 10Ω , o primário possuir 5000 espiras e o secundário possuir 15000 espiras.
- i) Simule no PSIM o circuito da figura e compare os resultados com os resultados teóricos.

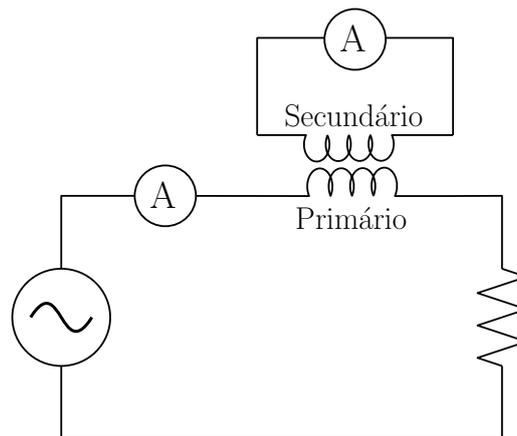


Figura 5.2: Circuito do Transformador de corrente

5.2 Roteiro da Experiência 5

5.2.1 Materiais e equipamentos

- Transformador de bancada;
- Voltímetro CA;
- Amperímetro CA;
- Reostato de 110Ω e $2,5A$;

5.2.2 Execução

I - Identificação do material

- Identificar o material utilizado.
- Anotar os dados do transformador.

II - Primeira parte

- Alimente o primário do transformador com $220V$ (use a fonte de 0 a $200V$ CA) entre os terminais 0 e $220V$;
- Meça a tensão entre os seguintes terminais do primário:
 - 0 e $110V$
 - 0 e $190V$
 - 190 e $220V$
- Meça a tensão entre os seguintes terminais do secundário:
 - 0 e $110V$
 - 0 e $220V$
 - 0 e $190V$
 - 190 e $220V$
- O que é possível concluir?

III - Segunda parte: Trafo Abaixador

- Alimente o primário do transformador com $220V$ (use a fonte de 0 a $250V$ CA) entre os terminais 0 e $220V$;
- Meça a corrente no primário e as tensões no primário e no secundário. Considere os terminais 0 e $110V$ do secundário.
- Conecte o reostato ajustado para máxima resistência aos terminais 0 e $110V$ do secundário.
- Meça tensões e correntes no primário e no secundário.
- Ajuste o reostato para que a corrente do secundário seja $2A$.

- Meça tensões e correntes no primário e no secundário.

IV - Terceira parte: Trafo Elevador

- Alimente o primário do transformador com $50V$ (use a fonte de 0 a $250V$ CA) entre os terminais 0 e $110V$;
- Meça a corrente no primário e as tensões no primário e no secundário. Considere os terminais 0 e $190V$ do secundário.
- Conecte o reostato ajustado para máxima resistência aos terminais 0 e $190V$ do secundário.
- Meça tensões e correntes no primário e no secundário.
- Ajuste o reostato para que a corrente do secundário seja $1,2A$.
- Meça tensões e correntes no primário e no secundário.

V - Quarta parte: Trafo de corrente

- Ligue o primário do transformador em série com uma fonte e com o reostato (ajustado para o máximo) como na figura 5.3. Utilize os terminais 190 e $220V$ do primário.
- Curto-circuite os terminais 0 e 110 do secundário através de um amperímetro.
- Ajuste gradativamente a tensão da fonte até que a corrente do primário atinja $1A$;
- Meça as tensões no primário e no secundário.

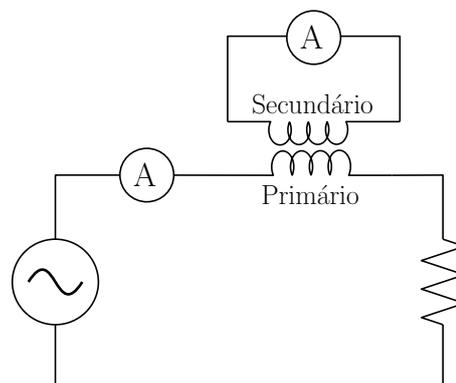


Figura 5.3: Circuito do Transformador de corrente

5.3 Relatório

- Descrever e explicar tudo o que foi observado na aula;
- Os valores obtidos estão de acordo com os valores teóricos? Justifique.
- Porque a corrente do primário é diferente de zero, mesmo quando o secundário está em aberto?

