



PROTÓTIPO DE LUXÍMETRO PARA VERIFICAÇÃO DE TENSÃO EFICAZ EM LABORATÓRIO DE ANÁLISE DE CIRCUITOS EM CORRENTE ALTERNADA

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2023.4566

Ernesto Fernando Ferreyra Ramirez - ferreyra@uel.br
Universidade Estadual de Londrina

jose fernando mangili jr - mangili@uel.br
Universidade Estadual de Londrina UEL

Luiz Fernando Schmidt - luizschmidt@uel.br
Universidade Estadual de Londrina

Daniella Yuri Hasebe - danihasebe@gmail.com
Universidade Estadual de Londrina

Arthur Bottine e Silva - arthur.bottine@uel.br
Universidade Estadual de Londrina

Resumo: Neste trabalho é apresentado um protótipo para medição de luminosidade (luxímetro), baseado no sistema microcontrolado Arduino, que foi utilizado para verificar a equivalência entre sinais elétricos AC e DC durante o laboratório de Análise de Circuitos de Corrente Alternada em um curso de graduação em Engenharia Elétrica. Após replicar o experimento algumas dezenas de vezes durante as aulas, foi encontrado um erro médio inferior a 5%. Disto, pode-se dizer que a utilização no ensino de circuitos elétricos de ferramentas de sistemas embarcados, como por exemplo o sistema microcontrolado Arduino, é bastante promissor, pois estimula o engajamento de discentes de diversos períodos do curso.

Palavras-chave: Circuitos Elétricos, Valor RMS, Arduino, Circuitos AC, Sensor de Luz.

PROTÓTIPO DE LUXÍMETRO PARA VERIFICAÇÃO DE TENSÃO EFICAZ EM LABORATÓRIO DE ANÁLISE DE CIRCUITOS EM CORRENTE ALTERNADA

1 INTRODUÇÃO

No final do século XIX, nos EUA houve uma disputa acirrada entre o uso da energia elétrica em Corrente Contínua (conhecida como CC ou DC de *Direct Current*) defendida por Thomas Alva Edison, contra a Corrente Alternada (conhecida como CA ou AC de *Alternating Current*) defendida por George Westinghouse, Nikola Tesla e Charles Proteus Steinmetz. Este evento ficou conhecido como a “Guerra das Correntes” (*Current War*), que no final foi vencida pela Corrente Alternada, pois o alcance dos geradores DC estava limitado a aproximadamente 1 milha quadrada, enquanto que a corrente alternada conseguia ser transmitida eficientemente por longas distâncias (BLY, 2018, p.61-62). Desta forma, até os dias de hoje, a potência elétrica é distribuída para residências e escritórios por correntes e tensões alternadas senoidais. Também o seu uso foi disseminado para outras áreas da Engenharia Elétrica, devido à análise de Fourier, que mostra que todos os sinais elétricos de interesse prático são constituídos de componentes senoidais (HAMBLEY, 2009, p.112).

Entretanto, apesar da utilização de energia elétrica AC nos sistemas de geração, transmissão e distribuição, uma parcela significativa dos equipamentos eletrônicos de baixa potência utiliza energia elétrica DC para, por exemplo, polarizar circuitos transistorizados ou alimentar circuitos integrados. Para isso, são utilizados circuitos retificadores que transformam as tensões de alimentação AC (que consistem em sinais senoidais com amplitudes situadas aproximadamente na faixa de 150 a 300 V) provenientes da rede elétrica, para tensões DC com valores típicos: 3,3 V; 5 V; 9 V; 12 V; entre outros. Por isso, é de suma importância para o futuro engenheiro eletricitista ou eletrônico conhecer o processo de equivalência de sinais elétricos AC (tipicamente senoidais, mas que também podem ser retangulares ou triangulares) em sinais elétricos DC.

Assim, neste trabalho são mostradas as fases de implementação e a aplicação de um protótipo para medição de luminosidade, baseado no sistema microcontrolado Arduino, que foi utilizado para verificar a equivalência entre sinais elétricos AC e DC durante o laboratório de Análise de Circuitos de Corrente Alternada em um curso de graduação em Engenharia Elétrica.

2 ORIGENS E CONCEITUAÇÃO DA CORRENTE ALTERNADA

Inicialmente, é necessário conhecer as origens da Corrente Alternada para em seguida entender a importância do estudo da sua equivalência para Corrente Contínua. Por isso, nesta seção serão relatados um breve histórico do surgimento e alguns conceitos básicos envolvendo a corrente alternada, bem como a demonstração da fórmula do seu valor eficaz.

2.1 Origens da Corrente Alternada

O primeiro sistema de fornecimento de eletricidade foi construído por Thomas Alva Edison, em 1882. Este sistema usava corrente contínua e era de pequeno porte, atendendo algumas dezenas de residências. Alguns anos depois, este sistema foi expandido e chegou a alimentar 150.000 lâmpadas com tensão média de 110 V DC (SILVA FILHO, 2007, p.72).

Em 1886, George Westinghouse inaugurou o primeiro sistema de energia elétrica a corrente alternada, que no ano seguinte chegou a alimentar 135.000 lâmpadas. O transformador aperfeiçoado por W. Stanley, permitia a distribuição da corrente alternada, que possuía valor típico de 1.000 V AC na usina geradora (SILVA FILHO, 2007, p.72). Então, estabeleceu-se uma disputa comercial entre as duas modalidades de corrente elétrica, que ficou conhecida na história como a "Guerra das Correntes" (ROBBINS; MILLER, 2010, p.466).

