

15º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2024

Medidor de energia de baixo custo dedicado a experimento com impressora 3D

ANA CLARA DEMORE¹, JUAN PAULO ROBLES², GABRIEL HENRIQUE
GONÇALVES BARRETO³

¹ Graduando em Engenharia Elétrica, Bolsista PIBIFSP, IFSP, Campus Votuporanga, ana.demore@aluno.ifsp.edu.br.

² Docente do IFSP, Campus Votuporanga, juan@ifsp.edu.br.

³ Graduando em Análise e Desenvolvimento de Sistemas, SPTECH, Campus São Paulo, gabriel.barreto@sptech.school.
Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.04.00.00-7 Engenharia Elétrica

RESUMO: Com a revolução industrial inúmeras tecnologias foram impulsionadas, entre elas, a manufatura aditiva. No entanto, em conjunto com a evolução industrial a demanda de energia cresceu demasiadamente e embora o consumo energético de uma impressora 3D seja baixo, é de extrema importância considerar um consumo energético sustentável. Medidores de consumo como wattímetros são essenciais para monitoramento do consumo energético da manufatura durante a impressão, portanto, surge a necessidade de desenvolver um wattímetro de baixo custo. Com o uso do microcontrolador ESP8266 e outros componentes, foi desenvolvido um aparelho que, por meio de soma discreta, calcula a potência média partindo das potências instantâneas consumidas pela máquina de impressão. Além de um circuito protótipo, o projeto possui um código desenvolvido no *software* do Arduino e uma aplicação gráfica para ilustrar o consumo médio durante o processo de impressão da manufatura.

PALAVRAS-CHAVE: manufatura; microcontrolador, consumo energético; potência média; soma discreta; wattímetro.

Low-cost energy meter dedicated to 3D printer experiment

ABSTRACT: With the industrial revolution, numerous technologies were boosted, including additive manufacturing. However, in conjunction with industrial evolution, the energy demand has grown too much and although the energy consumption of a 3D printer is low, it is extremely important to consider sustainable energy consumption. Consumption meters such as wattmeters are essential for monitoring the energy consumption of manufacturing during printing, so the need arises to develop a low-cost wattmeter. With the use of the microcontroller ESP8266 and other components, a device was developed that, by means of a discrete sum, calculates the average power based on the instantaneous powers consumed by the printing machine. In addition to a prototype circuit, the project has a code developed in the Arduino Software and a graphic application to illustrate the average consumption during the manufacturing printing process.

KEYWORDS: manufacturing; microcontroller, power consumption; medium power; discrete sum; wattmeter.

INTRODUÇÃO

A impressão 3D é uma tecnologia emergente para a fabricação de vários tipos de objetos usando diferentes materiais, desde metais, cerâmicas até polímeros. Atualmente tem-se uma diversidade de filamentos poliméricos disponíveis comercialmente com ótima resistência mecânica e ainda biodegradáveis (Goh *et al.*, 2021). O processo de impressão 3D pode ser demorado devido à complexidade da peça a ser impressa. Apesar da potência consumida pela impressora não ser excessiva,

o consumo energético se torna alto quando se trata de impressão de diversas peças e principalmente quando o desenho geométrico da peça impressa leva a uma impressão de longa duração (Walls *et al.*, 2014).

Em conjunto com a evolução industrial a demanda de energia cresceu demasiadamente e de acordo com a Energy Outlook (IEO) em 2016, a indústria de manufaturas consome cerca de 54% da energia demandada do mundo. Embora o consumo energético de uma impressora 3D seja baixo, é de extrema importância considerar um consumo energético sustentável (Ajay *et al.*, 2017).

Neste contexto, medidores de consumo como wattímetros são essenciais para monitoramento do consumo energético da manufatura durante a impressão. No entanto, muitos aparelhos não disponibilizam o monitoramento de forma concreta da carga, ou seja, não armazenam dados ou realizam gráficos de acordo com os parâmetros solicitados. Contudo, surgiu a necessidade de desenvolver um wattímetro de baixo custo que monitore o processo de impressão da manufatura, gerando assim gráficos e tabelas do consumo energético de todo período de funcionamento da máquina.