Transformadores: Determinação da Polaridade e dos Parâmetros do Circuito Equivalente

Na experiência anterior realizamos uma série de testes com um transformador monofásico visando entender o funcionamento do equipamento e verificar as diferenças entre o transformador ideal e o real. Dando continuidade no tema, serão abordadas na presente experiência a determinação da polaridade das bobinas do transformador e a determinação dos parâmetros do circuito equivalente.

- Talvez seja bom dividir em duas experiências: uma sobre polaridade e outra sobre parâmetros

6.1 Polaridade de Transformadores

A direção que as correntes fluem nas bobinas de um transformador é tal que o fluxo produzido pela bobina secundária tende contrariar o fluxo produzido pela bobina primária (ULABY, 2007)¹. A Figura 6.1 apresenta dois exemplos que ilustram esta questão. Nos dois casos a polaridade da bobina primária é tal que a corrente flui da fonte para o transformador (corrente entrando no terminal "positivo" da bobina). Se medirmos as tensões secundárias de cima para baixo, como indicado por v_2 , teremos um caso onde a tensão secundária estará defasada de 180° da tensão do primário e outro em que as duas tensões estarão em fase. O defasamento é causado pelo sentido de enrolamento da bobina e indica que a bobina do secundário da Figura 6.1(a) tem polaridade invertida.

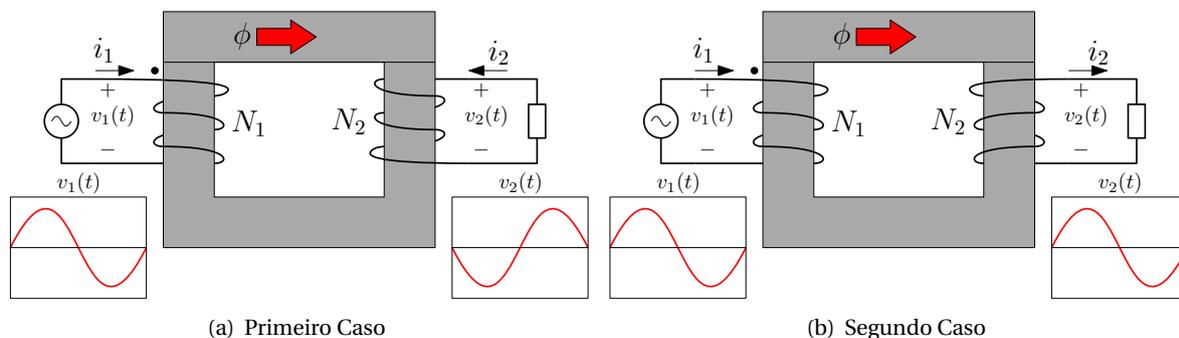


Figura 6.1: Polaridade de transformadores: Sem a notação do ponto

A representação mostrada na Figura 6.1 não é comum. Ao invés, é comum a utilização da notação do ponto para indicar a devida polaridade das bobinas. Neste caso, as tensões estão em fase sem que forem medidas do terminal com ponto para o terminal sem ponto. A Figura 6.2 ilustra a utilização desta notação². Além da polaridade da tensão, a notação do ponto serve também de parâmetro para escolha de sentido das correntes: no primário, a corrente deve entrar no ponto, no secundário ela deve sair.

Saber a polaridade das bobinas é de grande importância quando desejamos colocar transformadores em paralelo ou realizar a montagem de autotransformadores ou transformadores trifásicos. No entanto, abrir um transformador para visualizar os sentidos de enrolamento das bobinas primária e secundária é algo

¹Se a corrente no secundário tendesse gerar fluxo na mesma direção do primário, o fluxo total no núcleo aumentaria e iniciaria uma reação em cadeia: o aumento do fluxo aumentaria a tensão induzida no secundário que aumentaria a corrente que, por sua vez, aumentaria o fluxo.

²A notação do ponto também é utilizada nos símbolos de transformadores utilizados em circuitos elétricos.

