

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE GRADUAÇÃO E EDUCAÇÃO PROFISSIONAL
CURSO DE TECNOLOGIA EM MANUTENÇÃO INDUSTRIAL**

**ERASTO LEONEL SOMMERFELD JUNIOR
JACIR RODRIGO PETRY**

BANCADA DIDÁTICA PARA ESTUDO DE FATOR DE POTÊNCIA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

MEDIANEIRA

2012

ERASTO LEONEL SOMMERFELD JUNIOR

JACIR RODRIGO PETRY

BANCADA DIDÁTICA PARA ESTUDO DE FATOR DE POTÊNCIA

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Diplomação, do Curso Superior de Tecnologia em Manutenção Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Fischborn

MEDIANEIRA

2012



TERMO DE APROVAÇÃO

BANCADA DIDÁTICA PARA ESTUDO DE FATOR DE POTÊNCIA

por

ERASTO LEONEL SOMMERFELD JUNIOR
JACIR RODRIGO PETRY

Este Trabalho de conclusão de curso (TCC) foi apresentado às 9:00 do dia 03 de outubro de 2012 como requisito parcial para a obtenção do título de Tecnólogo no Curso Superior de Tecnologia em Manutenção Industrial, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Medianeira. Os acadêmicos foram arguidos pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Marcos Fischborn
UTFPR - Medianeira
(Orientador)

Prof. Me. Yuri Ferruzzi
UTFPR - Medianeira
(Convidado)

Prof. Esp. Giovano Mayer
UTFPR - Medianeira
(Convidado)

Prof. Me. Yuri Ferruzzi
UTFPR - Medianeira
(Responsável pelas atividades de TCC)

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus por nos guiar nessa trajetória.

Agradecemos especialmente ao nosso orientador, Prof. Dr. Marcos Fischborn, pelo auxílio durante este período e pelo companheirismo.

Aos nossos colegas de turma.

Aos demais Professores que de uma forma ou outra, nos ajudaram.

Gostaríamos de deixar registrado também, o nosso reconhecimento à nossas famílias, pois acreditamos que sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio.

Enfim, a todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

SOMMERFELD JUNIOR, Erasto Leonel; PETRY, Jacir Rodrigo. **Bancada didática para estudo de fator de potência**. 2012. 46f. Trabalho de Conclusão de Curso - Tecnologia em Manutenção Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2012.

A utilização maciça de transformadores, motores e outros dispositivos que armazenam campos magnéticos na indústria, comércio e residências faz com que ocorra o atraso da corrente elétrica em relação à tensão aplicada, efeito conhecido por fator de potência, um conceito importante considerado no estudo e projeto de instalações elétricas. Este trabalho tem como proposta a construção de uma bancada de estudo de fator de potência, na qual se possa simular este efeito e corrigi-lo, dando oportunidade aos alunos visualizarem na prática os conhecimentos teóricos obtidos nas aulas sobre correção do fator de potência.

Palavras-chave: Fator de potência. Correção do fator de potência. Indutores. Capacitores.

ABSTRACT

SOMMERFELD JUNIOR, Erasto Leonel; PETRY, Jacir Rodrigo. **Bancada didática para estudo de fator de potência**. 2012. 46f. Trabalho de Conclusão de Curso - Tecnologia em Manutenção Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2012.

The massive use of transformers, motors and other devices that store magnetic fields in industry, commerce and residences, causes a delay in the electric current in relation to the voltage applied. This effect is known as Power Factor and it is an important concept to be observed in study and design of electric installations. This work proposes an instrumentation and device kit for power factor study, in which students can simulate this effect and fix it. This kit enables students the opportunity to demonstrate in practice the theoretical knowledge obtained in his studies about power factor correction.

Keywords: Power factor. Power factor correction. Inductors. Capacitors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Capacitores numa placa eletrônica.....	11
Figura 2 – Banco de Capacitores industriais.....	12
Figura 3 - Circuito geral proposto.....	15
Figura 4 - Corrente e Tensão sincronizadas.....	16
Figura 5 - Circuito com carga Resistiva.....	16
Figura 6 - Simulação do circuito com carga Resistiva.....	17
Figura 7 - Corrente 90° atrasada da Tensão.....	18
Figura 8 - Corrente 45° atrasada da Tensão.....	19
Figura 9 - Circuito com carga Resistiva e Indutiva.....	20
Figura 10 - Simulação do circuito com carga Resistiva e Indutiva.....	20
Figura 11 - Corrente adiantada 90° da Tensão.....	21
Figura 12 - Circuito com carga Resistiva, Indutiva e Capacitiva.....	22
Figura 13 - Simulação do circuito com carga Resistiva, Indutiva e Capacitiva.....	22
Figura 14 - Alguns materiais reunidos.....	25
Figura 15 - Estrutura metálica para os módulos.....	25
Figura 16 - Medidores posicionados na bancada.....	26
Figura 17- Bancada pronta.....	26
Figura 18 - Esquema de ligação do circuito com carga resistiva.....	27
Figura 19 - (A) Tensão e corrente. (B) Triângulo de potências.....	28
Figura 20 - Esquema de ligação do circuito com carga Resistiva e Indutiva.....	29
Figura 21 - (A) Correntes para o circuito RL. (B) Triângulo de potências.....	30
Figura 22 - Esquema de ligação do circuito com carga Resistiva, Indutiva e Capacitiva.....	31
Figura 23 - (A) Correntes para o circuito RLC. (B) Triângulo de potências.....	33
Figura 24 - Esquema para ligação do circuito 1 com Resistor.....	40
Figura 25 - Esquema para ligação do circuito 2 com Resistor e Indutor.....	41
Figura 26 - Esquema para ligação do circuito 3 com Resistor, Indutor e Capacitor.....	41
Figura 27 - Curva de Indutância, Indutor aberto.....	44
Figura 28 - Curva de Indutância, Transformador 1.....	45
Figura 29 - Curva de Indutância, Transformador 2.....	46

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
1.1 OBJETIVO GERAL	8
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	9
1.3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	9
1.3.1 Correção de fator de potência.....	9
1.3.2 O que é energia ativa?.....	10
1.3.3 O que é energia reativa?	10
1.3.4 O que é energia aparente?	10
1.3.5 Capacitores, tipos e funcionamento.....	10
1.3.6 Banco de capacitores	12
1.3.7 Indutores.....	12
1.3.8 Problemas encontrados com baixo fator de potência	13
1.3.9 Benefícios da correção do fator de potência.....	13
2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	14
2.1 SIMULAÇÃO DOS CIRCUITOS	14
2.1.1 Circuito geral proposto.....	14
2.1.2 Circuito com carga puramente Resistiva	15
2.1.3 Circuito com carga Resistiva e Indutiva	18
2.1.4 Circuito com carga Resistiva, Indutiva e Capacitiva.	21
2.2 ESCALA DOS INSTRUMENTOS	23
3 MONTAGEM, RESULTADOS E DISCUSSÕES	24
3.1 COMPRA DO MATERIAL	24
3.2 MONTAGEM.....	25
3.2.1 Circuito com carga Resistiva.....	27
3.2.2 Circuito com carga Resistiva e Indutiva	28
3.2.3 Circuito com carga Resistiva, Indutiva e Capacitiva	31
4 CONCLUSÕES	34
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36
APENDICE 1	38
APÊNDICE 2	43

1 INTRODUÇÃO

Em corrente alternada, faz-se uso intensivo de transformadores, motores de corrente alternada e outros dispositivos eletromagnéticos que, através da geração e interação de campos magnéticos, realizam conversões eletromecânicas de energia. Com isso a energia produzida em um determinado gerador é transmitida a longas distâncias e energiza linhas de produção em inúmeras indústrias, fornece serviços para o comércio e permite uma vida confortável, com muitos eletrodomésticos, a uma imensa população.

Pode-se afirmar (AZEVEDO; NUNES, 2012) que a corrente elétrica é a responsável pela produção de campos magnéticos. Se a corrente é contínua, o campo magnético também será; se a corrente for alternada, o campo magnético também acompanhará a variação da corrente.

Segundo (AZEVEDO; NUNES, 2012):

“A corrente em um circuito gera um campo magnético que produz fluxo sobre o próprio circuito; assim, a variação de corrente produz uma tensão no circuito, fenômeno conhecido como auto-indução. O fluxo magnético é proporcional a corrente; a constante de proporcionalidade que depende da geometria e das propriedades magnéticas do meio, é chamada indutância (ou auto-indutância) do circuito, denotada por L.”

A reatância indutiva é a oposição à passagem de corrente alternada devido à indutância do circuito, dependendo também da frequência de onda de tensão e de corrente.

O atraso da corrente em relação à tensão é uma medida de quanta potência ativa está disponível para a realização de trabalho e dá origem aos conceitos de fator de potência e correção do fator de potência, itens estes, objetos de estudo deste trabalho.

1.1 OBJETIVO GERAL

Construir uma bancada para estudo de correção de fator de potência, contendo os elementos básicos necessários à verificação dos fenômenos elétricos

envolvidos, como instrumentos de medição, capacitores, cargas resistivas e indutores, permitindo também a conexão de outros dispositivos relacionados.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Construção da bancada contendo: amperímetro, wattímetro, voltímetro, cosfímetro, indutores, capacitores, resistores, permitindo ainda a conexão de outros dispositivos como pequenos motores de indução.

Elaboração e simulação dos circuitos elétricos a serem testados em *software* apropriado, com o objetivo de dimensionar apropriadamente os capacitores, indutores e resistores, bem como os instrumentos de proteção e medidas necessárias ao projeto.

Elaboração de um conjunto de experimentos, baseados nas simulações, que permitam ao professor e estudantes observar o comportamento do circuito mediante a introdução e retirada de capacitores.

Realizar ensaios na bancada, a fim de verificar o funcionamento dos experimentos propostos.

1.3 REFERENCIAL TEÓRICO

1.3.1 Correção de fator de potência

Vários tipos de dispositivos eletromagnéticos possuem enrolamentos: motores, transformadores, lâmpadas de descargas, fornos de indução, entre outros (Capacitech, 2011). Para funcionar, estes equipamentos magnetizam os núcleos de ferro, armazenando energia reativa, energia que não produz trabalho e diminui o fator de potência da instalação. De uma forma prática, baixos fatores de potência são sempre resultado de cargas indutivas (O'MALLEY, 1993).

Para melhorar o fator de potência é preciso corrigi-lo. O processo de introduzir elementos reativos para levar o mesmo a um valor mais próximo da

unidade é chamado de correção de fator de potência BOYLESTAD (2004, p. 591), o que exige estudo e preparo de técnicos, tecnólogos e engenheiros da área elétrica. Com isso são necessárias atividades práticas para melhor assimilação deste conteúdo, utilizando dispositivos de medida, equipamentos e bancadas de ensino.

1.3.2 O que é energia ativa?

Energia ativa é toda a energia que produz trabalho efetivamente. Ou seja, é a energia fornecida à carga e dissipada por esta BOYLESTAD (2004, p. 417). Alguns exemplos de consumo de energia ativa podem ser visualizados no acender de uma lâmpada, no esquentar de um chuveiro ou no acionamento de um motor.

