

## CAPÍTULO 2

# CONSPECTO SOBRE A TEORIA DE TRANSFORMADORES ELÉTRICOS E APLICAÇÃO PRÁTICA EM ESTUDO DE CASO SOBRE PERDAS EM TRANSFORMADORES ELÉTRICOS PORTÁTEIS

*Data de aceite: 03/06/2024*

**Iraí Tadeu Ferreira de Resende**

**Ana Cláudia de Melo Oliveira**

**Denilson Gonçalves Pereira**

**Henrique Nunes de Santana**

**Anthony de Souza Matos Leão**

**Manoel Messias Araújo Santos**

transformadores portáteis diferentes, 750 VA e 1500 VA, respectivamente, nas tensões de 127 V e 220 V, utilizando medidores de grandezas elétricas. Através da realização dos experimentos, percebeu-se que a potência máxima dissipada e o maior custo de energia foi encontrado quando realizado o experimento 2, com o transformador de 1500 VA, na tensão de 127 V, resultando numa perda de potência de 62,92 W e um custo mensal de R\$ 39,41.

**PALAVRAS-CHAVE:** Transformador Portátil, Arduino, Economia de energia

**RESUMO:** Transformadores são máquinas elétricas estáticas amplamente utilizadas na sociedade. Dentre eles existem os transformadores monofásicos. Um dos tipos de transformadores monofásicos utilizados são os transformadores portáteis ou autotransformadores, que permitem a utilização de níveis de tensão diferentes. Todavia, apesar de largamente comercializados, em diferentes níveis de potência, essas máquinas geram custos devido às perdas inerentes. Este trabalho propõe o projeto e montagem de uma bancada de medição de grandezas elétricas de baixo custo com objetivo de calcular perdas e custo de energia inerentes aos transformadores portáteis. Para isso foram realizados quatro experimentos em dois

**ABSTRACT:** Transformers are statical electric machines, used in society. Among then are the monophasic transformers. One kind of monophasic transformers are the portable transformers or autotransformers, allowing different voltage levels. Although widely commercialized, in diffente power levels, theses machines generate cost because of inerent losses. This work aims the project and assemble of a low-cost electrical magnitude measure bench to calculate energy losses and costs in portable transformers. Where performed four experiments in two differents portable transformers, 750 VA and 1500 VA,

respectively, in 127 and 220 voltage, using electrical magnitude measures equipment. Was perceived that the maximum power dissipated and the larger energy cost was found when performed the experiment 2, with the 1500 VA transformer, in 127 V, resulting a power of 62,92 W and a monthly cost of R\$ 39,41.

**KEYWORDS:** Portable Transformer, Arduino, Energy saving.

## INTRODUÇÃO

A energia elétrica é um insumo indispensável para a manutenção da sociedade moderna. Presente no cotidiano das pessoas, seu uso está diretamente ligado com a qualidade de vida das mesmas, visto que, por exemplo, favorece o aumento da produção de alimentos no setor agropecuário, disponibilizando mais alimentação, auxilia na sustentação da vida das pessoas em hospitais com a utilização de maquinários, etc.

As formas de geração da energia elétrica são variadas, podendo ser de fonte hidráulica, eólica, térmica, nuclear etc. Porém, inerentemente ligado ao sistema de geração/transmissão/distribuição de energia elétrica, faz-se necessário o uso de um equipamento que permite que esse conjunto funcione de maneira adequada: o transformador.

Os transformadores elétricos são equipamentos que estão presentes em todo o mundo. Entre algumas de suas funções estão a de variar os níveis tensão elétrica e permitir que a energia possa tanto ser distribuída ao longo do sistema elétrico de um país com maior eficiência, como também que níveis seguros de tensão elétrica possam ser utilizados em dispositivos usados no cotidiano da sociedade.

Particularmente no Brasil, também devido à grande quantidade de concessionárias de energia elétrica, os níveis de tensão nas residências podem ser diferentes ao longo dos diferentes Estados: 127 V ou 220 V. Apesar de existir no mercado equipamentos bivolt, que podem operar com os dois níveis de tensão diferentes, alguns aparelhos utilizados nas residências não possuem essa opção, sendo necessário o uso de um transformador portátil, quando não há como utilizar os diferentes níveis de tensão diretamente da rede residencial.

Transformadores portáteis são equipamentos largamente aplicados nos lares brasileiros. Eles trazem a vantagem de serem manipulados para ligar equipamentos de diferentes níveis de tensão elétrica sem a necessidade de alteração do sistema elétrico residência, sendo assim, traz comodidade para seu usuário. Contudo, seu uso indevido pode não somente acarretar um gasto indevido de energia, como também pôr em risco à vida das pessoas devido ao seu mau dimensionamento.

Nesse sentido, será analisado um estudo de caso sobre perdas de energia em diferentes transformadores portáteis de tensão elétrica e sua influência no gasto de energia elétrica mensal.

## OBJETIVOS

### Objetivo Geral

Estudar as perdas de energia em diferentes transformadores portáteis de tensão elétrica.

### Objetivos Específicos

Projetar e montar um equipamento portátil de teste para analisar as perdas nos transformadores portáteis com envio de sinal via bluetooth;

Analisar problemas relacionados ao dimensionamento do transformador portátil;

Estudar a influência das perdas em relação ao gasto mensal de energia elétrica.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### Transformador

Com o avanço da tecnologia, atrelado ao uso da eletricidade e o aumento da sua demanda, alguns equipamentos elétricos se tornaram essenciais na sociedade moderna. Dentre eles se encontra o transformador: equipamento que surgiu devido à soma de vários estudos e descobertas feitos ao longo do tempo.

Um dos pioneiros, que contribuiu para o surgimento dos primeiros transformadores, foi Hans Christian Ørsted (1777- 1851), comprovou, em 1820, que a corrente elétrica produz um campo magnético, através do uso de uma bússola e um fio energizado, dando início assim aos estudos relacionados sobre a interação direta da eletricidade e o magnetismo (Silva, 2019).

Michael Faraday (1791-1867) dando continuidade ao trabalho iniciado por Ørsted, provou o fenômeno da indução em 1831, onde uma corrente elétrica em um determinado circuito pode induzir a formação de outra em um circuito diferente (Faraday & Ribeiro, 2021).

Alguns anos depois, Joseph Henry (1797-1878), assim como Faraday, descobriu que ao movimentar um ímã próximo a uma espira de material do tipo condutor, uma corrente elétrica é produzida. Tais descobertas fizeram possível a compreensão das leis de atração e repulsão magnética. (Mussoi, 2016).

Em 1836 Nicholas Callan (1799-1864) desenvolveu um transformador de bobina de indução, a fim de gerar uma alta tensão para fornecer energia elétrica a uma máquina de grande porte.

Entretanto, somente em 1886, William Stanley, engenheiro que trabalhava para George Westinghouse, empresário do setor elétrico do Estados Unidos, em associação com outros dois engenheiros Oliver Shallenberger e Albert Schmid, conseguem produzir um transformador comercial, estimulados pelas idéias de Gaulard e Gibbs, dois inventores europeus que também contribuiram no estudo dos transformadores (Coltman, 1988).

Outros nomes foram muito importantes até o resultado do transformador que se tem hoje. Dentre eles está o metalúrgico Norman Goss que estudou as propriedades do aço silício que seria utilizado na fabricação dos núcleos ferromagnéticos dos transformadores, reduzindo as perdas por histerese e aumentando a permeabilidade dos mesmos, propriedades importantes para que um material possa se tornar viável na confecção dos núcleos dos transformadores.

## Definição do Transformador Elétrico

De modo geral, o transformador elétrico é um dispositivo responsável por modificar as tensões e correntes elétricas alternadas em um determinado sistema, através de um fluxo eletromagnético comum em ambos os lados. Na sua forma mais simples é constituído por duas bobinas separadas, denominadas bobina primária e secundária, ligadas por meio de um núcleo ferromagnético (Novais, Júnior e Silva, 2019).