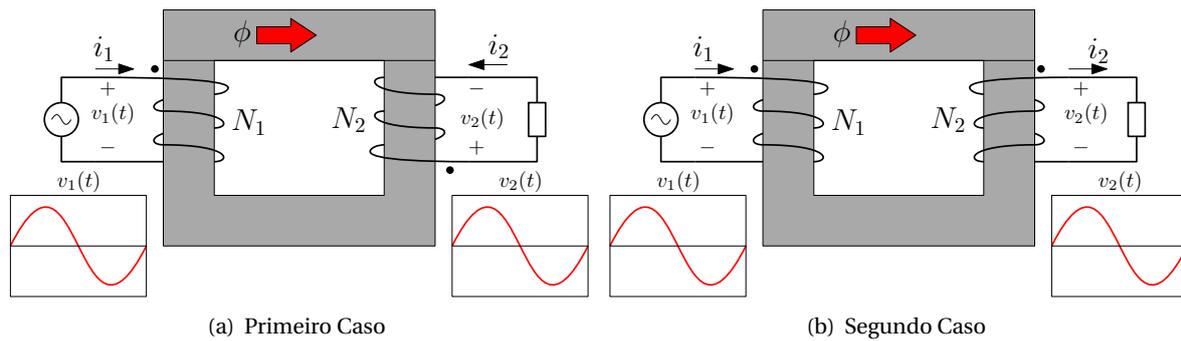


Figura 6.2: Polaridade de transformadores: Com a notação do ponto

indesejável e, na maioria das vezes, impossível. Por este motivo existe um teste simples, que exige apenas a utilização de voltímetros, para determinação da polaridade das bobinas (IEEE, 2016)³:

- Inicialmente é montado o circuito da Figura 6.3, com a bobina de alta como primário;
- Assumimos uma polaridade para a bobina primária (indicada de acordo com a notação do ponto);
- Ligamos o negativo da bobina primária a um dos terminais da bobina secundária.
- Medimos as três tensões indicadas na figura.

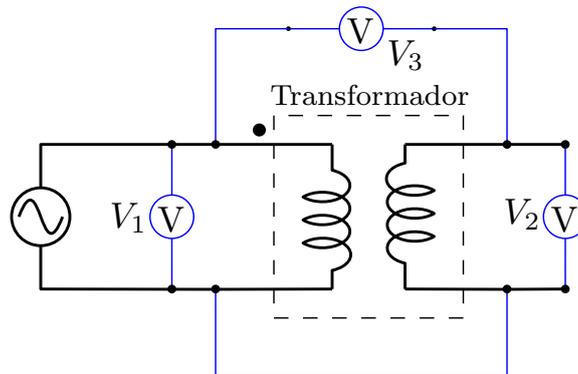


Figura 6.3: Circuito para o ensaio de polaridade

Neste caso:

- **Se** $V_3 = V_1 + V_2$, a polaridade do secundário está invertida em relação ao primário.
- **Se** $V_3 = V_1 - V_2$, a polaridade do secundário segue a polaridade do primário.

6.2 Wattímetro

Para realização dos ensaios descritos na seção 6.3 necessitaremos de um wattímetro: instrumento que mede a potência ativa consumida por um circuito. O wattímetro utilizado no laboratório, indicado na Figura 6.4(a), possui duas bobinas, uma de tensão e outra de corrente. Além disso, o diagrama da Figura 6.4(b) indica que a bobina de tensão possui taps para diferentes níveis de tensão: 48, 120, 240 e 480V. Uma vez que a bobina de tensão é ligada da mesma forma que ligamos um voltímetro, é importante perceber que

³A referência (IEEE, 2016) apresenta, também, outras duas metodologias para determinação de polaridade de transformadores. Esta referência ainda apresenta diversas metodologias utilizadas para o levantamento de características do transformador, vale a pena conferir.

se a bobina de tensão for submetida a uma tensão maior que a indicada pela escala, o wattímetro será danificado. Ou seja, a escolha da escala do tap da bobina de tensão deve ser feita com cautela. A bobina de corrente, por outro lado, assemelha-se a um amperímetro por isso deve ser ligada em série com o circuito. A Figura 6.5 apresenta o esquema típico de ligação de um wattímetro.