1.3.3 O que é energia reativa?

É responsável pela formação do campo magnético necessário para o funcionamento das máquinas girantes, a exemplo dos motores de indução e também dos transformadores (VALLIM, 2012). É energia absorvida e devolvida pelos elementos reativos de carga e descarga, sem produzir trabalho elétrico (MUSSOI, 2012).

1.3.4 O que é energia aparente?

A soma vetorial da energia ativa com a energia reativa fornece o valor total da energia que circula pelo sistema elétrico, esta energia recebe o nome de energia aparente. É a energia aparente total numa impedância mista (TLA, 2012).

1.3.5 Capacitores, tipos e funcionamento

Os capacitores são basicamente dispositivos para armazenar energia na forma de campos elétricos. São construídos por dois materiais condutores e separados por um material isolante.

Este material isolante é o que normalmente dá o nome para os capacitores. Assim, têm-se capacitores de cerâmica, de papel, de filme plástico, de mica, de vidro e eletrolítico.

Estes podem tanto ser aplicados em circuitos delicados, como, na eletrônica, como pode ser visto na figura 1, ou em locais mais robustos como na indústria, como pode ver na figura 2.

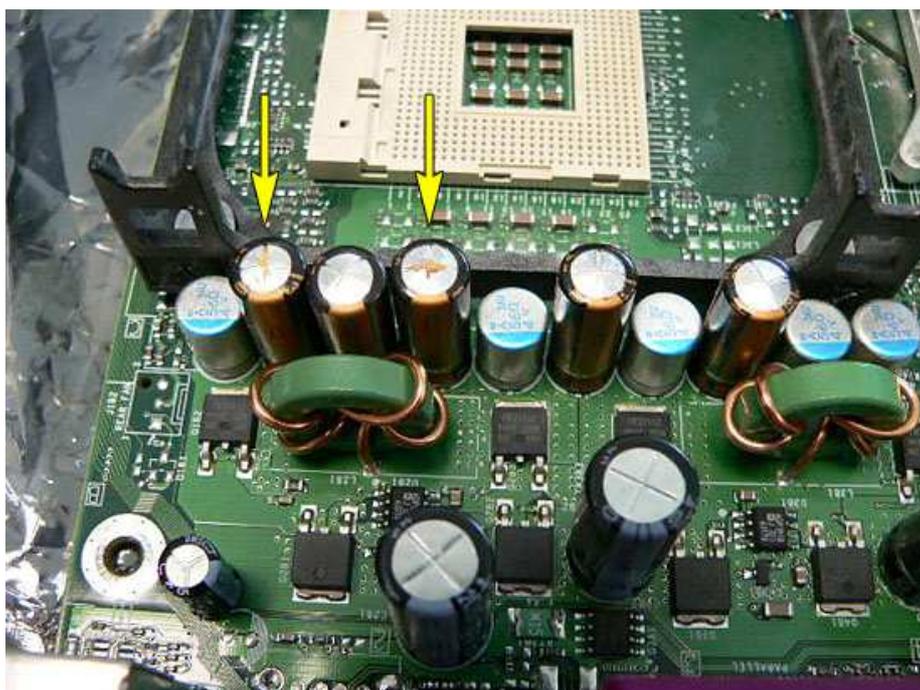


Figura 1 - Capacitores numa placa eletrônica.

Fonte: <http://www.aprendaefaca.net/index.php/blog/93-travamentos,-erros-e-resets-aleat%C3%B3rios-podem-ser-os-capacitores-eletrol%C3%ADticos-da-placa-m%C3%A3e.html>



Figura 2 – Banco de Capacitores industriais
Fonte: http://sp.quebarato.com.br/sao-paulo/energia-reativa-excedente-x-banco-de-capacitores__3E6E88.html

1.3.6 Banco de capacitores

Os bancos de capacitores são basicamente unidades onde ficam os sistemas de manobra, proteção e controle. Existem 2 tipos de banco de capacitores:

- A) Banco de capacitor fixo: este não possui nenhum tipo de controle, os capacitores ficam ligados ao sistema independentemente das condições de carga.
- B) Banco de capacitor automático: geralmente possui um controlador eletrônico, o qual retira ou insere carga no sistema de acordo com o fator de potência. (CENA, 2012)

1.3.7 Indutores

Indutores são basicamente bobinas, enrolamentos de fios colocados em torno de um núcleo, tal que pode ser fabricado com material ferromagnético, tendo como principais características, segundo GUSSOW (1997, p. 309):

- A indutância aumenta com o número de espiras em torno do núcleo;
- A indutância aumenta com a permeabilidade relativa do material com o qual é feito o núcleo;
- À medida que a área abrangida em cada espira aumenta, a indutância aumenta;
- A indutância diminui à medida que o comprimento da bobina aumenta (desde que o número de espiras permaneça constante).

1.3.8 Problemas encontrados com baixo fator de potência

Os problemas mais comuns encontrados com o baixo fator de potência são: uma maior corrente no circuito que resulta em condutores com seção maior, maior aquecimento nos condutores, necessidade de um transformador maior, acréscimo na conta de energia e equipamentos de proteção maiores.

1.3.9 Benefícios da correção do fator de potência

Há vários benefícios ao se corrigir o fator de potência, tais como: desaparece o acréscimo cobrado nas contas de energia elétrica; melhora o aproveitamento da energia elétrica para a geração de trabalho útil; diminuem as variações de tensão (oscilações); melhora o aproveitamento dos equipamentos com um menor aquecimento; diminuem as perdas de energia elétrica na instalação devido à liberação de carga; e, a capacidade dos transformadores alcança melhor aproveitamento. (Copel, 2011)

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A montagem da bancada envolve a seleção de dispositivos de medida como wattímetro, voltímetro, amperímetro e cosfímetro e materiais como MDF, ferro, disjuntores e outros.

Uma forma eficiente de seleção destes equipamentos é a simulação. Através dela, pode-se conferir as etapas do dimensionamento do circuito, obtendo-se as especificações iniciais para compra dos dispositivos e equipamentos.

A simulação foi feita utilizando um programa de computador, no qual foi possível estudar combinações de circuitos, tal que, deste modo determinaram-se os valores das cargas a serem adquiridas para a montagem da bancada, bem como os dispositivos de medida.

2.1 SIMULAÇÃO DOS CIRCUITOS

2.1.1 Circuito geral proposto

O circuito geral proposto para se corrigir o fator de potência apresenta a seguinte configuração, conforme mostra a figura 3, e possui os seguintes equipamentos e dispositivos:

- 1 Amperímetro analógico 10 A;
- 1 Voltímetro analógico 250 V;
- 1 Wattímetro analógico 600 W;
- 1 Cosfímetro analógico;
- 2 Resistores 100 Ohms, 160 W e 200 W;
- 1 Indutor 510 mH;
- 1 Capacitor 12 μ F;
- 1 Disjuntor 10 A;
- 1 Chave três posições;
- 1 Fusível 3 A.

Este circuito permite que sejam realizadas as seguintes configurações:

- Circuito com carga Resistiva
- Circuito com carga Resistiva e Indutiva
- Circuito com carga Resistiva, Indutiva e Capacitiva

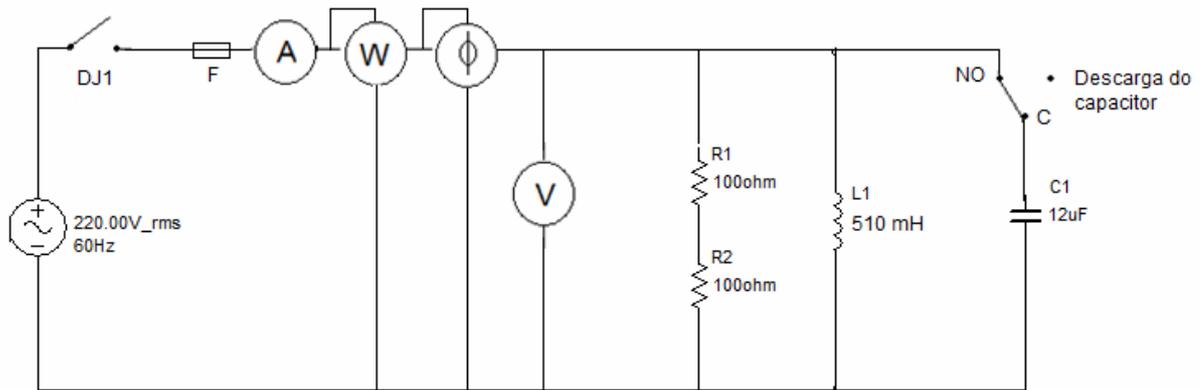


Figura 3 - Circuito geral proposto.

2.1.2 Circuito com carga puramente Resistiva

Quando a carga resistiva é conectada a uma fonte de tensão senoidal, a corrente que por ela circula tem a mesma forma e fase da onda da tensão; o pico de tensão produz um pico de corrente, e a passagem por zero que ocorre ao mesmo tempo, como mostra a figura 4. Quando isto acontece, diz-se que a tensão e a corrente estão em fase; o ângulo entre a tensão e a corrente é igual a zero.

Assim, de acordo com a equação:

$$FP = \cos(\theta)$$

$$\theta = 0^\circ$$

$$FP = \cos(0^\circ) = 1$$

O valor do fator de potência para este circuito é igual a 1,0.

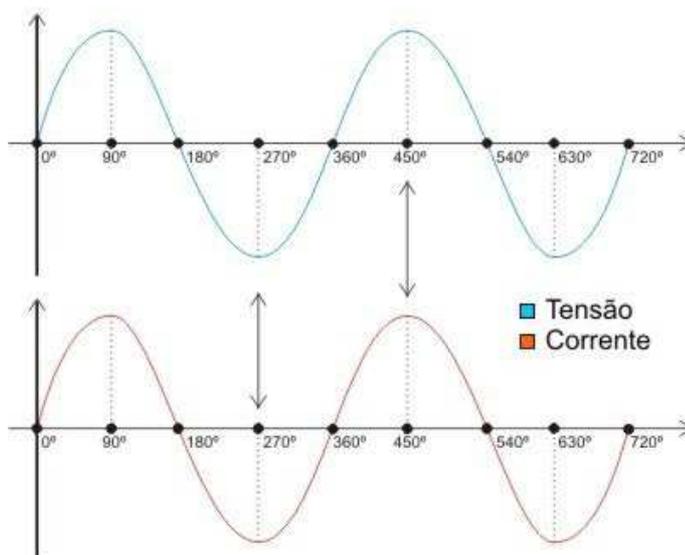


Figura 4 - Corrente e Tensão sincronizadas

Fonte: <http://www.eletrica.info/definicao-de-fator-de-potencia/>

O circuito da figura 5 é alimentado por uma fonte de tensão de 220 V Rms, 60 Hz e possui dois resistores de 100 Ohms ligados em série, estes ligados em paralelo com essa fonte. Possui também um amperímetro, um wattímetro, um voltímetro, um cosfímetro e um disjuntor.

