

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE  
SANTA CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA  
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA ELETRÔNICA**

**RODRIGO LUIZ DA COSTA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM ANALISADOR DE  
POTÊNCIA E QUALIDADE DE ENERGIA MONOFÁSICO  
DE BAIXO CUSTO**

**Florianópolis, 2022**

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE  
SANTA CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA  
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA ELETRÔNICA**

**RODRIGO LUIZ DA COSTA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM ANALISADOR DE  
POTÊNCIA E QUALIDADE DE ENERGIA MONOFÁSICO  
DE BAIXO CUSTO**

Trabalho de conclusão de curso submetido  
ao Instituto Federal de Educação, Ciência  
e Tecnologia de Santa Catarina como parte  
dos requisitos para obtenção do título de  
engenheiro eletrônico.

Orientador: Prof. Joabel Moia, Dr. Eng.

**Florianópolis, 2022**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Costa, Rodrigo Luiz da  
**Desenvolvimento de um Analisador de Potência e Qualidade de Energia Monofásico de Baixo Custo / Rodrigo Luiz da Costa; orientação de Joabel Moia.** - Florianópolis, SC, 2022.  
115 p.

**Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Eletrônica. Departamento Acadêmico de Eletrônica.**  
Inclui Referências.

1. Analisador de potência. 2. Qualidade de energia.  
3. Sistemas embarcados. 4. Processamento digital de sinais. 5. Display gráfico. I. Moia, Joabel. II. Instituto Federal de Santa Catarina. III. Desenvolvimento de um Analisador de Potência e Qualidade de Energia Monofásico de Baixo Custo.

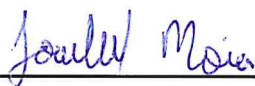
# **DESENVOLVIMENTO DE UM ANALISADOR DE POTÊNCIA E QUALIDADE DE ENERGIA MONOFÁSICO DE BAIXO CUSTO**

**RODRIGO LUIZ DA COSTA**

Este Trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Eletrônico em agosto de 2022 e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Engenharia Eletrônica do Instituto Federal de Educação Ciência, e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 30 de agosto, 2022.

Banca Examinadora:



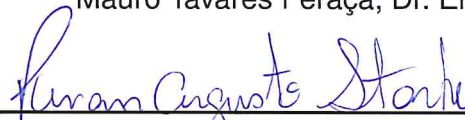
---

Joabel Moia, Dr. Eng.



---

Mauro Tavares Peraça, Dr. Eng.



---

Renan Augusto Starke, Dr. Eng.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, Elenir e Luiz, graças a vocês dois que eu pude estar aqui hoje, tendo a oportunidade de fazer o que gosto e me orgulho;

A minha companheira, Clara, sorte minha de estar ao seu lado todos os dias;

Aos meus grandes amigos: Luiz, Rafael, Rodrigo, Sonia, Tarcis e Vinícius, sem vocês este período não seria o mesmo, e talvez, eu não me tornasse eu mesmo;

Ao meu orientador, Joabel, por me guiar durante o curso e ao longo deste projeto;

Ao Instituto Federal de Santa Catarina, que com uma educação pública de qualidade, me permitiu buscar oportunidades outrora inalcançáveis, como o ensino profissional e a realização de pesquisa, extensão, intercâmbio, cursos de música e idiomas;

A todos que contribuíram nessa minha jornada de 11 anos de IFSC, do curso técnico até a engenharia, muito obrigado.

A educação transforma as pessoas.

## RESUMO

Este trabalho descreve o projeto de um analisador potência e qualidade de energia monofásico, compreendendo uma breve fundamentação teórica, seguida da descrição das etapas de desenvolvimento de *hardware* e de software embarcado. Primeiramente, analisou-se que soluções comerciais de analisadores de energia podem não ser compatíveis com a realidade orçamentária de instituições de ensino e pequenas empresas, inviabilizando seu uso em ambientes acadêmicos ou em provas de conceito. Em seguida, o trabalho traz uma breve revisão bibliográfica sobre métricas para análise da qualidade de energia e sobre instrumentação eletrônica para grandezas elétricas, acompanhada da descrição do projeto de *hardware* e software embarcado do protótipo realizado. Por fim, uma metodologia de testes validou os requisitos funcionais propostos e constatou compatibilidade das medições em relação à solução comercial Tektronix PA1000, comprovando que o circuito de medição de tensão e corrente projetado é capaz de obter métricas para análise de potência e qualidade de energia. O protótipo realiza medições de até 840 W de potência ativa, análise harmônica até o harmônico de 15ª ordem e permite visualização dos sinais e métricas em *display* gráfico.

**Palavras-chave:** Analisador de potência. Qualidade de energia. Sistemas embarcados. Processamento digital de sinais. *Display* gráfico.

## **ABSTRACT**

This work describes the design of a single-phase power quality analyzer, comprising a brief theoretical foundation, followed by the description of the hardware and embedded software development stages. First, it was analyzed that commercial solutions for energy analyzers may not be compatible with the budget of educational institutions and small companies, making their use unfeasible in academic environments or proofs of concept. Then, the work presents a brief bibliographic review on metrics for power quality analysis and on electronic instrumentation for electrical quantities, accompanied by a description of the hardware project and embedded software of the prototype. Ultimately, a test methodology validated the proposed functional requirements and verified the compatibility of the measurements in relation to the commercial solution Tektronix PA1000, proving that the voltage and current measurement circuit designed is capable of obtaining metrics for power analysis and energy quality. The prototype performs measurements up to 840 W of active power, harmonic analysis up to the 15th harmonic order and allows visualization of signals and metrics on a graphic display.

**Keywords:** Power analyzer. Power quality. Embedded systems. Digital signal processing. Graphic display.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Sistema de medição de energia por amostragem de tensão e corrente                          | 21 |
| Figura 2 – Formas de onda de tensão, corrente e potências instantâneas no domínio do tempo . . . . .  | 22 |
| Figura 3 – Triângulo das potências . . . . .                                                          | 23 |
| Figura 4 – Corrente e tensão num circuito RL série. . . . .                                           | 23 |
| Figura 5 – Resistor <i>shunt</i> . . . . .                                                            | 26 |
| Figura 6 – Resistor <i>shunt</i> espiral para $1 A_{RMS}$ utilizado no Tektronix PA1000 . .           | 26 |
| Figura 7 – Campo magnético rotacional $H$ gerado por corrente $I$ . . . . .                           | 27 |
| Figura 8 – Bobina de Rogowski . . . . .                                                               | 27 |
| Figura 9 – Bobina de Rogowski Fluke i2500-18 iFlex® . . . . .                                         | 28 |
| Figura 10 – Exemplo de transformador de corrente 1:5 . . . . .                                        | 28 |
| Figura 11 – Transformadores de corrente . . . . .                                                     | 29 |
| Figura 12 – Tensão $V_H$ gerada pelo Efeito Hall . . . . .                                            | 29 |
| Figura 13 – Componentes de um circuito integrado capaz de medir corrente por efeito Hall . . . . .    | 30 |
| Figura 14 – Sensor de corrente por efeito Hall em encapsulamento SOIC-8 . . .                         | 31 |
| Figura 15 – Ponteira de corrente Tektronix A622 . . . . .                                             | 31 |
| Figura 16 – Rebaixador de tensão por divisor resistivo . . . . .                                      | 32 |
| Figura 17 – Quantizador ideal com 8 níveis de amplitude (3 bits) . . . . .                            | 34 |
| Figura 18 – Diagramas de blocos do ADC de tipo SAR . . . . .                                          | 35 |
| Figura 19 – Diagramas de blocos do ADC de tipo sigma-delta . . . . .                                  | 36 |
| Figura 20 – Amostragem em um conversor sigma-delta . . . . .                                          | 36 |
| Figura 21 – <i>Aliasing</i> em um sinal senoidal no domínio do tempo . . . . .                        | 37 |
| Figura 22 – <i>Aliasing</i> em quatro sinais senoidais no domínio da frequência . . . .               | 38 |
| Figura 23 – Sinal não-linear composto pela adição de componente fundamental e 3ª harmônica . . . . .  | 41 |
| Figura 24 – Faixas de classificação da tensão atendimento com tensão de referência de 220 V . . . . . | 43 |
| Figura 25 – Analisadores de potência e qualidade de energia . . . . .                                 | 44 |
| Figura 26 – Diagrama de blocos do sistema . . . . .                                                   | 48 |
| Figura 27 – Conexões do ADC ADS131M02 . . . . .                                                       | 50 |
| Figura 28 – Conector para comunicação com o <i>front-end</i> analógico . . . . .                      | 51 |
| Figura 29 – Diagrama esquemático do circuito implementado para o ADC ADS131M02                        | 51 |
| Figura 30 – Diagrama de conexões internas do sensor LV20-P . . . . .                                  | 52 |
| Figura 31 – Filtro anti-aliasing diferencial . . . . .                                                | 54 |
| Figura 32 – Diagrama esquemático do circuito do sensor de tensão . . . . .                            | 55 |
| Figura 33 – Diagrama esquemático do circuito do sensor de corrente . . . . .                          | 57 |

|                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 34 – Esquemático do circuito de alimentação . . . . .                                          | 58  |
| Figura 35 – Placa de instrumentação . . . . .                                                         | 60  |
| Figura 36 – Modelo 3D da placa de instrumentação . . . . .                                            | 60  |
| Figura 37 – Simulação do circuito condicionador do sinal de tensão . . . . .                          | 61  |
| Figura 38 – Resultados de simulação do circuito condicionador do sinal de tensão                      | 62  |
| Figura 39 – Simulação do circuito condicionador do sinal de corrente . . . . .                        | 63  |
| Figura 40 – Resultados de simulação do circuito condicionador do sinal de corrente                    | 64  |
| Figura 41 – Kit de desenvolvimento Kaluga-1 V1.3 . . . . .                                            | 65  |
| Figura 42 – Camadas propostas para o software embarcado . . . . .                                     | 67  |
| Figura 43 – Diagrama de estados do sistema . . . . .                                                  | 69  |
| Figura 44 – Exemplos de kits de desenvolvimento com aplicações LVGL . . . . .                         | 70  |
| Figura 45 – Interface visual do protótipo . . . . .                                                   | 72  |
| Figura 46 – Frame SPI para leitura de dois canais do ADC . . . . .                                    | 74  |
| Figura 47 – Frame SPI para leitura de dois canais do ADC obtidos via analisador<br>lógico . . . . .   | 75  |
| Figura 48 – Placa de instrumentação montada . . . . .                                                 | 76  |
| Figura 49 – Protótipo completo - placa de instrumentação e placa de aquisição<br>de dados . . . . .   | 77  |
| Figura 50 – Medições dos multímetros Fluke 115 e do protótipo proposto . . . . .                      | 80  |
| Figura 51 – Testes com protótipo e Tektronix PA1000 . . . . .                                         | 81  |
| Figura 52 – Reconstrução dos sinais a partir das harmônicas calculadas . . . . .                      | 83  |
| Figura 53 – Comparação de métricas - Tensão de 180 V em carga RL com<br>saturação magnética . . . . . | 84  |
| Figura 54 – Comparação de sinais - Tensão de 180 V em carga RL com saturação<br>magnética . . . . .   | 84  |
| Figura 55 – Comparação Protótipo/PA1000 - Tensão RMS . . . . .                                        | 96  |
| Figura 56 – Comparação Protótipo/PA1000 - Corrente RMS . . . . .                                      | 96  |
| Figura 57 – Comparação Protótipo/PA1000 - Frequência . . . . .                                        | 97  |
| Figura 58 – Comparação Protótipo/PA1000 - Fator de potência . . . . .                                 | 97  |
| Figura 59 – Comparação Protótipo/PA1000 - Potência ativa . . . . .                                    | 98  |
| Figura 60 – Comparação Protótipo/PA1000 - Potência aparente . . . . .                                 | 98  |
| Figura 61 – Comparação Protótipo/PA1000 - Potência reativa . . . . .                                  | 99  |
| Figura 62 – Comparação Protótipo/PA1000 - Tensão de pico máxima . . . . .                             | 99  |
| Figura 63 – Comparação Protótipo/PA1000 - Tensão de pico mínima . . . . .                             | 100 |
| Figura 64 – Comparação Protótipo/PA1000 - Corrente de pico máxima . . . . .                           | 100 |
| Figura 65 – Comparação Protótipo/PA1000 - Corrente de pico mínima . . . . .                           | 101 |
| Figura 66 – Comparação Protótipo/PA1000 - Fator de crista da tensão . . . . .                         | 101 |
| Figura 67 – Comparação Protótipo/PA1000 - Fator de crista da corrente . . . . .                       | 102 |
| Figura 68 – Comparação Protótipo/PA1000 - THD da tensão . . . . .                                     | 102 |

|                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 69 – Comparação Protótipo/PA1000 - THD da corrente . . . . .         | 103 |
| Figura 70 – Comparação Protótipo/PA1000 - Harmônicos de corrente 20V . . .  | 104 |
| Figura 71 – Comparação Protótipo/PA1000 - Harmônicos de corrente 40V . . .  | 104 |
| Figura 72 – Comparação Protótipo/PA1000 - Harmônicos de corrente 60V . . .  | 104 |
| Figura 73 – Comparação Protótipo/PA1000 - Harmônicos de corrente 80V . . .  | 105 |
| Figura 74 – Comparação Protótipo/PA1000 - Harmônicos de corrente 100V . . . | 105 |
| Figura 75 – Comparação Protótipo/PA1000 - Harmônicos de corrente 120V . . . | 105 |
| Figura 76 – Comparação Protótipo/PA1000 - Harmônicos de corrente 140V . . . | 106 |
| Figura 77 – Comparação Protótipo/PA1000 - Harmônicos de corrente 160V . . . | 106 |
| Figura 78 – Comparação Protótipo/PA1000 - Harmônicos de corrente 180V . . . | 106 |
| Figura 79 – Comparação Protótipo/PA1000 - Harmônicos de corrente 200V . . . | 107 |
| Figura 80 – Comparação Protótipo/PA1000 - Harmônicos de corrente 220V . . . | 107 |
| Figura 81 – Comparação Protótipo/PA1000 - Harmônicos de corrente 240V . . . | 107 |
| Figura 82 – Formas de onda de tensão e corrente - Entrada 20V . . . . .     | 108 |
| Figura 83 – Formas de onda de tensão e corrente - Entrada 40V . . . . .     | 108 |
| Figura 84 – Formas de onda de tensão e corrente - Entrada 60V . . . . .     | 108 |
| Figura 85 – Formas de onda de tensão e corrente - Entrada 80V . . . . .     | 109 |
| Figura 86 – Formas de onda de tensão e corrente - Entrada 100V . . . . .    | 109 |
| Figura 87 – Formas de onda de tensão e corrente - Entrada 120V . . . . .    | 109 |
| Figura 88 – Formas de onda de tensão e corrente - Entrada 140V . . . . .    | 110 |
| Figura 89 – Formas de onda de tensão e corrente - Entrada 160V . . . . .    | 110 |
| Figura 90 – Formas de onda de tensão e corrente - Entrada 180V . . . . .    | 110 |
| Figura 91 – Formas de onda de tensão e corrente - Entrada 200V . . . . .    | 111 |
| Figura 92 – Formas de onda de tensão e corrente - Entrada 220V . . . . .    | 111 |
| Figura 93 – Formas de onda de tensão e corrente - Entrada 240V . . . . .    | 111 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Preço de analisadores de potência e qualidade de energia comerciais                                   | 17 |
| Tabela 2 – Comparação de analisadores de potência e qualidade de energia comerciais . . . . .                    | 45 |
| Tabela 3 – Especificação inicial do projeto de <i>hardware</i> . . . . .                                         | 47 |
| Tabela 4 – Custo estimado da lista de materias do projeto <sup>(1)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(3)</sup> . . . . . | 66 |
| Tabela 5 – Comparativo de recursos - Tektronix PA1000 x Protótipo proposto .                                     | 79 |
| Tabela 6 – Comparativo de resultados entre Fluke 115 e protótipo proposto . .                                    | 79 |
| Tabela 7 – Testes realizados em 12 níveis de tensão RMS . . . . .                                                | 82 |

## SUMÁRIO

|            |                                                                    |           |
|------------|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO</b>                                                  | <b>16</b> |
| <b>1.1</b> | <b>Justificativa</b>                                               | <b>17</b> |
| <b>1.2</b> | <b>Descrição do problema</b>                                       | <b>18</b> |
| <b>1.3</b> | <b>Objetivo geral</b>                                              | <b>18</b> |
| <b>1.4</b> | <b>Objetivos específicos</b>                                       | <b>18</b> |
| <b>2</b>   | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>                                       | <b>20</b> |
| <b>2.1</b> | <b>Medição de energia</b>                                          | <b>20</b> |
| <b>2.2</b> | <b>Métricas para análise de energia</b>                            | <b>21</b> |
| 2.2.1      | Valor médio                                                        | 21        |
| 2.2.2      | Valor RMS                                                          | 21        |
| 2.2.3      | Potência elétrica                                                  | 22        |
| 2.2.3.1    | Fator de potência                                                  | 22        |
| 2.2.3.2    | Potência aparente                                                  | 24        |
| 2.2.3.3    | Potência ativa                                                     | 24        |
| 2.2.3.4    | Potência reativa                                                   | 24        |
| 2.2.4      | Valor de pico                                                      | 25        |
| 2.2.5      | Fator de crista                                                    | 25        |
| <b>2.3</b> | <b>Sensores de corrente</b>                                        | <b>25</b> |
| 2.3.1      | Resistivo ( <i>Shunt</i> )                                         | 25        |
| 2.3.2      | Bobina de Rogowski                                                 | 26        |
| 2.3.3      | Transformador de corrente (TC)                                     | 28        |
| 2.3.4      | Efeito Hall                                                        | 29        |
| <b>2.4</b> | <b>Sensores de tensão</b>                                          | <b>31</b> |
| 2.4.1      | Divisor de tensão resistivo                                        | 32        |
| 2.4.2      | Transformador de tensão                                            | 32        |
| 2.4.3      | Efeito Hall                                                        | 33        |
| <b>2.5</b> | <b>Conversores analógico-digitais</b>                              | <b>33</b> |
| 2.5.1      | Conversor por aproximações sucessivas (SAR)                        | 34        |
| 2.5.2      | Conversor sigma-delta                                              | 35        |
| 2.5.3      | Teorema da amostragem de Nyquist                                   | 36        |
| 2.5.4      | Aliasing                                                           | 37        |
| 2.5.4.1    | Filtros anti-aliasing                                              | 38        |
| <b>2.6</b> | <b>Microcontroladores</b>                                          | <b>39</b> |
| 2.6.1      | Recursos para medição de energia                                   | 40        |
| 2.6.2      | Instruções e co-processadores para processamento digital de sinais | 40        |
| <b>2.7</b> | <b>Qualidade de energia</b>                                        | <b>41</b> |

|            |                                                                  |           |
|------------|------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.7.1      | Harmônicos . . . . .                                             | 41        |
| 2.7.2      | Distorção total harmônica . . . . .                              | 41        |
| 2.7.3      | PRODIST - Módulo 8 . . . . .                                     | 42        |
| 2.7.3.1    | Tensão de atendimento . . . . .                                  | 42        |
| 2.7.3.2    | Limite para distorções harmônicas totais . . . . .               | 43        |
| 2.7.4      | IEC 61000-3-2 . . . . .                                          | 43        |
| <b>2.8</b> | <b>Analísadores de potência e qualidade de energia . . . . .</b> | <b>44</b> |
| <b>3</b>   | <b>METODOLOGIA . . . . .</b>                                     | <b>46</b> |
| <b>4</b>   | <b>PROJETO DE <i>HARDWARE</i> . . . . .</b>                      | <b>47</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Diagrama de blocos . . . . .</b>                              | <b>47</b> |
| <b>4.2</b> | <b>Placa de instrumentação . . . . .</b>                         | <b>48</b> |
| 4.2.1      | Conversor analógico-digital . . . . .                            | 49        |
| 4.2.1.1    | ADS131M02 . . . . .                                              | 49        |
| 4.2.1.1.1  | Comunicação de dados . . . . .                                   | 50        |
| 4.2.1.2    | Diagrama esquemático . . . . .                                   | 51        |
| 4.2.2      | Sensor de tensão . . . . .                                       | 51        |
| 4.2.2.1    | LV20-P . . . . .                                                 | 52        |
| 4.2.2.2    | Condicionamento do sinal . . . . .                               | 53        |
| 4.2.2.3    | Filtro anti-aliasing . . . . .                                   | 53        |
| 4.2.2.4    | Diagrama esquemático . . . . .                                   | 54        |
| 4.2.2.5    | Conversão de LSBs para volts . . . . .                           | 55        |
| 4.2.3      | Sensor de corrente . . . . .                                     | 55        |
| 4.2.3.1    | ACS712 . . . . .                                                 | 56        |
| 4.2.3.2    | Condicionamento do sinal . . . . .                               | 56        |
| 4.2.3.3    | Diagrama esquemático . . . . .                                   | 56        |
| 4.2.3.4    | Conversão de LSBs para amperes . . . . .                         | 57        |
| 4.2.4      | Alimentação do circuito eletrônico . . . . .                     | 58        |
| 4.2.4.1    | +12 V / -12 V . . . . .                                          | 58        |
| 4.2.4.2    | +5 V . . . . .                                                   | 58        |
| 4.2.4.3    | +3,3 V . . . . .                                                 | 59        |
| 4.2.5      | Placa de circuito impresso . . . . .                             | 59        |
| 4.2.6      | Simulações . . . . .                                             | 61        |
| 4.2.6.1    | Circuito condicionador do sinal de tensão . . . . .              | 61        |
| 4.2.6.2    | Circuito condicionador do sinal de corrente . . . . .            | 62        |
| <b>4.3</b> | <b>Placa de aquisição e processamento de sinais . . . . .</b>    | <b>64</b> |
| 4.3.1      | Microcontrolador ESP32-S2 . . . . .                              | 65        |
| 4.3.2      | Interface homem-máquina . . . . .                                | 65        |
| 4.3.3      | Pinos e conexões . . . . .                                       | 66        |

|         |                                                             |    |
|---------|-------------------------------------------------------------|----|
| 4.4     | <b>Análise de custos</b>                                    | 66 |
| 5       | <b>PROJETO DE SOFTWARE EMBARCADO</b>                        | 67 |
| 5.1     | <b>Arquitetura</b>                                          | 67 |
| 5.1.1   | Camada de aplicação                                         | 68 |
| 5.1.2   | Camada de drivers                                           | 68 |
| 5.1.3   | Camada de abstração de <i>hardware</i>                      | 68 |
| 5.1.4   | Diagrama de estados                                         | 69 |
| 5.2     | <b>Espressif IoT Development Framework (<i>esp-idf</i>)</b> | 69 |
| 5.2.1   | esp-dsp                                                     | 70 |
| 5.2.2   | LVGL                                                        | 70 |
| 5.3     | <b>Interface homem-máquina</b>                              | 71 |
| 5.3.1   | Botões                                                      | 71 |
| 5.3.2   | Telas                                                       | 72 |
| 5.4     | <b>Driver ADS131M02</b>                                     | 73 |
| 5.4.1   | GPIOs utilizados                                            | 73 |
| 5.4.2   | Comunicação SPI                                             | 73 |
| 5.4.2.1 | Leitura de dois canais (Comando NULL)                       | 74 |
| 5.4.2.2 | Buffer de leitura                                           | 75 |
| 6       | <b>RESULTADOS</b>                                           | 76 |
| 6.1     | <b>Protótipo desenvolvido</b>                               | 76 |
| 6.1.1   | Hardware                                                    | 76 |
| 6.1.2   | Software embarcado                                          | 77 |
| 6.2     | <b>Comparação dos equipamentos</b>                          | 78 |
| 6.3     | <b>Comparação com multímetros True RMS</b>                  | 79 |
| 6.4     | <b>Setup de testes</b>                                      | 80 |
| 6.5     | <b>Comparação da análise de harmônicas</b>                  | 82 |
| 6.6     | <b>Comparação por métricas e sinais brutos</b>              | 83 |
| 7       | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>                                 | 85 |
|         | <b>REFERÊNCIAS</b>                                          | 87 |
|         | <b>APÊNDICES</b>                                            | 91 |
|         | <b>APÊNDICE A – RESULTADOS DAS MÉTRICAS PROCESSADAS</b>     | 92 |
|         | <b>APÊNDICE B – GRÁFICOS DAS MÉTRICAS PROCESSADAS</b>       | 96 |
| B.0.1   | Valor RMS da tensão                                         | 96 |

|                                                                                                  |                                       |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|------------|
| B.0.2                                                                                            | Valor RMS da corrente . . . . .       | 96         |
| B.0.3                                                                                            | Frequência . . . . .                  | 97         |
| B.0.4                                                                                            | Fator de potência . . . . .           | 97         |
| B.0.5                                                                                            | Potência ativa . . . . .              | 98         |
| B.0.6                                                                                            | Potência aparente . . . . .           | 98         |
| B.0.7                                                                                            | Potência reativa . . . . .            | 99         |
| B.0.8                                                                                            | Tensão máxima . . . . .               | 99         |
| B.0.9                                                                                            | Tensão mínima . . . . .               | 100        |
| B.0.10                                                                                           | Corrente máxima . . . . .             | 100        |
| B.0.11                                                                                           | Corrente mínima . . . . .             | 101        |
| B.0.12                                                                                           | Fator de crista da tensão . . . . .   | 101        |
| B.0.13                                                                                           | Fator de crista da corrente . . . . . | 102        |
| B.0.14                                                                                           | THD da tensão . . . . .               | 102        |
| B.0.15                                                                                           | THD da corrente . . . . .             | 103        |
| <b>APÊNDICE C – GRÁFICOS DAS ANÁLISES DE HARMÔNICOS .</b>                                        |                                       | <b>104</b> |
| <b>APÊNDICE D – FORMAS DE ONDA DE TENSÃO E CORRENTE .</b>                                        |                                       | <b>108</b> |
| <b>APÊNDICE E – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DA PLACA DE INSTRUMENTAÇÃO - KIT ESP32-S2 KALUGA-1 V1.3</b> |                                       | <b>112</b> |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|          |                                                                      |
|----------|----------------------------------------------------------------------|
| ADC      | <i>Analog-to-Digital Converter</i> - Conversor Analógico-Digital     |
| CA       | Corrente Alternada                                                   |
| CC       | Corrente Contínua                                                    |
| CI       | Circuito Integrado                                                   |
| EMI      | <i>Electromagnetic Interference</i> - Interferência Eletromagnética  |
| DAC      | <i>Digital-to-Analog Converter</i> - Conversor Digital-Analógico     |
| IFSC     | Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina |
| IoT      | <i>Internet of Things</i> - Internet das Coisas                      |
| IHM      | Interface Homem-Máquina                                              |
| PCI      | Placa de Circuito Impresso                                           |
| PTH      | <i>Plated Through-Hole</i> - Pino através de furo                    |
| OCD      | Organismo de Certificação Designado                                  |
| SDK      | <i>Software Development Kit</i> - Kit de Desenvolvimento de Software |
| SMD      | <i>Surface-Mount Device</i> - Dispositivo de Montagem Superficial    |
| $V_{DC}$ | <i>Voltage Direct Current</i> - Tensão Contínua                      |
| $V_{AC}$ | <i>Voltage Alternating Current</i> - Tensão Alternada                |

## 1 INTRODUÇÃO

Prevê-se que o mercado de produtos eletrônicos mundial movimentará 1,653 trilhão de dólares no ano de 2025, com um aumento anual de 6,8% (THE BUSINESS RESEARCH COMPANY, 2021). Como comparação, no ano de 2020, o PIB do Brasil totalizou 1,444 trilhão de dólares (THE WORLD BANK, 2022).

Avanços em tecnologias de hardware e software estão acelerando o desenvolvimento de novos produtos eletrônicos. Contribuindo para este fenômeno está a crescente demanda por produtos interconectados, conhecidos como dispositivos para a "Internet das Coisas" (IoT), capazes de coletar e transferir dados remotamente (FCC, 2021). De acordo com a empresa de consultoria empresarial McKinsey (2015), estima-se que o impacto financeiro destes produtos eletrônicos do segmento IoT será sete vezes maior que seu valor de mercado, totalizando 11,1 trilhões de dólares anualmente, a partir do ano de 2025.

Segundo a empresa de análise de dados Statista (2021), até o ano 2025, estarão em uso um total de 41,2 bilhões de produtos eletrônicos com recursos de conectividade. Estes dispositivos eletroeletrônicos, presentes na ordem de bilhões de unidades, regularmente utilizam circuitos não-lineares, como os retificadores e conversores estáticos, que sucessivamente chaveiam e interrompem a corrente elétrica, gerando distorções neste sinal e consequentemente causando efeitos adversos no próprio equipamento e em outros dispositivos que compartilham da mesma fonte de energia (DAS, 2015, p. 4).

As normas regulatórias frequentemente se atualizam para promover regras que possibilitem a coexistência de dispositivos eletroeletrônicos, estabelecendo limites para estes efeitos adversos, chamados de interferência eletromagnética (EMI). No Brasil, para comercializar qualquer produto na área de telecomunicações, este deve estar conforme ao "Regulamento de Avaliação da Conformidade e de Homologação de Produtos para Telecomunicações"(ANATEL, 2021).

Portanto, o levantamento do perfil de carga de um dispositivo torna-se uma etapa fundamental no ciclo de desenvolvimento, pois indica dados sobre o consumo de energia de um equipamento conectado à rede elétrica. Para obter estas informações, um dos instrumentos de medição que pode ser utilizado é o analisador de potência e qualidade de energia, que mede grandezas elétricas e parâmetros correlatos. Estes equipamentos de teste podem reduzir o risco de reprovações nos processos de homologação de um novo produto (TEKTRONIX, 2013b), pois são capazes de caracterizar os sistemas sob testes em termos de suas grandezas elétricas como a tensão, corrente e potência, possibilitando a visualização destas métricas em tempo real pelo desenvolvedor, ou realizando o armazenamento destes dados para posterior análise.

Este trabalho busca desenvolver um analisador de potência e qualidade de energia monofásico, de baixo custo, capaz de mostrar gráficos de tensão, corrente e potência instantânea, além também métricas sobre a qualidade de energia da tensão de entrada e o perfil de carga do dispositivo em teste.

## 1.1 Justificativa

No Brasil, para um equipamento estar conforme às normas vigentes, este deve ser aprovado em testes de acordo com sua categoria, realizados por um Organismo de Certificação Designado (OCD), instituição técnica legalmente constituída que, por delegação da Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel), conduz processos de avaliação da conformidade de produtos eletrônicos para telecomunicações (ANATEL, 2022). Não obstante, existem institutos e laboratórios certificados pelo Instituto de Metrologia (INMETRO) que permitem a realização de testes para certificações fora do escopo da Anatel, que podem ser requisitos para homologação de um produto eletrônico em determinadas aplicações.

O custo para realizar testes de homologação de um novo produto em um laboratório de certificação é alto e pode estar sujeito à reprovação. Para mitigar esse risco, equipamentos medidores de potência e qualidade de energia podem ser utilizados. No entanto, o custo elevado destes equipamentos pode ser inviável para instituições de ensino ou pequenas empresas buscando a validação de um protótipo em fase de prova de conceito.

Na Tabela 1 a seguir, tem-se o preço em dólares (USD) e em reais (BRL), sem a inclusão de impostos, de equipamentos analisadores de potência e qualidade de energia das principais fabricantes: Fluke, Hioki e Tektronix.

**Tabela 1 – Preço de analisadores de potência e qualidade de energia comerciais**

| <b>Fabricante</b> | <b>Modelo</b> | <b>Preço (USD)</b> | <b>Preço (BRL)<sup>1</sup></b> |
|-------------------|---------------|--------------------|--------------------------------|
| Fluke             | 435-II        | 9.642,99           | 49.507,11                      |
| Hioki             | PW3390-01     | 9.680,00           | 49.726,16                      |
| Tektronix         | PA1000        | 3.780,00           | 19.406,52                      |

(<sup>1</sup>) Data cotação utilizada: 09/05/2022 (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2022).

Fonte: (NEWARK, 2022a; TESTEQUITY, 2022; ALLIED, 2022).

Como visto na Tabela 1, estes equipamentos custam dezenas de milhares de reais. Este valor elevado é consequência da precisão de seus sensores e robustez do equipamento. Os modelos analisados possuem erro de acurácia na ordem de 0,01% e para utilização acadêmica ou em provas de conceito, esta ordem de grandeza é muitas vezes menor que o necessário para visualização dos sinais e cálculo de métricas.

Portanto, com o projeto de *hardware* que utilize sensores sem esse nível de acurácia, tem-se a possibilidade de obter dados semelhantes, com um custo de projeto reduzido.

Por fim, ao desenvolver o próprio equipamento medidor, torna possível adicionar recursos em trabalhos futuros via atualização de *firmware*, como por exemplo: novas métricas, geração de relatórios e até mesmo uma página *web*, possibilitando a visualização dos dados remotamente.

## 1.2 Descrição do problema

O projeto de um equipamento de medição envolve etapas desafiadoras, sendo elas: escolha de sensores e projeto do *front-end* analógico, projeto do circuito de instrumentação eletrônica, desenvolvimento de placa de circuito impresso e desenvolvimento do software embarcado.

Todas estas etapas envolvem decisões que impactam diretamente no custo e/ou no desempenho do equipamento.

Sendo assim, este trabalho descreve as decisões técnicas e ferramentas utilizadas para desenvolver um analisador de potência e qualidade de energia de baixo custo.

## 1.3 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é apresentar o projeto e o desenvolvimento de um analisador de potência e qualidade de energia elétrica de baixo custo, comparado às soluções comerciais atuais, para aplicações acadêmicas e de prova de conceito.

## 1.4 Objetivos específicos

Mais especificamente, os seguintes objetivos específicos foram propostos:

- a) Identificar e avaliar tecnologias que compõem um equipamento analisador de potência e qualidade de energia elétrica;
- b) Realizar pesquisa de mercado e analisar soluções de *front-end* analógico e/ou microcontroladores que atendam os requisitos deste sistema embarcado;
- c) Projetar circuito de condicionamento de sinais de tensão e corrente elétrica e desenvolver placa de circuito impresso que permita comunicação com o *front-end* analógico;
- d) Desenvolver firmware para aquisição de dados do *front-end* analógico;

- e) Criar rotinas de processamento digital de sinais que permitam obter métricas referentes à análise de potência e qualidade de energia elétrica;
- f) Desenvolver interface de exibição dos sinais e resultados referentes às grandezas elétricas medidas;
- g) Aplicar metodologia de testes e comparar resultados de medição com equipamento analisador de potência e qualidade de comercial.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem como objetivo apresentar os conceitos utilizados para o projeto de um analisador de potência e qualidade de energia. Contém uma breve fundamentação teórica sobre: instrumentação para medição de grandezas elétricas, conversores analógico-digitais, processamento digital de sinais e qualidade de energia. Por fim, há a descrição de equipamentos analisadores de potência e qualidade de energia comerciais, com foco no Tektronix PA1000, que será utilizado como referência ao longo deste trabalho.

### 2.1 Medição de energia

A energia pode ser matematicamente descrita como a integral definida da potência ( $p$ ) em um intervalo de tempo definido ( $t_1$  até  $t_2$ ). Sabe-se que a potência de um elemento em um ramo de um circuito elétrico é dada por  $p(t) = v(t) \cdot i(t)$ , conseqüentemente, a energia total ( $E$ ) de um sinal de potência  $p(t)$ , absorvida neste mesmo ramo pode ser definida pela Equação 1 (WEBSTER; EREN, 2014).

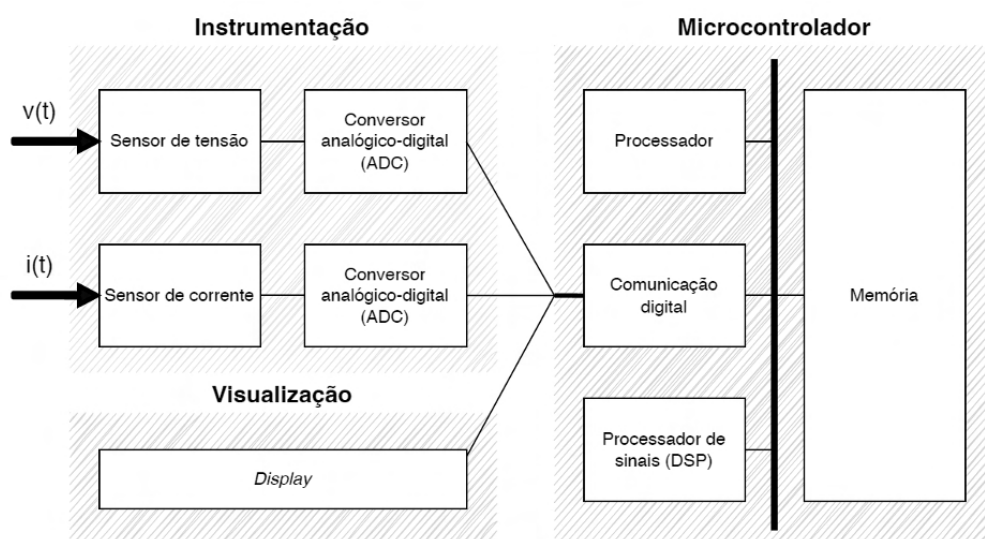
$$E = \int_{t_1}^{t_2} v(t) \cdot i(t) \cdot dt = \int_{t_1}^{t_2} p(t) \cdot dt \quad (1)$$

Conseqüentemente, no domínio discreto, para um sinal  $p_k = v_k \cdot i_k$ , com período de amostragem  $T_s$  e  $N$  amostras, pode-se obter a Equação 2, que descreve a energia absorvida durante um período finito de tempo.

$$E = \sum_{k=1}^N v_k \cdot i_k \cdot T_s = \sum_{k=1}^N p_k \cdot T_s \quad (2)$$

Portanto, é possível medir energia elétrica indiretamente, utilizando medidas de tensão e corrente num intervalo de tempo definido e processando estes sinais para obter potência, e conseqüentemente, energia.

A solução mais avançada para monitoramento de energia são os medidores digitais, que amostram sinais de tensão e corrente para em seguida processá-los e obter métricas de potência e energia (WEBSTER; EREN, 2014). A Figura 1 mostra um diagrama em blocos de um sistema de medição de energia por amostragem simultânea de tensão e corrente, que utiliza um microcontrolador para controle da aquisição, visualização e processamento dos sinais.

**Figura 1 – Sistema de medição de energia por amostragem de tensão e corrente**

Fonte: Adaptado de Webster e Eren (2014, p. 25-7).

## 2.2 Métricas para análise de energia

A análise de energia requer a obtenção de métricas específicas. As métricas mais usadas são: valor médio, valor médio quadrático (RMS), potência aparente, potência ativa, potência reativa, valor de pico, fator de potência, fator de crista e distorção total harmônica (TEKTRONIX, 2013a).

Nesta seção serão descritas as métricas de análise de energia citadas anteriormente, com ênfase em suas equações no domínio discreto, objeto de interesse deste trabalho.