Em 1888, houve um aumento expressivo, em torno de 100%, no preço do cobre, que é a matéria-prima dos fios condutores de eletricidade (SILVA FILHO, 2007, p.72). Isto favoreceu os sistemas de energia em corrente alternada, pois a utilização de transformadores, dispositivos elétricos que somente funcionam em corrente alternada, permite reduzir as perdas, através do aumento das tensões e diminuição das correntes, durante a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica (BURIAN Jr.; LYRA, 2006, p.90). Por isso, o patenteamento do motor CA polifásico de Nikola Tesla em 1888, o motor de indução e os sistemas de geração e distribuição polifásicos condenaram ao fracasso o uso da energia em CC (ALEXANDER; SADIKU, 2013, p.330). Contudo, embora a geração e distribuição ainda continuem a ser realizadas tipicamente em AC, nos últimos anos, o desenvolvimento da área de Eletrônica de Potência fortaleceu a transmissão de energia elétrica em CC (BURIAN Jr.; LYRA, 2006, p.100).

Pode-se citar outra vantagem do uso de sinais AC. Segundo Orsini e Consonni (2004, p.479), o estudo de redes em regime permanente senoidal é útil para o estudo de sistemas de comunicação, pois permite decompor, através da análise de Fourier, um sinal qualquer em uma soma (finita ou infinita) de componentes senoidais.

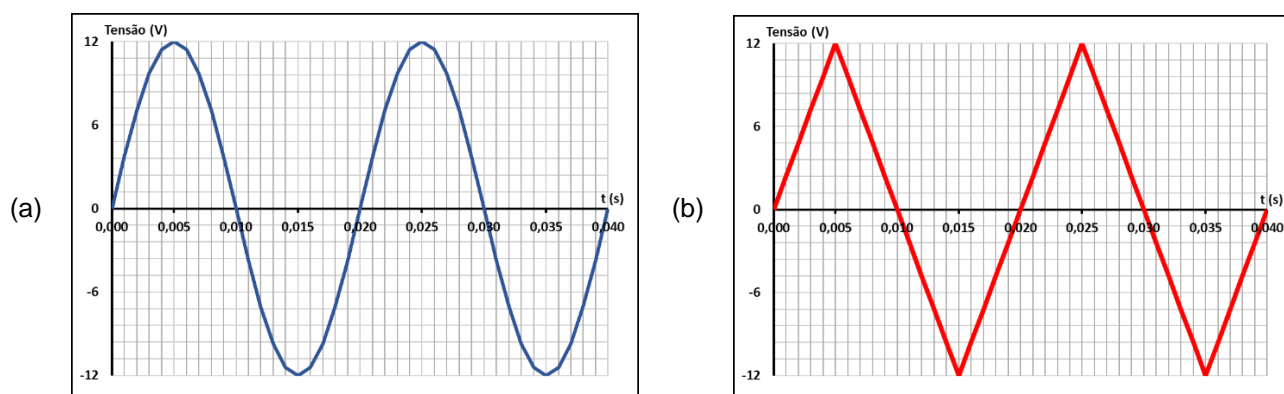
Posteriormente, em 1893, Charles Proteus Steinmetz, propôs a teoria dos Fasores, que permitiu, através do uso de álgebra complexa, analisar circuitos AC de forma similar aos circuitos CC (ROBBINS; MILLER, 2010, p.516). Isto simplificou a análise dos circuitos AC, pois a análise clássica de circuitos elétricos requeria a solução de um conjunto de equações diferenciais. Outrossim, o uso dos fasores permite adaptar facilmente os métodos de análise e os teoremas utilizados em circuitos resistivos para a análise em estado permanente senoidal de circuitos com resistores, indutores e capacitores (COSTA, 2013, p.251). Segundo Desoeh e Kuh (1988, p.251), o método fasorial é uma alternativa mais simples e elegante, baseada na ideia de representar uma senoide por um número complexo, para calcular a resposta de circuitos simples para excitações senoidais. Dessa forma, as informações relevantes para cada sinal no circuito passam a ser apenas sua amplitude e fase, que podem ser convenientemente representadas por fasores (KIENITZ, 2002, p.114). Assim, estas últimas descobertas impulsionaram ainda mais o uso da energia AC, através do aprimoramento e simplificação do estudo de circuitos em Regime Permanente Senoidal.

2.2 Conceitos básicos sobre Corrente Alternada

Uma tensão CA é aquela cujo módulo varia continuamente e cuja polaridade é invertida periodicamente, e que pode ser produzida por um gerador, chamado de alternador (GUSSOW, 1997, p.278). O termo forma de onda alternada descreve qualquer forma de

onda simétrica, incluindo ondas quadradas, dente de serra, triangulares e senoidais, cuja polaridade varia regularmente com o tempo. Entretanto, o termo AC quase sempre denota tensão senoidal (LINDEBURG, 2011, Vol. 3, p.27). Nas Figuras 1a e 1b são mostrados, respectivamente, exemplos de uma onda senoidal e uma onda triangular.

Figura 1 – Tensões AC típicas com 12 V de pico e frequência de 50 Hz: (a) Senoidal; (b) Triangular.



Fonte: Os autores.