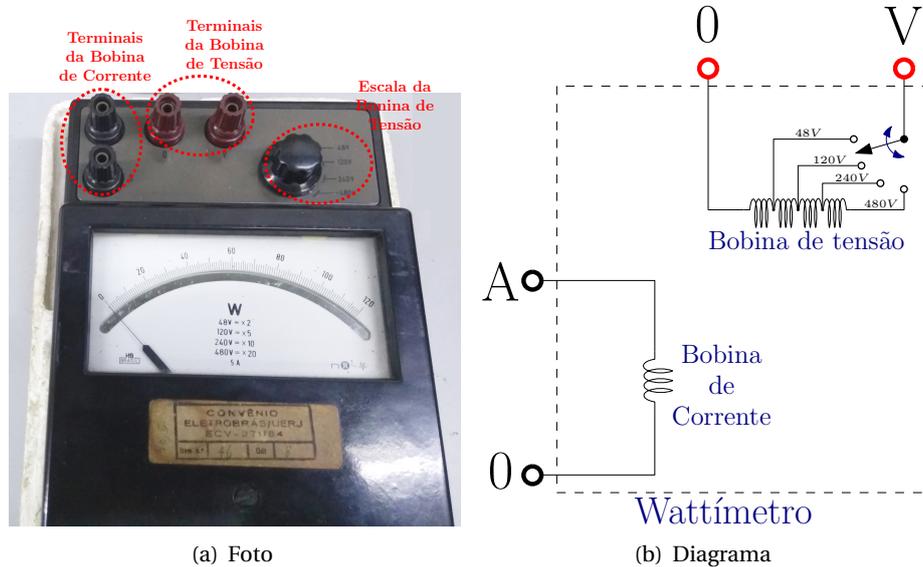


Figura 6.4: Wattímetro utilizado nas aulas de laboratório

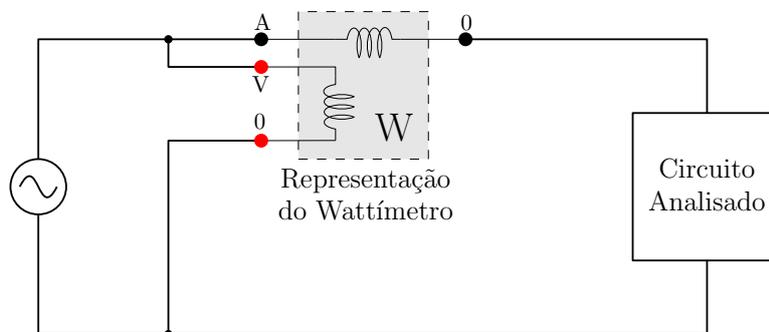


Figura 6.5: Forma de utilização do Wattímetro

6.3 Determinação dos Parâmetros do Circuito Equivalentente

A determinação dos parâmetros de circuito equivalentente, R_{eq} , X_{eq} , R_c e X_m , é realizada através de dois ensaios: o ensaio em vazio e o ensaio de curto circuito (UMANS, 2014; CHAPMAN, 2013).

- **Ensaio em vazio**

O lado de baixa é alimentado com tensão nominal e o lado de alta é mantido em aberto, como mostrado n Figura 6.6(a). Após este procedimento, são medidas a tensão, a corrente e a potência no primário. Este ensaio permite a determinação de R_c e X_m .

- **Ensaio de curto-circuito**

O lado de alta é ligado a uma fonte ajustável de tensão, inicialmente zerada, e o lado de baixa é curto-circuitado, como mostrado n Figura 6.6(b). Em seguida, a fonte de tensão deve ser gradativamente

ajustada para que o transformador consuma corrente nominal no primário⁴. Após este procedimento, são medidas a tensão, a corrente e a potência no primário. Este ensaio permite a determinação de R_{eq} e X_{eq} .

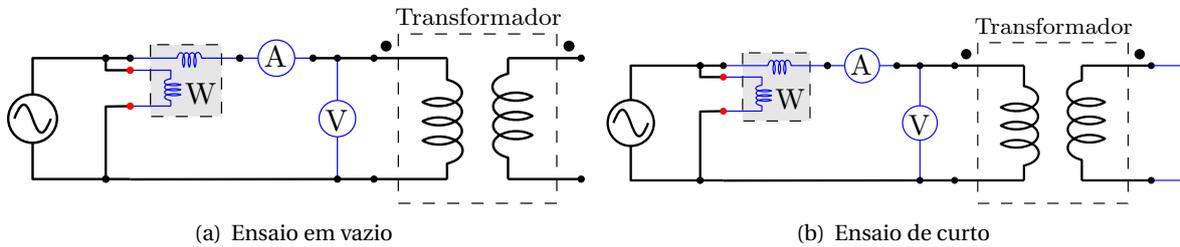


Figura 6.6: Ligação dos equipamentos nos ensaios em vazio e de curto-circuito

6.4 Preparatório

- a) Utilize o ponto para indicar a polaridade das bobinas A, B e C do transformador da Figura 6.7.

