

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE  
MINAS GERAIS - CAMPUS SABARÁ  
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Afonso Felipe Amaro Silva

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA  
A PARTIR DA PRESSÃO HIDRÁULICA RESIDENCIAL E VALIDAÇÃO  
EMPÍRICA DE UM PROTÓTIPO COM UM MICROGERADOR  
COMERCIAL**

Sabará  
2025

AFONSO FELIPE AMARO SILVA

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA  
A PARTIR DA PRESSÃO HIDRÁULICA RESIDENCIAL E VALIDAÇÃO  
EMPÍRICA DE UM PROTÓTIPO COM UM MICROGERADOR  
COMERCIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais Campus Sabará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

**Orientador:** Prof. Paulo A. Amaral Jr

**Coorientador:** Moisés Martins Gonçalves

Sabará  
2025

Silva, Afonso Felipe Amaro

S586e

Estudo da viabilidade de geração de energia elétrica a partir da pressão hidráulica residencial e validação empírica de um protótipo com um microgerador comercial [manuscrito]. / Afonso Felipe Amaro Silva. - 2025.

80 f. : il.

Orientação: Prof. Me. Paulo Aparecido Amaral Junior.

Coorientação: Me. Moisés Martins Gonçalves

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) – Instituto Federal de Minas Gerais, *Campus* Sabará.

1. Energia elétrica - Produção. – Monografia. 2. Energia - Fontes alternativas. – Monografia. 3. Turbinas. – Monografia. 4. Geradores hidrelétricos. – Monografia. 5. Microcontroladores (ESP32). – Monografia. 6. Correntes fluviais - Medição - Potencial hidráulico. – Monografia. I. Amaral Junior, Paulo Aparecido. II. Gonçalves, Moisés Martins. III. Instituto Federal de Minas Gerais, *Campus* Sabará. IV. Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação. V. Título.

CDU 621.31

César dos Santos Moreira / CRB6-2229

Biblioteca do IFMG *Campus* Sabará



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA**  
**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS**  
**Campus Sabará**  
**Diretoria de Ensino, Pesquisa e Extensão**  
**Conselho de Área - Controle e Processos Industriais**  
Rodovia MGC 262, Km 10 - Bairro Sobradinho - CEP 34590-390 - Sabará - MG  
- www.ifmg.edu.br

## **ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

Aos vinte e oito dias do mês de agosto do ano de dois mil e vinte e cinco, às dezoito horas e cinquenta minutos, sob a presidência do Professor Paulo Aparecido Amaral Júnior, reuniu-se a banca examinadora composta pelos professores abaixo relacionados, para a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) do discente Afonso Felipe Amaro Silva, matrícula nº 59756, do curso de Engenharia de Controle e Automação, do IFMG – Campus Sabará.

O trabalho intitulado ESTUDO DE VIABILIDADE ENERGÉTICA NO APROVEITAMENTO DA PRESSÃO HIDRÁULICA RESIDENCIAL foi apresentado e submetido à apreciação da banca. Após exposição, arguição e deliberação, a banca atribuiu a nota final de 76 pontos (de um total de 80). Somados aos 12 pontos atribuídos ao aluno pelo docente responsável pela disciplina de Projeto II, o aluno ficou com um total de 88 pontos, resultando em aprovado, condicionado ao cumprimento das orientações e prazos estabelecidos pela coordenação do curso.

Compuseram a Banca Examinadora:

- Membro 1 (Presidente): Prof. Paulo Aparecido Amaral Júnior
- Membro 2: Prof. Rodrigo Hiroshi Murofushi
- Membro 3: Prof. Diego Oliveira Miranda

O discente deverá apresentar a versão final do trabalho em formato PDF e depositá-lo no repositório institucional até a data do dia vinte e oito de setembro de dois mil e vinte e cinco. O não cumprimento das exigências implicará no não cômputo das horas referentes aos componentes curriculares de TCC I e II.

E para constar, lavrou-se a presente ata, assinada pelos membros da banca.

Sabará, 28 de agosto de 2025.



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Aparecido Amaral Junior, Professor EBTT**, em 29/08/2025, às 19:10, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Hiroshi Murofushi, Professor EBTT**, em 29/08/2025, às 21:51, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

---



Documento assinado eletronicamente por **Diego Oliveira Miranda, Professor EBTT**, em 31/08/2025, às 21:32, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

---



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs> informando o código verificador **2435186** e o código CRC **A0A10121**.

---

23714.001466/2025-48

2435186v1

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por me guiar, fortalecer e proporcionar sabedoria ao longo de toda essa jornada acadêmica. À minha família, pelo amor, apoio incondicional e incentivo em todos os momentos, mesmo nos mais desafiadores. À minha namorada, pelo carinho, paciência e por sempre acreditar em mim, motivando-me a seguir em frente.

Também sou grato a todas as pessoas que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho, seja com palavras de incentivo, apoio técnico ou simplesmente compartilhando momentos de aprendizado e experiência. Cada gesto, orientação e incentivo foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

A todos vocês, meu sincero obrigado.



## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade da geração de energia elétrica a partir da pressão hidráulica disponível em sistemas residenciais de abastecimento de água. Para isso, foi desenvolvido um protótipo composto por uma microturbina conectada à entrada da caixa d'água, sensores para medição de pressão, vazão, corrente e tensão, além de um sistema de aquisição de dados baseado no microcontrolador ESP32. O sistema foi submetido a uma série de testes experimentais, abrangendo calibração dos sensores e ensaios práticos em diferentes condições operacionais: circuito aberto (sem carga) e com cargas resistivas de diferentes valores. Foram analisados os valores médios de tensão, corrente e potência gerada em cada cenário, permitindo observar a influência direta da carga aplicada sobre o desempenho elétrico do sistema. A análise também contemplou estimativas de geração com base no consumo hídrico real do IFMG Campus Sabará. Os resultados demonstram que, embora a potência gerada seja limitada, o sistema apresentou funcionamento estável e comprova a viabilidade técnica da microgeração hidráulica para aplicações de baixa potência, incentivando a consciência energética, a diversificação da matriz energética e incentivando práticas sustentáveis no ambiente urbano.

**Palavras-chave:** Geração de energia; Energia renovável; Microturbina; Potencial hidráulico; ESP32.

## ABSTRACT

This work aims to evaluate the feasibility of generating electricity from the hydraulic pressure available in residential water supply systems. For this purpose, a prototype was developed consisting of a microturbine connected to the inlet of the water tank, sensors for measuring pressure, flow, current, and voltage, as well as a data acquisition system based on the ESP32 microcontroller. The system was subjected to a series of experimental tests, including sensor calibration and practical trials under different operating conditions: open circuit (no load) and with resistive loads of different values. The average values of voltage, current, and generated power were analyzed in each scenario, allowing the observation of the direct influence of the applied load on the system's electrical performance. The analysis also included generation estimates based on the actual water consumption of IFMG Campus Sabará. The results show that, although the generated power is limited, the system demonstrated stable operation and proved the technical feasibility of hydraulic microgeneration for low-power applications, encouraging energy awareness, diversification of the energy matrix, and promoting sustainable practices in the urban environment.

**Keywords** Power generation; Renewable energy; Microturbine; Hydraulic potential; ESP32.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Maquete utilizada no estudo. . . . .	18
Figura 2 – Prototipo utilizado no estudo de Rosa 2018. . . . .	19
Figura 3 – Plataforma de ensaios laboratoriais do estudo. . . . .	20
Figura 4 – Esquemático do estudo de Figueredo. . . . .	21
Figura 5 – Representação geração de energia hidreletrica. . . . .	23
Figura 6 – Microcontrolador ESP32. . . . .	34
Figura 7 – Sensor de Corrente ACS712 5A. . . . .	36
Figura 8 – Sensor de Fluxo de Água de 1/2- YF-S201. . . . .	36
Figura 9 – Sensor de Pressão de Água Yu G1. . . . .	37
Figura 10 – Mini Gerador Hidrelétrico F50 12 V 10 W. . . . .	37
Figura 11 – Mini Gerador Hidrelétrico desmontado. . . . .	38
Figura 12 – Diagrama simplificado do protótipo de geração de energia. . . . .	39
Figura 13 – Prototipo de geração de energia. . . . .	40
Figura 14 – Esquemático do circuito eletrônico do protótipo. . . . .	41
Figura 15 – Placa criada para o protótipo. . . . .	41
Figura 16 – Configuração do divisor de tensão. . . . .	42
Figura 17 – Multímetro e fonte ajustavel durante os testes . . . . .	42
Figura 18 – Gráfico de desempenho do sistema de medição de tensão. . . . .	43
Figura 19 – Gráfico de desempenho do sistema de medição de corrente. . . . .	45
Figura 20 – Bomba de Calibração de Manômetros Salcas S600 usada nos testes. . . . .	46
Figura 21 – Manômetro analógico com glicerina (0 a 10 bar). . . . .	47
Figura 22 – Coleta de dados prática do sensor de pressão. . . . .	48
Figura 23 – Curva de calibração do sensor de pressão. . . . .	49
Figura 24 – Reservatorio de testes usado para calibração. . . . .	50
Figura 25 – Número de pulsos para 8 litros de água em 10 medições consecutivas . . . . .	51
Figura 26 – Protótipo conectado ao sistema de abastecimento com circuito hidráulico fechado. . . . .	52
Figura 27 – Variação de grandezas elétricas e hidráulicas ao longo do tempo em circuito aberto. . . . .	55
Figura 28 – Potência Elétrica Gerada durante o Teste em Vazio. . . . .	56
Figura 29 – Variação de grandezas elétricas e hidráulicas ao longo do tempo com carga resistiva de 16,3 $\Omega$ . . . . .	58
Figura 30 – Potência Elétrica Gerada durante o Teste com carga de 16,3 $\Omega$ . . . . .	59
Figura 31 – Variação de grandezas elétricas e hidráulicas ao longo do tempo com carga resistiva de 23,5 $\Omega$ . . . . .	61
Figura 32 – Potência Elétrica Gerada durante o Teste com carga de 23,5 $\Omega$ . . . . .	62
Figura 33 – Variação de grandezas elétricas e hidráulicas ao longo do tempo com carga resistiva de 46,5 $\Omega$ . . . . .	64

Figura 34 – Potência Elétrica Gerada durante o Teste com carga de 46,5 $\Omega$ . . . . .	65
Figura 35 – Variação de grandezas elétricas e hidráulicas ao longo do tempo com carga resistiva de 93 $\Omega$ . . . . .	67
Figura 36 – Potência Elétrica Gerada durante o Teste com carga de 93 $\Omega$ . . . . .	68
Figura 37 – Variação de grandezas elétricas e hidráulicas ao longo do tempo com carga resistiva de 135,6 $\Omega$ . . . . .	70
Figura 38 – Potência Elétrica Gerada durante o Teste com carga de 135,6 $\Omega$ . . . . .	71
Figura 39 – Potência em função das Cargas obtido nos testes. . . . .	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo das medições de tensão elétrica . . . . .	44
Tabela 2 – Resumo das medições de corrente elétrica . . . . .	45
Tabela 3 – Valores médios de tensão real para cada faixa de pressão. . . . .	48
Tabela 4 – Resultados do teste em vazio (circuito aberto). . . . .	54
Tabela 5 – Resultados do teste com carga resistiva de 16,3 $\Omega$ . . . . .	57
Tabela 6 – Resultados do teste com carga resistiva de 23,5 $\Omega$ . . . . .	60
Tabela 7 – Resultados do teste com carga resistiva de 46,5 $\Omega$ . . . . .	63
Tabela 8 – Resultados do teste com carga resistiva de 93 $\Omega$ . . . . .	66
Tabela 9 – Resultados do teste com carga resistiva de 135 $\Omega$ . . . . .	69
Tabela 10 – Comparativo dos valores médios obtidos nos testes . . . . .	72
Tabela 11 – Consumo mensal de água no IFMG Sabará . . . . .	74
Tabela 12 – Potencial teórico de geração de energia com microgerador (sem perdas) . .	74
Tabela 13 – Potencial de geração de energia no IFMG Sabará . . . . .	75

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
SEP	Sistema Elétrico de Potência
IFMG	Instituto Federal de Minas Gerais
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Gamma$	Letra grega Gama
$\Lambda$	Lambda
$\zeta$	Letra grega minúscula zeta
$\xi$	Letra grega minúscula qsi
$\in$	Pertence

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b>	<b>15</b>
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo geral</i>	<i>15</i>
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos específicos</i>	<i>15</i>
<b>1.2</b>	<b>Justificativa</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>17</b>
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>22</b>
<b>3.1</b>	<b>Distribuição de água</b>	<b>22</b>
<b>3.2</b>	<b>Gerador hidrelétrico</b>	<b>22</b>
<b>3.3</b>	<b>Consumo Médio de Água na Região Metropolitana de Belo Horizonte</b>	<b>23</b>
<b>3.4</b>	<b>Potencial Hidráulico Aplicado em Sistemas de Abastecimento de Água e sua Viabilidade Econômica</b>	<b>24</b>
<i>3.4.1</i>	<i>Relação Entre Potencial Hidráulico e Energia Mecânica</i>	<i>24</i>
<i>3.4.2</i>	<i>Cálculo da Altura Manométrica (H)</i>	<i>24</i>
<i>3.4.3</i>	<i>Cálculo da Vazão Volumétrica (Q)</i>	<i>25</i>
<i>3.4.4</i>	<i>Síntese das Relações Entre Parâmetros Hidráulicos e Potência</i>	<i>26</i>
<b>3.5</b>	<b>Relação Entre Potencial Hidráulico, Consumo de Água e Viabilidade Econômica</b>	<b>27</b>
<b>3.5.0.1</b>	<b>Potencial de geração</b>	<b>27</b>
<i>3.5.1</i>	<i>Custo e Valor Econômico da Energia</i>	<i>28</i>
<i>3.5.1.1</i>	<i>Energia Gerada em uma Caixa D'água</i>	<i>29</i>
<b>3.6</b>	<b>Instrumentação para Circuitos Elétricos</b>	<b>29</b>
<i>3.6.1</i>	<i>Formas de medição em circuitos elétricos</i>	<i>29</i>
<b>3.7</b>	<b>Sensores Não Invasivos</b>	<b>30</b>
<i>3.7.1</i>	<i>Sensores de Efeito Hall</i>	<i>30</i>
<i>3.7.2</i>	<i>Transformadores de Corrente Não Invasivos</i>	<i>30</i>
<b>3.8</b>	<b>Comparação entre Sensores Invasivos e Não Invasivos</b>	<b>31</b>
<i>3.8.1</i>	<i>Precisão e Detalhamento</i>	<i>31</i>
<i>3.8.2</i>	<i>Instalação e Manutenção</i>	<i>31</i>

<b>3.9</b>	<b>Considerações para a Escolha do Sensor</b> . . . . .	<b>32</b>
<b>3.10</b>	<b>Microcontroladores (ESP32)</b> . . . . .	<b>32</b>
<i>3.10.1</i>	<i>o ESP32</i> . . . . .	<i>32</i>
<i>3.10.2</i>	<i>Aplicações do ESP32</i> . . . . .	<i>32</i>
<i>3.10.3</i>	<i>Hardware do ESP32</i> . . . . .	<i>33</i>
<i>3.10.4</i>	<i>Programação do ESP32 com a IDE Arduino</i> . . . . .	<i>33</i>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b> . . . . .	<b>35</b>
<b>4.1</b>	<b>Escolha do Equipamento</b> . . . . .	<b>35</b>
<i>4.1.1</i>	<i>Medidor de Tensão</i> . . . . .	<i>35</i>
<i>4.1.2</i>	<i>Medidor de Corrente</i> . . . . .	<i>36</i>
<i>4.1.3</i>	<i>Medidor de Vazão</i> . . . . .	<i>36</i>
<i>4.1.4</i>	<i>Medidor de Pressão</i> . . . . .	<i>37</i>
<i>4.1.5</i>	<i>Microgerador</i> . . . . .	<i>37</i>
<b>4.2</b>	<b>Seleção do Ponto de Implementação</b> . . . . .	<b>38</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> . . . . .	<b>39</b>
<b>5.1</b>	<b>Construção do Protótipo</b> . . . . .	<b>39</b>
<b>5.2</b>	<b>Calibração estática do sistema de medição de tensão</b> . . . . .	<b>40</b>
<i>5.2.1</i>	<i>Validação da Medição de Tensão com o ESP32</i> . . . . .	<i>41</i>
<b>5.3</b>	<b>Calibração estática do sistema de medição de corrente elétrica</b> . . . . .	<b>44</b>
<i>5.3.1</i>	<i>Calibração Estática do Sistema de Medição de Pressão</i> . . . . .	<i>46</i>
<b>5.4</b>	<b>Calibração do Sistema de Medição de Fluxo de Água</b> . . . . .	<b>49</b>
<i>5.4.1</i>	<i>Procedimento Experimental</i> . . . . .	<i>50</i>
<i>5.4.2</i>	<i>Resultados da Calibração</i> . . . . .	<i>51</i>
<i>5.4.3</i>	<i>Testes do Protótipo em Ambiente Residencial</i> . . . . .	<i>52</i>
<i>5.4.3.1</i>	<i>Teste com Circuito Aberto (Sem Carga)</i> . . . . .	<i>53</i>
<i>5.4.3.2</i>	<i>Teste com Carga Resistiva de 16,3 <math>\Omega</math></i> . . . . .	<i>56</i>
<i>5.4.3.3</i>	<i>Teste com Carga Resistiva de 23,5 <math>\Omega</math></i> . . . . .	<i>59</i>
<i>5.4.3.4</i>	<i>Teste com Carga Resistiva de 46,5 <math>\Omega</math></i> . . . . .	<i>62</i>
<i>5.4.3.5</i>	<i>Teste com Carga Resistiva de 93 <math>\Omega</math></i> . . . . .	<i>65</i>
<i>5.4.3.6</i>	<i>Teste com Carga Resistiva de 135,6 <math>\Omega</math></i> . . . . .	<i>68</i>

<b>5.4.3.7</b>	<b>Análise Comparativa dos Testes com Carga</b> . . . . .	<b>71</b>
<b>5.4.4</b>	<b><i>Análise do Potencial de Geração de Energia a partir de Dados Reais de Consumo no IFMG Campus Sabará</i></b> . . . . .	<b>73</b>
<b>5.4.5</b>	<b><i>Análise dos Resultados</i></b> . . . . .	<b>75</b>
<b>5.4.5.1</b>	<b>Análise Econômica</b> . . . . .	<b>76</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> . . . . .	<b>77</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>79</b>

# 1 INTRODUÇÃO

À medida que a população global continua a crescer e o desenvolvimento industrial se expande, a demanda por energia atinge níveis sem precedentes. O consumo energético per capita aumenta constantemente, impulsionado pelo avanço tecnológico e pela melhoria dos padrões de vida. Este crescimento exponencial no uso de energia coloca uma pressão significativa sobre os recursos naturais e o meio ambiente, tornando assim desejável uma transição para fontes de energia renováveis e sustentáveis. No Brasil, embora a matriz energética seja majoritariamente composta por fontes renováveis, ainda há um vasto potencial para diversificar as fontes de geração e reduzir a dependência de hidrelétricas, que podem causar impactos socioambientais consideráveis.

Neste cenário, a exploração de novas fontes de energia renovável torna-se cada vez mais crucial. Dentre as diversas tecnologias de geração de energia renovável, pode-se citar os sistemas eólicos, fotovoltaicos, usinas de incineração de resíduos e biomassa, além de pequenas usinas hidroelétricas como alternativas prováveis para a geração distribuída. A energia hídrica urbana, obtida a partir do fluxo de água em tubulações residenciais, apresenta-se como uma alternativa inovadora para a geração descentralizada e sustentável de eletricidade. Diferentemente das grandes usinas hidrelétricas, a geração de energia a partir da água urbana não requer a construção de grandes barragens, podendo ser implementada em diversas escalas e mitigando impactos ambientais significativos (TOLMASQUIM; GUERREIRO; GORINI, 2007).

Este trabalho se propõe a investigar a viabilidade de uso da energia hídrica urbana, levando em conta o real potencial de geração e os dispositivos existentes no mercado. Através da instalação de microturbinas no ponto de abastecimento de água, será possível analisar o potencial energético do fluxo hídrico para gerar eletricidade destinada ao consumo próprio, também introduzindo uma opção que otimize a viabilidade econômica da geração descentralizada.

Espera-se que os resultados desta pesquisa contribuam para uma melhor compreensão sobre as possibilidades de conversão de energia elétrica a partir da água que flui nas tubulações de abastecimento residencial. Espera-se também que sejam respondidas perguntas como: quanto de energia realmente é possível gerar na tubulação de uma residência? Qual o retorno financeiro mensal de um sistema desse tipo? Quanto de investimento seria necessário para implementar um sistema desse tipo? Seria economicamente viável? Além disso, a geração de energia a partir da água urbana pode estimular o aproveitamento de uma fonte de energia não aproveitada, fortalecendo a economia verde e a resiliência energética do país.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 *Objetivo geral*

Avaliar a viabilidade de instalação de microgeradores elétricos em sistemas residenciais de abastecimento de água, e também avaliar sua viabilidade técnica e financeira.

### 1.1.2 *Objetivos específicos*

- Avaliar o potencial hidráulico para geração de energia de uma micro turbina instalada na entrada de abastecimento de água de uma residência.
- Determinar quais grandezas hidráulicas e elétricas que são relevantes para avaliar o desempenho e a viabilidade da instalação de um sistema de geração de energia.
- Construir um protótipo que permita a avaliação do processo de geração de energia elétrica através do fluxo da água. O protótipo deve ser capaz de medir as grandezas físicas de interesse.
- Realizar testes e levantar dados que possam embasar a avaliação de viabilidade e eficiência do protótipo.

## 1.2 Justificativa

A geração de energia a partir de fontes não renováveis, como combustíveis fósseis e nucleares, continua sendo uma das principais causas do aquecimento global. A queima de combustíveis fósseis em usinas termelétricas, por exemplo, libera grandes quantidades de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e outros gases de efeito estufa, contribuindo significativamente para as mudanças climáticas. Além disso, essas usinas são associadas à poluição do ar e à degradação ambiental, afetando a qualidade de vida das populações próximas, como mostra o estudo de Martins 2008.

No Brasil, embora a matriz energética seja majoritariamente renovável, a demanda por energia continua aumentando, o que leva ao uso mais frequente de outras fontes, como destacado em Tolmasquim; Guerreiro; Gorini, 2007. As termelétricas, embora forneçam energia de maneira estável e previsível, têm um impacto ambiental elevado, tanto em termos de emissões de  $\text{CO}_2$  quanto no consumo de água, essencial para o resfriamento dos sistemas.