A análise de circuitos em corrente alternada aborda funções periódicas, isto é, aquelas para as quais $y(t) = y(nT + t)$, onde n é um número inteiro e T é o período (EDMINISTER, 1991, p.36). Por isso, é importante abordar alguns conceitos básicos sobre funções periódicas. Segundo Boylestad (2012, p. 453-454), definimos:

- Forma de onda periódica: forma de onda que se repete continuamente após certo intervalo de tempo constante;
- Período (T): intervalo de tempo, dado em segundos (s), entre repetições sucessivas de uma forma de onda periódica;
- Ciclo: parte de uma forma de onda contida em um intervalo de tempo igual a um período;
- Frequência (f): número de ciclos que ocorrem em 1 s. Sua unidade é dada em Hertz (Hz).
- Amplitude de pico: valor máximo de uma forma de onda em relação ao valor médio;
- Valor de Pico (V_P): valor máximo instantâneo de uma função medido a partir do nível de zero volt. No caso de uma onda alternada, que tem valor médio zero, a amplitude de pico e o valor de pico são iguais.

Na Figura 1a, pode-se perceber que a onda senoidal se repete em ciclos de 0,02 segundos, ou seja, o período (T) será 0,02 s ou 20 ms. Então, a frequência (f), ou em outras palavras, a quantidade de ciclos que ocorrem em 1 s, será calculada pela Equação (1).

$$f = \frac{1}{\text{Duração de 1 ciclo}} = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,02 \text{ s}} = 50 \text{ Hz} \quad (1)$$

Ainda na Figura 1a, o valor médio é zero, pois trata-se de uma onda alternada. Por isso, neste caso, o Valor de Pico será igual à Amplitude 12 V. Desta forma, é possível expressar algebricamente o sinal senoidal como uma função $v(t)$ com tensão de pico V_P de 12 V e frequência f de 50 Hz, no domínio do tempo através da Equação (2).

$$v(t) = V_P \text{ sen}(\omega t) = V_P \text{ sen}(2\pi f t) = 12 \text{ sen}(100\pi t) = 12 \text{ sen}(314,16 t) \text{ V} \quad (2)$$

Observe que na Equação (2), o termo $2\pi f$ corresponde à **frequência angular**, que é representada pelo símbolo ω e cuja unidade é radianos por segundo. Essa frequência serve para transformar a variável independente tempo em um ângulo em radianos, que possa ser utilizado na função seno.

2.3 Demonstração da fórmula do Valor Eficaz

Segundo Edminister (1991, p.37), a tensão (ou corrente) eficaz é o valor efetivo em DC que equivale a um sinal AC, de tal modo que seja gerada a mesma potência média em um resistor.

Essa situação pode ser formulada algebricamente. Primeiramente, pode-se calcular a potência média em um circuito DC (P_{DC}) que consistem em uma fonte de tensão V_{DC} que gera uma corrente I_{DC} ao alimentar um resistor R , como visto na Equação (3).

$$P_{DC} = V_{DC} \cdot I_{DC} = V_{DC} \cdot \frac{V_{DC}}{R} = \frac{V_{DC}^2}{R} \quad (3)$$

Em seguida, pode-se fazer o mesmo procedimento para calcular a potência média em um circuito AC (P_{AC}) que alimenta a mesma carga R do caso DC. Nesse caso, como a carga é puramente resistiva, não há defasagem entre a tensão e a corrente AC. Logo, pode-se afirmar que se a tensão AC (v_{AC}) for um sinal periódico no tempo, representado, por exemplo, pela função $y(t)$, então a corrente AC (i_{AC}) na carga R é dada pela Equação (4).

$$i_{AC} = \frac{v_{AC}}{R} = \frac{y(t)}{R} \quad (4)$$

Desta forma, a potência média AC (P_{AC}) pode ser calculada na Equação (5).

$$P_{AC} = \frac{1}{T} \int_0^T (v_{AC} \cdot i_{AC}) dt = \frac{1}{T} \int_0^T y(t) \cdot \frac{y(t)}{R} dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{y(t)^2}{R} dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{v_{AC}^2}{R} dt \quad (5)$$

Então, se forem igualadas as potências médias DC e AC calculadas nas Equações (3) e (5), respectivamente, será encontrada a Equação (6).

$$\frac{V_{DC}^2}{R} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{v_{AC}^2}{R} dt \quad (6)$$

Na Equação (6), se for cancelado o termo comum R e isolado o V_{DC} , resultará na Equação (7).

$$V_{RMS} = V_{DC} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_{AC}^2 dt} \quad (7)$$

Perceba que a expressão obtida para V_{DC} corresponde ao valor eficaz da tensão AC. Isto corresponde ao afirmado por Nilsson e Riedel (2009, p.231), que o valor eficaz ou *RMS* (*root mean square*) de uma função periódica é definido como a raiz quadrada do valor médio da função ao quadrado.

2.4 Valor Eficaz de um sinal senoidal

No caso de um sinal senoidal, basta utilizar uma fonte de tensão AC, que pode ser modelada como visto na Equação (2). Note que neste caso, será gerada uma corrente senoidal com a mesma frequência e fase da tensão, pois segundo Nilsson e Riedel (2009, p.231), uma fonte de tensão (ou corrente) senoidal (independente ou dependente) produz uma tensão (ou corrente) que varia senoidalmente com o tempo. Disto, o valor eficaz de uma tensão AC senoidal pode ser calculada através da Equação (8).

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_{AC}^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [V_P \text{sen}(\omega t)]^2 dt} \quad (8)$$

O valor eficaz será obtido através do desenvolvimento da Equação (8), que é mostrado na Equação (9).