### 2.2.1 Valor médio

O valor médio de um sinal  $X$  pode ser calculado pela Equação 3 (TEKTRO-NIX, 2013a).

$$X_{med} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N X_k \quad (3)$$

### 2.2.2 Valor RMS

O valor RMS de um sinal, também conhecido por valor eficaz, é a métrica mais usada em medições de sinais de corrente alternada (CA) e indica o valor equivalente a um sinal CC (TEKTRONIX, 2013a). Segundo Hart (2011, p. 35), o valor RMS

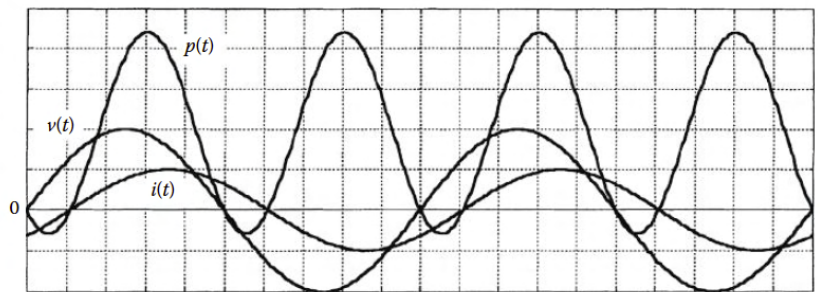
de um sinal  $X_k$  pode ser calculado pela Equação 4.

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N X_k^2} \quad (4)$$

### 2.2.3 Potência elétrica

Como visto na seção 2.1, a potência elétrica é dada pela multiplicação de um sinal de tensão por um sinal de corrente no tempo, resultando em um sinal de potência instantânea  $p(t)$ . Um exemplo dessa operação pode ser vista em um gráfico na Figura 2.

**Figura 2 – Formas de onda de tensão, corrente e potências instantâneas no domínio do tempo**



Fonte: (WEBSTER; EREN, 2014).

No exemplo da Figura 2, os sinais de tensão e corrente estão defasados, portanto, não possuem simetria no eixo X, consequentemente, a multiplicação de ambos sinais terá valores negativos no momento em que um sinal possuir amplitude positiva e o outro estiver com amplitude negativa. Por convenção, a potência positiva é considerada como potência drenada e a potência negativa seria a potência fornecida (devolvida à fonte).

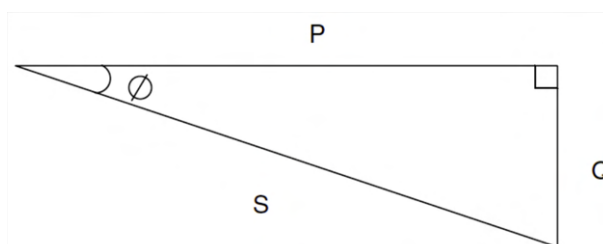
Nesta seção, as grandezas escalares de fator de potência, potência aparente, potência ativa e potência reativa serão descritas.

#### 2.2.3.1 Fator de potência

O fator de potência é uma grandeza associada à qualidade de energia pois é a razão entre a potência ativa ( $P$ ) e a potência aparente ( $S$ ) que é entregue a uma carga, como mostra a Equação 5.

$$FP = \frac{P}{S} \quad (5)$$

Em circuitos elétricos lineares, a potência ativa, potência e potência aparente podem ser representadas pelo "triângulo das potências", visto na Figura 3.

**Figura 3 – Triângulo das potências**

Fonte: Adaptado de Sankaran (2002, p. 142).

Onde:

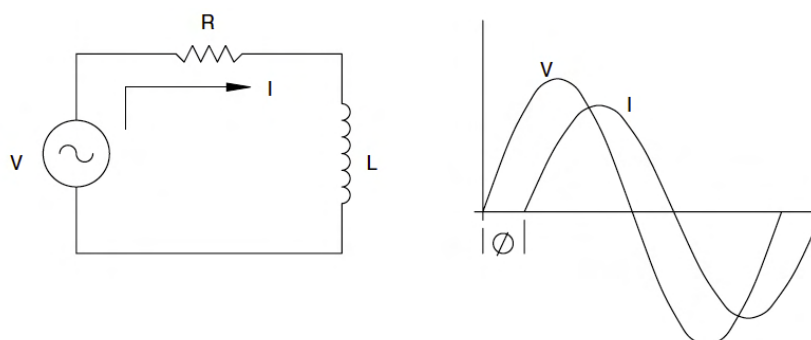
$\phi$  é o ângulo de defasagem entre a componente fundamental da tensão e a componente fundamental da corrente

$P$  é a potência ativa, expressa em watts (W)

$Q$  é a potência reativa, expressa em volt-ampere reativo (VAr)

$S$  é a potência aparente, expressa em volt-ampere (VA)

O ângulo  $\phi$  que pondera o fator de potência pode ser calculado pela defasagem entre os sinais de tensão e corrente, como pode ser visto na Figura 4.

**Figura 4 – Corrente e tensão num circuito RL série.**

Fonte: (SANKARAN, 2002).

Para casos onde há presença de distorção harmônica na forma de onda de corrente, conhecendo-se o ângulo  $\phi$ , pode-se calcular o fator de potência por meio da Equação 6 (HART, 2011, p. 49).

$$FP = \frac{\cos(\phi)}{\sqrt{1 + THD_I^2}} \quad (6)$$

Onde:

$\phi$  é o ângulo de defasagem entre a componente fundamental da tensão e a componente fundamental da corrente

$THD_I$  é a distorção total harmônica da corrente

Para cargas lineares, o ângulo  $\phi$  pode ser calculado em função de valores conhecidos de potência aparente e reativa, como visto pela Equação 7.

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{Q}{P}\right) \quad (7)$$

### 2.2.3.2 Potência aparente

A potência aparente  $S$  pode ser calculada de duas formas: sendo a primeira pela multiplicação do valor RMS de tensão  $V_{RMS}$  e do valor RMS de corrente  $I_{RMS}$ , tendo-se a Equação 8, que pode ser empregada para qualquer circuito, linear ou não linear. Adicionalmente, pode-se calcular a potência aparente utilizando o cálculo da hipotenusa do triângulo das potências, descrito pela Equação 9, no entanto, esta equação é válida somente para cargas lineares.

$$S = V_{RMS} \cdot I_{RMS} \quad (8)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (9)$$

### 2.2.3.3 Potência ativa

Segundo Sankaran (2002, p. 141), a potência ativa, também conhecida como potência real, é a porção da potência aparente que é convertida em trabalho e perdas no equipamento elétrico que está desempenhando trabalho diferente de zero. A potência ativa para cargas lineares pode ser calculada pela Equação 10. Para cargas não lineares, utiliza-se a Equação 11.

$$P = S \cdot \cos(\phi) \quad (10)$$

$$P = S \cdot FP \quad (11)$$

### 2.2.3.4 Potência reativa

A potência reativa é uma métrica que sempre estará presente porque equipamentos eletrônicos sempre terão capacitâncias e indutâncias, que por consequência geram potência reativa (SANKARAN, 2002), portanto, não há circuito real com fator de potência unitário. Para calcular a potência reativa para cargas lineares, faz-se analogia ao cálculo da potência ativa, tendo a potência reativa  $Q$  referente ao cateto oposto de  $\phi$ , tem-se a Equação 12 para obter o valor de potência reativa.

$$Q = S \cdot \sin(\phi) \quad (12)$$

### 2.2.4 Valor de pico

O valor de pico é o máximo valor absoluto em um sinal. Esta métrica é importante pois indica a maior amplitude de tensão ou corrente presente em um ramo.

Para obtê-lo, primeiro calcula-se os valores globais de máximo ( $X_{max}$ ) e de mínimo ( $X_{min}$ ) em um sinal, para em seguida obter o maior valor absoluto entre ambos, como é descrito pela Equação 13.

$$X_{pk} = \max(|X_{max}|, |X_{min}|) \quad (13)$$

### 2.2.5 Fator de crista

O fator de crista (CF) é a razão entre o valor de pico e o valor RMS, como pode ser visto na Equação 14.

$$CF = \frac{X_{pk}}{X_{RMS}} \quad (14)$$

Portanto, para sinais senoidais, espera-se que o fator de crista seja aproximadamente  $\sqrt{2}$ .

## 2.3 Sensores de corrente

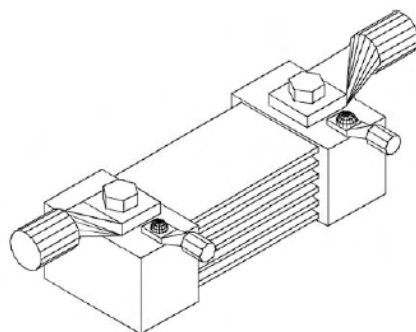
A corrente elétrica é consequência do movimento de cargas elétricas. Existem diversos métodos para sensoriamento desta grandeza e nesta seção serão descritas algumas destas tecnologias, como: resistores shunt, bobinas de Rogowski, transformadores de corrente e sensores de efeito Hall.

### 2.3.1 Resistivo (*Shunt*)

Medindo-se a tensão ( $V$ ) sobre um resistor ( $R$ ) de valor conhecido, é possível calcular a corrente ( $I$ ) no ramo por meio da Lei de Ohm, vista na Equação 15.

$$I = \frac{V}{R} \quad (15)$$

O resistor do tipo *shunt*, é um sensor capaz de medir correntes contínuas (CC) ou correntes alternadas (CA). Sua construção busca realizar um elemento com comportamento totalmente resistivo, portanto, algumas técnicas devem ser usadas para reduzir indutâncias e capacitâncias, de forma a aumentar a largura de banda de medição. Por exemplo: para mitigar o efeito *skin* em correntes alternadas de alta frequência, que concentraria o fluxo de cargas nas bordas do elemento, usam-se camadas de condutor na maioria dos resistores *shunt*. Uma ilustração de um resistor *shunt* consta na Figura 5 a seguir:

**Figura 5 – Resistor *shunt***

Fonte: (WEBSTER; EREN, 2014).

Em equipamentos de medição comerciais, destaca-se o uso de um tipo de resistor *shunt* em camadas espirais pelo analisador de potência e energia Tektronix PA1000, como sensor de correntes elétricas de até  $1 A_{RMS}$  (AVNET, 2014). O resistor *shunt* de  $1 A_{RMS}$  do PA1000 pode ser visto na Figura 6.

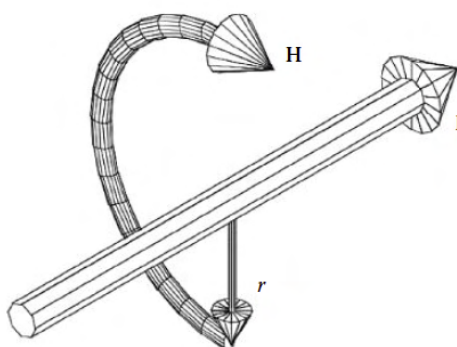
**Figura 6 – Resistor *shunt* espiral para  $1 A_{RMS}$  utilizado no Tektronix PA1000**

Fonte: Adaptado de AVNET (2014).

Segundo Webster e Eren (2014, p. 284), a principal desvantagem em utilizar um resistor shunt é a necessidade de interrupção o circuito de medição para inserir o resistor shunt. Não obstante, a característica resistiva de dissipar potência em forma de calor, torna resistores shunt para alta corrente volumosos. Por fim, o resistor shunt não provê isolamento galvânica para o circuito de medição, o que pode ser requisito em algumas aplicações.

### 2.3.2 Bobina de Rogowski

A bobina de Rogowski é um tipo de sensor que utiliza o fenômeno eletromagnético de geração de campo magnético rotacional ao longo de um condutor com corrente elétrica como grandeza de sensoriamento.

**Figura 7 – Campo magnético rotacional  $H$  gerado por corrente  $I$** 

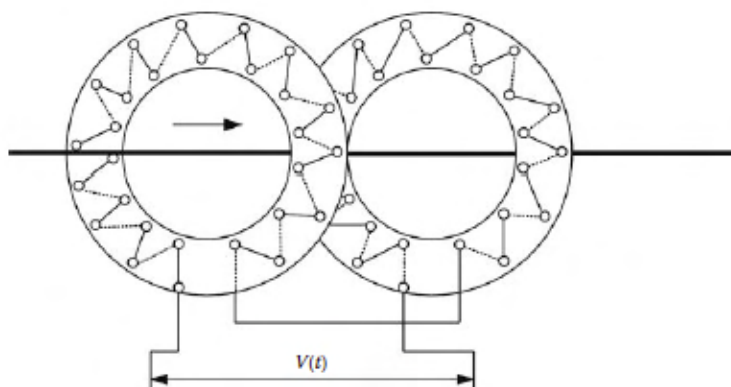
Fonte: (WEBSTER; EREN, 2014).

A bobina de Rogowski oferece isolamento galvânica ao circuito de medição. É composta por duas bobinas com uma indutância mútua ( $M$ ) conhecida e sabendo-se que uma tensão proporcional é induzida no conjunto de bobinas de acordo com a taxa de variação de uma corrente  $I$  passando pelo centro da bobina, tem-se a Equação 16, que descreve a tensão  $V(t)$  nos terminais de uma bobina de Rogowski. Um diagrama da bobina de Rogowski pode ser visto na Figura 8.

$$V(t) = M \cdot \frac{dI}{dt} \quad (16)$$

Onde:

$V(t)$  = Sinal de sensoriamento de corrente induzido na bobina de Rogowski

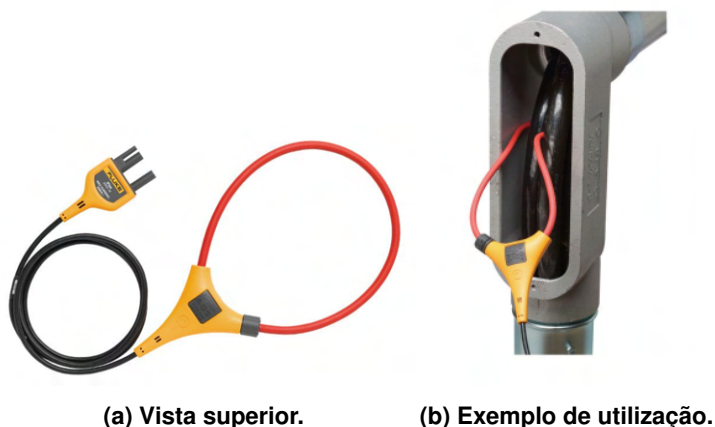
**Figura 8 – Bobina de Rogowski**

Fonte: (WEBSTER; EREN, 2014).

Por depender da variação da corrente em um condutor, a bobina de Rogowski não permite o sensoriamento de corrente contínua, somente de corrente alternada. Este tipo de sensor é normalmente construído com bobinas em núcleo de ar,

permitindo maleabilidade e uso em instalações elétricas de corrente alternada, como pode ser visto na Figura 9.

**Figura 9 – Bobina de Rogowski Fluke i2500-18 iFlex®**



Fonte: (FLUKE, 2022b).

### 2.3.3 Transformador de corrente (TC)

O transformador de corrente é um sensor amplamente utilizado em situações que exigem isolamento galvânica, como a medição de circuitos de alta corrente, sendo necessário reduzir a corrente primária para um valor menor no secundário. É um tipo de sensor essencial nos sistemas elétricos, normalmente estando associado ao *feedback* das condições reais do sistema, possibilitando obter métricas em regime permanente, detectar faltas elétricas, mantendo o isolamento galvânico entre o sinal e o sistema em medição, proporcionando segurança nas operações e reduzindo custos com montagens e cabeamento.

Um exemplo de transformador de corrente com uma espira no primário e cinco espiras no secundário pode ser visto na Figura 10.

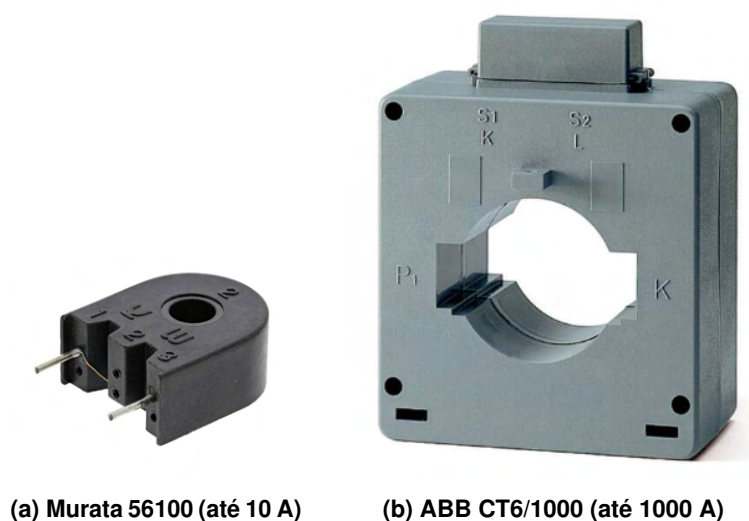
**Figura 10 – Exemplo de transformador de corrente 1:5**



Fonte: Adaptado de Webster e Eren (2014).

Por ser um transformador, não é capaz de sensoriar correntes CC, somente CA. Os transformadores de corrente podem ser encontrados em encapsulamentos PTH, SMD e também como peças avulsas, sendo a corrente máxima variável até milhares de amperes, dependendo da aplicação. Na Figura 11, constam dois exemplos de transformadores de corrente comerciais, um deles para montagem em placa de circuito impresso e outro para fixação externa.

**Figura 11 – Transformadores de corrente**



(a) Murata 56100 (até 10 A)

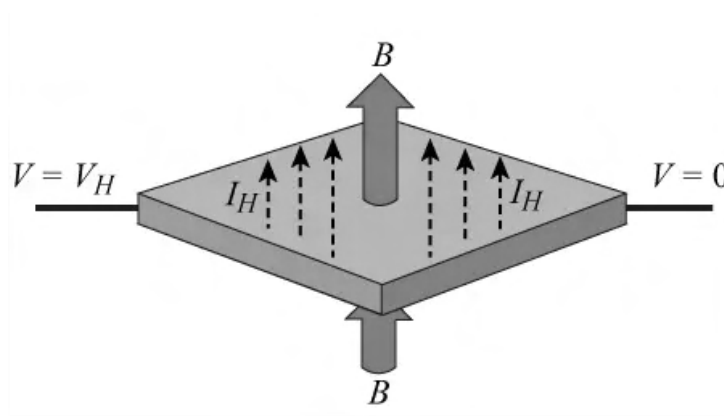
(b) ABB CT6/1000 (até 1000 A)

Fonte: (RS COMPONENTS, 2022; ABB, 2022).

#### 2.3.4 Efeito Hall

O efeito Hall é o fenômeno descrito pela tensão gerada pelo movimento de cargas em uma superfície sujeita a um campo magnético perpendicular (ALLEGRO MICROSYSTEMS, 2022b), como ilustrado na Figura 12.

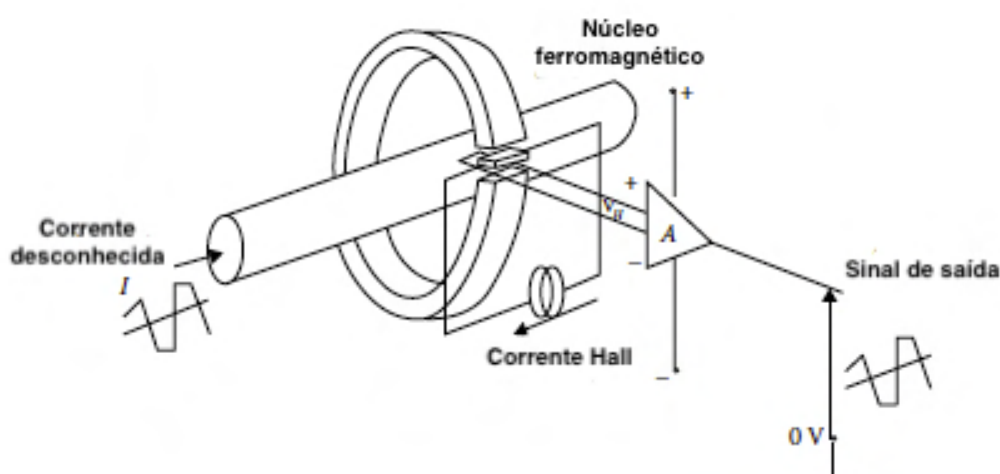
**Figura 12 – Tensão  $V_H$  gerada pelo Efeito Hall**



Fonte: (ALLEGRO MICROSYSTEMS, 2022b).

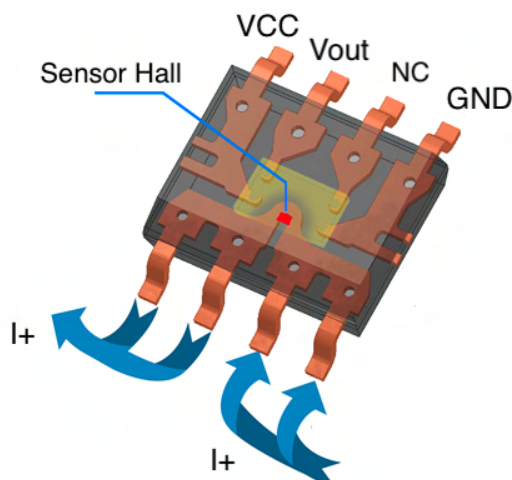
Sensores de efeito Hall utilizam um núcleo magnético para concentrar o campo magnético proporcional à corrente sensoriada, que irá induzir uma tensão na placa condutora (elemento Hall). A tensão é induzida no elemento Hall para correntes CC e CA. No entanto, esta tensão é na ordem de milivolts e sempre é necessária uma amplificação e o circuito de condicionamento deve ser adequado para estes níveis (WEBSTER; EREN, 2014). Um diagrama ilustrando uma corrente passando por um condutor, um núcleo magnético, um elemento hall e um circuito de condicionamento pode ser visto na Figura 13.

**Figura 13 – Componentes de um circuito integrado capaz de medir corrente por efeito Hall**



Fonte: Adaptado de Webster e Eren (2014).

Alguns fabricantes possuem soluções monolíticas para sensoriamento de corrente utilizando o efeito Hall. A isolamento galvânica da corrente sensoriada e capacidade de medir correntes CC e CA torna estes sensores adequados para muitas aplicações.

**Figura 14 – Sensor de corrente por efeito Hall em encapsulamento SOIC-8**

Fonte: Adaptado de Allegro Microsystems (2020).

Uma destas aplicações é como ponteira de corrente para osciloscópios, como por exemplo a Tektronix A622, capaz de medir correntes CC e CA até  $10 A_{RMS}$  (NEWARK, 2022b), que pode ser vista na Figura 15.

**Figura 15 – Ponteira de corrente Tektronix A622**

Fonte: (NEWARK, 2022b).

## 2.4 Sensores de tensão

A tensão elétrica é descrita como a diferença de potencial elétrico entre dois pontos. A medição de tensão elétrica é fundamental para a análise de potência e qualidade de energia, portanto, a escolha de um sensor de tensão deve estar de acordo com os requisitos de projeto.

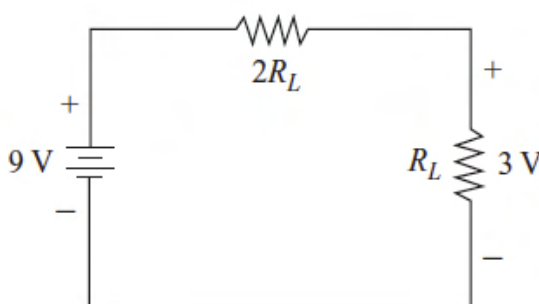
Nesta seção, serão descritos os sensores por divisores de tensão, os transformadores de tensão e os sensores de tensão que utilizam efeito Hall.

### 2.4.1 Divisor de tensão resistivo

Em situações onde é necessário rebaixar a tensão para a leitura em um circuito de conversão analógico digital, o divisor resistivo torna-se uma solução simples e efetiva para o propósito. Na Figura 16 consta um exemplo de divisor de tensão abaixador de uma tensão de entrada  $V_{in}$  de 9V para uma tensão de saída de 3V, de acordo com a Equação 17, que demonstra o cálculo da tensão aplicada ao resistor  $R_L$ :

$$V_{R_L} = \frac{V_{in} \cdot R_L}{R_L + R_{div}} = \frac{9 \cdot R_L}{R_L + 2R_L} = 3V \quad (17)$$

**Figura 16 – Rebaixador de tensão por divisor resistivo**



Fonte: (SANKARAN, 2002).

Este tipo de topologia possui dois principais problemas: isolamento galvânica e dissipação de potência no resistor anterior à carga. Para mitigar o problema de dissipação de potência, pode-se usar uma associação série de resistores, que somados resultam no mesmo valor de  $R_{div}$  e que dividiriam a potência dissipada entre si, porém, neste caso, soma-se os erros referentes a categoria dos resistores utilizados, podendo comprometer as medidas, resultando em valores diferentes do esperado na tensão de saída  $V_{R_L}$ .

### 2.4.2 Transformador de tensão

Em sistemas de medição de tensão alternada de baixa frequência, transformadores de tensão (VT) usualmente são utilizados como rebaixadores de tensão e isoladores galvânicos (WEBSTER; EREN, 2014).

Transformadores de tensão são compostos por duas bobinas, primária e secundária, onde a bobina primária é conectada ao circuito de potência e a segunda ao circuito de medição. As bobinas são isoladas eletricamente, mas há uma conexão magnética entre elas, normalmente criada por um núcleo ferro-magnético. Por estes motivos, o transformador de tensão não permite o monitoramento de tensões CC e pode estar sujeito à saturação magnética, gerando distorções harmônicas no sinal de tensão medido no secundário (saída).

Ao utilizar um transformador de tensão como instrumento de medição, o projetista deve se atentar à especificação de perdas do transformador e também sobre o atraso de fase do sinal visto no secundário. Transformadores de tensão são amplamente utilizados em sensores e circuitos de proteção em redes de distribuição de energia elétrica de alta tensão, no entanto, também podem ser encontrados para utilização em projetos de baixa tensão.

### 2.4.3 Efeito Hall

Analogamente aos sensores de corrente por efeito Hall vistos na seção 2.3.4, é possível medir tensão utilizando o mesmo princípio, no entanto, deve-se promover, em série à tensão de teste, uma resistência de valor conhecido, permitindo que com o uso de um circuito interno de realimentação possa se medir a tensão em teste, por meio do efeito Hall. Um sensor tensão por efeito Hall que utiliza esta topologia é o LV20-P, capaz de medir de 10 V até 500 V (LEM, 2021).

Sensores de tensão por efeito Hall são recomendados em aplicações que tem como requisito o isolamento galvânico e medição de tensão contínua e alternada.

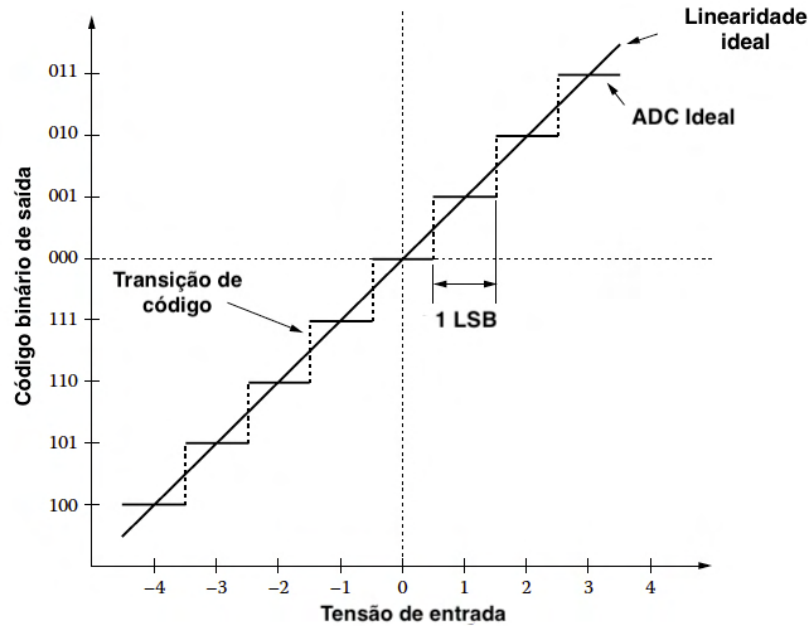
## 2.5 Conversores analógico-digitais

A maioria dos sistemas eletrônicos para instrumentação utilizada de algum processo para transformar sinais analógicos, disponíveis no meio físico, para sinais discretos, a serem disponibilizados para os processadores digitais. A interface responsável por este processo é o conversor analógico-digital (ADC), que atua realizando dois processos: amostragem e quantização (WEBSTER; EREN, 2014).

A amostragem é o processo de converter um sinal contínuo, com informação infinita, em uma sequência de valores durante um intervalo finito de tempo (sinal discreto).

Enquanto a amostragem atua na discretização do domínio de um sinal, a quantização discretiza a imagem, portanto, reduz um sinal contínuo com infinitas possibilidades de amplitude, a um sinal de amplitude discreta, com possibilidades finitas. Durante o processo de quantização, o ADC deve ser capaz de selecionar um valor discreto aproximado do valor real de um sinal, resultando em um comportamento de "escada" na relação de conversão entre o sinal real e o sinal quantizado, como pode ser visto na Figura 17.

Figura 17 – Quantizador ideal com 8 níveis de amplitude (3 bits)



Fonte: Adaptado de Webster e Eren (2014).

Outros dois conceitos fundamentais para o entendimento de um ADC são: a faixa de operação (*range*) e a resolução. A faixa de operação consiste nos valores de tensão que a entrada do circuito de conversão permite, exemplo: de -10 V (*range<sub>-</sub>*) até 10 V (*range<sub>+</sub>*). A resolução é normalmente associada ao número de bits em que a faixa de operação será discretizada em amplitude. Portanto, para o exemplo anterior, caso o ADC possua resolução (*res*) de 24 bits, tem-se que o menor valor de tensão descrito por um bit menos significativo (LSB) resultante da medição, será de acordo com a Equação 18.

$$LSB_V = \frac{range_+ - range_-}{2^{res}} = \frac{10 - (-10)}{2^{24}} = 0,000001192092896 V \quad (18)$$

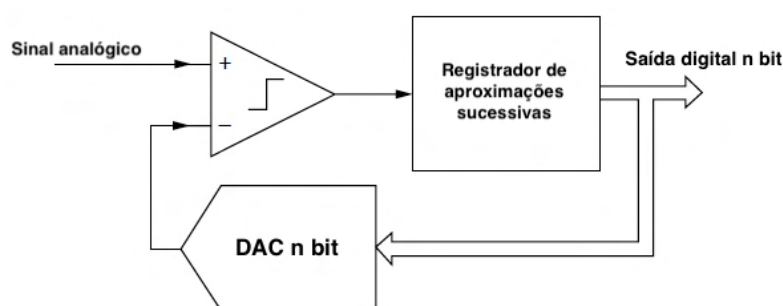
Consequentemente, este ADC terá discretização da amplitude em 16.777.216 níveis de aproximadamente 1,2  $\mu V$ , na faixa de operação de -10 V até 10 V.

### 2.5.1 Conversor por aproximações sucessivas (SAR)

Atualmente é o tipo de ADC mais comum, frequentemente utilizado como periférico de microcontroladores ARM (ST MICROELECTRONICS, 2022) e em outras soluções monolíticas, devido ao seu baixo custo (WEBSTER; EREN, 2014). A maioria dos SAR disponíveis no mercado possuem resolução de 8 a 16 bits e frequências de amostragem até a ordem de megahertz, que permite versatilidade da sua utilização em diversas aplicações.

O SAR internamente conta com um amplificador comparador de tensão conectado e um registrador de contagem de aproximações sucessivas, em malha fechada a um conversor digital-analógico (DAC), possibilitando o *feedback* de valores de tensão. De acordo com Webster e Eren (2014) o ADC de tipo SAR inicia o processo de conversão com uma sequência de tentativas de obter o valor mais próximo possível do sinal em sua entrada analógica. Assim que atinge o critério de parada, o registrador de aproximações sucessivas é capaz montar uma palavra binária que representa o sinal amostrado na entrada analógica do ADC. O diagrama de blocos do ADC de tipo SAR pode ser visto na Figura 18.

**Figura 18 – Diagramas de blocos do ADC de tipo SAR**



Fonte: Adaptado de Webster e Eren (2014).

### 2.5.2 Conversor sigma-delta

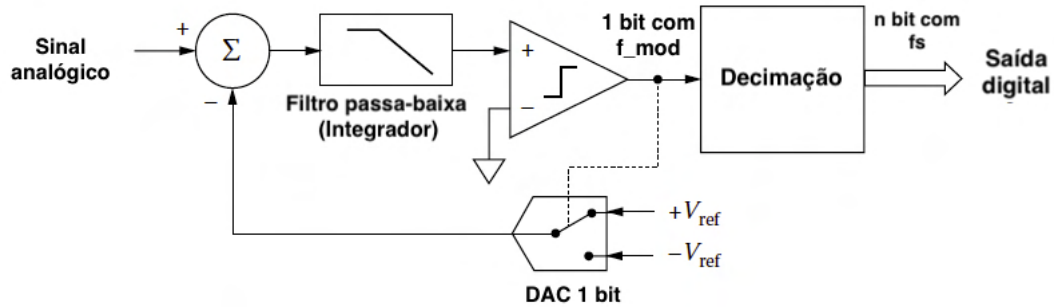
Conversores do tipo sigma-delta tipicamente possuem resoluções de 16 a 24 bits e frequências de amostragem até a ordem de centenas de kilohertz. Devido a sua capacidade de converter com resolução de 24 bits em frequências de 48 kHz, é muito utilizado em aplicações de áudio *high-end* (WEBSTER; EREN, 2014). Outra aplicação comum de conversores sigma-delta são em aplicações para medição de energia, pois devido ao seu baixo custo, são encontrados frequentemente soluções monolíticas com até 8 canais, permitindo amostragem simultânea dos sinais de tensão e corrente em sistemas monofásicos e polifásicos (TEXAS INSTRUMENTS, 2021).

O conversor sigma-delta converte um sinal analógico em um fluxo de bits (*bitstream*). Este tipo de conversor opera com sobreamostragem, portanto, efetua amostras em uma frequência maior que a mínima taxa de amostragem, que é duas vezes maior que a maior frequência no sinal analógico de entrada (TOCCI; WIDMER; MOSS, 2011).

O diagrama dos blocos que compõem um ADC do tipo sigma-delta pode ser visto na Figura 19. O conversor é composto de um bloco integrador (filtro passa-baixa) que recebe o sinal analógico de entrada e entrega para um bloco comparador. O resultado da comparação (1 bit) é realimentado na entrada e também vai para a

saída, onde consta um circuito decimador, responsável por decodificar a modulação por variações do sinal dada pelo primeiro bloco subtrator (modulação delta), em um sinal de saída em *bitstream*.

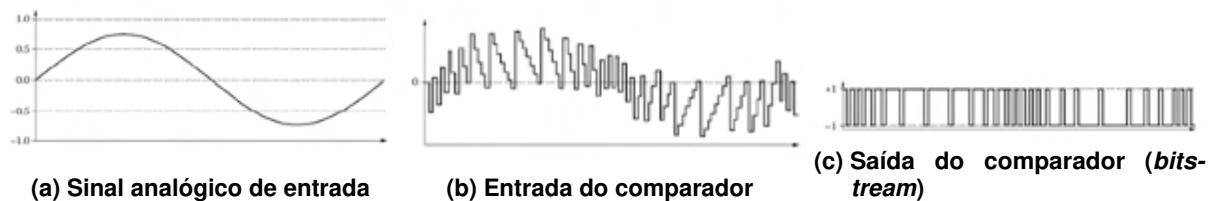
**Figura 19 – Diagramas de blocos do ADC de tipo sigma-delta**



Fonte: Adaptado de Webster e Eren (2014).

Portanto, tem-se somas (representadas pela letra grega sigma) sucessivas de um sinal de saída que varia somente 1 bit no tempo utilizando modulação delta. Dando a motivação do nome do tipo de ADC: sigma-delta. Um exemplo do processo de amostragem de um ADC sigma-delta pode ser visto na Figura 20.

**Figura 20 – Amostragem em um conversor sigma-delta**



Fonte: Adaptado de Webster e Eren (2014).

Por fim, observando a Figura 20(c), tem-se que o ciclo de trabalho do sinal digital de 1 bit, na saída do comparador, é equivalente a amplitude do sinal analógico de entrada.

### 2.5.3 Teorema da amostragem de Nyquist

O teorema da amostragem de Nyquist implica que um sinal senoidal no tempo pode ser reconstruído em amostras sem perda de informação, desde que a frequência de amostragem ( $f_s$ ) seja duas ou mais vezes maior que a frequência ( $B$ ) deste sinal senoidal, como descrito na Equação 19.

$$B \leq \frac{f_s}{2} \quad . \quad (19)$$

Portanto, a frequência de amostragem mínima para obter uma componente  $B$ , conhecida como frequência de Nyquist ( $f_N$ ), é dada pela Equação 20.

$$f_N = 2 \cdot B \quad . \quad (20)$$

Este teorema deve ser levado em consideração em aplicações de instrumentação eletrônica que utilizam conversores analógico-digitais.

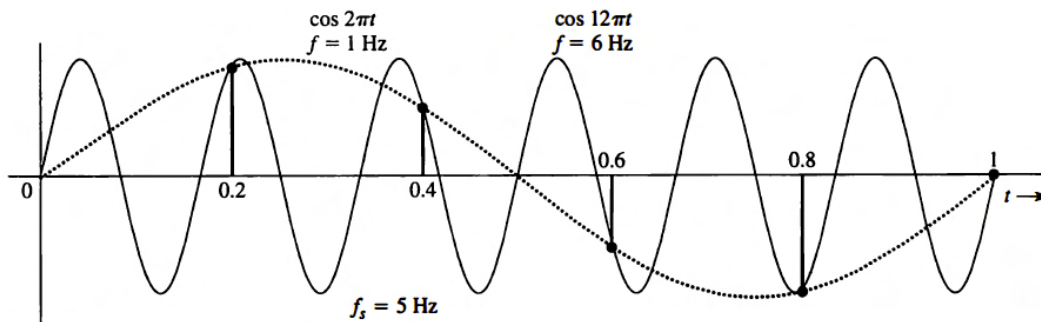
#### 2.5.4 Aliasing

Teoricamente, é possível recuperar a informação de um sinal acima da frequência de Nyquist, pois um sinal amostrado é deslocado na frequência por um valor igual a múltiplos da frequência de amostragem ( $f_s$ ) (WEBSTER; EREN, 2014). Este fenômeno é conhecido como aliasing.

Segundo Lathi (2009), o *aliasing* torna impossível determinar a frequência exata de um sinal analógico amostrado, pois permite que dois ou mais sinais senoidais no tempo contínuo, com frequências distintas, possam ser amostrados simultaneamente e resultarem em sinais de tempo discreto que possuem a mesma frequência.

O fenômeno de *aliasing* é exemplificado na Figura 21, onde consta um sinal com frequência de 6 Hz, amostrado com  $f_s = 5$  Hz, resultando em aliasing, e consequentemente tornando o sinal amostrado um sinal com frequência de 1 Hz.

**Figura 21 – Aliasing em um sinal senoidal no domínio do tempo**



Fonte: (LATHI, 2009).

No domínio da frequência, um exemplo é dado pela Figura 22, onde tem-se quatro sinais senoidais F1, F2, F3 e F4, com frequências ( $f_{\text{sinai}}$ ) de 25 Hz, 70 Hz, 160 Hz e 510 Hz, respectivamente, amostrados em 100 Hz. Suas respectivas frequências de aliasing podem ser calculadas pela Equação 21:

$$f_{\text{alias}} = |M \cdot f_s - f_{\text{sinai}}| \quad (21)$$

Onde:

$f_{alias}$  = Frequência de aliasing que será vista na banda entre 0 Hz e  $f_s$

$M$  = Múltiplo inteiro de  $f_s$  que resulte em um valor maior que  $f_{signal}$

Portanto, tem-se as frequências de aliasing causadas por F2, F3 e F4 dadas pelas Equações 22, 23 e 24.