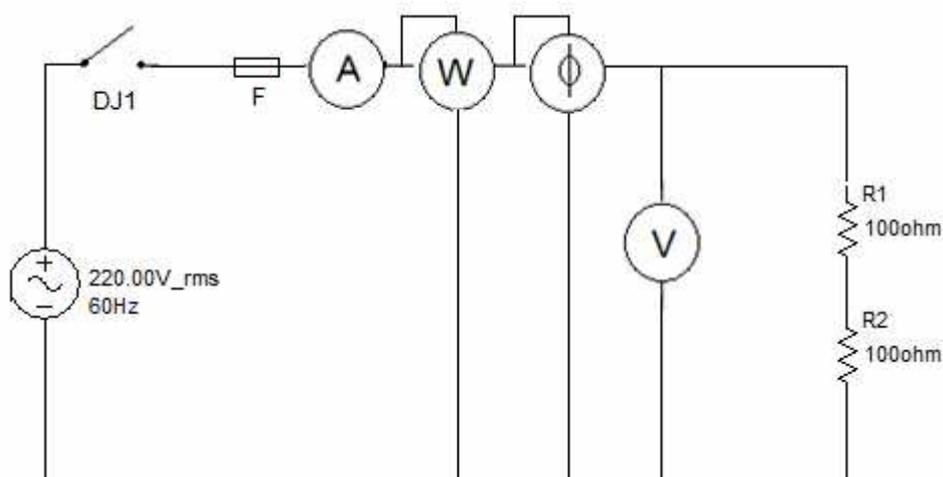


Figura 5 - Circuito com carga Resistiva.

Foi realizada a simulação deste circuito em um determinado *software* para verificar os valores de tensão, corrente, potência e fator de potência, conforme mostra a figura 6.

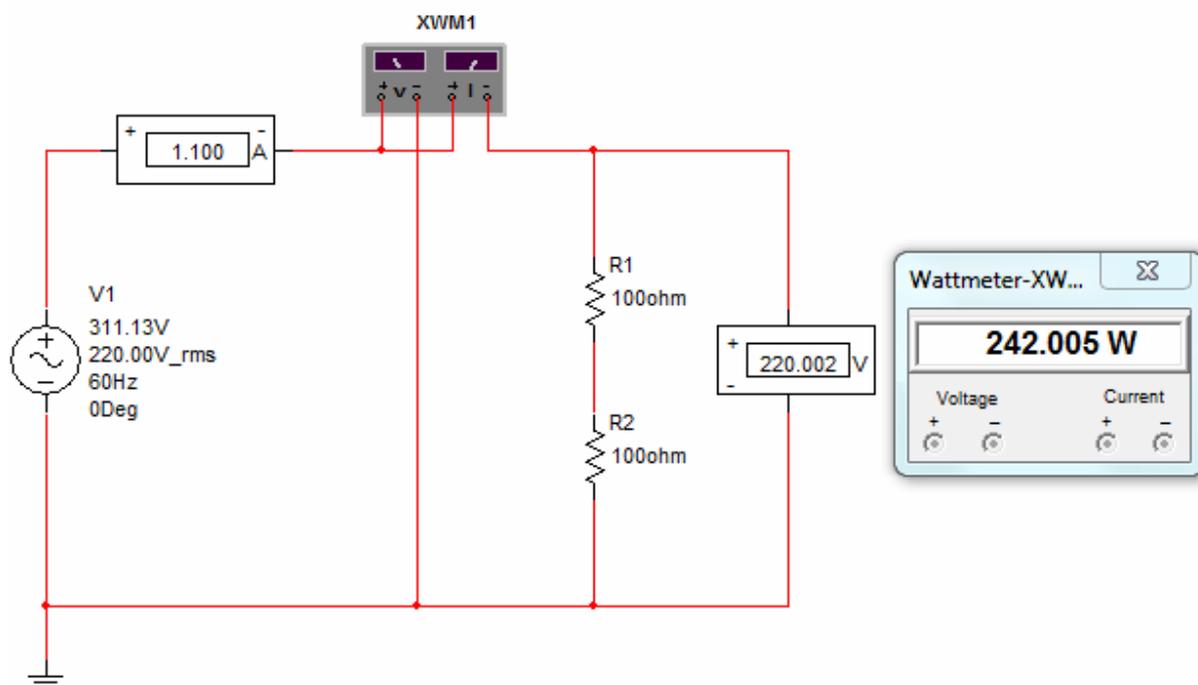


Figura 6 - Simulação do circuito com carga Resistiva.

Obtendo os seguintes resultados de:

Tensão = 220 V

Corrente = 1,10 A

Potência = 242 W

$$\text{Fator de potência} = \frac{P}{V \cdot I} = \frac{242}{220 \cdot 1,1} = 1$$

Para o circuito operando apenas com carga resistiva, o dimensionamento dos equipamentos resultaria em:

Amperímetro: $I > 1,1$ A

Wattímetro: $W > 240$ W

Disjuntor: $I > 1,1$ A

Voltímetro: 220 V

Fusível: $> 1,1$ A

2.1.3 Circuito com carga Resistiva e Indutiva

Uma carga indutiva provoca um atraso da corrente. Ela faz com que, em um circuito puramente indutivo e em regime, a corrente circule com $\frac{1}{4}$ de atraso de ciclo, ou seja, 90° , da tensão, como mostra a figura 7. Isso ocorre devido a campos magnéticos criados pelos enrolamentos de fios (bobinas) existentes nas cargas indutivas. Nesse caso o cosseno de 90° é zero, conseqüentemente o fator de potência é zero. Portanto, toda carga puramente indutiva possui Fator de Potência zero.

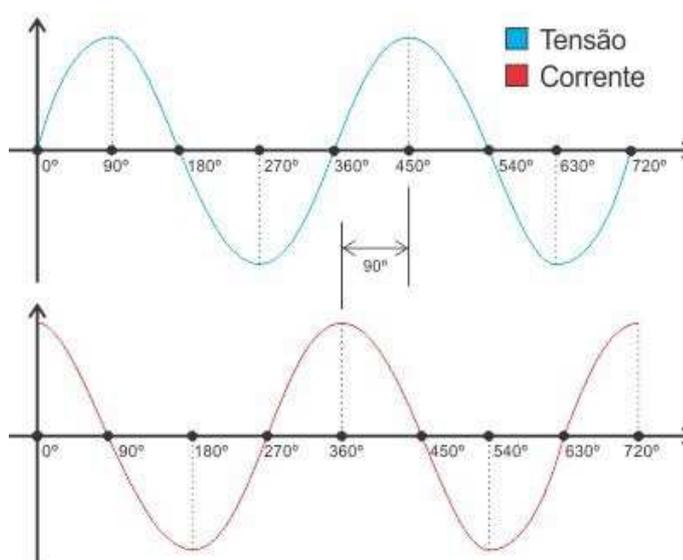


Figura 7 - Corrente 90° atrasada da Tensão.

Fonte: <http://www.eletrica.info/definicao-de-fator-de-potencia/>

A figura 8, ilustra uma carga mista Indutiva e Resistiva, provocando um atraso na Corrente de $\frac{1}{8}$ de ciclo, 45° . Logo o Fator de Potência é cosseno de 45° , igual a 0,71.

A potência ativa de um circuito elétrico é dada por $P = VI \cos(\theta)$, onde P é a potência, i é a corrente que circula e V é a tensão aplicada. Em uma carga resistiva a tensão está em fase com a corrente. Em uma carga puramente indutiva, quando a

tensão está em zero volts, a corrente está no seu máximo e quando a tensão está em seu máximo, a corrente é zero ampéres. O mesmo acontece para a carga capacitiva.

Sendo assim, a potência ativa de uma carga puramente capacitiva ou puramente indutiva é sempre zero. Devido a isso existe corrente circulando na rede e nenhuma potência sendo fornecida.

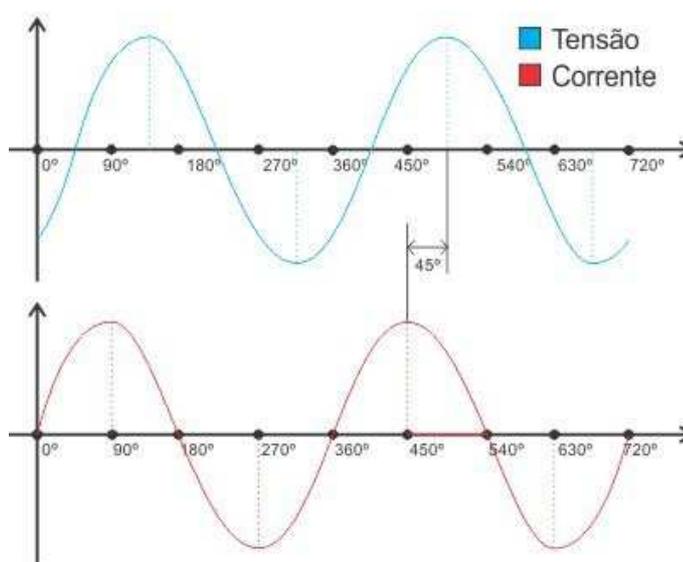


Figura 8 - Corrente 45° atrasada da Tensão.

Fonte: <http://www.eletrica.info/definicao-de-fator-de-potencia/>

O circuito da figura 9, é alimentado por uma fonte de tensão de 220 VRms, 60 Hz e possui dois resistores de 100 Ohms ligados em série e indutores de 60 mH, 140mH e 260 mH, estes ligados em série, toda a carga ligada em paralelo a essa fonte. Possui também um amperímetro, um wattímetro, um voltímetro, um cosfímetro e um disjuntor.

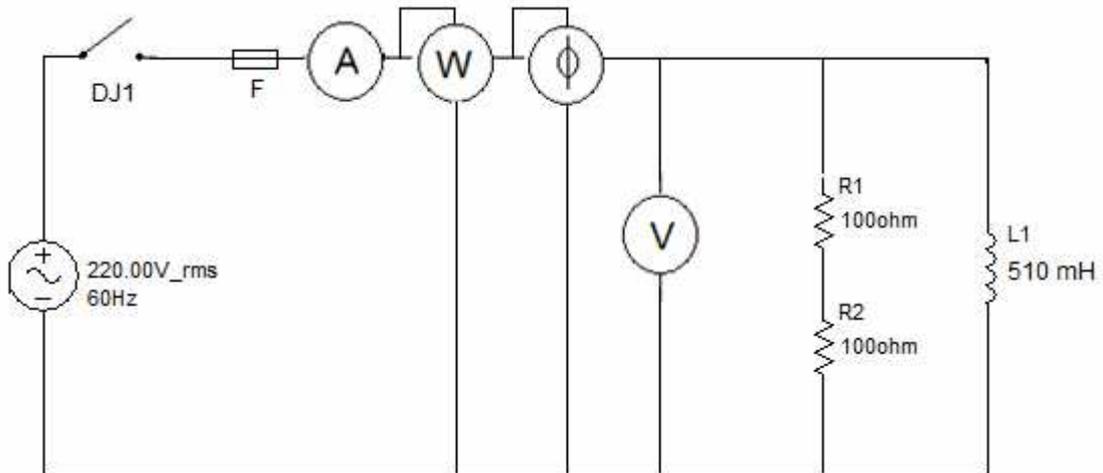


Figura 9 - Circuito com carga Resistiva e Indutiva.

Utilizando o mesmo *software* foi realizada a simulação do circuito, figura 10, para verificar os valores de tensão, corrente, potência e fator de potência.