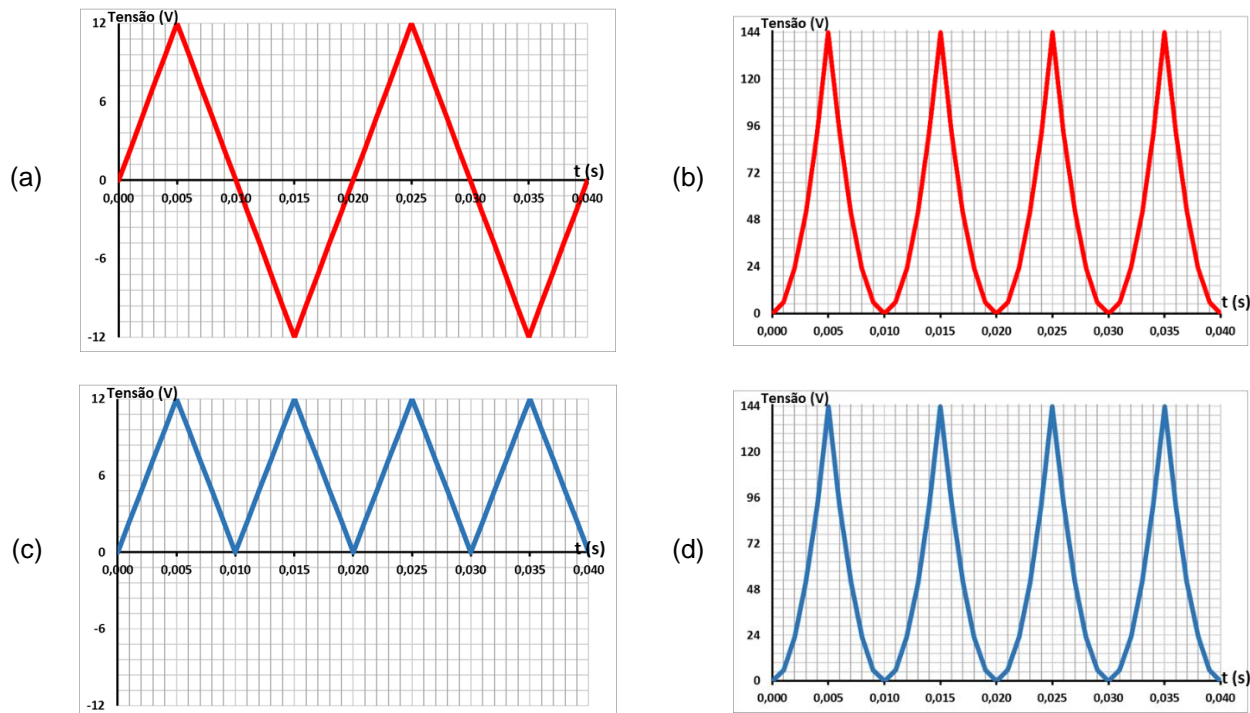
$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{V_P^2}{T} \left[\int_0^T \frac{1}{2} dt - \int_0^T \frac{\cos(2\omega t)}{2} dt \right]} = \sqrt{\frac{V_P^2}{T} \cdot \left(\frac{T}{2} - 0 \right)} = \frac{V_P}{\sqrt{2}} \quad (9)$$

Ou seja, para sinais alternados senoidais, a tensão (e a corrente) eficazes correspondem ao respectivo valor de pico dividido pela raiz quadrada de 2 (BURIAN; LYRA, 2006, p.93). Geralmente, os valores dos equipamentos projetados para operar com tensão e corrente elétrica senoidais são dados com valores eficazes e não com seus valores de pico. Na rede elétrica residencial brasileira, a tensão tem frequência de 60 Hz e tensão de 220 V eficazes (SANTANA; SILVA Jr., 2011, p.174). Em muitas localidades, a distribuição de energia elétrica é feita em 127 V eficazes. Isso significa que a amplitude da tensão senoidal fornecida é de aproximadamente 180 V (BURIAN; LYRA, 2006, p.93).

2.5 Valor Eficaz de um sinal triangular

Algumas vezes, é necessário calcular os valores RMS de tensões e correntes periódicas que não são senoidais. Para isso, basta utilizar a definição do valor RMS (HAMBLEY, 2009, p.115). Assim, ao analisar a Equação (7), percebe-se que é necessário encontrar a média da função AC, no caso v_{AC} , ao quadrado. Com isso, em $v_{AC}(t)^2$ a parte negativa da onda triangular mostrada na Figura 1b se comportará da mesma forma que a parte positiva. Neste caso, no sinal $v_{AC}(t)^2$, o período cairá pela metade e a frequência dobrará em relação ao sinal $v_{AC}(t)$. Isto pode ser visualizado na Figura 2.

Figura 2 – Estudo do sinal triangular: (a) Sinal AC original com 12 V de pico; (b) Sinal AC original elevado ao quadrado; (c) Módulo do sinal AC original; (d) Módulo do sinal AC elevado ao quadrado.



Fonte: Os autores.

Conforme visto na Figura 2, ao invés do sinal AC original (Figura 2a), pode-se utilizar o seu módulo (Figura 2c) para calcular o valor RMS, pois ambos terão o mesmo comportamento ao serem elevados ao quadrado (Figuras 2b e 2d). Perceba que esse módulo equivale ao sinal AC original retificado em onda completa.

Então, um sinal triangular genérico com valor de pico V_P e período T , similar ao mostrado na Figura 2c, pode ser modelado através de duas retas, como mostrado nas Equações (10) e (11).

$$V_{AC}(t) = \frac{2V_P}{T} \cdot t \quad \text{para } 0 \leq t \leq \frac{T}{2} \quad (10)$$

$$V_{AC}(t) = 2V_P - \frac{2V_P}{T} \cdot t \quad \text{para } \frac{T}{2} \leq t \leq T \quad (11)$$

Se as Equações (10) e (11) forem aplicadas à fórmula do valor RMS mostrada na Equação (7), será encontrada a Equação (12).