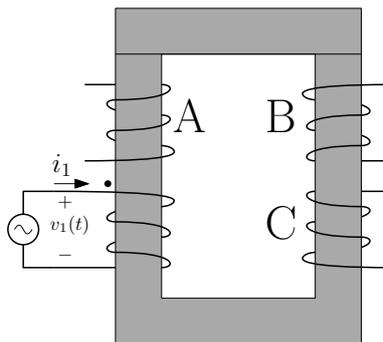


Figura 6.7: Transformador com múltiplos enrolamentos

- b) Na metodologia de determinação da polaridade das bobinas, é possível determinar a polaridade sem medir V_2 (indicado na Figura 6.3)? Justifique.
- c) Utilize a notação do ponto para marcar a polaridade das bobinas nos circuito da Figura 6.8. Sabe-se que os dois transformadores estão ligados na configuração abaixadora. Quais são as tensões nos secundários?

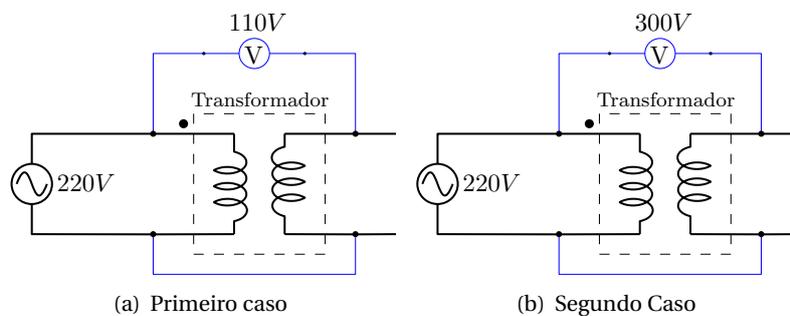


Figura 6.8: Ensaio de Polaridade de um transformador abaixador

⁴O ensaio em curto deve ser realizado com muito cuidado, acima de tudo porque queremos que transformador sobreviva ao teste.

- d) Um outro método para determinação da polaridade de transformadores é o Golpe indutivo⁵ com Corrente Contínua. Pesquise e descreva esta metodologia de determinação de polaridade.
- e) O que acontece se a bobina de tensão do wattímetro for submetida a uma tensão de 220V quando a chave seletora estiver posicionada em 110V?
- f) O que acontece se a bobina de corrente do wattímetro for ligada em paralelo com a fonte?
- g) No ensaio em vazio, porque devemos usar tensão nominal no transformador?
- h) No ensaio de curto, porque devemos usar corrente nominal no transformador?
- i) Determine os parâmetros do circuito equivalente referidos ao lado de alta considerando os seguintes resultados obtidos de um transformador de 220V:110V:

	Tensão	Corrente	Potência
Ensaio em Vazio			
Lado de Alta em vazio	110V	0,81A	33,3W
Ensaio de Curto			
Lado de Baixa em Curto	7,99V	3,72A	11,1W

⁵No inglês é Inductive Kick.

6.5 Roteiro da Experiência 6

6.5.1 Materiais e equipamentos

- Transformador de bancada;
- Voltímetro CA;
- Amperímetro CA;
- Wattímetro;
- Reostato de 110Ω e $2,5A$.

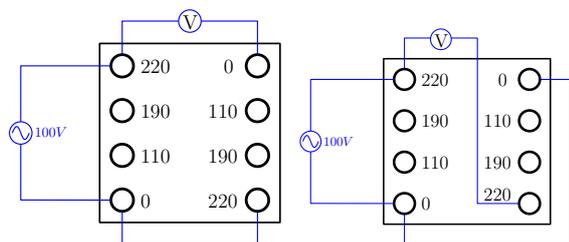
6.5.2 Execução

I - Identificação do material

- Identificar o material utilizado.
- Anotar os dados do transformador e do Wattímetro.

II - Primeira parte: polaridade

- Utilizando o transformador na configuração $220V:220V$, monte o circuito de teste de polaridade indicado na Figura 6.9(a).