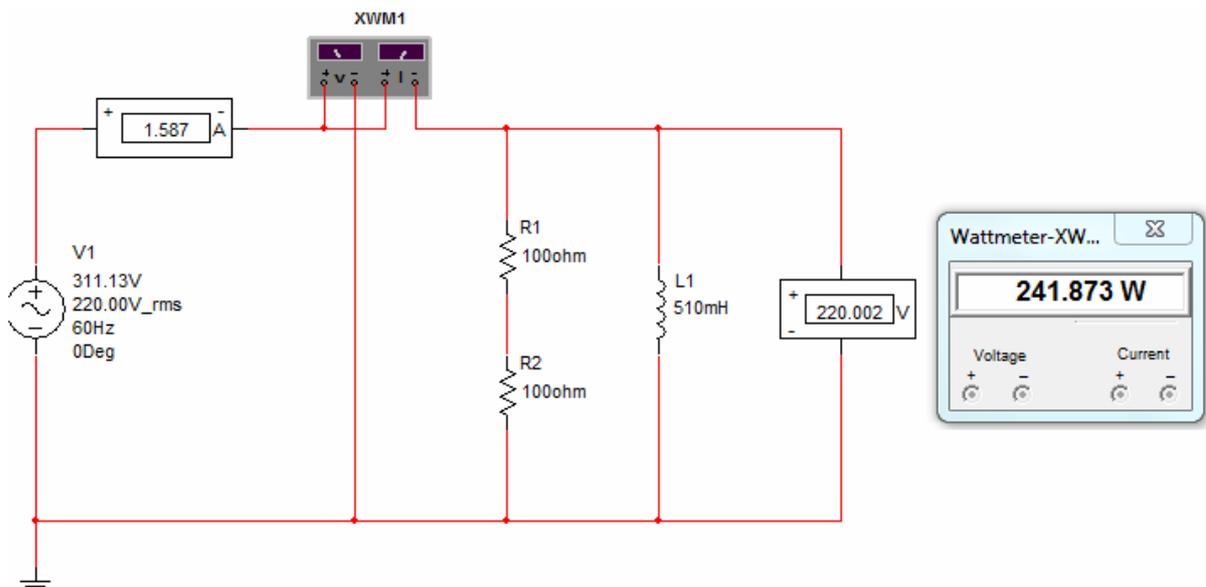


Figura 10 - Simulação do circuito com carga Resistiva e Indutiva.

Obtendo os seguintes resultados de:

Tensão= 220 V

Corrente= 1,587 A

Potência= 241,873 W

$$\text{Fator de potência} = \frac{P}{V.I} = \frac{241,873}{220.1,587} = 0,69$$

Para o circuito operando com carga resistiva e indutiva, o dimensionamento dos equipamentos resultaria em:

Amperímetro: $I > 1,5 \text{ A}$

Wattímetro: $W > 240 \text{ W}$

Disjuntor: $I > 1,5 \text{ A}$

Cosfímetro: $< 0,7$

Voltímetro: 220 V

Fusível: $> 1,5 \text{ A}$

2.1.4 Circuito com carga Resistiva, Indutiva e Capacitiva.

Uma carga capacitiva faz com que a corrente se adiante $\frac{1}{4}$ de ciclo, ou seja, 90° em relação à tensão, como pode ser visto na figura 11. Isso ocorre devido a campos elétricos criados pelos capacitores existentes nessas cargas. Nesse caso o cosseno de 90° é zero. Conseqüentemente o Fator de potência é zero. Portanto, toda carga puramente capacitiva possui Fator de Potência zero.

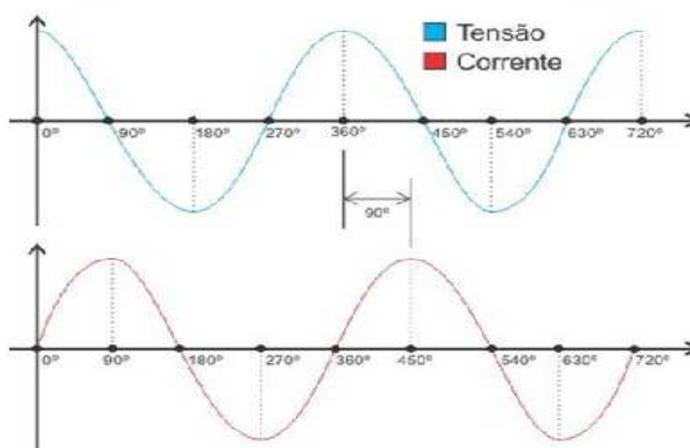


Figura 11 - Corrente adiantada 90° da Tensão.

Fonte: <http://www.eletrica.info/definicao-de-fator-de-potencia/>

O circuito da figura 12, é alimentado por uma fonte de tensão de 220 VRms, 60 Hz e possui três ramos: um ramo com dois resistores de 100 Ohms ligados em série, um ramo com um indutor de 510 mH e um ramo com um capacitor de 12 μ F para corrigir o fator de potência.

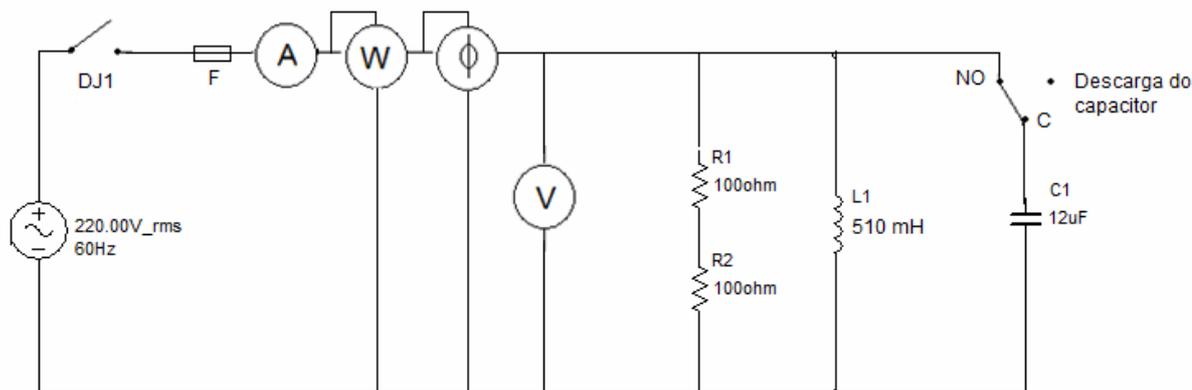


Figura 12 - Circuito com carga Resistiva, Indutiva e Capacitiva.

Com a simulação deste circuito conforme mostra a figura 13, pode-se constatar que, com o capacitor o fator de potência foi corrigido de 0,69 para 0,99.

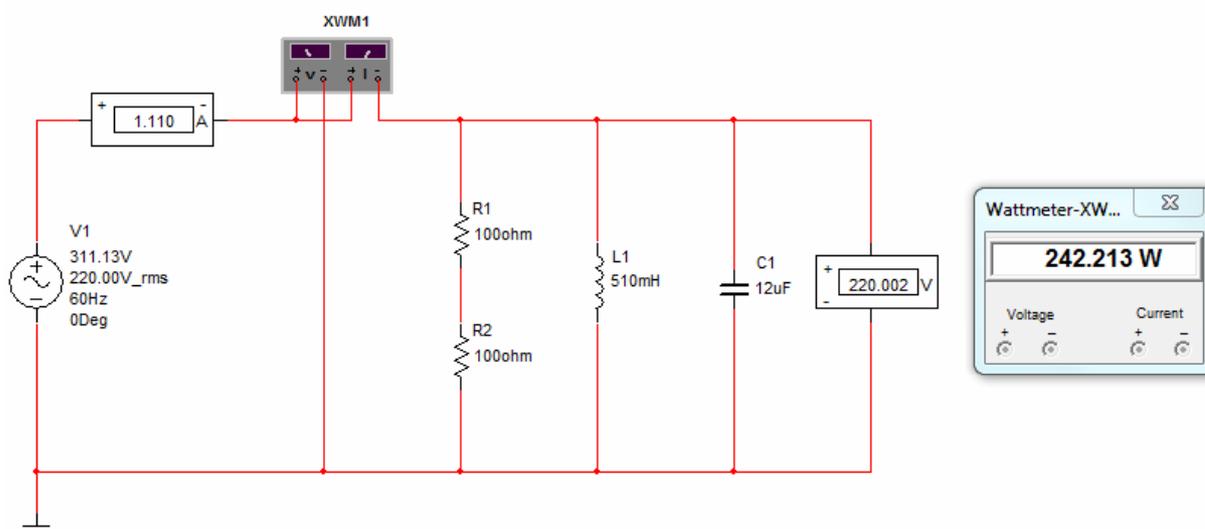


Figura 13 - Simulação do circuito com carga Resistiva, Indutiva e Capacitiva.

Os demais valores obtidos são:

Tensão = 220 V

Corrente = 1,11 A

Potência = 242,213 W

$$\text{Fator de potência} = \frac{P}{V.I} = \frac{242,213}{220.1,11} = 0,99$$

Para o circuito operando com carga resistiva, indutiva e capacitiva, o dimensionamento dos equipamentos resultaria em:

Disjuntor: $I > 1,11 \text{ A}$

Amperímetro: $I > 1,11 \text{ A}$

Wattímetro: $W > 240 \text{ W}$

Cosfímetro: $\varphi < 0,6$

Voltímetro: 220 V

Fusível: $> 1,11 \text{ A}$

2.2 ESCALA DOS INSTRUMENTOS

Assim, compilando-se os resultados, obteve-se a seguinte tabela:

Tabela 1 - Valores compilados.				
Equipamentos	Circuito R	Circuito RL	Circuito RLC	Valor de projeto
Fusível	$> 1,1$	$> 1,5$	$> 1,11$	$> 1,5 \text{ a}$
Disjuntor	$> 1,1 \text{ a}$	$> 1,5 \text{ a}$	$> 1,11 \text{ a}$	$> 1,5 \text{ a}$
Amperímetro	$> 1,1 \text{ a}$	$> 1,5 \text{ a}$	$> 1,11 \text{ a}$	$> 1,5 \text{ a}$
Wattímetro	$> 240 \text{ w}$	$> 240 \text{ w}$	$> 240 \text{ w}$	$> 240 \text{ w}$
Cosfímetro	-----	$> 0,7$	$> 0,6$	$> 0,6$
Voltímetro	$> 220 \text{ v}$	$> 220 \text{ v}$	$> 220 \text{ v}$	$> 220 \text{ v}$

A fim de contemplar todos os experimentos, os instrumentos a serem adquiridos precisam atender a coluna 5 da tabela.

3 MONTAGEM, RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentadas as etapas de montagem da bancada, os materiais adquiridos, os esquemas de montagem e os resultados dos experimentos.

Alguns dos procedimentos experimentais aqui apresentados podem ser aproveitados em práticas de ensino envolvendo a correção do fator de potência. O apêndice 1 contém as etapas de realização destes ensaios, esquemas de ligação e tabelas a serem preenchidas.