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \left[\int_0^{T/2} \left(\frac{2V_P}{T} \cdot t \right)^2 dt + \int_{T/2}^T \left(2V_P - \frac{2V_P}{T} \cdot t \right)^2 dt \right]} \quad (12)$$

Note na Figura 2c que cada ciclo da onda triangular é formado por um triângulo isósceles. Então, a área delimitada pela parte ascendente, mostrada na Equação (10), é igual à área delimitada pela parte descendente mostrada na Equação (11). Esta simetria também pode ser observada para o sinal correspondente ao quadrado da onda triangular (Figura 2d). Visto que a integral de uma função corresponde à área delimitada entre esta função e o eixo dos tempos, pode-se obter a equivalência mostrada na Equação (13).

$$\int_0^{T/2} \left(\frac{2V_P}{T} \cdot t \right)^2 dt = \int_{T/2}^T \left(2V_P - \frac{2V_P}{T} \cdot t \right)^2 dt \quad (13)$$

Desta forma, usando a igualdade mostrada na Equação (13), pode-se simplificar a Equação (12) e calcular o valor RMS de uma onda triangular, como visto na Equação (14).

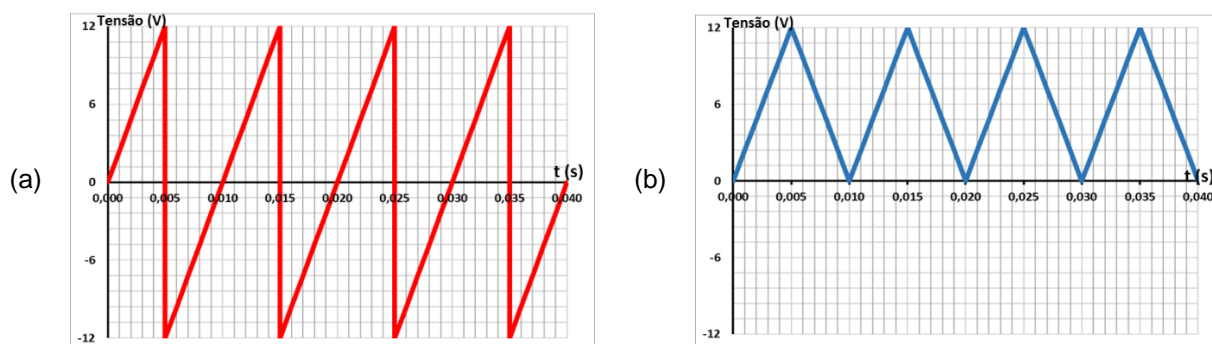
$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{T/2} \left(\frac{2V_P}{T} \cdot t \right)^2 dt} = \sqrt{\frac{2}{T} \cdot \left(\frac{2V_P}{T} \right)^2 \cdot \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{T}{2} \right)^3} = \sqrt{\frac{V_P^2}{3}} = \frac{V_P}{\sqrt{3}} \quad (14)$$

O resultado da Equação (14) também pode ser encontrado em uma onda do tipo Dente-de-Serra, como mostrada na Figura 3a. Note que o módulo desse sinal, que é visto na Figura 3b, corresponde à mesma onda triangular vista na Figura 2c. Então, os cálculos mostrados nas Equações (10) a (14) também serão aplicáveis para a onda Dente-de-Serra.

Assim, conclui-se que para ondas AC triangulares (similares à mostrada na Figura 2a) e Dentes-de-Serra (similares à mostrada na Figura 3a), o valor RMS será o seu Valor de Pico (V_P) dividido pela raiz quadrada de três, como visto na Equação (14).

Figura 3 – Processamento do sinal Dente-de-Serra:

(a) Sinal AC do tipo Dente-de-Serra com 12 V de pico; (b) Módulo do sinal AC Dente-de-Serra.



Fonte: Os autores.

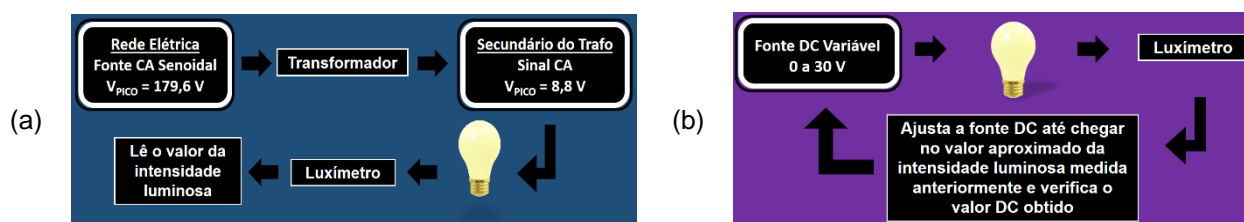
3 MEDIÇÃO DO VALOR EFICAZ USANDO LUXÍMETRO

Nesta seção, serão mostrados detalhes da concepção do experimento, bem como detalhes construtivos do luxímetro e a sua aplicação no laboratório de Análise de Circuitos em Corrente Alternada.

3.1 Concepção do uso do luxímetro para medir Valor Eficaz

A ideia de utilizar o luxímetro veio da definição do valor RMS, ou seja, o “equivalente DC de um sinal AC” como citado anteriormente na seção 2. Então, se levarmos em consideração a tensão em uma lâmpada incandescente, que suporta os dois tipos de tensão desde que a sua potência máxima não seja atingida, é possível fazer esta equivalência se a quantidade de intensidade luminosa for a mesma para a alimentação AC e DC. Assim, o procedimento adotado pode ser resumido na Figura 4.