De acordo com a ABNT, o transformador é um equipamento elétrico estático que, por indução eletromagnética, transforma tensão e corrente alternadas entre dois ou mais enrolamentos, sem mudança de frequência (NBR 5356).

A IEC (*International Electrotechnical Commission*) define o transformador como um equipamento estático, com dois ou mais enrolamentos, que, por indução eletromagnética, converte um sistema de tensão e correntes alternadas em outro sistema, geralmente, com tensão e correntes diferentes da original e com a frequência mantida (IEC 60076).

Além dos enrolamentos descritos pelas normas acima, há também a presença de um núcleo ferromagnético. Esse componente é de suma importância para o melhor funcionamento deste equipamento, uma vez que é também um dos responsáveis por minimizar suas perdas. Segundo Martignoni (1991), esse núcleo é geralmente do tipo laminado, formado por lâminas isoladas entre si.

Aliás, Kosow (1982), diz que ele tem como finalidade combater as correntes parasitas e perdas por histerese, já que permite a concentração do fluxo magnético induzido ao estabelecer um coeficiente de acoplamento, relação entre o fluxo magnético produzido pelo primário que atravessa o secundário, próximo a 1.

Como retrata Finocchio e Ferreira (2018):

O núcleo possui várias características, entre elas podem-se citar as correntes de excitação, magnetização e do ferro. A corrente de excitação é responsável por suprir as perdas do núcleo e por produzir o fluxo magnético, sendo este fluxo mantido pela circulação constante da corrente de magnetização.

A imagem abaixo mostra de forma detalhada os elementos que constituem um transformador. É possível perceber o núcleo do transformador (constituído de material ferromagnético), envolto por duas bobinas (enrolamentos). Com a passagem de corrente elétrica por uma das bobinas surge um fluxo magnético e conseqüentemente uma diferença de potencial é induzida na outra bobina.

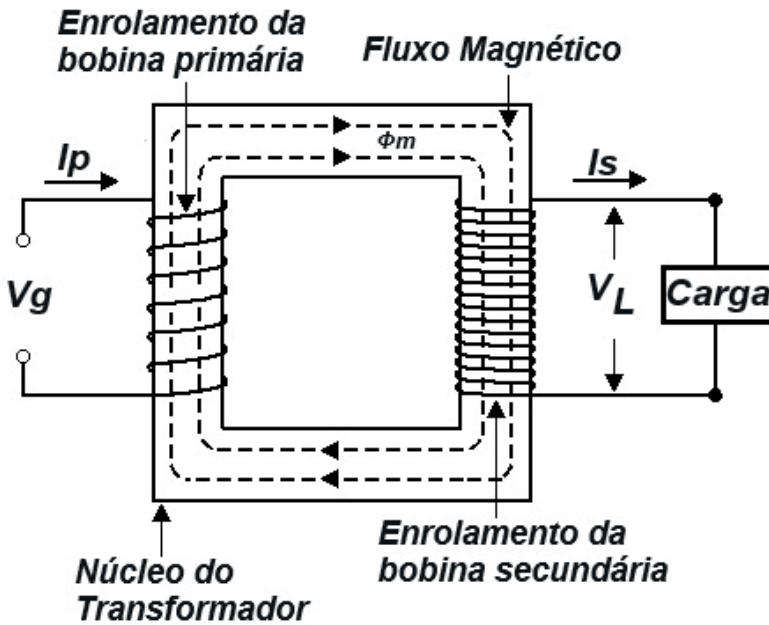


Figura 1: Transformador monofásico.

## Princípio de Funcionamento

O fenômeno conhecido como indutância mútua, é um dos princípios responsáveis pelo funcionamento do transformador, de forma simples Boylestad (2012) afirma que:

Um transformador é constituído por dois enrolamentos dispostos de maneira que o fluxo magnético variável produzido por um deles aja sobre o outro. Isso resulta em uma tensão induzida nos dois enrolamentos.

Na Figura 2 está demonstrado o fenômeno de indutância mútua.

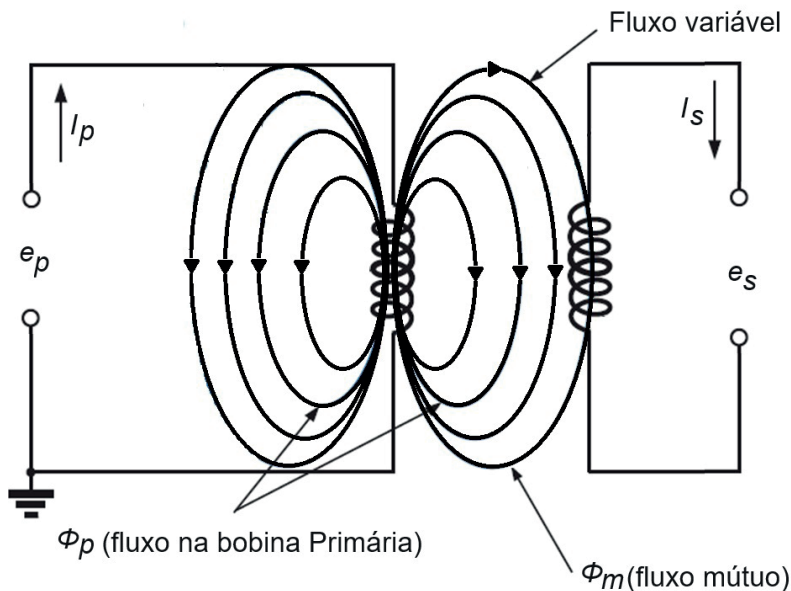


Figura 2: Indutância Mútua.

Dois princípios são necessários para compreender o princípio do transformador, a Lei da Indução de Faraday e a Lei de Lenz.

O fluxo magnético é representado pela constante  $\Phi$ . Ao supor que uma espira envolvendo uma superfície de área  $A$  está sendo submetida a um campo magnético  $B$  (Halliday, Resnick & Walker, 2016), tem-se:

$$\Phi = \int B \cdot dA \tag{1}$$

Segundo a Lei de Faraday, quando um fluxo magnético é variado com o tempo em uma bobina com  $N$  espiras, uma diferença de potencial é induzida (Azevedo et al., 2017).

O módulo da equação (2) é apresentado como:  $e_p$  sendo a f.e.m induzida,  $N_p$  é referente à quantidade de espiras,  $d\Phi_p$  é a variação do fluxo magnético e  $dt$  é a variação do tempo, assim:

$$e_p = N_p \frac{d\Phi_p}{dt} \tag{2}$$

Souza, Silva e Balthazar (2017), afirmam que a Lei de Lenz completa a de Faraday, sendo que quando o fluxo magnético através de um condutor varia no tempo, surge neste condutor uma corrente que dá origem a um campo magnético cujo fluxo tende a se opor à variação que lhe deu origem.

## Tipos de transformadores

Existem diversos tipos de transformadores que atuam com finalidades diferentes em um circuito elétrico. Dentre eles existem os transformadores de tensão, corrente, potencial e autotransformadores.

### Transformadores de Tensão

Tem como finalidade alterar os valores da tensão elétrica em um circuito devido à presença de duas ou mais bobinas acopladas em um núcleo constituído de material ferromagnético. Podem ser do subtipo abaixador, utilizado para diminuir a tensão da rede a níveis adequados de consumo ou elevador, utilizado para aumentar os níveis de tensão na bobina secundária (Alves *et al.*, 2022).

Os transformadores de tensão ainda podem ser monofásicos ou trifásicos. Os transformadores de tensão monofásicos possuem apenas duas bobinas, uma primária e outra secundária (Figura 1), enquanto os transformadores trifásicos possuem seis bobinas, três primárias e três secundárias (Figura 4).