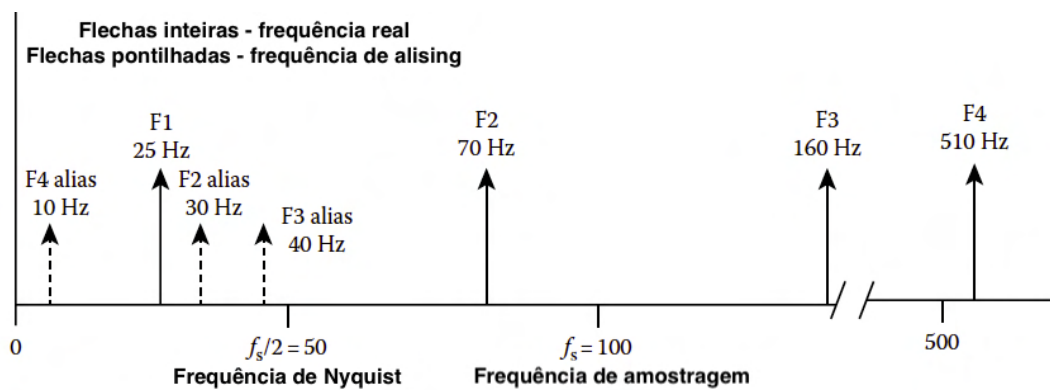
$$F2_{alias} = |M \cdot f_s - f_{signal}| = |(1) \cdot 100 - 70| = 30 \text{ Hz} \quad (22)$$

$$F3_{alias} = |M \cdot f_s - f_{signal}| = |(2) \cdot 100 - 160| = 40 \text{ Hz} \quad (23)$$

$$F4_{alias} = |M \cdot f_s - f_{signal}| = |(6) \cdot 100 - 510| = 90 \text{ Hz} \quad (24)$$

Vale ressaltar que a componente F1, de 25 Hz, não causa aliasing pois está dentro da banda da frequência de Nyquist, então  $M = 0$ .

**Figura 22 – Aliasing em quatro sinais senoidas no domínio da frequência**



Fonte: Adaptado de Webster e Eren (2014).

O caso citado por Lathi (2009), onde sinais contínuos com frequência distinta resultam em sinais iguais após o processo de amostragem, poderia ser visto no exemplo da Figura 22 caso, por exemplo, houvesse um sinal F5 com frequência de 75 Hz, teria-se  $F5 = F1$  no domínio discreto. Este caso é demonstrado pela Equação 25.

$$F5_{alias} = |(1) \cdot 100 - 75| = 25 \text{ Hz} = F1 \quad (25)$$

#### 2.5.4.1 Filtros anti-aliasing

Para remover totalmente o aliasing, seria necessário um filtro capaz de filtrar toda energia espectral acima da frequência de Nyquist, antes do processo de amostragem. Como estes filtros são totalmente teóricos, normalmente atua-se mitigando o aliasing com o uso de filtros passa-baixa analógicos, conhecidos como filtros anti-aliasing. De acordo com Webster e Eren (2014), filtros passa-baixa de primeira ou segunda ordem são suficientes para mitigar o aliasing na maioria das aplicações.

Por fim, a sobreamostragem de um sinal (como é feito no circuito interno do ADC sigma-delta), permite que a frequência de Nyquist seja deslocada para a direita no espectro, e juntamente ao uso de filtros anti-aliasing analógicos pré-amostragem, pode contribuir para aproximar a amostragem do sinal real, pois permite que o decaimento do filtro ocorra inicialmente numa banda de sinal sem aliasing (TEXAS INSTRUMENTS, 2015a).

## 2.6 Microcontroladores

Microcontroladores são um dos componentes fundamentais em sistemas embarcados e permitem que instruções de máquina sejam executadas realizando por meio dos seus periféricos: funções lógicas, aquisição e processamento de sinais, comunicação de dados e controle de processos.

"Os microcontroladores, geralmente, possuem todos os componentes de um computador completo (CPU, memória e portas de entrada/saída), tudo dentro de um único circuito integrado. Eles estão embutidos nos aparelhos eletrodomésticos de cozinha, nos equipamentos de vídeo e áudio, nas fotocopiadoras, nas máquinas de atendimento automático, nos equipamentos automáticos das fábricas, nos instrumentos médicos e em muitos outros aparelhos."(TOCCI; WIDMER; MOSS, 2011).

Caso opte-se por utilizar um microcontrolador em um equipamento eletrônico, deve-se ponderar se as seguintes variáveis existem e atendam os requisitos de projeto:

- a) Frequência de processamento;
- b) Memória não-volátil;
- c) Memória RAM;
- d) Consumo energético;
- e) Interfaces de comunicação com fio e sem fio;
- f) Instruções e co-processador para processamento digital de sinais;
- g) Bibliotecas de abstração de camadas de hardware;
- h) Documentação;
- i) Ferramentas de compilação e gravação;
- j) Custo e disponibilidade de mercado.

Unindo estas características, um microcontrolador pode ser um componente central em um sistema de medições digitais, pois como visto na Figura 1, é capaz de controlar a aquisição de dados, o processamento dos sinais e a interface homem-máquina de configuração e visualização de dados.

### 2.6.1 Recursos para medição de energia

Alguns microcontroladores possuem recursos de *hardware* e *software* capazes de obter métricas de potência e qualidade de energia diretamente pela leitura de um conversor analógico digital interno. Um exemplo é o microcontrolador MSP430AFE253, uma solução monolítica com três ADCs sigma-delta de 24 bits como periféricos internos. A leitura das amostras adquiridas por estes conversores é diretamente alocada para a memória do microcontrolador, sem a necessidade de transmissão de dados com um ADC externo. Por fim, por meio de uma biblioteca de *software* disponibilizada pelo fabricante, pode-se obter métricas de energia como: tensão e corrente RMS, potência aparente, potência ativa e potência reativa (TEXAS INSTRUMENTS, 2016).

### 2.6.2 Instruções e co-processadores para processamento digital de sinais

Em sistemas embarcados para medição, realizar tarefas de processamento digital de sinais (DSP) torna possível que o mesmo dispositivo que adquiriu os dados tenha capacidade de processá-los e gerar métricas.

Determinados microcontroladores possuem um conjunto de instruções adicional capaz de realizar operações matemáticas que seriam segmentadas em centenas de instruções *assembly*, em apenas uma instrução realizada em poucos ciclos de *clock*. Estas instruções para processamento digital de sinais, normalmente são disponibilizadas para operações vetoriais (ARM, 2022; ESPRESSIF, 2022), como a multiplicação e acumulação (MAC), reduzindo tempo e consumo energético das operações matemáticas no sistema.

Este recurso adicional busca dar possibilidade ao projetista de, no mesmo microcontrolador que controla a aplicação geral (visualização, interface homem-máquina, envio de dados), também realizar operações matemáticas complexas em um curto intervalo de tempo. Caso esse recurso não esteja disponível ou seja necessário um maior desempenho, há a possibilidade de utilizar um processador digital de sinais dedicado, no entanto, pode aumentar complexidade e custo do projeto.

Adicionalmente, microcontroladores cada vez mais possuem unidades aritméticas para operações com ponto flutuante (FPU), que em conjunto com as instruções vetoriais tipo DSP, contribuem para a otimização de tempo e consumo energético, um exemplo de microcontrolador que contém FPU é o ESP32 (ESPRESSIF, 2022). A principal vantagem de utilizar a FPU está na possibilidade de utilizar números com a formatação ponto flutuante IEEE-754 (*float*) (SCIENCE DIRECT, 2022), aumentando a faixa de operação disponível para os cálculos matemáticos e consequentemente reduzindo o risco de *overflows* e *underflows*, inerente em sistemas que utilizam aritmética de ponto fixo em ULAs sem suporte à *float*. Devido ao seu formato, números em *float* não possuem o mesmo passo entre as representações numéricas possíveis, o que

deve ser considerado no projeto e na opção por usar aritmética de ponto fixo, onde a discretização se mantém para qualquer faixa de valores.

## 2.7 Qualidade de energia

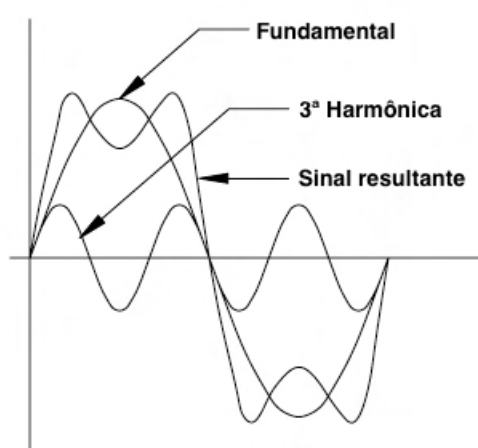
Nesta seção, serão definidos os conceitos de qualidade de energia, harmônicos e distorção harmônica. Ao final da seção é feita uma breve introdução à procedimentos e limites relacionados a qualidade da energia elétrica distribuída pelas concessionárias no Brasil e a normas internacionais que regulamentam os limites de distorção harmônica emitidas por um equipamento eletrônico.

Segundo Sankaran (2002), a qualidade de energia é composta por limites em grandezas elétricas que permitam pleno funcionamento em equipamentos eletrônicos, sem nenhuma perda significativa em performance ou vida útil.

### 2.7.1 Harmônicos

Os harmônicos são definidos como sinais que possuam frequência múltipla do sinal de frequência fundamental (sinal com maior energia no domínio da frequência). Estes sinais podem ser gerados por diversas fontes, como por exemplo: saturação magnética e uso de cargas não-lineares, esta última sendo o caso mais frequente (DAS, 2015). Os harmônicos podem ser prejudiciais de forma a causarem interferências em sistemas eletroeletrônicos. Um exemplo de como os sinais harmônicos compõem um sinal pode ser visto na Figura 23.

**Figura 23 – Sinal não-linear composto pela adição de componente fundamental e 3ª harmônica**



Fonte: (SANKARAN, 2002).

### 2.7.2 Distorção total harmônica

Distorções harmônicas são fenômenos associados a deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência

fundamental (ANEEL, 2021, p. 14). A métrica de distorção total harmônica (THD) é a razão entre a soma dos quadrados do valor RMS de todas as componentes senoidais de um sinal  $X_k$  com exceção da fundamental e o próprio valor RMS da componente fundamental (HART, 2011, p. 35), como pode ser visto na Equação 26.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} X_k^2}}{X_1} \quad (26)$$

Devido ao fato que instrumentos de medição possuem uma largura de banda finita, o número de componentes senoidais quadráticas somadas no numerador da THD será finito, em função da máxima frequência múltipla da fundamental dentro da largura de banda do sinal amostrado.

A THD pode ser calculada analogamente para tensão e corrente de uma carga, utilizando a mesma Equação 26.

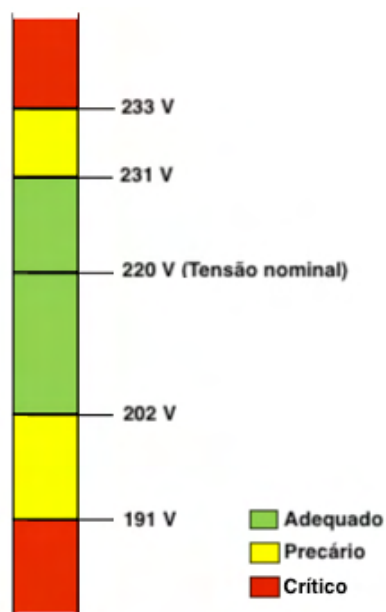
### 2.7.3 PRODIST - Módulo 8

O documento do Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) - Módulo 8: Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica, define os fenômenos relacionados à qualidade do serviço de distribuição e estabelece os procedimentos relativos à qualidade do fornecimento de energia elétrica (ANEEL, 2021).

O Módulo 8 do PRODIST também define os requisitos para os equipamentos medidores de energia elétrica utilizados na rede de distribuição, no entanto, o protótipo desenvolvido não se adequa nesta categoria, pois não tem como objetivo registrar continuamente a tensão da rede de distribuição, mas sim obter métricas de potência relacionadas a uma carga ou dispositivo conectado à uma tensão de teste, podendo esta ser a tensão da rede de distribuição.

#### 2.7.3.1 Tensão de atendimento

Um dos requisitos de distribuição mais importantes que o Módulo 8 do PRODIST estabelece é a tensão de atendimento. Esta tensão é a que o consumidor recebe em sua residência, comércio, ou indústria, portanto, todos seus equipamentos estão sujeitos à qualidade desta tensão. A tensão de atendimento deve estar de acordo com limiares estabelecidos em função da tensão de referência (nominal) estabelecida. Três faixas de utilização são propostas pelo PRODIST, sendo elas: adequada, precária e crítica, cada um com limiares em função da tensão de referência. A Figura 24 ilustra as faixas de classificação da tensão de atendimento para uma tensão nominal de 220 V.

**Figura 24 – Faixas de classificação da tensão atendimento com tensão de referência de 220 V**

Fonte: Adaptado de ANEEL (2021, p. 42).

Portanto, ao medir o valor de tensão RMS presente nos terminais de uma carga conectada à um ponto de distribuição de energia elétrica, pode-se observar se o valor encontra-se dentro da faixa adequada, assegurando a tensão de atendimento num limite adequado para uso na carga.

#### 2.7.3.2 Limite para distorções harmônicas totais

Segundo a ANEEL (2021, p. 15), o Módulo 8 do PRODIST estabelece que o máximo de distorção total harmônica na tensão de distribuição, para todas as harmônicas em análise, deve ser de no máximo 10,0 % da tensão fundamental.

#### 2.7.4 IEC 61000-3-2

A norma padrão internacional IEC61000-3-2 aplica limites em correntes harmônicas inseridas na rede elétrica por um equipamento eletrônico.

A IEC61000-3-2 é aplicável a equipamentos com correntes até  $16 A_{RMS}$  por fase e que sejam conectados à rede pública de distribuição de energia elétrica em baixa tensão operando com frequência de 50 Hz ou 60 Hz (EMC STANDARDS, 2022). Não obstante, a norma prescreve valores máximos para correntes harmônicas do 2º ao 40º harmônico, de acordo com a categoria definida para o equipamento em teste.

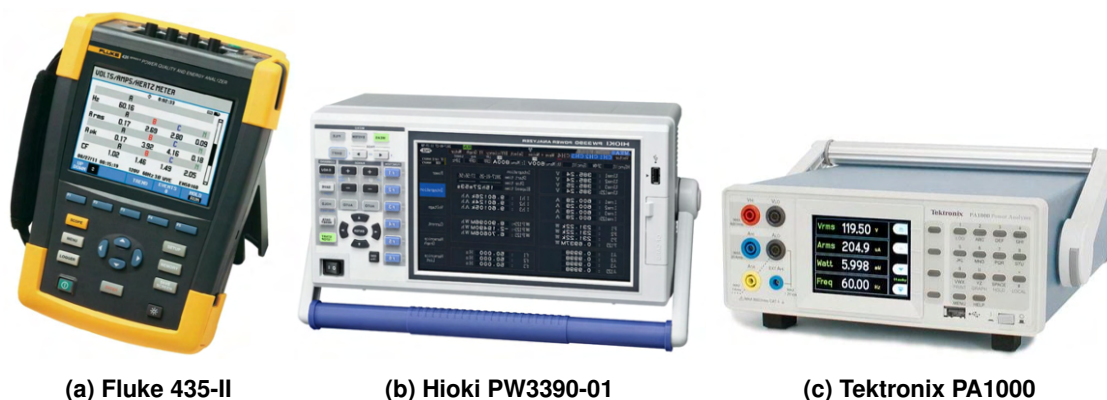
## 2.8 Analisadores de potência e qualidade de energia

Um característico sistema embarcado que utiliza os conceitos de instrumentação eletrônica descritos neste capítulo é o analisador de potência e qualidade de energia.

Analisadores de potência e qualidade de energia são equipamentos eletrônicos utilizados para medição de grandezas elétricas como: tensão, corrente, potência, energia e harmônicos de um equipamento ou carga em teste. Estes produtos possuem uma ou mais interfaces para visualização e armazenamento de dados, possibilitando o usuário ler os resultados em tempo real e armazenar as medidas solicitadas. Empresas como Fluke, Hioki e Tektronix comercializam estes equipamentos. Preços estimados podem ser vistos na Tabela 1.

A utilização de analisadores de potência e qualidade de energia é ampla, podendo ser usada para aferir o comportamento de cargas durante o desenvolvimento de produtos em setores de engenharia em empresas ou, por exemplo, validar limites de harmônicos em órgãos certificadores. A utilização destes em campo também é possível utilizando equipamentos alimentados à bateria, como o Fluke 435-II (FLUKE, 2022a). Na Figura 25 podem ser vistas fotos dos três analisadores de potência e qualidade de energia comparados.

**Figura 25 – Analisadores de potência e qualidade de energia**



Fonte: (NEWARK, 2022a; TESTEQUITY, 2022; ALLIED, 2022).

Buscando ter uma visualização dos recursos disponíveis, comparou-se os principais parâmetros especificados nas folhas de dados e obteve-se a Tabela 2 que pode ser vista a seguir:

**Tabela 2 – Comparação de analisadores de potência e qualidade de energia comerciais**

| <b>Modelo</b>        | <b>Fluke 435-II</b>   | <b>Hioki PW3390-01</b> | <b>Tektronix PA1000</b> |
|----------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------|
| Tensão máxima        | 1.000 $V_{RMS}$       | 1.500 $V_{RMS}$        | 600 $V_{RMS}$           |
| Corrente máxima      | 200 / 6.000 $A_{RMS}$ | 20.000 $A_{RMS}$       | 1 / 20 $A_{RMS}$        |
| Acurácia de tensão   | $\pm 0.1\%$           | $\pm 0.04\%$           | $\pm 0,04\%$            |
| Acurácia de corrente | $\pm 0.1\%$           | $\pm 0.04\%$           | $\pm 0,04\%$            |
| Harmônicos           | 50 <sup>º</sup>       | 100 <sup>º</sup>       | 50 <sup>º</sup>         |
| Largura de banda     | 10 kHz                | 200 kHz                | 1 MHz                   |
| Display              | LCD gráfico           | LCD gráfico            | LCD gráfico             |
| Alimentado à bateria | Sim                   | Não                    | Não                     |
| Interfaces           | USB                   | RS-232, LAN e USB      | GPIO, LAN e USB         |

O Tektronix PA1000 é o equipamento com menor custo entre os analisadores de potência e qualidade de energia analisados (Tabela 1) e é o único disponível no Departamento Acadêmico de Eletrônica (DAELN) do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC).

### 3 METODOLOGIA

Este trabalho descreve a realização de um protótipo para análise de potência e qualidade de energia, buscando uma solução de baixo custo que promova características semelhantes as observadas em soluções comerciais.

Para atingir este objetivo, uma pesquisa bibliográfica foi realizada sobre os temas de medição de grandezas elétricas, conversores analógico digitais, qualidade de energia, normas sobre qualidade de energia da rede de distribuição e normas sobre emissão de corrente harmônica em equipamentos eletrônicos.

Em seguida, realizou-se uma pesquisa aplicada sobre equipamentos analisadores de potência e qualidade de energia comerciais e soluções de hardware de baixo custo para medições de grandezas elétricas.

Confirmando-se a viabilidade para a realização de um protótipo de analisador de potência e qualidade de energia, as seguintes etapas foram realizadas:

- a) Projeto e simulação do hardware;
- b) Desenvolvimento de placa de circuito impresso;
- c) Desenvolvimento do firmware;
- d) Montagem do protótipo;

Por fim, uma sequência de testes foi implementada, com base na metodologia proposta por Webster e Eren (2014, p. 25-7), realizando a medição de valores ao longo da faixa de operação do protótipo desenvolvido e posteriormente a comparação dos resultados do mesmo experimento realizado com um equipamento referência, obtendo-se o erro absoluto entre as medidas.

## 4 PROJETO DE *HARDWARE*

O projeto de *hardware* consistiu no desenvolvimento de uma interface para utilização do *front-end* analógico para aquisição de sinais de tensão e corrente simultaneamente, além de uma interface para visualização e registro destes sinais.

Com base na pesquisa bibliográfica realizada na fundamentação teórica e na disponibilidade de componentes eletrônicos para a realização do projeto, elencou-se na Tabela 3, a especificação de funcionalidades previstas para o protótipo de analisador de potência e qualidade de energia.

**Tabela 3 – Especificação inicial do projeto de *hardware***

| <b>Especificação</b>             | <b>Valor</b>          |
|----------------------------------|-----------------------|
| Tensão de teste (CC e CA)        | até 240 $V_{RMS}$     |
| Corrente de teste (CC e CA)      | até 3,5 $A_{RMS}$     |
| Conversor analógico digital      | 24 bits (sigma-delta) |
| Largura de banda                 | 4 kHz                 |
| Harmônicos                       | até o 50º             |
| Display gráfico                  | Sim (LCD 3,2")        |
| Tensão de entrada do equipamento | 127/220 $V_{RMS}$     |

Fonte: Elaboração própria

Ao longo deste capítulo serão descritas as análises e decisões técnicas realizadas durante o desenvolvimento do projeto de *hardware* do protótipo.

### 4.1 Diagrama de blocos

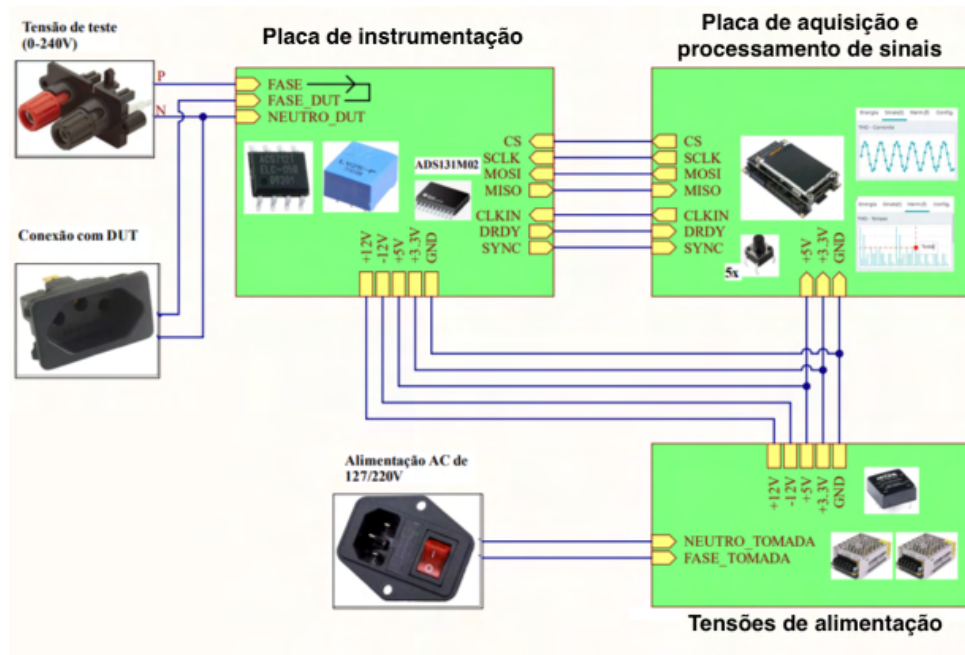
Buscando atender o tempo restrito de projeto, as especificações propostas e também possibilitar o uso do *front-end* analógico por qualquer dispositivo, optou-se por separar o *hardware* em três blocos:

- Placa de instrumentação: placa de circuito impresso contendo o *front-end* analógico, condicionamento de sinais, sensores de tensão e corrente e interface de comunicação para envio dos dados adquiridos;
- Placa de aquisição e processamento de sinais: placa de circuito impresso ou kit de desenvolvimento contendo um microcontrolador e uma interface de comunicação compatível com a disponibilizada pela placa de instrumentação;
- Fonte de alimentação: conversores CA-CC externos permitem a alimentação do *hardware* do protótipo pela rede de distribuição elétrica 127/220  $V_{RMS}$ . O circuito de conversão de tensões CC-CC faz parte da placa de instrumentação.

Esta escolha se assemelha a estratégia de fabricantes de circuitos integrados, como feito pela Texas Instruments (2022), que disponibiliza kits para avaliação de componentes contendo um circuito adequado para validação de requisitos funcionais, buscando reduzir o tempo de desenvolvimento do software embarcado e também do bloco de *hardware* de forma independente, durante o período em que o *hardware* completo para produção está em etapa de projeto ou validação.

Na totalidade, o *hardware* referente ao protótipo consiste em uma placa de instrumentação, que conectada a uma placa de aquisição e processamento de dados e uma fonte de alimentação, é capaz de realizar medições de sinais de tensão e corrente em um dispositivo em teste (DUT), este alimentado por uma tensão de teste isolada da tensão CA de entrada. O diagrama de blocos do *hardware* pode ser visto na Figura 26 a seguir:

Figura 26 – Diagrama de blocos do sistema



Fonte: Acervo do autor.

## 4.2 Placa de instrumentação

A placa de instrumentação promove uma interface de *hardware* capaz de medir tensão e corrente por meio de um circuito de condicionamento de sinal conectado à duas entradas de um conversor analógico-digital, de forma a possibilitar a leitura destes sinais por uma interface externa de aquisição de dados.

### 4.2.1 Conversor analógico-digital

Para a escolha do ADC, considerou-se como requisito: resolução de 24 bits, redução de aliasing, largura de banda maior que 4 kHz e amostragem simultânea de dois canais. Estas especificações permitem que não haja defasagem no processo de amostragem e que seja possível medir até o harmônico de ordem 66<sup>a</sup>, para sinais com frequência fundamental de 60 Hz.

#### 4.2.1.1 ADS131M02

O ADC escolhido foi o ADS131M02, da Texas Instruments, lançado em 2021. Este conversor possui 24 bits de resolução, com amostragem simultânea de dois canais, e permite frequências de amostragem de até 64 kHz. O ADS131M02 é adequado para aplicações de medição de energia e proteção de circuitos elétricos (TEXAS INSTRUMENTS, 2021, p. 1).

O ADS131M02 conta com entradas diferenciais, ou seja, para cada entrada, dois pinos independentes da referência, cujo nível de tensão resultante é a diferença da tensão da entrada positiva pela entrada negativa. Esta topologia é favorável à redução de ruído de modo comum, uma vez que este será removido com a operação de diferença entre duas entradas.

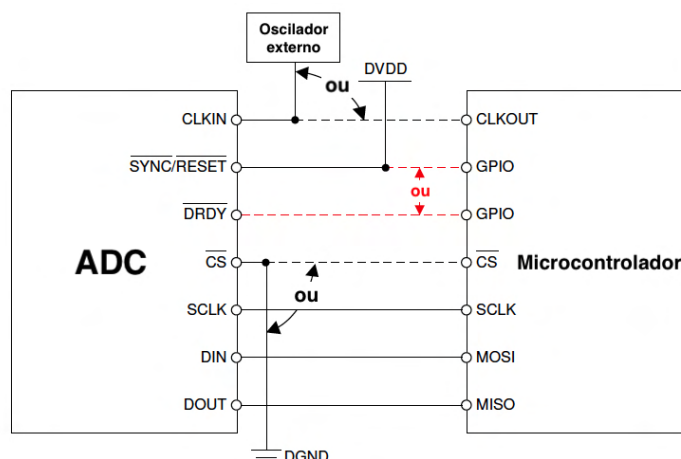
Os requisitos de *hardware* de alimentação do circuito digital interno (DVDD) e do circuito analógico interno (AVDD) para o pleno funcionamento do ADS131M02 são:

- a) Tensão DVDD: 2,7 V até 3,6 V;
- b) Tensão AVDD: 2,7 V até 3,6 V;

Por este motivo, um conversor CC-CC LM1117MPX-3.3 foi utilizado no projeto com o objetivo de converter 5 V para 3,3 V e alimentar o ADS131M02. Capacitores de 1  $\mu$ F C4 e C5 foram conectados em AVDD e DVDD de forma a reduzirem ruído na alimentação. Por fim, o capacitor de 220 nF C7 foi conectado ao pino CAP (Saída do LDO de 1,8 V interno), de forma a reduzir o ruído de alta frequência na saída do LDO interno.

O ADC ADS131M02 deve ter a seguinte topologia de conexões com a placa de aquisição e processamento de sinais:

Figura 27 – Conexões do ADC ADS131M02



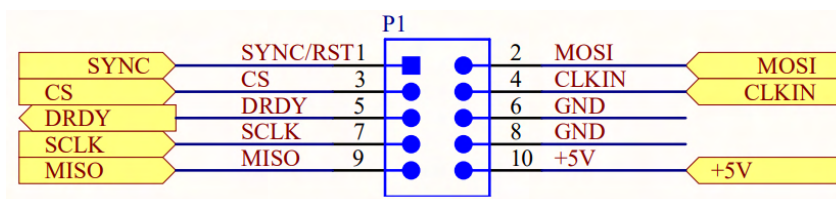
Fonte: Adaptado de Texas Instruments (2021, p. 66).

O clock do modulador sigma-delta é dado pelo sinal da entrada CLKIN, o projetista tem a opção de usar um oscilador com valores fixos em 2,048 MHz, 4,192 MHz ou 8,192 MHz ou prover um sinal pulsado via pino de IO. De forma a reduzir os custos e complexidade do projeto, foi conectado à interface externa da placa de instrumentação, que será ligada a um pino de saída do microcontrolador em CLKIN, onde será gerado um sinal pulsado de 8,192 MHz.

#### 4.2.1.1.1 Comunicação de dados

A única interface de comunicação do ADS131M02 é a SPI, uma interface serial. Em relação ao circuito SPI: os pinos CS, SCLK, DIN e DOUT são diretamente conectados à interface externa da placa de instrumentação, assim como o pino de SYNC/RESET, possibilitando um meio de comunicação com placa de aquisição e processamento de dados.

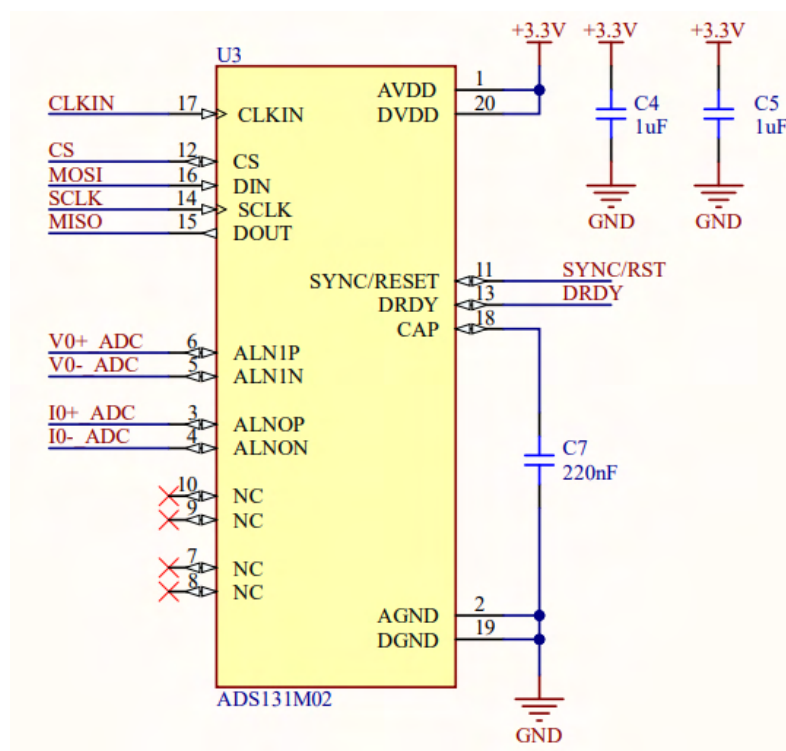
De forma a possibilitar a comunicação do *front-end* analógico a uma interface externa para aquisição de dados, projetou-se um conector (P1) com todas as conexões necessárias para uso do ADS131M02. A Figura 28 mostra o conector com todos os pinos da interface. Com exceção do pino extra de GND, o sistema utiliza todos os pinos disponíveis no conector P1.

**Figura 28 – Conector para comunicação com o *front-end* analógico**

Fonte: Acervo do autor.

#### 4.2.1.2 Diagrama esquemático

Uma vez dispoendo de todas as conexões, o diagrama esquemático das trihas conectadas ao ADS131M02 pode ser visto na Figura 29 a seguir:

**Figura 29 – Diagrama esquemático do circuito implementado para o ADC ADS131M02**

Fonte: Acervo do autor.

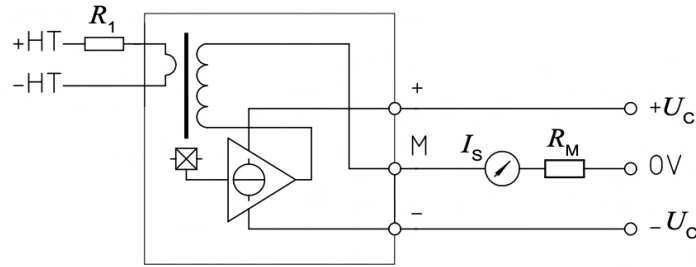
#### 4.2.2 Sensor de tensão

Para o sensoriamento de tensão, foram pesquisadas soluções com isolamento galvânico, capazes de medir sinais CC ou CA, e preferencialmente, disponíveis no IFSC. O sensor de tensão LV20-P cumpriu estes requisitos de forma a ser o componente escolhido para o projeto.

#### 4.2.2.1 LV20-P

O LV20-P é um sensor de tensão por efeito Hall, capaz de medir tensões de 10 V até 500 V, CC ou CA. Como poder ser visto na Figura 30, possui internamente um arranjo semelhante ao demonstrado na Figura 13, da seção 2.4.3 da fundamentação teórica sobre sensores de efeito Hall para medição de tensão.

**Figura 30 – Diagrama de conexões internas do sensor LV20-P**



Fonte: (LEM, 2021).

De forma a projetar  $R_1$  e  $R_M$  e o circuito de condicionamento de sinal para a entrada do ADC, considerou-se as informações dispostas em *datasheet*, para  $\pm U_C = \pm 12$  V (LEM, 2021):

- Relação de transformação da corrente do circuito primário para o secundário ( $T_r$ ): 2,5;
- Resistência do circuito primário ( $R_p$ ): 250  $\Omega$ ;
- Resistência do circuito secundário ( $R_s$ ): 110  $\Omega$ ;
- Corrente máxima no circuito primário ( $I_{p_{max}}$ ): 14 mA;
- Corrente máxima no circuito secundário ( $I_{s_{max}} = I_{p_{max}} \cdot T_r$ ): 35 mA.

Para uma especificação de tensão máxima  $HT = 240\sqrt{2} = 240 V_{RMS}$ , tem-se as Equações 27 e 28 a seguir para o cálculo dos resistores  $R_1$  e  $R_M$ , propondo que  $R_1$  seja 24 k $\Omega$  resultando em:

$$R_{p_{tot}} = R_p + R_1 = 24250 \Omega \quad (27)$$

$$I_p = \frac{HT}{R_{p_{tot}}} \approx 14 \text{ mA} \quad (28)$$

No entanto, para  $R_1 = 24 \text{ k}\Omega$  teria-se a Equação 29:

$$P_{R_1} = \frac{HT^2}{R_1} \approx 2,4 \text{ W} \quad (29)$$

Portanto, de forma a dividir e permitir o uso de resistores de menor potência, dividiu-se  $R_1$  em dois resistores de 12 k $\Omega$ , para até 2 W cada. Ficando aproximadamente 1,2 W dissipado em cada um dos resistores do circuito primário do sensor LV20-P.

Para o resistor do circuito secundário ( $R_M$ ), calculou-se em função da excursão desejada do sinal de saída.

$$R_M = \frac{V_{desejada}}{I_{smax}} = \frac{1,2}{0,035} = 34,28 \Omega \quad (30)$$

Devido a disponibilidade de componentes, utilizou-se  $R_M = 33 \Omega$ , valor disponível na tabela de resistores E24, com potência de dissipada de até 1/8 W. A potência  $P_{R_M}$  neste resistor pode ser calculada pela Equação 31 a seguir:

$$P_{R_M} = I_s^2 \cdot R_M \approx 40 mW \quad (31)$$

#### 4.2.2.2 Condicionamento do sinal

Buscando isolar a referência (GND) do circuito de entrada do ADC e para adequar a saída de tensão diferencial  $V_{R_M}$  do LV20-P aos níveis  $\pm 1,2$  V, utilizaram-se dois canais de um amplificador operacional, o primeiro configurado como atenuador inversor, de acordo com a Equação 32 a seguir:

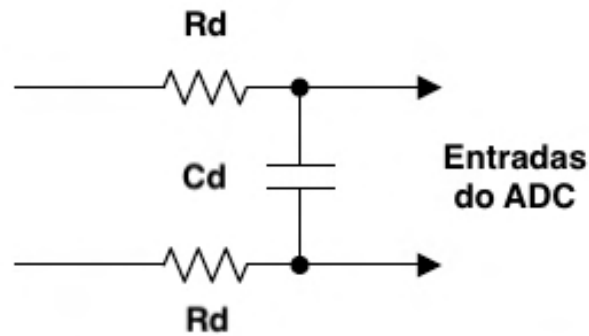
$$A_1 = -R_f/R_I = -10k/20k = -0,5 \quad (32)$$

O segundo canal foi utilizado como buffer inversor ( $A_2 = -1$ ). Portanto, os sinais de saída nos pinos 8 e 14 do amplificador operacional permitem um sinal diferencial de aproximadamente  $\pm 1,2$  V entre os pinos V0+\_ADC e V0\_-ADC, conectados à entrada do conversor analógico digital (Figura 32).

#### 4.2.2.3 Filtro anti-aliasing

O fabricante do ADC recomenda utilizar um filtro anti-aliasing diferencial de primeira ordem nas entradas, de acordo com a Figura 31. Pelo fato do ADC ser do tipo sigma-delta, com frequência de modulação na ordem de megahertz, tem-se que a banda de 4 kHz está em uma ordem de grandeza abaixo da frequência de Nyquist real do modulador, portanto, o decaimento de um filtro de primeira ordem torna-se suficiente para mitigar a maior parte do aliasing.

Figura 31 – Filtro anti-aliasing diferencial



Fonte: Adaptado de (TEXAS INSTRUMENTS, 2021, p. 65)

Segundo a Texas Instruments (2015b), a frequência de corte  $f_c$  para um filtro anti-aliasing diferencial é descrita pela Equação 33, portanto, para a especificação de largura de banda de 4 kHz e fixando  $C_d = 10 \text{ nF}$ , tem-se a Equação 34 para cálculo do resistor  $R_d$ .