3.1 COMPRA DO MATERIAL

O circuito geral de ensaio da figura 3 é composto pelos seguintes materiais:

- 1 Amperímetro analógico 10 A;
- 1 Voltímetro analógico 250 V;
- 1 Wattímetro analógico 600 W;
- 1 Cosfímetro analógico;
- 2 Resistores 100 Ohms, 160 W e 200 W;
- 1 Indutor 510 mH;
- 1 Capacitor 12 μ F;
- 1 Disjuntor 10 A;
- 1 Chave três posições;
- 1 Fusível 3 A;

Entretanto, a encomenda de um indutor de 510 mH revelou-se difícil de se concretizar em tempo hábil, após a compra de um indutor com núcleo de ferro aberto, com baixa indutância.

Desta forma, optou-se pela compra de outros dois transformadores de forno de microondas, denominados neste texto como transformador 1 e transformador 2.

Após a realização de ensaios de caracterização para levantamento da curva de magnetização e de indutância dos indutores, cujo procedimento, tabelas e gráficos encontram-se no apêndice 2, obtiveram-se os seguintes valores de indutâncias, encontrados logo acima da região linear, próximo da saturação:

Indutor aberto: 60 mH

Transformador 1: 260 mH

Transformador 2: 140 mH

3.2 MONTAGEM

Foram reunindo-se alguns materiais, como figura 14, para fixação nos módulos em MDF e montagem da estrutura metálica.



Figura 14 - Alguns materiais reunidos.

Então foi construída a estrutura metálica, na qual os módulos em MDF serão dispostos, mostrada na figura 15.



Figura 15 - Estrutura metálica para os módulos.

Já com os módulos de MDF, fixaram-se os medidores (amperímetro, voltímetro, wattímetro e cosfímetro) nos mesmos. A estrutura de montagem permite o livre posicionamento na estrutura metálica, conforme ilustrado na figura 16.



Figura 16 - Medidores posicionados na bancada.

Após todos os equipamentos estarem fixados nos módulos MDF, reuniram-se todos na estrutura metálica, conforme figura 17, dando por fim a montagem da bancada.

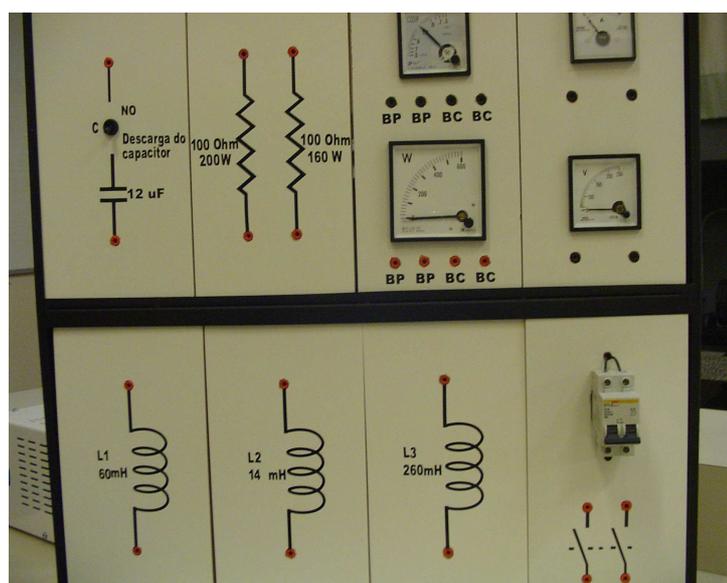


Figura 17- Bancada pronta.

3.2.1 Circuito com carga Resistiva

Para a montagem do circuito com carga resistiva, tem-se o circuito abaixo, conforme figura 18.

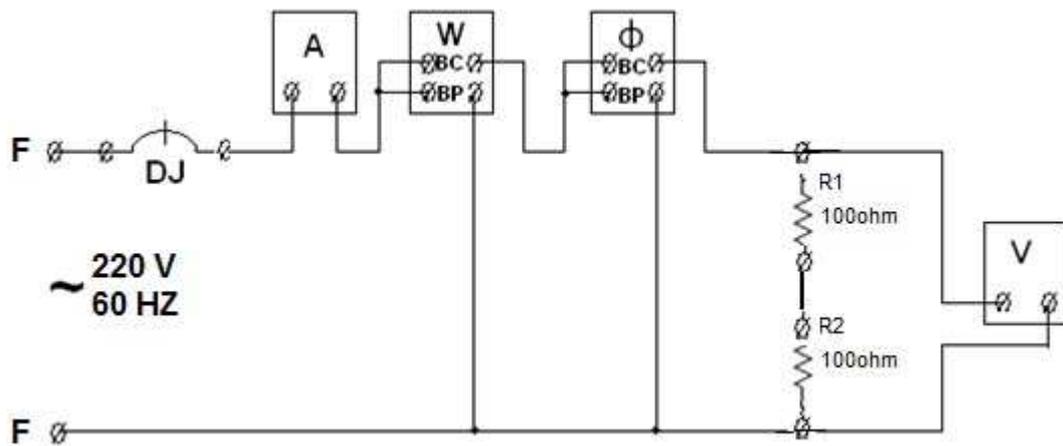


Figura 18 - Esquema de ligação do circuito com carga resistiva.

Os valores medidos para o circuito são:

Corrente= 1,1 A

Potência= 260 W

Tensão= 220 V

Cos (θ)= 1

Desta forma, os valores de potência ativa, reativa e aparente podem ser calculados como segue:

$$V = 220 \text{ V}$$

$$\cos(\alpha) = 1$$

$$R_1 = 100 \text{ ohm}$$

$$R_2 = 100 \text{ ohm}$$

$$I = \frac{V}{R} = \frac{220}{200} = 1,1 \text{ A}$$

$$P = VI \cos(\theta) = 220 \cdot 1,1 = 242 \text{ W}$$

$$Q = VI \sin(\theta) = 0 \text{ VAR}$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 242 \text{ VA}$$

Com isso, os diagramas fasoriais para a carga puramente resistiva têm a seguinte forma, conforme figura 19.

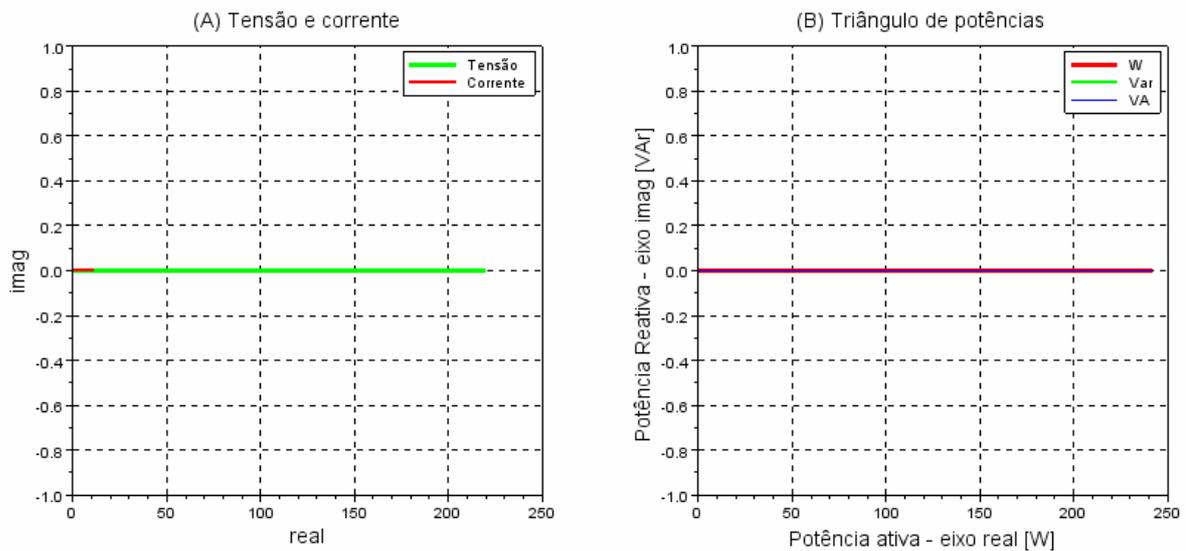


Figura 19 - (A) Tensão e corrente. (B) Triângulo de potências.

Os valores obtidos com a montagem são idênticos aos obtidos com a simulação realizada no capítulo 2.

3.2.2 Circuito com carga Resistiva e Indutiva

Para a montagem do circuito com carga resistiva e indutiva, tem-se o circuito a seguir, conforme figura 20.

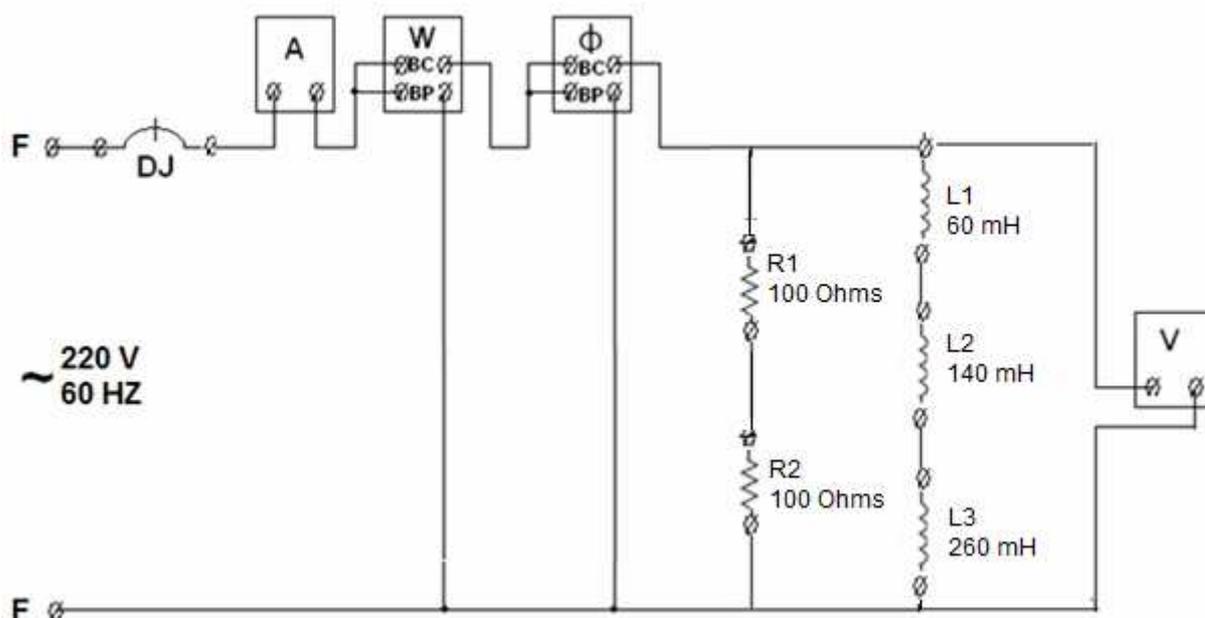


Figura 20 - Esquema de ligação do circuito com carga Resistiva e Indutiva.

Observe-se que esta montagem faz uso de 3 indutores, diferentemente da simulação apresentada no capítulo 2.