Além das termelétricas, a energia nuclear, apesar de emitir menos  $\text{CO}_2$  diretamente, apresenta desafios relacionados à segurança e ao gerenciamento de resíduos radioativos. Os riscos de acidentes e os problemas de longo prazo associados ao armazenamento de resíduos tornam essa opção menos atraente do ponto de vista ambiental e social.

A energia cinética da água em sistemas residenciais surge como uma possibilidade pouco explorada de geração de energia elétrica. Em muitos casos, acontece que a água que chega até os reservatórios de abastecimento, chega com uma pressão muito elevada, sendo que, na prática, o que importa é que a água chegue ao reservatório, independente se com muita ou pouca pressão. Ao integrar soluções sustentáveis no cotidiano das pessoas, esses sistemas tornam os impactos positivos do uso responsável dos recursos naturais mais tangíveis, promovendo maior compreensão e responsabilidade coletiva em relação ao consumo de energia. Além disso, esta perspectiva de geração, se explorada em larga escala, poderia representar, mesmo que de forma tímida, uma diversificação da matriz energética.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Ao longo da evolução e crescimento da sociedade, bem como das constantes transformações tecnológicas, houve uma crescente demanda por ampliação na produção de energia elétrica. Com o aumento da demanda, surge também a necessidade de expandir a geração de energia a partir de fontes renováveis, conforme e destacado em DUPONT; GRASSI; ROMITTI (2015) (DUPONT; GRASSI; ROMITTI, 2015).

Nesse cenário de necessidade por fontes renováveis, diversos países estão em processo de transição energética. Blocos econômicos mundiais, como os países do BRICS, têm se mobilizado nesse sentido. Segundo LOSEKANN; TAVARES (2019) (LOSEKANN; TAVARES, 2019), os países desse bloco demonstram um crescente interesse em fontes renováveis e buscam reduzir suas emissões de carbono. China e Índia, grandes consumidores de energia, lideram a demanda mundial e buscam diversificar suas matrizes energéticas. O Brasil, por sua vez, já possui uma matriz com alta participação de fontes renováveis. O estudo enfatiza a diversidade de desafios e estratégias adotadas por cada país, mas destaca a importância da cooperação entre os membros do BRICS para acelerar a transição energética e promover o desenvolvimento de tecnologias limpas.

Uma das soluções para aumentar a geração de energia renovável é a geração distribuída, que permite a produção de energia elétrica em pequena escala, próxima ao ponto de consumo. Conforme SOETHE; BLANCHET (2020) (SOETHE; BLANCHET, 2020), essa prática foi introduzida no ordenamento jurídico brasileiro em 2004, mas só se tornou uma realidade prática no país a partir de 2012, com a regulamentação da ANEEL. Apesar do crescimento significativo no número de conexões nos últimos anos, o potencial da geração distribuída ainda não foi totalmente explorado, indicando um amplo espaço para desenvolvimento e expansão.

O estudo de SILVA (2018) (SILVA, 2018) avalia a viabilidade do aproveitamento do potencial hidráulico presente no sistema de abastecimento de água de edifícios e residências para a geração de energia elétrica em pequena escala. Os resultados indicam que a instalação de microturbinas nesse sistema é capaz de gerar energia de forma eficiente e com baixo custo, constituindo-se como uma alternativa sustentável e economicamente viável para reduzir o desperdício de energia hidráulica. Para fundamentar essas conclusões, o autor realizou medições essenciais, a vazão máxima admissível, o consumo médio de água, além da quantidade de água convertida em energia elétrica. Essas medições foram feitas utilizando instrumentos apropriados, como o manômetro de Bourdon, entre outros. Além das avaliações teóricas, o autor construiu um protótipo de sistema de microgeração, permitindo a obtenção de dados práticos sobre a operação das microturbinas instaladas, seu desempenho energético e viabilidade de instalação em ambientes reais. Dessa forma, as conclusões alcançadas no estudo resultam de uma combinação de análises experimentais, medições de campo e avaliação do desempenho de um protótipo desenvolvido, reforçando a aplicabilidade prática da proposta

Foi avaliada a viabilidade de implantação de um sistema de geração de energia comple-

mentar e sustentável em um edifício residencial de 25 pavimentos em Criciúma, SC, utilizando a pressão hidráulica excedente em tubulações (CECHINEL, 2018). Após analisar o sistema de abastecimento de água e identificar pontos onde a energia potencial é desperdiçada, o estudo considerou aspectos como vazão, altura manométrica e o tipo de turbina mais adequado, na figura 1 e mostrado a maquete utilizada no estudo. Embora tenha demonstrado viabilidade técnica em termos hidráulicos e elétricos, a análise econômica revelou-se desfavorável devido ao alto investimento necessário, tornando-o pouco atraente no momento.

Figura 1 – Maquete utilizada no estudo.



Fonte:(CECHINEL, 2018).

As diferenças nas conclusões entre os estudos atribuídas a SILVA, (2018) e a análise de CECHINEL podem ser explicadas pelos distintos contextos e enfoques adotados. O primeiro demonstrou que a implantação de microturbinas hidráulicas em sistemas prediais é tecnicamente viável, eficiente e economicamente atraente, principalmente devido ao baixo custo de implantação, à fácil obtenção de materiais e ao potencial de instalação de várias unidades para melhorar a viabilidade. Em contraste, o estudo de CECHINEL revelou que, apesar da viabilidade técnica, o alto investimento necessário torna o sistema pouco atraente financeiramente naquele contexto. Essas diferenças se devem aos escopos distintos: enquanto o trabalho inicial focou na viabilidade de baixo custo e potencial de aproveitamento em larga escala, o estudo de CECHINEL considerou aspectos econômicos mais restritivos, influenciados pelas condições regionais, o porte do edifício e os custos envolvidos. Assim, a análise econômica e o contexto específico de cada estudo foram fatores determinantes nas conclusões divergentes.

Outro estudo analisou a viabilidade da geração de eletricidade por meio da energia cinética presente nas tubulações de água residenciais, utilizando um micro-hidrogerador (ROSA

*et al.*, 2018), como demonstrado na figura 2. Apesar de contribuir para a redução do consumo elétrico, os resultados indicam que a aplicação residencial desse sistema não é economicamente viável, devido ao longo período de retorno (payback) e baixo impacto financeiro. Contudo, o conceito pode ser aplicável em locais com alto fluxo e consumo de energia elétrica, como grandes edifícios, indústrias e estações de tratamento. O estudo sugere melhorias no dispositivo e análises mais detalhadas para torná-lo uma solução eficaz e sustentável em larga escala.

Figura 2 – Protótipo utilizado no estudo de Rosa 2018.



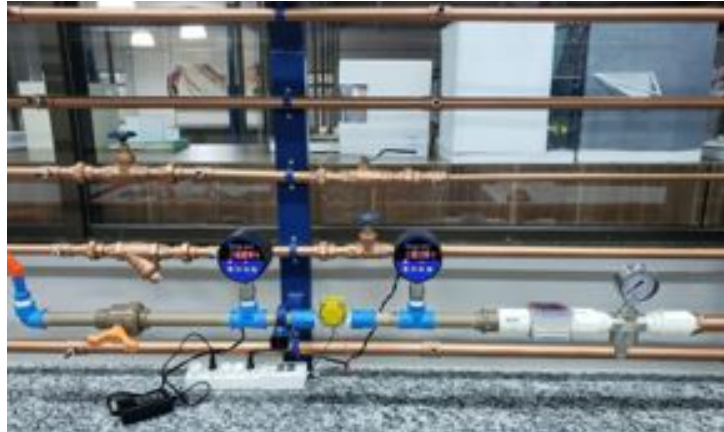
Fonte: (ROSA *et al.*, 2018).

Diferentemente de estudos anteriores, TORRES *et al.*, (2020) (TORRES *et al.*, 2020) investigou a viabilidade da microgeração de energia elétrica em áreas rurais por meio da instalação de uma microturbina Michell-Banki em sistemas agroindustriais com fluxo de água canalizado. A escolha dessa turbina se deve à sua simplicidade construtiva, baixo custo e capacidade de operar sob baixas quedas de pressão e vazões reduzidas, características comuns em sistemas de abastecimento em propriedades rurais.

Durante os ensaios laboratoriais como demonstrado na figura 4, o sistema foi submetido a faixas de pressão variando entre 0,5 e 15,5 metros de coluna de água (mca), com monitoramento da tensão e corrente elétrica geradas por meio de um microcontrolador Arduino UNO. A tensão máxima registrada foi de 12 Volts, e a potência elétrica mais alta foi de 1,6 Watts. No entanto, mesmo com essa produção, o sistema apresentou perdas de pressão consideráveis, que variaram entre 62% e 89%, dependendo da faixa de operação. Tais perdas ocorrem principalmente devido às dimensões reduzidas do orifício de jato da turbina (2 mm) e ao pequeno diâmetro dos condutos (25 mm), os quais geram restrições significativas ao escoamento da água, convertendo parte da energia hidráulica em perdas mecânicas e turbulência, em vez de aproveitamento útil.

A eficiência máxima de 12,66% observada no estudo representa a relação entre a energia elétrica gerada e a energia hidráulica disponível. Esse rendimento modesto se deve, principalmente,

Figura 3 – Plataforma de ensaios laboratoriais do estudo.



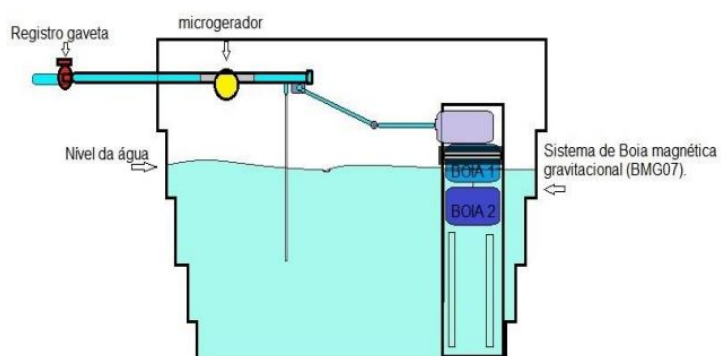
Fonte:(TORRES *et al.*, 2020).

ao fato de a microturbina não estar otimizada para as condições reais de pressão e vazão, além de seu porte reduzido, que favorece perdas por atrito e turbulência. A conversão indireta da energia, com uso de sensores e módulos eletrônicos, também consome parte da energia gerada, contribuindo para a redução da eficiência do sistema.

Apesar da baixa eficiência, o estudo destaca que a microturbina pode ser empregada de forma estratégica, como substituta de válvulas redutoras de pressão em sistemas hidráulicos, gerando energia enquanto reduz a pressão da água — um valor agregado em contextos onde a energia elétrica é escassa ou cara. Assim, mesmo com uma eficiência limitada, o sistema pode ser considerado viável em cenários específicos, desde que não comprometa o fornecimento de água no ponto de consumo.

Com objetivo semelhante, FIGUEIREDO; BRAGA *et al.* (2021) (FIGUEIREDO; BRAGA *et al.*, 2021) propôs um sistema que utiliza uma boia magnética e gravitacional para retardar o fechamento do registro do reservatório, como demonstrado na figura ?? prolongando a geração de eletricidade. O mini gerador, adaptado ao fluxo de água, alcançou até 12 V e 10 W de potência, demonstrando a eficiência do método. O projeto, pioneiro no Brasil, apresentou resultados promissores ao acender simultaneamente trinta micro lâmpadas de LED de 12 V, destacando o potencial da microgeração de energia em ambientes urbanos.

Figura 4 – Esquemático do estudo de Figueredo.



Fonte:(FIGUEIREDO; BRAGA *et al.*, 2021).

### **3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Nesta seção, são abordados os conceitos fundamentais necessários para o tema proposto de maneira consistente, permitindo a realização de ensaios e testes com um protótipo físico. Esses conceitos são essenciais para embasar a metodologia adotada e justificar as escolhas técnicas e científicas ao longo do desenvolvimento do trabalho.

#### **3.1 Distribuição de água**

Os sistemas de distribuição de água para consumo humano são compostos por várias etapas: captação, tratamento, bombeamento, armazenamento e distribuição. A água é captada de mananciais, tratada para garantir sua potabilidade, e bombeada para reservatórios que regulam o abastecimento e garantem a pressão adequada na rede (ABNT, 2005). A pressão ideal na rede de distribuição varia entre 10 e 50 metros de coluna de água (mca), sendo que 20 a 30 mca são suficientes para a maioria das aplicações residenciais. O controle da pressão é essencial para evitar problemas como vazamentos, rupturas e garantir o bom funcionamento dos sistemas hidráulicos nos pontos de consumo. O controle da pressão é realizado com o uso de válvulas redutoras de pressão, bombas com controle de velocidade, e reservatórios elevados que utilizam a gravidade para estabilizar a pressão da água na rede de distribuição (ABNT, 2005). Sistemas automáticos de controle e monitoramento, como SCADA, ajustam em tempo real a operação de bombas e válvulas, garantindo um fornecimento constante e seguro, também é importante resaltar que sistemas de geração elétrica na rede urbana não representa um problema ou uma carga a mais para os sistemas de abastecimento, que é o objetivo tratado neste trabalho.

#### **3.2 Gerador hidrelétrico**

Um gerador hidrelétrico converte a energia potencial da água em energia mecânica e, posteriormente, em energia elétrica. Em sistemas convencionais, esse processo começa com o armazenamento da água em um reservatório formado por uma barragem. Quando a água é liberada, ela percorre dutos até a turbina, onde sua energia cinética movimenta os rotores, convertendo-a em energia mecânica como representado na figura 5. Essa turbina está acoplada a um gerador, que pode produzir energia tanto em corrente alternada (CA) quanto em corrente contínua (CC).

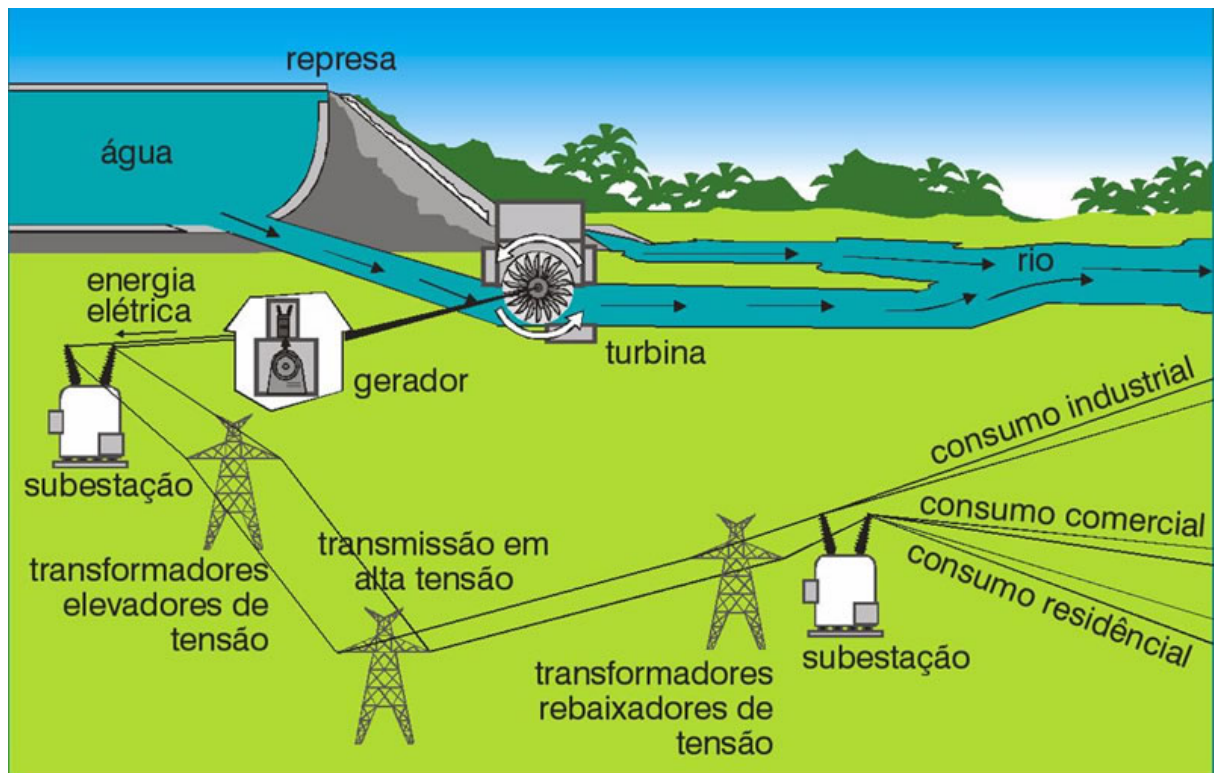
Em sistemas de microgeração, como o proposto neste trabalho, são empregadas turbinas compactas que operam com a pressão hidráulica residencial, eliminando a necessidade de grandes barragens. Os geradores de CA requerem retificação, por meio de diodos ou ponte retificadora para converter a corrente alternada em contínua, possibilitando o armazenamento em baterias. Já os geradores de CC, como o mini gerador de 12 V e 10 W utilizado no protótipo, produzem corrente contínua diretamente através de um comutador mecânico, apresentando maior simplicidade e eficiência para aplicações de pequena escala.

A geração de energia elétrica fundamenta-se na Lei de Faraday da Indução Eletromagnética:

$$FEM = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (3.1)$$

Essa equação expressa que a variação temporal do fluxo magnético  $\Phi$  induz uma força eletromotriz (FEM), sendo o sinal negativo indicativo da oposição à variação, conforme a Lei de Lenz. Após a conversão, a eletricidade gerada pode ser adaptada conforme a demanda: a corrente contínua pode ser utilizada diretamente ou convertida em corrente alternada para transmissão e distribuição. Por fim, a água retorna ao seu curso natural, minimizando impactos ambientais (CAUS, 2014).

Figura 5 – Representação geração de energia hidrelétrica.



Fonte: (SINDENERGIA, 2024)

### 3.3 Consumo Médio de Água na Região Metropolitana de Belo Horizonte

O consumo médio de água por habitante na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) apresenta índices elevados quando comparados às recomendações internacionais. Dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2022) indicam que, na capital Belo Horizonte, o consumo médio per capita é de aproximadamente 162,2 litros por habitante por dia, valor superior à média nacional, que é de 153,26 litros por habitante por dia, e ligeiramente inferior à média estadual de Minas Gerais, que alcança 167,53 litros por habitante por dia.

Esse cenário revela uma demanda significativa sobre os recursos hídricos, sobretudo quando comparado à recomendação da Organização Mundial da Saúde (OMS), que sugere um consumo ideal de 100 litros por pessoa por dia para suprir as necessidades básicas de higiene e consumo (institutoagua2024).

Considerando uma residência com quatro pessoas, esse consumo diário atinge 648,8 litros, resultando em um total de aproximadamente 19.464 litros por mês, apenas para o abastecimento residencial de água.

### 3.4 Potencial Hidráulico Aplicado em Sistemas de Abastecimento de Água e sua Viabilidade Econômica

#### 3.4.1 Relação Entre Potencial Hidráulico e Energia Mecânica

O potencial hidráulico presente em sistemas pressurizados, como redes de abastecimento de água, representa uma forma de energia armazenada sob pressão, que pode ser convertida em energia mecânica e, posteriormente, em energia elétrica. O aproveitamento desse potencial é uma solução sustentável, especialmente para sistemas de microgeração, onde há possibilidade de recuperar parte da energia utilizada para pressurizar a água (WHITE, 2017; MOTT, 2009).

A potência hidráulica disponível no sistema é calculada pela equação 3.2. (WHITE, 2017; WALTON, 1987):

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (3.2)$$

Onde:

- $P$  = potência hidráulica (W);
- $\rho$  = densidade da água (1000 kg/m<sup>3</sup>);
- $g$  = aceleração da gravidade (9,81 m/s<sup>2</sup>);
- $Q$  = vazão volumétrica do fluido (m<sup>3</sup>/s);
- $H$  = altura manométrica ou equivalente de pressão (m).

#### 3.4.2 Cálculo da Altura Manométrica (H)

A altura manométrica (H) é uma grandeza que traduz a pressão existente no sistema em metros de coluna de água. Ela é obtida pela seguinte fórmula (MOTT, 2009):

$$H = \frac{P}{\rho \cdot g} \quad (3.3)$$

Onde:

- $P$  = pressão do fluido em Pascal (Pa);
- $\rho$  = densidade da água (1000 kg/m<sup>3</sup>);
- $g$  = aceleração da gravidade (9,81 m/s<sup>2</sup>).

### 3.4.3 Cálculo da Vazão Volumétrica (Q)

A vazão volumétrica ( $Q$ ) corresponde ao volume de água que escoar por segundo em determinada seção do tubo. O cálculo é feito a partir da equação (WHITE, 2017; MOTT, 2009):

$$Q = A \cdot v \quad (3.4)$$

Sendo:

- $A$  = área da seção transversal do tubo (m<sup>2</sup>);
- $v$  = velocidade do fluido (m/s).

A área da seção transversal é determinada pela fórmula:

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (3.5)$$

Onde:

- $D$  = diâmetro interno do tubo (m).

A velocidade do fluido pode ser obtida a partir da equação da conservação de energia em escoamento pressurizado. Para um fluido ideal, desconsiderando perdas, a velocidade pode ser expressa como:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot P}{\rho}} = \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad (3.6)$$

Onde:

- $v$  = velocidade do fluido (m/s);
- $P$  = pressão do fluido (Pa);
- $\rho$  = densidade da água (kg/m<sup>3</sup>);

- $g$  = aceleração da gravidade (9,81 m/s<sup>2</sup>);
- $H$  = altura manométrica (m).

### 3.4.4 Síntese das Relações Entre Parâmetros Hidráulicos e Potência

O conhecimento dos parâmetros físicos, como pressão ( $P$ ) e diâmetro interno do tubo ( $D$ ), permite calcular:

- A altura manométrica ( $H$ );
- A área da seção transversal ( $A$ );
- A velocidade do escoamento ( $v$ );
- A vazão volumétrica ( $Q$ ).

Com esses valores, calcula-se a potência hidráulica bruta do sistema, que representa a quantidade de energia disponível no escoamento de água, conforme:

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (3.7)$$

Essa potência pode ser convertida em energia elétrica, considerando o rendimento dos equipamentos (geradores e turbinas) utilizados no processo ((ANEEL), 2024).

#### Exemplo Prático de Aplicação do Potencial Hidráulico

Considere um edifício residencial de 10 andares que possui um sistema de abastecimento com reservatório superior localizado a 30 metros acima do nível do térreo. A pressão no ponto de saída da tubulação é de aproximadamente 294.300 Pa (equivalente a 30 m.c.a), e a tubulação utilizada possui um diâmetro interno de 0,05 metros. Suponha uma velocidade média da água de 2 m/s (ao invés de calcular a velocidade pela equação 3.6, que nos daria um resultado ideal, vamos adotar um valor prático, mais próximo de uma aplicação real)..