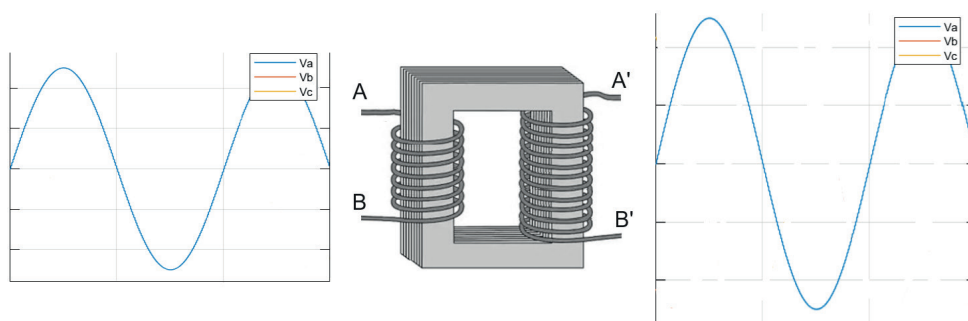


Figura 3: Transformador Monofásico.

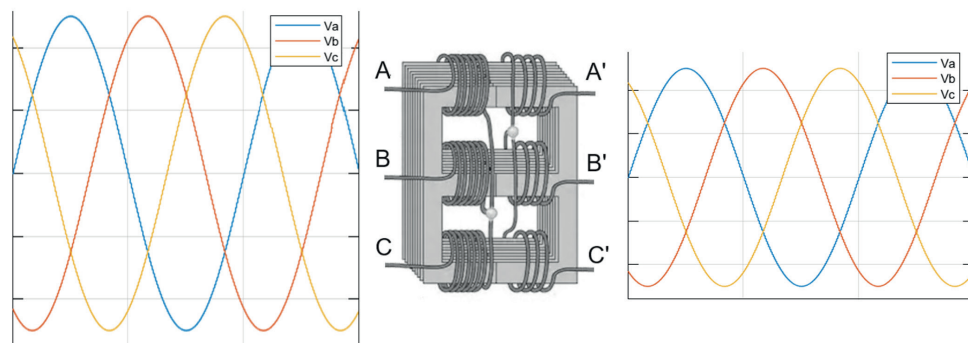


Figura 4: Transformador Trifásico.

### *Transformador de Corrente*

São transformadores que tem por propósito identificar e/ou medir a corrente elétrica que circula em um circuito, através da transformação dessa corrente em um menor valor, o que possibilita a sua medição através de instrumentos que originalmente não suportam altos níveis de corrente. A Figura 5 demonstra a ligação de um transformador de corrente em um circuito (Mendonça *et al.*, 2021).

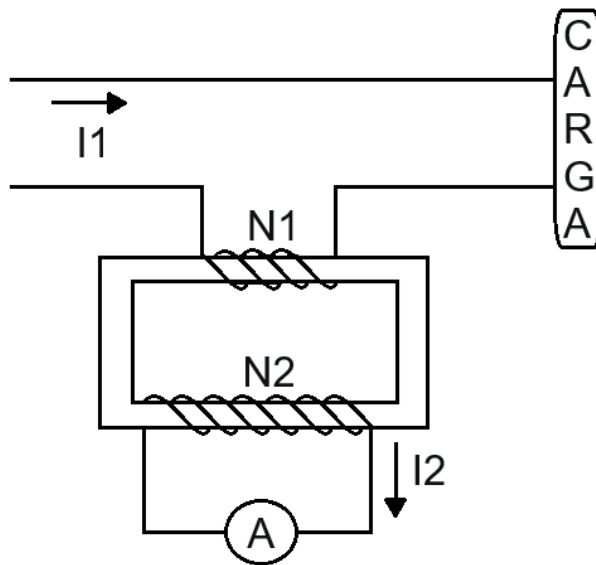


Figura 5: Transformador de Corrente.

### *Transformador de Potência*

O transformador de potência tem como finalidade reduzir o potencial elétrico que se deseja medir em um circuito a níveis seguros para o operador do instrumento de medição. Neste tipo de transformador, o enrolamento primário é ligado ao circuito o qual se deseja medir o potencial elétrico, enquanto o secundário é ligado ao instrumento de medição. Na Figura 6 está demonstrada a conexão de um transformador de potência (Segatto & Coury, 2008).



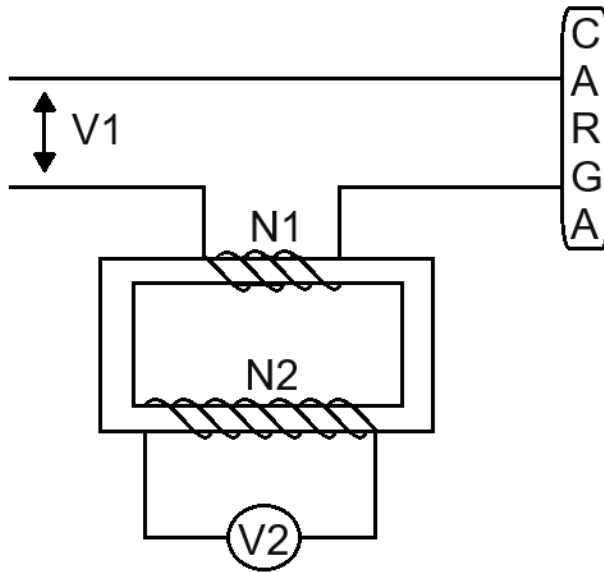


Figura 6: Transformador de Potencial.

### *Transformador Portátil Residencial*

O transformador portátil residencial, assim como o transformador convencional, é utilizado tanto para reduzir como para elevar os níveis de tensão de uma rede elétrica.

Na Figura 7 está demonstrado um transformador portátil simples. O mesmo, no exemplo, transforma a tensão da rede elétrica de 110V para 220V e vice-versa.



Figura 7: Transformador Portátil Comercial.

Possui como grande vantagem o custo reduzido para sua aquisição, quando comparado aos transformadores convencionais para cumprirem a mesma função, pois é constituído com menos materiais e facilidade para que os consumidores venham a ligar os equipamentos eletroeletrônicos residenciais.

Todavia, um problema comum é que no ato da aquisição do mesmo por parte do consumidor, em geral, a potência do autotransformador não é levado em consideração, estando incompatível com a potência do aparelho onde ele será conectado, acarretando no surgimento de níveis de correntes indesejadas que, sem a adequada proteção, podem por em risco o sistema elétrico residencial e assim causa acidentes e danos.

## **TRANSFORMADORES NO COTIDIANO**

Quando há necessidade de se conectar um equipamento, em geral eletrodomésticos, à rede elétrica e a mesma não fornece a tensão elétrica adequada para o equipamento (127 V ou 220 V), é comum se utilizar um transformador portátil. Ainda assim, a utilização desses equipamentos para o funcionamento de eletrodomésticos de uso constante deve ser sempre evitado, buscando-se alternativas, como a verificação do quadro de distribuição para obtenção da tensão necessária ou solicitação de readequação da alimentação de entrada da residência para a tensão requerida por parte da concessionária de energia. A Figura 8 demonstra duas situações: a) quando há a possibilidade da implementação da tensão elétrica de 220V em uma residência analisando a entrada a partir do medidor de energia e b) quando não há possibilidade da implementação da tensão elétrica 220V em uma residência.

Quando uma residência possui duas fases, considerando fase e neutro 127 V, é possível fazer a instalação de um equipamento 220 V, com a utilização de duas fases. Logo, é possível a readequação da rede interna e assim distribuir um circuito com 220 V. Porém, no segundo caso, quando a residência é alimentada somente com uma fase e um neutro, perfazendo 127 V, é necessário um transformador portátil, para sanar essa falta de tensão elétrica específica, excluindo-se as possibilidades anteriores.