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot 2 \cdot R_d \cdot C_d} = 4000 \text{ Hz} \quad (33)$$

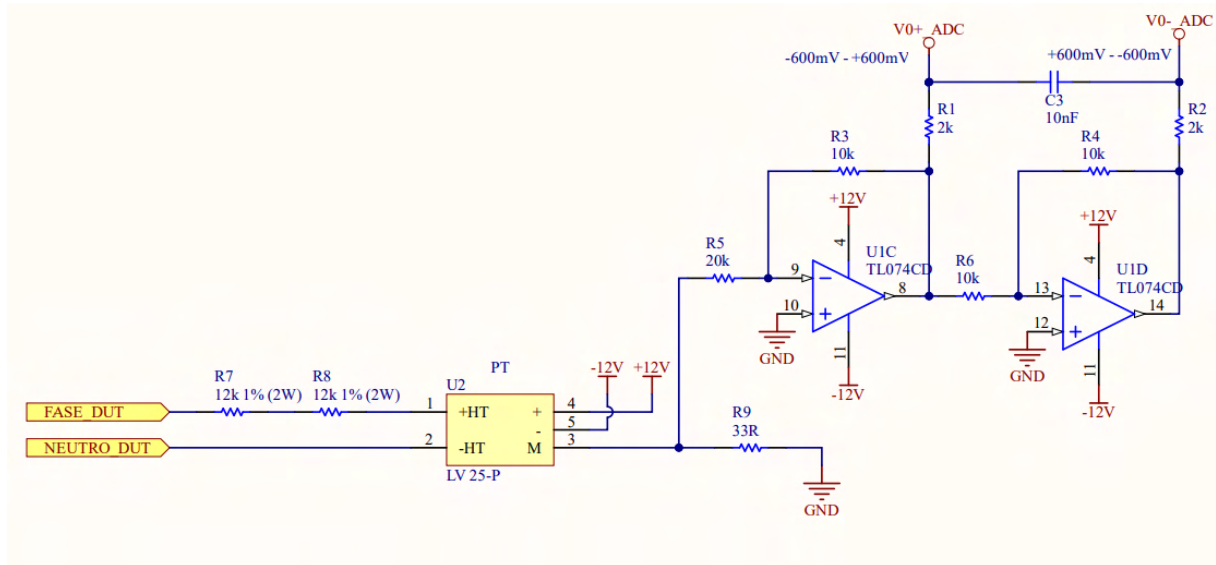
$$R_d = \frac{1}{2\pi \cdot 2 \cdot 4000 \cdot 10 \text{ n}} \approx 2000 \Omega \quad (34)$$

Portanto, o circuito de filtro anti-aliasing, com frequência de corte em 4 kHz, possui  $R_d = 2 \text{ k}\Omega$  e  $C_D = 10 \text{ nF}$ .

#### 4.2.2.4 Diagrama esquemático

Por fim, o diagrama esquemático proposto para o circuito medidor de tensão consta na Figura 32 a seguir:

Figura 32 – Diagrama esquemático do circuito do sensor de tensão



Fonte: Acervo do autor.

#### 4.2.2.5 Conversão de LSBs para volts

Para o cálculo do valor em volts da tensão medida em função do dado lido pelo conversor analógico-digital de 24-bits, que entrega contagens de LSB, usa-se a Equação 35 a seguir, que utiliza metade da excursão do ADC, pois  $V_{ADC}$  é obtido como complemento de dois, tendo parcela negativa.

$$V_{in} = \frac{ADC_{LSB} \cdot ADC_{range} \cdot range}{2^{23}} = \frac{ADC_{LSB} \cdot 1,2 \cdot 240\sqrt{2}}{2^{23}} \quad (35)$$

Buscando mitigar a interferência da faixa de erro de resistores sobre as medidas, aplicou-se um processo de calibração por referência, utilizando o Tektronix PA1000 como equipamento referência. Após a realização de duas medidas espaçadas pela faixa de leitura do sensor de tensão e posterior cálculo de acordo com a Equação 35, comparou-se com os resultados do equipamento referência e o coeficiente  $K_{calib} = 0.975$  foi proposto, multiplicando o valor de  $V_{in}$  e adequando as medidas de acordo com a referência. Este valor se deve as adequações à tabela E24 e ao erro dos resistores utilizados, que possuem 5% de erro.

#### 4.2.3 Sensor de corrente

Para o sensoriamento de corrente, foram pesquisadas soluções com isolamento galvânico e preferencialmente, disponíveis no IFSC. O sensor de corrente ACS712 cumpriu estes requisitos de forma a ser o componente escolhido para o projeto.

#### 4.2.3.1 ACS712

Existem três versões do ACS712, para as seguintes correntes de pico:  $\pm 5$  A,  $\pm 20$  A e  $\pm 30$  A, todas elas são compatíveis com o hardware da placa de instrumentação, no entanto, devido à disponibilidade do componente, somente a versão de capaz de medir correntes até  $\pm 5$  A (ACS712-5A) foi montada.

Os sensores da família ACS712 estão entrando em estado de obsolescência e não são mais recomendados para o novos designs. Para substituí-los, sem ônus ao projeto de hardware, pode-se usar a nova família ACS725, que é compatível pino a pino com o ACS712 e possui, além dos modelos de 5 A, 20 e 30 A, duas referências extras, para 10 A e 50 A de corrente (ALLEGRO MICROSYSTEMS, 2022a).

#### 4.2.3.2 Condicionamento do sinal

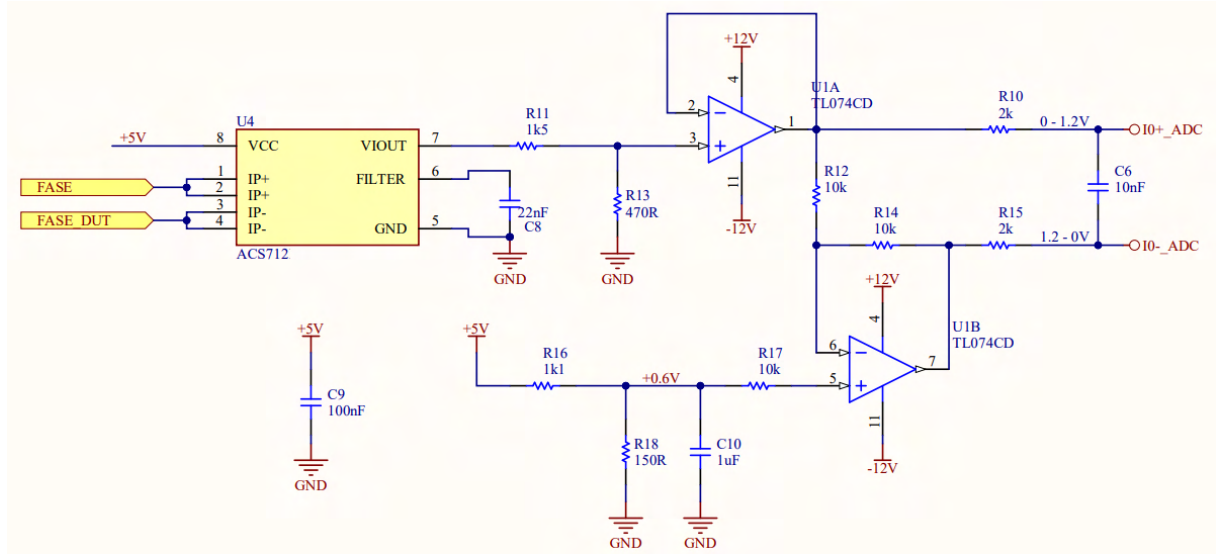
O circuito de condicionamento utilizou como base a topologia proposta pela Texas Instruments (2018), composto por dois amplificadores operacionais de um TL074CD e responsável por transformar um sinal de modo comum, com excursão de 0 a 5 V, centrado em 2,5 V, em um sinal diferencial, com  $\pm 1,2$  V de diferença entre os pinos. O circuito de condicionamento de sinal possui um divisor de tensão CC na entrada de um amplificador, promovendo um *offset* na saída do mesmo, que irá inverter o sinal recebido na entrada negativa, de forma a obter um sinal no pino 7 defasado  $180^\circ$  do pino 1 do TL074CD.

Por não haver disponibilidade de resistores de  $1k1 \Omega$  (Tabela E48), o resistor R16 foi substituído na montagem da placa por um resistor de  $1k \Omega$ . Essa mudança, somado aos erros referentes à faixa de erro de 5% dos outros resistores utilizados, impacta diretamente no offset e coeficiente linear de medição, e portanto, para obter um sinal coerente, um fator de calibração deve ser implementado via *firmware*.

#### 4.2.3.3 Diagrama esquemático

Por fim, o diagrama esquemático proposto para o circuito medidor de corrente consta na Figura 33. Cabe ressaltar que há um filtro anti-aliasing de primeira ordem, o mesmo utilizado no circuito do sensor de tensão, portanto, com frequência de corte de aproximadamente 4 kHz.

Figura 33 – Diagrama esquemático do circuito do sensor de corrente



Fonte: Acervo do autor.

#### 4.2.3.4 Conversão de LSBs para amperes

Por fim, para o cálculo da corrente de entrada, em miliamperes, em função do dado lido pelo conversor analógico-digital, pode-se usar as Equações 36 e 37 a seguir, para um conversor de 24 bits com tensão de referência em 1,2 V, considerando o sinal lido  $ADC_{LSB}$  como um inteiro de 32 bits sem sinal (*unsigned int*). O parâmetro de conversão  $conv$  é de 0,185 V / A para o ACS712-5A.

$$escala = \frac{2^{24}}{ADC_{range}} \cdot conv = \frac{2^{24}}{1,2} \cdot 0,185 = 3103784,96 \quad (36)$$

$$I_{in} = \frac{1}{escala} \cdot (ADC_{LSB} - 2^{23}) = \frac{1}{3103784,96} \cdot (ADC_{LSB} - 2^{23}) \quad (37)$$

O mesmo processo de calibração para tensão foi realizado para corrente, obtendo-se um coeficiente  $K_{calib} = 0.730$  e multiplicando o valor de  $I_{in}$  para se adequar as medidas de acordo com a referência. Este valor se deve principalmente ao resistor do divisor de tensão para o circuito somador ser de 1 k $\Omega$  ao invés de 1k1  $\Omega$ , como especificado, mudando a faixa de operação dos sinais diferenciais de corrente. Não obstante, as adequações à tabela E24 e ao erro dos resistores utilizados, que possuem 5% de erro. Não foi realizada calibração do offset do sensor, o que também pode ter causado os erros observados.

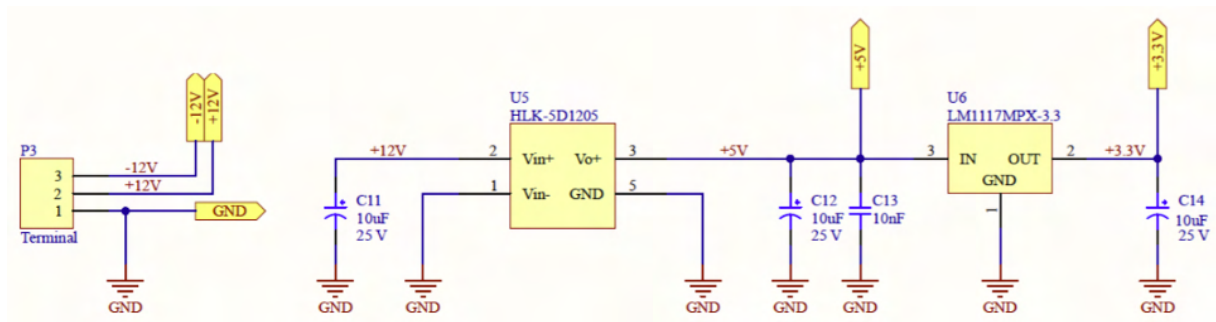
#### 4.2.4 Alimentação do circuito eletrônico

O projeto de hardware utiliza os seguintes níveis de tensão para alimentação dos circuitos:

- a) +12 V: Requisito para o sensor LV20-P;
- b) -12 V: Requisito para o sensor LV20-P;
- c) +5 V: Requisito para o sensor ACS712 e microcontrolador;
- d) +3,3 V: Requisito para o conversor analógico-digital ADS131M02.

As tensões de +12 V e -12 V são provenientes de duas fontes chaveadas externas, e as tensões de 5 V e 3,3 V são geradas pelo próprio circuito, utilizando a tensão de +12 V como entrada, como pode ser visto na Figura 34 a seguir:

**Figura 34 – Esquemático do circuito de alimentação**



Fonte: Acervo do autor.

##### 4.2.4.1 +12 V / -12 V

Para obter o circuito de alimentação simétrica, optou-se por utilizar duas fontes externas de 12 V, possibilitando obter +12 V e -12 V no circuito por meio da utilização de um arranjo de fontes em série, onde o ramo que compreende a conexão entre as duas fontes é a referência de tensão. O modelo utilizado é uma fonte chaveada tipo colmeia, com tensão de entrada na faixa de 100 - 240  $V_{AC}$  a 50 - 60 Hz, para até 2  $A_{RMS}$ . Cada fonte possui dimensões de 11 cm de comprimento, 7,8 cm de largura e 3,5 cm de altura.

As tensões de +12 V / -12 V são usadas no sensor de tensão LV20-P e no amplificador operacional TL074CD como alimentação simétrica.

##### 4.2.4.2 +5 V

O circuito de +5 V utiliza um conversor DC-DC abaixador para converter a tensão +12 V proveniente da fonte de alimentação externa. Optou-se por um conversor DC-DC monolítico, tornando o projeto mais simples. O conversor DC-DC utilizado é

o HLK-5D1205, capaz de converter sinais de tensão de 9 V a 18 V na entrada para 5 V na saída, fornecendo até 1 A de corrente na saída. Circuitos internos de referência garantem o nível de tensão da saída em 5 V com menos de 0,5 % de flutuação de tensão (HI-LINK, 2022).

A tensão de +5 V é utilizada pelo sensor de corrente ACS712 como alimentação. Esta tensão também foi disposta no conector de saída da placa de instrumentação, buscando alimentar um circuito microcontrolado para a aquisição de dados, que drene até 1 A de corrente.

#### 4.2.4.3 +3,3 V

A saída de tensão +3,3 V é entregue pelo circuito integrado LM1117MPX-3.3, um regulador linear de tensão (LDO) capaz de converter tensões de 1,4 V a 15 V na entrada em uma tensão de saída 3,3 V com até 800 mA de corrente de saída.

A tensão de +3,3 V é utilizada como alimentação do conversor analógico-digital ADS131M02.

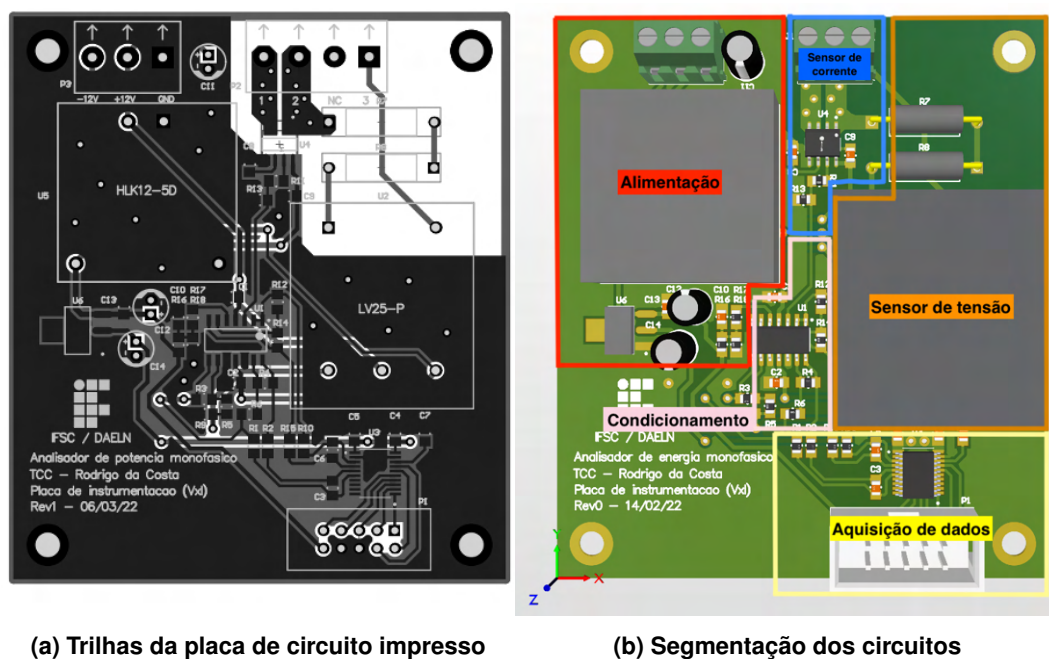
#### 4.2.5 Placa de circuito impresso

A placa de instrumentação, desenvolvida para conter os circuitos de sensoriamento de tensão e corrente, foi projetada como uma placa de circuito impresso de duas camadas de trilhas. O circuito foi segmentado em blocos de forma a isolar os sinais de potência dos sinais de medição e facilitar o roteamento. Os seguintes blocos foram elencados:

- a) Alimentação: entrada de tensão +12 V e -12 V e saídas +5 V e +3,3 V;
- b) Sensor de corrente: circuito referente ao sensor LV20-P;
- c) Sensor de tensão: circuito referente ao sensor ACS712;
- d) Condicionamento de sinal: conversão de sinais para a entrada do ADC;
- e) Aquisição de dados: comunicação com o ADC.

O resultado final do roteamento e da segmentação dos blocos de hardware podem ser vistos na Figura 35 a seguir:

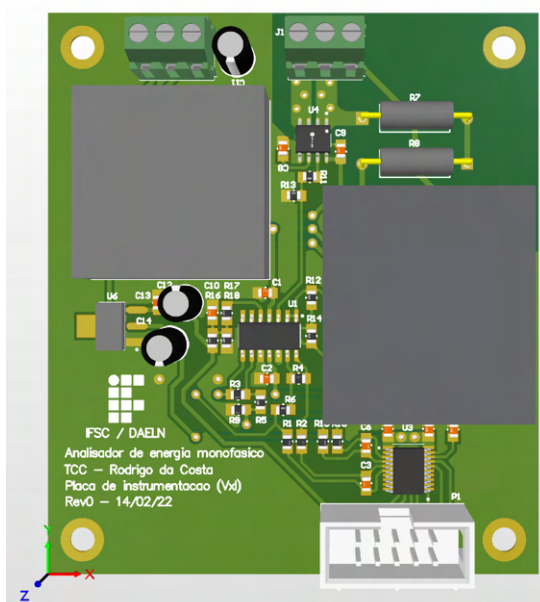
Figura 35 – Placa de instrumentação



Fonte: Acervo do autor.

O resultado final do projeto da placa de instrumentação pode ser visto na Figura 36 a seguir:

Figura 36 – Modelo 3D da placa de instrumentação



Fonte: Acervo do autor.

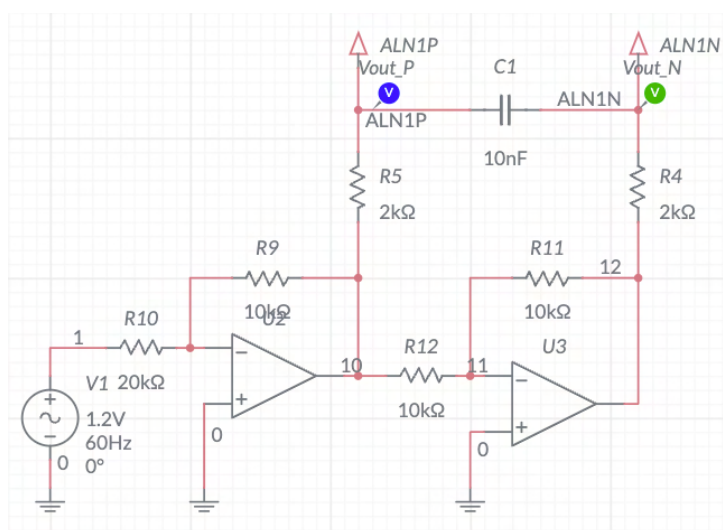
### 4.2.6 Simulações

Com o projeto de hardware definido, realizou a simulação com o software MultisimLive um ambiente de simulações usado pela indústria e ambientes de ensino para o projeto de circuitos eletrônicos. O MultisimLive possui uma versão gratuita, que permite criar esquemáticos e realizar simulações diretamente pelo navegador em circuitos com até 25 elementos e uma biblioteca contendo 125 componentes (NATIONAL INSTRUMENTS, 2022). Todos os circuitos criados na versão gratuita do MultisimLive são disponíveis publicamente.

#### 4.2.6.1 Circuito condicionador do sinal de tensão

O projeto do circuito condicionador do sinal de tensão, proveniente do sensor de efeito Hall LV20-P foi simulado no MultisimLive e pode ser visto na Figura 37. A saída do LV20-P foi representada como uma fonte senoidal de 60 Hz (V1), com valor médio zero e amplitude de 1,2 V, equivalente a um sinal senoidal de tensão de entrada com  $240\sqrt{2}$  V de amplitude, máximo valor RMS teórico projetado para a entrada do circuito de medição de tensão.

**Figura 37 – Simulação do circuito condicionador do sinal de tensão**



Fonte: Acervo do autor.

A Figura 38 a seguir mostra os resultados da simulação do circuito condicionador do sinal de tensão, onde pode ser visto a defasagem de  $180^\circ$  entre as duas saídas diferenciais ALN1P e ALN1P.

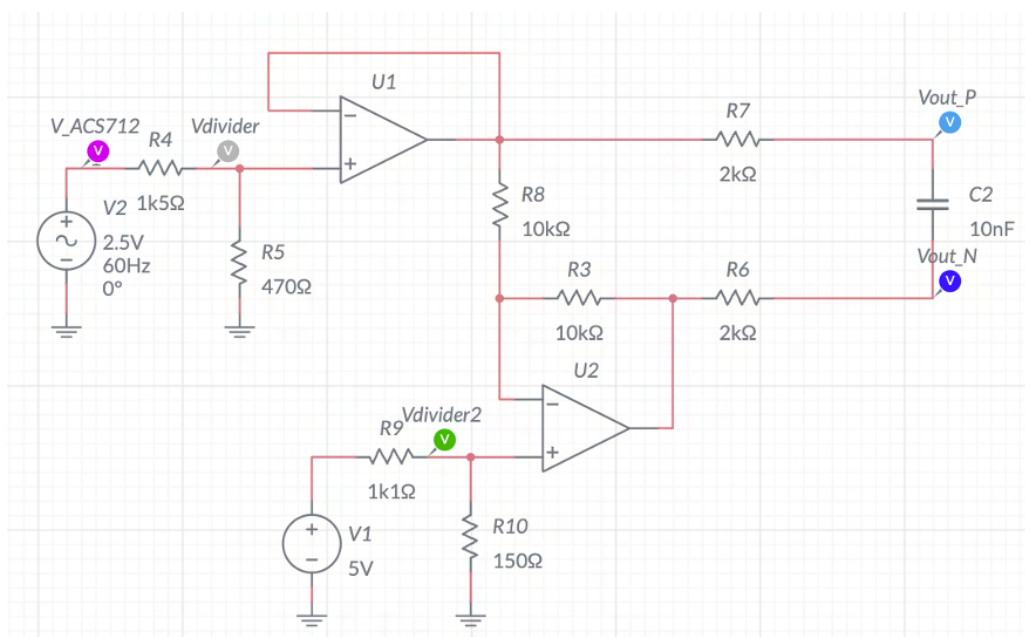
**Figura 38 – Resultados de simulação do circuito condicionador do sinal de tensão**

Fonte: Acervo do autor.

Nota-se que, como calculado anteriormente, a excursão do sinal diferencial fica de, no máximo 1,20 V, com as duas saídas ALN1P e ALN1N sendo sinais de mesma amplitude e defasagem de 180°. Sendo assim, de acordo com o especificado para as entradas diferenciais do conversor analógico-digital ADS131M02.

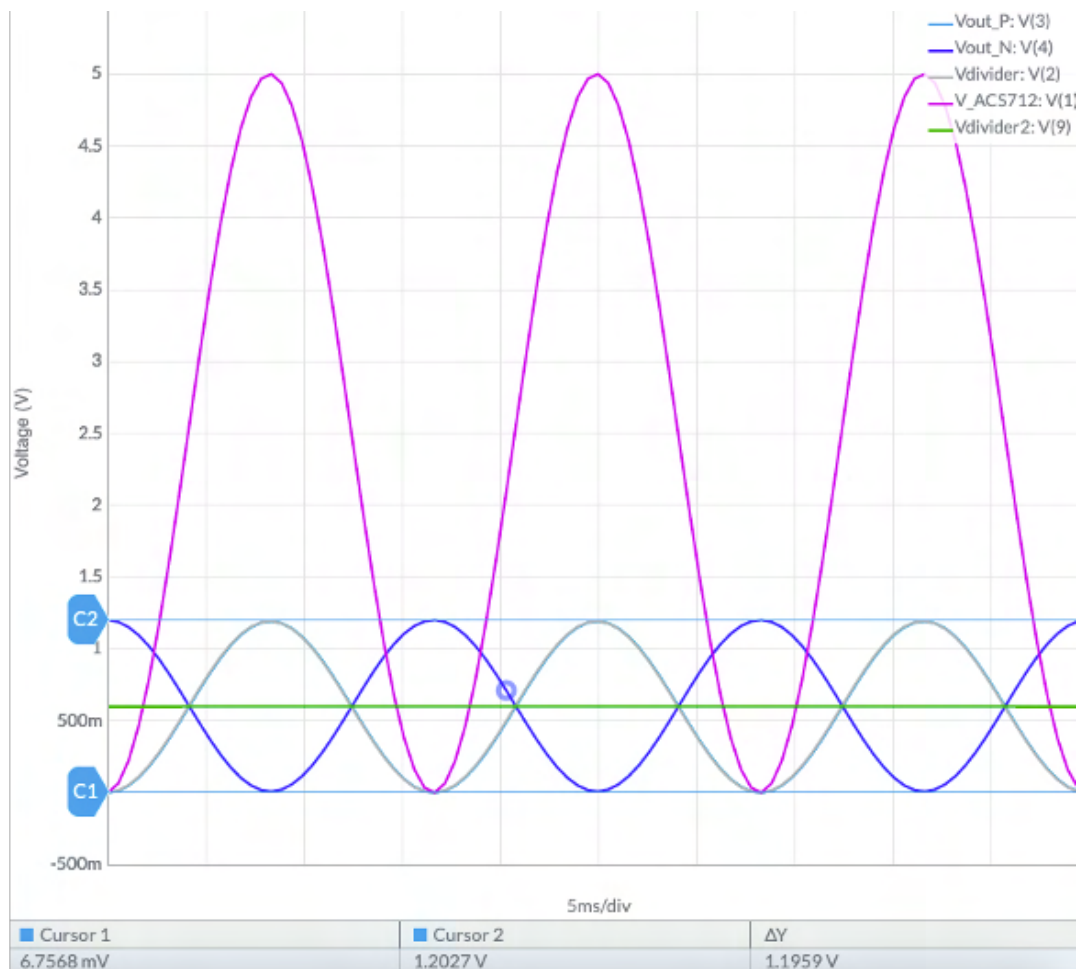
#### 4.2.6.2 Circuito condicionador do sinal de corrente

O projeto do circuito condicionado do sinal de corrente, proveniente do sensor de efeito Hall ACS712 foi simulado no MultisimLive e pode ser visto na Figura 39. O sinal de entrada (V2) foi simulado como um sinal de senoidal centrado em 2,5V e com amplitude de 2,5 V e frequência de 60 Hz, tendo excursão total de 0 V a 5 V. Esta faixa de valores é equivalente a um ACS712-5A excitado por uma corrente senoidal de -5 A até + 5 A.

**Figura 39 – Simulação do circuito condicionador do sinal de corrente**

Fonte: Acervo do autor.

A Figura 40 a seguir mostra os resultados da simulação do circuito condicionador do sinal de corrente, onde pode ser visto a atenuação do sinal de entrada em um sinal diferencial de menor amplitude.



**Figura 40 – Resultados de simulação do circuito condicionador do sinal de corrente**

Fonte: Acervo do autor.

Como calculado anteriormente, a transformação de um sinal de saída simples (V-ACS712) em um sinal diferencial foi realizada (Vout-P e Vout-N). A referência de tensão a ser usada pelo somador (Vdivider) está em 600 mV, e o sinal diferencial resultante tem amplitude máxima de aproximadamente 1,20 V, de acordo com o especificado e utilizando toda faixa dinâmica de leitura do conversor analógico-digital ADS131M02.

### 4.3 Placa de aquisição e processamento de sinais

O kit de desenvolvimento Kaluga-1 V1.3, centrado no módulo ESP32-S2-WROOM da fabricante Espressif, tornou-se a escolha para a placa de aquisição e processamento de sinais do projeto pois apresentou as seguintes especificações, adequadas para o protótipo proposto:

- Comunicação de dados SPI compatível com o ADC do projeto;
- Periférico dedicado para comunicação com displays LCD

- c) Microcontrolador com memória RAM suficiente para buffer do LCD e de dados de aquisição;
- d) Disponibilidade de bibliotecas para processamento digital de sinais;
- e) Conectividade sem-fio (Wi-Fi);
- f) Disponibilidade no acervo do autor.

O apêndice E conta com o diagrama esquemático do kit utilizado como placa de aquisição e processamento de sinais. O kit de desenvolvimento Kaluga-1 V1.3, pode ser visto na Figura 41 a seguir.

**Figura 41 – Kit de desenvolvimento Kaluga-1 V1.3**



Fonte: (MOUSER, 2022a)

#### 4.3.1 Microcontrolador ESP32-S2

O módulo ESP32-S2-WROOM, disponível no kit de desenvolvimento, possui o microcontrolador ESP32-S2, um SoC (*System on a Chip*), ideal para uso em aplicações da indústria IoT (MOUSER, 2020). O ESP32-S2 presente neste módulo conta com um processador XTensa LX7 de núcleo único, com frequência de clock de até 240 MHz, 320 kB de memória RAM e 4 MB de memória flash.

O microcontrolador também possui interface SPI, com possibilidade de utilizar *words* de qualquer número de bits até 32 bits, fazendo-o compatível com o ADC ADS131M02. Por fim, a quantidade de memória RAM disponível, o periférico para comunicação otimizada com displays LCD e os recursos de conectividade wireless via rede Wi-Fi tornam o ESP32-S2 adequado para gerenciar as funcionalidades de firmware no protótipo de analisador de potência e qualidade de energia.

#### 4.3.2 Interface homem-máquina

Neste projeto, buscando a permitir visualização dos dados de medição de forma semelhante ao Tektronix PA1000, utilizou-se um display LCD gráfico 3,2",

disponível no kit de desenvolvimento Kaluga-1 V1.3, pelo fato das conexões já estarem preparadas para uso do LCD, como pode ser visto na página 3 do Apêndice E. O display LCD utilizado no projeto é compatível com o controlador Sitronix ST7789V, suportado pela biblioteca LVGL, utilizada para controle do display gráfico.

Também tomando como exemplo o Tektronix PA1000, tem-se que botões são responsáveis por permitir que o usuário configure as métricas ativas e outros parâmetros de medição, por este motivo, cinco botões foram conectados à placa de aquisição e processamento de dados, buscando permitir a interação do usuário com o equipamento de teste. Uma placa universal contendo cinco botões foi utilizada para realizar estas conexões.

#### 4.3.3 Pinos e conexões

De forma a realizar a comunicação com a placa de instrumentação, os seguintes pinos

### 4.4 Análise de custos

A lista de materiais do projeto foi gerada com base nos componentes necessários para a montagem da placa de instrumentação e para a compra da placa de aquisição e processamento de dados. A partir da lista de materiais, gerou-se uma lista tabela simplificada contendo todos os itens, por categoria, mostrada a seguir na Tabela 4 com o custo estimado da lista de materias do projeto.

**Tabela 4 – Custo estimado da lista de materias do projeto <sup>(1)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(3)</sup>**

| Item                                        | Quantidade | Custo/un (R\$) | Custo (R\$)   |
|---------------------------------------------|------------|----------------|---------------|
| Placa de aquisição e processamento de dados | 1          | 245,60         | 245,60        |
| Sensor de tensão LV20-P                     | 1          | 249,54         | 249,54        |
| Sensor de corrente ACS712                   | 1          | 24,76          | 24,76         |
| Amplificador operacional TL074CD            | 1          | 16,42          | 16,42         |
| Conversor analógico-digital ADS131M02       | 1          | 16,93          | 16,93         |
| Regulador linear de tensão LM1117MPX-3.3    | 1          | 6,49           | 6,49          |
| Conectores                                  | 3          | 4,10           | 12,30         |
| Resistores                                  | 18         | 0,46           | 8,28          |
| Capacitores                                 | 14         | 0,62           | 8,68          |
| Conversor DC-DC HLK-5D1205                  | 1          | 77,94          | 77,94         |
| Fontes +12V / -12 V                         | 2          | 45,38          | 90,76         |
| <b>Custo estimado</b>                       |            |                | <b>757,70</b> |

<sup>(1)</sup> Data cotação utilizada: 24/08/2022 (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2022).

<sup>(2)</sup> Não foram contabilizados custos da produção e soldagem da placa de instrumentação.

<sup>(3)</sup> Valor unitário em função de cotação para 10 unidades.

Fonte: (MOUSER, 2022b; DIGIKEY, 2022; AMAZON, 2022; PROESI, 2022)

## 5 PROJETO DE SOFTWARE EMBARCADO

Para compreender os requisitos do projeto de firmware, primeiramente definiu-se um diagrama de estados do sistema e uma arquitetura de software baseada em camadas. O objetivo dessa abordagem é modularizar as funcionalidades e incentivar práticas de código reutilizável.

Os módulos e funções desenvolvidos neste projeto foram todos feitos em linguagem C.

### 5.1 Arquitetura

Para este projeto, levou-se em consideração as ferramentas disponíveis pelo fabricante do microcontrolador utilizado (ESP32-S2), chegando no seguinte diagrama disposto na Figura 42, onde evidenciou-se os recursos de *software* disponíveis pela SDK *esp-idf* e os módulos que deveriam ser desenvolvidos de forma a realizar o projeto de software embarcado do protótipo de analisador de potência e qualidade de energia.

**Figura 42 – Camadas propostas para o software embarcado**



Fonte: Elaboração própria.

Como visto na Figura 42, a SDK *esp-idf* disponibiliza um conjunto de módulos de *software* que permitem a interação com os recursos de *hardware*, visualização de dados em display gráfico (LVGL), e interfaces homem-máquina (IHM) com botões. Portanto, constatou-se a necessidade do desenvolvimento de *firmware* para a camada de aplicação, responsável pelos módulos para processamento digital de sinais e controle da interface gráfica, além do desenvolvimento de um *driver* para comunicação com o ADC ADS131M02.

### 5.1.1 Camada de aplicação

A aplicação roda um sistema operacional em tempo real FreeRTOS, com agendador a cada 1 ms, num esquema *round-robin*, onde duas tarefas de mesma prioridade dividem o único processador disponível no microcontrolador (ESP32-S2).

Nesta camada foram inseridos os módulos responsáveis por gerenciar a criação de tarefas e estados do sistema. O sistema é composto somente por entradas assíncronas, dependendo totalmente do usuário para, por exemplo: iniciar uma medição ou navegar em alguma tela. Foram criados três módulos na camada de aplicação:

- a) Gerenciador de IHM (*app\_hmi.c/.h*): Contém *callbacks* para eventos de pressionamento de botão;
- b) Gerenciador de interface visual (*app\_gui.c/.h*): Contém funções para atualização dos gráficos e métricas na tela;
- c) Processamento de sinais (*app\_dsp.c/.h*): Contém funções para DSP, como: remoção de média em vetor e aplicação de Transformada Rápida de Fourier (FFT) em vetor.

As tarefas criadas para o firmware são:

- a) Tarefa 1 - Sistema: esta tarefa é responsável pelo gerenciamento dos estados do sistema, que podem ser alterados de acordo com variáveis atribuídas por *callbacks* que ocorrem em eventos de presionamento de botão;
- b) Tarefa 2 - Display gráfico: Esta tarefa é responsável pelo controle das telas no display gráfico, a taxa de atualização dos dados na depende desta tarefa.

### 5.1.2 Camada de drivers

Na camada de drivers foram dispostos os módulos referentes à interface com circuitos integrados externos ao microcontrolador. No caso deste projeto, apenas um módulo de *driver* foi desenvolvido, o módulo para interface com o ADC ADS131M02. Outros dois módulos foram utilizados: LVGL e *esp-button*, mas fazem parte da *esp-idf*.

- a) Driver ADS131M02 (*drv\_ads131m0x.c/.h*): Contém funções de inicialização, geração de sinal pulsado CLKIN, leitura de canais e leitura/escrita de registradores;

### 5.1.3 Camada de abstração de hardware

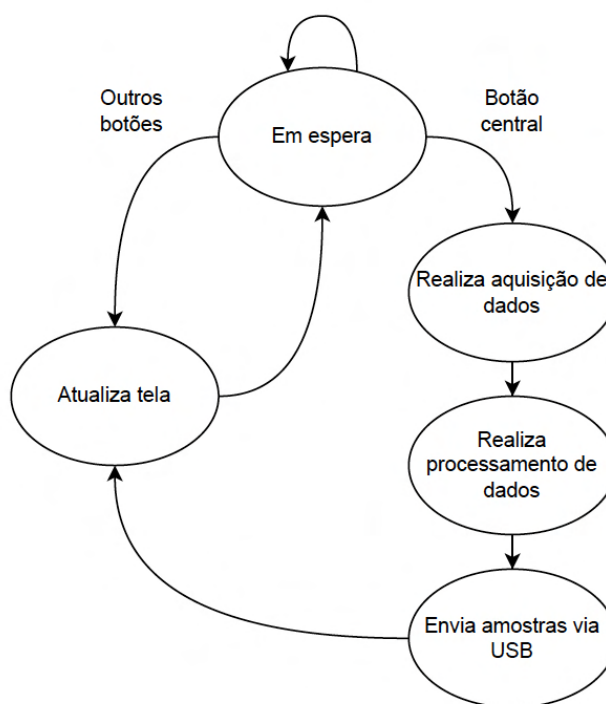
No firmware desenvolvido utilizou-se diretamente a camada de abstração de hardware (HAL) *esp-idf*, disponibilizada pelo fabricante. Caso o projeto tivesse

como requisito ser compatível com duas famílias distintas de microcontroladores, seria implementada uma camada HAL adicional, permitindo isolar trechos e definições de código específicas para um *hardware*, como por exemplo: suporte a diferentes periféricos e endereços de registradores.

#### 5.1.4 Diagrama de estados

O sistema desenvolvido é baseado em eventos causados pelo pressionamento de cinco botões presentes na interface-homem máquina do protótipo, que permite a execução da aquisição dos sinais e a visualização dos dados. O diagrama simplificado de estados do sistema pode ser visto na Figura 43 a seguir:

Figura 43 – Diagrama de estados do sistema



Fonte: Autoria própria.

## 5.2 Espressif IoT Development Framework (*esp-idf*)

Para este projeto, utilizou-se a SDK *esp-idf*, feita majoritariamente em linguagem C, que contém ferramentas para o desenvolvimento de sistemas software embarcado utilizando microcontroladores da família ESP32 e é disponibilizada pela própria fabricante Espressif. A *esp-idf* contém um módulo com funções otimizadas para uso em processamento digital de sinais, chamado de *esp-dsp*, utilizado neste projeto.

Não obstante, este projeto também contou com o uso de bibliotecas de código aberto desenvolvidas por terceiros e adaptadas pela Espressif para a *esp-idf*,

como a biblioteca LVGL, responsável pela interface com o display gráfico.

### 5.2.1 esp-dsp

A *esp-dsp* é uma biblioteca para processamento digital de sinais (DSP), disponibilizada como um componente da *esp-idf*. O código disponibilizado pelo fabricante contém otimizações feitas em assembly, por meio da utilização de recursos de *hardware* da Unidade de Ponto Flutuante (FPU) (ESPRESSIF, 2022).