(a) Primeiro caso

(b) Segundo Caso

Figura 6.9: Circuito de Teste de Polaridade

- Utilizando a fonte de $0 - 250V$ CA, alimente o primário com $100V$.
- Meça as tensões V_1 , V_2 e V_3 (vide circuito da Figura 6.3) e determine a polaridade do secundário.
- Repita o procedimento considerando o circuito da Figura 6.9(b)
- Repita o Processo para as configurações $220V:110V$ e $110V:30V$.

III - Segunda parte: Teste do Wattímetro

- Monte um circuito similar ao da Figura 6.5 usando a fonte de $0 - 250V$ CA e o reostato de 110Ω : mantenha a fonte zerada e o reostato no máximo.

- Ajuste a escala do Wattímetro para $240V$.
- Ajuste a tensão para $50V$ e meça a corrente e a potência que o reostato consome.
- Ajuste a tensão para $100V$ e, depois, para $200V$ e meça novamente os dados.
- A potência medida pelo Wattímetro corresponde a potência consumida pelo reostato?

IV - Terceira parte: Ensaio Em Vazio

- Considerando o transformador na configuração $220V:220V$, monte o circuito da figura 6.6(a).
- Ajuste a tensão para o valor nominal.
- Meça a corrente, a tensão e a potência.
- Zere o volante de da tensão CA.
- Repita os procedimentos anteriores para as configurações $190V:110V$ e $110V:30V$: **Não se esqueça que o lado de alta deve estar em aberto**

V - Quarta parte: Ensaio de curto

⚠ MUITO CUIDADO PARA NÃO QUEIMAR O TRANSFORMADOR. A TENSÃO DA FONTE, NESTE ENSAIO, DEVER SER AJUSTADA LENTAMENTE PARA PRODUZIR A CORRENTE INDICADA. A INADEQUADA REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE CURTO PODE DANIFICAR OS EQUIPAMENTOS E IRRITAR O PROFESSOR.

- Considerando o transformador na configuração $220V:220V$, monte o circuito da figura 6.6(b).
- Ajuste lentamente a tensão até que a corrente atinja $2A$ ⁶.
- Meça a corrente, a tensão e a potência.
- Zere o volante de da tensão CA.
- Repita o processo para as configurações $190V:110V$ (use corrente de $1,5A$) e $110V:30V$ (use corrente de $1,0A$): lembre-se que o lado de baixa deve ser curto-circuitado.

⁶Na prática o ensaio deve ser realizado com corrente nominal, contudo, para melhor adequação os equipamentos do laboratório foi escolhido trabalhar apenas com $2A$.

6.6 Relatório

- Descrever e explicar tudo o que foi observado na aula;
- Apresente os resultados do teste do Wattímetro e calcule o erro de medição de cada um dos casos.
- Obtenha os parâmetros de circuito equivalente das configurações 220V:220V, 190V:110V e 110V:30V referidos ao lado de alta: apresente os resultados em uma tabela onde as linhas representem os diferentes parâmetros e as colunas as diferentes configurações.

Transformadores: Eficiência e Regulação de Tensão

Esta experiência tem como objetivo levantar a eficiência e a regulação de tensão de um transformador monofásico para diferentes valores de carga.

7.1 Preparatório

Considere que o transformador do último item do preparatório da experiência 6 esteja funcionando na configuração abaixadora entregando tensão nominal a uma carga monofásica.

- a) Preencha a tabela a seguir com a eficiência do transformador para cada um dos casos. Observe que as colunas indicam a potência ativa da carga e as linhas o fator de potência.

	0,25kW	0,50kW	1,00kW
0,70 C			
0,85 C			
1,00			
0,85 I			
0,70 I			

- b) Preencha a tabela a seguir com a regulação de tensão do transformador para cada um dos casos.

	0,25kW	0,50kW	1,00kW
0,70 C			
0,85 C			
1,00			
0,85 I			
0,70 I			

Aumentar as tabelas (colocar mais casos) e pedir para usar python.

7.2 Roteiro da Experiência 7

7.2.1 Materiais e equipamentos

- Transformador de bancada;
- Voltímetro CA;
- Amperímetro CA;
- Wattímetro;
- Reostato de 110Ω e $2,5A$.

7.2.2 Execução

Durante toda a experiência será considerado o circuito da Figura 7.1 com o transformador na configuração 190V:110V. Embora a figura apresente dois wattímetros, cada bancada contará apenas com um. Ou seja, hora ele será utilizado para medir a potência de entrada do transformador, hora a de saída.