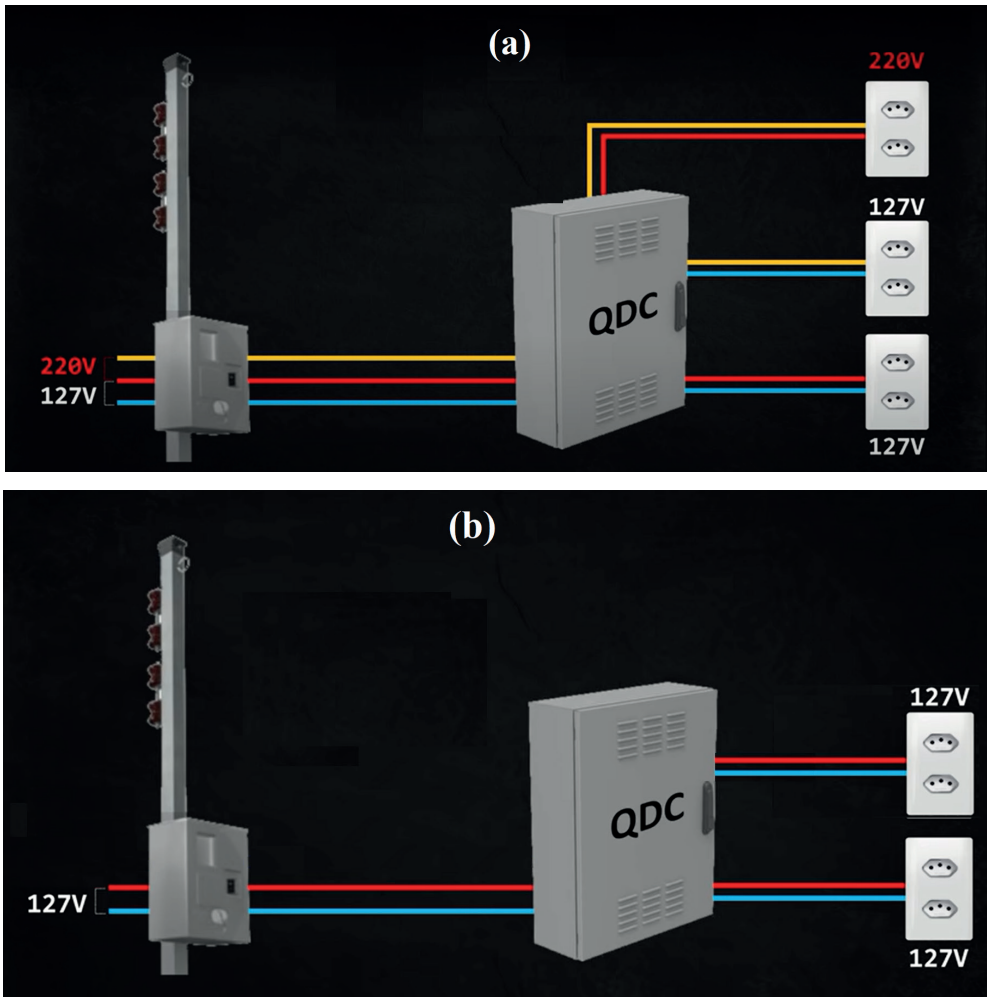


Figura 8: Esquema de distribuição de tensão elétrica em uma residência com tensão elétrica fase-fase 220 V (a) e sem tensão elétrica 220 V.

Em geral, os transformadores portáteis comerciais, são vendidos para a transformação da tensão de 127 V para 220 V ou de 220 V para 127 V. Embora, ao escolher esse equipamento, alguns cuidados precisam ser tomados a partir da própria instrução do fabricante. Dentre esses cuidados estão principalmente: a relação entre a potência máxima suportada pelo transformador, a potência do equipamento a qual será conectado ao transformador e o seu fator de potência (que depende do tipo de carga). Arelado a isso, é necessário também observar a temperatura máxima suportada pelo transformador, que está relacionada a carga conectada a ele e que, mesmo sem carga, ou seja, a vazio, o transformador consome energia, sendo o consumo maior para transformadores que suportam maior potência.

## TRANSFORMADOR IDEAL

O transformador ideal é aquele em que as perdas não são consideradas. O núcleo tem como característica uma alta permeabilidade, o que confina todo o fluxo magnético nele e a resistência dos enrolamentos não são consideradas.

É sabido que o enrolamento primário é aquele alimentado pela fonte de alimentação. Através disso, com o princípio da indutância mútua, ao ser aplicada uma tensão  $v = V\text{sen}(\omega t)$ , um fluxo magnético  $\phi_m$ , se movimenta no núcleo do transformador, responsável pelo surgimento da força eletromotriz exposta pela equação (2). Esse fluxo é dado por:

$$\Phi_m = \frac{V \cos(\omega t)}{\omega N} \quad (3)$$

Onde:  $V$  é a tensão na linha,  $\omega$  é a velocidade angular e  $N$  é quantidade de espiras no enrolamento.

É importante salientar que quando a corrente na bobina primária ( $I_p$ ) for máxima, o fluxo magnético é máximo e diretamente proporcional a corrente primária. A Figura 2, mostrada anteriormente, demonstra as correntes primária ( $I_p$ ) e secundária ( $I_s$ ) em um transformador.

Dessa forma, pode se afirmar, ao analisar a Figura 10, que:

$$i_p = \sqrt{2}I_p\text{sen}(\omega t) \quad (4)$$

e

$$\phi_m = \Phi_m\text{sen}(\omega t) \quad (5)$$

Ainda, a Lei de Faraday, para a condição ideal nos transformadores, apresenta:

$$e_p = N_p \frac{d\phi_p}{dt} = N_p \frac{d\phi_m}{dt} \quad (6)$$

Onde:  $d\phi_p$  é o fluxo associado ao enrolamento primário.

Como foi exposto, quando o transformador é considerado ideal suas perdas são ignoradas, nesse sentido pode-se deduzir que  $v = e_p$

Associando a equação (6) com a (5), substituindo  $\phi_m$  por seu devido valor, obtém-se:

$$e_p = N_p \frac{d}{dt} (\Phi_m\text{sen}(\omega t))$$

Ao aplicar a derivada na equação acima, encontra-se:

$$e_p = \omega N_p \Phi_m \cos(\omega t)$$

ou

$$e_p = \omega N_p \Phi_m \text{sen}(\omega t + 90^\circ)$$

Logo, mostra a tensão induzida  $e_p$  adiantada em relação à corrente do enrolamento primário, tendo como valor eficaz:

$$E_p = \frac{\omega N_p \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f N_p \Phi_m}{\sqrt{2}}$$

então,

$$E_p = 4,44 f N_p \Phi_m \quad (7)$$

Como neste caso, os valores dos fluxos magnéticos, tanto no enrolamento primário como no secundário, são idênticos, faz com que seja possível refazer o procedimento acima voltado para o secundário. Dessa maneira, não é difícil perceber que  $E_p = E_s$ . Considerando  $E_s$  como o valor *rms* (do inglês, *root mean square*) da tensão no enrolamento secundário.

Essas equações revelam algo muito importante para análise de transformadores. Ao correlacionar o enrolamento primário e secundário da equação (6), estabelece:

$$\frac{E_p}{E_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad (8)$$

Isso demonstra que o módulo da relação das tensões induzidas do primário e do secundário é igual a relação entre o número das espiras dos equivalentes enrolamentos.