##### 1. Cálculo da Área da Seção Transversal ( $A$ ):

$$A = \frac{\pi \cdot (0,05)^2}{4} = 0,00196 \text{ m}^2$$

##### 2. Cálculo da Vazão Volumétrica ( $Q$ ):

$$Q = A \cdot v = 0,00196 \cdot 2 = 0,00392 \text{ m}^3/\text{s}$$

##### 3. Cálculo da Potência Hidráulica ( $P$ ):

$$P = 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,00392 \cdot 30 \approx 1153,6 \text{ W}$$

Portanto, a potência hidráulica disponível é de aproximadamente **1,15 kW**, desconsiderando as perdas do circuito hidráulico.

Considerando um sistema de microgeração com rendimento de 60% do gerador, a potência elétrica útil gerada seria:

$$P_{\text{útil}} = 1,15 \cdot 0,60 = 0,69 \text{ kW}$$

Esse valor corresponde a 690 Watts de potência elétrica, que estará disponível somente quando houver vazão de água na tubulação. Mesmo assim, sistemas de armazenamento de energia com baterias, juntamente com um sistema de microgeração hidráulica, podem ser interessantes para alimentar uma pequena carga de iluminação por exemplo.

### 3.5 Relação Entre Potencial Hidráulico, Consumo de Água e Viabilidade Econômica

Além da análise técnica, é possível realizar uma avaliação econômica sobre o quanto de energia elétrica poderia ser gerada a partir do consumo de água em um sistema pressurizado e qual seria o valor econômico associado a essa energia.

#### 3.5.0.1 Potencial de geração

A energia elétrica gerada a partir do escoamento de água sob pressão pode ser estimada com base na potência hidráulica e no tempo necessário para o escoamento do volume considerado. Para o caso de  $1 \text{ m}^3$  de água, a energia gerada dependerá da altura manométrica do sistema e das propriedades físicas da água.

A potência hidráulica instantânea é dada por:

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (3.8)$$

Onde:

- $P$  = potência hidráulica (W);
- $\rho$  = densidade da água ( $\text{kg/m}^3$ );
- $g$  = aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ );
- $Q$  = vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ );
- $H$  = altura manométrica (m).

A energia elétrica  $E$ , em quilowatt-hora (kWh), é calculada a partir da potência e do tempo de escoamento:

$$E = \frac{P \cdot t}{1000} \quad (3.9)$$

onde  $P$  é a potência instantânea do sistema,  $t$  é o tempo em horas, necessário para escoar o volume de água considerado, e o fator 1000 converte de watts para quilowatts.

Como se deseja saber a energia associada ao escoamento de exatamente  $1 \text{ m}^3$  de água, considera-se o tempo necessário para escoar esse volume com a vazão  $Q$ , ou seja:

$$t [s] = \frac{1}{Q} \quad (3.10)$$

Substituindo a Equação 3.10 na Equação 3.9:

$$E = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot \frac{1}{Q}}{1000} = \frac{\rho \cdot g \cdot H}{1000} \quad (3.11)$$

O resultado obtido na Equação 3.11 está em  $\text{kW} \cdot \text{s}/\text{m}^3$  (quilowatts-segundo por metro cúbico), que equivale a  $\text{kJ}/\text{m}^3$ . Para expressar o valor em  $\text{kWh}/\text{m}^3$ , é necessário dividir ainda por 3600 (número de segundos em uma hora):

$$E = \frac{\rho \cdot g \cdot H}{1000 \cdot 3600} \quad (3.12)$$

Assumindo  $\rho = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$  e  $g = 9,81 \text{ m}/\text{s}^2$ :

$$E = 0,002725 \cdot H \quad (\text{kWh}/\text{m}^3) \quad (3.13)$$

Portanto desprezando as perdas nas tubulações e conexões, cada metro cúbico de água escoado sob uma determinada altura manométrica  $H$  é capaz de fornecer, teoricamente, uma quantidade de energia proporcional a  $0,002725 \cdot H$ , expressa em kWh. Essa energia representa o potencial bruto disponível no fluido e poderá ser convertida em energia elétrica conforme a eficiência dos componentes do sistema, como turbinas e geradores.

### 3.5.1 Custo e Valor Econômico da Energia

Sabendo o custo médio da energia elétrica na região, por exemplo, **R\$ 0,95 a R\$ 1,20 por kWh** (GERAIS, 2024), o valor econômico da energia gerada por metro cúbico é:

$$\text{Valor (R\$)} = E (\text{kWh}) \cdot \text{Tarifa (R\$/kWh)} \quad (3.14)$$

### 3.5.1.1 Energia Gerada em uma Caixa D'água

Considerando uma caixa d'água de 1000 litros (1 m<sup>3</sup>):

- Energia potencial gerada =  $0,002725 \cdot H$  kWh;
- Valor econômico proporcional à tarifa aplicada.

Se uma residência consome, por exemplo, 12 m<sup>3</sup>/mês, o potencial energético mensal seria:

$$E = 12 \cdot 0,002725 \cdot H \quad (\text{kWh}) \quad (3.15)$$

Aplicando o valor da tarifa, obtém-se o potencial de economia ou geração, caso esse potencial hidráulico fosse integralmente convertido em energia elétrica.

## 3.6 Instrumentação para Circuitos Elétricos

Os instrumentos para medição de grandezas elétricas são essenciais para a medição e monitoramento de parâmetros elétricos em diversos sistemas. Eles fornecem informações cruciais sobre corrente, tensão e potência, permitindo uma análise detalhada e eficiente do consumo energético (SAWHNEY, 2014).

### 3.6.1 Formas de medição em circuitos elétricos

Os sensores de energia se dividem em duas categorias principais: invasivos e não invasivos. Cada tipo tem suas características e fórmulas específicas para a medição dos parâmetros elétricos.

1. Sensores Invasivos: Os sensores invasivos são conectados diretamente ao circuito elétrico, oferecendo medições precisas. As fórmulas envolvidas dependem do tipo específico de sensor.
2. Shunts: Um shunt é um resistor de baixa resistência colocado em série com a carga. A tensão medida no shunt é usada para calcular a corrente.

$$I = \frac{V_{shunt}}{R_{shunt}} \quad (3.16)$$

Onde:

- $I$  = Corrente através do shunt (A)
- $V_{shunt}$  = Tensão medida sobre o shunt (V)

- $R_{shunt}$  = Resistência do shunt ( $\Omega$ )

Transformadores de Corrente (CTs): O transformador de corrente mede a corrente ao induzir uma corrente proporcional na bobina secundária. A corrente primária ( $I_{primary}$ ) e a corrente secundária ( $I_{secondary}$ ) estão relacionadas pela razão de transformação ( $N$ ).

$$I_{primary} = I_{secondary} \times N$$

Onde:

- $I_{primary}$  = Corrente primária no condutor (A)
- $I_{secondary}$  = Corrente secundária no CT (A)
- $N$  = Razão de transformação do CT (sem unidade)

### 3.7 Sensores Não Invasivos

Os sensores não invasivos medem parâmetros elétricos sem conexão física direta com o circuito. Eles geralmente utilizam o efeito Hall ou transformadores de corrente não invasivos (KOTHARI; NAGRATH, 2011).

#### 3.7.1 Sensores de Efeito Hall

O sensor de efeito Hall mede o campo magnético gerado pela corrente elétrica. A tensão Hall ( $V_{Hall}$ ) gerada é proporcional à corrente que passa pelo condutor.

$$I = \frac{V_{Hall}}{k}$$

Onde:

- $I$  = Corrente através do condutor (A)
- $V_{Hall}$  = Tensão medida pelo sensor de efeito Hall (V)
- $k$  = Constante do sensor de efeito Hall (V/A)

#### 3.7.2 Transformadores de Corrente Não Invasivos

Transformadores de corrente (TCs) não-invasivos são dispositivos utilizados para medir a corrente elétrica em um condutor sem a necessidade de interromper o circuito ou realizar conexões diretas com os fios energizados. Eles operam com base no princípio da indução eletromagnética

e geralmente são constituídos por uma bobina de medição (secundário) que envolve parcialmente ou completamente o condutor a ser medido (primário).

Fisicamente, esses TCs são frequentemente encontrados na forma de anéis ou "garras" que se abrem e se fecham ao redor do cabo condutor. Isso permite que sejam facilmente acoplados a um fio sem a necessidade de cortar ou expor o condutor, o que torna a instalação mais segura e prática, especialmente em sistemas energizados. A carcaça externa é geralmente de material isolante rígido (plástico ABS, por exemplo), e no interior há um núcleo de ferrite ou aço silício que canaliza o campo magnético gerado pela corrente do condutor.

A corrente no condutor cria um campo magnético que atravessa o núcleo do TC, induzindo uma tensão proporcional na bobina secundária. Essa tensão é então usada para estimar a corrente original, muitas vezes com auxílio de circuitos condicionadores ou microcontroladores.

A relação entre a corrente medida (secundária) e a corrente primária segue os mesmos princípios dos transformadores de corrente tradicionais (invasivos), respeitando a razão de transformação de corrente.

$$I_{primary} = I_{secondary} \times N$$

Onde:

- $I_{primary}$  = Corrente primária no condutor (A)
- $I_{secondary}$  = Corrente secundária medida (A)
- $N$  = Razão de transformação do transformador não invasivo (sem unidade)

## 3.8 Comparação entre Sensores Invasivos e Não Invasivos

### 3.8.1 Precisão e Detalhamento

- Sensores invasivos fornecem medições diretas e precisas com base nas fórmulas específicas para shunts e CTs.
- Sensores não invasivos oferecem uma abordagem mais prática e segura, utilizando o efeito Hall ou transformadores de corrente não invasivos para medições indiretas.

### 3.8.2 Instalação e Manutenção

- Sensores invasivos requerem desconexão do circuito para instalação e podem necessitar de manutenção regular.

- Sensores não invasivos permitem a instalação sem interromper o circuito, ideal para ambientes onde a continuidade da operação é essencial.

### 3.9 Considerações para a Escolha do Sensor

A escolha entre sensores invasivos e não invasivos deve considerar:

- **Precisão requerida:** Sensores invasivos são mais precisos para medições detalhadas.
- **Impacto na operação:** Sensores não invasivos são preferíveis em situações onde a interrupção do circuito deve ser evitada.
- **Tipo de circuito:** A escolha deve levar em conta o tipo de corrente (AC ou DC) e as características do circuito.

### 3.10 Microcontroladores (ESP32)

#### 3.10.1 o ESP32

ESP32 é uma plataforma de desenvolvimento altamente versátil baseada em microcontrolador de 32 bits, desenvolvida pela Espressif Systems. Ela é amplamente utilizada em projetos eletrônicos e aplicações de Internet das Coisas (IoT), devido à sua alta capacidade de processamento, conectividade integrada e baixo consumo de energia.

O ESP32 integra diversas funcionalidades como conectividade Wi-Fi e Bluetooth, múltiplos pinos de entrada e saída digitais e analógicas, além de núcleos de processamento dual-core. Assim como as placas Arduino, o ESP32 pode ser programado por meio da IDE Arduino, utilizando linguagem C/C++.

Seu funcionamento consiste na leitura de sinais de entrada (como sensores) e execução de comandos que afetam as saídas (como LEDs, motores ou atuadores). A programação é carregada na placa via cabo USB, e o microcontrolador executa o código continuamente, respondendo a estímulos externos (Espressif Systems, 2023).

#### 3.10.2 Aplicações do ESP32

O ESP32 é ideal para projetos que exigem conectividade, processamento em tempo real e múltiplas interfaces de comunicação. Um exemplo simples de aplicação seria controlar uma lâmpada remotamente via rede Wi-Fi utilizando um aplicativo para smartphone. Projetos mais sofisticados incluem o monitoramento de variáveis ambientais e envio de dados para a nuvem, como em estações meteorológicas inteligentes.

Também é possível utilizar o ESP32 em sistemas de irrigação automatizados, acionamento por assistentes de voz, controle de acesso com sensores biométricos, ou mesmo em robôs controlados por Bluetooth. Sua conectividade embutida e baixo custo expandem consideravelmente as possibilidades de automação e controle (PEREIRA; CHAARI; DAROGE, 2023).

### 3.10.3 Hardware do ESP32

O ESP32 geralmente é encontrado em placas de desenvolvimento como o ESP32 DevKit V1, como mostrado na figura 6. Seus principais componentes são:

- **Microcontrolador:** Núcleo dual-core Tensilica LX6 de 32 bits, com clock de até 240 MHz e 520 KB de SRAM.
- **Conectividade:** Wi-Fi 802.11 b/g/n e Bluetooth v4.2 BR/EDR + BLE.
- **Pinos de Entrada e Saída (GPIO):** Aproximadamente 30 a 36 pinos configuráveis para digital, analógico, PWM, I2C, SPI, UART, entre outros.
- **Conversores AD e DA:** Diversos canais ADC de 12 bits e DAC de 8 bits.
- **Interfaces de Comunicação:** SPI, I2C, UART, CAN, PWM, entre outras.
- **Porta USB via conversor serial:** Permite gravação e comunicação com o computador.
- **Alimentação:** Pode ser alimentado via USB ou fonte externa (5V), com regulador de 3,3V onboard.
- **Botões Reset e Boot:** Para reinício do sistema e upload do código.

### 3.10.4 Programação do ESP32 com a IDE Arduino

Apesar de o ESP32 poder ser programado via frameworks como o ESP-IDF, muitos desenvolvedores iniciantes preferem utilizar a **IDE Arduino** devido à sua simplicidade. Para isso, basta instalar o suporte ao ESP32 através do Gerenciador de Placas da IDE Arduino.

A programação é feita em C/C++, com acesso a bibliotecas específicas que permitem utilizar os recursos de Wi-Fi, Bluetooth, sensores e atuadores. A interface é amigável e há uma vasta quantidade de exemplos prontos que facilitam a aprendizagem e o desenvolvimento de projetos conectados (Vida de Silício, 2024).

Figura 6 – Microcontrolador ESP32.



Fonte:(Core Electronics, 2025).

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Escolha do Equipamento

Como mencionado anteriormente na seção de objetivos deste trabalho, um dos objetivos é a construção de um sistema protótipo para geração de energia elétrica usando uma microturbina conectada na entrada da caixa d'água.

Então, para iniciar o desenvolvimento do protótipo é fundamental selecionar os instrumentos de medição que coletarão os valores de tensão e corrente provenientes da microturbina, bem como a vazão e pressão da água. Esses dados serão processados pelo ESP 32 para análises relacionadas ao sistema de geração de energia.

#### 4.1.1 Medidor de Tensão

Para a medição da tensão elétrica na saída do gerador, será aplicado um circuito divisor de tensão, formado por dois resistores  $R_1$  e  $R_2$ . Os valores desse divisor de tensão precisam ser escolhidos de forma a não resultarem em consumo significativo de energia, garantindo assim que a medição não afete o desempenho do gerador.

Neste exemplo utilizando a equação 4.1:

$$V_{out} = V_{in} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (4.1)$$

consideramos uma tensão de entrada ( $V_{in}$ ) de 12 V. Para que a tensão de saída ( $V_{out}$ ) seja de 5 V, podemos utilizar os seguintes valores para os resistores:

$$R_1 = 70 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 50 \text{ k}\Omega$$

$$V_{out} = 12 \text{ V} \cdot \frac{50 \text{ k}\Omega}{70 \text{ k}\Omega + 50 \text{ k}\Omega} = 12 \text{ V} \cdot \frac{50}{120} = 5 \text{ V} \quad (4.2)$$

sendo assim a corrente consumida no divisor de tensão e insignificante:

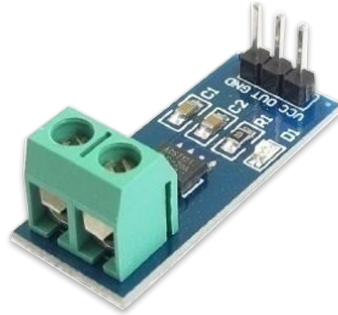
$$I = \frac{12 \text{ V}}{70 \text{ k}\Omega + 50 \text{ k}\Omega} = 0,1 \text{ mA} \quad (4.3)$$

Isso significa que a tensão de saída será de 5 V e uma corrente de 0,1 mA é pouco significativa, portanto, consideramos um nível adequado de corrente no divisor de tensão. Essa configuração é útil para medir tensões que estão além da faixa de operação dos instrumentos de medição, permitindo que a tensão seja reduzida a um nível seguro e mensurável.

O ESP 32, que será utilizado como medidor, possui uma alta impedância de entrada, o que minimiza a corrente que flui através do divisor e reduz o consumo de energia. Isso evita que a carga do ESP influencie a tensão do circuito, garantindo medições precisas.

### 4.1.2 Medidor de Corrente

Figura 7 – Sensor de Corrente ACS712 5A.



Fonte:(Smartkits, 2024).

Para a medição da corrente elétrica, será utilizado um Sensor de Corrente ACS712 5A que pode ser visto na figura 7. A instalação do sensor requer a abertura do circuito a ser medido, conectando-o em série. Ao alimentar o sensor com 5V no pino VCC, a tensão de saída inicial será de 2,5V. Quando uma corrente elétrica, seja DC ou AC, passar pelos terminais, ocorrerá uma alteração na tensão de saída, onde cada ampere de corrente resultará em um incremento ou decremento de 185mV, dependendo da polaridade da corrente (Smartkits, 2024).

### 4.1.3 Medidor de Vazão

Figura 8 – Sensor de Fluxo de Água de 1/2- YF-S201.



Fonte:(eletrogate, 2024).

Para medir o fluxo de água no sistema, utilizaremos um Sensor de Fluxo de Água de 1/2- YF-S201 que pode ser visto na figura 8. Este sensor possui um rotor que é movido pela água e um sensor baseado no efeito Hall. Quando a água passa pelo rotor, ele gira, e a velocidade de rotação varia conforme a quantidade de água que passa. Essas variações são detectadas pelo sensor de efeito Hall, que envia um sinal correspondente (eletrogate, 2024).

#### 4.1.4 Medidor de Pressão

Figura 9 – Sensor de Pressão de Água Yu G1.



Fonte:(shopees, 2024).

Para as medições de pressão da água no sistema, será utilizado o Transmissor de Sensor de Pressão de Água Yu G1 que pode ser visto na figura 9, que mede pressões de 0 a 300 psi. Este transdutor possui um corpo de aço inoxidável, oferecendo proteção contra surtos de tensão. O sensor apresenta um erro de saída de 0,5%, incluindo não linearidade, erro de histerese e repetibilidade. Sua estabilidade e confiabilidade são garantidas pela tecnologia de compensação de precisão e componentes sensíveis. Este sensor é amplamente utilizado em tanques de óleo, combustível e diesel para detectar diversos líquidos (shopees, 2024).

#### 4.1.5 Microgerador

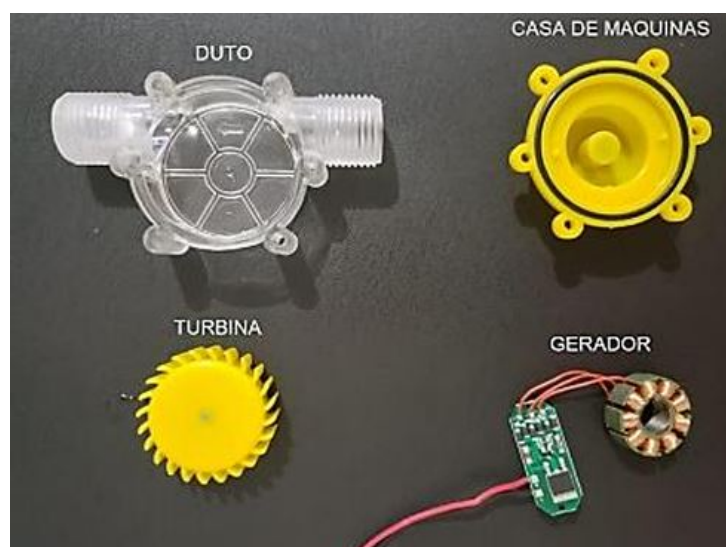
Figura 10 – Mini Gerador Hidrelétrico F50 12 V 10 W.



Fonte:(shopees, 2024).

Como ponto principal do projeto, será utilizado o Mini Gerador Hidrelétrico que pode ser visto na figura 10, que possui uma tensão de saída de 12V e capacidade de potência de 10W (potência prometida nos sites de venda do produto). Fabricado em acrílico transparente/amarelo, o gerador opera com corrente contínua (CC). Ele possui internamente um circuito de retificação trifásica completa (ponte com seis diodos), que converte a saída AC alternada gerada pela micro-turbina em corrente contínua. Em seguida, um diodo Zener de 12 V regula a tensão de saída, limitando-a a este valor que pode ser visto em detalhes na figura 11. Como características físicas uma conexão com rosca de 19mm e diâmetro interno de 13 mm, pesa 110 g e suas dimensões são 8,8 cm x 5,8 cm x 3,9 cm. (shopees, 2024).

Figura 11 – Mini Gerador Hidrelétrico desmontado.



Fonte: (TORRES *et al.*, 2020).

Com esses dispositivos em mãos, a próxima etapa consiste em desenvolver o código em C++ que realizará a leitura das variáveis referentes ao sistema, permitindo as devidas conversões para verificar a correlação entre o fluxo de água e a energia gerada. Para facilitar os testes do código, utilizaremos uma placa fotovoltaica, possibilitando a realização de testes em bancada. Isso permitirá verificar o funcionamento do código e do protótipo antes da instalação em uma tubulação.

## 4.2 Seleção do Ponto de Implementação

Com o protótipo montado e testado, ele será instalado na entrada de abastecimento da caixa d'água, assim avaliar a eficiência de geração de energia. Também serão realizados testes em ambiente controlado para verificar o comportamento do sistema em diferentes valores de vazão e pressão da água.

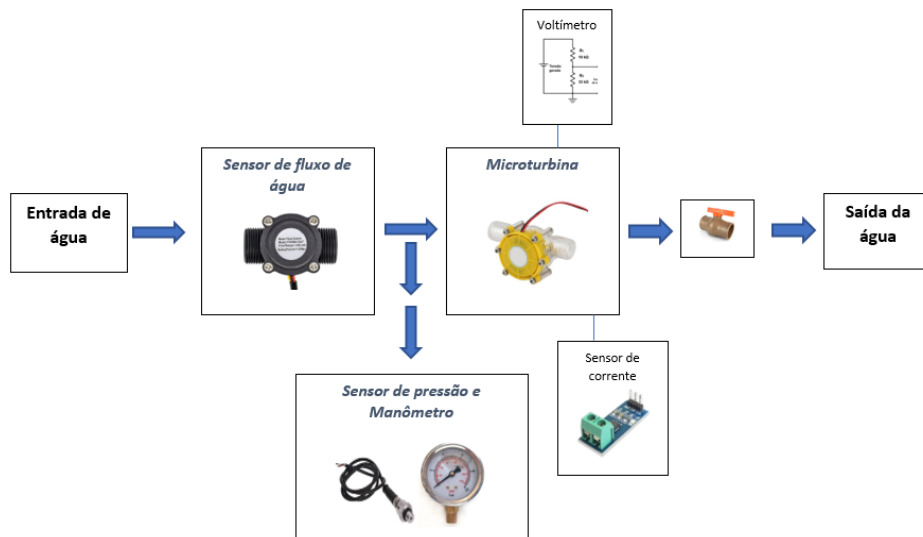
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os principais resultados obtidos com a construção e avaliação do sistema de microgeração hidráulica proposto. Foram conduzidos experimentos práticos que envolveram a montagem do protótipo, a calibração de sensores e a coleta de dados em condições reais de funcionamento.

### 5.1 Construção do Protótipo

O protótipo desenvolvido neste trabalho tem como principal objetivo fornecer um embasamento prático acerca da aplicação de um sistema de geração de energia elétrica em ambiente residencial, o sistema proposto no diagrama esquemático de funcionamento apresentado na Figura 12.

Figura 12 – Diagrama simplificado do protótipo de geração de energia.

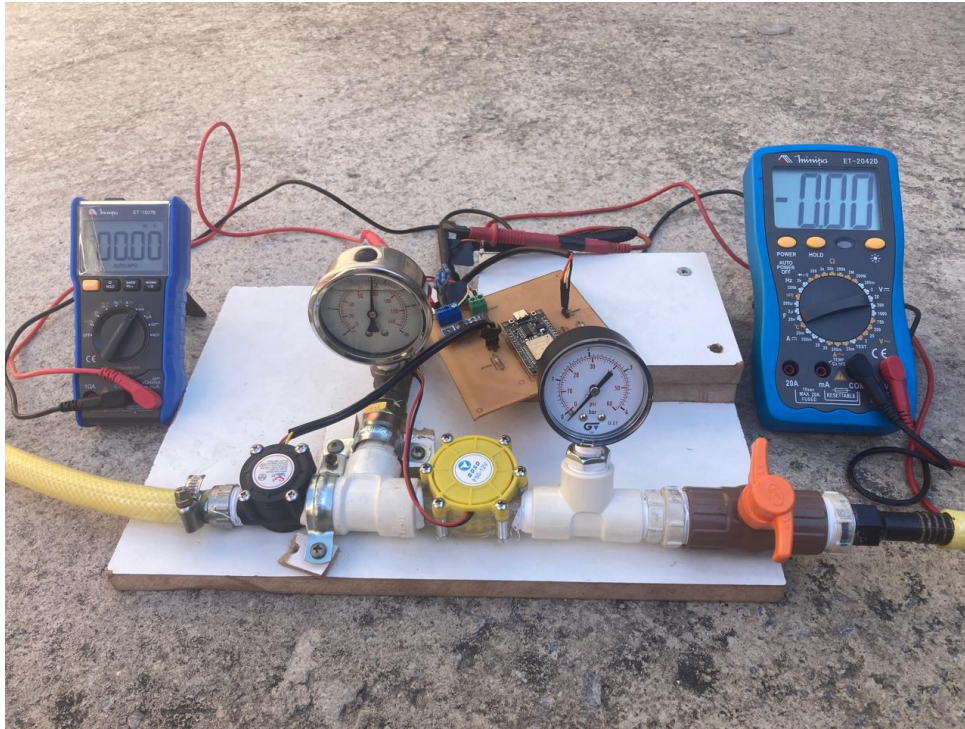


Fonte: Imagem criada pelo autor.

O sistema foi projetado para realizar o registro de grandezas físicas relevantes para a análise do desempenho, como a pressão da água, o fluxo hídrico, a tensão gerada pelo microgerador e a corrente elétrica consumida. A aquisição desses dados é realizada por meio da plataforma ESP32, que recebe as informações dos sensores e as processa conforme o código desenvolvido em linguagem C++, específico para esta aplicação.

Com o intuito de minimizar interferências eletromagnéticas e garantir leituras confiáveis, foi confeccionada uma placa eletrônica dedicada, que concentra os componentes necessários ao funcionamento do sistema. Nessa placa foram alocados o sensor de corrente, os resistores do divisor de tensão, os terminais de conexão do fluxostato, do gerador e, principalmente, a correta pinagem do ESP32. Essa abordagem contribuiu significativamente para a organização dos circuitos e para o aumento da confiabilidade operacional do protótipo.

Figura 13 – Protótipo de geração de energia.



Fonte:Foto tirada pelo autor.

## 5.2 Calibração estática do sistema de medição de tensão

A leitura da tensão gerada pelo sistema foi realizada por meio de um divisor de tensão resistivo, conforme descrito na Seção 4.1.1. A figura abaixo representa a configuração do divisor aplicado neste projeto com os valores de resistências usados.

Com essa configuração, a relação de divisão foi calculada de forma a garantir que a tensão aplicada na entrada analógica do ESP32 permanecesse dentro de sua faixa segura de operação (até 3,3V), mesmo quando a tensão gerada pelo sistema fosse consideravelmente superior.

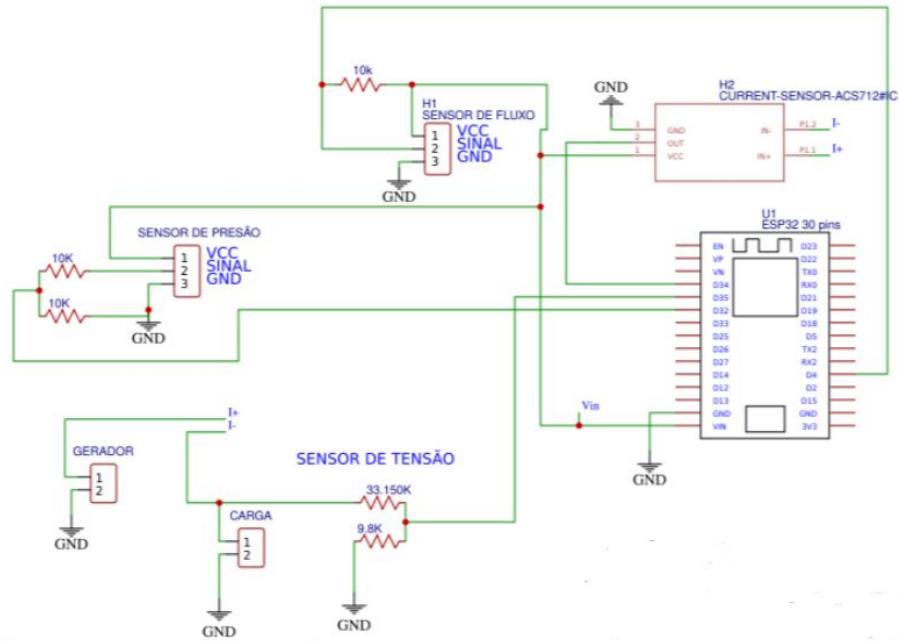
$$V_{\text{out}} = V_{\text{gerador}} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = V_{\text{gerador}} \cdot \frac{10000}{43000} \approx V_{\text{gerador}} \cdot 0,2326 \quad (5.1)$$

A tensão real gerada pelo sistema foi calculada no código a partir da leitura do ADC, utilizando a equação inversa do divisor de tensão. Esse procedimento permitiu converter corretamente a leitura proporcional em seu valor original, garantindo precisão no monitoramento.

$$V_{\text{gerador}} = V_{\text{ADC}} \cdot \left( \frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) = V_{\text{ADC}} \cdot 4,3 \quad (5.2)$$

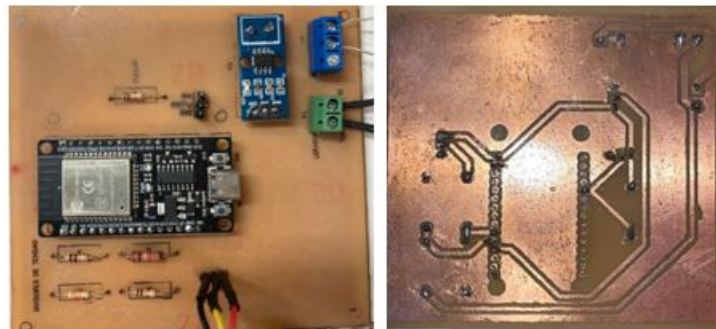
Este procedimento possibilitou a monitoração da tensão gerada durante os testes do sistema.

Figura 14 – Esquemático do circuito eletrônico do protótipo.



Fonte: Imagem criada pelo autor.

Figura 15 – Placa criada para o protótipo.

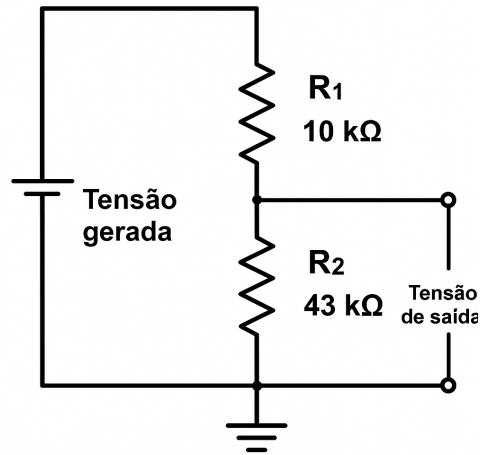


Fonte: Imagem criada pelo autor.

### 5.2.1 Validação da Medição de Tensão com o ESP32

Para validar o funcionamento do sistema de medição de tensão implementado com o ESP32 e o divisor resistivo, foram realizados testes utilizando uma fonte de tensão com saída ajustável e um multímetro digital **multímetro modelo ET-1639A, da marca Minipa** como padrão de referência.

Figura 16 – Configuração do divisor de tensão.



Fonte: Imagem criada pelo autor.

Figura 17 – Multímetro e fonte ajustável durante os testes .



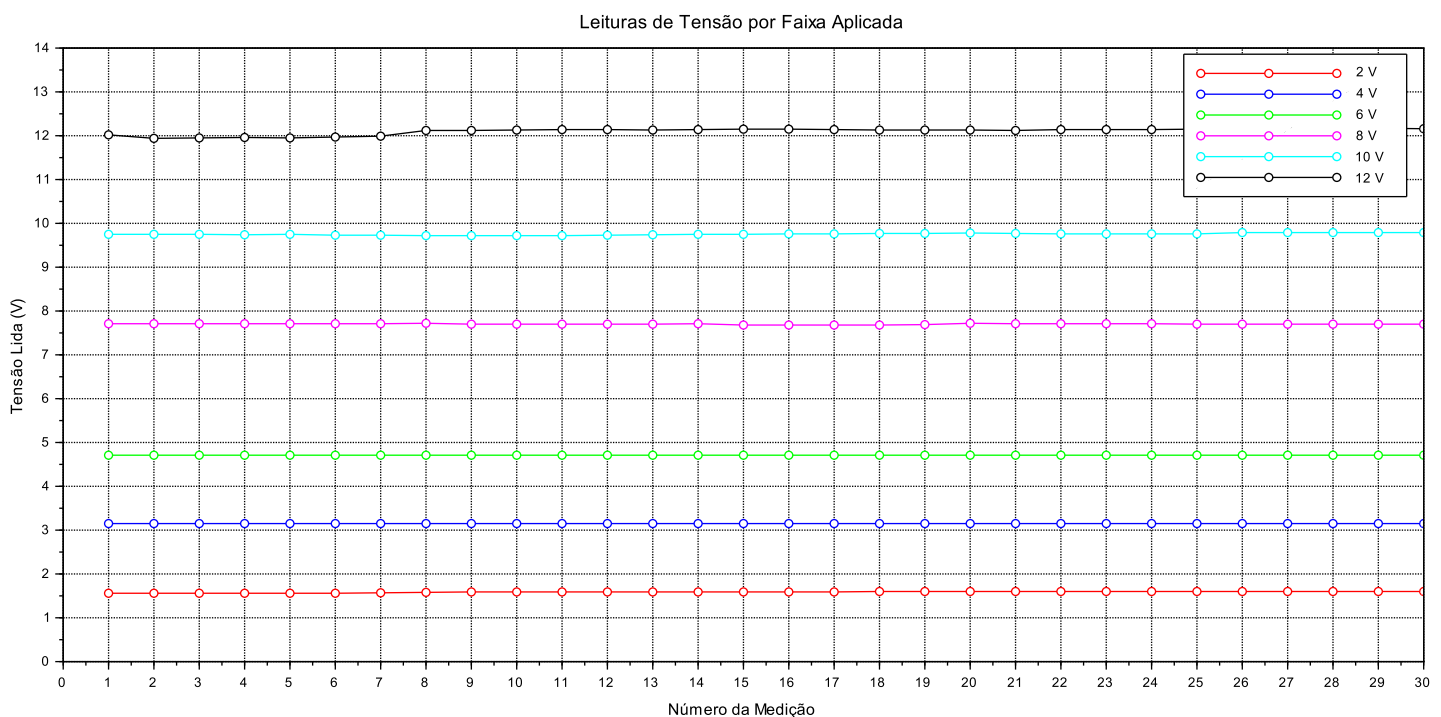
Fonte: foto tirada pelo autor.

Os ensaios consistiram na aplicação de diferentes níveis de tensão na entrada do divisor por meio de uma fonte de bancada, enquanto o valor da tensão na entrada do divisor era monitorado pelo multímetro e simultaneamente executando o código com o procedimento descrito na Seção 5.2 pelo ESP 32.

Para consolidar a validação do sistema de medição de tensão com o ESP32, foi elaborado um gráfico comparativo com os resultados obtidos em 30 leituras para cada nível de tensão aplicado: 2 V, 4 V, 6 V, 8 V, 10 V e 12 V. Essas leituras foram processadas em ambiente Scilab, onde se aplicou uma média aritmética simples para cada conjunto de dados, e também o cálculo do desvio padrão.

O gráfico da figura 18 permite visualizar a estabilidade das medições e o grau de aproximação dos valores obtidos em relação aos valores de referência.

Figura 18 – Gráfico de desempenho do sistema de medição de tensão.



Fonte: Gráfico gerado pelo autor.

Em todas as faixas de tensão testadas, observou-se que as médias calculadas ficaram muito próximas dos valores aplicados pela fonte de bancada, evidenciando a boa escolha dos valores de resistência do divisor resistivo e a satisfatória aproximação da conversão analógica-digital do ESP32.

Esses resultados reforçam a confiabilidade do sistema embarcado para monitoramento de tensão em tempo real, validando tanto o código desenvolvido quanto o dimensionamento dos resistores do divisor. Com isso, o sistema demonstrou ser confiável para medições de tensão dentro da proposta para o protótipo.

Tabela 1 – Resumo das medições de tensão elétrica

Tensão aplicada pela fonte	Média medida pelo ESP32 (V)	Desvio padrão (V)
2,00 V	1,58	0,02
4,00 V	3,15	0,00
6,00 V	4,71	0,00
8,00 V	7,70	0,01
10,00 V	9,76	0,02
12,00 V	12,10	0,07

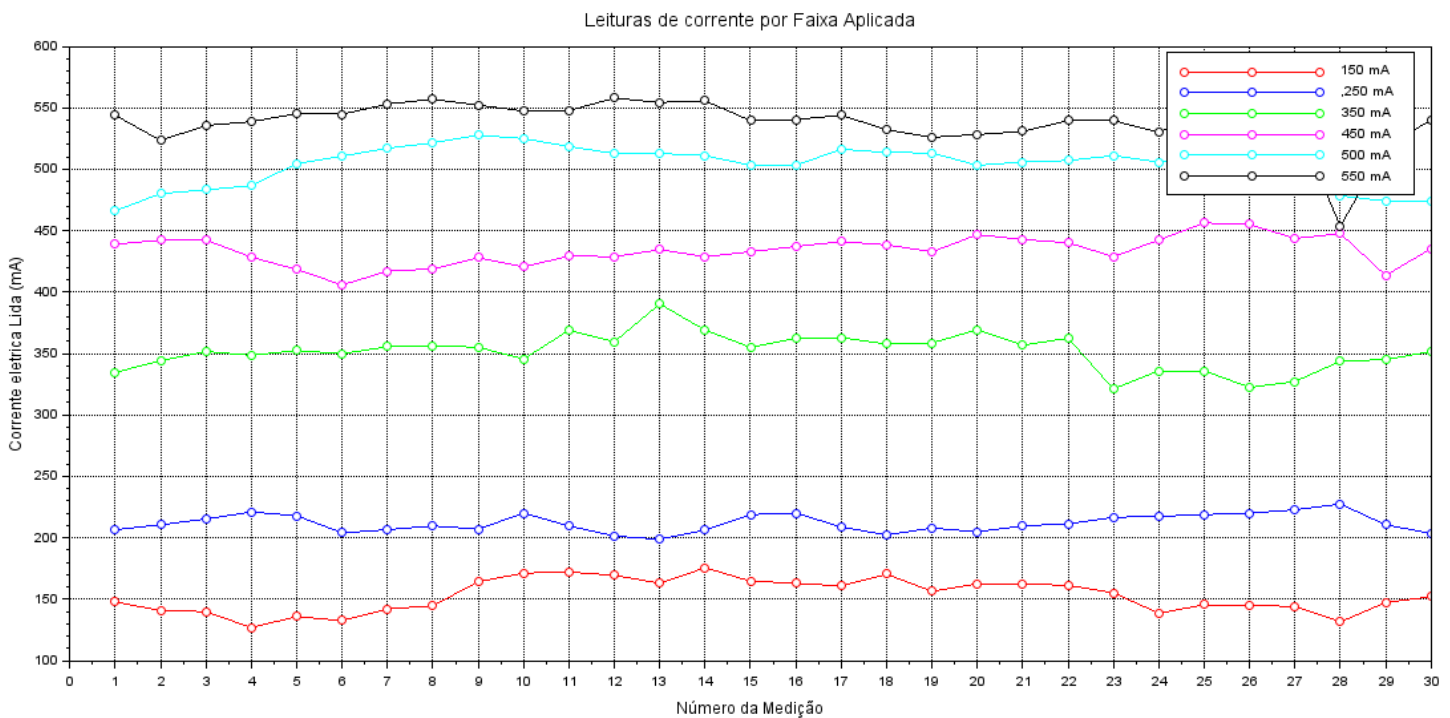
### 5.3 Calibração estática do sistema de medição de corrente elétrica

A calibração da leitura de corrente elétrica foi conduzida com o objetivo de validar a precisão do sensor ACS712 (modelo de 5A), conforme descrito na Seção 4.1.2. Este sensor fornece uma saída analógica proporcional à corrente medida, os dados de datasheet nos dizem que a sensibilidade é de aproximadamente 185 mV/A e tensão de referência centralizada em 2,5 V.

Para o procedimento de validação, foram aplicados cinco níveis distintos de corrente contínua (150 mA, 250 mA, 350 mA, 450 mA e 550 mA), por meio de uma fonte de alimentação ajustável conectada a uma carga resistiva estável. A medição de referência foi realizada com auxílio de um **multímetro modelo ET-1639A, da marca Minipa**, considerado padrão de medição.

As leituras da saída do sensor foram adquiridas por meio do ESP32, utilizando filtragem com média móvel de 10 amostras para reduzir variações indesejadas e oscilações nos sinais de medição. O tratamento estatístico contemplou o cálculo da média e do desvio padrão para cada nível de corrente aplicada, conforme resumo abaixo:

Figura 19 – Gráfico de desempenho do sistema de medição de corrente.



Fonte: Gráfico gerado pelo autor.

Tabela 2 – Resumo das medições de corrente elétrica

Corrente aplicada	Média medida (mA)	Desvio padrão (mA)
150 mA	152,88	13,43
250 mA	211,86	7,21
350 mA	281,31	5,38
450 mA	362,21	6,64
550 mA	435,89	5,06

Os resultados mostram que o sistema de medição apresenta boa exatidão, pois a média medida acompanha de forma linear a corrente aplicada. No entanto, o nível de 150 mA apresenta menor precisão, evidenciada por um desvio padrão relativamente alto (13,43 mA), o que indica maior dispersão das medidas repetidas nessa faixa. Em contraste, nas correntes de 250 a 550 mA, os desvios padrões estão entre 5,06 mA e 7,21 mA, demonstrando maior precisão e, conseqüentemente, maior confiabilidade e repetibilidade nessas faixas de corrente.

Essas informações são relevantes para aplicações onde o controle ou monitoramento de corrente elétrica em sistemas de microgeração é necessário, permitindo avaliar o desempenho real do sensor frente a diferentes condições operacionais.

### 5.3.1 Calibração Estática do Sistema de Medição de Pressão

A calibração do sensor de pressão foi realizada com o objetivo de garantir a confiabilidade do sistema de medição implementado no protótipo. O procedimento consistiu na aplicação de pressões controladas, variando de 0 a 5 bar, com o registro das respectivas leituras de tensão fornecidas pelo microcontrolador ESP32. O objetivo foi estabelecer uma relação matemática entre a saída elétrica do sensor e os valores reais de pressão.

Para garantir a precisão dos ensaios, foi utilizada uma Bomba de Calibração de Manômetros Salcas S600, capaz de gerar pressões estáveis e precisas.

Figura 20 – Bomba de Calibração de Manômetros Salcas S600 usada nos testes.



Fonte: Foto tirada pelo autor.

Essa bomba foi acoplada a dois dispositivos principais:

- Um manômetro analógico com glicerina da marca Balflex, com escala de 0 a 10 bar (ou 0 a 140 PSI), utilizado como instrumento de referência confiável;

Figura 21 – Manômetro analógico com glicerina (0 a 10 bar).



- Um sensor de pressão Yu G1, do tipo piezoresistivo com saída analógica, conforme descrito na Seção 4.1.4, responsável por registrar as variações de pressão em forma de tensão elétrica.

Como o sensor Yu G1 opera com alimentação de 5 V e sua saída analógica pode atingir tensões superiores a 3,3 V — limite máximo suportado pelos pinos analógicos do ESP32 — foi implementado um divisor de tensão resistivo na linha de sinal. Este circuito utilizou dois resistores de mesmo valor,  $R_1 = 10\text{ k}\Omega$  e  $R_2 = 10\text{ k}\Omega$ , formando um divisor 1:2, responsável por reduzir proporcionalmente a tensão de saída do sensor, tornando-a compatível com os níveis de entrada do microcontrolador.

O processo de calibração foi conduzido da seguinte forma: tanto o sensor Yu G1 quanto o manômetro analógico Balflex foram conectados simultaneamente à bomba de calibração Salcas S600, garantindo que ambos estivessem submetidos à mesma pressão em cada etapa do experimento. A pressão foi aumentada gradualmente em incrementos de 1 bar, variando de 0 até 5 bar. Para cada valor de pressão aplicado, foram coletadas 30 amostras de tensão do sensor, lidas pelo ESP32. Utilizou-se filtragem por média móvel de 10 amostras, com o intuito de reduzir oscilações e variações indesejadas nas medições.

Figura 22 – Coleta de dados prática do sensor de pressão.



Fonte: foto tirada pelo autor.

As leituras foram organizadas em planilha, e para cada faixa de pressão foram calculadas a média e o desvio padrão das tensões medidas.

Com base nesses valores, foi possível associar uma média de tensão elétrica a cada valor de pressão aplicada, permitindo construir uma curva de calibração do sensor.

Tabela 3 – Valores médios de tensão real para cada faixa de pressão.

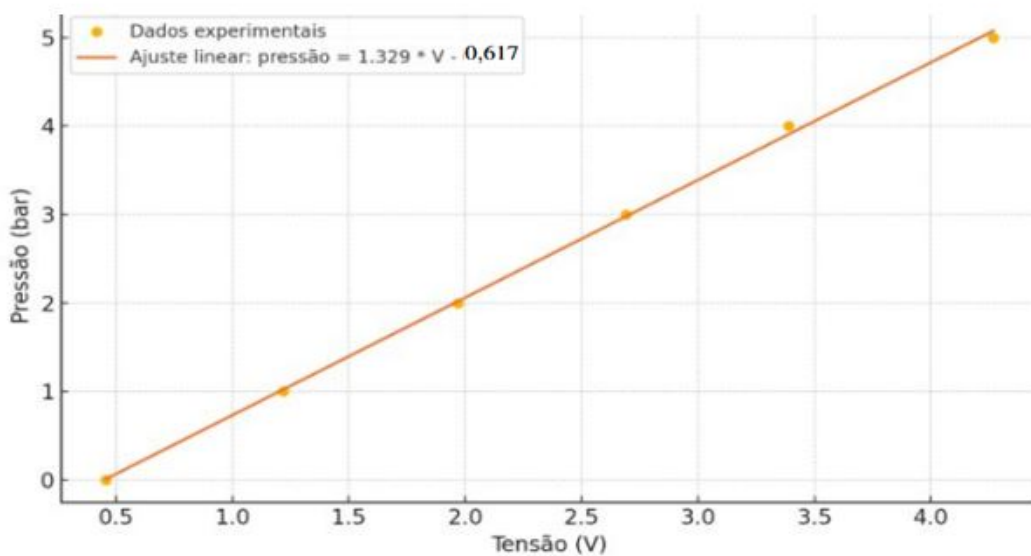
Pressão (bar)	Tensão real (V)
0	0,456
1	1,218
2	1,969
3	2,690
4	3,390
5	4,270

A análise dos dados revelou um comportamento linear da saída do sensor em função da pressão aplicada. Assim, foi aplicada uma **regressão linear** para obter uma equação empírica que descrevesse essa relação. O modelo gerado ajustou os dados experimentais com excelente aproximação, resultando na seguinte equação:

$$P = 1,348 \cdot V_{\text{sensor}} - 0,617 \quad (5.3)$$

Essa equação estabelece a relação entre a tensão de saída do sensor (em volts) e a pressão medida (em bar). O coeficiente angular 1,348 representa a sensibilidade do sensor (bar por volt), enquanto o termo constante -0,617 compensa o deslocamento inicial da curva (offset), refletindo a tensão de saída não nula mesmo quando a pressão aplicada é zero — característica comum em sensores piezoresistivos. A regressão apresentou um coeficiente de determinação de 99,97%, indicando excelente aderência do modelo linear aos dados experimentais.

Figura 23 – Curva de calibração do sensor de pressão.



Fonte: Gráfico gerado pelo autor.

Substituindo  $V_{\text{sensor}}$  pela expressão em função do ADC, considerando o divisor resistivo, tem-se a equação final implementada no código:

$$P = 1,348 \cdot \left( \frac{\text{ADC} \times 3,3}{4095} \times 2 \right) - 0,617 \quad (5.4)$$

Essa abordagem garante que os valores de pressão lidos pelo sistema correspondam com alta fidelidade à realidade física, conforme validado em bancada.

## 5.4 Calibração do Sistema de Medição de Fluxo de Água

Para garantir a confiabilidade da medição de vazão no sistema desenvolvido, foi realizada a calibração do sensor de fluxo de água modelo YF-S201, instalado na entrada do protótipo de geração de energia. Esse sensor opera com base em um rotor acionado pela passagem da água e um sensor de efeito Hall que detecta a rotação. A rotação do rotor gera pulsos digitais, cuja frequência é proporcional ao fluxo de água.

### 5.4.1 Procedimento Experimental

A calibração foi realizada por meio de um método prático utilizando um balde graduado com volume conhecido. Foram medidos 8 litros de água em cada experimento, os quais foram despejados no reservatório de testes acoplado ao protótipo. A água passava inicialmente pelo sensor de fluxo e, em seguida, pela microturbina, o que permitiu realizar a calibração.

Figura 24 – Reservatório de testes usado para calibração.



Fonte: foto tirada pelo autor.

Durante o esvaziamento do reservatório, foi feita a contagem dos pulsos gerados pelo sensor, correspondentes à passagem dos 8 litros de água. Esse procedimento foi repetido dez

vezes consecutivas. A média das medições resultou em aproximadamente 3064,6 pulsos por 8 litros, o que permitiu calcular a constante de calibração:

$$K = \frac{3064,6 \text{ pulsos}}{8 \text{ litros}} \approx 383,08 \text{ pulsos/L}$$

Essa constante foi adotada no sistema para o cálculo da vazão em tempo real, com base na equação:

$$Q = \frac{f}{K}$$

Em que:

- $Q$  é a vazão da água em litros por minuto (L/min);
- $f$  representa a frequência de pulsos por minuto;
- $K$  é a constante de calibração obtida experimentalmente.

#### 5.4.2 Resultados da Calibração

A seguir, é apresentado o gráfico das dez medições realizadas durante o processo de calibração do sensor YF-S201:

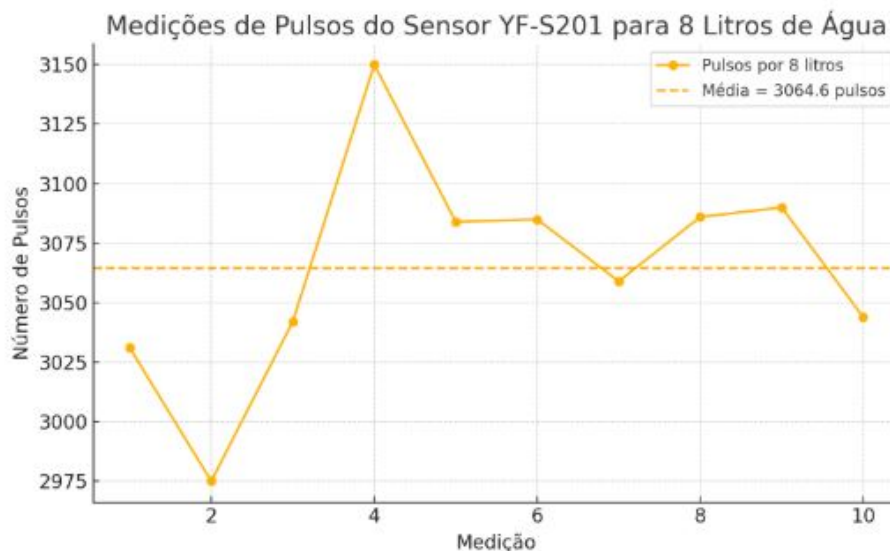


Figura 25 – Número de pulsos para 8 litros de água em 10 medições consecutivas

Após a calibração, o sistema foi testado em diferentes situações de fluxo. As leituras obtidas foram repetidamente comparadas com volumes medidos manualmente, apresentando resultados consistentes e com precisão satisfatória, validando a eficácia do processo de calibração e a confiabilidade do sensor no contexto do protótipo.

### 5.4.3 Testes do Protótipo em Ambiente Residencial

Após a conclusão do processo de montagem, calibração e validação dos sensores, foi realizado um teste prático do protótipo em uma residência localizada na cidade de Betim, na região metropolitana de Belo Horizonte, com o objetivo de avaliar o desempenho do sistema sob condições reais de uso.

O protótipo foi conectado diretamente à linha de abastecimento de água da residência, a qual apresentava uma pressão estática de 5 bar com o circuito hidráulico inicialmente fechado.

Figura 26 – Protótipo conectado ao sistema de abastecimento com circuito hidráulico fechado.



Fonte: foto tirada pelo autor.

Os ensaios foram conduzidos em duas etapas: a primeira com o circuito aberto (sem carga) e, posteriormente, com a inserção de cargas resistivas de 16,3  $\Omega$ , 23,5  $\Omega$ , 46,5  $\Omega$ , 93  $\Omega$  e 135,6  $\Omega$  no sistema.

Durante os testes, foram monitorados os valores de fluxo instantâneo (L/min), volume total de água, pressão, corrente e tensão elétrica. As medições de corrente e tensão foram realizadas simultaneamente por meio do sistema de aquisição baseado no ESP32 e também por um multímetro digital, permitindo validar a precisão do sistema. Observou-se uma boa concordância entre os valores obtidos por ambos os métodos.

### 5.4.3.1 Teste com Circuito Aberto (Sem Carga)

O primeiro ensaio prático foi realizado com o sistema operando em circuito aberto, ou seja, sem nenhuma carga resistiva conectada à saída do gerador. Esse tipo de ensaio, conhecido como teste em vazio, tem como objetivo observar o comportamento elétrico do protótipo em condições de fluxo hidráulico ativo, mas sem consumo de corrente, simulando uma situação em que o sistema gera tensão, mas não transfere potência para uma carga.

Durante o teste, foram registrados os valores de fluxo instantâneo, volume acumulado, corrente elétrica e tensão média. Com esses dados, foi possível calcular a potência elétrica instantânea utilizando a expressão:

$$P = V \times I$$

onde  $V$  representa a tensão elétrica e  $I$  a corrente elétrica medida em cada instante.

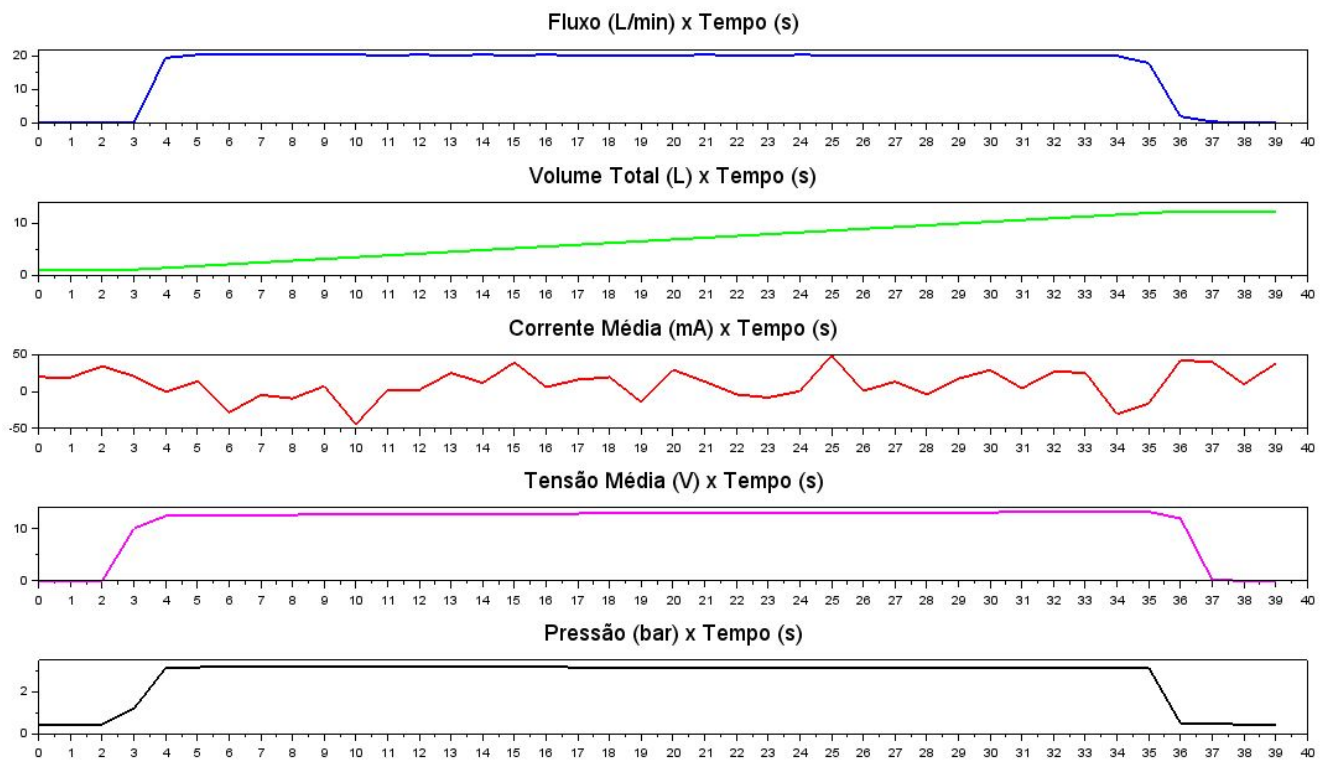
É importante destacar que os valores apresentados no multímetro durante os testes indicaram uma tensão de aproximadamente 12,8 V e corrente nula (0 mA). Contudo, observou-se que o sistema de medição de corrente do protótipo indicava pequenas variações, o que é esperado devido à presença de ruídos no sinal, é importante ressaltar que, durante a calibração do sensor, não foram feitos testes nesta faixa de corrente. Ainda assim, tais leituras permaneceram próximas do valor real e dentro do desvio padrão esperado.

Tabela 4 – Resultados do teste em vazio (circuito aberto).

Vazão (L/min)	Volume (L)	Corrente (mA)	Tensão (V)	Pressão (bar)
0	0,00	19,51	0	0,44
0	0,00	19,08	0	0,44
0	0,00	34,32	0	0,44
0,16	0,00	20,82	9,98	1,19
19,44	0,32	-0,53	12,38	3,12
20,38	0,66	13,85	12,47	3,16
20,53	1,01	-28,84	12,51	3,19
20,38	1,35	-4,88	12,57	3,20
20,38	1,69	-9,67	12,60	3,19
20,38	2,03	7,32	12,63	3,19
20,38	2,36	-44,96	12,65	3,18
20,22	2,70	2,09	12,71	3,17
20,38	3,04	2,09	12,73	3,17
20,22	3,38	25,18	12,75	3,17
20,38	3,72	11,67	12,79	3,18
20,22	4,06	39,55	12,81	3,17
20,38	4,39	6,01	12,83	3,17
20,22	4,73	16,03	12,84	3,16
20,22	5,07	19,51	12,87	3,15
20,22	5,41	-14,46	12,88	3,15
20,22	5,74	29,53	12,90	3,15
20,38	6,08	13,41	12,93	3,16
20,22	6,42	-4,01	12,94	3,16
20,06	6,75	-8,37	12,95	3,14
20,38	7,09	0,35	12,98	3,15
20,22	7,43	49,13	12,99	3,15
20,22	7,77	0,78	13,01	3,15
20,22	8,11	13,41	13,03	3,15
20,22	8,45	-4,01	13,05	3,15
20,22	8,79	17,33	13,06	3,15
20,22	9,13	29,10	13,07	3,14
20,06	9,45	4,27	13,10	3,14
20,22	9,79	26,92	13,12	3,15
20,22	10,12	25,61	13,13	3,13
20,22	10,46	-31,02	13,14	3,12
20,06	10,79	-16,21	13,15	3,14
17,87	11,09	42,16	11,92	0,49
1,88	11,12	40,42	0,20	0,45
0,31	11,13	9,93	0	0,44
0	11,13	37,81	0	0,44
0	11,13	27,79	0	0,44

A seguir, é apresentado o gráfico da variação de grandezas elétricas e hidráulicas em função do tempo durante o teste em circuito aberto. Esse gráfico permite visualizar a evolução do comportamento dinâmico do sistema ao longo do ensaio com carga nula.

Figura 27 – Variação de grandezas elétricas e hidráulicas ao longo do tempo em circuito aberto.

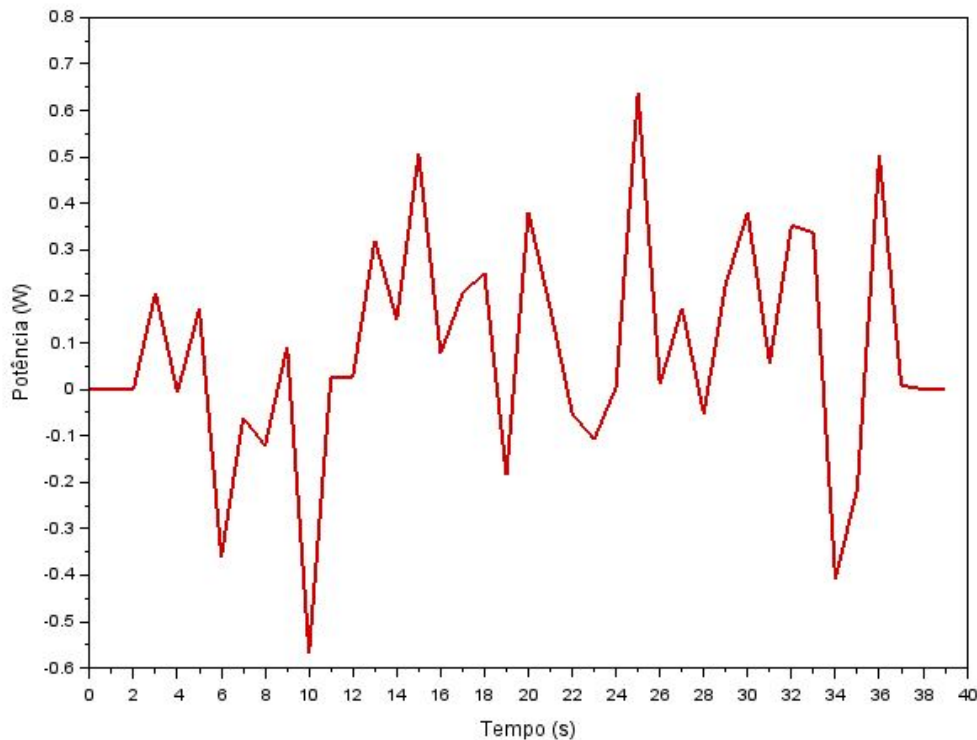


Fonte: Gráfico gerado pelo autor.

Como ilustrado nos gráficos da figura 27 durante o teste em vazio, observou-se a variação das grandezas elétricas e hidráulicas ao longo do tempo, mesmo na ausência de carga. Com a vazão estabilizando próximo a 20 L/min e a pressão variando entre 3,0 bar e 3,1 bar, a tensão média atingiu valores de até 13,15 V. Ainda assim, a corrente permaneceu nula ao longo do teste. O amperímetro indicou exatamente 0 mA durante toda a medição, e a corrente média registrada pelo sistema ficou próxima de 0 mA, com pequenas oscilações atribuídas ao ruído eletrônico do sensor. Esse comportamento confirma que, apesar da geração de tensão, não houve transferência de potência elétrica para uma carga, caracterizando o funcionamento esperado em circuito aberto e validando a resposta do sistema em condições reais de operação hidráulica sem consumo elétrico.

A figura 28 abaixo apresenta o gráfico da potência gerada em função do tempo durante esse ensaio. Observa-se que, apesar da presença de tensão no circuito, a potência elétrica manteve-se praticamente nula em todo o intervalo analisado. Pequenas oscilações visíveis no gráfico são atribuídas a ruídos nas medições da corrente, possivelmente causados por instabilidades do sensor em regime sem carga.

Figura 28 – Potência Elétrica Gerada durante o Teste em Vazio.



Fonte: Gráfico gerado pelo autor.

Esse resultado está de acordo com o comportamento esperado para o modo de operação sem carga, em que não há caminho condutivo para o escoamento da corrente elétrica. Nessa condição, a energia gerada pelo sistema permanece sob a forma de tensão nos terminais do gerador, caracterizando uma energia potencial não dissipada. Pode-se perceber que, devido à dispersão das leituras de corrente mesmo com o valor real sendo zero, o gráfico de potência apresenta pequenas oscilações, ainda que, teoricamente, o valor esperado da potência elétrica neste caso seja 0 W. Essa leve variação é atribuída ao ruído do sensor e não representa transferência real de energia para uma carga.

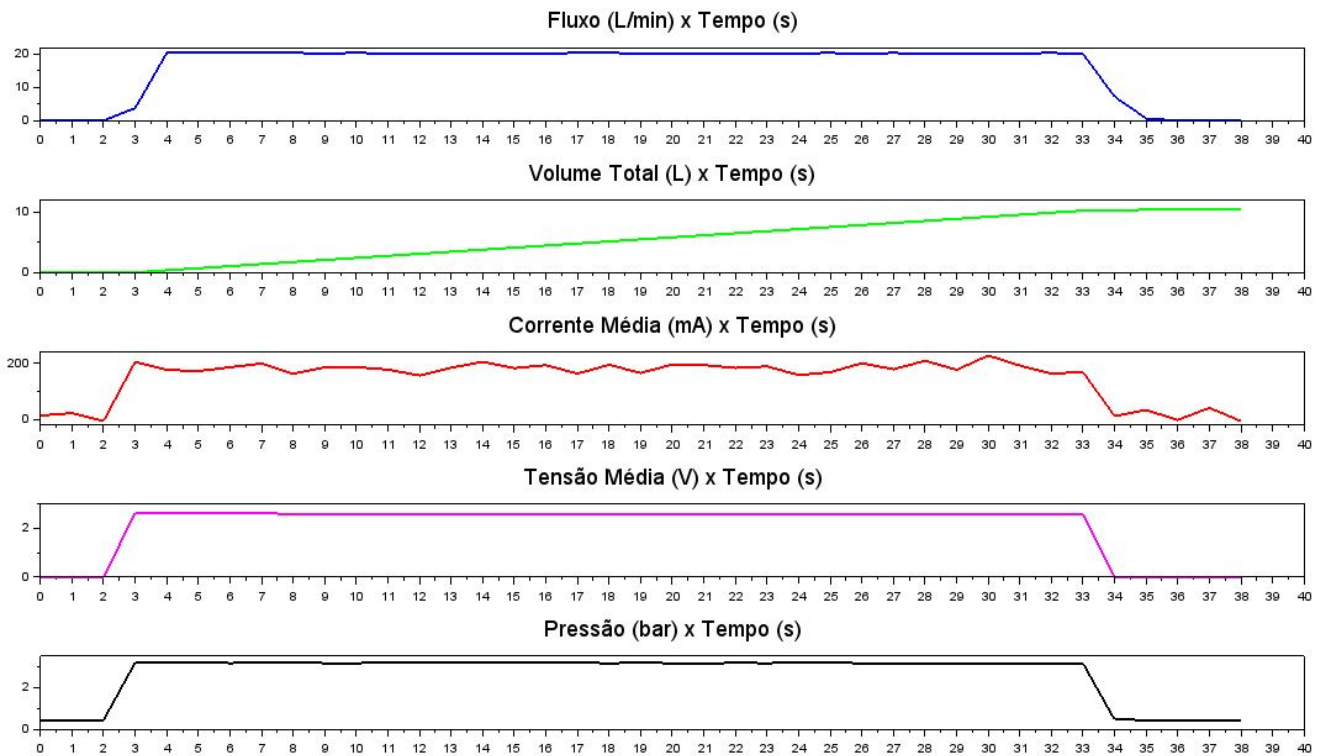
#### 5.4.3.2 Teste com Carga Resistiva de $16,3 \Omega$

O segundo ensaio prático foi conduzido com a conexão de uma carga resistiva de  $16,3 \Omega$  ao sistema gerador. Esse tipo de teste tem como finalidade avaliar o desempenho do protótipo sob condições reais de operação, em que há transferência efetiva de potência elétrica para uma carga.

Tabela 5 – Resultados do teste com carga resistiva de 16,3  $\Omega$ .

Vazão (L/min)	Volume Total (L)	Corrente (mA)	Tensão (V)	Pressão (bar)
0	0	13,24	0	0,44
0	0	21,95	0	0,44
0	0	-5,92	0	0,44
3,76	0,06	204,47	2,62	3,18
20,38	0,40	175,29	2,62	3,17
20,38	0,74	171,37	2,61	3,22
20,38	1,08	184,87	2,60	3,16
20,38	1,42	198,37	2,61	3,19
20,38	1,76	161,78	2,59	3,19
20,22	2,10	184,43	2,59	3,16
20,38	2,44	185,31	2,59	3,16
20,22	2,77	176,59	2,59	3,18
20,22	3,11	155,68	2,59	3,19
20,22	3,45	183,13	2,59	3,19
20,22	3,79	204,04	2,58	3,17
20,22	4,12	181,82	2,58	3,18
20,22	4,46	192,28	2,57	3,18
20,38	4,80	162,22	2,57	3,17
20,38	5,14	193,58	2,57	3,16
20,22	5,48	164,40	2,57	3,17
20,22	5,81	194,89	2,57	3,16
20,06	6,15	192,71	2,57	3,15
20,22	6,48	182,26	2,57	3,17
20,22	6,82	187,92	2,56	3,16
20,22	7,16	157,43	2,57	3,18
20,38	7,50	167,01	2,56	3,17
20,06	7,83	199,68	2,56	3,16
20,38	8,17	177,47	2,56	3,15
20,06	8,51	207,96	2,56	3,16
20,22	8,84	175,72	2,55	3,16
20,22	9,18	226,69	2,55	3,15
20,22	9,52	190,97	2,56	3,15
20,38	9,86	162,22	2,56	3,14
20,06	10,19	167,88	2,56	3,15
7,21	10,31	11,07	0	0,45
0,63	10,32	32,85	0	0,44
0	10,32	-2,87	0	0,44
0	10,32	40,69	0	0,44
0	10,32	-6,79	0	0,44

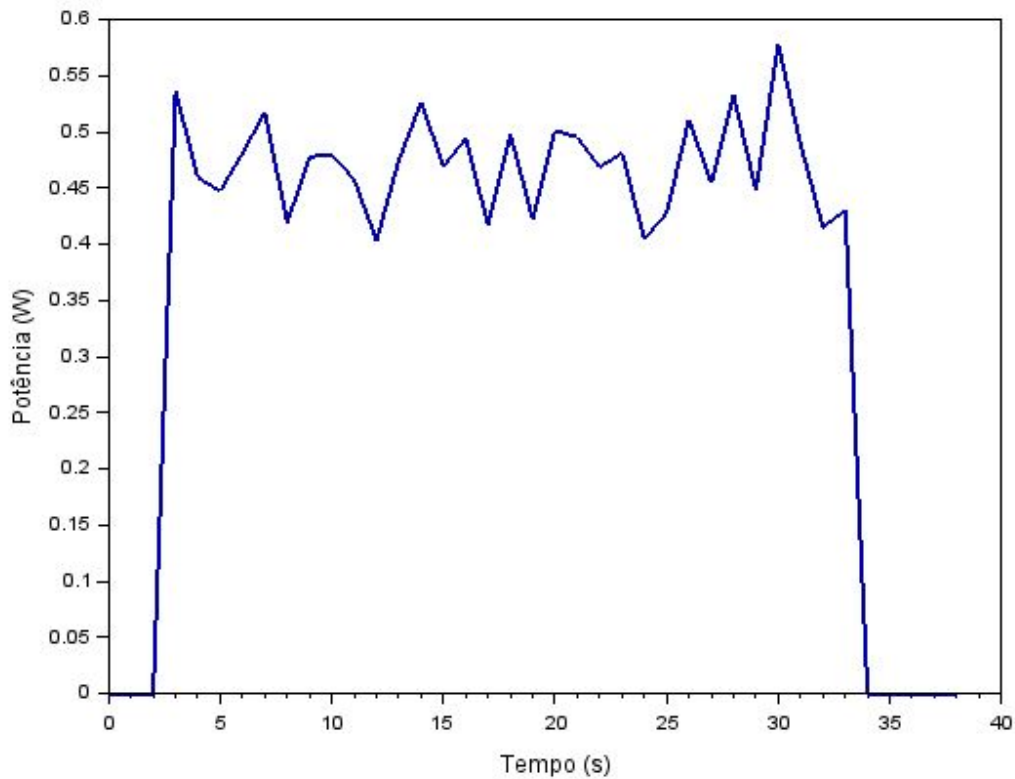
A seguir na figura 29, é apresentado o gráfico da variação de grandezas elétricas e hidráulicas em função do tempo durante o teste com carga resistiva de 16,3  $\Omega$

Figura 29 – Variação de grandezas elétricas e hidráulicas ao longo do tempo com carga resistiva de 16,3  $\Omega$ .

Fonte: Gráfico gerado pelo autor.

Como ilustrado nos gráficos durante o teste com carga de 16,3  $\Omega$ , observou-se a variação das grandezas elétricas e hidráulicas ao longo do tempo, com o sistema operando sob condições reais de fornecimento de energia. Com a vazão estabilizando próximo a 20 L/min e a pressão variando entre 3,0 bar e 3,2 bar, a tensão média permaneceu em torno de 2,6 V. Nesse cenário, diferentemente do teste em vazio, a corrente elétrica apresentou valores significativamente superiores, variando entre aproximadamente 150 mA e 220 mA ao longo do ensaio.

Essa condição permitiu a entrega efetiva de potência elétrica à carga resistiva conectada ao sistema. A figura 30 abaixo apresenta o gráfico da potência gerada em função do tempo durante esse ensaio.

Figura 30 – Potência Elétrica Gerada durante o Teste com carga de  $16,3 \Omega$ .

Fonte: Gráfico gerado pelo autor.

Verifica-se que, ao contrário do que foi observado no circuito aberto, a potência elétrica manteve-se continuamente presente, com valores oscilando entre 0,4W e 0,6W, atingindo picos de até 0,66W nos instantes de maior estabilidade do fluxo hidráulico.

#### 5.4.3.3 Teste com Carga Resistiva de $23,5 \Omega$

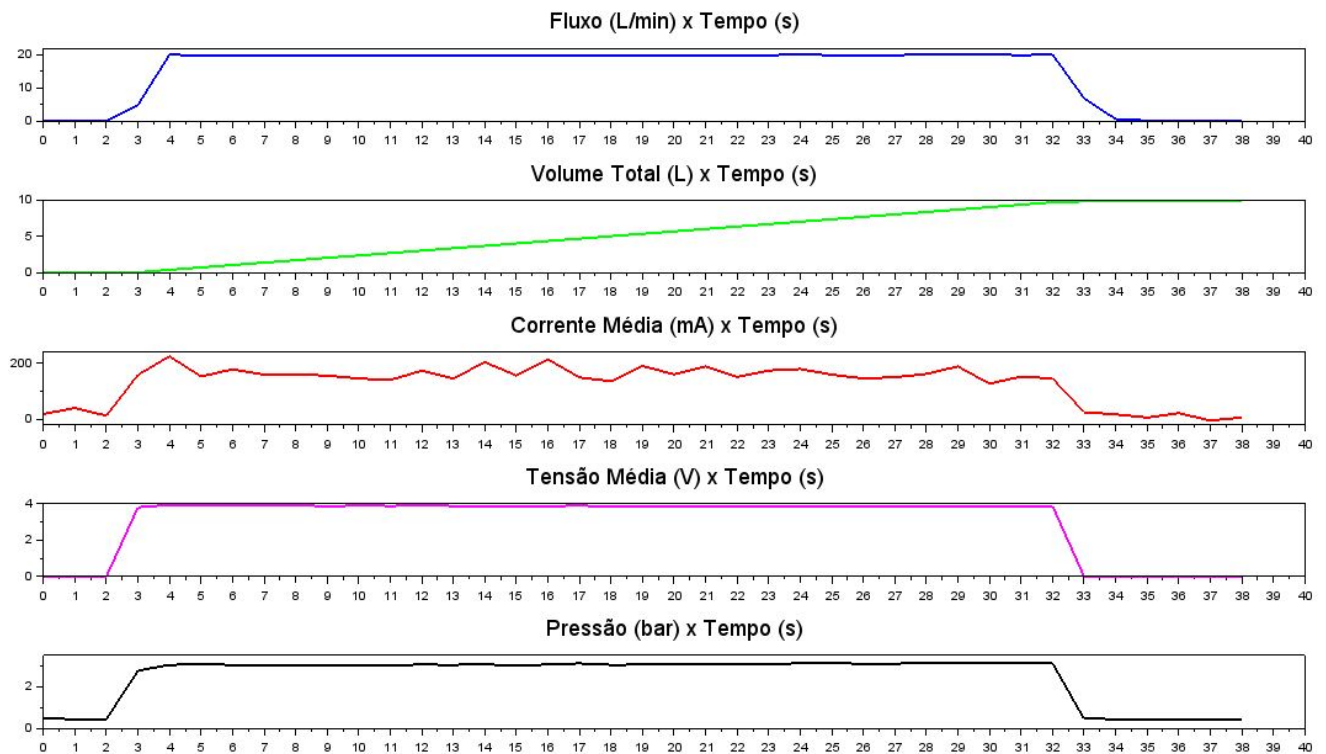
O terceiro ensaio prático foi conduzido com a conexão de uma carga resistiva de  $23,5 \Omega$  ao sistema gerador. Esse tipo de teste tem como finalidade avaliar o desempenho do protótipo sob condições reais de operação, em que há transferência efetiva de potência elétrica para uma carga.

Tabela 6 – Resultados do teste com carga resistiva de 23,5  $\Omega$ .

vazão (L/min)	Volume Total (L)	Corrente Média (mA)	Tensão Média (V)	Pressão (bar)
0	0	17,99	0	0,45
0	0	39,33	0	0,44
0	0	11,89	0	0,44
4,86	0,08	157,38	3,79	2,76
20,06	0,42	223,59	3,93	3,04
19,75	0,74	151,72	3,91	3,06
19,91	1,08	177,42	3,91	3,04
19,75	1,41	157,82	3,88	3,04
19,75	1,73	158,25	3,89	3,04
19,75	2,06	155,20	3,86	3,01
19,75	2,39	144,31	3,88	3,03
19,59	2,72	139,09	3,87	3,03
19,91	3,05	172,19	3,88	3,05
19,59	3,38	144,75	3,87	3,04
19,75	3,71	202,68	3,87	3,07
19,75	4,04	155,20	3,84	2,99
19,75	4,37	213,14	3,86	3,06
19,75	4,69	148,23	3,88	3,11
19,91	5,03	134,73	3,85	3,04
19,75	5,36	189,18	3,86	3,05
19,91	5,69	159,12	3,86	3,08
19,91	6,02	187,00	3,87	3,09
19,91	6,35	149,98	3,86	3,08
19,91	6,68	173,06	3,86	3,09
20,06	7,02	178,29	3,85	3,11
19,91	7,35	158,25	3,86	3,11
19,91	7,68	144,75	3,86	3,10
19,91	8,01	149,11	3,86	3,10
20,06	8,35	160,87	3,86	3,12
20,06	8,68	187,44	3,85	3,11
20,06	9,02	126,02	3,85	3,11
19,91	9,35	151,28	3,85	3,11
20,06	9,68	144,75	3,86	3,11
6,90	9,80	24,52	0	0,45
0,63	9,81	16,68	0	0,44
0,16	9,81	5,36	0	0,44
0	9,81	21,04	0	0,44
0	9,81	-5,10	0	0,44
0	9,81	5,36	0	0,44

A seguir, é apresentado na figura 31 a variação de grandezas elétricas e hidráulicas em função do tempo durante o teste com carga resistiva de 23,5  $\Omega$

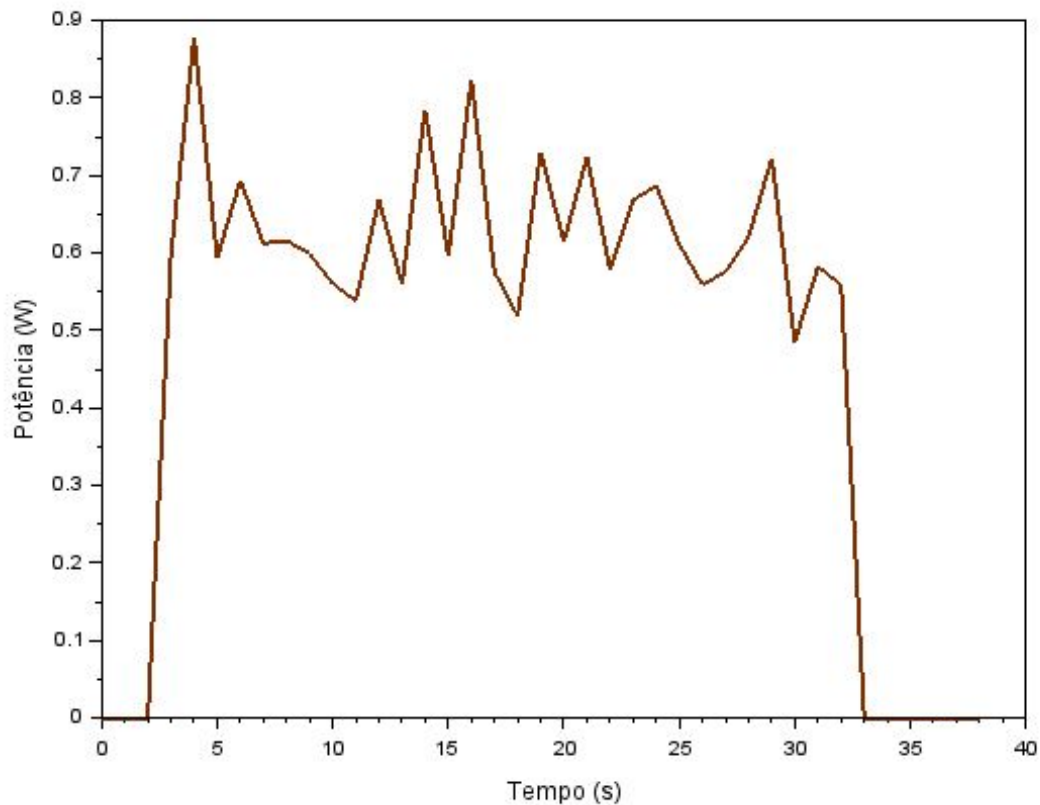
Figura 31 – Variação de grandezas elétricas e hidráulicas ao longo do tempo com carga resistiva de 23,5  $\Omega$ .



Fonte: Gráfico gerado pelo autor.

Os valores registrados evidenciam um desempenho estável da geração de energia, com a vazão mantendo-se em torno de 20 L/min e pressão variando entre 3,0 e 3,12 bar.

A tensão média fornecida pelo gerador situou-se ao redor de 3,86 V, enquanto a corrente elétrica variou entre aproximadamente 140 mA e 220 mA durante a maior parte do teste. Esses dados demonstram a efetiva transferência de energia para a carga. A figura 32 abaixo apresenta o gráfico da potência gerada em função do tempo durante esse ensaio.

Figura 32 – Potência Elétrica Gerada durante o Teste com carga de 23,5  $\Omega$ .

Fonte: Gráfico gerado pelo autor.

Verifica-se que os valores de potência elétrica oscilaram entre 0,5 W e 0,85 W, com picos próximos de 0,87 W, evidenciando que a resistência de 23,5  $\Omega$  proporcionou um maior aproveitamento da energia gerada em comparação com a carga de 16,3  $\Omega$ .

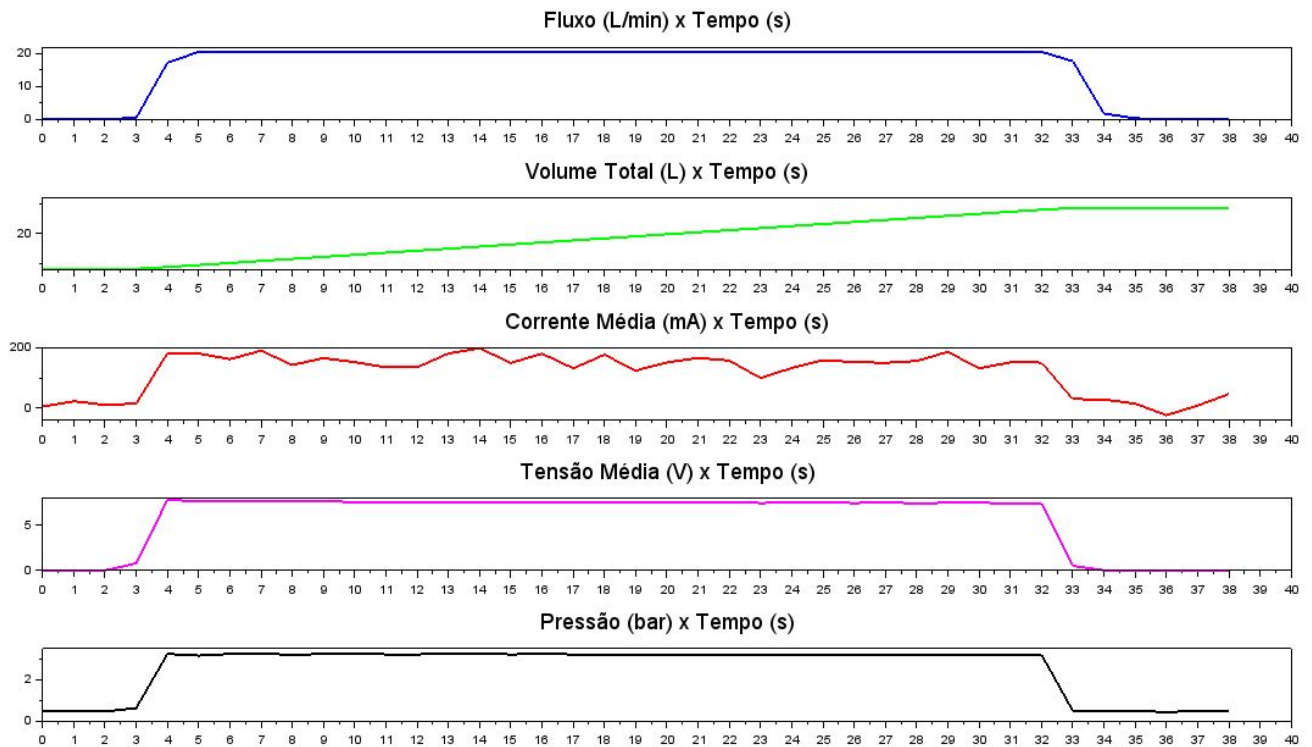
#### 5.4.3.4 Teste com Carga Resistiva de 46,5 $\Omega$

O quarto ensaio prático foi conduzido com a conexão de uma carga resistiva de 46,5  $\Omega$  ao sistema gerador. Esse tipo de teste tem como finalidade avaliar o desempenho do protótipo sob condições reais de operação, em que há transferência efetiva de potência elétrica para uma carga.

Tabela 7 – Resultados do teste com carga resistiva de 46,5  $\Omega$ .

Vazão (L/min)	Volume Total (L)	Corrente Média (mA)	Tensão Média (V)	Pressão (bar)
0	0,00	4,92	0	0,45
0	0,00	22,35	0	0,45
0	0,00	10,59	0	0,45
0,47	0,00	14,51	0,78	0,62
17,24	0,30	182,21	7,82	3,24
20,53	0,64	180,90	7,65	3,16
20,53	0,98	162,17	7,68	3,24
20,38	1,32	190,49	7,64	3,24
20,53	1,66	142,57	7,61	3,21
20,53	2,00	165,66	7,62	3,23
20,38	2,34	152,59	7,60	3,26
20,53	2,69	135,17	7,59	3,22
20,38	3,03	135,17	7,57	3,22
20,38	3,36	181,34	7,57	3,24
20,53	3,71	198,33	7,56	3,24
20,38	4,05	149,98	7,55	3,22
20,38	4,39	180,47	7,56	3,23
20,38	4,73	132,12	7,52	3,22
20,53	5,07	176,98	7,53	3,22
20,53	5,41	124,28	7,52	3,20
20,38	5,75	151,28	7,51	3,22
20,38	6,09	166,53	7,51	3,22
20,53	6,43	157,38	7,52	3,20
20,38	6,77	99,45	7,47	3,20
20,38	7,11	132,99	7,49	3,21
20,38	7,45	158,69	7,49	3,21
20,38	7,79	152,59	7,47	3,21
20,38	8,13	149,98	7,49	3,20
20,38	8,47	156,08	7,46	3,21
20,38	8,81	186,57	7,48	3,19
20,38	9,15	131,68	7,48	3,20
20,38	9,49	151,72	7,46	3,21
20,53	9,83	150,85	7,47	3,20
17,71	10,13	29,75	0,51	0,49
1,72	10,15	28,44	0	0,45
0,31	10,16	14,51	0	0,45
0	10,16	-23,83	0	0,44
0	10,16	7,97	0	0,45
0	10,16	46,74	0	0,45

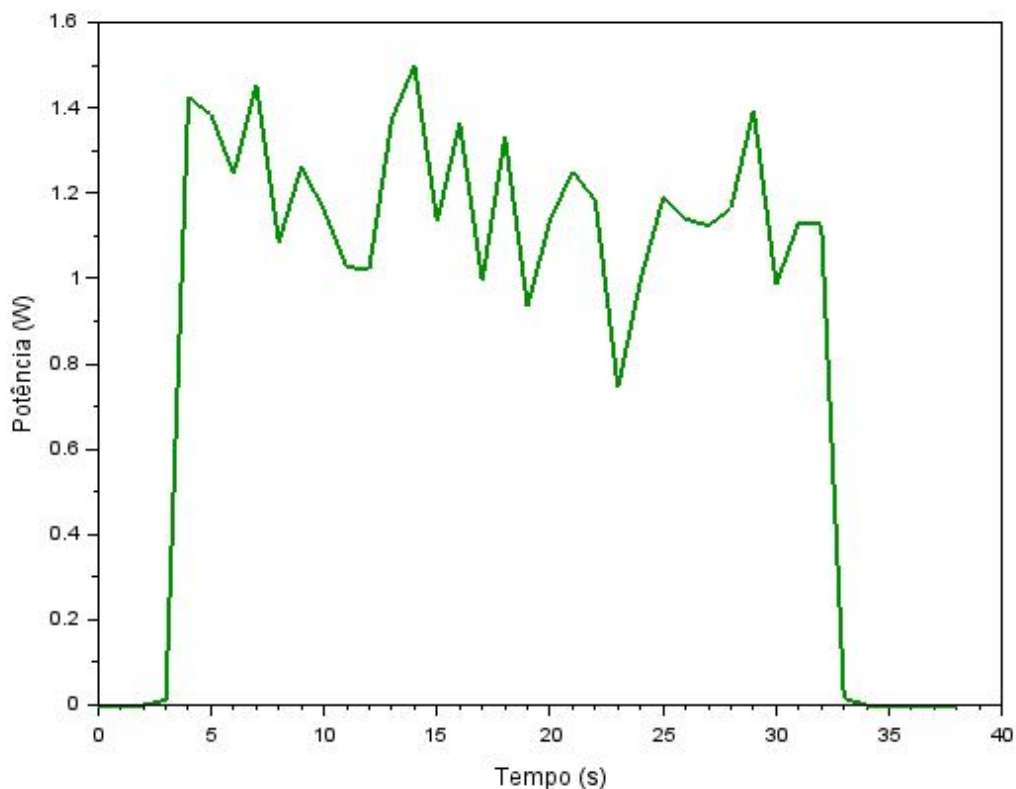
A seguir na figura 33, é apresentado o gráfico da variação de grandezas elétricas e hidráulicas em função do tempo durante o teste com carga resistiva de 46,5  $\Omega$

Figura 33 – Variação de grandezas elétricas e hidráulicas ao longo do tempo com carga resistiva de 46,5  $\Omega$ .

Fonte: Gráfico gerado pelo autor.

Durante o teste, os parâmetros hidráulicos se mantiveram relativamente constantes, com a vazão estabilizando em torno de 20 L/min e pressão variando entre 3,19 e 3,26 bar. Já os valores médios de tensão situaram-se entre 7,45 e 7,82 V, enquanto as correntes atingiram patamares mais elevados do que nos testes anteriores, com valores que variaram principalmente entre 130 mA e 198 mA, conforme a estabilidade do fluxo e a carga aplicada.

Esse cenário permitiu a observação de uma maior entrega de potência elétrica à carga como evidenciado abaixo no gráfico da figura 32.

Figura 34 – Potência Elétrica Gerada durante o Teste com carga de 46,5  $\Omega$ .

Fonte:Gráfico gerado pelo autor.

Verifica-se que a potência elétrica manteve-se consistentemente elevada durante o ensaio, com valores variando entre 1,0 W e 1,45 W, atingindo picos de aproximadamente 1,49 W. Esse comportamento confirma o aumento significativo da transferência de energia elétrica em comparação aos testes com resistências mais baixas (16,3 e 23,5  $\Omega$ ), evidenciando a influência direta da resistência da carga sobre a corrente consumida e, conseqüentemente, sobre a potência gerada.

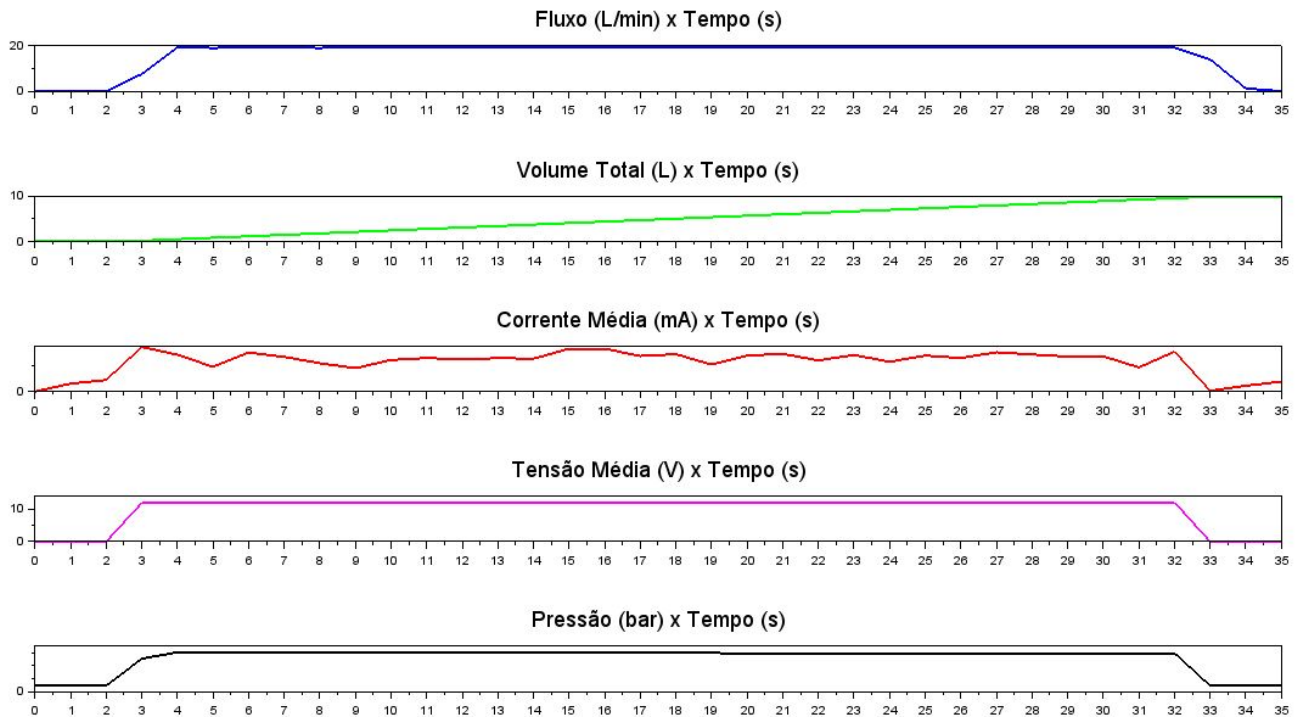
#### 5.4.3.5 Teste com Carga Resistiva de 93 $\Omega$

O quinto ensaio prático foi conduzido com a conexão de uma carga resistiva de 93  $\Omega$  ao sistema gerador. Esse tipo de teste teve como finalidade avaliar o comportamento do protótipo sob uma carga mais elevada, possibilitando verificar os limites da geração de potência elétrica em condições mais exigentes.

Tabela 8 – Resultados do teste com carga resistiva de 93  $\Omega$ .

Vazão (L/min)	Volume Total (L)	Corrente Média (mA)	Tensão Média (V)	Pressão (bar)
0,00	0,07	0,52	0	0,45
0,00	0,07	31,45	0	0,45
0,00	0,07	45,82	0	0,45
7,68	0,20	176,07	11,85	2,53
19,28	0,52	145,58	11,94	3,02
19,12	0,84	97,66	11,95	3,03
19,28	1,16	153,85	11,96	2,98
19,28	1,48	136,87	11,97	3,00
19,12	1,80	112,04	11,98	3,00
19,44	2,13	92,43	11,97	2,97
19,28	2,45	124,67	11,98	2,99
19,28	2,77	132,51	11,99	2,99
19,28	3,09	126,85	11,99	2,99
19,28	3,41	132,07	11,99	2,98
19,28	3,73	129,90	12,00	2,97
19,44	4,06	169,10	12,01	2,97
19,28	4,38	169,10	12,01	2,98
19,44	4,70	140,35	12,02	2,96
19,28	5,02	147,32	12,02	2,97
19,28	5,34	106,81	12,02	2,96
19,28	5,67	142,53	12,03	2,95
19,28	5,99	148,63	12,03	2,95
19,44	6,31	123,36	12,03	2,94
19,28	6,63	144,27	12,05	2,95
19,28	6,95	117,70	12,03	2,95
19,28	7,28	142,09	12,04	2,94
19,44	7,60	132,51	12,05	2,93
19,28	7,92	155,16	12,05	2,93
19,28	8,24	146,45	12,06	2,94
19,28	8,56	138,17	12,05	2,94
19,28	8,88	139,04	12,06	2,94
19,28	9,21	95,48	12,06	2,93
19,28	9,53	157,77	12,07	2,95
14,11	9,76	3,57	0	0,46
1,41	9,79	23,17	0	0,45
0,16	9,79	39,29	0	0,45

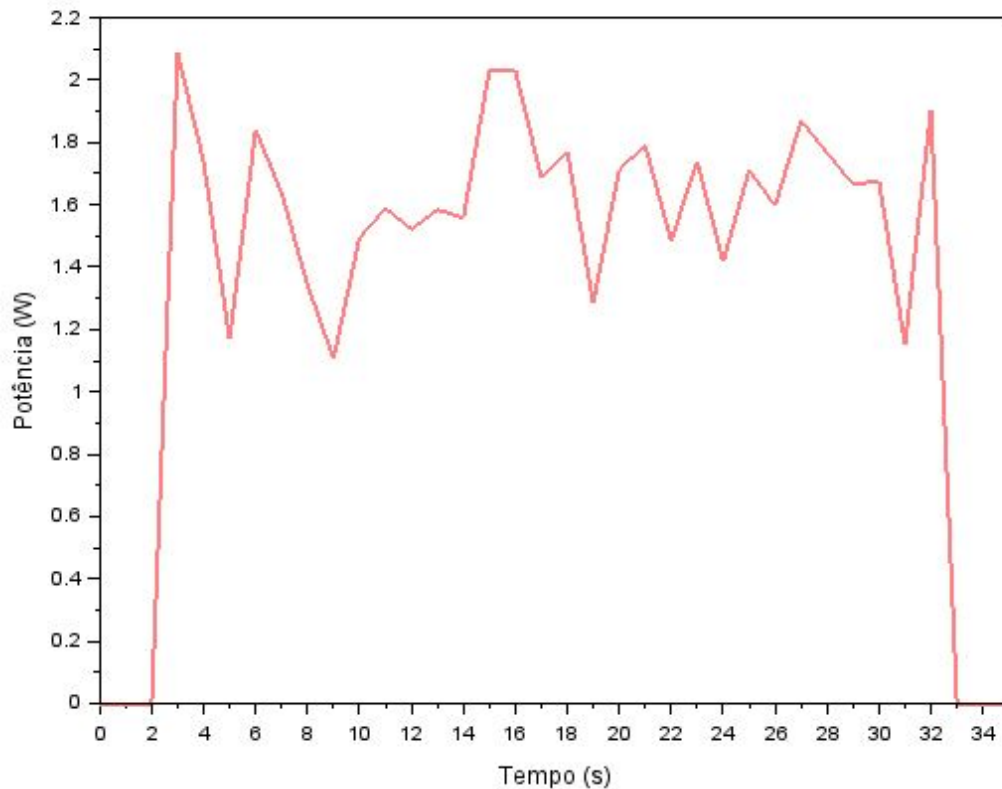
A seguir, é apresentado na figura 35. o gráfico da variação de grandezas elétricas e hidráulicas em função do tempo durante o teste com carga resistiva de 93  $\Omega$ .

Figura 35 – Variação de grandezas elétricas e hidráulicas ao longo do tempo com carga resistiva de  $93 \Omega$ .

Fonte: Gráfico gerado pelo autor.

Durante o teste, os parâmetros hidráulicos se mantiveram relativamente estáveis, com a vazão próximo de 19 L/min e pressão variando entre 2,93 e 3,03 bar. Os valores de tensão média oscilaram entre 11,85 V e 12,07 V, enquanto as correntes médias se mantiveram predominantemente na faixa de 90 mA a 176 mA, com breves oscilações nos momentos iniciais e finais do teste.

Esse cenário possibilitou a observação da entrega de potência elétrica para a carga, conforme ilustrado no da figura 36 abaixo.

Figura 36 – Potência Elétrica Gerada durante o Teste com carga de 93  $\Omega$ .

Fonte:

Gráfico gerado pelo autor.

Verifica-se que a potência elétrica gerada se manteve estável durante a maior parte do ensaio, com valores variando entre 1,1 W e 1,5 W, atingindo picos próximos a 1,57 W. Esse desempenho evidencia que, mesmo com uma carga resistiva mais elevada, o sistema foi capaz de fornecer energia de forma eficiente, embora com menor corrente comparada aos testes com resistências menores.

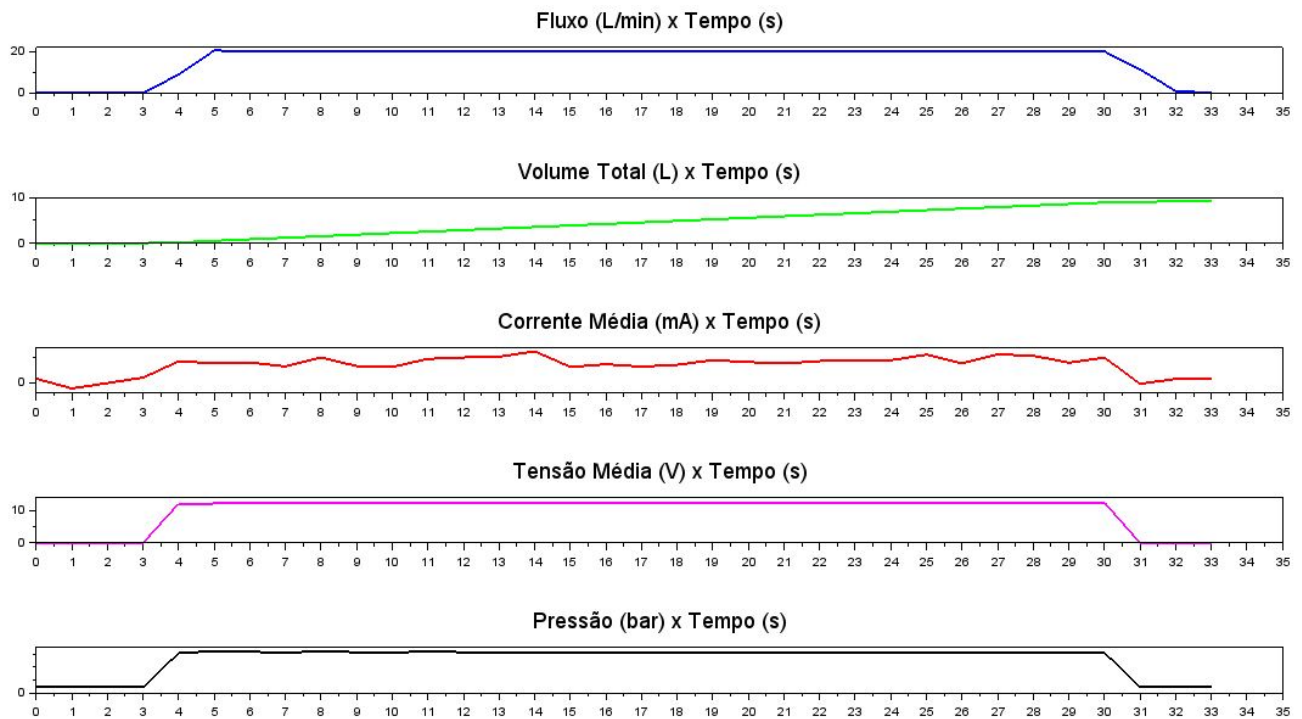
#### 5.4.3.6 Teste com Carga Resistiva de 135,6 $\Omega$

O sexto ensaio prático foi realizado com a conexão de uma carga resistiva de 135,6  $\Omega$  ao sistema gerador. O objetivo deste teste foi avaliar o desempenho do sistema sob uma carga ainda mais elevada, o que representa um cenário de maior exigência em termos de tensão para a entrega de potência elétrica.

Tabela 9 – Resultados do teste com carga resistiva de 135  $\Omega$ .

Vazão (L/min)	Volume Total (L)	Corrente Média (mA)	Tensão Média (V)	Pressão (bar)
0,00	0,00	16,86	0,00	0,44
0,00	0,00	-21,91	0,00	0,45
0,00	0,00	-0,57	0,00	0,44
0,00	0,00	20,78	0,00	0,44
8,93	0,15	84,81	12,07	3,06
20,53	0,49	78,28	12,13	3,21
20,22	0,83	80,45	12,15	3,15
20,06	1,16	65,21	12,17	3,13
20,38	1,50	100,06	12,20	3,16
20,22	1,84	66,52	12,21	3,14
20,22	2,18	63,03	12,22	3,13
20,22	2,51	94,83	12,24	3,16
20,22	2,85	100,49	12,25	3,14
20,22	3,19	103,54	12,26	3,14
20,22	3,52	124,45	12,27	3,12
20,06	3,86	63,03	12,27	3,12
20,06	4,19	73,48	12,29	3,13
20,22	4,53	64,34	12,30	3,12
20,06	4,86	71,31	12,31	3,11
20,38	5,20	90,04	12,32	3,13
20,06	5,54	82,20	12,33	3,11
20,22	5,88	76,97	12,34	3,11
20,06	6,21	86,12	12,34	3,11
20,06	6,54	90,91	12,36	3,12
20,22	6,88	89,60	12,36	3,11
20,06	7,22	111,38	12,37	3,10
20,22	7,55	76,97	12,38	3,10
20,06	7,89	112,69	12,39	3,10
20,06	8,22	107,03	12,39	3,08
20,06	8,56	80,02	12,40	3,08
20,06	8,89	99,62	12,41	3,09
11,44	9,08	-3,62	0,00	0,45
0,94	9,10	15,99	0,00	0,45
0,16	9,10	14,68	0,00	0,44

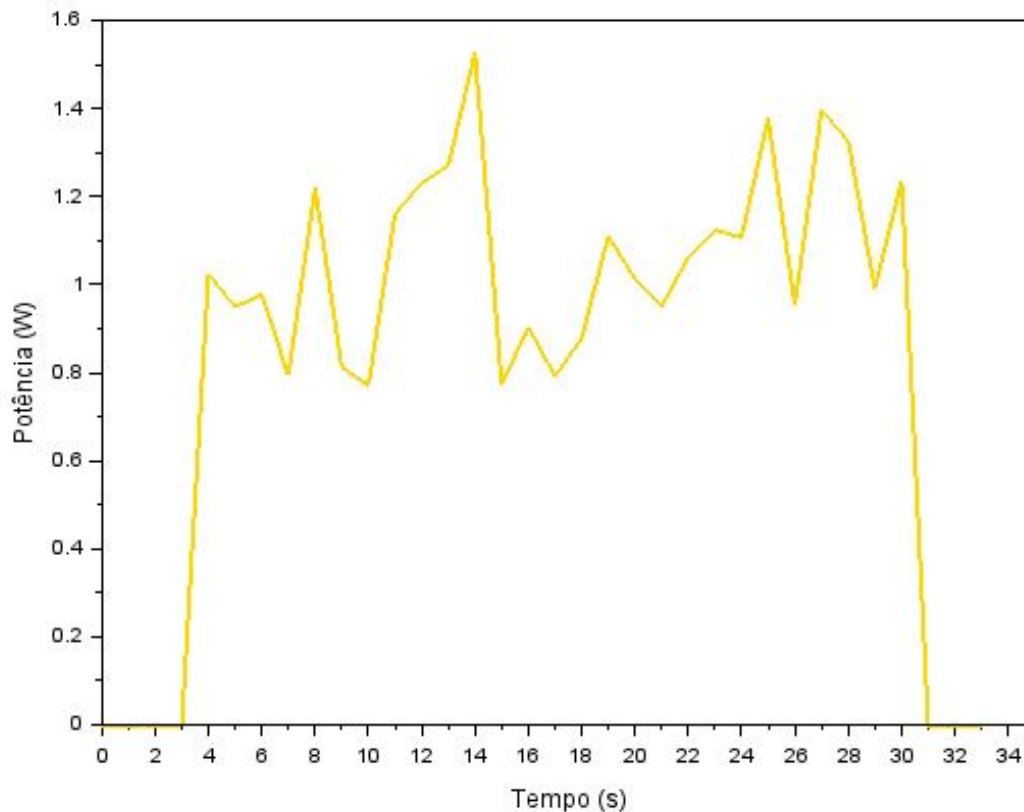
A seguir, é apresentado o gráfico da figura 37 variação de grandezas elétricas e hidráulicas em função do tempo durante o teste com carga resistiva de 135,6  $\Omega$ .

Figura 37 – Variação de grandezas elétricas e hidráulicas ao longo do tempo com carga resistiva de 135,6  $\Omega$ .

Fonte: Gráfico gerado pelo autor.

Durante o teste, observou-se uma estabilidade nos parâmetros hidráulicos, com a vazão próximo de 20 L/min e pressão variando entre 3,08 e 3,16 bar. A tensão média permaneceu praticamente constante entre 12,07 V e 12,41 V, o que indica a limitação do sistema em fornecer tensões mais elevadas, o que já é esperado devido a limitação do próprio gerador empregado. As correntes médias oscilaram entre 63 mA e 124 mA, refletindo o esforço do sistema em manter a entrega de potência diante da carga elevada.

A seguir, apresenta-se na figura 38 o gráfico com a potência elétrica gerada durante o ensaio.

Figura 38 – Potência Elétrica Gerada durante o Teste com carga de 135,6  $\Omega$ .

Fonte:

Gráfico gerado pelo autor.

A análise do gráfico de potência revela que o sistema atingiu um ponto de saturação. A potência estabilizou-se em torno de 1,1 W a 1,3 W, com picos breves próximos a 1,35 W. Essa limitação indica que o protótipo não foi capaz de fornecer mais energia elétrica devido a capacidade do gerador. Tal comportamento é típico de sistemas que atingem seu ponto de máxima eficiência, após o qual o ganho de potência se torna inexpressivo, mesmo com maior demanda hidráulica.

#### 5.4.3.7 Análise Comparativa dos Testes com Carga

Para consolidar os resultados obtidos nos ensaios práticos, elaborou-se uma tabela comparativa contendo os valores médios de tensão, corrente e potência elétrica, considerando tanto os dados obtidos diretamente com o multímetro quanto aqueles registrados pelo sistema embarcado (ESP32). Essa abordagem permite avaliar a fidelidade das medições feitas pelo protótipo e sua viabilidade como ferramenta de monitoramento de sistemas de microgeração hidráulica.

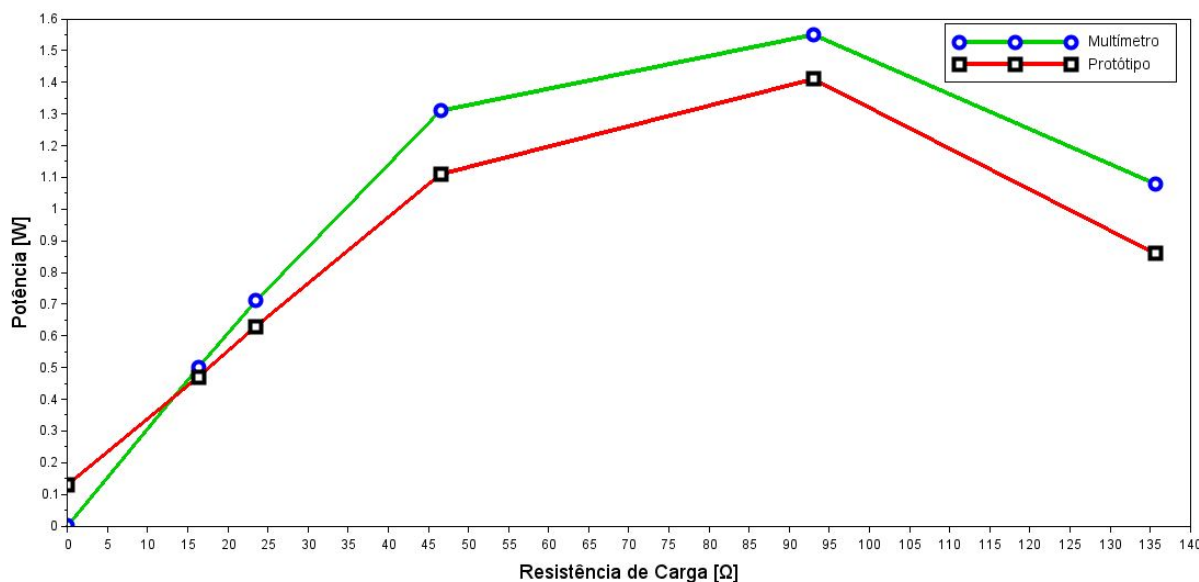
Tabela 10 – Comparativo dos valores médios obtidos nos testes

Condição de Carga	Tensão (Multímetro) [V]	Tensão (Protótipo) [V]	Corrente (Multímetro) [mA]	Corrente (Protótipo) [mA]	Potência (Multímetro) [W]	Potência (Protótipo) [W]
Circuito Aberto	12,80	12,74	0,00	10,41	0,00	0,13
RL = 16,3 $\Omega$	2,77	2,58	181,00	148,07	0,50	0,47
RL = 23,5 $\Omega$	4,06	3,87	176,00	143,01	0,71	0,63
RL = 46,5 $\Omega$	7,68	7,10	170,00	121,53	1,31	1,11
RL = 93,0 $\Omega$	11,96	12,01	130,00	117,23	1,55	1,41
RL = 135,6 $\Omega$	12,26	12,29	88,00	69,99	1,08	0,86

A partir da Tabela 10, observa-se uma boa correspondência entre os valores medidos pelo protótipo e os registrados pelo multímetro, principalmente para os ensaios realizados com tensões superiores a 4 V. Pequenas discrepâncias são esperadas e podem ser atribuídas às limitações intrínsecas dos sensores utilizados, variações no tempo de amostragem e imprecisões associadas ao circuito de aquisição de dados, também é importante citar que o uso dos dados de datasheet do sensor, e a não calibração do sistema de medição de corrente também podem estar contribuindo com estas variações.

A potência máxima registrada ocorreu no teste com carga de 93  $\Omega$ , alcançando 1,55 W (multímetro) e 1,41 W (protótipo), confirmando o ponto de maior transferência de energia elétrica ao longo dos ensaios como demonstrado na figura 39.

Figura 39 – Potência em função das Cargas obtido nos testes.



Fonte: Gráfico gerado pelo autor.

Esse comportamento está em conformidade com o esperado dos testes, pois a potência entregue é máxima quando a resistência da carga é aproximadamente igual à resistência interna do gerador, conforme previsto pela teoria da máxima transferência de potência. Os resultados obtidos indicam que a resistência interna do gerador está próxima de 93  $\Omega$ .

Outra observação é a tendência crescente da tensão à medida que se aumentam os valores de resistência da carga, enquanto a corrente diminui proporcionalmente.

Dessa forma, conclui-se que o protótipo desenvolvido demonstrou desempenho satisfatório na coleta e análise dos dados elétricos, sendo adequado para o monitoramento de sistemas de microgeração hidráulica em ambientes residenciais.

#### **5.4.4 Análise do Potencial de Geração de Energia a partir de Dados Reais de Consumo no IFMG Campus Sabará**

Para avaliar de forma prática o desempenho e a aplicabilidade do sistema de microgeração hidráulica proposto neste trabalho, foi realizada uma análise com base em dados reais de consumo de água. A fonte utilizada foi a fatura mensal da unidade do Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Sabará, que registra o consumo mensal de água em metros cúbicos (m<sup>3</sup>) ao longo de um período de 12 meses.

A metodologia adotada consistiu na aplicação direta das equações de potencial hidráulico desenvolvidas na Seção 3.5, mais especificamente da equação corrigida que estima a energia gerada em função da altura manométrica da coluna de água:

$$E = 0,002725 \cdot H \quad (\text{kWh/m}^3) \quad (5.5)$$

Onde:

- $E$  é a energia teórica gerada por metro cúbico de água (kWh/m<sup>3</sup>);
- $H$  é a altura manométrica, expressa em metros de coluna de água (m.c.a.).

Para esta análise, foi considerada uma pressão média de 3 bar, valor típico em redes de abastecimento prediais institucionais, que corresponde a uma altura manométrica de aproximadamente 30,59 m.c.a. Assim, a energia teórica disponível por metro cúbico foi estimada como:

$$E = 0,002725 \cdot 30,59 \approx 0,08336 \text{ kWh/m}^3$$

Com isso, para cada mês, o volume total de água consumido (em m<sup>3</sup>) foi multiplicado por este valor para determinar o potencial bruto de geração de energia, desconsiderando perdas por atrito, rendimento do gerador ou eficiência do sistema eletrônico.

A Tabela 11 apresenta o volume de água consumido mensalmente, conforme os registros da conta da Copasa, enquanto a Tabela 12 traz o correspondente potencial teórico de energia que poderia ser gerado por meio do sistema proposto.

Tabela 11 – Consumo mensal de água no IFMG Sabará

Mês/Ano	Volume de Água (litros)	Volume (m <sup>3</sup> )
Set/2023	96.000	96
Out/2023	152.000	152
Nov/2023	144.000	144
Dez/2023	177.000	177
Jan/2024	69.000	69
Fev/2024	219.000	219
Mar/2024	22.000	22
Abr/2024	125.000	125
Mai/2024	119.000	119
Jun/2024	85.000	85
Jul/2024	33.000	33
Ago/2024	58.000	58

Tabela 12 – Potencial teórico de geração de energia com microgerador (sem perdas)

Mês/Ano	Volume (m <sup>3</sup> )	Energia (Wh)	Energia (kWh)
Set/2023	96	8.002,56	8,00
Out/2023	152	12.667,52	12,67
Nov/2023	144	12.002,78	12,00
Dez/2023	177	14.756,83	14,75
Jan/2024	69	5.753,07	5,75
Fev/2024	219	18.259,75	18,26
Mar/2024	22	1.833,92	1,83
Abr/2024	125	10.420,00	10,42
Mai/2024	119	9.923,84	9,92
Jun/2024	85	7.085,60	7,09
Jul/2024	33	2.750,88	2,75
Ago/2024	58	4.835,04	4,83
<b>Total</b>	1.329	108.291,79	108,29

A energia hidráulica teórica foi calculada a partir do volume mensal de água consumido, considerando-se a pressão equivalente de 30 metros de coluna de água (m.c.a.) e a densidade da água de 1000 kg/m<sup>3</sup>. O resultado dessa etapa indicou um potencial máximo de 108,29 kWh no período analisado, representando o limite superior de geração caso não houvesse perdas mecânicas, hidráulicas ou elétricas.

Para calcular a quantidade de energia gerada por um gerador instalado na tubulação (entrada da caixa d'água), podemos utilizar a seguinte relação:

$$E = \frac{P \cdot t}{3.600.000}$$

onde:

- $P$  é a potência do gerador, em W;
- $E$  é a energia gerada, em kWh;
- o fator 3.600.000 é para converter a energia de J para kWh;
- $t$  é o tempo de escoamento de água, em segundos (tempo em que o gerador estará operando), que pode ser calculado dividindo o volume de água escoado em  $m^3$  pela vazão volumétrica.

Para esta análise, considera-se uma vazão de  $0,00392 m^3/s$ , compatível com uma tubulação de 2 polegadas de diâmetro e uma pressão de 30 m.c.a., a mesma vazão utilizada no exemplo da Seção 3.4.4.

Os resultados obtidos a partir do consumo mensal estão sintetizados na Tabela 13:

Tabela 13 – Potencial de geração de energia no IFMG Sabará

Mês/Ano	Consumo ( $m^3$ )	Energia teórica (kWh)	100 W (kWh)	1000 W (kWh)
Set/2023	96	8,00	0,68	6,80
Out/2023	152	12,67	1,10	10,77
Nov/2023	144	11,99	1,02	10,20
Dez/2023	177	14,74	1,25	12,54
Jan/2024	69	5,75	0,49	4,89
Fev/2024	219	18,25	1,55	15,52
Mar/2024	22	1,83	0,16	1,56
Abr/2024	125	10,42	0,89	8,86
Mai/2024	119	9,92	0,84	8,43
Jun/2024	85	7,08	0,60	6,02
Jul/2024	33	2,75	0,23	2,34
Ago/2024	58	4,83	0,41	4,11
Total	1329	108,29	9,22	92,04

Observa-se que, ao longo do período analisado, o gerador de 100 W produziu um total de 9,22 kWh, enquanto o gerador de 1000 W atingiu 92,04 kWh. Esses valores demonstram que o primeiro cenário aproveita apenas uma fração reduzida do potencial teórico, enquanto o segundo se aproxima consideravelmente da energia hidráulica disponível.

#### 5.4.5 Análise dos Resultados

Os resultados obtidos indicam que a unidade do IFMG Sabará possui um potencial teórico a ser explorado de geração de energia hidráulica com base em seu consumo de água. O mês com maior volume de consumo foi fevereiro de 2024, com  $219 m^3$ , o que resultaria, teoricamente, em uma geração de aproximadamente 18,26 kWh em um único mês. Mesmo nos meses de menor consumo, como março e julho, ainda haveria possibilidade de geração de energia em torno de 1,83 a 2,75 kWh.

Essa análise demonstra que, mesmo sem considerar as perdas inevitáveis no sistema real, como eficiência da turbina, perdas de carga e rendimento do sistema hidráulico. A pressão hidráulica disponível nas tubulações constitui uma fonte energética viável para aplicações de baixa potência, como alimentação de sistemas de iluminação autônoma ou circuitos de monitoramento.

Considerando a soma do consumo mensal ao longo do ano, o potencial máximo teórico de energia hidráulica disponível seria de aproximadamente 108,29 kWh, representando o limite superior de energia que poderia ser aproveitada.

#### **5.4.5.1 Análise Econômica**

Considerando a tarifa de energia de R\$ 1,00/kWh, a economia anual estimada seria de aproximadamente R\$ 9,22 para um gerador de 100 W, com aproveitamento de 9,22 kWh, e de cerca de R\$ 92,04 para um gerador de 1000 W, com aproveitamento de 92,04 kWh. Ressalta-se que esses valores podem ser significativamente superiores caso sejam aplicadas tarifas mais altas nos horários de pico, especialmente no IFMG Sabará, em função das condições contratuais de fornecimento de energia.

## 6 CONCLUSÃO

Por meio do desenvolvimento e aplicação deste estudo, foi possível analisar a viabilidade da geração de energia elétrica a partir da pressão hidráulica disponível em sistemas prediais, explorando o reaproveitamento de um recurso geralmente dissipado nas instalações residenciais. A partir da construção de um protótipo funcional, equipado com sensores de pressão, vazão volumétrica, corrente e tensão, e controlado por um microcontrolador ESP32, foi possível realizar uma série de testes experimentais em diferentes condições hidráulicas e elétricas.

Os ensaios práticos permitiram comprovar, em termos de engenharia, que o projeto apresenta viabilidade técnica tanto na parte hidráulica quanto na parte elétrica. Através dos testes com cargas resistivas variadas (16,3  $\Omega$ , 23,5  $\Omega$ , 46,5  $\Omega$ , 93  $\Omega$  e 135,6  $\Omega$ ), verificou-se que é possível gerar energia elétrica de forma contínua, sendo o desempenho diretamente influenciado pela carga aplicada e pelas condições do fluxo hídrico. Os resultados mostraram que há um ponto de operação no qual se obtém maior aproveitamento da potência disponível, e que valores de resistência muito elevados reduzem significativamente a corrente e, conseqüentemente, a potência útil.

Ainda que o sistema tenha apresentado funcionamento estável e capacidade de monitoramento em tempo real, a potência obtida foi muito baixa, o que limita seu interesse prático para a geração de energia elétrica em residências. Apesar do protótipo ter funcionado bem em laboratório, a potência gerada é insuficiente para suprir demandas domésticas, tornando questionável a viabilidade financeira e energética da instalação de um sistema desse tipo. Portanto, o gerador analisado se mostra pouco atraente para aplicações residenciais em sua configuração atual.

Usando as equações abordadas na fundamentação teórica, é possível estimar que, considerando a captação de água de um córrego por um tubo de 5 cm de diâmetro e uma altura manométrica de 30 metros de coluna d'água, sem levar em conta perdas, a potência hidráulica disponível é de aproximadamente 14 kW. Mantida uma vazão volumétrica constante, isso corresponde a 14 kWh de energia gerada por hora, ou cerca de 336 kWh por dia, o que evidencia o potencial econômico dessa aplicação. Nesse contexto, tornam-se relevantes os estudos voltados para o desenvolvimento e a utilização de geradores com maior potência e eficiência, capazes de oferecer melhores resultados em termos de retorno energético e financeiro.

A análise baseada no consumo hídrico real do IFMG Campus Sabará demonstrou que o impacto econômico direto seria limitado, porém, em associação com outras fontes de geração distribuída, o sistema pode contribuir para maior eficiência no uso dos recursos e para a conscientização sobre práticas sustentáveis.

Dessa forma, conclui-se que apesar do sistema aplicado no estudo deste trabalho não oferecer viabilidade energética e econômica, iniciativas dessa natureza podem contribuir para a geração de energia, promovendo soluções sustentáveis, especialmente em um cenário de maior potencial hidráulico em que se busca maior descentralização da geração e o aproveitamento

inteligente dos recursos naturais. O projeto também demonstra o potencial de integração entre conceitos de automação, eletrônica embarcada e sustentabilidade ambiental. Considerando os recursos hídricos disponíveis em instalações prediais, mesmo com limitações de escala e rendimento, o sistema demonstrou ser funcional e aplicável em contextos que demandam soluções inovadoras, sustentáveis e educacionais.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 12218:2005 - Projeto de Sistemas de Abastecimento de Água**. [S.l.], 2005. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005. Citado na página 22.
- (ANEEL), A. N. de E. E. **Banco de Informações de Geração – BIG: Micro e Minigeração Distribuída**. 2024. <<https://www.aneel.gov.br/>>. Acessado em: 02 de junho de 2025. Citado na página 26.
- CAUS, T. R. Energia hidrelétrica: eficiência na geração. Universidade Federal de Santa Maria, 2014. Citado na página 23.
- CECHINEL, K. M. Microgeração de energia elétrica a partir do potencial hidráulico predial. 2018. Citado na página 18.
- Core Electronics. **ESP32-H2 Microcontroller DevKit (With Presoldered Headers)**. 2025. <<https://core-electronics.com.au/esp32-h2-microcontroller-devkit.html>>. Acesso em 11 jun. 2025. Citado na página 34.
- DUPONT, F. H.; GRASSI, F.; ROMITTI, L. Energias renováveis: buscando por uma matriz energética sustentável. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 19, n. 1, p. 70–81, 2015. Citado na página 17.
- eletrogate. **Módulo Sensor de Tensão 0-25V DC**. 2024. Acessado em: 14 de setembro de 2024. Disponível em: <[https://www.eletrogate.com/modulo-sensor-de-tensao-0-25v-dc?utm\\_source=Site&utm\\_medium=GoogleMerchant&utm\\_campaign=GoogleMerchant&utm\\_source=google&utm\\_medium=cpc&utm\\_campaign=\[MC4\]\\_\[G\]\\_\[PMax\]\\_ArduinoroboticaSensoresModulos&utm\\_content=&utm\\_term=&gad\\_source=1&gclid=CjwKCAjw6JS3BhBAEiwAO9waFyijuZDNAjWjBRhb1vOYOdY8dPxtermj4zK0k7UR8eM-5PaWerOKHhBwE](https://www.eletrogate.com/modulo-sensor-de-tensao-0-25v-dc?utm_source=Site&utm_medium=GoogleMerchant&utm_campaign=GoogleMerchant&utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=[MC4]_[G]_[PMax]_ArduinoroboticaSensoresModulos&utm_content=&utm_term=&gad_source=1&gclid=CjwKCAjw6JS3BhBAEiwAO9waFyijuZDNAjWjBRhb1vOYOdY8dPxtermj4zK0k7UR8eM-5PaWerOKHhBwE)>. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.
- Espressif Systems. **ESP32 Technical Reference Manual**. [S.l.], 2023. Acesso em: 10 jun. 2025. Disponível em: <<https://www.espressif.com>>. Citado na página 32.
- FIGUEIREDO, V. P. d.; BRAGA, L. G. Schröder e *et al.* Geração de energia elétrica por águas urbanas. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.
- GERAIS, C. . E. de M. **Tarifas de Energia Elétrica – 2024**. 2024. <<https://www.cemig.com.br/>>. Acessado em: 02 de junho de 2025. Citado na página 28.
- KOTHARI, D.; NAGRATH, I. **Modern Power System Analysis**. 3rd. ed. New York: McGraw-Hill, 2011. Citado na página 30.
- LOSEKANN, L.; TAVARES, F. B. **Política Energética no BRICS: desafios da transição energética**. [S.l.], 2019. Citado na página 17.
- MOTT, R. L. **Mecânica dos Fluidos**. 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- PEREIRA, G. P.; CHAARI, M. Z.; DAROGE, F. Iot-enabled smart drip irrigation system using esp32. **IoT**, MDPI, v. 4, n. 3, p. 221–243, 2023. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2624-831X/4/3/12>>. Citado na página 33.

ROSA, R. O.; JÚNIOR, R. F. D. S.; GALDINO, L.; ASSUMPCÃO, T. A. A. de. Estudo da viabilidade de geração de eletricidade por meio da energia cinética presente nas tubulações de águas residenciais. **Caleidoscópio**, v. 10, n. 1, p. 12–16, 2018. Citado na página 19.

SAWHNEY, A. **Electrical Measurements and Instrumentation**. 7th. ed. New Delhi: Pub. House, 2014. Citado na página 29.

shopees. **Transmissor Sensor de Pressão de Água G1/4 0-10/30/80/100/200/300PSI Transdutor**. 2024. Acessado em: 14 de setembro de 2024. Disponível em: <[https://shopee.com.br/product/207152253/26552613056?gads\\_t\\_sig=VTJGc2RHVmtYMTlxTFVSVVRrdENkVHQ3ZkZSUTMrR3pBWmZZNzdrcnRBM1BKZjR4U2FXODIIMgad\\_source=1&gclid=CjwKCAjw6JS3BhBAEiwAO9waF78yCT-vZ\\_KN35nmwBdReq4TOwwsIIDnIcCApf2wv5M2CUZSrbC6BoCJF8QAvD\\_BwE](https://shopee.com.br/product/207152253/26552613056?gads_t_sig=VTJGc2RHVmtYMTlxTFVSVVRrdENkVHQ3ZkZSUTMrR3pBWmZZNzdrcnRBM1BKZjR4U2FXODIIMgad_source=1&gclid=CjwKCAjw6JS3BhBAEiwAO9waF78yCT-vZ_KN35nmwBdReq4TOwwsIIDnIcCApf2wv5M2CUZSrbC6BoCJF8QAvD_BwE)>. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 38.

SILVA, R. S. d. Aproveitamento do potencial do sistema hidráulico predial para geração de energia elétrica. 2018. Citado na página 17.

SINDENERGIA. **Mini Gerador Hidrelétrico 12V 10W - Transmissor Sensor**. 2024. <<https://www.sindenergia.com.br/mostra.php?noticia=5753>>. Acessado em: 21 de setembro de 2024. Citado na página 23.

Smartkits. **Sensor de Corrente ACS712 5A**. 2024. <[https://www.smartkits.com.br/sensor-de-corrente-acs712-5a?parceiro=9390&gad\\_source=1&gclid=CjwKCAjw6JS3BhBAEiwAO9waFyU9NuV3wFt49GTyRS9Nk3lYSiWZfVnYGD0qBXlaSC8xsRiKZxlbwE](https://www.smartkits.com.br/sensor-de-corrente-acs712-5a?parceiro=9390&gad_source=1&gclid=CjwKCAjw6JS3BhBAEiwAO9waFyU9NuV3wFt49GTyRS9Nk3lYSiWZfVnYGD0qBXlaSC8xsRiKZxlbwE)>. Acessado em: 14 de setembro de 2024. Citado na página 36.

SOETHE, G. C.; BLANCHET, L. A. Geração distribuída e desenvolvimento sustentável. **A&C-Revista de Direito Administrativo & Constitucional**, v. 20, n. 79, p. 233–257, 2020. Citado na página 17.

TOLMASQUIM, M. T.; GUERREIRO, A.; GORINI, R. Matriz energética brasileira: uma perspectiva. **Novos estudos CEBRAP**, SciELO Brasil, p. 47–69, 2007. Citado na página 14.

TORRES, W. *et al.* Avaliação da geração de energia elétrica de uma microturbina instalada em tubulações de água em sistemas agroindustriais. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2020. Citado 3 vezes nas páginas 19, 20 e 38.

Vida de Silício. **O que é Arduino e como funciona?** 2024. Acessado em: 14 de setembro de 2024. Disponível em: <<https://portal.vidadesilicio.com.br/o-que-e-arduino-e-como-funciona/>>. Citado na página 33.

WALTON, W. C. **Hidráulica dos Poços: Princípios e Cálculos**. São Paulo: Edgard Blücher, 1987. Citado na página 24.

WHITE, F. M. **Mecânica dos Fluidos**. 9. ed. Rio de Janeiro: McGraw-Hill, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.