MATERIAL E MÉTODOS

De acordo com o processo de obtenção do modelo descrito na Figura 1, o medidor de energia é dividido em duas partes principais: o protótipo (hardware), que realiza a medição da potência e fornece os dados ao *software*, e o *software*, que permite o gerenciamento remoto, possibilitando que o usuário crie interfaces para monitorar e manipular os valores de potência medidos.

O processo de obtenção do valor de potência envolve um circuito elétrico responsável pelo condicionamento dos sinais de tensão e corrente de entrada, ajustando-os para valores compatíveis com a escala de operação do microcontrolador. O microcontrolador, por sua vez, calcula o valor da potência e transmite esses dados para uma aplicação WEB, que pode ser acessada em navegadores como Firefox, Google Chrome ou Safari. Esse *software* apresenta os valores de potência de forma conveniente, facilitando as investigações de consumo energético em impressoras 3D.

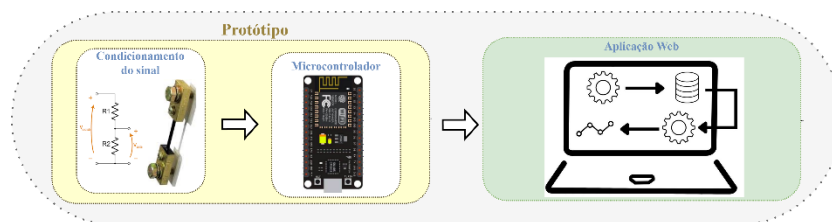


FIGURA 1. Modelo geral do medidor de energia.

O cálculo de Potência é resultado do produto entre tensão e corrente (Nilsson & Riedel, 2008), e sua medida instantânea em uma carga é representada pela Equação 1 (Boylestad, 2012). No sistema elétrico de energia, a tensão e a corrente alternada, v e i , são grandezas senoidais, a tensão é representada pela Equação 2. Sendo assim, V e I são grandezas senoidais, ou seja, um valor médio eficaz. A potência instantânea matematicamente ilustrada na Equação 3, considerando $\theta=0^\circ$ (Boylestad, 2012).

$$p = v \cdot i \quad (1)$$

$$v = V_m \cdot \sin(\omega t + \theta) \quad (2)$$

$$p = (V \cdot I) - (V \cdot I \cdot \cos(2\omega t)) \quad (3)$$

A partir da Equação 3, observa-se que a potência instantânea varia com o tempo, o que a torna mais difícil de ser medida. Por outro lado, a Potência média, em watts, é obtida a partir da média da potência instantânea ao longo de um período conforme a Equação 4, onde P_m é a potência média, $p(t)$ a potência instantânea e T o intervalo de integração.

$$P_m = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad (4)$$

Nesse contexto, o uso da potência média, como cálculo de potência pelo protótipo proposto, torna-se mais conveniente para ser medido. Esse é o motivo pelo qual os wattímetros disponíveis no mercado indicam a potência média (Alexander & Sadiku, 2013).

A impressora 3D, tem em sua entrada de alimentação um circuito de retificação (AC/DC). Geralmente esse tipo de retificador apresenta elevado conteúdo harmônico, principalmente porque a corrente de entrada não mais se comporta como uma senóide (Djabali *et al.*, 2023). Por esse motivo, as tensões e correntes presentes na Equação 1 não devem ser consideradas como grandezas puramente senoidais. Portanto, para o cálculo de P_m da Equação 4, os valores instantâneos independem da forma de onda do sinal medido.

Nesse contexto, considerando conhecido os valores instantâneos de potência a serem medidos, a Equação 4 pode ser substituída pela Equação 5. Assim, uma soma discreta é realizada com as potências instantâneas referentes a cada subintervalo, o resultado da soma é dividido pela quantidade de subintervalos. No circuito proposto, o microcontrolador realizará esse cálculo e, em seguida, fornecerá a potência média para a aplicação Web.

$$P_m = \frac{(P(t_1) + P(t_2) + \dots + P(t_n))}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n P(t_n) \quad (5)$$

A Figura 4(a) apresenta o desenho do circuito do wattímetro e a Figura 4 (b) uma fotografia do circuito que foi utilizado para os testes. Ele é composto por um microcontrolador ESP8266, quatro resistores de 220Ω, que realiza o condicionamento dos sinais de tensão e corrente de entrada por meio de um divisor de tensão, isto é, adequa os sinais de entrada de 3,3V a 1,65V. Além disso, utiliza-se um CI Multiplexador 4051 para gerenciar os sinais de entrada, alternando entre a tensão e a corrente o sinal enviado para a única entrada analógica do microcontrolador.

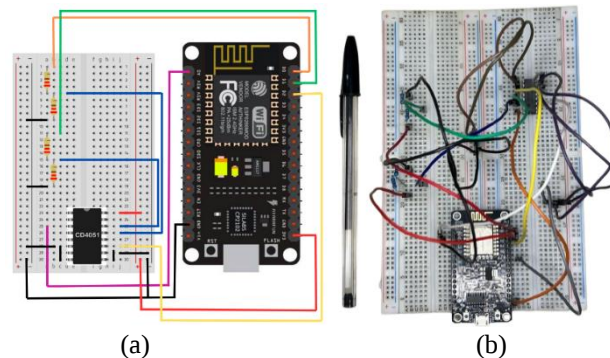


FIGURA 4. (a) Desenho do circuito do medidor de energia (b) Fotografia do medidor de energia em desenvolvimento.

Por meio de uma comunicação serial, o ESP8266 alimenta um banco de dados desenvolvido com o programa MySQL (MySQL Reference Manual, versão 2024), no qual são armazenados os dados processados pelo microcontrolador, incluindo o valor da potência média e a data e hora da leitura. Uma aplicação Web (site) é utilizada para a apresentação de gráficos do consumo de energia durante a simulação do protótipo, utilizando os dados provenientes do banco de dados.

Para que seja possível visualizar graficamente o consumo de potência medido pelo protótipo, foram desenvolvidas uma aplicação Web, uma aplicação comunicação serial e um banco de dados. O banco de dados, chamado leitura, é uma tabela criada no MySQL que armazena as leituras de potência média identificando seu id, valor e sua data e hora. A primeira aplicação comunicação serial é responsável pela conexão entre microcontrolador e o banco de dados, sendo assim, o banco é alimentado pelos valores calculados no ESP8266. A segunda aplicação Web é responsável por consumir o banco de dados e plotar gráficos de acordo com os valores de potência média disponíveis no banco.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A fim de validar o modelo proposto, utilizou-se um circuito elétrico com uma carga puramente resistiva de 1 Ω, alimentada por uma fonte de tensão de onda quadrada com razão cíclica de 0,4% e 1,65V de tensão de pico com frequência de 60 Hz, conforme mostra a Figura 5.

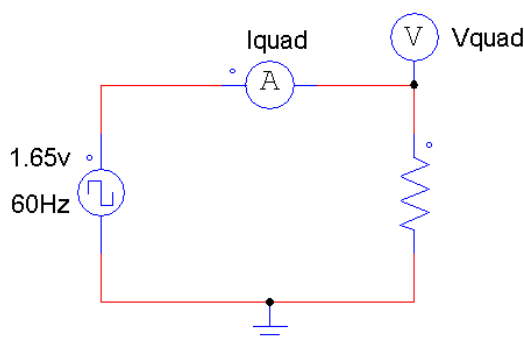


FIGURA 5. Circuito puramente resistivo.

A partir de resultados de simulação utilizando o *software* PSIM (PSIM User's Manual, versão 2020), foram obtidos os valores de potência instantâneas e média conforme mostra a Figura 6.

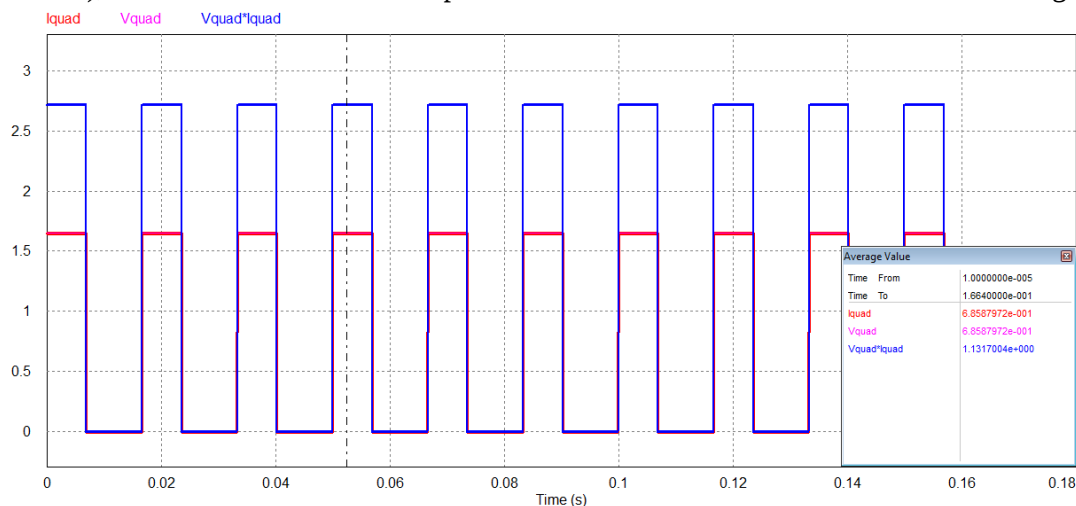


FIGURA 6. Potência média calculada pelo PSIM utilizando a potência instantânea.

Para os testes com o protótipo, foi gerado um sinal de onda quadrada, semelhante ao da Figura 6. O protótipo realizou a leitura calculou a potência média e gerou o banco conforme os resultados mostrados na Figura 7.

id	potencia_media	data_hora_leitura
1	1.13	2024-09-09 18:16:44
2	1.13	2024-09-09 18:16:46
3	1.13	2024-09-09 18:16:48
4	1.13	2024-09-09 18:16:50
5	1.13	2024-09-09 18:17:07
6	1.13	2024-09-09 18:17:07
7	1.13	2024-09-09 18:17:07
8	1.13	2024-09-09 18:17:07
9	1.13	2024-09-09 18:17:07
10	1.13	2024-09-09 18:17:07

FIGURA 7. Banco de dados com 10 leituras armazenadas.

A partir do banco de dados da Figura 7, utilizando a aplicação WEB, plotou-se os gráficos da Figura 8. Conforme esperado, o resultado da potência média foi constante com valor de 1,13W.

Comparando os resultados de simulação no PSIM com os obtidos a partir do protótipo, pode-se validar o modelo de medição e principalmente comprovar o funcionamento do protótipo proposto, pois ambos forneceram os mesmos resultados de potência média, mesmo considerando como entrada uma forma de onda diferente de uma senóide.

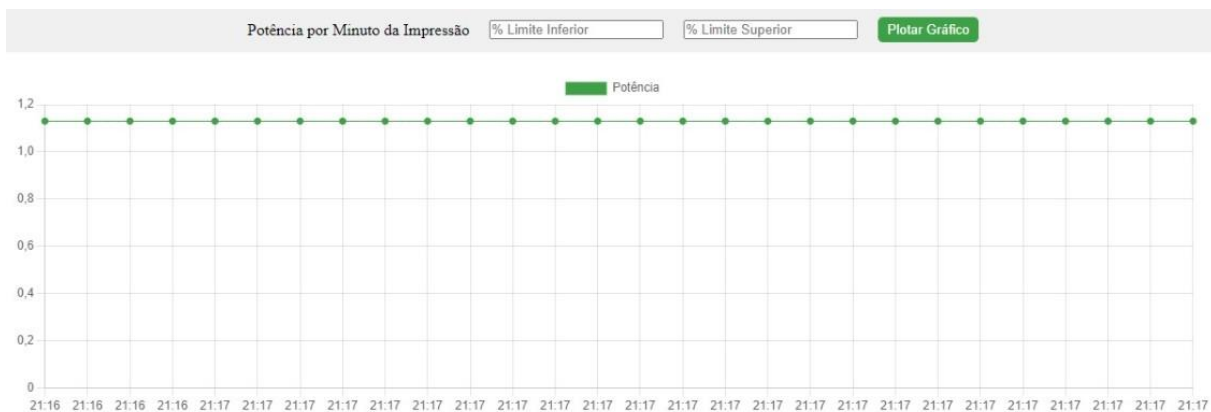


FIGURA 8. Gráfico plotado de acordo com os dados do banco de dados.

CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta um medidor de potência de baixo custo, dedicado a monitorar o consumo energético de uma impressora 3D. A solução proposta utiliza o microcontrolador ESP8266, um circuito condicionador de sinais e uma aplicação Web, que pode ser executada em navegadores como Firefox, Google Chrome ou Safari. O dispositivo calcula a potência média por meio de somas discretas das potências instantâneas, utilizando o programa desenvolvido na plataforma Arduino (Arduino Documents, versão 2024). O circuito, em conjunto com o *software* do Arduino, permite a criação de uma ferramenta eficiente para analisar o consumo de energia durante o processo de manufatura aditiva. A implementação de um banco de dados para armazenar as leituras, além da visualização gráfica dos dados por meio de uma aplicação Web, oferece uma abordagem completa e acessível para o monitoramento energético.

Os resultados de medição de potência de uma carga, obtidos a partir do protótipo desenvolvido, foram comparados com os resultados de simulações no PSIM. Dessa forma, o modelo de medição de potência média foi validado, comprovando o funcionamento do protótipo, já que ambos forneceram os mesmos resultados, mesmo ao utilizar uma forma de onda diferente da senoidal como entrada.

Como proposta para trabalhos futuros, incluem-se o uso de condicionadores de sinais apropriados para ligação em redes de corrente alternada, a confecção do protótipo em placa de circuito impresso com conexões de entrada facilitadas para medição de tensão e corrente, e a apresentação gráfica das informações de potência instantânea e média, além do cálculo da energia consumida pela carga.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

A.C.D e J.P.R contribuíram com a curadoria e análise dos dados, atuaram na redação do trabalho, revisão do trabalho e aprovaram a versão submetida.

A.C.D procedeu com a metodologia e experimentos.

A.C.D e G.H.G.B contribuíram com o desenvolvimento do software para análise de dados do experimento.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao IFSP, campus Votuporanga, pela bolsa de iniciação científica.

REFERÊNCIAS

Ajay, J. *et al.*, 2017. 3DGates: An Instruction-Level Energy Analysis and Optimization of 3D Printers. ACM SIGPLAN Notices, v.52, pp 419-433.

Alexander, C. K. *et al.*, 2013. Fundamentos de Circuitos Elétricos: 5º edição. Amgh.

Boylestad, R. L., 2012. Introdução à Análise de Circuitos: 12º edição. Pearson.

Djabali, S. *et al.*, 2023. Harmonics mitigation of AC-to-DC converters using PWM rectifier with enhanced model predictive control approach. Academic Press.

Donato, E. B., 2006. Wattímetro digital de baixo custo. Acesso em 5 mai. 2024. Disponível em: https://www3.dti.ufv.br/sig_del/consultar/monografia.

Goh, G. L. *et al.*, 2021. 3D printing of multilayered and multimaterial electronics: a review. Advanced Electronic Materials, 7, n. 10, p. 2100445.

Guidorizzi, H. L., 2013. Um Curso de Cálculo - Vol. 1: 5º edição. Ltc.

Martins, V. H. C., 2017. Impressão 3D: uma abordagem de produção mais limpa?. ProQuest Dissertations & Theses. D. Acesso em 23 jul. 2024. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1822/46577>.

Nilsson, J.W. *et al.*, 2008. Circuitos Elétricos: 8º edição. Pearson.

Walls, S. *et al.*, 2014. Relative energy consumption of low-cost 3D printers: 12th International Conference on Manufacturing Research.