Figura 4 – Esquema de uso do luxímetro para medir valor eficaz: (a) Montagem inicial em corrente alternada; (b) Montagem em corrente contínua.

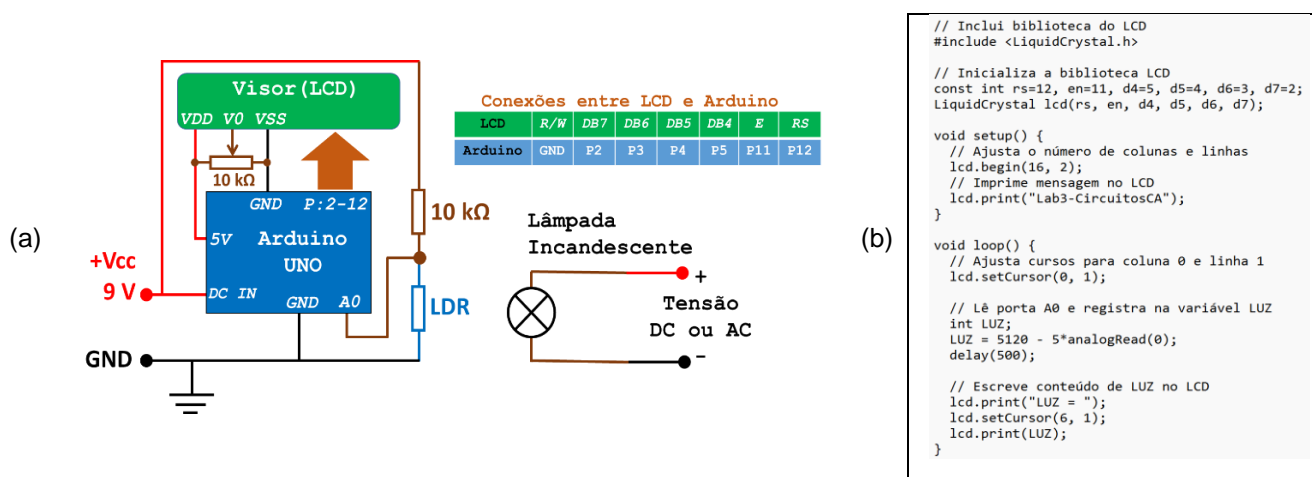


Fonte: Os autores.

3.2 Circuito básico e detalhes construtivos do luxímetro

Para implementar rapidamente o luxímetro, foi utilizada uma placa de prototipagem Arduino UNO R3, como mostrado na Figura 5.

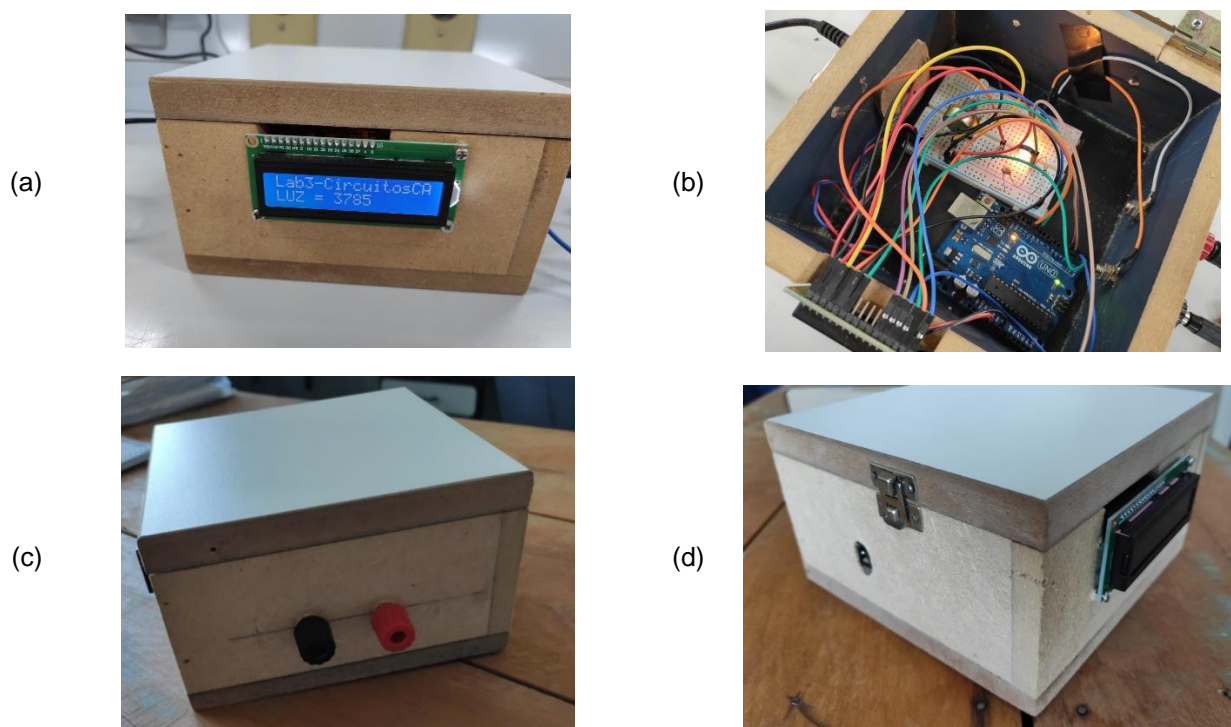
Figura 5 – Projeto do luxímetro: (a) Esquema de ligações; (b) Código no Arduino.