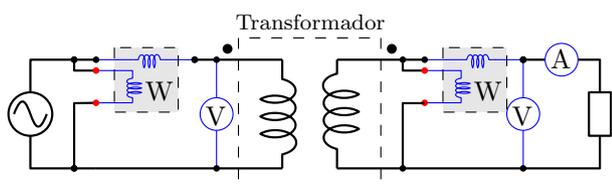


Figura 7.1: Circuito de teste utilizado na Experiência 7

I - Primeira parte: Carga Resistiva

- Monte o circuito da Figura 7.1 usando o reostato de 110Ω no máximo.
- Utilizando a fonte de $0 - 250V$ CA, alimente o primário com $190V$.
- Meça as tensões no primário e no secundário e as potências.
- Calcule a eficiência e a regulação de tensão.
- Ajuste o reostato para que a corrente secundária seja de $1,5A$ e repita o processo.
- Ajuste o reostato para que a corrente secundária seja de $2,0A$ e repita o processo.

II - Primeira parte: Carga Indutiva

- Monte o circuito da Figura 7.1 usando o reostato de 110Ω no máximo em série com a bobina de 1000 (coloque o núcleo em I no centro dela).
- Utilizando a fonte de $0 - 250V$ CA, alimente o primário com $190V$.
- Meça as tensões no primário e no secundário e as potências.
- Calcule a eficiência e a regulação de tensão.
- Ajuste o reostato para que a corrente secundária seja de $1,5A$ e repita o processo.
- Ajuste o reostato para que a corrente secundária seja de $2,0A$ e repita o processo.

III - Primeira parte: Carga Capacitiva

- Monte o circuito da Figura 7.1 usando o reostato de 110Ω no máximo em série com o banco de capacitores de $50\mu F$.
- Utilizando a fonte de $0 - 250V$ CA, alimente o primário com $190V$.
- Meça as tensões no primário e no secundário e as potências.
- Calcule a eficiência e a regulação de tensão.
- Ajuste o reostato para que a corrente secundária seja de $1,5A$ e repita o processo.
- Ajuste o reostato para que a corrente secundária seja de $2,0A$ e repita o processo.

Modificações para o próximo período:

- Fazer apenas o caso 110:110V
- Usar o capacitor de $35\mu F$ do lab.
- Usar o indutor de 500 espiras com núcleo I

7.3 Relatório

- Descrever e explicar tudo o que foi observado na aula;
- Apresente os resultados do teste.
- Calcular a eficiência e a regulação de tensão para cada um dos casos.

Autotransformadores

O autotransformador é uma espécie de transformador sem isolamento elétrico entre o primário e o secundário.

- Colocar um guia mostrando como montamos um autotrafo de bobina única e como transformamos um transformador em um autotransformador
- Cortar a parte IV
- Utilizar como carga o reostato de 110Ω em série com uma bobina de 250 espiras:
 - Na parte I e II usando apenas o núcleo em U
 - Na Parte III usando o núcleo em U e em I
- Realizar a parte III com tensão nominal (250V)
- Pedir para medir a corrente na bobina comum e a tensão na bobina série nas partes I e II

8.1 Preparatório

8.2 Roteiro da Experiência 8

8.2.1 Materiais e equipamentos

- Transformador de bancada;
- Voltímetro CA;
- Amperímetro CA;
- Wattímetro;
- Reostato de 110Ω e $2,5A$.

8.2.2 Execução

I - Autotrafo abaixador de 190:110V

- a) Utilizando uma das bobinas do transformador, monte um autotransformador abaixador de 190V:110V.
- b) Alimente o primário com tensão nominal e ligue o reostato ajustado para 110Ω no secundário.
- c) Meça as correntes e tensões no primário e no secundário.
- d) Ajuste o reostato para que a corrente que flui por ele atinja $1,5A$ e meça novamente as tensões e correntes.
- e) Ajuste o reostato para que a corrente que flui por ele atinja $2,0A$ e meça novamente as tensões e correntes.

II - Autotrafo elevador de 80V:110V

- a) Utilizando uma das bobinas do transformador, monte um autotransformador elevador de 80V:110V.
- b) Alimente o primário com tensão nominal e ligue o reostato ajustado para 110Ω no secundário.
- c) Meça as correntes e tensões no primário e no secundário.
- d) Ajuste o reostato para que a corrente que flui por ele atinja $1,5A$ e meça novamente as tensões e correntes.
- e) Ajuste o reostato para que a corrente que flui por ele atinja $2,0A$ e meça novamente as tensões e correntes.

Nos próximos itens utilizaremos as duas bobinas do transformador para montar um autotransformador. Muito cuidado com a polaridade das bobinas, inversões podem causar danos nos equipamentos.

III - Autotrafo abaixador de 250:220V

- a) Utilizando as duas bobinas do transformador, monte um autotransformador abaixador de 250V:220V.
- b) Alimente o primário com $100V^1$ e ligue o reostato ajustado para 110Ω no secundário.
- c) Meça as correntes de entrada e de saída, as correntes na bobina série e na bobina comum, as tensões no primário e no secundário e as tensões nas bobinas série e comum.
- d) Usando um wattímetro, meça as potências de entrada e de saída e as potências nas bobinas série e comum.
- e) Ajuste o reostato para que haja $1,5A$ e $2,0A$ nele e repita o processo de medição das variáveis.

IV - Autotrafo elevador de 220:330V

- a) Utilizando as duas bobinas do transformador, monte um autotransformador elevador de 220V:330V.
- b) Alimente o primário com $100V^2$ e ligue o reostato ajustado para 110Ω no secundário.
- c) Meça as correntes de entrada e de saída, as correntes na bobina série e na bobina comum, as tensões no primário e no secundário e as tensões nas bobinas série e comum.
- d) Usando um wattímetro, meça as potências de entrada e de saída e as potências nas bobinas série e comum.
- e) Ajuste o reostato para que haja $1,5A$ e $2,0A$ nele e repita o processo de medição das variáveis.

¹Foi escolhido este valor para evitar correntes superiores as suportadas pelo reostato

²Foi escolhido este valor para evitar correntes superiores as suportadas pelo reostato

Bibliografia

- ABB. *Instrument Transformers: Technical Information and Application Guide*. 2005. Acesso em: 22 sep. 2019. Disponível em: <<https://library.e.abb.com/public/e2462bd7f816437ac1256f9a007629cf/ITTechInfoAppGuide.pdf>>.
- Catarinense Motores Elétricos. *Motor Elétrico Trifásico*. 2013. Acesso em: 30 aug. 2019. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=xGW3RHVGBmA>>.
- CHAPMAN, S. *Fundamentos de Máquinas Elétricas*. 5. ed. [S.l.]: AMGH Editora, 2013. ISBN 9788580552072.
- FREITAS, C. M. *Efeito da saturação na corrente de magnetização de transformadores*. 2019. Disponível em: <http://www.eng.uerj.br/deptos/professor/338/Animacao_magnetizacao.ipynb>.
- FREITAS, C. M. *Manual de Escrita dos Relatórios de CEME*. [S.l.], 2019. Versão 3.0. Disponível em: <http://www.eng.uerj.br/deptos/professor/338/Manual_relatorio_3_0.pdf>.
- HAYT, W.; BUCK, J. *Eletromagnetismo*. 8. ed. [S.l.]: Bookman Editora, 2013. ISBN 9788580551549.
- IEEE. Ieee standard test code for liquid-immersed distribution, power, and regulating transformers. *IEEE Std C57.12.90-2015 (Revision of IEEE Std C57.12.90-2010)*, p. 1–120, March 2016.
- NEVES, A.; NERI, I. *Derivação Numérica - Diferenças finitas para 2 pontos*. 2013. Acesso em: 05 sep. 2019. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=HxX7O07Ycz0>>.
- PIFFNER. *Transformadores de Corrente Tipo Janela*. Acesso em: 22 sep. 2019. Disponível em: <https://www.piffner.com.br/fileadmin/files/documents/80_downloads/Transformadores-de-Corrente-Tipo-Janela.pdf>.
- Rosetta Code. *Averages/Root mean square*. 2019. Acesso em: 30 aug. 2019. Disponível em: <https://rosettacode.org/wiki/Averages/Root_mean_square>.
- ULABY, F. T. *Eletromagnetismo para Engenheiros*. [S.l.]: Bookman, 2007. ISBN 9788577800858.
- UMANS, S. *Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley*. 7. ed. [S.l.]: AMGH Editora, 2014. ISBN 9788580553741.