Vale salientar aqui que a divisão entre as espiras, geralmente é apresentada como sendo intitulada como relação de transformação.

$$\alpha = \frac{E_p}{E_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad (9)$$

A mesma abordagem se aplica para as correntes, obtém-se:

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{N_s}{N_p} \quad (10)$$

Ao analisar a equação acima, percebe-se que a razão entre as correntes no primário e no secundário de um transformador é inversamente proporcional à relação entre as espiras. Admitindo isso, pode-se afirmar que a potência de entrada deve ser igual à de saída, posto que:

$$E_p I_p = E_s I_s \quad (11)$$

Rearranjando a equação (11), e substituindo na equação (8), tem-se que:

$$\frac{N_s}{N_p} = \frac{1}{\alpha} = \frac{I_p}{I_s} \quad (12)$$

Dividindo-se as equações 8 pela 12, obtemos:

$$\frac{E_p / E_s}{I_p / I_s} = \frac{\alpha}{1/\alpha} \quad (13)$$

Assim, encontra-se;

$$Z_p = \alpha^2 Z_s \quad (14)$$

Nesse contexto, a impedância do primeiro circuito do transformador, em suas condições ideais, dada pela letra  $Z_p$ , é igual ao quadrado da transformação multiplicada pela impedância da carga, sendo essa representada por  $Z_s$ .

## Transformador Real

Nos transformadores reais todas as perdas inerentes do sistema devem ser consideradas. De acordo com Alves e Nogueira (2009), as perdas são designadas como “escoamentos de potência”, uma vez que o valor da potência de saída é diferente da entrada.

Na Figura 9 está representado o modelo do transformador real.

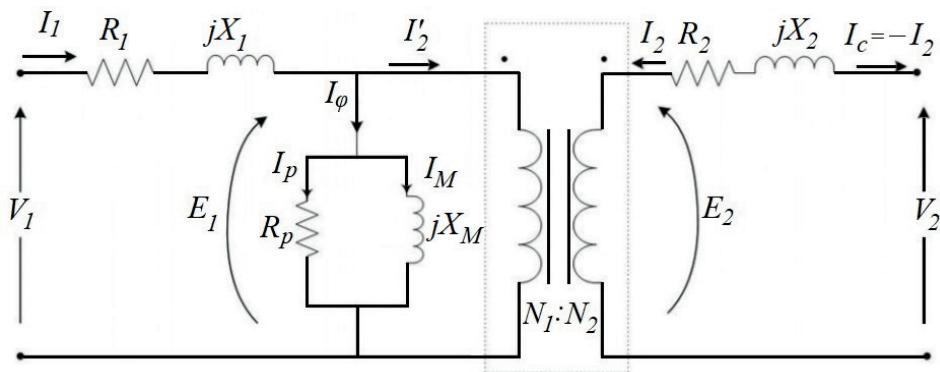


Figura 9: Modelo do Transformador Real

Fonte: Jordão, 2002 (adaptado).

Onde:

$V_1$  - tensão elétrica de entrada e  $V_2$  tensão elétrica de saída;

$I_1$  e  $I_2$  - corrente no primário no secundário, respectivamente;

$I_M$  - Indutância mútua

$R_1$  e  $R_2$  - resistências dos enrolamentos do primário e secundário, respectivamente;

$jX_1$  e  $jX_2$  - as reatâncias de dispersão do primário e secundário, respectivamente;

$jX_M$  - a reatância de magnetização;

$R_p$  - representa as perdas do núcleo;

$I_\phi$  - a corrente de excitação.

### *Perdas nos Transformadores*

Existem basicamente quatro tipos de perdas mais importantes a serem estudadas em transformadores, que estão diretamente associadas aos condutores e o núcleo ferromagnético. Duas delas constituem as perdas no ferro (também chamada de perdas no núcleo), que ocorrem devido às perdas pelo fenômeno de histerese e correntes parasitas, também chamada de perda Foucault e duas diretamente associadas às perdas no cobre (também chamada de perdas nos enrolamentos), que ocorrem uma devido à resistência elétrica do material constituinte dos enrolamentos (resistência ôhmica), traduzida como perda por efeito Joule e outra devido a fluxos de dispersão magnéticos inerentes do núcleo (Jiles e Atherton, 1984; Oliveira, 2018).

- 1. Perda por histerese:** Está relacionada à reorganização dos átomos, contidos em uma região chamada domínio magnético, provocada pela propriedade dos materiais ferromagnéticos que compõem o núcleo do transformador. A cada ciclo, uma pequena energia é gasta a fim de alinhar novamente os momentos magnéticos, conseqüentemente, devido aos diversos ciclos, há um aumento na temperatura do transformador que pode culminar na redução da eficiência do transformador. A utilização de materiais de alta permeabilidade magnética, reduz esse tipo de perda (SANTOS, 2006);

A equação (15) expressa às perdas em função do tipo de material do núcleo, frequência de alimentação da rede, tensão de alimentação do transformador, número de espiras nos enrolamentos e área da seção transversal do núcleo:

$$P_H = k \cdot \left( \frac{2 \cdot f \cdot V_1}{N \cdot A \cdot \omega} \right)^2 \quad (15)$$

Onde:

$P_H$  – Perdas por histerese;

$k$  – Constante associada ao material constituinte do núcleo;

$f$  – Frequencia da rede;

$V_1$  – Tensão eficaz da rede;

$A$  – Área da seção transversal do núcleo;

$N$  – Número de espiras;

$\omega$  – Velocidade angular;

- 2. Correntes de Foucault:** Ao aplicar um fluxo variante no tempo em um transformador associado a um campo magnético, correntes começam a circular no interior do núcleo. Essas correntes são conhecidas como correntes parasitas e elas acabam proporcionando perdas, uma vez que, devido às movimentações dos elétrons, provocam efeito Joule. Essas perdas podem ser minimizadas laminando o núcleo do transformador (Chapman, 2013);

A equação (16) expressa às perdas devido às correntes de Foucault, relacionadas ao tipo de material do núcleo, frequência de alimentação da rede, tensão de alimentação do transformador, número de espiras nos enrolamentos e área da seção transversal do núcleo:

$$P_F = k \cdot \left( \frac{2 \cdot f \cdot V_1}{N \cdot A \cdot \omega} \right)^2 \quad (16)$$



Onde:

$P_F$  – Perdas por Histerese;

$k$  – Constante associada ao material constituinte do núcleo;

$f$  – Frequencia da rede;

$V_1$  – Tensão eficaz da rede;

$A$  – Área da seção transversal do núcleo;

$N$  – Número de espiras;

$\omega$  – Velocidade angular;

3. **Perda nos enrolamentos:** Quando uma corrente elétrica percorre um condutor, neste caso do tipo cobre, surge a energia térmica, justamente pela movimentação dos elétrons. Conhecido também como efeito Joule é diretamente proporcional ao quadrado da corrente do enrolamento. Tais perdas no transformador variam com a diminuição ou aumento da potência da carga;
4. **Fluxo de dispersão:** São linhas do fluxo magnético que saem dos enrolamentos, núcleo e das partes metálicas do transformador dão origem a correntes parasitas circulantes. São representados pela adição de uma reatância indutiva de dispersão em série com cada enrolamento.

A equação (17) expressa às perdas devido ao cobre, relacionadas às resistências e correntes nos enrolamentos primário e secundário, as correntes parasitas circulantes devido ao fluxo de dispersão nos enrolamentos, núcleo e partes metálicas:

$$P_{Cobre} = Z_1.I_1^2 + Z_2.I_2^2 + P_{D1} + P_{D2} \quad (17)$$

Onde:

$P_C$  – Perdas no cobre;

$Z_1$  – Impedância na bobina primária;

$Z_2$  – Impedância na bobina secundária;

$I_1$  – Corrente na bobina primária;

$I_2$  – Corrente na bobina secundária;

$P_{D1}$  – Perdas devido o fluxo de dispersão nos enrolamentos;

$P_{D2}$  – Perdas devido o fluxo de dispersão no núcleo e materiais metálicos;

Nesse contexto, faz-se necessário considerar em um transformador real: os efeitos da resistência dos enrolamentos, como dos fluxos dispersos, e também, ter a permeabilidade finita no núcleo-não linearidade.