A *esp-dsp* se adequa para uso neste projeto devido à capacidade de realizar operações com instruções otimizadas para matemática com vetores e pelas funções para FFT, possibilitando a análise de harmônicos.

### 5.2.2 LVGL

A *Light and Versatile Graphics Library* (LVGL) é uma biblioteca de código aberto, capaz de implementar o controle de elementos visuais em displays gráficos para sistemas embarcados. A LVGL possui mais de 30 tipos de *gadgets* para visualização de dados e uma IDE para geração de código-fonte e simulação do uso das interfaces gráficas.

**Figura 44 – Exemplos de kits de desenvolvimento com aplicações LVGL**



Fonte: (LVGL, 2022).

Uma das maiores vantagens da LVGL é sua estrutura multiplataforma, que permite com a mudança de poucos arquivos, mudar o microcontrolador responsável pelo controle do display gráfico, mantendo os módulos de código que gerenciam a aplicação gráfica.

A LVGL é escrita completamente em C, visando compatibilidade com arquiteturas que não possuam compiladores para C++ e foi projetada para utilizar o mínimo de recursos de *hardware*, sendo um mínimo de 32 kB de RAM e 128 kB de memória não-volátil para rodar uma aplicação LVGL, sendo assim adequada para uso no microcontrolador ESP32-S2.

Por fim, um *port* da biblioteca LVGL na versão v7.9, chamado *lv\_port\_esp32*, foi desenvolvido pela Espressif e é compatível com os microcontroladores ESP32 e ESP32-S2. Esta biblioteca e versão foram utilizadas no projeto da interface gráfica em display LCD 3,2" com 320x240 pixels de resolução, portanto, para pixels com 16 bits relativos à cor, tem-se aproximadamente 150 kB para armazenamento do *buffer* da tela, utilizando cerca da metade da memória RAM disponível no ESP32-S2.

### 5.3 Interface homem-máquina

O protótipo desenvolvido possui uma interface gráfica em LVGL, dividida em quatro abas laterais.

- a) Métricas
- b) Sinais no tempo
- c) Harmônicos
- d) Configurações

As abas ficam disponíveis na parte superior da tela e a navegação é realizada por meio de cinco botões.

#### 5.3.1 Botões

Com o objetivo de possibilitar a navegação nas telas, cinco botões foram adicionados ao projeto. Os botões utilizam um componente da *esp-idf*, chamado *button*, que permite a utilização de recursos como: configuração de clique simples e/ou clique duplo, tempo de resposta e associação de um botão a um pino de entrada do microcontrolador.

As funções de cada botão são:

- a) Botão superior: clique simples - navega verticalmente para cima;
- b) Botão inferior: clique simples - navega verticalmente para baixo;
- c) Botão lateral direito: clique simples - navega entre abas;
- d) Botão lateral esquerdo: clique simples - navega entre abas;
- e) Botão central: clique simples - inicializa medição; clique duplo - esconde abas;

### 5.3.2 Telas

As abas são elementos da LVGL e são totalmente independentes, podendo ter mais ou menos recursos visuais que outras abas. A aba de configuração está presente no projeto e pode ser acessada, porém, não possui nenhum elemento gráfico e nem realiza nenhuma função, tornando apenas três abas úteis atualmente no projeto.

As outras três telas: métricas, sinais no tempo e sinais harmônicos, possuem interface definida. Na Figura 45 abaixo, são observadas as três abas disponíveis para uso.

**Figura 45 – Interface visual do protótipo**



Fonte: Acervo do autor.

A tela de métricas mostra todas as medidas calculadas pelo protótipo, sendo elas: valor RMS da tensão (V), valor RMS da corrente (mA), potência aparente (VA) e frequência (Hz).

A tela de sinais no tempo mostra efetivamente os sinais de tensão e corrente adquiridos com uma quantidade limitada de amostras. Sinais de tensão e corrente não estão sobrepostos no mesmo gráfico, e como a tela possui um tamanho limitado, acomodando somente um gráfico por vez, o usuário deve utilizar os botões para cima/baixo para deslocar a tela e visualizar o outro gráfico desejado.

A tela de harmônicos mostra os sinais de tensão e corrente no domínio da frequência, após a FFT realizada pelo módulo de DSP. A implementação da tela de harmônicos mostra todo espectro de frequências, e não somente os harmônicos, como usualmente são apresentados. Este recurso não foi concluído devido ao tempo limitado ao desenvolvimento do projeto.

Não foram implementados recursos para configuração da escala em nenhum dos eixos dos gráficos disponíveis nas telas de sinais no tempo e harmônicos, resultando em escalas de visualização fixas.

## 5.4 Driver ADS131M02

Em muitos casos, não há iniciativas de código-fonte aberto que compreendem a utilização de um circuito integrado ou módulo específico. Este caso é verdade para o conversor analógico-digital ADS131M02, por ser um componente de aplicação específica e lançado há menos de 2 anos.

Buscando a compatibilidade com esse ADC, um novo módulo para comunicação com este dispositivo (driver) foi desenvolvido, possibilitando a aquisição de dados de tensão e corrente pelo microcontrolador.

### 5.4.1 GPIOs utilizados

Buscando garantir o funcionamento do ADC de acordo com as conexões feitas no *hardware*, as seguintes configurações dos pinos de uso geral (GPIO) foram realizadas.

- a) DRDY: Entrada pull-up, GPIO19, pino 42 do conector J2;
- b) CLKIN: Saída push-pull, GPIO20, pino 40 do conector J2;
- c) SYNC/RESET: Saída push-pull, GPIO21, pino 38 do conector J2;
- d) CS: Saída push-pull, GPIO26, pino 36 do conector J2;
- e) DOUT: Saída push-pull, GPIO33, pino 34 do conector J2;
- f) SCLK: Saída push-pull, GPIO34, pino 32 do conector J2;
- g) DIN: Entrada pull-up, GPIO35, pino 30 do conector J2.

Estes pinos podem ser vistos no Apêndice E, dispostos no conector *header* J2. Estas configurações fazem parte de uma função de inicialização do módulo de driver do ADC ADS131M02.

### 5.4.2 Comunicação SPI

Após a implementação do driver para comunicação com o ADC, realizaram-se testes com o analisador lógico buscando garantir a comunicação SPI de acordo com a especificação. Utilizando um analisador lógico e o software PulseView, obtiveram-se frames SPI do comando NULL, utilizado para leitura do valor do registrador STATUS, seguido de dois canais de 24-bits e um CRC 16-bit, totalizando quatro *words*.

Esta transferência SPI acontece para cada pulso de DRDY, pino que indica fim de conversão. A maior frequência de amostragem que foi possível adquirir via firmware foi com DRDY em 2 kHz. Em 4 kHz, próxima frequência de amostragem disponível pelo ADS131M02, ocorrem perdas de amostra devido ao fato do tempo para completar uma transferência de frame SPI é maior que o período de amostragem.

Portanto, não foi possível atingir o requisito de 8 kHz de amostragem (largura de banda de 4 kHz, possibilitando análise até a 50ª harmônica), devido à impossibilidade do firmware em atingir este requisito de tempo real crítico.+

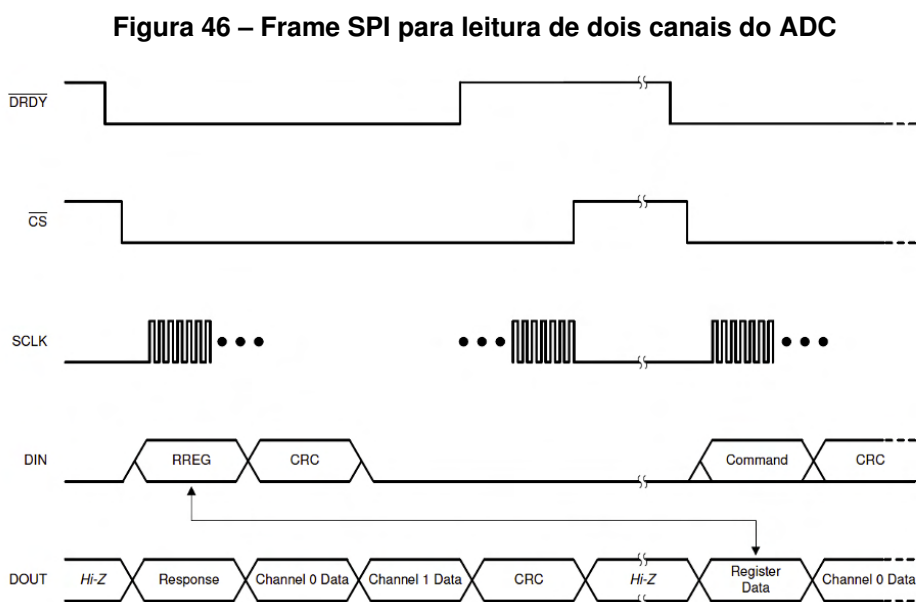
O fluxo de leitura ficou de acordo com o seguinte procedimento:

- a) Configura pinos do ADC;
- b) Dispositivo principal inicia a saída pulsada CLKIN em 8,192 MHz;
- c) Aguarda pressionamento do botão central;
- d) Pulsa pino de RESET;
- e) Dispositivo principal envia comando NULL via SPI para N amostras, aguardando pulso de DRDY para o envio seguinte;
- f) Dispositivo principal lê e armazena em RAM quatro *words* de 24 bits: STATUS, REG0, REG1 e CRC para cada pulso de DRDY.

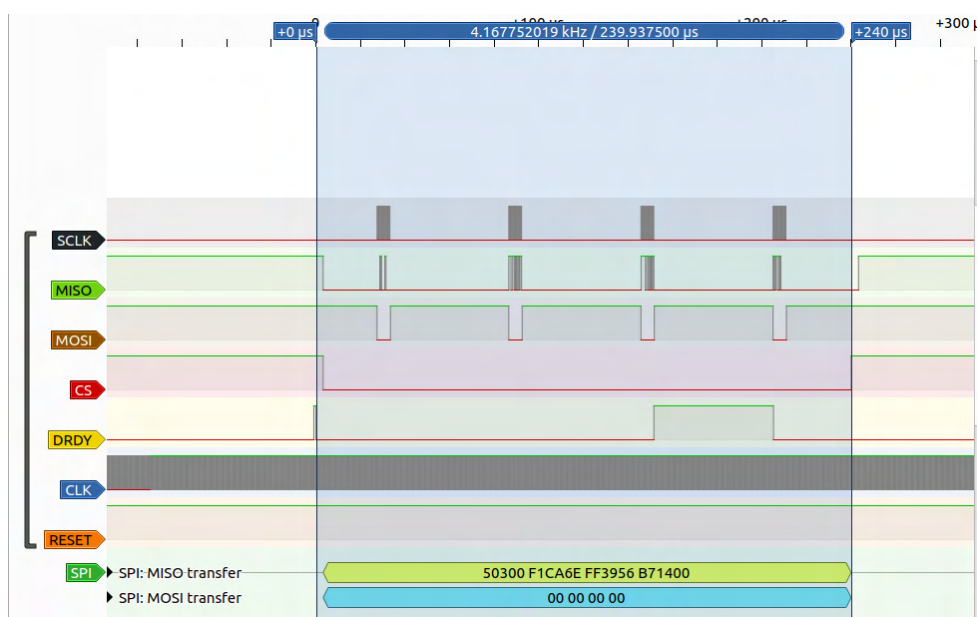
#### 5.4.2.1 Leitura de dois canais (Comando NULL)

O comando SPI NULL é usado para monitorar o estado do dispositivo, e seu caso de uso principal é a aquisição de dados do ADC continuamente.

Na Figura 46, tem-se um exemplo de Frame SPI esperado para o comando NULL e na Figura 47 a implementação prática deste comando numa transação SPI entre ESP32-S2 e ADS131M02.



Fonte: (TEXAS INSTRUMENTS, 2021)

**Figura 47 – Frame SPI para leitura de dois canais do ADC obtidos via analisador lógico**

Fonte: Acervo do autor

#### 5.4.2.2 Buffer de leitura

O buffer de leitura utilizado para armazenamento dos dados adquiridos, em memória RAM, é composto de um vetor de 2048 estruturas, cada estrutura sendo referente a uma amostra, e possuindo uma variável *uint32\_t* para cada *word* lida durante a transferência SPI. Este buffer, para 2048 amostras, totaliza 32 kB de memória RAM estaticamente alocada.

## 6 RESULTADOS

Neste capítulo serão demonstrados os resultados obtidos neste trabalho. Na primeira parte desta seção serão demonstrados os resultados do protótipo de analisador de energia desenvolvido, contendo o circuito montado em placa de circuito impresso, em seguida, gráficos e tabelas serão apresentados comparando o protótipo desenvolvido com o analisador de potência Tektronix PA1000.

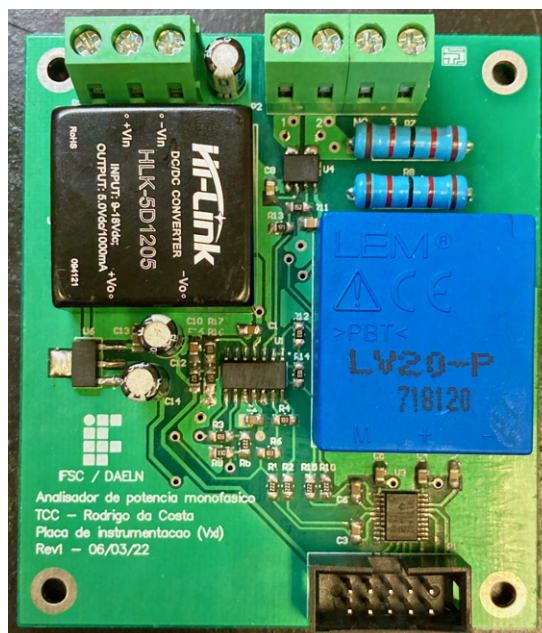
### 6.1 Protótipo desenvolvido

Ao final do trabalho, obteve-se um protótipo de analisador potência e qualidade de energia monofásico, que utiliza um conversor analógico-digital com 24-bits de resolução e dois canais de amostragem simultânea (ADS131M02), sensor de corrente elétrica CC-CA por efeito Hall (ACS712) e sensor de tensão elétrica CC-CA por efeito Hall (LV20-P), junto a um microcontrolador ESP32-S2, responsável pela aquisição e processamento digital dos sinais para posterior visualização em *display* gráfico de 3,2 polegadas.

#### 6.1.1 Hardware

Como resultado final obteve-se uma placa de circuito impresso do *front-end* analógico, com todos os componentes montados, que pode ser vista na Figura 48 abaixo:

**Figura 48 – Placa de instrumentação montada**



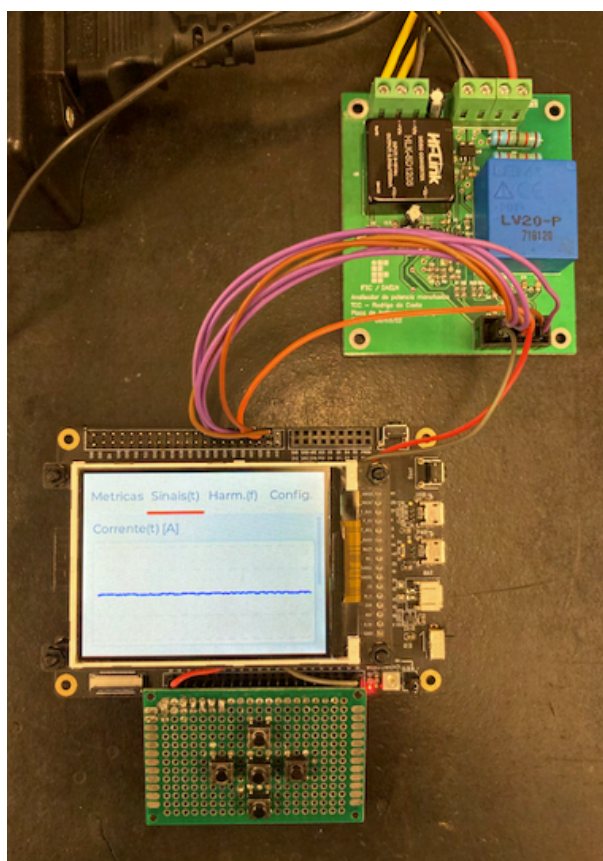
Fonte: Acervo do autor.

Esta placa permite a leitura de tensão e corrente em teste, que são medidas ao conectar a tensão e o dispositivo em teste nos conectores na parte superior da placa. A comunicação de dados deve ser feita via conector *header* 5x2 localizado na parte inferior da placa.

Apenas uma amostra da placa de instrumentação foi montada e testada. O sensor de corrente utilizado é o ACS712-5A, porém, pode ser substituído por outras referências de maior excursão de corrente: ACS712-20A ou ACS712-30A, pois são compatíveis pino a pino. No entanto, o *firmware* deveria ter o coeficiente de conversão modificado, de acordo com a referência escolhida.

Para a utilização do protótipo, a placa de aquisição de dados foi conectada à placa de instrumentação, como pode ser visto na Figura 49 abaixo:

**Figura 49 – Protótipo completo - placa de instrumentação e placa de aquisição de dados**



Fonte: Acervo do autor.

### 6.1.2 Software embarcado

O software embarcado se mostrou capaz de realizar a aquisição de sinais de tensão e corrente da placa de instrumentação. Cinco botões foram utilizados para interação com o protótipo.

O sistema mostrou-se capaz de adquirir sinais de tensão e corrente amos-

trados simultaneamente pelo ADC, com ( $f_s = 2$  kHz) e 2048 amostras, registrá-los na memória e posteriormente aplicar rotinas de processamento digital de sinais, possibilitando realizar diretamente no sistema embarcado as medições de: valores RMS de tensão e corrente, frequência da tensão e potência aparente.

O firmware é capaz de converter o valor entregue em contagens de LSB pelo ADC em unidades do SI. Adicionalmente, para calibração dos sensores, utilizou-se um fator de calibração definido em pré-compilação, para tensão e corrente, que é aplicado junto a equação de conversão de LSB para grandeza elétrica.

Não obstante, o sistema permite o envio dos dados brutos de tensão e corrente, por meio de pacotes seriais enviados pela interface USB.

Não foi possível realizar amostragens com  $f_s = 8$  kHz como a especificação inicial sugeriu, pois, o firmware não foi capaz de realizar leitura do frame SPI completo num período menor que  $T_s = 1/f_{sk}$ .

O módulo DSP se mostrou capaz de realizar FFT dos sinais de tensão e corrente ( $N_{bins} = N_{samples} = 2048$ ) e gerar um vetor de magnitudes, para em sequência buscar o índice com valor máximo e estimar a frequência da fundamental do sinal medido.

Por fim, tem-se pendente a implementação em tempo de execução das seguintes métricas: THD, fator de potência, potência ativa e potência reativa. A métrica de THD poderia ser implementada, porém, devido ao tempo limitado de projeto, deu-se prioridade à outras tarefas.

As outras métricas referentes à potência, todas dependem do fator de potência, e para esta métrica não foi possível implementar um algoritmo robusto para detecção de passagens por zero de um sinal. Uma solução proposta para trabalhos futuros, visando diminuir a complexidade do firmware e aumentar a precisão desta métrica, seria a implementação de um circuito analógico externo ao ADC, para detecção de passagens por zero.

## 6.2 Comparação dos equipamentos

Na Tabela 5 a seguir, é feita uma comparação entre os recursos de hardware e software disponíveis no Tektronix PA1000 e no protótipo desenvolvido.

Tabela 5 – Comparativo de recursos - Tektronix PA1000 x Protótipo proposto

|                            | Tektronix PA1000     | Protótipo proposto |
|----------------------------|----------------------|--------------------|
| Tensão máxima              | 600 $V_{RMS}$        | 240 $V_{RMS}$      |
| Corrente máxima            | 20 $A_{RMS}$         | 3,5 $A_{RMS}$      |
| potência ativa máxima      | 12.000 W             | 840 W              |
| Largura de banda           | 1 MHz                | 1 kHz              |
| Número de harmônicas       | 50 <sup>a</sup>      | 15 <sup>a</sup>    |
| Acurácia                   | ±0,04%               | ±2,6% <sup>1</sup> |
| Display gráfico            | Sim                  | Sim                |
| Interface de comunicação   | GPIO, Ethernet, USB  | USB                |
| Software                   | Sim                  | Não                |
| Análise de harmônicos      | IEC/EN 61000-3-2/4-7 | Não                |
| Análise de <i>stand-by</i> | IEC 62301/EN 50564   | Não                |
| Custo estimado             | R\$ 19.406,52        | R\$ 757,70         |

(<sup>1</sup>) Acurácia do sensor de corrente na faixa de operação até 5 A (±1,5%) somada à acurácia do sensor de tensão (±1,1%).

Fonte: Elaboração própria

### 6.3 Comparação com multímetros True RMS

A primeira validação das métricas de valor RMS e potência aparente foi realizada com dois multímetros Fluke 115 True RMS, um configurado como amperímetro e outro como voltímetro, medindo a tensão de atendimento disponível no IFSC aplicada a uma carga resistiva, utilizando o reostato ELETELE N125 configurado em 103,2  $\Omega$ . A Tabela 6 a seguir mostra os resultados das medições em ambos os multímetros e do protótipo proposto.

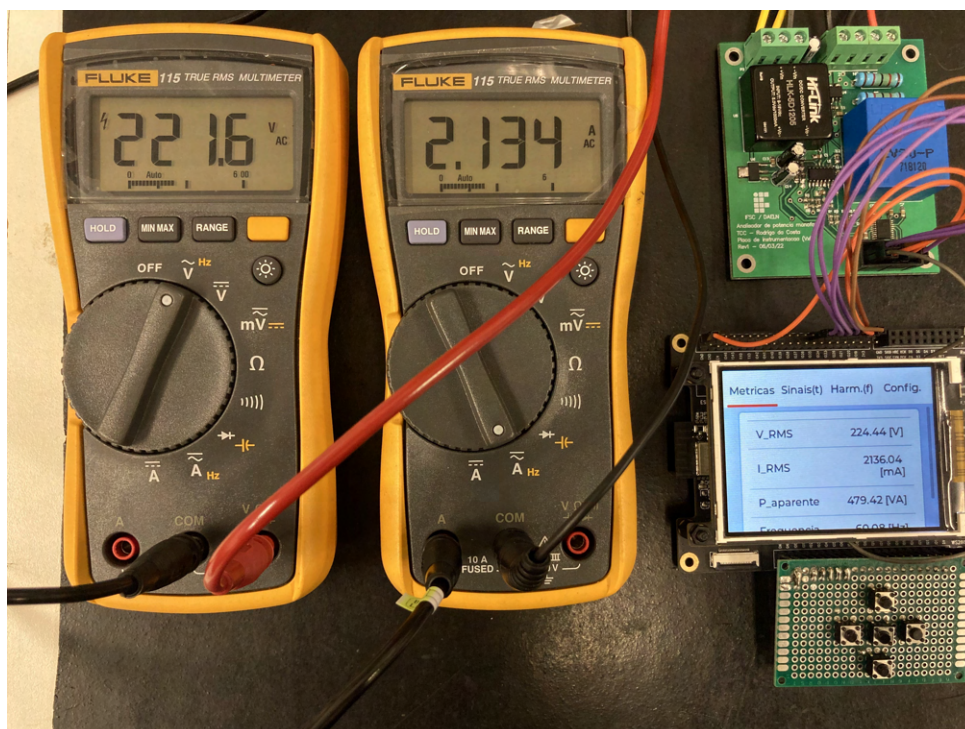
Tabela 6 – Comparativo de resultados entre Fluke 115 e protótipo proposto

| Métrica           | Fluke 115          | Protótipo proposto |
|-------------------|--------------------|--------------------|
| Tensão RMS        | 221,6 $V_{RMS}$    | 224,44 $V_{RMS}$   |
| Corrente RMS      | 2,134 mA $A_{RMS}$ | 2,136 mA $A_{RMS}$ |
| Potência aparente | 479,89 VA          | 479,40 VA          |

Fonte: Elaboração própria

Um registro fotográfico deste teste, mostrando os resultados no *display* do multímetro e no protótipo, pode ser visto na Figura 50 a seguir:

Figura 50 – Medições dos multímetros Fluke 115 e do protótipo proposto



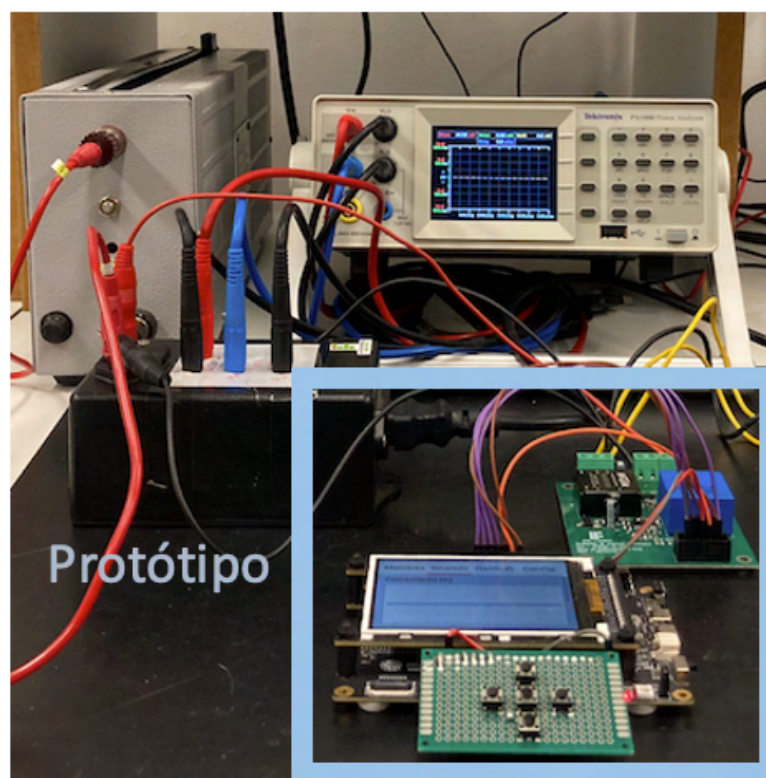
Fonte: Acervo do autor.

## 6.4 Setup de testes

Buscando realizar a comparação entre medidas do Tektronix PA1000 e o protótipo proposto, realizou-se a ligação dos equipamentos de forma que o circuito medidor de corrente de ambos estivesse em série com o DUT, e o circuito de medição de tensão de ambos em paralelo ao DUT.

A configuração da bancada de testes pode ser visualizada na Figura 51 a seguir:

Figura 51 – Testes com protótipo e Tektronix PA1000



Fonte: Acervo do autor.

Os testes foram realizados de forma a realizar uma série de medidas em toda a faixa de medida que o protótipo seria em teoria capaz de medir, possibilitando a comparação com o Tektronix PA1000 em mais de uma situação e com mais de um tipo de carga.

Duas cargas foram utilizadas para os testes:

- a) Carga R - Reostato  $103,2 \, \Omega$ ;
- b) Carga RL - Reostato  $103,2 \, \Omega$  em série com indutor de 980 mH;

É importante ressaltar que o indutor utilizado na carga RL série é um primário de transformador com núcleo ferromagnético, sujeito à saturação magnética, que pôde ser observada nos resultados do teste. O reostato utilizado foi o ELETELE N125, para até 500 W.

A fonte de tensão CA utilizada para os testes foi a FCAMHQ 250-44-55, do fabricante Supplier. Configurou-se o equipamento para obter na saída um sinal senoidal com amplitude configurável e com somente uma componente com frequência fixa em 60 Hz. Foram escolhidos 12 níveis de tensão para realização dos testes, utilizando passos de 20 V da tensão de entrada. A Tabela 7 a seguir conta com todos os 24 testes realizados.

Tabela 7 – Testes realizados em 12 níveis de tensão RMS

|         |          | Tensões de teste (V) |    |    |    |     |     |     |     |     |     |     |     |
|---------|----------|----------------------|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Carga R | Carga RL | 20                   | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 | 220 | 240 |

Para cada teste, configurou-se o Tektronix PA1000, por meio do software PWRVIEW, para extrair as 41 métricas a seguir:

- a) Tensão RMS;
- b) Tensão RMS;
- c) potência ativa;
- d) Potência aparente;
- e) Potência reativa;
- f) Frequência da tensão;
- g) Fator de potência;
- h) Fator de crista da tensão;
- i) Fator de crista da corrente;
- j) THD da tensão;
- k) THD da corrente;
- l) Amplitude da harmônica N da tensão (1 até 15);
- m) Amplitude da harmônica N da corrente (1 até 15);

Para os 24 experimentos, sendo 41 métricas por experimento, totalizaram-se 984 métricas, gerando um dataset que pode ser visto no Apêndice A.

## 6.5 Comparação da análise de harmônicas

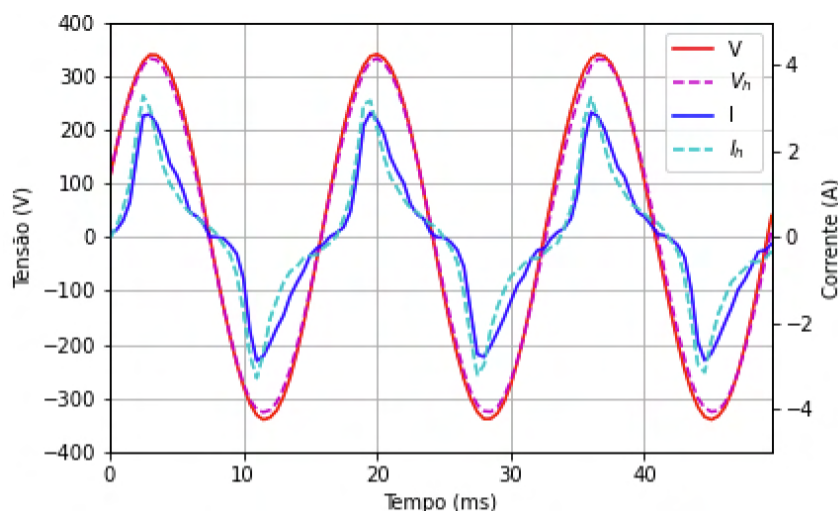
As magnitudes dos harmônicos foram calculados externamente, via script Python, e processados de forma a gerar gráficos de barras com os resultados. A FFT realizada no script usa o mesmo número de bins que a FFT implementada no protótipo, buscando obter um resultado semelhante ao que seria obtido caso houvesse sido finalizada a implementação de análise de harmônicos no software embarcado.

Os resultados da análise de magnitude de harmônicos até o 15º harmônicos do sinal de corrente podem ser vistos no Apêndice C. Como esperado, a carga RL apresentou não-linearidades e alta THD da corrente, devido à saturação magnética imposta no transformador.

De forma a demonstrar a coerência das magnitudes espectrais calculadas, realizou-se o processo inverso, buscando obter os sinais de tensão e corrente no tempo,

dispondo somente dos harmônicos, por meio da soma das 15 componentes senoidais obtidas. O resultado pode ser visto na Figura 52 a seguir:

**Figura 52 – Reconstrução dos sinais a partir das harmônicas calculadas**



Fonte: Elaboração própria.

## 6.6 Comparação por métricas e sinais brutos

O protótipo mostrou-se adequado para medições de: valor RMS, potência aparente, potência ativa e fator de crista. No entanto, métricas de potência reativa, frequência, fator de potência e THD apresentaram erro em relação à referência na maioria das medidas.

Os resultados foram apresentados em gráficos, presentes no Apêndice B.

De forma a elucidar um teste prático, o resultado de uma das medidas, para  $180 V_{RMS}$ , pode ser visto na Figura 53, contendo uma comparação direta entre os resultados vistos no PA1000 e os que seriam obtidos no sistema proposto, caso todas as métricas estivessem sendo calculadas em tempo real.

Figura 53 – Comparação de métricas - Tensão de 180 V em carga RL com saturação magnética



(a) Resultados no Tektronix PA1000

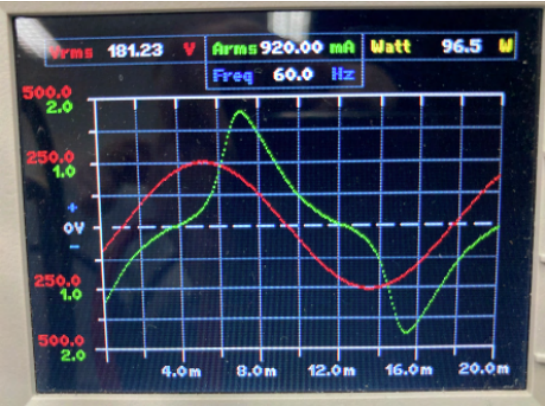
|                 |                |
|-----------------|----------------|
| Watt: 90,34 W   | VA: 166,95 VA  |
| VAr: 136,03 VAr | Vrms: 182,47 V |
| Arms: 914,9 mA  | PF: 0,541      |
| Vpk+: 258,5 V   | Apk+: 1,781 mA |
| Vcf: 1,416      | Acf: 1,947     |
| Freq: 60,59 Hz  | Vthd: 768 m%   |
| Athd: 38,40 %   |                |

(b) Resultados no protótipo analisador de potência

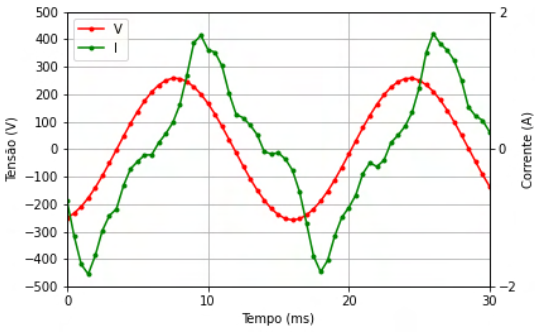
Fonte: Acervo do autor.

Por fim, de forma a comparar os sinais brutos adquiridos, tem-se a Figura 54, referente ao mesmo experimento, demonstrando as formas de ondas adquiridas no Tektronix PA100 e no protótipo analisador de energia. No Apêndice D constam todas as formas de onda adquiridas, para todos os casos de teste.

Figura 54 – Comparação de sinais - Tensão de 180 V em carga RL com saturação magnética



(a) Sinais no Tektronix PA1000



(b) Sinais no protótipo analisador de potência

Fonte: Acervo do autor.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O protótipo desenvolvido mostrou-se adequado para obtenção de sinais de tensão e corrente elétrica, sendo capaz de obter métricas de potência e qualidade de energia. De maneira independente, o sistema calcula as seguintes métricas: tensão RMS, corrente RMS, potência aparente e frequência da tensão. As outras métricas propostas: potência ativa, potência reativa, fator de potência, fator de crista, valores de pico e THD, foram calculadas externamente utilizando o registro dos dados de tensão e corrente adquiridos em conjunto a um *script* desenvolvido em linguagem Python para processamento dos dados.

Adicionalmente, o protótipo disponibiliza em uma tela LCD os resultados das métricas calculadas e os sinais de tensão e corrente medidos, no domínio do tempo e no domínio da frequência.

No Capítulo 6 sobre resultados, constatou-se que as métricas que utilizam o fator de potência tiveram um maior erro em relação às métricas que dependiam apenas dos valores instantâneos de tensão e/ou corrente. Este comportamento se deve ao fato da resolução da métrica do fator de potência estar associada à frequência de amostragem, responsável pela discretização no tempo dos sinais, e portanto alterando a precisão do cálculo de defasagem entre as duas formas de onda, que utiliza a diferença de tempo entre as passagens por zero do sinal de tensão e corrente. Uma das soluções possíveis seria aumentar a frequência de amostragem do ADC, o que não se mostrou possível devido aos requisitos *hard real-time*, como a comunicação SPI e o polling do evento de fim de conversão serem realizados em tempo menor que o período referente à amostragem dos sinais, impossibilitando ao microcontrolador obter estes dados de maneira sincronizada.

Por fim, o protótipo apresentou medições compatíveis com as obtidas pelo equipamento de referência Tektronix PA1000, portanto, confirmou-se que o protótipo foi capaz de adquirir dados de tensão e corrente e realizar o processamento digital destes sinais, resultando em métricas com resultados coerentes aos obtidos pelo equipamento de referência, atingindo-se a maior parte dos objetivos propostos na Seção 1.4.

As métricas de tensão e corrente RMS, potência aparente, frequência da tensão, fatores de crista e valores de pico tiveram resultados semelhantes ao equipamento de referência. No entanto, as métricas de THD, fator de potência, potência ativa e potência reativa, possuíam erro absoluto considerável mesmo na faixa de operação nominal, sendo recomendada a adequação do projeto de hardware e software embarcado para permitir o aumento da precisão e realização em tempo de execução destas métricas.

Buscando complementar os resultados, elencou-se os seguintes itens para

trabalhos futuros, sendo a maioria deles associados ao firmware:

- a) Possibilitar leituras com frequência de amostragem de 8 kHz, com largura de banda suficiente para análises até a 50<sup>a</sup> harmônica;
- b) Desenvolver processamento de sinais embarcado para as métricas de fator de potência e THD;
- c) Disponibilizar módulo de firmware contendo driver do conversor analógico-digital ADS131M02 como um componente *open-source* da *esp-idf*;
- d) Implementar aba de configuração do sistema, permitindo alterar os parâmetros de aquisição em tempo real pelo usuário;
- e) Substituir sensor de corrente por resistores *shunt*;
- f) Adicionar hardware para detecção de passagem por zero;
- g) Unificar projeto de placa de instrumentação e placa de controle, e realizar montagem do protótipo em gabinete.

## REFERÊNCIAS

ABB. *CT6/1000 Current Transformer*. 2022. Disponível em: <<https://new.abb.com/products/pt/2CSG421190R1101/ct6-1000>>. Acesso em: 2 ago 2022.

ALLEGRO MICROSYSTEMS. *Voltage Isolation in Variable Frequency Drives*. 2020. Disponível em: <<https://www.allegromicro.com/en/insights-and-innovations/technical-documents/hall-effect-sensor-ic-publications/voltage-isolation-in-variable-frequency-drives>>. Acesso em: 2 ago 2022.

ALLEGRO MICROSYSTEMS. *ACS725 - Automotive-Grade, Galvanically Isolated Current Sensor IC with Common-Mode Field Rejection in a Small Footprint SOIC8 Package*. 2022. Disponível em: <<https://www.allegromicro.com/-/media/files/datasheets/acs725-datasheet.pdf>>. Acesso em: 21 ago 2022.

ALLEGRO MICROSYSTEMS. *Hall-Effect Sensors*. 2022. Disponível em: <<https://www.allegromicro.com/en/insights-and-innovations/technical-documents/hall-effect-sensor-ic-publications/allegro-hall-effect-sensor-ics>>. Acesso em: 4 ago 2022.

ALLIED. *Tektronix PA1000*. 2022. Disponível em: <<https://www.alliedelec.com/product/tektronix/pa1000/70339196/>>. Acesso em: 09 may 2022.

AMAZON. *HLK-5D1205*. 2022. Disponível em: <<https://www.amazon.com/HI-Link-HLK-5D1205-5D1212-Voltage-Stabilizing/dp/B0875WKYY7>>. Acesso em: 21 ago 2022.

ANATEL. *Resolução nº 715, de 23 de outubro de 2019*. 2021. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/1101442/iot-number-of-connected-devices-worldwide>>. Acesso em: 17 apr 2022.