Os valores medidos para o circuito são:

Corrente= 2,2 A

Potência= 335 W

Tensão= 220 V

Cos (θ) = 0,69

Estes valores podem ser comparados com os resultados calculados de potência ativa, reativa, aparente e fator de potência, da forma como segue:

$$V = 220 \text{ V}$$

$$R = 100 + 100 = 200 \text{ ohm}$$

$$L = (60 + 140 + 260) \cdot 10^{-3}$$

$$X_L = 2\pi fL = 2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 460 \cdot 10^{-3}$$

$$Z_L = j173,41 \text{ ohm}$$

$$Z_e = \frac{R \cdot Z_L}{R + Z_L} = \frac{200 \cdot (j173,41)}{200 + j173,41} = 131,021 \angle 49,07^\circ \text{ ohm}$$

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{220 \angle 0^\circ}{131,021 \angle 49,07^\circ} = 1,67 \angle -49,07^\circ \text{ ohm}$$

$$S = VI^* = 220 \angle 0^\circ \cdot 1,67 \angle 49,07^\circ = 369,40 \angle 49,07^\circ = 242,01 + j279,09 \text{ VA}$$

$$P = 242,01 \text{ W}$$

$$Q = 279,09 \text{ VAR}$$

$$\cos(\theta) = \frac{P}{S} = \frac{242,01}{369,40} = 0,6551$$

$$FP = 65,51\%$$

Com isso, os diagramas fasoriais para uma carga mista, com resistor em paralelo com um indutor, têm a seguinte configuração, conforme a figura 21.

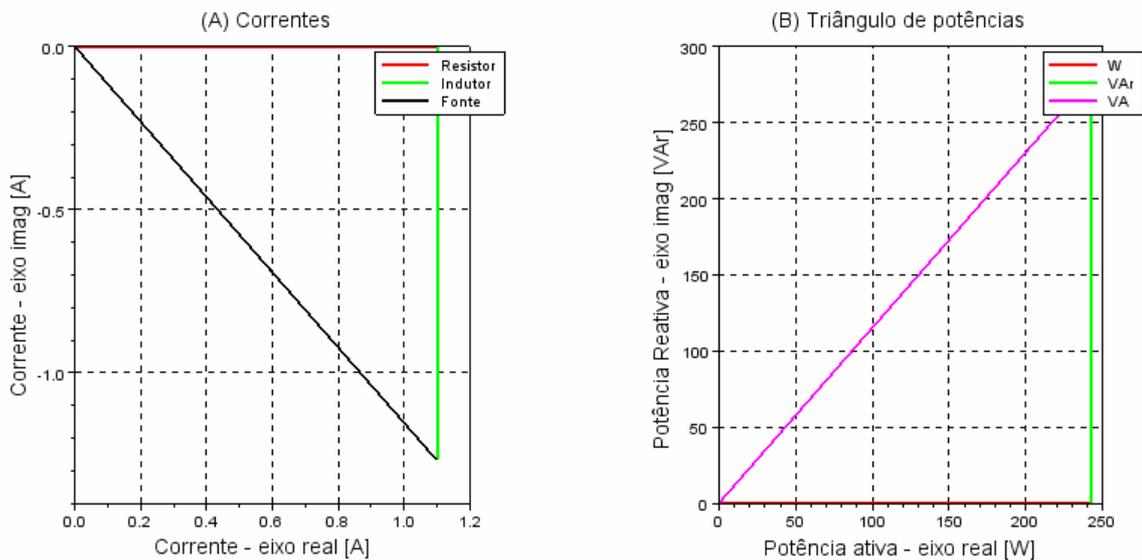


Figura 21 - (A) Correntes para o circuito RL. (B) Triângulo de potências.

Os valores obtidos com a montagem foram diferentes dos valores obtidos com a simulação e com os cálculos. Os motivos para isso estão relacionados à não linearidade da indutância dos transformadores utilizados na bancada. Os reatores

ficam saturados, diminuindo sensivelmente os valores de indutância, tal que o fator de potência da montagem é maior que o fator de potência calculado.

3.2.3 Circuito com carga Resistiva, Indutiva e Capacitiva

Para a montagem do circuito com carga resistiva, indutiva e capacitiva, tem-se o circuito abaixo, conforme figura 22.

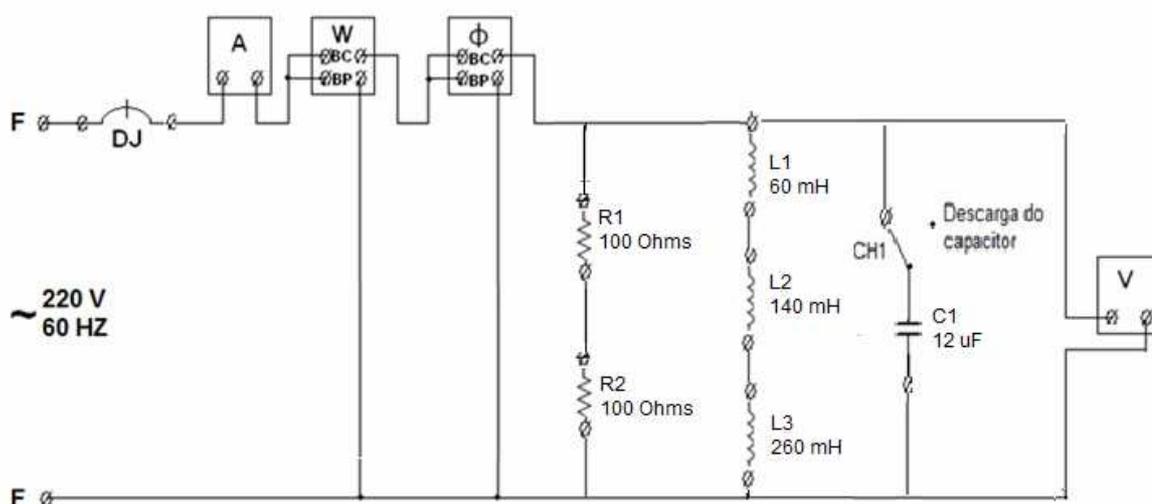


Figura 22 - Esquema de ligação do circuito com carga Resistiva, Indutiva e Capacitiva.

Da mesma forma que para a carga com resistores e indutores, este circuito utiliza 3 indutores. É diferente também do circuito simulado no capítulo 2.

Os valores medidos para o circuito são:

Corrente= 1,7 A

Potência= 340 W

Tensão= 220 V

Cos (θ) =0,92

Estes valores podem ser comparados com os resultados calculados de potência ativa, reativa, aparente e fator de potência, da forma como segue:

$$V = 220 \text{ V}$$

$$R = 100 + 100 = 200 \text{ ohm}$$

$$L = (60 + 140 + 260) \cdot 10^{-3}$$

$$X_L = 2\pi fL = 2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 460 \cdot 10^{-3}$$

$$Z_L = j173,41 \text{ ohm}$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 12 \cdot 10^{-6}} = 221,04$$

$$Z_C = -j221,04 \text{ ohm}$$

$$Y = \frac{1}{R} + \frac{1}{Z_L} + \frac{1}{Z_C} = 0,005 - j0,0012426 \text{ ohm}$$

$$Z = \frac{1}{Y} = 188,36 + j46,813 = 194,09 \angle 13,95^\circ \text{ ohm}$$

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{220 \angle 0^\circ}{194,09 \angle 13,95^\circ} = 1,13 \angle -13,95^\circ \text{ ohm}$$

$$S = VI^* = 220 \angle 0^\circ \cdot 1,13 \angle 13,95^\circ = 249,36 \angle 13,95^\circ = 242 + j60,14 \text{ VA}$$

$$P = 242 \text{ W}$$

$$Q = 60,14 \text{ VAr}$$

$$\cos(\theta) = \frac{P}{S} = \frac{242}{249,36} = 0.9704$$

$$FP = 97,04\%$$

Com isso, os diagramas fasoriais para a carga completa da bancada contendo resistores em paralelo com os indutores e com o capacitor, têm a seguinte configuração, conforme a figura 23.

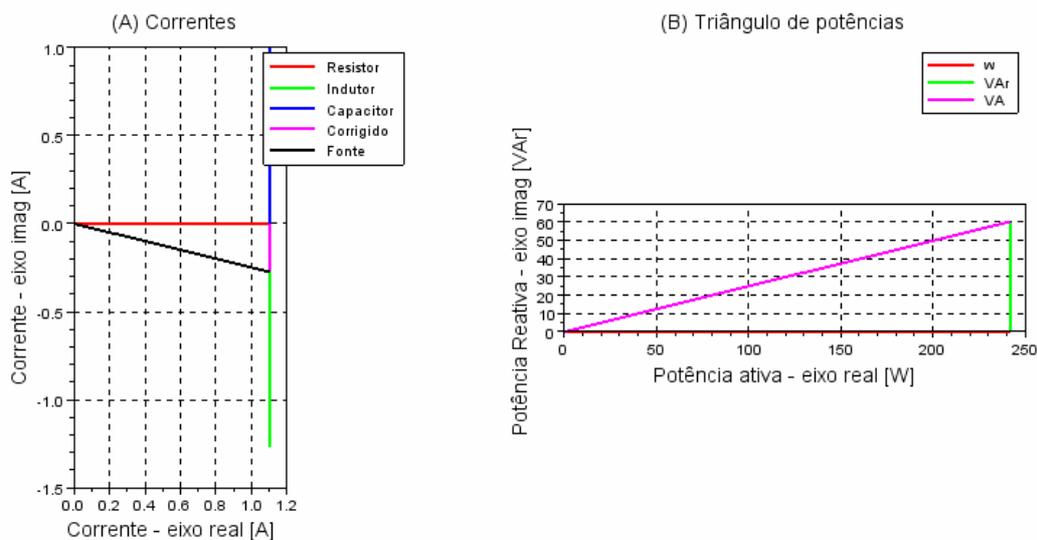


Figura 23 - (A) Correntes para o circuito RLC. (B) Triângulo de potências.

Também nesta montagem, os valores obtidos foram diferentes dos valores encontrados na simulação do capítulo 2 e com os cálculos. A não linearidade da indutância dos reatores utilizados na bancada influenciaram o funcionamento do circuito.

Entretanto, pode-se observar que houve a correção do fator de potência com o acréscimo do capacitor na terceira montagem. Tanto nos valores de fator de potência medidos como nos valores calculados.

4 CONCLUSÕES

Na introdução deste trabalho, apresentou-se como objetivo a construção de uma bancada didática para estudo da correção do fator de potência. A bancada foi construída, com os seguintes dispositivos de medição e cargas: amperímetro, cosfímetro, voltímetro, wattímetro, cargas resistivas, capacitivas e indutivas. Com a bancada é possível simular a defasagem e a correção da mesma, com cargas indutivas, capacitivas e resistivas.

Durante a aquisição dos dispositivos e materiais necessários ao projeto, houve algumas dificuldades, por isto os valores de alguns equipamentos utilizados tiveram mudanças.

A fim de se obter bons valores de leitura de corrente, propôs-se inicialmente um resistor de 91 ohms, que por não ser encontrado para aquisição, foi substituído por um de 100 Ohms com potência de 200 W.

A tensão de alimentação também foi modificada de 127 V para 220 V para reduzir custos na aquisição de equipamentos de medição; com isso foi necessária a aquisição de mais um resistor de 100 Ohms, este com potência de 160 W.