Fonte: Os autores.

O Arduino é ligado a um display de cristal líquido (LCD) 16x2, marca Longtech, modelo LCM1602B e a um sensor de luz resistivo (LDR), que capta a luminosidade gerada por uma lâmpada incandescente de sinalização para painel. Desta maneira, foi possível mostrar a equivalência entre a tensão CA e o seu respectivo equivalente CC (valor eficaz), através de medições da intensidade luminosa da lâmpada (alimentada com tensões CC ou CA externas ao Arduino) obtidas no laboratório de Análise de Circuitos CA. O custo total estimado do protótipo foi aproximadamente R\$100,00 (US\$20 na cotação de março de 2023). Note que para este experimento, não é necessário haver uma calibração do luxímetro, pois basta que a leitura de intensidade luminosa (independentemente da unidade ser Lux ou não) obtida para o sinal CA seja a mesma do sinal DC, desde que seja utilizado o mesmo aparelho nas duas medições. Na Figura 6 são mostrados detalhes construtivos do protótipo, cujo circuito foi acondicionado em um caixa de madeira para que a leitura de intensidade luminosa não sofresse interferência da iluminação externa.

Figura 6 – Detalhes do protótipo inicial do Luxímetro:
(a) Visor LCD; (b) Ligações internas; (c) Entrada para
alimentação da lâmpada; (d) Entrada para
alimentação do Arduino.

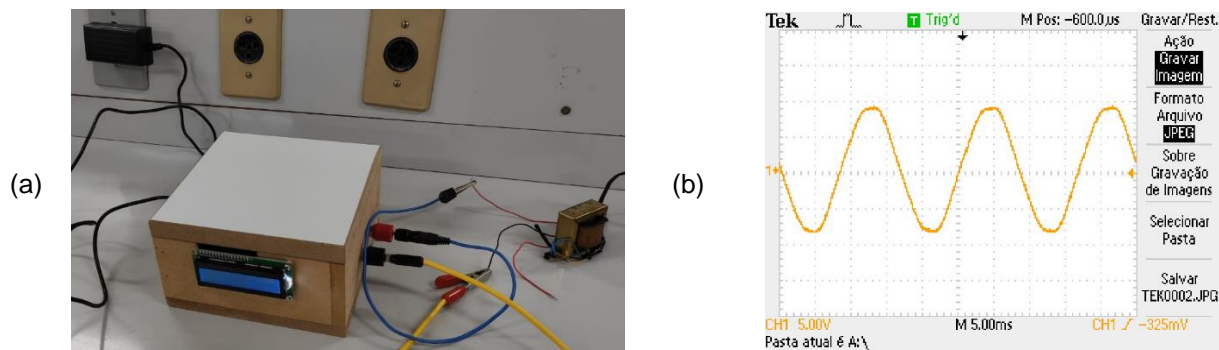


Fonte: Os autores.

3.3 Resultados obtidos e melhorias propostas

Para testar a efetividade do luxímetro na medição do valor eficaz de tensão, foi realizado um experimento como esquematizado na Figura 4. Primeiramente, a lâmpada incandescente foi ligada à saída de um transformador de 600 mA, que convertia a tensão da rede (127 Vrms e 60 Hz) do primário em aproximadamente 6,5 Vrms no secundário, como mostrado na Figura 7a. Mediu-se a tensão em um osciloscópio Tektronix TDS 1001C-30EDU de 30 MHz e 500 MS/s, gerando como resultado a onda mostrada na Figura 7b.

Figura 7 – Teste do luxímetro em AC: (a) Alimentação
AC da lâmpada; (b) Sinal AC visto no osciloscópio.



Fonte: Os autores.

Ainda na montagem AC, foi registrado o valor da variável LUZ, que mudava de 0 a 5.120, conforme a luminosidade captada pelo sensor LDR, correspondendo 0 à luminosidade mínima e 5.120 à máxima. Em seguida, a lâmpada foi conectada a uma fonte DC variável (0 a 30 V) MINIPA MPC-3003D. Ajustou-se a tensão dessa fonte DC até que o luxímetro voltasse a apresentar o mesmo valor da variável LUZ registrado na montagem AC. Nas duas montagens, também foi utilizado o multímetro Minipa ET-2507 True rms para medir a tensão na lâmpada. Os resultados são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Comparação dos resultados da medição do valor eficaz (ou RMS) utilizando a variável LUZ do Luxímetro.

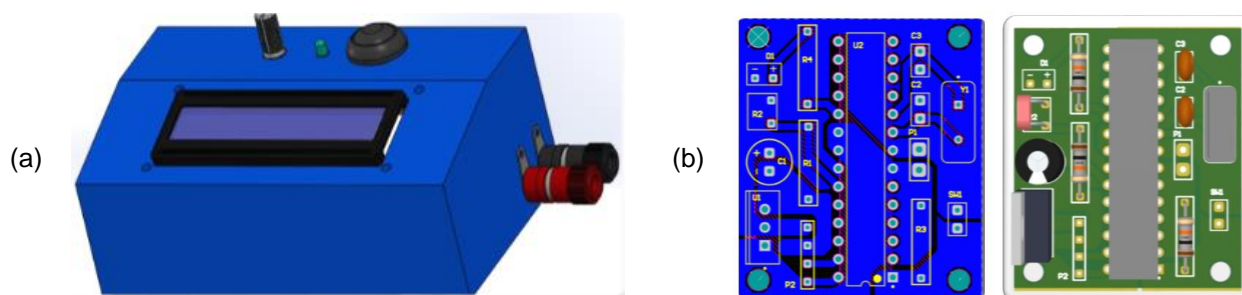
Tipo de medição da tensão na lâmpada	Variável LUZ	Valor de Pico (V)	Valor RMS (V)	Erro (%) em relação ao multímetro na montagem DC
Osciloscópio na montagem AC	3.950	8,8	6,22	-1,58%
Multímetro na montagem AC	3.950	-	6,19	-2,06%
Multímetro na montagem DC	3.950	-	6,32	-

Fonte: Os autores.

O erro experimental mostrado na Tabela 1 está coerente com o a exatidão dos instrumentos utilizados, que é de até 3%. O mesmo experimento foi replicado com os estudantes de graduação durante o laboratório de “Análise de Circuitos em Corrente Alternada”, permitindo a sua repetição por cerca de 30 vezes. Desta vez, o erro médio ficou em aproximadamente 5%, o que pode ser atribuído à falta de experiência dos discentes na manipulação dos equipamentos e condução dos experimentos.

Assim, pode-se concluir que o luxímetro descrito neste trabalho é uma ferramenta didática válida para medição experimental do valor eficaz de um sinal AC. Entretanto, necessita-se diminuir seu tamanho e custo para que a confecção de mais unidades seja possível, viabilizando seu uso mais frequente no curso de graduação. Na Figura 8 são apresentados os passos atuais deste aprimoramento, que estão sendo feitos por discentes de graduação do curso de Engenharia Elétrica e coautores deste trabalho. Basicamente são dois passos: elaboração do projeto de um novo chassi, utilizando impressora 3D; e melhoria do circuito interno, através do projeto de uma placa de circuito impresso (PCB) contendo o kit “Stand Alone” do microcontrolador ATMEGA328 utilizado no Arduino.

Figura 8 – Melhorias do luxímetro: (a) Chassi a ser
feito em impressão 3D; (b) Projeto da PCB dedicada.



Fonte: Os autores.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização no ensino de circuitos elétricos de ferramentas de sistemas embarcados, como por exemplo o luxímetro desenvolvido com o sistema microcontrolado Arduino, é bastante viável e efetivo, pois permite a participação de discentes que se encontram em fases diferentes (iniciais ou intermediárias) do curso, envolvendo conceitos básicos de eletricidade e eletrônica em uma perfeita integração entre ambos no melhor modo “hands on”. Além disso, permite que os docentes consigam aprimorar e atualizar os roteiros dos seus experimentos laboratoriais utilizando componentes acessíveis e de baixo custo.

AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos ao técnico de maquetaria, Sr. Carlos Alberto Duarte pelo apoio operacional.

REFERÊNCIAS

ALEXANDER, Charles K.; SADIKU, Matthew N. O. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

BOYLESTAD, Robert L. **Introdução à Análise de Circuitos**. 12. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2012.

BLY, Robert W. **Charles Proteus Steinmetz: The Electrical Wizard of Schenectady**. Fresno: Linden Publishing, 2018.

BURIAN JUNIOR, Yaro; LYRA, Ana Cristina C. **Circuitos Elétricos**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2006.

COSTA, Vander Menengoy da. **Circuitos Elétricos Lineares: enfoques teórico e prático**. Rio de Janeiro: Interciência, 2013.

DESOEH, Charles A.; KUH, Ernest S. **Teoria Básica de Circuitos**. Rio de Janeiro: Guanabara, 1988.

EDMINISTER, Joseph A. **Circuitos Elétricos**. 2. ed. São Paulo: Makron, McGraw-Hill, 1991.

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

HAMBLEY, Allan R. **Engenharia Elétrica**: princípios e aplicações. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

KIENTZ, Karl Heinz. **Análise de Circuitos**: um enfoque de sistemas. Barueri: Manole, 2002.

LINDEBURG, Michael R. **Fundamentos de Engenharia**: teoria e prática – Vol. 3. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

NILSSON, James W.; RIEDEL, Susan A. **Circuitos Elétricos**. 8. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

ORSINI, Luiz de Queiroz; CONSONNI, Denise. **Curso de Circuitos Elétricos – Vol. 2**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2004.

ROBINS, Allan H.; MILLER, Wilhelm C. **Análise de Circuitos**: Teoria e Prática – Vol. 1. São Paulo: Cengage Learning, 2010.

SANTANA, Eudemario Souza de; SILVA JUNIOR, Irênio de Jesus. **Teoria e Análise de Circuitos Elétricos para Cursos Técnicos e Tecnológicos**. Rio de Janeiro: Interciência, 2011.

SILVA FILHO, Matheus Teodoro da. **Fundamentos de Eletricidade**. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

PROTOTYPE OF LUXIMETER FOR VERIFICATION OF EFFECTIVE VOLTAGE IN LABORATORY OF ANALYSIS OF CIRCUIT IN ALTERNATING CURRENT

Abstract: *In this work, a prototype for measuring brightness (luxmeter) is presented, based on the Arduino microcontroller system, which was used to verify the equivalence between AC and DC electrical signals during the Laboratory of Analysis of Alternating Current Circuits in an undergraduate course in Engineering Electric. After replicating the experiment a few dozen times during classes, an average error of less than 5% was found. From this, it can be said that the use of embedded systems tools in teaching electrical circuits, such as the Arduino microcontroller system, is very promising, as it encourages the engagement of students from different periods of the course.*

Keywords: *Electrical Circuits, RMS value, Arduino, AC circuits, Light sensor.*