ANATEL. *Organismos de Certificação Designados (OCD)*. 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/anatel/pt-br/regulado/certificacao/ocds>>. Acesso em: 18 apr 2022.

ANEEL. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST - Módulo 8 - Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica*. 2021. Disponível em: <[https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956\\_2\\_7.pdf](https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_7.pdf)>. Acesso em: 12 ago 2022.

ARM. *CMSIS-DSP*. 2022. Disponível em: <<https://arm-software.github.io/CMSIS-DSP/latest>>. Acesso em: 01 ago 2022.

AVNET. *Tektronix PA1000 Power Analyzer (ASEAN / ANZ ONLY) - Review*. 2014. Disponível em: <[https://community.element14.com/products/roadtest/rv/roadtest\\_reviews/1323/tektronix\\_pa1000\\_pow\\_2](https://community.element14.com/products/roadtest/rv/roadtest_reviews/1323/tektronix_pa1000_pow_2)>. Acesso em: 08 ago 2022.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. *Conversor de Moedas - USD para BRL*. 2022. Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/conversao>>. Acesso em: 09 may 2022.

DAS, J. C. *Power Systems Harmonics and Passive Filter Designs*. [S.l.]: IEEE Press, 2015. ISBN 978-1-118-86162-2.

DIGIKEY. *LV20-P*. 2022. Disponível em: <<https://www.digikey.com.br/pt/products/detail/lem-usa-inc/LV-20-P/409833>>. Acesso em: 21 ago 2022.

EMC STANDARDS. *A Practical Guide for EN 61000-3-2 - Limits for harmonic current emissions*. 2022. Disponível em: <[https://www.emcstandards.co.uk/files/61000-3-2\\_mains\\_harmonics.pdf](https://www.emcstandards.co.uk/files/61000-3-2_mains_harmonics.pdf)>. Acesso em: 21 ago 2022.

ESPRESSIF. *Espressif DSP Library API Reference*. 2022. Disponível em: <<https://docs.espressif.com/projects/esp-dsp/en/latest/esp-dsp-apis.html>>. Acesso em: 21 jun 2022.

FCC. *The Commission Seeks Comment on Spectrum for the Internet of Things - Notice of Inquiry No. 21-353*. 2021. Disponível em: <<https://www.fcc.gov/document/spectrum-requirements-internet-things-notice-inquiry>>. Acesso em: 04 apr 2022.

FLUKE. *Manual do Usuário - Fluke 434-II/435-II/437-II*. 2022. Disponível em: <[https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/F430-II\\_umpor0100.pdf](https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/F430-II_umpor0100.pdf)>. Acesso em: 08 jul 2022.

FLUKE. *Technical Data - Fluke i2500-18 iFlex® Flexible Current Probes*. 2022. Disponível em: <<https://www.fluke.com/en/product/accessories/current-clamps/fluke-i2500-18-iflex/ds>>. Acesso em: 08 jul 2022.

HART, D. *Power Electronics*. 1. ed. Valparaíso, Indiana: McGraw-Hill, 2011. ISBN 978-0-07-338067-4.

HI-LINK. *12V to 5V5W DC regulated isolation power supply module 5D1205 dcdc isolation step-down module DC power supply*. 2022. Disponível em: <<https://www.hlktech.com/en/Goods-163.html#datum>>. Acesso em: 15 jun 2022.

LATHI, B. P. *Principles of Linear Systems and Signals*. 2nd edition. ed. [S.l.]: Oxford University Press, 2009. ISBN 978-0-19-806227-1.

LEM. *LEM Voltage Transducer LV25-P*. 2021. Disponível em: <[https://www.lem.com/sites/default/files/products\\_datasheets/lv\\_25-p.pdf](https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/lv_25-p.pdf)>. Acesso em: 01 ago 2022.

LVGL. *Light and Versatile Graphics Library (LVGL)*. 2022. Disponível em: <<https://lvgl.io/>>. Acesso em: 10 ago 2022.

MCKINSEY. *By 2025, Internet of things applications could have USD 11 trillion impacts*. 2015. Disponível em: <<https://www.mckinsey.com/mgi/overview/in-the-news/by-2025-internet-of-things-applications-could-have-11-trillion-impact>>. Acesso em: 04 apr 2022.

MOUSER. *ESP32-S2-WROOM*. 2020. Disponível em: <[https://www.mouser.com/datasheet/2/891/esp32\\_s2\\_wroom\\_esp32\\_s2\\_wroom\\_i\\_datasheet\\_en-1799809.pdf](https://www.mouser.com/datasheet/2/891/esp32_s2_wroom_esp32_s2_wroom_i_datasheet_en-1799809.pdf)>. Acesso em: 21 ago 2022.

MOUSER. *ESP32-S2-KALUGA-1*. 2022. Disponível em: <<https://br.mouser.com/ProductDetail/Espressif-Systems/ESP32-S2-KALUGA-1?qs=vmHwEFxEFR%252BSQTBNTuFhog%3D%3D>>. Acesso em: 01 ago 2022.

MOUSER. *Mouser electronics*. 2022. Disponível em: <<https://br.mouser.com/>>. Acesso em: 21 ago 2022.

NATIONAL INSTRUMENTS. *Multisim Pricing*. 2022. Disponível em: <<https://www.multisim.com/pricing/>>. Acesso em: 4 ago 2022.

NEWARK. *FLUKE-435-II - 3 Phase Power Quality and Energy Analyzer with Carrying Case*. 2022. Disponível em: <<https://www.newark.com/fluke/fluke-435-ii/3-phase-power-qualityenergy-analyzer/dp/76T4892>>. Acesso em: 09 may 2022.

NEWARK. *Tektronix A622 Current Probe, BNC Plug, Current Clamp, 100 A, 50 mA*. 2022. Disponível em: <<https://www.newark.com/pt-BR/tektronix/a622/current-probe-50ma-to-100a-dc/dp/01F2474>>. Acesso em: 4 ago 2022.

PROESI. *Fonte 12V / 2A*. 2022. Disponível em: <<https://proesi.com.br/fonte-de-alimentacao-o-ms-25-12-saida-12v-2-08a.html>>. Acesso em: 21 ago 2022.

RS COMPONENTS. *Murata Power Solutions 5600 Series Current Transformer, 10A Input, 10:1*. 2022. Disponível em: <<https://sg.rs-online.com/web/p/current-transformers/7157074>>. Acesso em: 2 ago 2022.

SANKARAN, C. *Power Quality*. 1. ed. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2002. ISBN 0-8493-1040-7.

SCIENCE DIRECT. *Single Precision Format*. 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/single-precision-format>>. Acesso em: 06 jul 2022.

ST MICROELECTRONICS. *AN2834 - How to get the best ADC accuracy in STM32 microcontrollers*. 2022. Disponível em: <[https://www.st.com/resource/en/application\\_note/cd00211314-how-to-get-the-best-adc-accuracy-in-stm32-microcontrollers-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/application_note/cd00211314-how-to-get-the-best-adc-accuracy-in-stm32-microcontrollers-stmicroelectronics.pdf)>. Acesso em: 06 jul 2022.

STATISTA. *Internet of Things (IoT) and non-IoT active device connections worldwide from 2010 to 2025(in billions)*. 2021. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/1101442/iot-number-of-connected-devices-worldwide>>. Acesso em: 12 apr 2022.

TEKTRONIX. *Fundamentals of AC Power Measurements*. 2013. Disponível em: <<https://www.tek.com/en/documents/application-note/fundamentals-ac-power-measurements>>. Acesso em: 08 ago 2022.

TEKTRONIX. *PA1000 Single-Phase Power Analyzer*. 2013. Disponível em: <<https://www.tek.com/en/products/power-analyzers/pa1000>>. Acesso em: 18 apr 2022.

TESTEQUITY. *Hioki PW3390-01 Power Analyzer, 4 Channel*. 2022. Disponível em: <<https://www.testequity.com/product/30293-1-PW3390-01>>. Acesso em: 09 may 2022.

TEXAS INSTRUMENTS. *The delta-sigma advantage to anti-aliasing filters*. 2015. Disponível em: <[https://e2e.ti.com/blogs\\_/archives/b/precisionhub/posts/the-delta-sigma-advantage-to-anti-aliasing-filters](https://e2e.ti.com/blogs_/archives/b/precisionhub/posts/the-delta-sigma-advantage-to-anti-aliasing-filters)>. Acesso em: 10 ago 2022.

TEXAS INSTRUMENTS. *Three guidelines for designing anti-aliasing filters*. 2015. Disponível em: <[https://e2e.ti.com/blogs\\_/archives/b/precisionhub/posts/three-guidelines-for-designing-anti-aliasing-filters](https://e2e.ti.com/blogs_/archives/b/precisionhub/posts/three-guidelines-for-designing-anti-aliasing-filters)>. Acesso em: 21 ago 2022.

TEXAS INSTRUMENTS. *Single-Phase Electric Meter With Isolated Energy Measurement*. 2016. Disponível em: <<https://www.tij.co.jp/lit/ug/tidu455a/tidu455a.pdf?ts=1662575044807>>. Acesso em: 21 ago 2022.

TEXAS INSTRUMENTS. *Single-ended to differential using a two op-amp circuit - SBAA265*. 2018. Disponível em: <[https://www.ti.com/lit/an/sbaa265/sbaa265.pdf?ts=1661140653266&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/an/sbaa265/sbaa265.pdf?ts=1661140653266&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F)>. Acesso em: 21 ago 2022.

TEXAS INSTRUMENTS. *ADS131M02 2-Channel, Simultaneously-Sampling, 24-Bit, Delta-Sigma ADC*. 2021. Disponível em: <<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads131m02.pdf>>. Acesso em: 08 jul 2022.

TEXAS INSTRUMENTS. *ADS131M08 evaluation module for eight-channel, 24-bit, simultaneous-sampling, delta-sigma ADC*. 2022. Disponível em: <<https://www.ti.com/tool/ADS131M08EVM>>. Acesso em: 08 ago 2022.

THE BUSINESS RESEARCH COMPANY. *Electronic Products Market*. 2021. Disponível em: <<https://www.thebusinessresearchcompany.com/report/electronic-products-market>>. Acesso em: 04 apr 2022.

THE WORLD BANK. *GDP (current USD) - Brazil*. 2022. Disponível em: <<https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD?locations=BR>>. Acesso em: 07 may 2022.

TOCCI, R.; WIDMER, N.; MOSS, G. *Sistemas Digitais - Princípios e Aplicações*. 11<sup>a</sup> edição. ed. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2011. ISBN 978-85-4300-694-9.

WEBSTER, J. G.; EREN, H. *Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook - Electromagnetic, Optical, Radiation, Chemical and Biomedical Measurement*. 2. ed. Boca Raton, Florida: CRC Press - Taylor and Francis Group, 2014. ISBN 978-1-4398-4893-7.

## APÊNDICES

APÊNDICE A – RESULTADOS DAS MÉTRICAS PROCESSADAS

| Tensão | Ensaio | Equipamento | V_RMS    | I_RMS  | P        | S        | Q        | Frequency | PF     | Vpk_max  | Vpk_min   |
|--------|--------|-------------|----------|--------|----------|----------|----------|-----------|--------|----------|-----------|
| 20     | R      | TCC         | 20,4977  | 0,2295 | 4,7046   | 4,7046   | 0,0000   | 58,8094   | 1,0000 | 29,0080  | -28,9800  |
| 20     | R      | PA1000      | 20,3180  | 0,1973 | 4,0082   | 4,0082   | 0,0755   | 59,9900   | 0,9997 | 29,0730  | -29,2350  |
| 20     | RL     | TCC         | 20,4650  | 0,1090 | 0,1400   | 2,2300   | 2,1600   | 60,5915   | 0,0629 | 28,9384  | -28,9526  |
| 20     | RL     | PA1000      | 20,7230  | 0,0359 | 0,2398   | 0,7445   | 0,7048   | 60,0320   | 0,3221 | 29,6360  | -29,6810  |
| 40     | R      | TCC         | 40,4962  | 0,4113 | 16,6554  | 16,6554  | 0,0000   | 60,5915   | 1,0000 | 57,2800  | -57,2480  |
| 40     | R      | PA1000      | 40,7230  | 0,3945 | 16,0630  | 16,0630  | 0,2091   | 60,0360   | 0,9999 | 58,0070  | -58,0660  |
| 40     | RL     | TCC         | 40,3716  | 0,1290 | 1,0770   | 5,2080   | 4,7380   | 60,5915   | 0,2060 | 57,0692  | -57,1082  |
| 40     | RL     | PA1000      | 40,8260  | 0,9698 | 3,1432   | 2,9899   | 0,0000   | 60,0130   | 0,3086 | 58,1690  | -58,1990  |
| 60     | R      | TCC         | 60,5801  | 0,6011 | 36,4162  | 36,4162  | 0,0000   | 60,5915   | 1,0000 | 85,6022  | -85,7504  |
| 60     | R      | PA1000      | 60,7650  | 0,5870 | 35,6670  | 35,6700  | 0,4742   | 60,0100   | 0,9999 | 86,4640  | -86,4770  |
| 60     | RL     | TCC         | 60,2454  | 0,1622 | 2,8800   | 7,8700   | 8,7480   | 58,8094   | 0,2948 | 85,3541  | -85,2249  |
| 60     | RL     | PA1000      | 60,9340  | 0,1285 | 2,4308   | 7,8300   | 7,4441   | 60,0310   | 0,3104 | 86,7200  | -86,7580  |
| 80     | R      | TCC         | 80,8163  | 0,7898 | 63,8285  | 63,8285  | 0,0000   | 60,5915   | 1,0000 | 114,2960 | -114,4426 |
| 80     | R      | PA1000      | 80,8530  | 0,7800 | 63,0580  | 63,0640  | 0,8427   | 60,0210   | 0,9999 | 114,8200 | -114,8400 |
| 80     | RL     | TCC         | 80,2263  | 0,2112 | 6,0090   | 16,9465  | 15,4100  | 60,5915   | 0,3546 | 113,5100 | -113,7315 |
| 80     | RL     | PA1000      | 81,0340  | 0,1919 | 5,0313   | 15,5480  | 14,7110  | 59,9910   | 0,3236 | 115,1700 | -115,2500 |
| 100    | R      | TCC         | 101,2527 | 0,9797 | 99,1957  | 99,1957  | 0,0000   | 58,8094   | 1,0000 | 143,4416 | -143,1303 |
| 100    | R      | PA1000      | 100,9100 | 0,9733 | 98,2020  | 98,2110  | 1,2738   | 59,9950   | 0,9999 | 143,1600 | -143,1000 |
| 100    | RL     | TCC         | 100,3803 | 0,2837 | 10,7600  | 28,4700  | 25,9100  | 60,5915   | 0,3781 | 142,7463 | -142,0822 |
| 100    | RL     | PA1000      | 101,2000 | 0,2731 | 9,6348   | 27,6330  | 25,8990  | 60,0450   | 0,3487 | 143,8200 | -143,7400 |
| 120    | R      | TCC         | 121,6728 | 1,1721 | 142,6074 | 142,6074 | 0,0000   | 58,8094   | 1,0000 | 172,4920 | -172,1011 |
| 120    | R      | PA1000      | 120,9800 | 1,1671 | 141,1900 | 141,2000 | 1,7583   | 59,9930   | 0,9999 | 171,6100 | -171,4400 |
| 120    | RL     | TCC         | 120,6621 | 0,3901 | 18,6200  | 47,0600  | 42,8200  | 60,5915   | 0,3956 | 170,9603 | -170,7616 |
| 120    | RL     | PA1000      | 121,3000 | 0,3839 | 18,2320  | 46,5710  | 42,8540  | 60,0250   | 0,3915 | 172,3000 | -172,1800 |
| 140    | R      | TCC         | 142,1442 | 1,3613 | 193,5027 | 193,5027 | 0,0000   | 58,8094   | 1,0000 | 201,1543 | -201,5412 |
| 140    | R      | PA1000      | 141,0400 | 1,3611 | 191,9500 | 191,9600 | 2,2910   | 59,9850   | 0,9999 | 199,9700 | -199,7700 |
| 140    | RL     | TCC         | 141,2014 | 0,5401 | 29,9460  | 76,2500  | 69,3800  | 60,5915   | 0,3927 | 199,7716 | -199,8738 |
| 140    | RL     | PA1000      | 141,3900 | 0,5379 | 34,5490  | 76,0520  | 67,7510  | 60,0340   | 0,4543 | 200,8700 | -200,8300 |
| 160    | R      | TCC         | 163,0714 | 1,5559 | 253,7222 | 253,7222 | 0,0000   | 60,5915   | 1,0000 | 230,5215 | -230,9280 |
| 160    | R      | PA1000      | 160,8800 | 1,5533 | 249,8700 | 249,8800 | 2,8647   | 59,9510   | 0,9999 | 228,1300 | -227,9100 |
| 160    | RL     | TCC         | 161,6283 | 0,7221 | 63,8130  | 116,7000 | 95,0900  | 60,5915   | 0,5468 | 228,9326 | -228,8564 |
| 160    | RL     | PA1000      | 161,4500 | 0,7233 | 60,9610  | 116,7800 | 99,6060  | 60,0290   | 0,5220 | 229,2500 | -229,1300 |
| 180    | R      | TCC         | 183,5747 | 1,7518 | 321,5879 | 321,5879 | 0,0000   | 58,8094   | 1,0000 | 260,2466 | -259,7049 |
| 180    | R      | PA1000      | 181,1100 | 1,7493 | 316,8100 | 316,8300 | 3,5039   | 59,9850   | 0,9999 | 256,7900 | -256,5100 |
| 180    | RL     | TCC         | 182,4777 | 0,9149 | 90,3400  | 166,9500 | 136,0360 | 60,5915   | 0,5410 | 258,5063 | -258,1845 |
| 180    | RL     | PA1000      | 181,5100 | 0,9266 | 98,3580  | 168,1800 | 136,4200 | 60,0070   | 0,5848 | 257,7800 | -257,7300 |
| 200    | R      | TCC         | 204,5295 | 1,9489 | 398,6061 | 398,6061 | 0,0000   | 60,5915   | 1,0000 | 289,0918 | -289,3816 |
| 200    | R      | PA1000      | 201,1200 | 1,9434 | 390,8300 | 390,8500 | 4,1702   | 59,9550   | 0,9999 | 285,4000 | -285,0500 |
| 200    | RL     | TCC         | 200,7279 | 1,1241 | 149,9500 | 225,6200 | 155,7600 | 60,5915   | 0,6646 | 283,9683 | -284,0648 |
| 200    | RL     | PA1000      | 201,5100 | 1,1338 | 145,6900 | 228,4700 | 176,0000 | 59,9810   | 0,6377 | 286,3100 | -286,0700 |
| 220    | R      | TCC         | 224,4561 | 2,1397 | 480,2763 | 480,2763 | 0,0000   | 60,5915   | 1,0000 | 317,2167 | -317,9588 |
| 220    | R      | PA1000      | 221,1800 | 2,1376 | 472,7700 | 472,8000 | 4,8992   | 59,9770   | 1,0000 | 313,7600 | -314,0000 |
| 220    | RL     | TCC         | 220,6368 | 1,3317 | 194,1200 | 293,8300 | 202,8400 | 60,5915   | 0,6610 | 311,9609 | -312,5093 |
| 220    | RL     | PA1000      | 221,5100 | 1,3399 | 202,0400 | 296,8000 | 217,4100 | 59,9550   | 0,6807 | 314,2500 | -314,3400 |
| 240    | R      | TCC         | 241,2139 | 2,3274 | 561,4063 | 561,4063 | 0,0000   | 58,8094   | 1,0000 | 342,1750 | -341,3321 |
| 240    | R      | PA1000      | 241,1100 | 2,3290 | 561,5100 | 561,5400 | 5,6447   | 59,9760   | 1,0000 | 343,7000 | -342,8100 |
| 240    | RL     | TCC         | 240,8713 | 1,5326 | 243,0000 | 369,1610 | 254,8915 | 60,5915   | 0,6598 | 340,5152 | -339,7101 |
| 240    | RL     | PA1000      | 241,4900 | 1,5425 | 266,4800 | 372,4900 | 260,2700 | 59,9910   | 0,7154 | 344,3800 | -343,2800 |

|  | lpk_max | lpk_min | Vcf    | lcf    | Vthd   | lthd     | Vh1_mag  | Vh2_mag | Vh3_mag | Vh4_mag | Vh5_mag | Vh6_mag |
|--|---------|---------|--------|--------|--------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|
|  | 0.5223  | -0.2997 | 1.4152 | 2.2758 | 0.0326 | 0.3657   | 21.1576  | 0.1231  | 0.0529  | 0.0345  | 0.0227  | 0.0194  |
|  | 0.2864  | -0.2834 | 1.4338 | 1.4515 | 0.0924 | 0.1044   | 20.4020  | 0.0077  | 0.0042  | 0.0028  | 0.0071  | 0.0024  |
|  | 0.2371  | -0.2768 | 1.4140 | 2.1746 | 1.0400 | 359.9700 | 18.7237  | 0.1688  | 0.0628  | 0.0574  | 0.0395  | 0.0203  |
|  | 0.0600  | -0.0571 | 1.4333 | 1.6696 | 0.1363 | 2.5820   | 20.7090  | 0.0184  | 0.0113  | 0.0068  | 0.0140  | 0.0040  |
|  | 0.7200  | -0.4688 | 1.4145 | 1.7507 | 0.0143 | 1.1136   | 41.5879  | 0.2093  | 0.0793  | 0.0491  | 0.0151  | 0.0348  |
|  | 0.5665  | -0.5622 | 1.4257 | 1.4360 | 0.3418 | 0.3275   | 40.7020  | 0.1243  | 0.0463  | 0.0440  | 0.0226  | 0.0302  |
|  | 0.2228  | -0.3734 | 1.4136 | 1.7270 | 0.5400 | 173.7800 | 39.4771  | 0.1861  | 0.0698  | 0.0284  | 0.0170  | 0.0068  |
|  | 0.1221  | -0.1182 | 1.4254 | 1.5858 | 0.1108 | 4.8018   | 40.8080  | 0.0215  | 0.0102  | 0.0230  | 0.0038  |         |
|  | 0.9412  | -0.7944 | 1.4130 | 1.5658 | 0.0135 | 4.4766   | 62.5069  | 0.4164  | 0.1947  | 0.1442  | 0.1596  | 0.0785  |
|  | 0.8390  | -0.8350 | 1.4230 | 1.4293 | 0.1353 | 0.2549   | 60.7440  | 0.0360  | 0.0271  | 0.0044  | 0.0500  | 0.0021  |
|  | 0.2883  | -0.4793 | 1.4168 | 1.7780 | 1.3400 | 58.9908  | 113.1600 | 0.6429  | 0.3276  | 0.1990  | 0.1007  | 0.1339  |
|  | 0.2020  | -0.1976 | 1.4238 | 1.5716 | 0.3555 | 7.3183   | 60.8900  | 0.0568  | 0.0255  | 0.0336  | 0.0746  | 0.0294  |
|  | 1.1832  | -1.0928 | 1.4143 | 1.4982 | 0.0130 | 2.4177   | 79.9612  | 0.6169  | 0.3821  | 0.2449  | 0.2247  | 0.1393  |
|  | 1.1114  | -1.1099 | 1.4201 | 1.4250 | 0.4025 | 0.4449   | 80.8020  | 0.0563  | 0.2641  | 0.0945  | 0.0373  | 0.0483  |
|  | 0.3588  | -0.5336 | 1.4149 | 1.6985 | 1.1700 | 60.7300  | 82.5514  | 0.7480  | 0.4150  | 0.2856  | 0.1896  | 0.1657  |
|  | 0.3028  | -0.3012 | 1.4214 | 1.5782 | 0.1200 | 9.6200   | 81.0400  | 0.0010  | 0.0219  | 0.0090  | 0.0319  | 0.0090  |
|  | 1.4616  | -0.4409 | 1.4167 | 1.4919 | 0.0080 | 8.8469   | 106.4936 | 0.7206  | 0.3517  | 0.2375  | 0.2223  | 0.1339  |
|  | 1.3867  | -1.3822 | 1.4188 | 1.4247 | 0.0987 | 0.2753   | 100.9000 | 0.0365  | 0.0267  | 0.0003  | 0.0406  | 0.0005  |
|  | 0.4976  | -0.6232 | 1.4221 | 1.7543 | 1.1390 | 45.1700  | 95.2240  | 1.0554  | 0.5034  | 0.3925  | 0.3390  | 0.1830  |
|  | 0.4425  | -0.4409 | 1.4212 | 1.6211 | 0.3524 | 12.9470  | 101.1100 | 0.2772  | 0.0487  | 0.1009  | 0.0797  | 0.0617  |
|  | 1.7228  | -1.6668 | 1.4177 | 1.4699 | 0.0089 | 4.5250   | 126.7409 | 1.1218  | 0.5997  | 0.4174  | 0.2907  | 0.2367  |
|  | 1.6614  | -1.6558 | 1.4185 | 1.4235 | 0.0852 | 0.2839   | 120.9700 | 0.0326  | 0.0120  | 0.0128  | 0.0493  | 0.0030  |
|  | 0.7344  | -0.7303 | 1.4169 | 1.8827 | 1.2200 | 31.5600  | 119.1297 | 1.1757  | 0.6015  | 0.3738  | 0.2968  | 0.2302  |
|  | 0.6593  | -0.6559 | 1.4204 | 1.7173 | 0.1215 | 18.0800  | 121.2300 | 0.0778  | 0.0273  | 0.0321  | 0.0827  | 0.0228  |
|  | 1.9867  | -1.9509 | 1.4151 | 1.4594 | 0.0070 | 1.6200   | 157.5778 | 1.3541  | 0.7329  | 0.5066  | 0.3478  | 0.2675  |
|  | 1.9370  | -1.9323 | 1.4231 | 1.4231 | 0.0878 | 0.3095   | 141.0400 | 0.0473  | 0.0309  | 0.0221  | 0.0480  | 0.0127  |
|  | 1.0709  | -0.9140 | 1.4148 | 1.9829 | 0.5800 | 34.1000  | 133.1374 | 0.6579  | 0.3011  | 0.0877  | 0.1047  | 0.0298  |
|  | 0.9702  | -0.9670 | 1.4207 | 1.8038 | 0.2261 | 24.6260  | 141.3300 | 0.1416  | 0.1489  | 0.0728  | 0.1349  | 0.0559  |
|  | 2.2483  | -2.2192 | 1.4136 | 1.4450 | 0.0038 | 1.1169   | 182.1069 | 1.0322  | 0.4708  | 0.3251  | 0.1616  | 0.1570  |
|  | 2.2093  | -2.2066 | 1.4181 | 1.4224 | 0.3315 | 0.4322   | 160.8100 | 0.4475  | 0.1401  | 0.1636  | 0.0947  | 0.0926  |
|  | 1.3543  | -1.4561 | 1.4164 | 1.8756 | 1.1590 | 35.2000  | 157.1851 | 1.4362  | 0.5366  | 0.5817  | 0.5690  | 0.3197  |
|  | 1.3563  | -1.3546 | 1.4200 | 1.8750 | 0.2768 | 29.7790  | 161.3300 | 0.1391  | 0.2694  | 0.0898  | 0.1575  | 0.0799  |
|  | 2.5341  | -2.5026 | 1.4177 | 1.4466 | 0.0062 | 1.1310   | 192.9349 | 1.7428  | 1.0634  | 0.6578  | 0.5525  | 0.3957  |
|  | 2.4859  | -2.4844 | 1.4179 | 1.4211 | 0.1366 | 0.3351   | 181.1200 | 0.1116  | 0.1181  | 0.0353  | 0.1096  | 0.0256  |
|  | 1.7815  | -1.9049 | 1.4166 | 1.9472 | 0.7680 | 38.4000  | 186.6071 | 1.1336  | 0.7011  | 0.3418  | 0.1943  | 0.1679  |
|  | 1.7991  | -1.7964 | 1.4204 | 1.9416 | 0.2023 | 33.9120  | 181.4400 | 0.0144  | 0.2794  | 0.0108  | 0.1889  | 0.0061  |
|  | 2.8347  | -2.7728 | 1.4134 | 1.4545 | 0.0027 | 0.9724   | 223.2536 | 1.0949  | 0.5102  | 0.3055  | 0.1021  | 0.1861  |
|  | 2.7629  | -2.7588 | 1.4191 | 1.4217 | 0.1955 | 0.3385   | 201.1800 | 0.2199  | 0.1532  | 0.0841  | 0.0391  | 0.0604  |
|  | 2.2472  | -2.1462 | 1.4147 | 1.9992 | 0.6630 | 43.0100  | 213.6684 | 1.1066  | 0.4762  | 0.3283  | 0.4059  | 0.2021  |
|  | 2.2354  | -2.2283 | 1.4208 | 1.9716 | 0.2548 | 36.6050  | 201.5400 | 0.0252  | 0.3643  | 0.0070  | 0.2278  | 0.0120  |
|  | 3.1080  | -3.0363 | 1.4133 | 1.4525 | 0.0031 | 1.1865   | 239.5179 | 1.4751  | 0.6540  | 0.4595  | 0.2226  | 0.2406  |
|  | 3.0386  | -3.0345 | 1.4197 | 1.4215 | 0.1397 | 0.3403   | 221.2000 | 0.1529  | 0.0755  | 0.0523  | 0.0903  | 0.0209  |
|  | 2.6141  | -2.5667 | 1.4139 | 1.9629 | 1.0400 | 44.6200  | 242.0415 | 2.0335  | 0.9683  | 0.7897  | 0.1813  | 0.4115  |
|  | 2.6205  | -2.6125 | 1.4194 | 1.9557 | 0.3273 | 221.6200 | 221.6200 | 0.1744  | 0.4160  | 0.3374  | 0.0567  | 0.0567  |
|  | 3.3939  | -3.2998 | 1.4186 | 1.4582 | 0.0042 | 1.0956   | 258.5865 | 2.1623  | 1.2230  | 0.8547  | 0.4416  | 0.4987  |
|  | 3.3185  | -3.3109 | 1.4255 | 1.4249 | 0.1393 | 0.3310   | 241.1500 | 0.1057  | 0.1040  | 0.0255  | 0.2124  | 0.0416  |
|  | 2.9530  | -2.8905 | 1.4137 | 1.9268 | 1.1200 | 44.9900  | 262.0590 | 2.0837  | 1.6570  | 0.8281  | 0.6412  | 0.5094  |
|  | 2.9503  | -2.9463 | 1.4261 | 1.9127 | 0.3557 | 38.3060  | 241.4800 | 0.0418  | 0.6132  | 0.0235  | 0.3922  | 0.0246  |

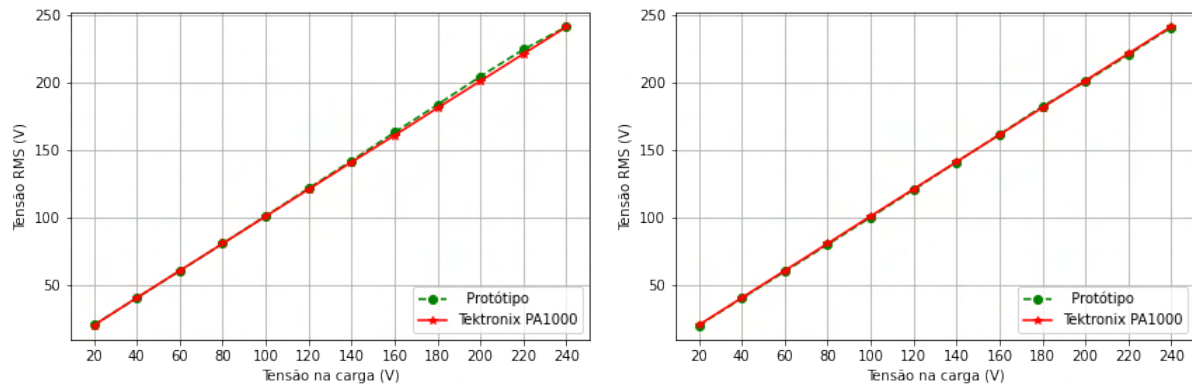
| Vh7_mag | Vh8_mag | Vh9_mag | Vh10_mag | Vh11_mag | Vh12_mag | Vh13_mag | Vh14_mag | Vh15_mag | lh1_mag | lh2_mag | lh3_mag |
|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|
| 0.0169  | 0.0122  | 0.0076  | 0.0111   | 0.0099   | 0.0109   | 0.0133   | 0.0121   | 0.0118   | 0.2061  | 0.1434  | 0.0010  |
| 0.0056  | 0.0006  | 0.0046  | 0.0004   | 0.0033   | 0.0115   | 0.0048   | 0.0020   | 0.0025   | 0.1981  | 0.0001  | 0.0001  |
| 0.0168  | 0.0085  | 0.0066  | 0.0118   | 0.0131   | 0.0069   | 0.0076   | 0.0072   | 0.0072   | 0.0340  | 0.1061  | 0.0026  |
| 0.0016  | 0.0029  | 0.0013  | 0.0020   | 0.0069   | 0.0009   | 0.0024   | 0.0029   | 0.0045   | 0.0358  | 0.0001  | 0.0009  |
| 0.0292  | 0.0261  | 0.0341  | 0.0243   | 0.0408   | 0.0235   | 0.0280   | 0.0235   | 0.0235   | 0.4009  | 0.1725  | 0.0076  |
| 0.0188  | 0.0180  | 0.0270  | 0.0083   | 0.0376   | 0.0056   | 0.0180   | 0.0037   | 0.0125   | 0.3943  | 0.0012  | 0.0002  |
| 0.0236  | 0.0156  | 0.0325  | 0.0219   | 0.0359   | 0.0204   | 0.0231   | 0.0199   | 0.0204   | 0.0749  | 0.1296  | 0.0043  |
| 0.0054  | 0.0050  | 0.0080  | 0.0073   | 0.0182   | 0.0079   | 0.0024   | 0.0033   | 0.0072   | 0.0769  | 0.0000  | 0.0037  |
| 0.0475  | 0.0600  | 0.0517  | 0.0353   | 0.0455   | 0.0357   | 0.0297   | 0.0333   | 0.0313   | 0.6089  | 0.1385  | 0.0055  |
| 0.0134  | 0.0238  | 0.0091  | 0.0063   | 0.0240   | 0.0125   | 0.0061   | 0.0072   | 0.0049   | 0.5869  | 0.0003  | 0.0013  |
| 0.1289  | 0.0718  | 0.0727  | 0.0562   | 0.0624   | 0.0339   | 0.0238   | 0.0197   | 0.0259   | 0.1231  | 0.1261  | 0.0120  |
| 0.0486  | 0.0282  | 0.0210  | 0.0269   | 0.0453   | 0.0193   | 0.0211   | 0.0193   | 0.0283   | 0.1282  | 0.0003  | 0.0094  |
| 0.0865  | 0.0779  | 0.1246  | 0.0610   | 0.0247   | 0.0345   | 0.0456   | 0.0334   | 0.0293   | 0.7747  | 0.1054  | 0.0038  |
| 0.0793  | 0.0258  | 0.0876  | 0.0200   | 0.0609   | 0.0230   | 0.0308   | 0.0049   | 0.0243   | 0.7795  | 0.0026  | 0.0017  |
| 0.1768  | 0.1038  | 0.0723  | 0.0689   | 0.0454   | 0.0399   | 0.0452   | 0.0270   | 0.0186   | 0.1967  | 0.0974  | 0.0211  |
| 0.0540  | 0.0088  | 0.0508  | 0.0013   | 0.0383   | 0.0141   | 0.0221   | 0.0030   | 0.0120   | 0.1909  | 0.0001  | 0.0183  |
| 0.0998  | 0.0889  | 0.0835  | 0.0621   | 0.1146   | 0.0574   | 0.0561   | 0.0624   | 0.0662   | 0.0619  | 0.0619  | 0.0060  |
| 0.0100  | 0.0097  | 0.0298  | 0.0078   | 0.0802   | 0.0012   | 0.0085   | 0.0052   | 0.0190   | 0.9733  | 0.0004  | 0.0021  |
| 0.1724  | 0.1427  | 0.0852  | 0.1145   | 0.1476   | 0.0659   | 0.0565   | 0.0364   | 0.0205   | 0.2580  | 0.0799  | 0.0333  |
| 0.0419  | 0.0394  | 0.0734  | 0.0258   | 0.1234   | 0.0175   | 0.0369   | 0.0052   | 0.0281   | 0.2709  | 0.0003  | 0.0350  |
| 0.2070  | 0.1520  | 0.1050  | 0.0988   | 0.1249   | 0.0734   | 0.0581   | 0.0463   | 0.0420   | 1.2179  | 0.0402  | 0.0047  |
| 0.0245  | 0.0079  | 0.0203  | 0.0043   | 0.0623   | 0.0122   | 0.0480   | 0.0062   | 0.0201   | 1.1671  | 0.0003  | 0.0027  |
| 0.1875  | 0.1476  | 0.1045  | 0.0898   | 0.0864   | 0.0607   | 0.0880   | 0.0500   | 0.0293   | 0.3737  | 0.0409  | 0.0716  |
| 0.0175  | 0.0147  | 0.0118  | 0.0174   | 0.0605   | 0.0213   | 0.0380   | 0.0100   | 0.0191   | 0.3779  | 0.0004  | 0.0672  |
| 0.2560  | 0.1868  | 0.1442  | 0.1244   | 0.1071   | 0.0905   | 0.0656   | 0.0468   | 0.0364   | 1.5090  | 0.0195  | 0.0058  |
| 0.0436  | 0.0095  | 0.0394  | 0.0039   | 0.0724   | 0.0106   | 0.0267   | 0.0180   | 0.0346   | 1.3612  | 0.0004  | 0.0033  |
| 0.1077  | 0.0404  | 0.1023  | 0.0459   | 0.1114   | 0.0636   | 0.0749   | 0.0623   | 0.0645   | 0.4874  | 0.0075  | 0.1147  |
| 0.0761  | 0.0538  | 0.0754  | 0.0459   | 0.1026   | 0.0448   | 0.0646   | 0.0493   | 0.0703   | 0.5224  | 0.0012  | 0.1244  |
| 0.0802  | 0.1189  | 0.1010  | 0.1197   | 0.1179   | 0.1167   | 0.1289   | 0.1275   | 0.1350   | 1.7379  | 0.0253  | 0.0123  |
| 0.0774  | 0.0594  | 0.0225  | 0.0497   | 0.0669   | 0.0161   | 0.0586   | 0.0104   | 0.0282   | 1.5527  | 0.0043  | 0.0040  |
| 0.2888  | 0.1915  | 0.1966  | 0.1390   | 0.0793   | 0.0978   | 0.0717   | 0.0608   | 0.0587   | 0.6723  | 0.0192  | 0.1986  |
| 0.1054  | 0.0789  | 0.1365  | 0.0714   | 0.1319   | 0.0568   | 0.0580   | 0.0533   | 0.0654   | 0.6929  | 0.0010  | 0.1970  |
| 0.3488  | 0.2561  | 0.1811  | 0.1712   | 0.1740   | 0.1075   | 0.0812   | 0.0627   | 0.0356   | 1.8394  | 0.0305  | 0.0096  |
| 0.0443  | 0.0254  | 0.0640  | 0.0049   | 0.1033   | 0.0089   | 0.0584   | 0.0124   | 0.0166   | 1.7495  | 0.0011  | 0.0044  |
| 0.1121  | 0.1015  | 0.0774  | 0.0976   | 0.1353   | 0.0962   | 0.1163   | 0.1049   | 0.1163   | 0.8864  | 0.0352  | 0.3082  |
| 0.0857  | 0.0022  | 0.0661  | 0.0140   | 0.0956   | 0.0058   | 0.0207   | 0.0036   | 0.0177   | 0.8772  | 0.0002  | 0.2782  |
| 0.2086  | 0.1543  | 0.1824  | 0.1480   | 0.1989   | 0.1475   | 0.1515   | 0.1485   | 0.1553   | 2.1259  | 0.0342  | 0.0204  |
| 0.1119  | 0.0415  | 0.1022  | 0.0183   | 0.1480   | 0.0491   | 0.0609   | 0.0201   | 0.0535   | 1.9440  | 0.0021  | 0.0055  |
| 0.2446  | 0.1611  | 0.1834  | 0.1477   | 0.1585   | 0.1451   | 0.1306   | 0.1352   | 0.1415   | 1.1265  | 0.0542  | 0.4385  |
| 0.1794  | 0.0141  | 0.0677  | 0.0077   | 0.1965   | 0.0140   | 0.0471   | 0.0054   | 0.0620   | 1.0648  | 0.0004  | 0.3566  |
| 0.2064  | 0.1541  | 0.0975  | 0.1388   | 0.2389   | 0.1319   | 0.1619   | 0.1446   | 0.1622   | 2.2828  | 0.0482  | 0.0293  |
| 0.0931  | 0.0291  | 0.0768  | 0.0267   | 0.1824   | 0.0256   | 0.0711   | 0.0180   | 0.0489   | 2.1379  | 0.0014  | 0.0052  |
| 0.4568  | 0.2815  | 0.3889  | 0.1992   | 0.1855   | 0.1285   | 0.0984   | 0.0849   | 0.0656   | 1.3785  | 0.0481  | 0.5592  |
| 0.2894  | 0.0342  | 0.1857  | 0.0351   | 0.2620   | 0.0165   | 0.0240   | 0.0415   | 0.0924   | 1.2529  | 0.0021  | 0.4282  |
| 0.3349  | 0.3228  | 0.3180  | 0.2169   | 0.1933   | 0.1425   | 0.0668   | 0.0716   | 0.0374   | 2.4942  | 0.0540  | 0.0085  |
| 0.1072  | 0.0267  | 0.0953  | 0.0103   | 0.1303   | 0.0067   | 0.1165   | 0.0223   | 0.0737   | 2.3296  | 0.0011  | 0.0060  |
| 0.2465  | 0.3180  | 0.1104  | 0.2148   | 0.1305   | 0.1303   | 0.0834   | 0.0745   | 0.0468   | 1.5710  | 0.0498  | 0.6365  |
| 0.2818  | 0.0053  | 0.2355  | 0.0116   | 0.1311   | 0.0048   | 0.2207   | 0.0244   | 0.2068   | 1.4400  | 0.0005  | 0.4917  |