O valor da indutância também sofreu mudanças por não ser possível encontrar um indutor com valor desejado em tempo hábil, o que levou à aquisição de três indutores.

A bancada foi construída com objetivo de proporcionar aos alunos um meio adequado para aplicar os conhecimentos teóricos obtidos no decorrer do curso e ainda ressaltar a importância da correção do fator de potência através de simulações e cálculos.

O trabalho também utilizou simulações de circuito para dimensionar os dispositivos de medida, apresentou montagem prática e propôs procedimentos experimentais para aulas de laboratório.

Os resultados encontrados com as montagens foram coerentes com as simulações, mostrando a utilização de capacitores na correção do fator de potência. As diferenças encontradas, entretanto, deveram-se principalmente ao comportamento não linear dos indutores utilizados no circuito. Os indutores foram

ensaiados e os valores de indutância utilizados nos cálculos de regime permanente são aproximações obtidas a partir das curvas de indutância em função da tensão.

Como sugestões para trabalhos futuros, apresentam-se os seguintes itens:

- Inserção de mais cargas;
- Aplicação em sistemas trifásicos;
- Utilização de capacitores variáveis;
- Utilização de um controlador de fator de potência para estudo de banco automático de capacitores.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALTAZAR, Jamil de Almeida. **Definição de fator de potência**. Disponível em: <<http://www.eletrica.info/definicao-de-fator-de-potencia>>. Acesso em: 17 março 2012.

BOYLESTAD, Robert L. **Introdução à Análise de Circuitos**. São Paulo. Pearson Hall. 10 ed. 2004.

CAPACITECH. Disponível em: <http://www.capacitech.com.br/download/Fator_de_Potencia_Capacitech.pdf>. Acesso em: 11 dez. 2011.

CENA. Disponível em: <<http://www.bancodecapacitores.com/como-funciona-um-banco-de-capacitores.html>> Acesso em: 20 de abril 2012.

CREDER, Hélio. **Instalações Elétricas**. Rio de Janeiro. LTC. 15 ed, p. 269-270, 2007.

COPEL. Disponível em: <[http://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/fator_de_potencia/\\$FILE/fator_potencia.pdf](http://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/fator_de_potencia/$FILE/fator_potencia.pdf)>. Acesso em: 28 out. 2011.

GUSSOW, Milton. **Eletricidade Básica**. São Paulo. Pearson Makron Books. 2 ed, 1997.

AZEVEDO, Eduardo Ribeiro; NUNES, Luiz Antônio de Oliveira. **Lei da Indução de Faraday**. Disponível em: <<http://www.la.if.sc.usp.br/ensino/Fisica3/11-LeideInducaodeFaraday.pdf>>. Acesso em: 12 jul. 2012.

O'MALLEY, John R. **Análise de circuitos**. Rio de Janeiro, RJ: McGraw-Hill, 1983.

VALLIM, Marcos Banheti Rabello. **Relações de corrente alternada**. Disponível em:

< <http://www.das.ufsc.br/~mvallim/eletro-eletronica/circuitos-ac.pdf> >. Acesso em: 16 out. 2012.

MUSSOI, Fernando Luiz Rosa. **Sinais Senoidais: Tensão e Corrente Alternada**. Disponível em: < <http://pt.scribd.com/doc/36135435/78/POTENCIA-APARENTE-E-TRIANGULO-DE-POTENCIAS> >. Acesso em: 16 out. 2012.

TLA. **MANUAL TLA Capacitores de potência**. Disponível em: < <http://pt.scribd.com/doc/49621047/10/CONCEITOS-BASICOS> >. Acesso em: 16 out. 2012.

APÊNDICE 1

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL: Correção do fator de potência

Objetivos do ensaio

Entender como funciona a correção do fator de potência através da utilização de cargas capacitivas aplicadas a circuitos com cargas resistivas e indutivas.

Competências adquiridas com o ensaio

- Explicar sobre a forma de se corrigir o fator de potência com o uso de capacitor.
- Corrigir o fator de potência.
- Elaborar os triângulos de potência.

Teoria

A correção do baixo Fator de Potência é uma das soluções para reduzir as perdas de energia elétrica, diminuir os riscos com acidentes elétricos por superaquecimento e, também, para evitar acréscimo na fatura de energia por estar operando com baixo fator de potência.

O baixo Fator de Potência pode ser corrigido com:

- O dimensionamento correto de motores e equipamentos;
- A seleção, utilização e operação correta de motores e equipamentos elétricos em geral;
- A utilização permanente de reatores de alto Fator de Potência;
- A instalação de capacitores ou banco de capacitores onde for necessário (de preferência próximo à carga);
- A instalação de motores síncronos em paralelo com a carga, o que normalmente não é economicamente viável em indústrias.

Quando o Fator de Potência é corrigido e elevado para 0,92 ou mais, a empresa passa a utilizar energia da forma mais correta e econômica. Isto acontece por quê:

- Desaparece o acréscimo cobrado nas contas de energia elétrica com a correção do fator de potência;
- Melhora o aproveitamento da energia elétrica para geração de trabalho útil;
- Diminuem as variações de tensão (oscilações);
- Melhora o aproveitamento dos equipamentos com menor consumo;
- Aumenta a vida útil dos equipamentos;
- Os condutores tornam-se menos aquecidos, diminuindo as perdas por efeito Joule na instalação;
- Devido à liberação de carga, a capacidade dos transformadores alcança melhor aproveitamento.

Questões (devem ser respondidas antes do ensaio)

1) O menor valor para o fator de potência estabelecido pela ANEEL é:

- a) 0,90
- b) 0,92
- c) 0,99

2) Descreva como pode ser feita a correção do fator de potência.

3) Quais os benefícios de se ter um fator de potência ideal em uma instalação?

Execução do ensaio

a) Instrumentos necessários:

- Amperímetro analógico 10 A;
- Voltímetro analógico 250 V;
- Wattímetro analógico 600 W;
- Cosfímetro analógico;
- 2 Resistores 100 Ohms;
- 1 Indutor 60 mH;
- 1 indutor 140 mH;
- 1 indutor 260 mH;
- 1 Capacitor 12 μ F;
- 1 Disjuntor 10 A;
- 1 Chave Três posições;

b) Ligação e procedimentos de ensaio:

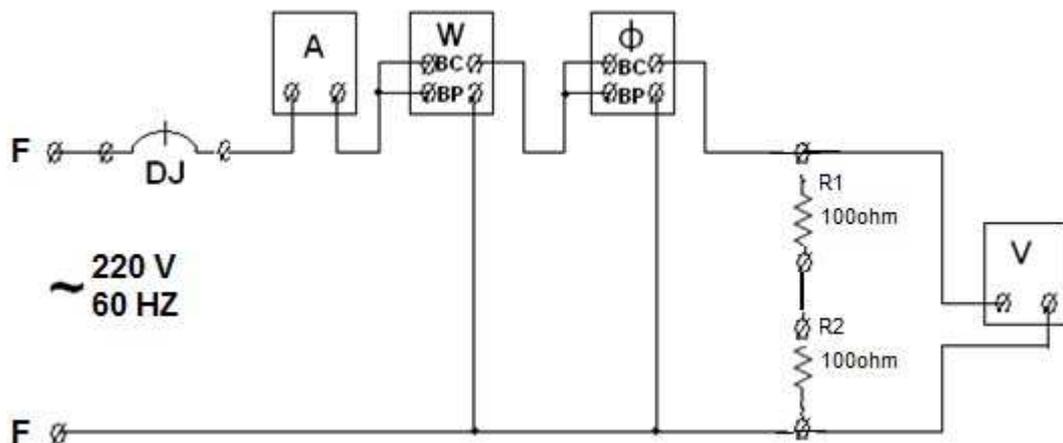


Figura 24 - Esquema para ligação do circuito 1 com Resistor.

- 1) Conectar os equipamentos conforme a figura 24.
- 2) Verificar tensão na bancada, ligar o disjuntor.
- 3) Fazer as leituras de tensão, corrente, potência e fator de potência e anotar os valores na tabela 2, para o circuito 1.
- 4) Fazer os cálculos da potência e de corrente e fazer um esboço do triângulo de potências.
- 5) Desligar o disjuntor.

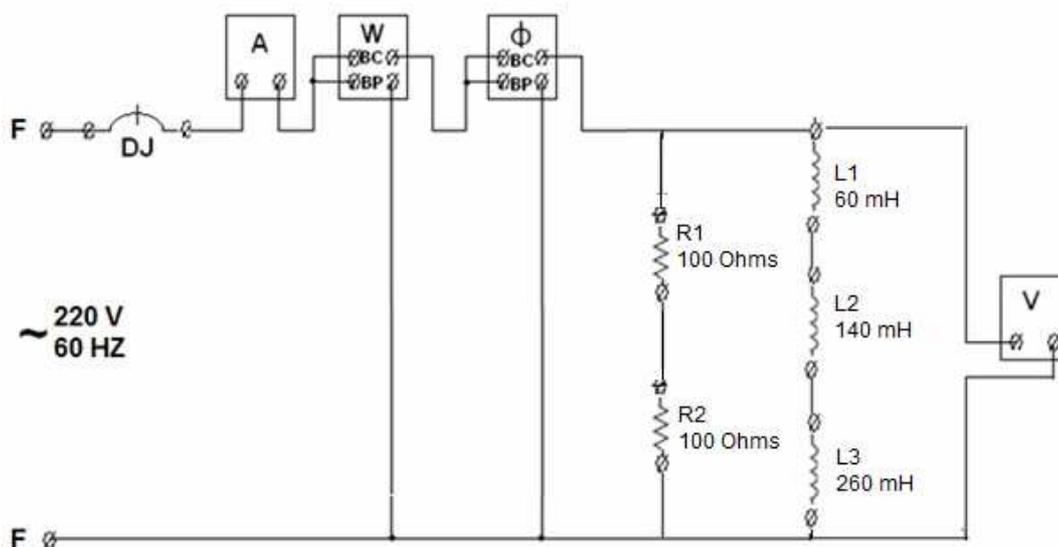


Figura 25 - Esquema para ligação do circuito 2 com Resistor e Indutor.

- 6) Conectar os equipamentos conforme figura 25.
- 7) Ligar o disjuntor.
- 8) Fazer as leituras de tensão, corrente, potência e fator de potência e anotar os valores na tabela 2, para o circuito 2.
- 9) Fazer os cálculos das potências, da corrente e do $\cos \alpha$ e fazer um esboço do triângulo de potências.
- 10) Desligue o disjuntor.

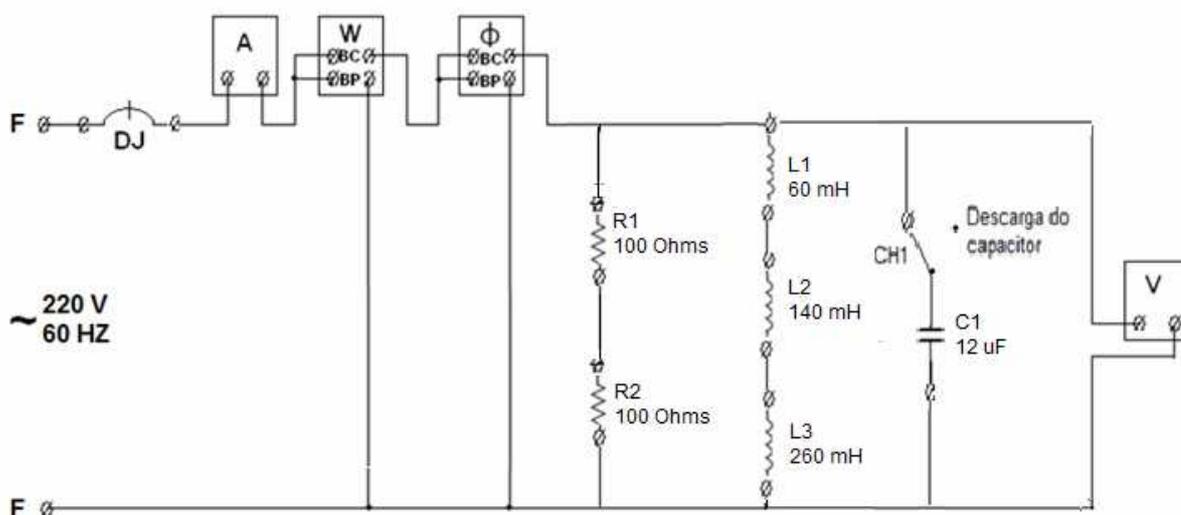


Figura 26 - Esquema para ligação do circuito 3 com Resistor, Indutor e Capacitor.

- 10) Conectar os equipamentos conforme figura 26.
- 11) Ligar o disjuntor.
- 12) Fazer as leituras de tensão, corrente, potência e fator de potência e anotar os valores na tabela 2, para o circuito 3.
- 13) Fazer os cálculos das potências, da corrente, do $\cos \alpha$ e da otimização do fator de potência com capacitor e fazer um esboço do triângulo de potências.
- 14) Desligar o disjuntor. Desconectar os cabos.

Tabela 2 - Valores coletados nas medições.

Circuito	Tensão (V)	Corrente (I)	Potência (W)	Fator de potência
1				
2				
3				

APÊNDICE 2

ENSAIO DOS INDUTORES

Este anexo descreve a realização de ensaios de caracterização para levantamento da curva de magnetização e de indutância dos indutores.

O ensaio de caracterização dos indutores seguiu o mesmo procedimento adotado para as medidas de tensão, corrente e potência de um circuito RL série. Aplicando-se tensão ao circuito, medem-se a tensão (V), a corrente (I) e a potência ativa (P), tal que:

$$R = \frac{P}{I^2} \text{ ohms}$$

$$Z = \frac{V}{I} \text{ ohms}$$

$$X = \sqrt{(Z^2 - R^2)} \text{ ohms}$$

E, desta forma, calcula-se a indutância, tal que $f = 60$ Hz.

$$L = \frac{X}{2\pi f} \text{ H}$$

Ensaio Indutor aberto

Foram realizados diversos ensaios para determinação do valor do indutor aberto, conforme tabela 3, gerando a curva de indutância da figura 27. O valor da indutância para este reator, para estudos em regime permanente, foi aproximado para 60 mH, pois fica próximo à região de saturação do mesmo.

Tabela 3 – Caracterização Indutor aberto.

Tensão (V)	Corrente (I)	Potência (W)	Indutância (H)
19,81	0,47	8	0,0572
40,2	0,98	32	0,063469
60,4	1,49	73	0,062888

80,6	2,01	133	0,060736
100	2,53	214	0,055928
120,4	3,08	326	0,049424
142,2	3,71	476	0,04384
160	4,21	620	0,039409
180,5	4,79	814	0,033693
198	5,37	1043	0,019002
220	6,03	1310	0,015262

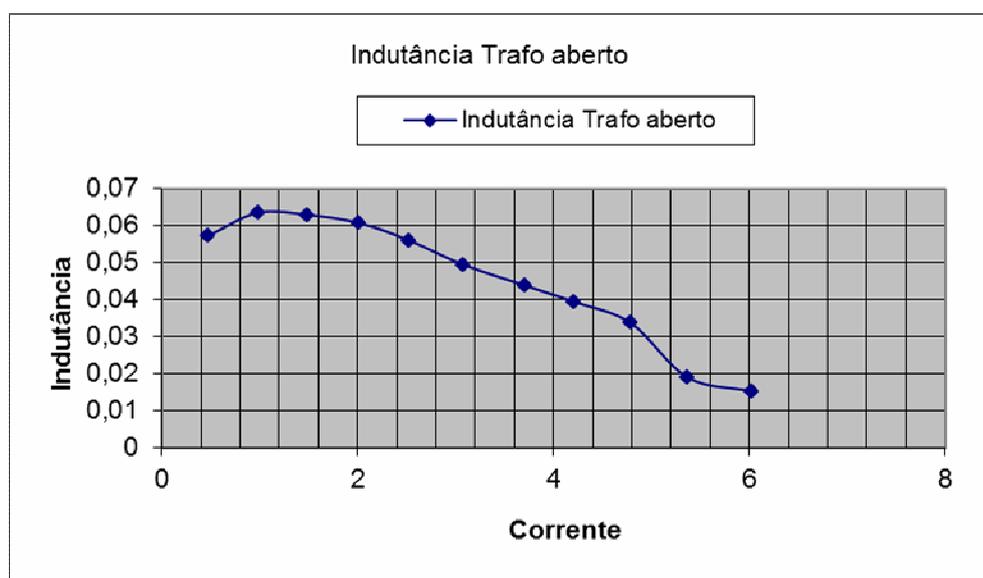


Figura 27 - Curva de Indutância, Indutor aberto.

Ensaio Transformador 1

Da mesma forma que o ensaio anterior, também foram realizados diversos ensaios para determinação do valor do Transformador 1, conforme tabela 4, gerando a curva de indutância da figura 28. O valor da indutância para este reator, para estudos em regime permanente, foi aproximado para 260 mH, pois fica próximo à região de saturação do mesmo.

Tabela 4 – Caracterização Transformador 1.

Tensão (V)	Corrente (I)	Potência (W)	Indutância (H)
19,56	0,17	3	0,131643
40,8	0,3	9	0,244506
60,7	0,44	18	0,270351
84,2	0,67	37	0,251649
101,6	0,92	61	0,221965
120,5	1,35	111	0,17309
140,2	1,93	204	0,126595
160,3	2,54	333	0,096332
180	3,15	488	0,077179
199	3,87	720	0,048408
220	4,48	938	0,039993

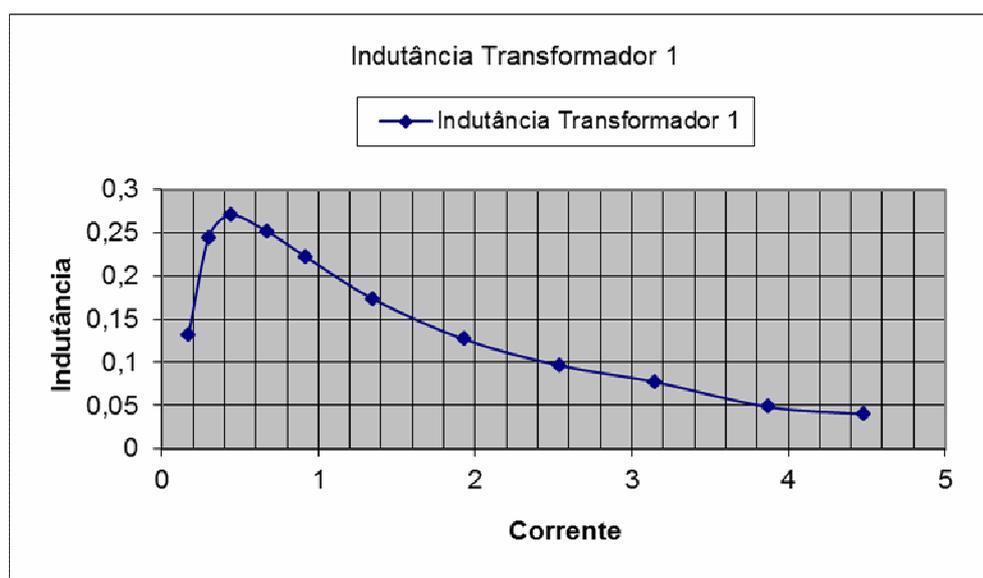


Figura 28 - Curva de Indutância, Transformador 1.

Ensaio Transformador 2.

Para este Indutor também foram realizados diversos ensaios para determinação do valor do Transformador 2, conforme tabela 5, gerando a curva de indutância da figura 29. O valor da indutância para este reator, para estudos em regime permanente, foi aproximado para 140 mH, pois fica próximo à região de saturação do mesmo.

Tabela 5 – Caracterização Transformador 2.

Tensão (V)	Corrente (I)	Potência (W)	Indutância (H)
20,3	0,37	7	0,052764
40,1	0,55	18	0,111758
60,6	0,73	35	0,134676
80,4	0,94	58	0,145462
100,7	1,22	92	0,145107
120,5	1,6	146	0,130478
140,6	2,1	233	0,109087
160,3	2,68	354	0,089894
180	3,28	520	0,068938
200	4,02	746	0,049216
220	4,51	934	0,043666

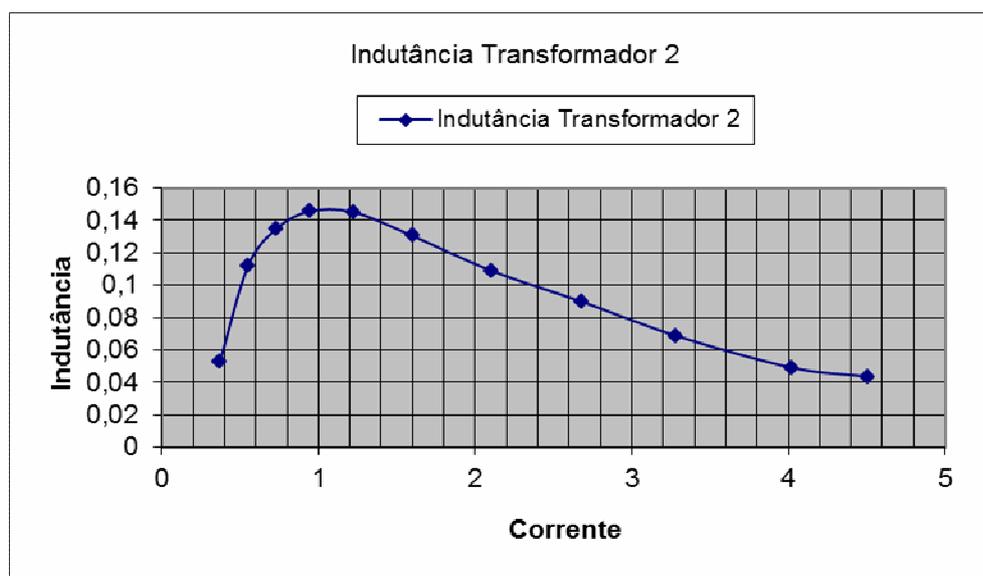


Figura 29 - Curva de Indutância, Transformador 2.