Outro fator relevante no transformador real é a corrente de excitação. Como retrata Alves e Nogueira (2009):

além de ser responsável pelo estabelecimento do fluxo magnético no núcleo do transformador, a corrente de excitação é responsável por suprir as perdas que o transformador apresenta quando operando em vazio, quais sejam: perdas por histerese e perdas oriundas das correntes de Foucault (ou correntes parasitas). Logo, podemos concluir que a corrente de excitação é composta por duas correntes distintas: a corrente de magnetização e a corrente que supre as perdas em vazio.

Portanto;

$$I_{exc}(t) = I_{\varphi}(t) + I_{histerese} + I_{foucault}(t) \quad (18)$$

A partir da Figura 11, deduz-se que a corrente do primário é dada pela equação abaixo:

$$I_1 = I_{\varphi} + I_2' \quad (19)$$

Sendo  $I_{\varphi}$  a corrente magnetizante do núcleo  $I_2'$  e a corrente vista do primário.

$$I_2' = \frac{N_S}{N_P} \cdot I_2 \quad (20)$$

Essa corrente magnetizante é:

$$I_{\varphi} = I_p + I_M \quad (21)$$

Ao analisar a Figura 11 pode-se extrair as equações da tensão primária e secundário do transformador real, sendo respectivamente:

$$V_1 = E_1 + (R_1 + jX_{L1})I_1 \quad (22)$$

e

$$V_2 = E_2 + (R_2 + jX_{L2})I_2 \quad (23)$$

As perdas no núcleo do transformador é:

$$P_n = I_\varphi \cdot E_1 \quad (24)$$

A regulação de tensão é uma grandeza responsável por verificar a variação de tensão entre os seus terminais do regime a vazio até a carga em plena operação. Para este efeito, a tensão primária é considerada constante. Dito isso, a regulação pode ser dada em porcentagem, logo:

$$\%R = \left( \frac{V_2 - V_2'}{V_2} \right) 100\% \quad (25)$$

A eficiência é a relação entre a potência elétrica de saída, proporcionada pelo secundário do transformador, e a de entrada, alimentada pela fonte de tensão elétrica. Entretanto, como o transformador é do caso real, as perdas devem ser consideradas, assim:

$$\eta = \left( \frac{P_{saída}}{P_{saída} + P_{perdas}} \right) 100\% \quad (26)$$

Além disso, existe uma forma de analisar como a eficiência varia com a carga. Sendo a potência de saída:

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \theta \quad (27)$$

Então,

$$\eta = \left( \frac{P_{saída}}{P_{saída} + P_{perdas}} \right) = \frac{U_2 I_2 \cos \theta}{U_2 I_2 \cos \theta + W_N + R I_2^2} \quad (28)$$

Ademais, segundo Souza e Almeida (2010), as perdas a vazio em transformador, são oriundas das correntes parasitas, Foucault e pela histerese. Essas perdas representam entre 1 a 2% das perdas nominais e dependem das condições magnéticas.

A corrente a vazio é lida através do amperímetro, sendo:

$$P_{ca} = VI\varphi \cos \theta = VI_C \quad (29)$$

$$I_M^2 = I_\varphi^2 - I_C^2 \quad (30)$$

A partir da leitura no equipamento, têm-se:

$$R_p = \frac{V_{ca}}{P_{ca}} \quad (31)$$

## Arduino e Módulo Bluetooth

O arduino é um dispositivo programável de prototipagem eletrônica, contendo, principalmente, um microcontrolador. Por permitir um conjunto de entradas e saídas analógicas e digitais, em geral, está associado a sensores, chaves e atuadores. Por possuir software e hardware livre, é largamente utilizado para o controle de uma variedade de elementos eletroeletrônicos, assim como envio de informação, seja via *wire* ou *wireless* (McROBERTS, 2010).

Em 2020, Resende *et. al.*, utilizaram o arduino, juntamente com outros dispositivos eletrônicos, para aquisição de dados de temperatura e controle do tempo de reações de síntese de ésteres etílicos. Foi possível, através da interação do arduino com sensores e atuadores, a aquisição de dados e estudo das respostas do sistema desenvolvido de forma satisfatória.

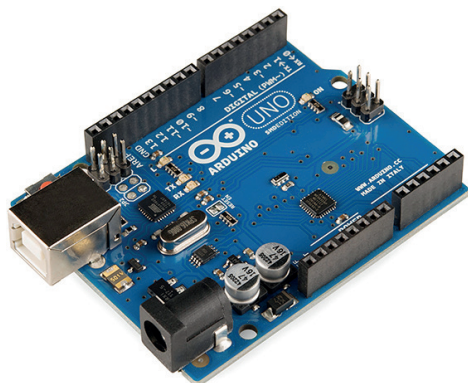
Teikari *et al.* (2012), utilizou o arduino para controle de luminosidade de LEDs em experiências para estímulos visuais, pupilometria, em roedores e em testes de fotometria em humanos. Os pesquisadores demonstraram que é possível obter resultados satisfatórios utilizando o arduino, apesar do baixo custo dos materiais utilizados.

Ferdoush & Li(2014), propuseram em seu trabalho, para monitoramento de variáveis climáticas, a utilização de um sistema de baixo custo contendo arduino e sensores associados. Os resultados demonstraram além da aquisição de dados confiáveis, a redução de custos quando comparado a outros equipamentos já utilizados no mercado.

Silva *et al.* (2019) em seu trabalho, utilizaram a plataforma arduino juntamente com um módulo bluetooth HC-05 para fazer aquisição de dados de sensores para monitoramento da integridade de uma estrutura de concreto, para recepção e emissão dos dados de deformação da mesma. Os autores concluem que a utilização do arduino e do módulo bluetooth HC-05 foram fundamentais para o envio de dados relacionados à aquisição, controle e transmissão de dados relacionados a forças, deformações e deslocamentos da estrutura trabalhada.

Na Figura 9 observamos um exemplar da plataforma Arduino (a) e do Módulo Bluetooth HC-05.

(a)



(b)

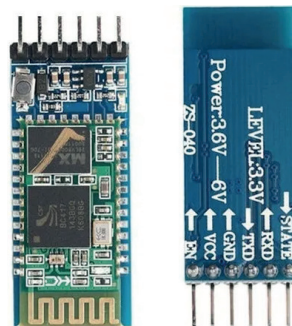


Figura 9: (a) Plataforma Arduino e (b) Módulo Bluetooth.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do estudo de caso, foi montada uma bancada portátil para medição das correntes de entrada e saída, assim como as tensões e potência dissipada no transformador, com intuito de averiguar as possíveis perdas advindas do transformador portátil. Para isso, o projeto da bancada foi dividido em três partes:

- estrutural: onde os equipamentos elétricos de medição, transmissão e auxiliares foram montados;
- elétrica de medição e auxiliar: contendo os equipamentos medidores de corrente, tensão, potência e fator de potência (multimedidores), duas tomadas 2P + T 10A, cabeamento, disjuntores e transformadores;
- transmissão de dados: contendo arduino, sensor de corrente, módulo Bluetooth e cabeamento.

O esquema ilustrativo de montagem dos equipamentos da bancada proposta está demonstrado na Figura 10. Na rede de energia foi acoplado um multimedidor que estará conectado a uma tomada onde a bobina primária do transformador foi conectada. A entrada do transformador foi conectada a um disjuntor e este conectado à outra tomada. Em seguida estes elementos foram conectados ao primeiro multimedidor e ao primeiro sensor de corrente do arduino, enquanto a bobina secundária do transformador foi conectada a um disjuntor que está conectado à tomada. Também foi conectado a tomada o segundo multimedidor e o segundo sensor de corrente do arduino, que, conseqüentemente, estavam ligados à tomada do equipamento elétrico utilizado como fonte de resistência elétrica. Por fim, ao Arduino foi conectado um módulo de bluetooth para a aquisição de dados do sistema.

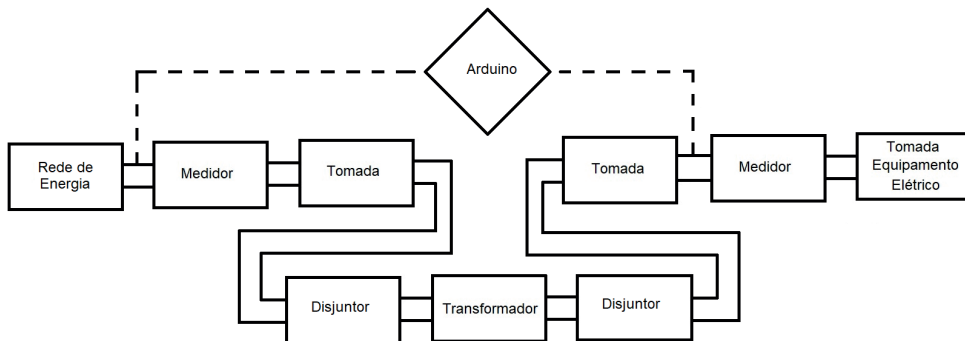


Figura 10: Fluxograma de visualização do sistema proposto.

A Figura 11 demonstra o modelo do equipamento portátil planejado que implementado na prática. É possível visualizar os medidores das grandezas elétricas em M1 e M2, o módulo bluetooth em B1, a tomada T1 ligada à bobina primária do transformador, a tomada T2 ligada a bobina secundária do transformador, a tomada T3 ligada ao equipamento (carga), e os disjuntores de proteção das bobinas primárias e secundária D1 e D2.

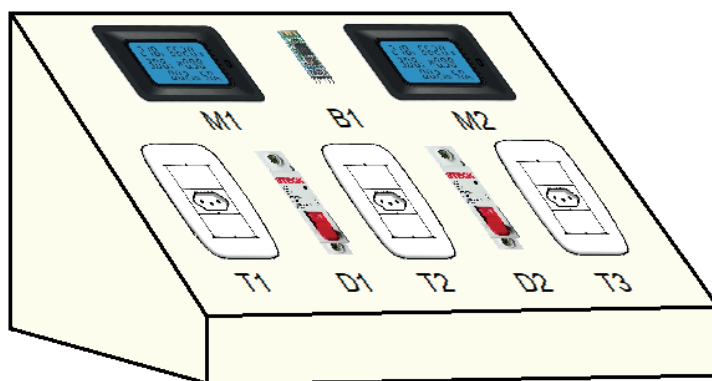


Figura 11: Modelo de equipamento portátil para medição das perdas.

Para realização deste estudo de caso, foram utilizados dois transformadores portáteis de 750 VA e 1500 VA de potência, respectivamente, escolhidos por serem facilmente encontrado à venda no comércio. Foram feitas duas medições, a vazio, nas tensões de 127 V e duas medições, a vazio, nas tensões de 220 V, com intuito de medir a corrente que circula no primário dos transformadores, a potência dissipada e relacionar com os custos gerados pelos transformadores funcionando a vazio. A Tabela 1 descreve a relação dos experimentos realizados.

Experimento	Tensão (V)	Potência do Transformador (VA)	Tempo de consumo (horas)	Potência dissipada (Wh)	Custo (R\$)
1	127	750	720		
2	127	1500	720		
3	220	750	720		
4	220	1500	720		

Tabela 1: Experimentos a serem realizados para medição de correntes, potência e custo mensal.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 12 está demonstrada as medições a vazio de correntes que circulam no transformador de 750 VA (a) e no transformador de 1500 VA (b) quando a bobina primária está ligada em 127 V. É possível perceber que já circula uma corrente nos transformadores, respectivamente de 0,48 A e 1,49A, resultando em uma perda de potência de 9,78 W e 62,92 W. Os transformadores ligados sem carga durante 24 horas e 30 dias por mês geraria um custo de aproximadamente R\$ 6,13 e R\$ 39,41 considerando o preço do kWh R\$ 0,87.

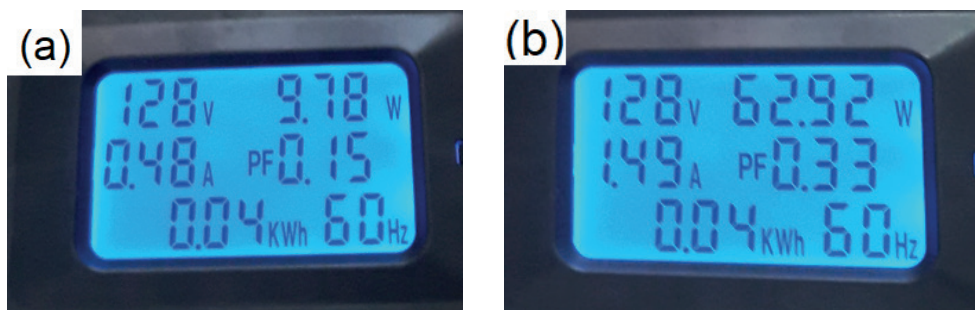


Figura 12: Medição de corrente, potência, tensão e fator de potência no transformador de 750 VA (a) e no transformador de 1500 VA (b)

Na Figura 13 está demonstrada as medições a vazio de correntes que circulam no transformador de 750 VA (a) e no transformador de 1500 VA (b) quando a bobina primária está ligada em 220 V. É possível perceber que já circula uma corrente nos transformadores, respectivamente de 0,24 A e 0,48A, resultando em uma perda de potência de 8,99 W e 37,61 W, uma diferença a menos, em porcentagem, quando comparamos com a ligação em 127 V das bobinas primárias, de aproximadamente 8,08% e 40,22%. Os transformadores ligados sem carga durante 24 horas e 30 dias por mês geraria um custo de aproximadamente R\$ 5,63 e R\$ 23,55 considerando o preço do kWh R\$ 0,87.

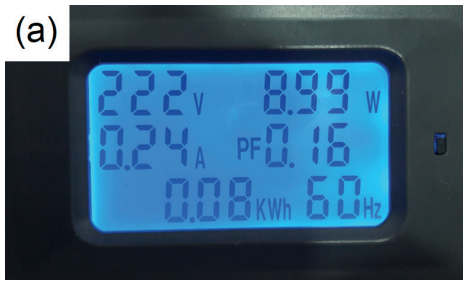


Figura 13: Medição de corrente, potência, tensão e fator de potência no transformador de 750 VA (a) e no transformador de 1500 VA (b).

Na Tabela 2 estão descritas as relações entre experimentos realizados. É possível notar os valores medidos da potência dissipada pelos transformadores com ensaios a vazio, tempo de consumo e custo mensal.

Experimento	Tensão (V)	Potência do Transformador (VA)	Tempo de consumo (horas)	Potência dissipada (Wh)	Custo (R\$)
1	127	750	720	9,78	6,13
2	127	1500	720	62,92	39,41
3	220	750	720	8,99	5,63
4	220	1500	720	37,61	23,55

Tabela 2: Relação entre potência dissipada, tempo de consumo e custo mensal nos transformadores.

Na Tabela 3 estão descritos os custos necessários para a aquisição dos equipamentos que farão parte da banca experimental.

Estrutural	Equipamento	Descrição	Quantidade	Valor (R\$)
1	MDF	Suporte para os equipamentos	1	150,00
Elétrica, medição e auxiliar	Equipamento	Descrição	Quantidade	Valor (R\$)
1	Medidores	Medição das grandezas elétricas	2	240,00
2	Tomadas 2P + T 20A	Alimentação do Transformador	2	30,00
3	Cabeamento 2,5 mm <sup>2</sup>	Energização dos equipamentos	1	30,00
4	Disjuntor	Proteção dos equipamentos	1	15,00
Transmissão de dados	Equipamento	Descrição	Quantidade	Valor (R\$)
1	Arduino	Gerenciamento de Sinais	1	40,00
2	Sensor de corrente	Medição de corrente elétrica	2	80,00
3	Módulo Bluetooth	Envio de sinal	1	25,00
4	Cabeamento	Energização dos equipamentos	1	5,00
5	Fonte	Energização do Arduino	1	15,00
Total	-	-	-	630,00

Tabela 3: Custo da bancada e seus equipamentos.



## CONCLUSÕES

Através dos primeiros ensaios com transformadores, percebeu-se a dissipação de potência nos mesmos, sem carga acoplada. Tal perda está diretamente ligada a um custo anual de centenas de reais, com base nos ensaios com os modelos utilizados. As perdas são advindas da resistência das bobinas e do núcleo, da corrente de Foucault, indutâncias de dispersão nas bobinas e por histerese e assim percebe-se na prática o surgimento de perdas de potência previstas na teoria.

Por fim, percebemos que o mau uso do transformado de potência, seja devido a um mau dimensionamento ou uso indevido do mesmo, pode acarretar em problemas graves como super aquecimento do equipamento ou mesmo gerar custos indevidos no consumo da energia elétrica.

## REFERÊNCIAS

ALVES, A.; SOUZA, E. M.; MACHADO, C. P.; LITTIKE, K. A.; SILVA, D. M. S. O transformador: teoria, construção e análise do rendimento. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 44, p 1-13, 2022.

ALVES, N. M. S; NOGUEIRA., G. J. D. C. Transformadores de potência: teoria e ensaios, tópicos essenciais. Trabalho de Conclusão de Curso. UFRJ, 2010.

AZEVEDO, Giovanni; PEIXOTO, Carlos; BARGOS, Fabiano; MENGATTI, Carlos. Gerador trifásico de baixo custo para o ensino de física. Revista Brasileira de Ensino de Física, São Paulo, v. 39, n. 1, p. 1-7, jan./2017.

BOYLESTAD, Robert L. Introdução à Análise de Circuitos. 12. ed. SÃO PAULO: PEARSON, 2012. p. 1-959.

CHAPMAN, Stephen. Fundamentos de Máquinas Elétricas, 5ª Ed, Porto Alegre, 700 pp., 2013.

COLTMAN, John. The Transformer. Scientific American, v. 258, n. 1, 86-95, 1988.

FARADAY, Michael. A história química de uma vela: as forças da matéria. Tradução de Vera Ribeiro. 1 ed. Rio de Janeiro: Contraponto, 2007.

FERDOUSH, Sheikh; LI, Xinrong. **wireless sensor network system design using raspberry pi and arduino for environmental monitoring applications**. Procedia Computer Science, v. 34, 103-110, 2014. doi: 10.1016/j.procs.2014.07.059.

FINOCCHIO, Marcos; FERREIRA, Jeferson. Estimativa das correntes elétricas no núcleo dos transformadores. Revista Técnico-Científica do CREA-PR, p. 1-16, 2018.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. Fundamentos de Física: Eletromagnetismo. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. p. 1-812.

IEC (International Electrotechnical Commission) 60076. Disponível em: <[https://webstore.iec.ch/preview/info\\_iec60076-1%7Bed3.0%7Db.pdf](https://webstore.iec.ch/preview/info_iec60076-1%7Bed3.0%7Db.pdf)>. Acesso em: 06 maio 2024.

- JILES, David; ATHERTON, David. Theory of ferromagnetic hysteresis. *Journal of Applied Physics*, v. 55, n. 6, 2115–2120, 1984. <https://doi.org/10.1063/1.333582>.
- JORDÃO, Rubens. *Transformadores*. Ed. Edgar Blücher, 1ª Ed., São Paulo, 197 pp., 2002.
- KOSOW, Irving. *Máquinas Elétricas*. Tradução de Felipe Daiello e Percy Soares. 4 ed. São Paulo: Globo, 1982.
- MARTIGNONI, Alfonso. *Transformadores*. 8 ed. São Paulo: Globo, 1991.
- MENDONÇA, Acácio; LOPEZ, Augustin; SANTANA, Danilo; NASCIMENTO, Eduarly; CARRERA, Gilberto; LEMOS, Hitalo; RIOS, Ricardo; MORAES, Ricardo. *Transformador de Corrente (TC) para subestação de distribuição (SED)*. Especificação Técnica Unificada - ETU 102. 7 ed. Brasil: Energisa, 2021.
- McROBERTS, Michael. *Arduino Básico*. 8. ed. São Paulo: Novatec, 2011.
- MUSSOI, Fernando. *Fundamentos de Eletromagnetismo*. 3 ed. Santa Catarina: Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, 2007.
- NBR 5356 – Transformador de Potência. Disponível em: <<http://www.ifba.edu.br/PROFESSORES/castro/NBR5356.PDF>>. Acesso em: 06maio 2024.
- NOGUEIRA, D. D. S; ALVES, Diego Prandino. *Transformadores de potência: teoria e aplicação tópicos essenciais*. Rio de Janeiro, p. 1-212, 2009.
- NOVAIS, Isabela, JÚNIOR, Acrísio, SILVA, Sérgio. **Modeling Three-Phase Transformers. 17th International Conference on Renewable Energies and Power Quality**, v. 17, 1-6, 2019. <https://doi.org/10.24084/repqj17.233>.
- OLIVEIRA, J. C. **Transformadores - Teoria e Ensaios** Ed. Edgar Blücher, 2ª Ed, São Paulo, 188 pp., 2018. PORTO, J. O. B. E. P. A. Michael Faraday e a história química de uma vela: um estudo de caso sobre a didática da ciência. **QUÍMICA NOVA NA ESCOLA**, p. 23-209.
- RESENDE, I.T.F.; ANDRADE, V.C.V.; CORIOLANO, D.L.; OLIVEIRA, A.C.M.; GONÇALVES, D.P.; YERGA, R. M. N.; FIERRO, J. L. G.; BILAL, M.; BHARAGAVA, R. N.; FERREIRA, L. F. R.; ALSINA, O. L. S.; FIGUEIREDO, R.T. **Use of a solar low-cost open-source controlled plant for WCOEE synthesis based on eggshell catalyst**. *Bioresource Technology Reports*, v. 11, p. 1-7, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100430>.
- SANTOS, L. **Cálculo das Perdas Técnicas dos Transformadores de Distribuição Operando em Ambiente Não-Senoidal**. Dissertação de Mestrado, UNESP, 122 F, 2006.
- SEGATTO, Ênio; COURY, Dênis. *Redes neurais aplicadas a relés diferenciais para transformadores de potência*. *Revista Controle & Automação*, v.19 n.1, 93-106, 2008.
- SILVA, A. P. B. D. *Distorções científicas perenes e suas consequências para o ensino de ciências: a relação entre eletricidade, magnetismo e calor*. **Revista Brasileira de Ensino da Física**, Revista, v. 41, n. 20180311, p. 4, mai./2019.

SILVA, João; AVI, Ana; FORTI, Nadia; PIMENTEL, Lia; BRANQUINHO, Omar. **Desenvolvimento de sistema de baixo custo para monitoramento de integridade estrutural**. *Revista Matéria*, v. 24, n. 4, 1-16, 2019. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190004.0853>.

SOUZA, Paulo; SILVA, C.; BALTHAZAR, Wagner. O arrasto magnético e as correntes de Foucault: um experimento de baixo custo com vídeo-análise. *Revista Brasileira de Ensino da Física*, RIO DE JANEIRO, v. 1, n. 2, p. 1-6, out./2018.

TEIKARI, Petteri; NAJJAR, Raymond; MALKKI, Hemi; KNOBLAUCH, Kenneth.; DUMORTIER, Dominique; GRONFIER, Claude; COOPER, Howard. An inexpensive Arduino-based LED stimulator system for vision research. *Journal of Neuroscience Methods*, v. 211, 227-236, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jneumeth.2012.09.012>.