| lh4_mag | lh5_mag | lh6_mag | lh7_mag | lh8_mag | lh9_mag | lh10_mag | lh11_mag | lh12_mag | lh13_mag | lh14_mag | lh15_mag |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0.0531  | 0.0015  | 0.0252  | 0.0015  | 0.0043  | 0.0008  | 0.0028   | 0.0004   | 0.0081   | 0.0006   | 0.0062   | 0.0003   |
| 0.0000  | 0.0001  | 0.0000  | 0.0000  | 0.0000  | 0.0000  | 0.0000   | 0.0000   | 0.0000   | 0.0000   | 0.0000   | 0.0000   |
| 0.0513  | 0.0015  | 0.0325  | 0.0006  | 0.0061  | 0.0027  | 0.0043   | 0.0011   | 0.0012   | 0.0004   | 0.0007   | 0.0002   |
| 0.0001  | 0.0001  | 0.0000  | 0.0001  | 0.0000  | 0.0000  | 0.0000   | 0.0000   | 0.0000   | 0.0001   | 0.0000   | 0.0001   |
| 0.0451  | 0.0044  | 0.0101  | 0.0052  | 0.0019  | 0.0019  | 0.0021   | 0.0024   | 0.0022   | 0.0016   | 0.0004   | 0.0008   |
| 0.0004  | 0.0002  | 0.0003  | 0.0002  | 0.0002  | 0.0003  | 0.0001   | 0.0003   | 0.0001   | 0.0002   | 0.0000   | 0.0001   |
| 0.0013  | 0.0065  | 0.0073  | 0.0022  | 0.0029  | 0.0027  | 0.0018   | 0.0007   | 0.0017   | 0.0011   | 0.0008   | 0.0006   |
| 0.0000  | 0.0003  | 0.0000  | 0.0000  | 0.0001  | 0.0006  | 0.0000   | 0.0000   | 0.0000   | 0.0000   | 0.0000   | 0.0000   |
| 0.0835  | 0.0040  | 0.0351  | 0.0016  | 0.0082  | 0.0006  | 0.0030   | 0.0015   | 0.0049   | 0.0006   | 0.0023   | 0.0007   |
| 0.0000  | 0.0003  | 0.0000  | 0.0001  | 0.0002  | 0.0001  | 0.0001   | 0.0002   | 0.0001   | 0.0001   | 0.0001   | 0.0001   |
| 0.0572  | 0.0021  | 0.0060  | 0.0029  | 0.0033  | 0.0012  | 0.0045   | 0.0016   | 0.0010   | 0.0003   | 0.0013   | 0.0001   |
| 0.0002  | 0.0001  | 0.0001  | 0.0001  | 0.0001  | 0.0002  | 0.0002   | 0.0001   | 0.0001   | 0.0001   | 0.0001   | 0.0001   |
| 0.0775  | 0.0014  | 0.0529  | 0.0037  | 0.0307  | 0.0015  | 0.0125   | 0.0004   | 0.0034   | 0.0001   | 0.0013   | 0.0012   |
| 0.0009  | 0.0005  | 0.0005  | 0.0005  | 0.0002  | 0.0006  | 0.0002   | 0.0005   | 0.0002   | 0.0002   | 0.0001   | 0.0002   |
| 0.0610  | 0.0020  | 0.0239  | 0.0003  | 0.0032  | 0.0012  | 0.0023   | 0.0012   | 0.0030   | 0.0008   | 0.0013   | 0.0005   |
| 0.0001  | 0.0009  | 0.0001  | 0.0005  | 0.0001  | 0.0003  | 0.0001   | 0.0002   | 0.0001   | 0.0001   | 0.0001   | 0.0001   |
| 0.0534  | 0.0028  | 0.0360  | 0.0037  | 0.0192  | 0.0033  | 0.0085   | 0.0023   | 0.0119   | 0.0005   | 0.0067   | 0.0008   |
| 0.0000  | 0.0008  | 0.0000  | 0.0007  | 0.0001  | 0.0005  | 0.0001   | 0.0007   | 0.0000   | 0.0002   | 0.0000   | 0.0003   |
| 0.0639  | 0.0016  | 0.0405  | 0.0009  | 0.0178  | 0.0016  | 0.0056   | 0.0014   | 0.0003   | 0.0005   | 0.0003   | 0.0006   |
| 0.0003  | 0.0026  | 0.0003  | 0.0005  | 0.0005  | 0.0004  | 0.0003   | 0.0003   | 0.0004   | 0.0002   | 0.0004   | 0.0004   |
| 0.0401  | 0.0032  | 0.0248  | 0.0045  | 0.0173  | 0.0015  | 0.0076   | 0.0023   | 0.0132   | 0.0011   | 0.0085   | 0.0007   |
| 0.0001  | 0.0010  | 0.0001  | 0.0010  | 0.0001  | 0.0007  | 0.0001   | 0.0009   | 0.0001   | 0.0005   | 0.0001   | 0.0002   |
| 0.0485  | 0.0141  | 0.0646  | 0.0061  | 0.0061  | 0.0014  | 0.0155   | 0.0001   | 0.0012   | 0.0062   | 0.0006   | 0.0006   |
| 0.0005  | 0.0116  | 0.0004  | 0.0035  | 0.0003  | 0.0009  | 0.0003   | 0.0008   | 0.0003   | 0.0002   | 0.0003   | 0.0003   |
| 0.0216  | 0.0070  | 0.0116  | 0.0105  | 0.0025  | 0.0005  | 0.0019   | 0.0009   | 0.0124   | 0.0014   | 0.0040   | 0.0007   |
| 0.0002  | 0.0013  | 0.0002  | 0.0015  | 0.0001  | 0.0011  | 0.0001   | 0.0013   | 0.0007   | 0.0002   | 0.0002   | 0.0005   |
| 0.0056  | 0.0271  | 0.1159  | 0.0087  | 0.0075  | 0.0017  | 0.0066   | 0.0025   | 0.0043   | 0.0005   | 0.0017   | 0.0010   |
| 0.0005  | 0.0310  | 0.0006  | 0.0081  | 0.0006  | 0.0029  | 0.0006   | 0.0009   | 0.0006   | 0.0007   | 0.0006   | 0.0009   |
| 0.0097  | 0.0056  | 0.0113  | 0.0042  | 0.0009  | 0.0036  | 0.0013   | 0.0016   | 0.0067   | 0.0014   | 0.0032   | 0.0009   |
| 0.0016  | 0.0013  | 0.0009  | 0.0016  | 0.0006  | 0.0009  | 0.0005   | 0.0012   | 0.0002   | 0.0005   | 0.0001   | 0.0002   |
| 0.0366  | 0.0576  | 0.0933  | 0.0135  | 0.0463  | 0.0052  | 0.0197   | 0.0019   | 0.0056   | 0.0011   | 0.0075   | 0.0009   |
| 0.0006  | 0.0583  | 0.0007  | 0.0178  | 0.0006  | 0.0080  | 0.0005   | 0.0016   | 0.0005   | 0.0009   | 0.0005   | 0.0003   |
| 0.0038  | 0.0049  | 0.0152  | 0.0025  | 0.0077  | 0.0051  | 0.0035   | 0.0046   | 0.0040   | 0.0025   | 0.0051   | 0.0008   |
| 0.0003  | 0.0018  | 0.0002  | 0.0019  | 0.0002  | 0.0017  | 0.0001   | 0.0018   | 0.0001   | 0.0011   | 0.0001   | 0.0007   |
| 0.0341  | 0.1085  | 0.0298  | 0.0424  | 0.0551  | 0.0249  | 0.0104   | 0.0081   | 0.0102   | 0.0033   | 0.0099   | 0.0010   |
| 0.0001  | 0.0951  | 0.0001  | 0.0395  | 0.0001  | 0.0198  | 0.0000   | 0.0077   | 0.0000   | 0.0039   | 0.0000   | 0.0019   |
| 0.0085  | 0.0011  | 0.0084  | 0.0068  | 0.0083  | 0.0026  | 0.0028   | 0.0055   | 0.0057   | 0.0021   | 0.0010   | 0.0009   |
| 0.0009  | 0.0021  | 0.0006  | 0.0025  | 0.0005  | 0.0021  | 0.0002   | 0.0023   | 0.0001   | 0.0011   | 0.0001   | 0.0008   |
| 0.0236  | 0.1715  | 0.0025  | 0.0835  | 0.0273  | 0.0394  | 0.0114   | 0.0128   | 0.0040   | 0.0041   | 0.0079   | 0.0010   |
| 0.0002  | 0.1343  | 0.0003  | 0.0695  | 0.0003  | 0.0379  | 0.0001   | 0.0209   | 0.0003   | 0.0123   | 0.0002   | 0.0072   |
| 0.0060  | 0.0038  | 0.0026  | 0.0119  | 0.0072  | 0.0066  | 0.0079   | 0.0058   | 0.0056   | 0.0012   | 0.0015   | 0.0015   |
| 0.0005  | 0.0021  | 0.0002  | 0.0024  | 0.0003  | 0.0020  | 0.0002   | 0.0025   | 0.0003   | 0.0015   | 0.0001   | 0.0008   |
| 0.0094  | 0.2252  | 0.0063  | 0.1024  | 0.0071  | 0.0370  | 0.0003   | 0.0132   | 0.0207   | 0.0048   | 0.0028   | 0.0019   |
| 0.0008  | 0.1696  | 0.0013  | 0.0964  | 0.0010  | 0.0541  | 0.0009   | 0.0353   | 0.0012   | 0.0235   | 0.0007   | 0.0152   |
| 0.0153  | 0.0103  | 0.0065  | 0.0042  | 0.0025  | 0.0051  | 0.0067   | 0.0004   | 0.0338   | 0.0029   | 0.0056   | 0.0003   |
| 0.0003  | 0.0026  | 0.0004  | 0.0025  | 0.0003  | 0.0021  | 0.0001   | 0.0023   | 0.0000   | 0.0017   | 0.0002   | 0.0012   |
| 0.0050  | 0.2664  | 0.0057  | 0.1274  | 0.0026  | 0.0548  | 0.0044   | 0.0270   | 0.0070   | 0.0033   | 0.0040   | 0.0010   |
| 0.0000  | 0.2001  | 0.0006  | 0.1178  | 0.0001  | 0.0707  | 0.0004   | 0.0503   | 0.0002   | 0.0333   | 0.0005   | 0.0231   |

## APÊNDICE B – GRÁFICOS DAS MÉTRICAS PROCESSADAS

### B.0.1 Valor RMS da tensão

**Figura 55 – Comparação Protótipo/PA1000 - Tensão RMS**



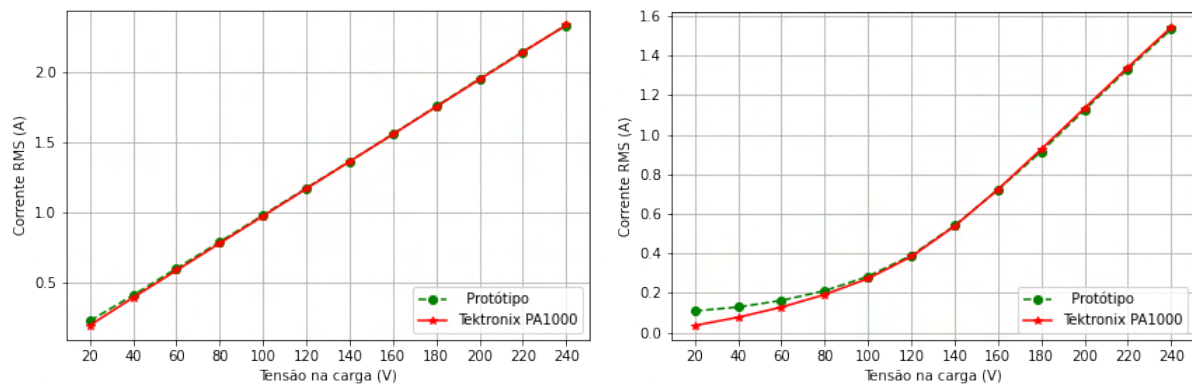
**(a) Carga R**

**(b) Carga RL**

Fonte: Elaboração própria

### B.0.2 Valor RMS da corrente

**Figura 56 – Comparação Protótipo/PA1000 - Corrente RMS**



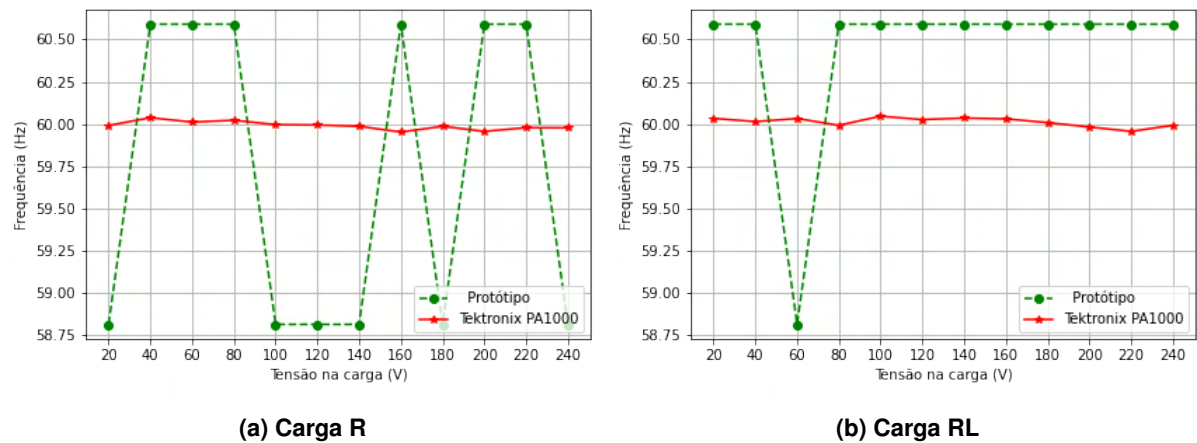
**(a) Carga R**

**(b) Carga RL**

Fonte: Elaboração própria

B.0.3 Frequência

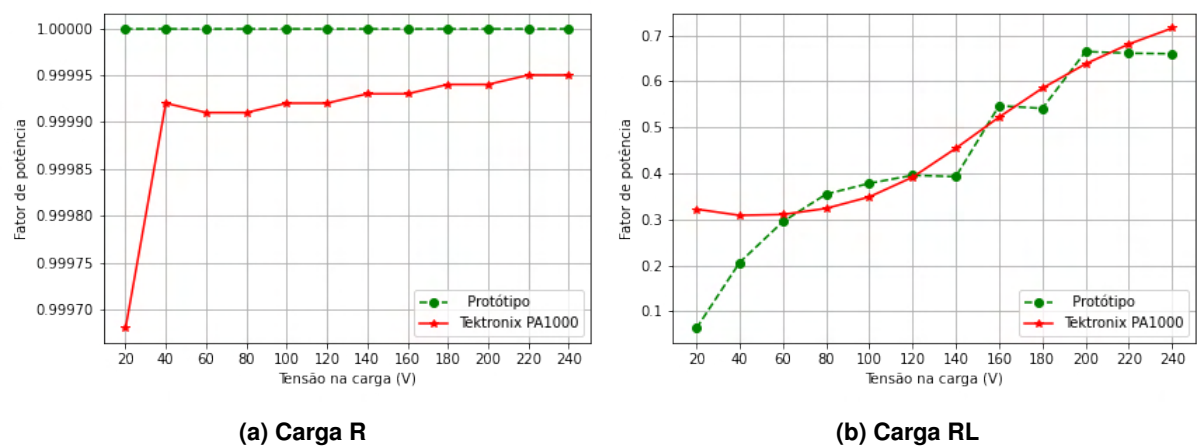
Figura 57 – Comparação Protótipo/PA1000 - Frequência



Fonte: Elaboração própria

B.0.4 Fator de potência

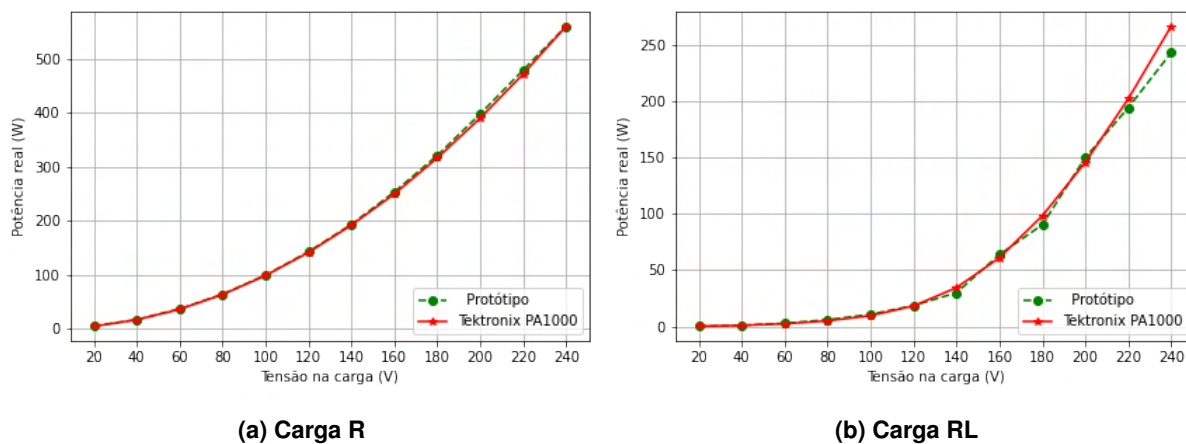
Figura 58 – Comparação Protótipo/PA1000 - Fator de potência



Fonte: Elaboração própria

## B.0.5 Potência ativa

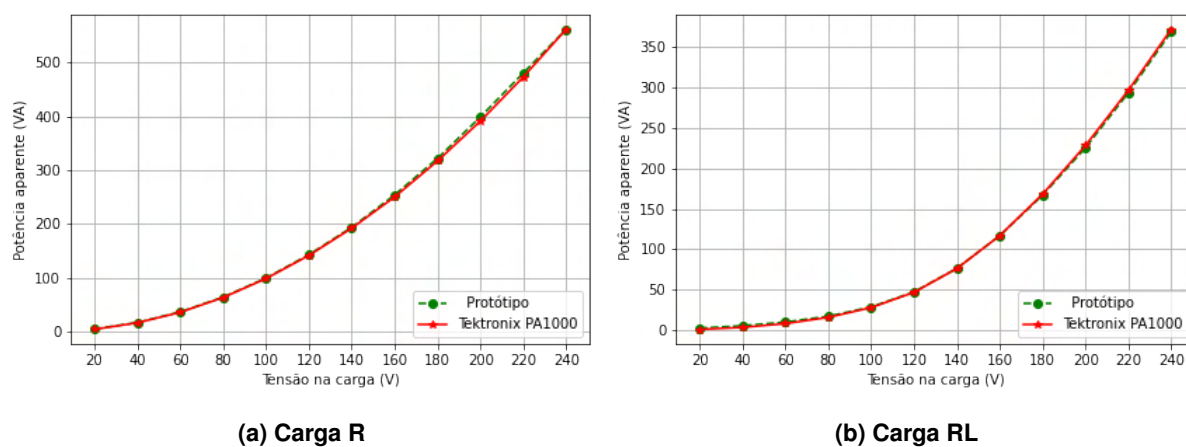
Figura 59 – Comparação Protótipo/PA1000 - Potência ativa



Fonte: Elaboração própria

## B.0.6 Potência aparente

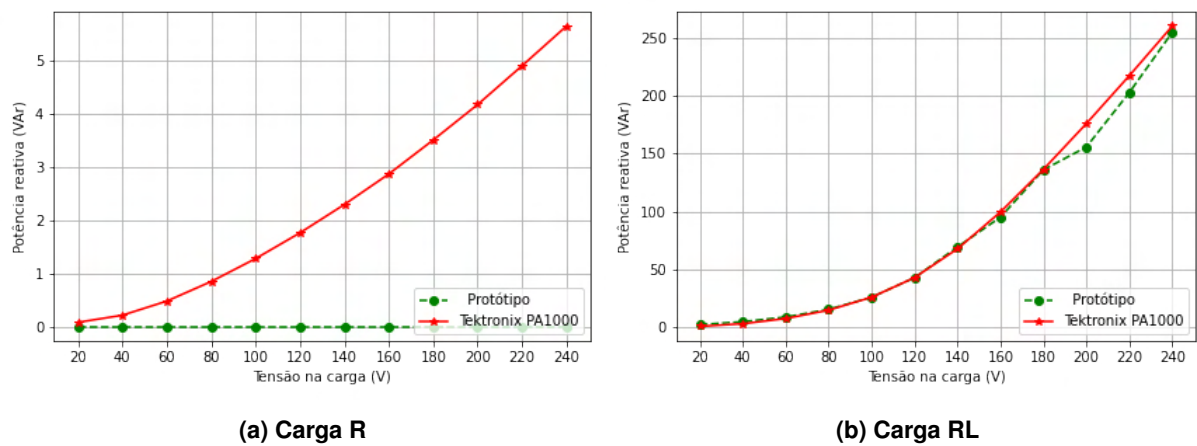
Figura 60 – Comparação Protótipo/PA1000 - Potência aparente



Fonte: Elaboração própria

B.0.7 Potência reativa

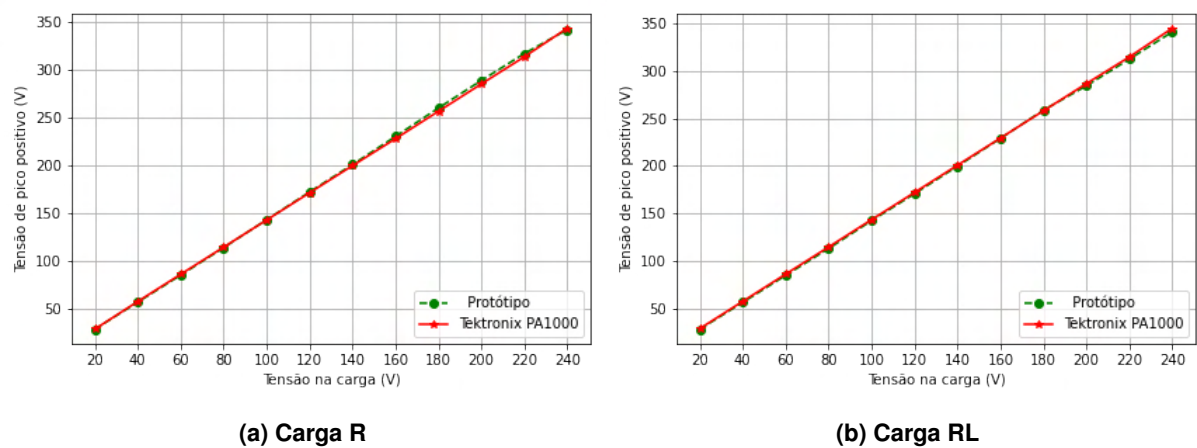
Figura 61 – Comparação Protótipo/PA1000 - Potência reativa



Fonte: Elaboração própria

B.0.8 Tensão máxima

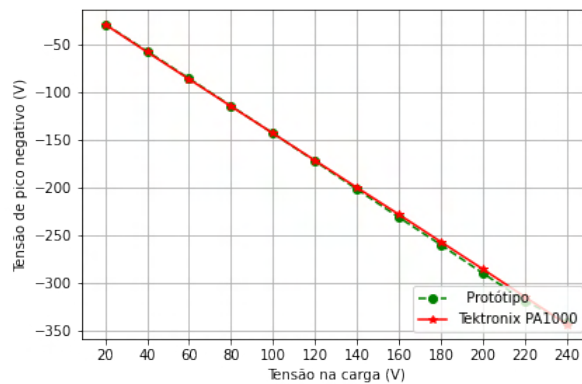
Figura 62 – Comparação Protótipo/PA1000 - Tensão de pico máxima



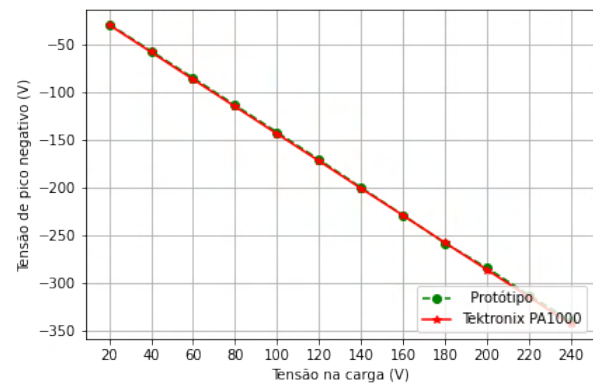
Fonte: Elaboração própria

## B.0.9 Tensão mínima

Figura 63 – Comparação Protótipo/PA1000 - Tensão de pico mínima



(a) Carga R

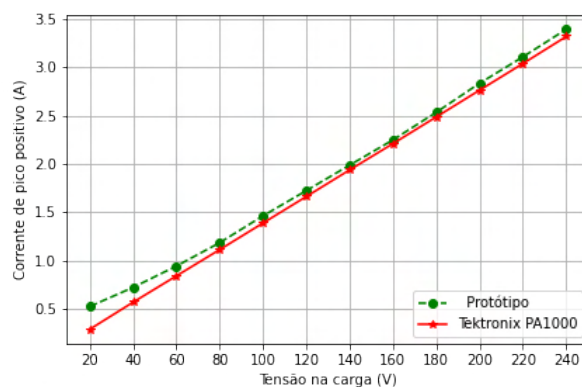


(b) Carga RL

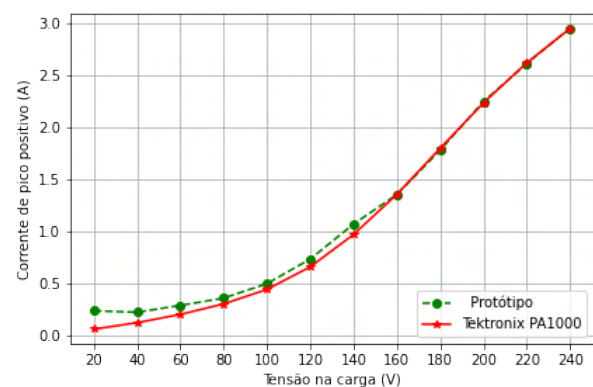
Fonte: Elaboração própria

## B.0.10 Corrente máxima

Figura 64 – Comparação Protótipo/PA1000 - Corrente de pico máxima



(a) Carga R

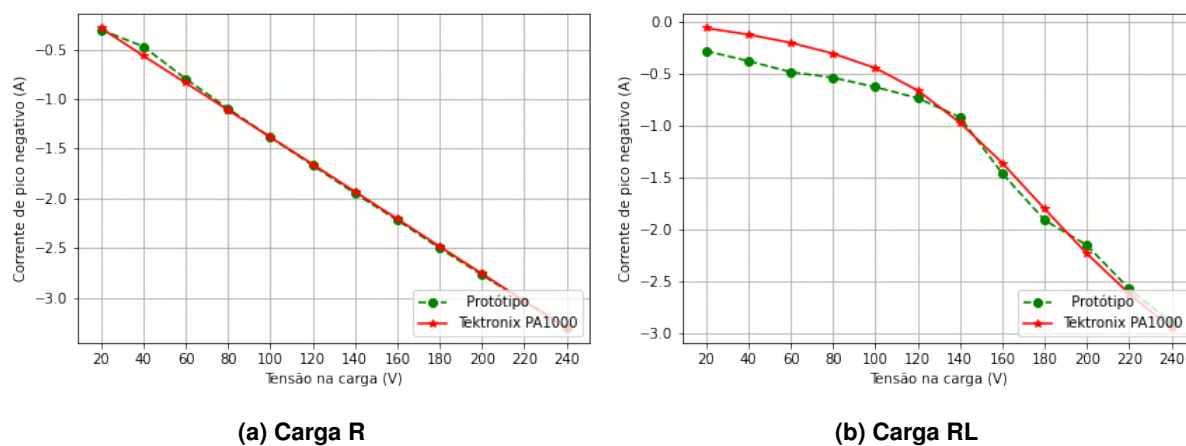


(b) Carga RL

Fonte: Elaboração própria

## B.0.11 Corrente mínima

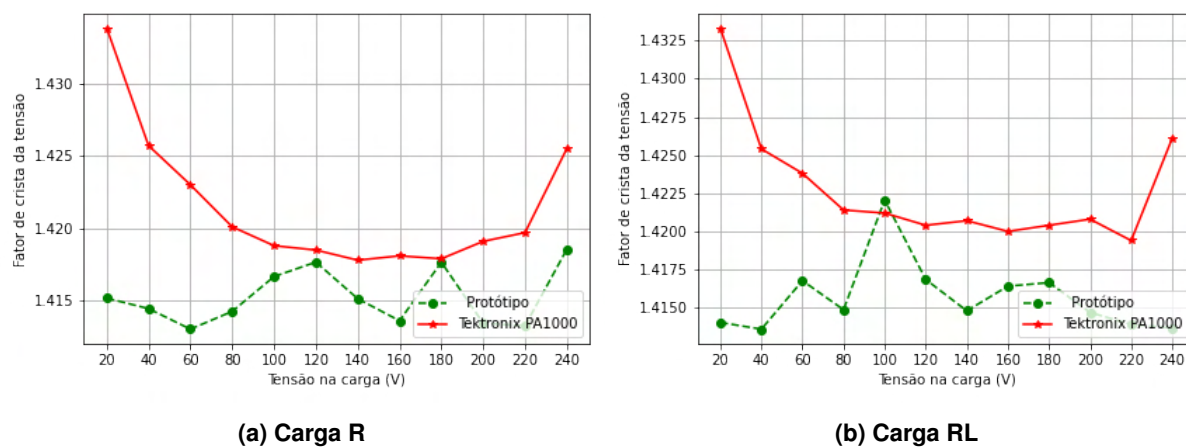
Figura 65 – Comparação Protótipo/PA1000 - Corrente de pico mínima



Fonte: Elaboração própria

## B.0.12 Fator de crista da tensão

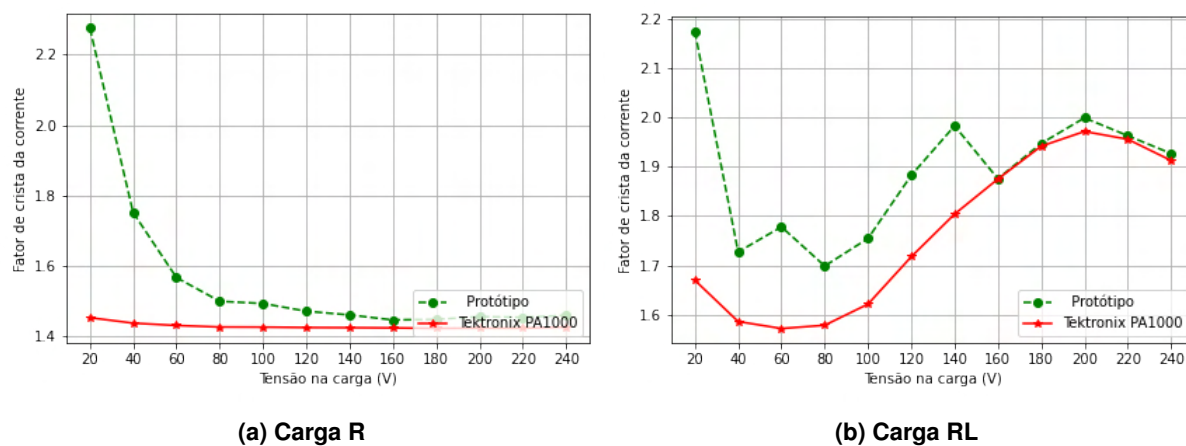
Figura 66 – Comparação Protótipo/PA1000 - Fator de crista da tensão



Fonte: Elaboração própria

## B.0.13 Fator de crista da corrente

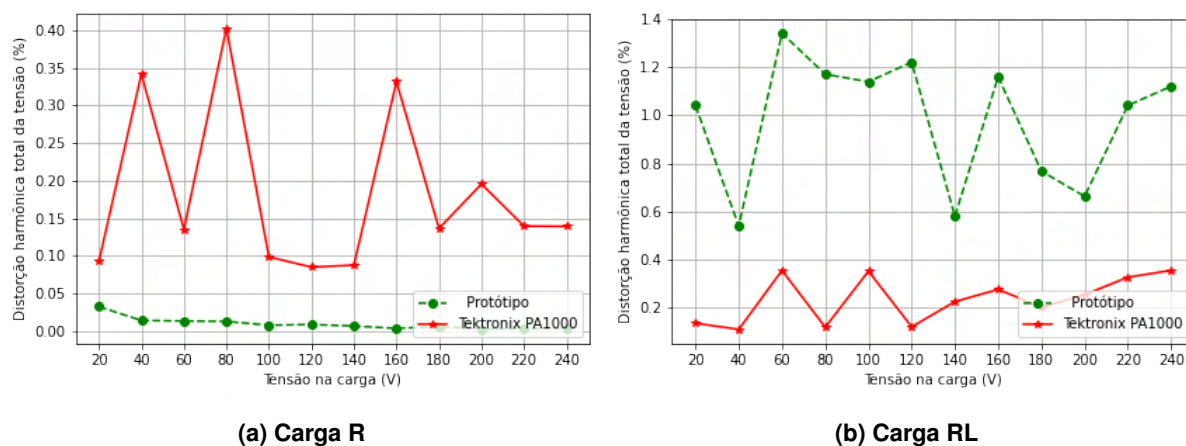
Figura 67 – Comparação Protótipo/PA1000 - Fator de crista da corrente



Fonte: Elaboração própria

## B.0.14 THD da tensão

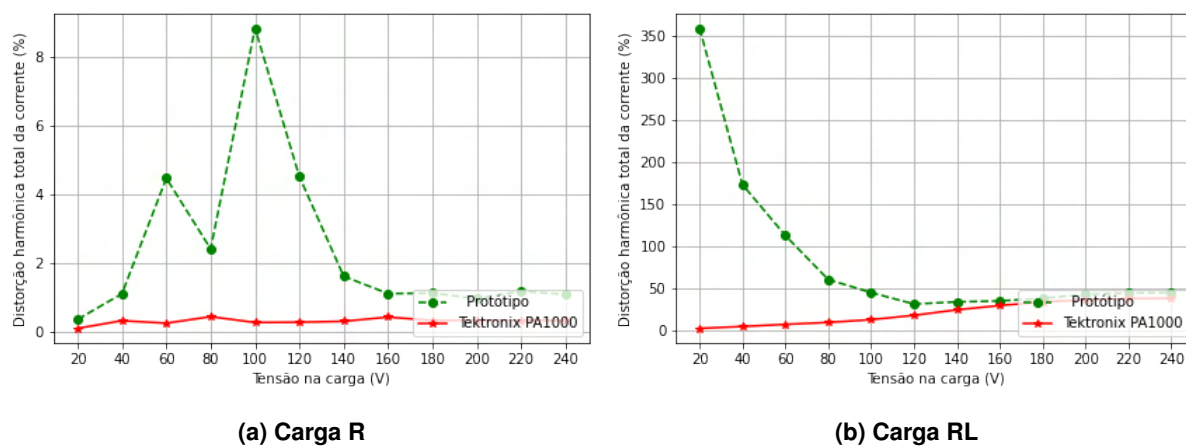
Figura 68 – Comparação Protótipo/PA1000 - THD da tensão



Fonte: Elaboração própria

## B.0.15 THD da corrente

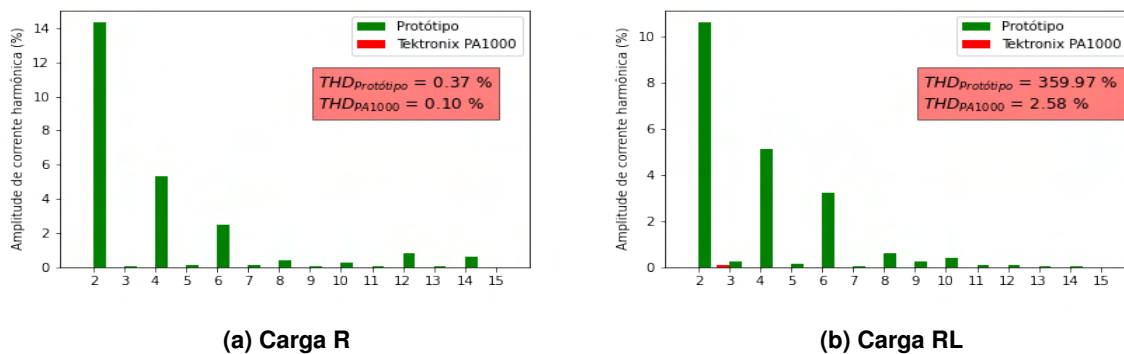
Figura 69 – Comparação Protótipo/PA1000 - THD da corrente



Fonte: Elaboração própria

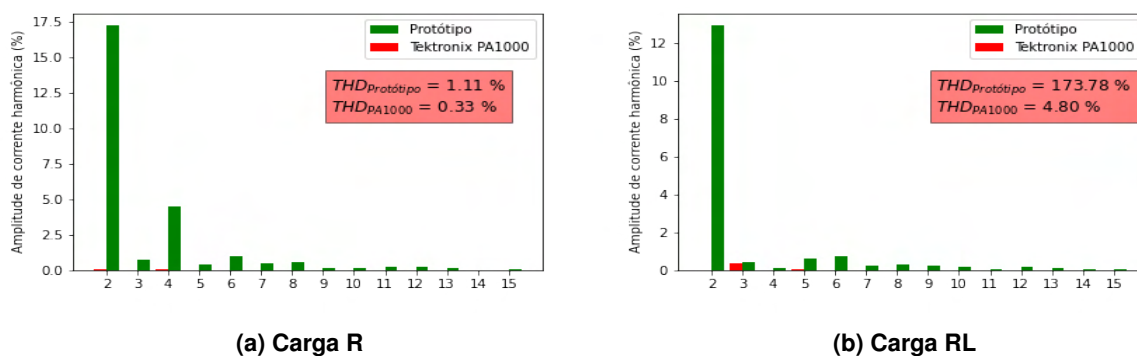
## APÊNDICE C – GRÁFICOS DAS ANÁLISES DE HARMÔNICOS

Figura 70 – Comparação Protótipo/PA1000 - Harmônicos de corrente 20V



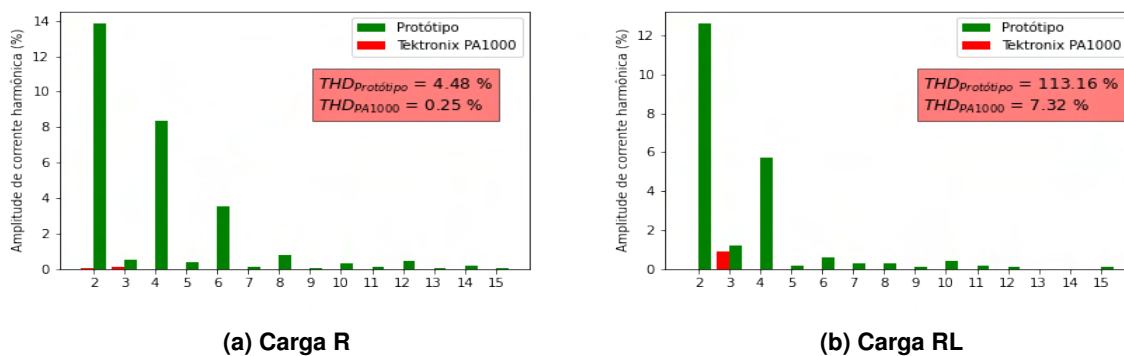
Fonte: Elaboração própria

Figura 71 – Comparação Protótipo/PA1000 - Harmônicos de corrente 40V



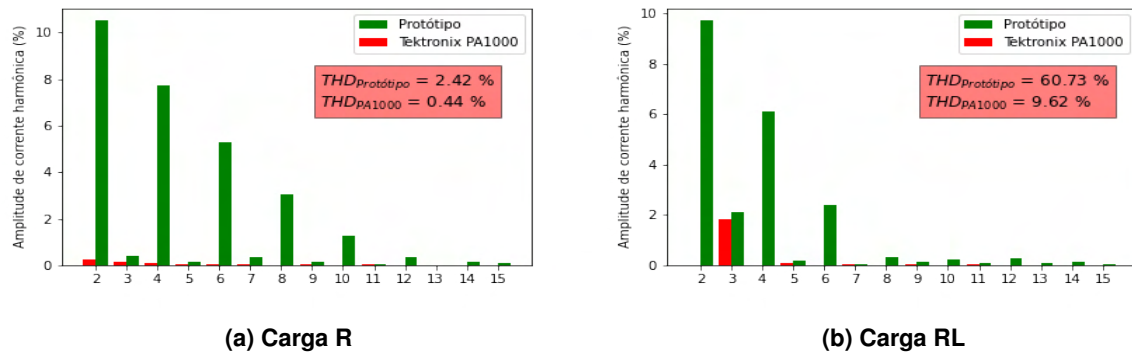
Fonte: Elaboração própria

Figura 72 – Comparação Protótipo/PA1000 - Harmônicos de corrente 60V



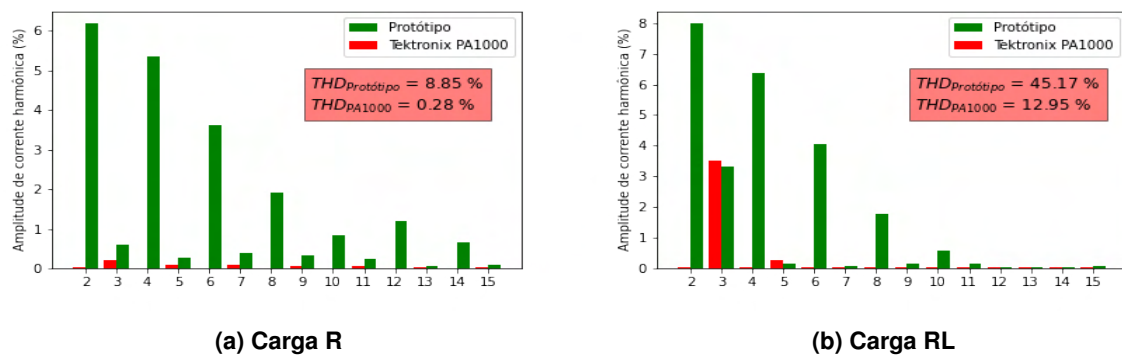
Fonte: Elaboração própria

**Figura 73 – Comparação Protótipo/PA1000 - Harmônicos de corrente 80V**



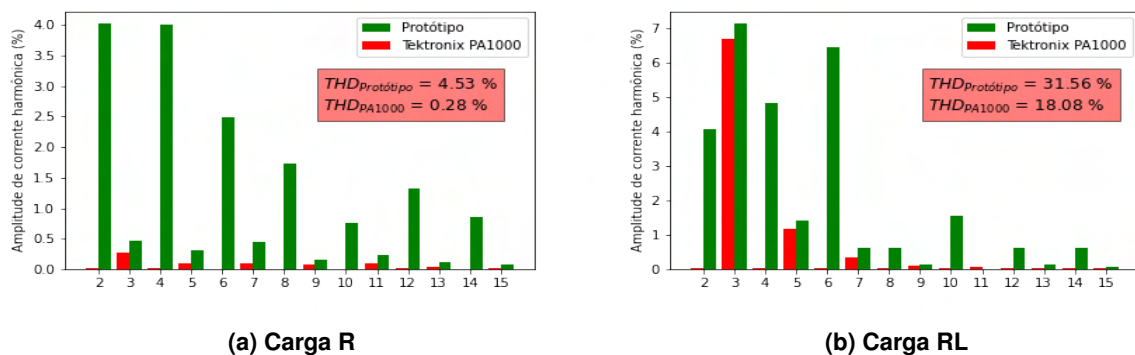
Fonte: Elaboração própria

**Figura 74 – Comparação Protótipo/PA1000 - Harmônicos de corrente 100V**



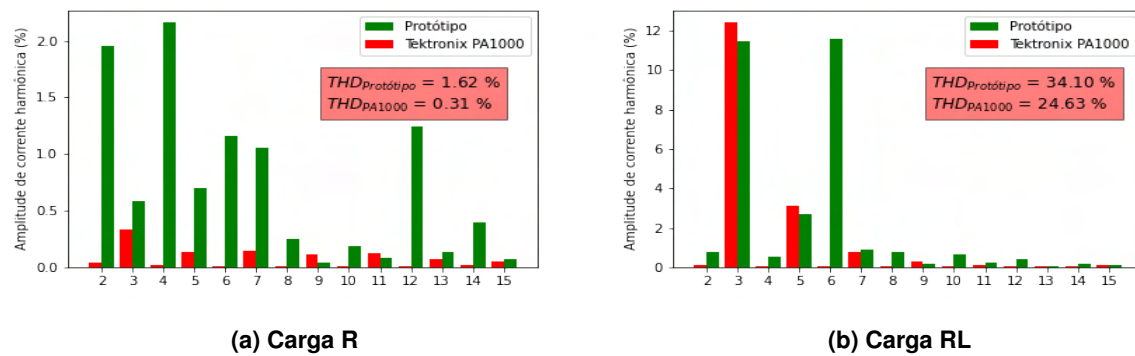
Fonte: Elaboração própria

**Figura 75 – Comparação Protótipo/PA1000 - Harmônicos de corrente 120V**



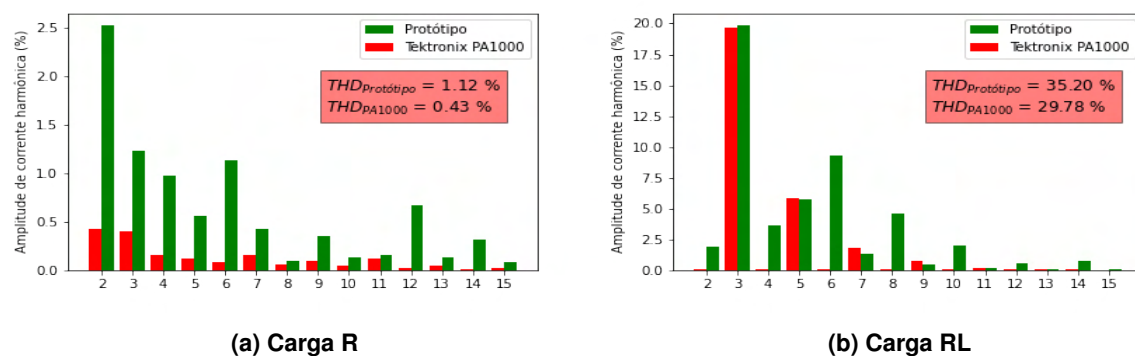
Fonte: Elaboração própria

Figura 76 – Comparação Protótipo/PA1000 - Harmônicos de corrente 140V



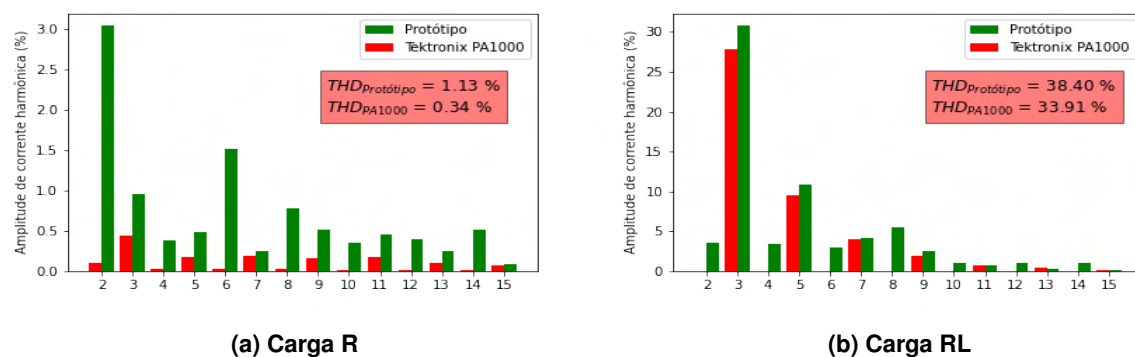
Fonte: Elaboração própria

Figura 77 – Comparação Protótipo/PA1000 - Harmônicos de corrente 160V



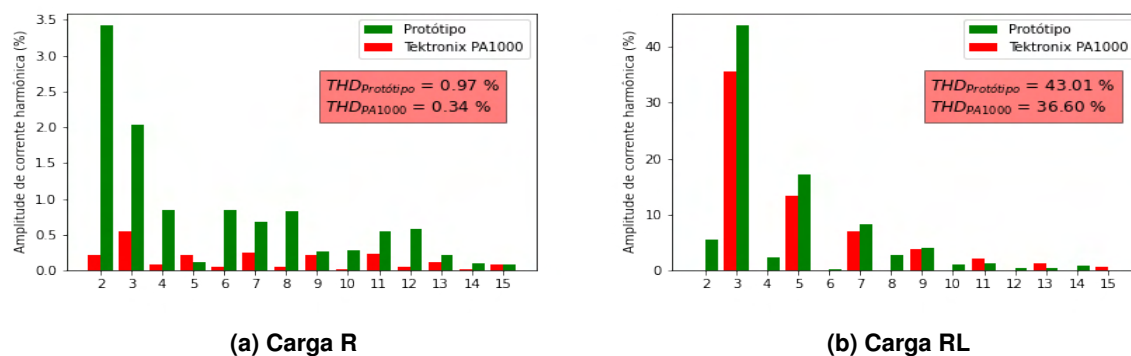
Fonte: Elaboração própria

Figura 78 – Comparação Protótipo/PA1000 - Harmônicos de corrente 180V



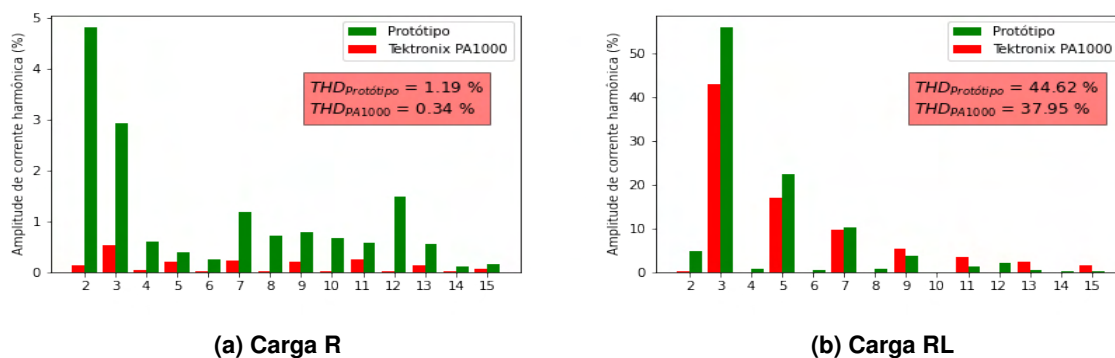
Fonte: Elaboração própria

**Figura 79 – Comparação Protótipo/PA1000 - Harmônicos de corrente 200V**



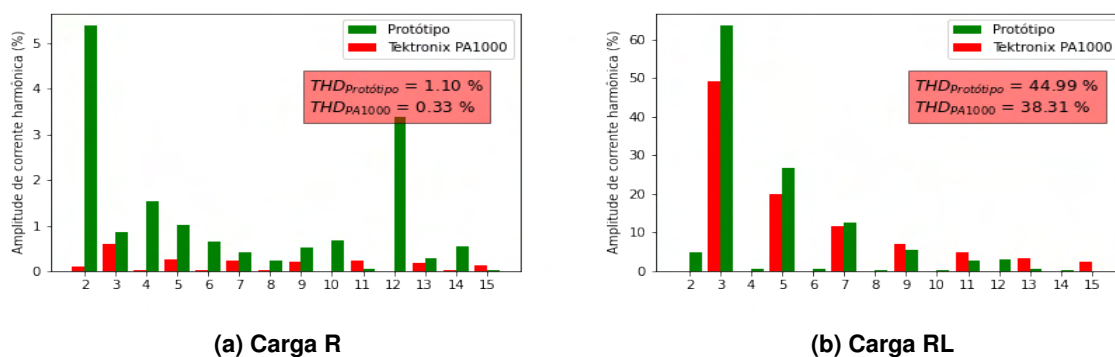
Fonte: Elaboração própria

**Figura 80 – Comparação Protótipo/PA1000 - Harmônicos de corrente 220V**



Fonte: Elaboração própria

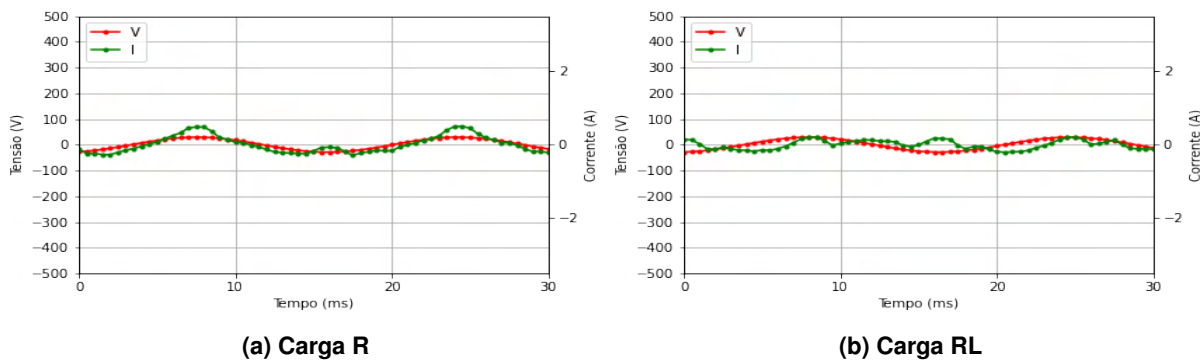
**Figura 81 – Comparação Protótipo/PA1000 - Harmônicos de corrente 240V**



Fonte: Elaboração própria

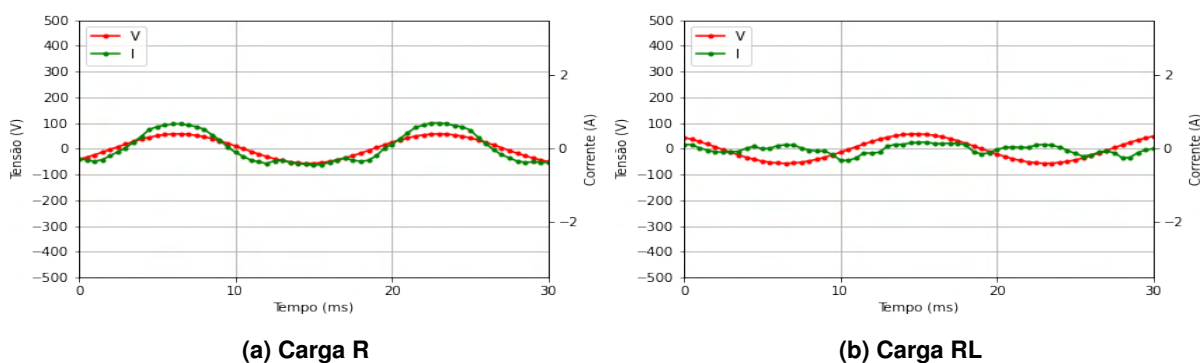
## APÊNDICE D – FORMAS DE ONDA DE TENSÃO E CORRENTE

Figura 82 – Formas de onda de tensão e corrente - Entrada 20V



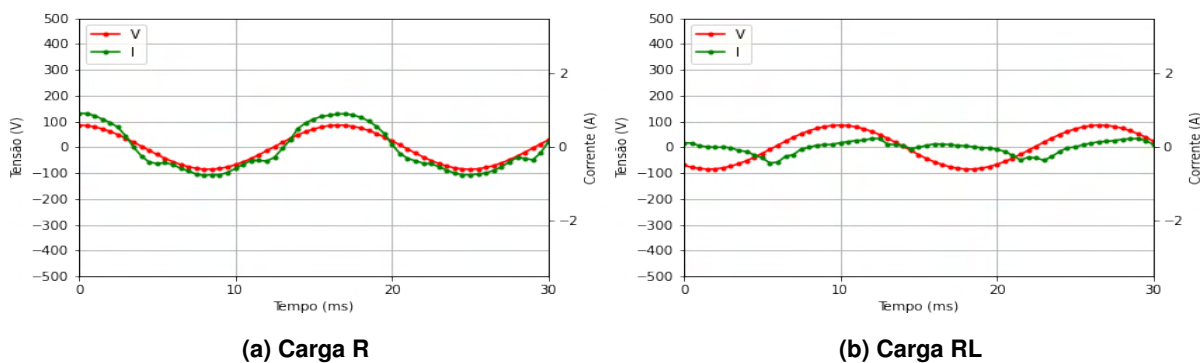
Fonte: Elaboração própria

Figura 83 – Formas de onda de tensão e corrente - Entrada 40V

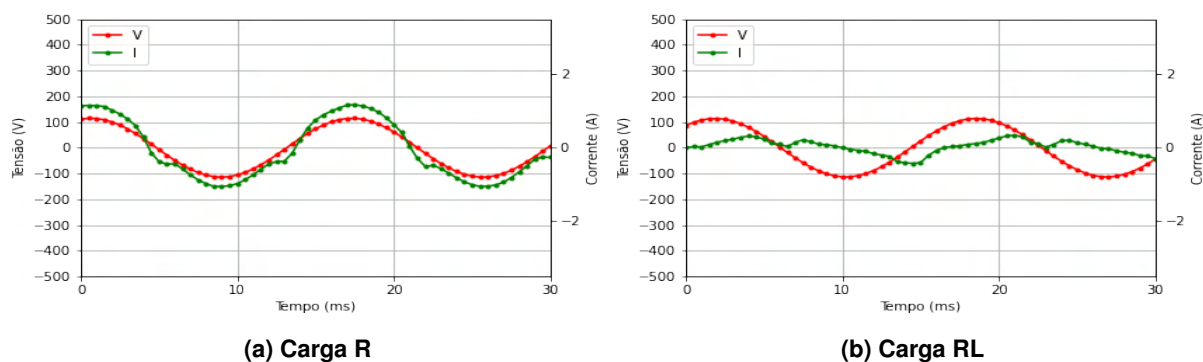


Fonte: Elaboração própria

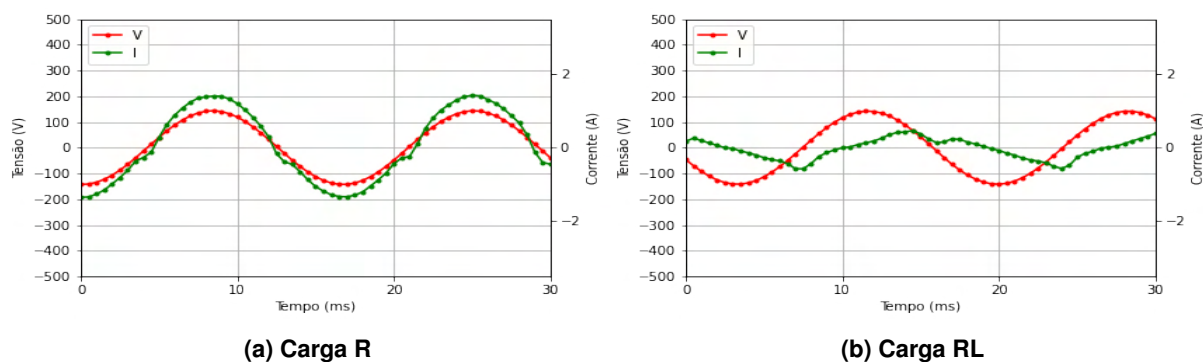
Figura 84 – Formas de onda de tensão e corrente - Entrada 60V



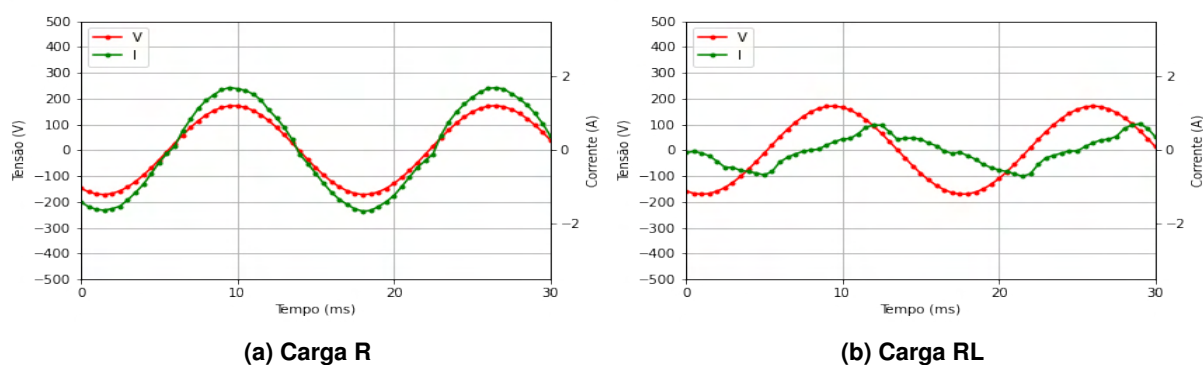
Fonte: Elaboração própria

**Figura 85 – Formas de onda de tensão e corrente - Entrada 80V**

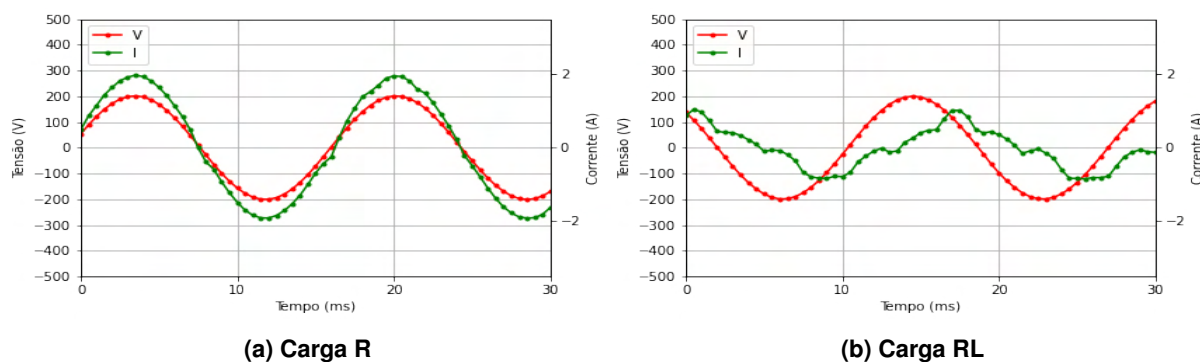
Fonte: Elaboração própria

**Figura 86 – Formas de onda de tensão e corrente - Entrada 100V**

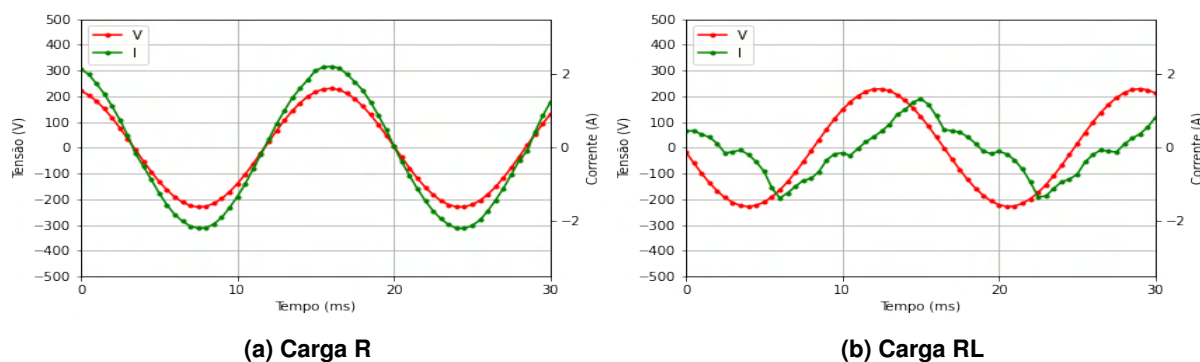
Fonte: Elaboração própria

**Figura 87 – Formas de onda de tensão e corrente - Entrada 120V**

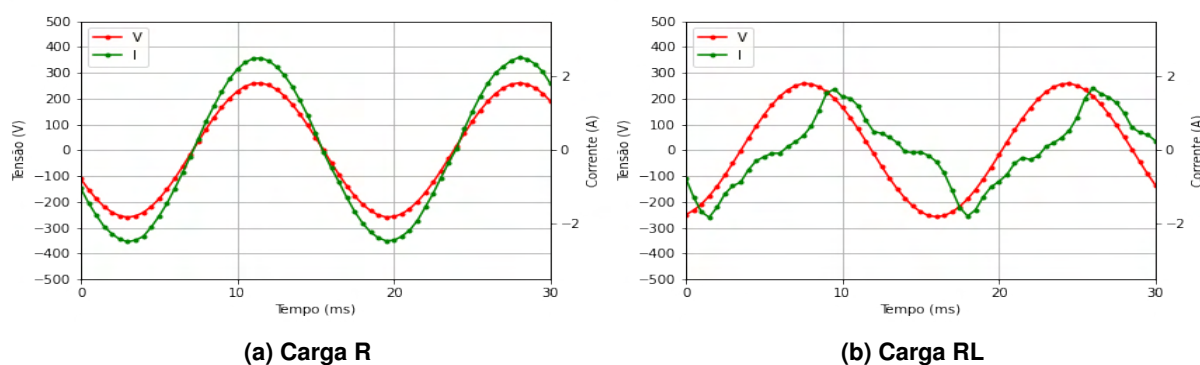
Fonte: Elaboração própria

**Figura 88 – Formas de onda de tensão e corrente - Entrada 140V**

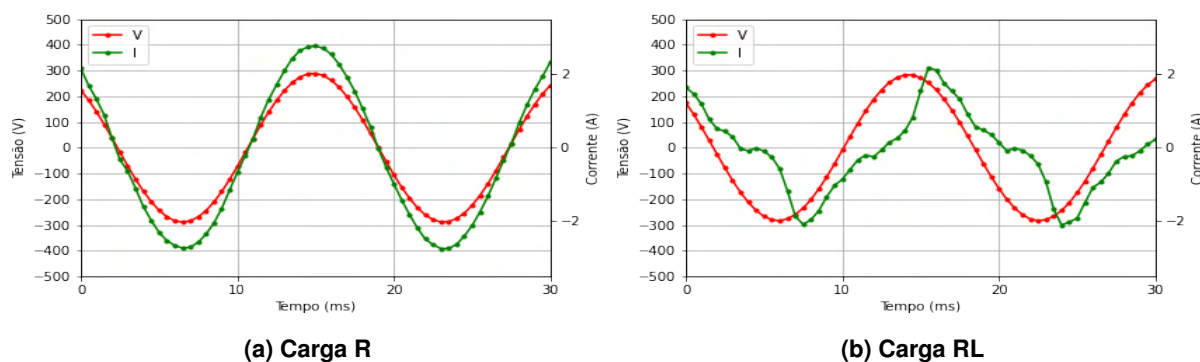
Fonte: Elaboração própria

**Figura 89 – Formas de onda de tensão e corrente - Entrada 160V**

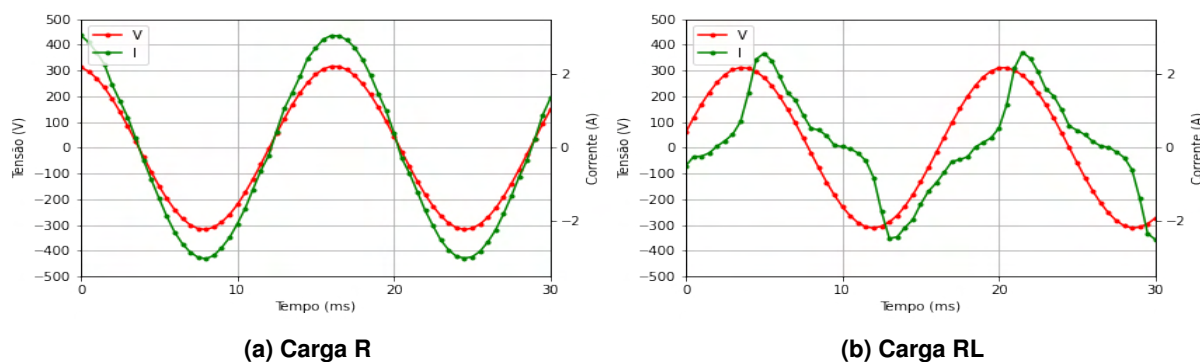
Fonte: Elaboração própria

**Figura 90 – Formas de onda de tensão e corrente - Entrada 180V**

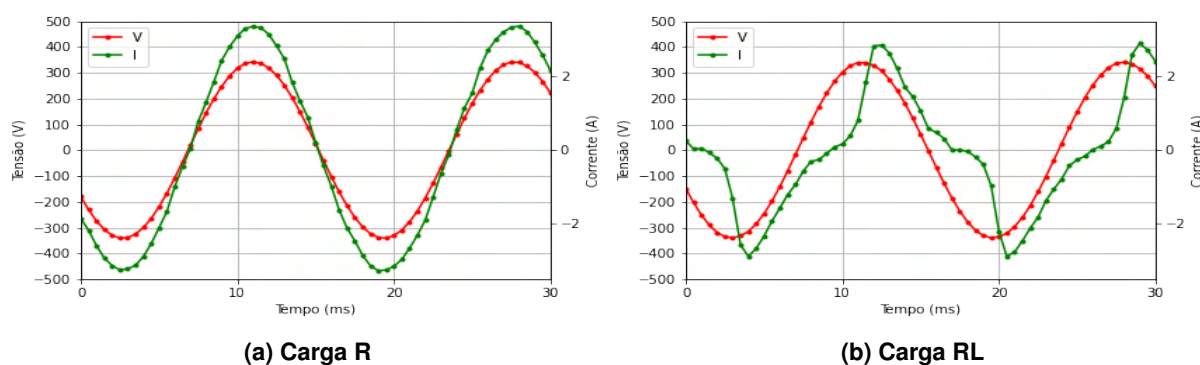
Fonte: Elaboração própria

**Figura 91 – Formas de onda de tensão e corrente - Entrada 200V**

Fonte: Elaboração própria

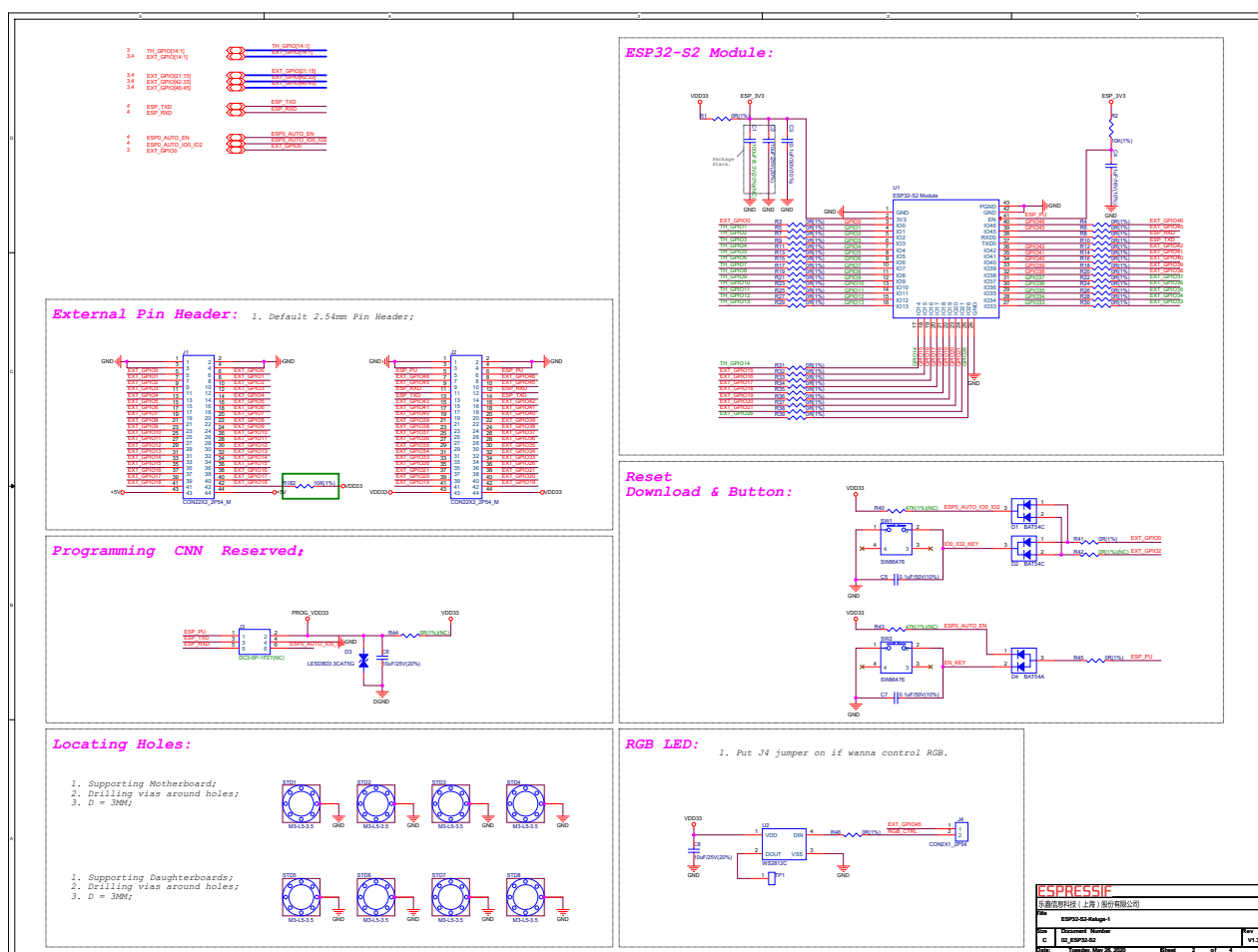
**Figura 92 – Formas de onda de tensão e corrente - Entrada 220V**

Fonte: Elaboração própria

**Figura 93 – Formas de onda de tensão e corrente - Entrada 240V**

Fonte: Elaboração própria

## APÊNDICE E – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DA PLACA DE INSTRUMENTAÇÃO - KIT ESP32-S2 KALUGA-1 V1.3







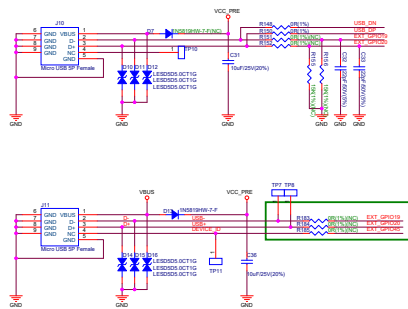


### JTAG Switch:

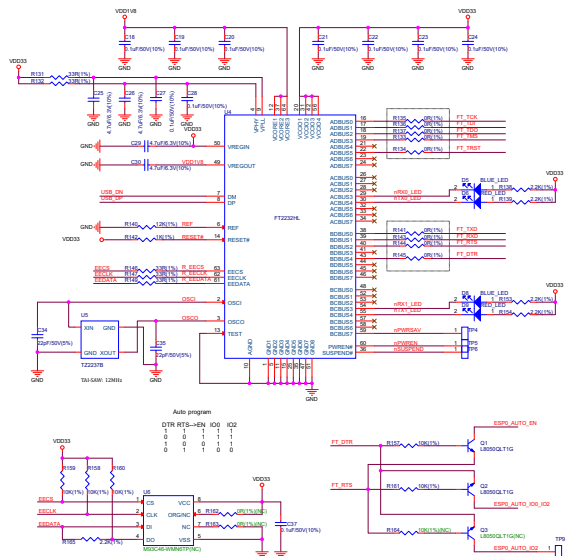
1. Switch for JTAG: default, JTAG off/WC.
2. Switch ON for JTAG debug;



### USB Power&Communication:



### FT2232HL:



### Power Charge:

