

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FEELT – FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

GUILHERME GUIDO GERALDO NETO

**Análise de desempenho de medidores de energia ativa e reativa em condições não  
senoidais**

Uberlândia

2025

GUILHERME GUIDO GERALDO NETO

**Análise de desempenho de medidores de energia ativa e reativa em condições não  
senoidais**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Faculdade de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Uberlândia como  
requisito parcial para obtenção do título de  
bacharel em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. José Rubens Macedo  
Júnior

Uberlândia

2025

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU  
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

G354 Geraldo Neto, Guilherme Guido, 2001-  
2025 Análise de desempenho de medidores de energia ativa e  
reativa em condições não senoides [recurso eletrônico] /  
Guilherme Guido Geraldo Neto. - 2025.  
  
Orientador: José Rubens Macedo Júnior.  
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em  
Engenharia Elétrica.  
Modo de acesso: Internet.  
Inclui bibliografia.  
Inclui ilustrações.  
  
1. Engenharia elétrica. I. Macedo Júnior, José Rubens  
,1972-, (Orient.). II. Universidade Federal de  
Uberlândia. Graduação em Engenharia Elétrica. III.  
Título.

CDU: 621.3

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091  
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



## UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica  
Av. João Naves de Ávila, 2121 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902  
Telefone: +55 (34) 3239-4708 - cocel@ufu.br



### ATA DE DEFESA - GRADUAÇÃO

|  |   |                 |       |                       |
|--|---|-----------------|-------|-----------------------|
| Curso de Graduação em:                                 | 1449BI - Graduação em Engenharia Elétrica: Bacharelado - Integral                               |                 |       |                       |
| Defesa de:   | FEELT31917 - Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica                              |                 |       |                       |
| Data:  | 30/04/2025  | Hora de início: | 16h30 | Hora de encerramento: |
| Matrícula do Discente:                                 | 12011EEL004   |                 |       |                       |
| Nome do Discente:                                      | Guilherme Guido Geraldo Neto  |                 |       |                       |
| Título do Trabalho:                                    | <b>Análise de desempenho de medidores de energia ativa e reativa em condições não senoidais</b> |                 |       |                       |
| A carga horária curricular foi cumprida integralmente? | <input checked="" type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não                            |                 |       |                       |

Reuniu-se, em plataforma digital de comunicação, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, assim composta: Professores **Daniel Pereira de Carvalho (FEELT/UFU)**, **Paulo Henrique Oliveira Rezende (FEELT/UFU)** e **José Rubens Macedo Junior (FEELT/UFU)**, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa, **Prof. Dr. José Rubens Macedo Junior**, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao discente a palavra, para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do curso.

A seguir o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o candidato:

Aprovado sem nota.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **José Rubens Macedo Junior, Professor(a) do Magistério Superior**, em 30/04/2025, às 17:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Henrique Oliveira Rezende**, **Professor(a) do Magistério Superior**, em 30/04/2025, às 17:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Pereira de Carvalho**, **Professor(a) do Magistério Superior**, em 30/04/2025, às 17:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site  
[https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?  
acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **6281818** e o código CRC **94A7A65C**.

---

**Referência:** Processo nº 23117.026426/2025-48

SEI nº 6281818

GUILHERME GUIDO GERALDO NETO

**Análise de desempenho de medidores de energia ativa e reativa em condições não  
senoidais**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Faculdade de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Uberlândia como  
requisito parcial para obtenção do título de  
bacharel em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. José Rubens Macedo  
Júnior

Uberlândia, 30 de abril de 2025

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. José Rubens Macedo Júnior (UFU)

---

Prof. Dr. Daniel Pereira de Carvalho (UFU)

---

Prof. Dr. Paulo Henrique Oliveira Rezende (UFU)

## **AGRADECIMENTOS**

A princípio gostaria de agradecer aos meus pais, Elegiânia e Guilherme, por todo o suporte e apoio durante meus anos na universidade, nada disso seria possível se não fosse pelo esforço conjunto dos dois para me proporcionar as melhores condições possíveis para minha formação.

Também gostaria de agradecer à minha namorada, Ana Lívia, por todo o apoio e incentivo nos últimos meses da minha graduação. Ela teve papel fundamental na manutenção da minha saúde mental e equilíbrio emocional nesse momento repleto de mudanças e incertezas, sendo meu porto seguro e minha maior confidente.

Agradeço também aos meus companheiros de universidade, em especial ao Lucas Pacheco, que esteve comigo desde o primeiro até o último dia de curso, proporcionando muitas risadas e suporte nas mais diversas situações da minha formação acadêmica. Além dos meus companheiros de apartamento, Bruno e João Vitor, que estiveram comigo durante minha estadia na Universidade Federal de Uberlândia.

Por fim, agradeço de coração aberto ao meu professor e orientador José Rubens pelo apoio e confiança, não só durante a confecção do trabalho, mas também pelos conselhos e orientações recebidos, os quais são – e serão – fundamentais na minha carreira profissional.

## RESUMO

Este trabalho analisa a performance de medidores de energia elétrica quando submetidos a condições não senoidais, causadas principalmente por distorções harmônicas oriundas de cargas não lineares. Com o crescimento do uso de equipamentos eletrônicos, essas distorções têm se tornado cada vez mais presentes nas redes de distribuição, impactando a precisão das medições de energia ativa e reativa. Para avaliar esses efeitos, foram realizados oito testes laboratoriais com diferentes níveis de distorção, utilizando treze medidores eletrônicos de cinco fabricantes distintos. Os resultados obtidos mostraram que, em condições ideais, os medidores mantêm erros dentro da faixa permitida ( $\pm 1\%$ ). No entanto, em cenários com distorções elevadas, os desvios aumentaram significativamente, alcançando até 86% de erro na medição da potência ativa e 19% na reativa. Também foi observado que alguns medidores deixaram de registrar qualquer medição em determinadas situações. Esses resultados evidenciam a necessidade de revisão das normas técnicas e dos critérios de calibração, especialmente no que diz respeito à definição de qual parcela da potência reativa deve ser considerada (fundamental ou total). O estudo ressalta a urgência de adaptações para garantir medições mais confiáveis e justas para consumidores e concessionárias.

**Palavras-chave:** Medidores de energia, distorções harmônicas, potência ativa, potência reativa, cargas não lineares.

## ABSTRACT

This work analyzes the performance of electricity meters when subjected to non-sinusoidal conditions, mainly caused by harmonic distortions from nonlinear loads. With the increasing use of electronic devices, such distortions have become more prevalent in power distribution networks, compromising the accuracy of active and reactive energy measurements. To assess these effects, eight laboratory tests were carried out with different distortion levels, using thirteen electronic meters from five different manufacturers. The results showed that, under ideal conditions, all meters presented errors within the permitted range ( $\pm 1\%$ ). However, in scenarios with high distortion levels, measurement deviations increased significantly, reaching up to 86% error in active power and 19% in reactive power. It was also observed that some meters failed to register any readings under specific test conditions. These findings highlight the need to revise current technical standards and calibration criteria, particularly concerning which component of reactive power (fundamental or total) should be considered. The study emphasizes the urgency of adapting existing regulations to ensure more reliable and fair measurements for both consumers and utility companies in the context of modern electrical systems increasingly affected by non-linear behavior.

**Keywords:** Energy meters, harmonic distortions, active power, reactive power, nonlinear loads.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Formas de onda senoidal e distorcida .....                | 19 |
| Figura 2 – Triângulo de Potências .....                              | 26 |
| Figura 3 – Arranjo laboratorial usado durante os testes .....        | 29 |
| Figura 4 – Formas de onda do Teste 1 .....                           | 30 |
| Figura 5 – Formas de onda do Teste 2 .....                           | 31 |
| Figura 6 – Formas de onda do Teste 3 .....                           | 31 |
| Figura 7 – Formas de onda do Teste 4 .....                           | 32 |
| Figura 8 – Formas de onda do Teste 5 .....                           | 32 |
| Figura 9 – Formas de onda do Teste 6 .....                           | 33 |
| Figura 10 – Formas de onda do Teste 7 .....                          | 34 |
| Figura 11 – Formas de onda do Teste 8 .....                          | 34 |
| Figura 12 – Desvios percentuais de potência ativa do Teste 1 .....   | 39 |
| Figura 13 – Desvios percentuais de potência ativa do Teste 2 .....   | 40 |
| Figura 14 – Desvios percentuais de potência ativa do Teste 3 .....   | 40 |
| Figura 15 – Desvios percentuais de potência ativa do Teste 4 .....   | 41 |
| Figura 16 – Desvios percentuais de potência ativa do Teste 5 .....   | 41 |
| Figura 17 – Desvios percentuais de potência ativa do Teste 6 .....   | 42 |
| Figura 18 – Desvios percentuais de potência ativa do Teste 7 .....   | 42 |
| Figura 19 – Desvios percentuais de potência ativa do Teste 8 .....   | 43 |
| Figura 20 – Desvios percentuais de potência reativa do Teste 2 ..... | 45 |
| Figura 21 – Desvios percentuais de potência reativa do Teste 3 ..... | 45 |
| Figura 22 – Desvios percentuais de potência reativa do Teste 4 ..... | 46 |
| Figura 23 – Desvios percentuais de potência reativa do Teste 5 ..... | 46 |
| Figura 24 – Desvios percentuais de potência reativa do Teste 6 ..... | 47 |
| Figura 25 – Desvios percentuais de potência reativa do Teste 7 ..... | 47 |

## **LISTA DE TABELAS**

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Distorção Harmônica Total de Tensão .....                            | 35 |
| Tabela 2 – Distorção Harmônica Total de Corrente .....                          | 35 |
| Tabela 3 – Valores de referência de Potência Ativa.....                         | 37 |
| Tabela 4 – Valores de referência de Potência Reativa .....                      | 38 |
| Tabela 5 – Valores de referência e medidor de potência reativa do Teste 8 ..... | 48 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

|       |   |
|-------|---|
| A/D   | Analógico/Digital                                 |
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica              |
| CC    | Corrente contínua                                 |
| CA    | Corrente alternada                                |
| DHT   | Distorção Harmônica Total                         |
| DHTI  | Distorção Harmônica Total de Corrente             |
| DHTV  | Distorção Harmônica Total de Tensão               |
| FP    | Fator de Potência                                 |
| IEEE  | Institute of Electrical and Electronics Engineers |
| kWh   | Quilowatt-hora                                    |
| LED   | Diodo Emissor de Luz                              |
| RMS   | Root Mean Square (valor eficaz)                   |
| SI    | Sistema Internacional de Unidades                 |
| TC    | Transformador de Corrente                         |
| TP    | Transformador de Potencial                        |
| VAR   | Volt-Ampere Reativo                               |
| VTCD  | Variações de Tensão de Curta Duração              |
| W     | Watt  |
| Ws    | Watt-segundo                                      |

## SUMÁRIO

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | INTRODUÇÃO .....                                      | 12 |
| 1.1   | Contextualização.....                                 | 12 |
| 1.2   | Motivação .....                                       | 12 |
| 1.3   | Objetivos.....  | 13 |
| 2     | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....                           | 14 |
| 2.1   | Energia .....   | 14 |
| 2.1.1 | Conceito .....  | 14 |
| 2.1.2 | Energia Ativa .....                                   | 14 |
| 2.1.3 | Energia Reativa.....                                  | 15 |
| 2.2   | Medidores de energia.....                             | 15 |
| 2.2.1 | Medidores eletromecânicos .....                       | 15 |
| 2.2.2 | Medidores eletrônicos.....                            | 17 |
| 2.3   | Harmônicos.....                                       | 18 |
| 2.3.1 | Conceito .....  | 18 |
| 2.3.2 | Origem e Geração .....                                | 19 |
| 2.3.3 | Análise Matemática .....                              | 20 |
| 2.3.4 | Efeitos no Sistema Elétrico.....                      | 21 |
| 2.3.5 | Impacto nas medições .....                            | 22 |
| 2.4   | Potência Ativa (P).....                               | 22 |
| 2.4.1 | Conceito .....  | 22 |
| 2.4.2 | Fundamentos Matemáticos .....                         | 23 |
| 2.4.3 | Potência Ativa e Potência Ativa Fundamental .....     | 23 |
| 2.5   | Potência Reativa (Q).....                             | 24 |
| 2.5.1 | Conceito .....  | 24 |
| 2.5.2 | Fundamentos Matemáticos .....                         | 25 |
| 2.5.3 | Potência Reativa e Potência Reativa Fundamental ..... | 25 |
| 2.6   | Potência Aparente .....                               | 26 |
| 2.7   | Fator de Potência (FP) .....                          | 27 |
| 2.7.1 | Conceito .....  | 27 |
| 2.7.2 | Correção do Fator de Potência.....                    | 27 |
| 3     | TESTES LABORATORIAIS .....                            | 29 |
| 3.1   | Detalhamento dos Testes .....                         | 29 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3.2   | Distorção Harmônica .....                                      | 35 |
| 3.3   | Valores de Referência .....                                    | 36 |
| 3.3.1 | Valores de Referência de Potência Ativa .....                  | 36 |
| 3.3.2 | Valores de Referência de Potência Reativa .....                | 37 |
| 4     | RESULTADOS .....   | 39 |
| 4.1   | Resultados de Potência Ativa.....                              | 39 |
| 4.2   | Resultados de Potência Reativa .....                           | 44 |
| 5     | CONCLUSÃO .....  | 50 |
|       | REFERÊNCIAS .....  | 51 |
|       | APÊNDICE A – Detalhamento dos testes .....                     | 52 |
|       | APÊNDICE B – Resultados dos testes para potência ativa.....    | 54 |
|       | APÊNDICE C – Resultados dos testes para potência reativa ..... | 56 |

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 Contextualização

A medição de energia elétrica desempenha um papel fundamental na gestão e no faturamento do consumo por parte das concessionárias de energia, sendo um elemento essencial para a correta tarifação e para o planejamento dos sistemas elétricos de potência. Historicamente, os primeiros medidores eram baseados em tecnologias eletromecânicas, os quais, apesar de robustos, apresentavam limitações quanto à precisão em condições não senoidais de tensão e corrente. Com o avanço tecnológico, os medidores eletrônicos passaram a ser amplamente utilizados, proporcionando maior precisão e funcionalidades avançadas, como armazenamento de dados e transmissão remota de informações. No entanto, mesmo com tais avanços, ainda existem desafios relacionados à medição da energia elétrica, especialmente em sistemas com significativa presença de harmônicos.

O crescente uso de cargas não lineares em instalações elétricas tem intensificado a distorção harmônica, impactando diretamente a medição da energia ativa e reativa. Em condições ideais, as formas de onda de tensão e corrente seriam perfeitamente senoidais com apenas a frequência fundamental de 60 Hz. Entretanto, com a presença de harmônicos, os diferentes métodos de medição existentes podem apresentar divergências nos valores obtidos, levando a inconsistências na cobrança de energia. Essa disparidade de medição pode beneficiar determinados consumidores em detrimento de outros, comprometendo a equidade do sistema tarifário.

### 1.2 Motivação

A complexidade crescente dos sistemas elétricos modernos, impulsionada pela integração de cargas não lineares e pela busca por maior eficiência energética, tem intensificado as distorções harmônicas nas redes de distribuição. Nesse contexto, garantir a confiabilidade na medição da energia elétrica torna-se um desafio relevante. Este estudo busca compreender o desempenho de diferentes medidores sob condições não senoidais, tema historicamente debatido na engenharia elétrica, como demonstra o trabalho pioneiro de Hollister (1915). A investigação ganha ainda mais importância com a evolução das normativas internacionais, como a IEEE 1459-2010 — *IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power*

*Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions* (IEEE, 2010), que define parâmetros de medição em condições com distorções harmônicas.

Estudos práticos que avaliem o comportamento dos medidores tornam-se fundamentais para identificar imprecisões e suas implicações técnicas e econômicas. Pesquisas recentes, como as de Macedo Jr. et al. (2020), apontam desvios superiores a 30% na medição de energia ativa em condições de elevada distorção de corrente. O trabalho de Xavier et al. (2020), por sua vez, abordou as divergências entre métodos de medição de energia reativa em condições não senoidais. Esses achados reforçam a necessidade de investigações contínuas sobre a adequação dos medidores às novas exigências dos sistemas elétricos.

### 1.3 Objetivos

O objetivo deste trabalho é investigar o impacto das distorções harmônicas nas medições de energia ativa e reativa, analisando as discrepâncias observadas entre diferentes medidores quando submetidos a condições não senoidais de tensão e corrente. A partir de testes experimentais, serão avaliadas as variações nos valores medidos, em relação à valores teóricos de referência, e suas implicações na precisão e confiabilidade dos equipamentos.

Os resultados obtidos permitirão demonstrar como a presença de componentes harmônicos pode afetar significativamente as medições, resultando em desvios que influenciam tanto o controle técnico dos sistemas elétricos quanto a tarifação da energia consumida. Dessa forma, este estudo visa expor a magnitude do problema e ressaltar a necessidade de adequação das normas e dos processos de calibração dos medidores, garantindo que as medições reflitam com maior fidelidade o real consumo de energia e exponha quais condições não senoidais impactam com maior intensidade consumidores e concessionárias.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Energia

#### 2.1.1 Conceito

Em sistemas elétricos que operam em corrente alternada (CA), mais comuns devido à sua eficiência, o conceito de energia elétrica é entendido como a capacidade de realizar trabalho por meio da movimentação de cargas elétricas, ou seja, os elétrons, em um circuito. Nesses sistemas, destacam-se duas formas principais de energia: a energia ativa e a energia reativa (COTRIM, 2017).

#### 2.1.2 Energia Ativa

A energia ativa refere-se à parcela de energia que efetivamente realiza trabalho útil, sendo convertida em outras formas de energia, como mecânica, térmica e luminosa, estando diretamente relacionada à potência ativa instantânea. Segundo o Sistema Internacional de Unidades (SI), a energia ativa é medida em joules (J), equivalente a watt-segundo (Ws). Contudo, na prática, utiliza-se com maior frequência a unidade quilowatt-hora (kWh).

A energia ativa, medida em kWh, é a principal forma utilizada pelas concessionárias de energia elétrica para quantificar o consumo. Conforme Gussow (2013), trata-se de um parâmetro essencial para a compreensão do real consumo dos equipamentos.

O cálculo matemático de energia ativa em sistemas CA é dado pela integral da potência instantânea, como mostra a Equação 1, resultado da multiplicação instantânea entre tensão e corrente, ao longo de um intervalo determinado de tempo (BOYLESTAD, 2014).

$$E_a = \int p(t) d(t) \quad (1)$$

Onde:

- $E_a$  é a energia ativa consumida (J);
- $p(t)$  é a potência ativa instantânea (W).

### 2.1.3 Energia Reativa

Ao contrário da energia ativa, que realiza trabalho útil, a energia reativa relaciona-se ao armazenamento temporário de energia nos campos magnéticos e elétricos dos componentes reativos dos sistemas elétricos em corrente alternada, como reatores (indutores) e capacitores, respectivamente (COTRIM, 2017).

A Equação 2 representa o conceito de potência reativa instantânea, medida em volt-ampere reativo (var), conceito essencial para a entendimento e cálculo matemático da energia reativa.

$$q(t) = v(t)i(t)\sin\varphi \quad (2)$$

Onde:

- $q(t)$  é a potência reativa instantânea (var);
- $v(t)$  é a tensão instantânea (Vrms);
- $i(t)$  é a corrente instantânea (Irms);
- $\varphi$  é o ângulo de defasagem entre tensão e corrente.

De acordo com Boylestad (2014), matematicamente, a energia reativa é calculada pela integral da potência reativa instantânea, como mostra a Equação 3.

$$E_q = \int q(t) d(t) \quad (3)$$

Onde:

- $E_q$  é a energia reativa consumida (volt-ampere-reativo segundo);
- $q(t)$  é a potência reativa instantânea (var).

## 2.2 Medidores de energia

### 2.2.1 Medidores eletromecânicos

Os medidores de energia eletromecânicos foram desenvolvidos com o objetivo de realizar a leitura do consumo de energia, tanto ativa quanto reativa, com base em princípios de indução magnética. O equipamento possui um disco metálico condutor que gira proporcionalmente ao consumo de energia: quanto maior o consumo, maior será a velocidade de rotação do disco.

O funcionamento desses medidores ocorre por meio da indução eletromagnética gerada pelas bobinas de tensão e corrente no disco condutor. A bobina de corrente é responsável por induzir um campo magnético constante no disco, devido à passagem de corrente elétrica. Esse campo magnético exerce uma força de rotação sobre o disco. Por outro lado, a bobina de tensão gera um campo magnético variável, relacionado à diferença de potencial entre os condutores de energia. A combinação desses campos magnéticos induz o movimento rotacional do disco condutor.

Além disso, os medidores contam com um sistema de controle da velocidade de rotação do disco, que visa aumentar a precisão das leituras. Esse sistema é composto por um ímã permanente, que atua como um freio, controlando a velocidade de rotação. Esse controle é fundamental para compensar eventos comuns na rede elétrica, como variações de tensão de curta duração (VTCDs), distorções harmônicas e flutuações de tensão. A presença desse dispositivo é essencial para garantir que a medição seja proporcional ao consumo de energia (FILHO, 1997).

A contagem da energia consumida é realizada a partir do número de voltas completadas pelo disco em um determinado período. O disco está acoplado a um conjunto de engrenagens responsáveis por converter a rotação em energia, medida em kWh. Vale ressaltar que os medidores de diferentes modelos e fabricantes podem ter diferentes relações de conversão entre a rotação do disco e a energia consumida. Além disso, os medidores podem apresentar mostradores de diversas maneiras: alguns têm todas as casas decimais no mesmo mostrador, enquanto outros utilizam mostradores separados para cada casa decimal.

Por fim, os medidores eletromecânicos de energia ativa e reativa são robustos e têm uma longa vida útil, geralmente sem a necessidade de manutenção frequente. As bobinas são as peças mais suscetíveis a desgaste, pois exigem alta precisão para o bom funcionamento do dispositivo. No entanto, a tecnologia adotada nesses equipamentos apresenta algumas limitações, especialmente no que diz respeito à precisão das medições de energia ativa e reativa. Por esse motivo, esses medidores têm sido progressivamente descontinuados, mas ainda são encontrados em operação, principalmente em residências e indústrias onde a substituição por equipamentos mais modernos ainda não se fez necessária.

### 2.2.2 Medidores eletrônicos

Diferentemente dos medidores eletromecânicos, que realizam a medição das energias ativa e reativa por meio de bobinas de tensão e corrente, os medidores eletrônicos empregam tecnologias mais sofisticadas e, consequentemente, proporcionam maior precisão na medição da energia elétrica.

Assim como ocorre na tecnologia eletromecânica, os medidores eletrônicos necessitam de amostras de tensão e corrente para calcular as potências e energias ativas e reativas. Essas amostras das formas de onda são obtidas por meio de sinais provenientes de transformadores de corrente (TCs) e transformadores de potencial (TPs). No entanto, como esses dispositivos são digitais, os sinais adquiridos pelos TCs e TPs precisam ser convertidos de analógicos para digitais por meio de dispositivos que fazem essa conversão (conversores A/D), garantindo que os processadores internos sejam capazes de realizar as leituras e os cálculos necessários.

Com os sinais digitais disponíveis, o cálculo da potência ativa instantânea é realizado por meio da multiplicação das amostras discretas e instantâneas de tensão e corrente pelo cosseno do ângulo de defasagem elétrica entre elas ( $\cos\varphi$ ). Posteriormente, esses dados de potência são armazenados no medidor, que realiza o cálculo da energia ativa acumulada, expressa em quilowatt hora (kWh).

Dessa forma semelhante, a fim de obter a potência reativa instantânea, a partir da discretização dos sinais de tensão e corrente adquiridos pelos TPs e TCs, realiza-se o produto dessas grandezas pelo seno da defasagem angular entre elas ( $\sin\varphi$ ). Posteriormente, com as informações de potência instantânea armazenadas, é possível realizar o cálculo da energia reativa acumulada, medida em quilovolt-ampere-reactivo hora (kvarh).

Assim, as Equações 4 e 5 representam o cálculo da energia ativa e reativa nos medidores eletrônicos, respectivamente.

$$E_p = \sum_{i=1}^N P_i \Delta t \quad (4)$$

Onde:

- $E_p$  é a Energia Ativa (kWh);
- $P_i$  é a Potência Ativa Instantânea no instante  $i$  (W);

- $\Delta t$  é o intervalo de tempo entre as medições discretas (segundos);
- $N$  é o número total de medições no tempo.

$$E_Q = \sum_{i=1}^N Q_i \Delta t \quad (5)$$

Onde:

- $E_Q$  é a Energia Reativa (kvarh);
- $Q_i$  é a Energia Reativa Instantânea no instante  $i$  (var);
- $\Delta t$  é o intervalo de tempo entre as medições discretas (segundos);
- $N$  é o número total de medições no tempo.

Embora os medidores eletrônicos realizem cálculos a partir de amostragens discretas de tensão e corrente, o modo como o consumo de energia é registrado apresenta similaridades com os medidores eletromecânicos. Nos dispositivos mais antigos, um disco condutor girava proporcionalmente ao consumo de energia. Já nos modelos modernos, a leitura é feita por meio do pulso de diodos emissores de luz (LEDs) conforme o consumo, de acordo com uma relação direta estabelecida por uma constante de pulso (kh). Essa constante, definida pelo fabricante e pelo modelo do medidor, permite uma medição mais precisa da potência consumida.

Portanto, apesar das diferenças na metodologia de cálculo em relação aos medidores eletromecânicos, os medidores eletrônicos oferecem maior precisão nas medições e armazenam dados detalhados sobre o consumo de energia. Além disso, devido à tecnologia envolvida em seu desenvolvimento e fabricação, esses dispositivos são capazes de transmitir informações para as concessionárias de energia por meio de diversos protocolos de comunicação, contribuindo para uma gestão mais eficiente do sistema elétrico.

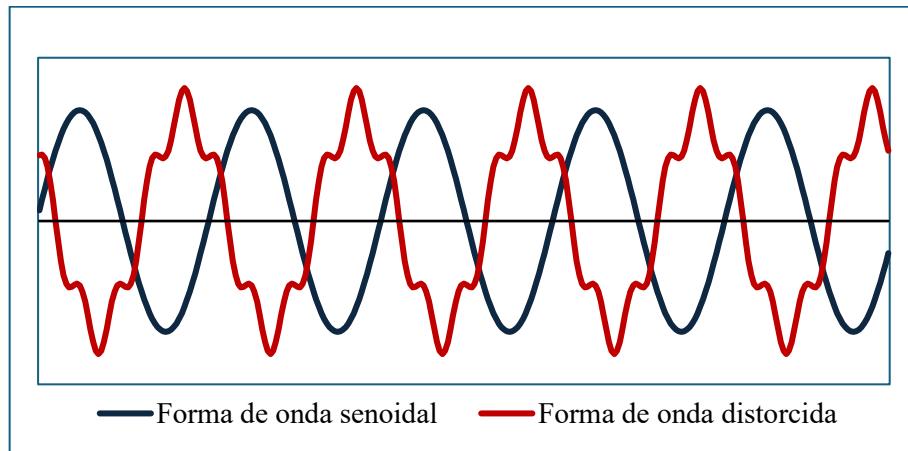
## 2.3 Harmônicos

### 2.3.1 Conceito

Em condições ideais do sistema elétrico, todas formas de onda de tensão e corrente, tanto em sistemas trifásicos como monofásicos, deveriam ser perfeitamente senoidais, com frequência única e fundamental de 60 Hz, no caso do Brasil. Neste contexto, os harmônicos são

componentes múltiplos inteiros da frequência fundamental, gerados por cargas não lineares, como retificadores e conversores, que distorcem a forma de onda senoidal original da corrente ou tensão. Com o aumento do uso de dispositivos eletrônicos, a presença de harmônicas nas instalações elétricas tornou-se uma questão relevante, exigindo atenção especial para garantir a qualidade da energia elétrica fornecida (MORENO, 2019).

Figura 1 – Formas de onda senoidal e distorcida



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 1 mostra uma forma de onda perfeitamente senoidal com frequência de 60 Hz, ou seja, ordem 1, e uma forma de onda, em vermelho, que possui distorções harmônicas. A onda distorcida é resultado da associação de componente de primeira e quinta ordem.

Os harmônicos são normalmente classificados em ordens, geralmente representadas pela letra  $n$ , pares e ímpares. As cargas não lineares operam de forma idêntica em todos os semiciclos da onda senoidal, devido à essa característica e natureza, as ordens harmônicas pares são mais incomuns em comparação às ímpares. Devido à essa tendência de operação não há geração de ordens harmônicas pares.

Além disso, a intensidade e o impacto das menores frequências múltiplas da fundamental é maior. Portanto, para  $n = 3, 5, 7$  e  $9$ , por exemplo, as amplitudes dos sinais em cada uma dessas ordens serão maiores quando comparadas às frequências mais elevadas.

### 2.3.2 Origem e Geração

Diferentemente das cargas lineares, as não lineares não seguem a Lei de Ohm, a qual expressa que a tensão é o produto entre resistência elétrica e corrente, de forma direta, ou seja,

a impedância varia de acordo com a tensão aplicada na carga. Portanto, a forma de onda da corrente resultante é desproporcional em relação à tensão, de forma que sejam gerados componentes harmônicos na corrente, que resultam em uma distorção da senoide.

Atualmente, a maioria das cargas não lineares causadoras de componentes harmônicas são os dispositivos eletrônicos, que possuem semicondutores para seu funcionamento. São exemplos de dispositivos e equipamentos geradores de ordens harmônicas: fontes chaveadas, comumente utilizadas em computadores e dispositivos eletrônicos no geral; retificadores, que convertem corrente alternada em corrente contínua; inversores de frequência, dispositivos utilizados para suavizar os impactos da partida de grandes motores na rede elétrica; lâmpadas fluorescentes e LEDs, as quais possuem reatores – também chamados de drivers – que convertem a corrente CA da rede em CC para funcionamento adequado das lâmpadas e dispositivos que usam arcos elétricos, como fornos a arco, equipamentos de solda e lâmpadas a vapor, fenômenos que criam variações intensas de carga, criando instabilidade no sistema.

### 2.3.3 Análise Matemática

Matematicamente, é possível representar um sinal periódico de tensão ou corrente, que possui componentes harmônicas associadas à frequência fundamental, por meio da Série de Fourier, como exposto na Equação 6.

$$x(t) = X_0 + \sum_{n=1}^{\infty} X_n \cos(n\omega t + \phi_n) \quad (6)$$

Onde:

- $X_0$  é a componente contínua (CC) do sinal;
- $X_n$  é a magnitude da componente harmônica de ordem n;
- $\omega$  é a frequência angular fundamental, representada por  $2\pi f$ ;
- $\phi_n$  é a defasagem angular da componente harmônica.

Além disso, Distorção Harmônica Total (DHT) é um importante conceito que quantifica a contribuição das frequências múltiplas na fundamental, em porcentagem. Ou seja, é um indicador que indica o nível de distorção em sinais de tensão ou corrente (DUGAN, 2003).

Matematicamente, as DHT de tensão e de corrente estão expressas pelas Equações 7 e 8, respectivamente.

$$DHT_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (7)$$

Onde:

- $n$  é a ordem harmônica;
- $V_n$  é a amplitude da componente harmônica de ordem  $n$ ;
- $V_1$  é a amplitude da componente fundamental, de ordem 1.

$$DHT_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (8)$$

Onde:

- $n$  é a ordem harmônica;
- $I_n$  é a amplitude da componente harmônica de ordem  $n$ ;
- $I_1$  é a amplitude da componente fundamental, de ordem 1.

#### 2.3.4 Efeitos no Sistema Elétrico

O sistema elétrico foi, inicialmente, projetado e parametrizado para funcionar e operar apenas com a frequência fundamental de 60 Hz, com a presença de harmônicos na rede, ou seja, componentes de tensão e corrente que alteram a forma de onda da senoide e a amplitude da mesma, surtem efeitos negativos que impactam no funcionamento adequado do sistema.

Destacam-se como principais efeitos causados por harmônicos:

- Aumento das perdas por aquecimento: com a adição de correntes harmônicas circulando pelos condutores os impactos do Efeito Joule, fenômeno físico que converte energia elétrica em energia térmica, são intensificados, causando superaquecimento de dispositivos e cabos;
- Ressonância: com a existência de componentes de sinais com frequências múltiplas da fundamental, é possível que aconteça os fenômenos de ressonância. Ressonância série e paralelo são as duas classificações para o efeito, sendo a primeira responsável por sobrecorrentes no sistema, pois o circuito se comporta como um curto-círcuito devido à

baixa impedância, e a segunda faz o circuito se comportar como um circuito aberto, devido à elevada impedância do sistema.

- Redução do Fator de Potência (FP): causada pelo aumento de potência reativa, associada às componentes harmônicas. Um menor fator de potência pode resultar em penalizações tarifárias e redução de eficiência do sistema.

### 2.3.5 Impacto nas medições

Como já mencionado anteriormente, todo o sistema elétrico foi, a princípio, parametrizado para operar apenas com formas de onda perfeitamente senoidais com uma única frequência de 60 Hz. Os equipamentos de medição e análise, de forma inicial, também foram desenvolvidos para realizar leituras com maior precisão para a frequência conhecida e sobressalente no sistema, frequência fundamental. Por isso, grande parte dos medidores de energia residenciais, e industriais, apresentam dificuldades e imprecisões na leitura de formas de onda com presença de componentes harmônicos.

Quanto maior o nível de distorção harmônica nas tensões e na corrente, maior a imprecisão e menor a confiabilidade dos equipamentos responsáveis por quantificar o consumo energético dos consumidores para com as distribuidoras de energia.

## 2.4 Potência Ativa (P)

### 2.4.1 Conceito

Conforme explicam Kothari e Nagrath (2011), a potência ativa (P) é o componente fundamental para o dimensionamento da geração e do consumo de energia elétrica em sistemas de potência, é o componente da energia elétrica que efetivamente realiza trabalho, ou seja, é responsável pela conversão da eletricidade em outras formas de energia, como mecânica, térmica, luminosa, sonora, química e magnética. Por esse motivo, também é chamada de potência real ou potência útil. Sua unidade de medida é o watt (W).

Em todas as etapas da rede elétrica - geração, transmissão e distribuição - os equipamentos, dispositivos e condutores são dimensionados para fornecer a máxima potência ativa com o maior nível de eficiência possível. Além disso, a tarifação dos consumidores, especialmente aqueles atendidos em baixa tensão, como residências e pequenos estabelecimentos comerciais, é baseada no consumo de energia ativa, calculado a partir da

potência ativa consumida ao longo do tempo. Dessa forma, a potência ativa se destaca como o componente mais relevante e de maior impacto quando se trata do consumo e da eficiência da eletricidade.

#### 2.4.2 Fundamentos Matemáticos

Com base no conceito abordado no item anterior, a potência ativa corresponde à quantidade de energia elétrica efetivamente convertida em trabalho útil nos sistemas elétricos. Dessa forma, é a parcela responsável pelo abastecimento das cargas da rede, ou seja, pelos consumidores de energia.

Matematicamente, P pode ser expressa pela Equação 9.

$$P = V I \cos \varphi \quad (9)$$

Onde:

- $P$  é a potência ativa (W);
- $V$  é a tensão eficaz (Vrms);
- $I$  é a corrente eficaz (Irms);
- $\varphi$  é a defasagem angular entre a tensão e a corrente ( $^{\circ}$ ).

#### 2.4.3 Potência Ativa e Potência Ativa Fundamental

Em condições ideais de funcionamento dos equipamentos, máquinas e de toda a rede elétrica, as formas de onda de tensão e corrente deveriam ser perfeitamente senoidais. Isso significa que não haveria a presença de componentes em frequências diferentes da fundamental, ou seja, não haveria harmônicos. No entanto, como as condições reais do sistema elétrico não possibilitam uma senoide perfeita para as formas de onda, há inevitavelmente a presença de componentes harmônicas nos sinais elétricos.

Diante desse cenário, é essencial compreender os conceitos de potência ativa, potência ativa fundamental ( $P_1$ ) e potência ativa harmônica ( $P_h$ ).

$P_1$  corresponde à parcela da potência ativa associada exclusivamente à frequência fundamental, que no Brasil é de 60 Hz. Seu cálculo matemático considera apenas os valores de tensão e corrente da primeira ordem harmônica ( $n = 1$ ).

Já  $P_h$  representa as parcelas da potência ativa associadas às componentes harmônicas, ou seja, às frequências múltiplas da fundamental. Embora seja mais comum a presença de componentes harmônicas de ordem ímpar, todas as ordens, exceto a fundamental, podem contribuir para  $P_h$ . O cálculo dessa potência é realizado pelo produto das tensões e correntes de mesma ordem harmônica. Caso sejam multiplicadas grandezas de diferentes ordens, o resultado será zero.

Por fim, a potência ativa, também chamada potência ativa total, é determinada pela soma da potência ativa fundamental com as componentes de potência ativa harmônica, conforme a Equação 10.

$$P = P_1 + P_h \quad (10)$$

## 2.5 Potência Reativa (Q)

### 2.5.1 Conceito

Diferentemente da potência ativa, que está diretamente associada ao trabalho útil realizado por meio da conversão de energia elétrica, a potência reativa (Q) está relacionada às trocas de energia entre os campos elétricos e magnéticos. Essa potência é uma parcela da potência aparente, formada pela interação entre tensões e correntes em circuitos que contêm componentes indutivos e capacitivos. No SI, sua medida é expressa em volt-ampere reativo (var).

A potência reativa surge quando há uma defasagem angular entre a tensão e a corrente, ou seja, quando suas formas de onda não estão em fase. Na presença de cargas indutivas, nas quais a corrente é atrasada em relação à tensão, há consumo de potência reativa. Já na presença de cargas capacitivas, em que a corrente é adiantada em relação à tensão, há o fornecimento de potência reativa para o sistema (GRAINGER; STEVENSON, 1994).

Embora a potência reativa não realize trabalho útil diretamente, suas propriedades elétricas e magnéticas são fundamentais para assegurar o funcionamento de diversos dispositivos. Indutores e capacitores desempenham um papel essencial ao manter a circulação da energia reativa entre o sistema de potência e os equipamentos conectados à rede, garantindo o funcionamento adequado desses dispositivos sem que essa energia seja permanentemente consumida.

### 2.5.2 Fundamentos Matemáticos

A partir do conceito exposto no item anterior, a potência reativa é a componente da potência aparente que, embora não realize trabalho útil diretamente, é essencial para o funcionamento adequado dos equipamentos no sistema elétrico. Ela se origina da interação entre tensão e corrente, estando diretamente relacionada à diferença angular entre essas grandezas.

Dessa forma, Q pode ser expressa matematicamente pela seguinte equação:

$$Q = VIsen\varphi \quad (11)$$

Onde:

- $Q$  é a potência reativa (var);
- $V$  é a tensão eficaz (Vrms);
- $I$  é a corrente eficaz (Irms);
- $\varphi$  é a desafagem angular entre a tensão e a corrente ( $^{\circ}$ ).

### 2.5.3 Potência Reativa e Potência Reativa Fundamental

Em condições ideais do sistema elétrico, as formas de onda das tensões e correntes deveriam ser perfeitamente senoidais, ou seja, conter apenas a frequência fundamental de 60 Hz. No entanto, na prática, essas condições ideais existem apenas em cenários teóricos ou educacionais. Dessa forma, as formas de onda reais não seguem um perfil senoidal perfeito, apresentando componentes de frequências variadas, conhecidas como harmônicos, que causam distorções nas formas de onda.

Diante desse cenário, torna-se essencial o desenvolvimento dos conceitos de potência reativa, potência reativa fundamental ( $Q_1$ ) e potência reativa harmônica ( $Q_h$ ).

Analogamente à potência ativa total, a potência reativa total é composta pela soma da  $Q_1$ , que corresponde à componente de primeira ordem ( $n = 1$ ), e  $Q_h$ , que representam as componentes associadas às frequências múltiplas da fundamental.

Dessa forma, a potência reativa total, ou simplesmente potência reativa, conforme a Equação 12.

$$Q = VI \operatorname{sen} \varphi \quad (12)$$

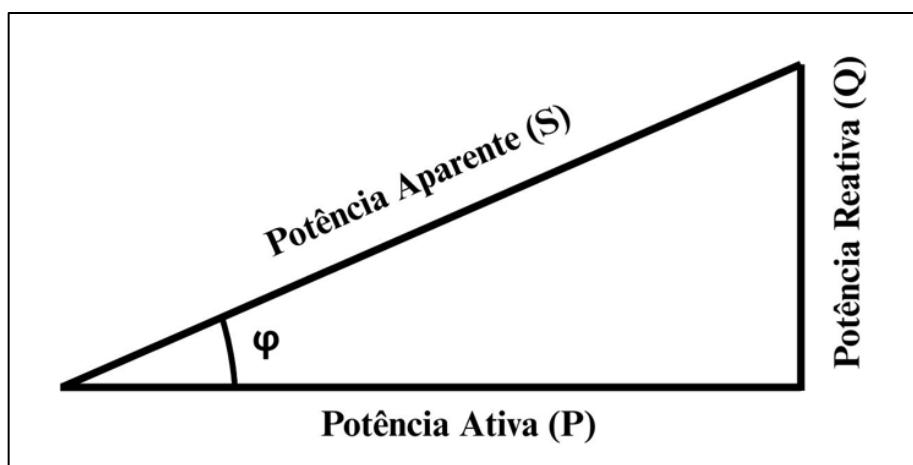
## 2.6 Potência Aparente

Diferentemente de potência ativa e potência reativa, que representam, respectivamente, a parcela de energia efetivamente convertida em trabalho útil e as trocas de energia entre os campos magnéticos e elétricos, a Potência Aparente (S) corresponde à totalidade da potência entregue ao sistema elétrico ou consumidos por uma carga. Sua unidade de medida, de acordo com o SI, é o volt-ampere (VA).

A potência aparente é um parâmetro essencial para o dimensionamento adequado de equipamentos, como geradores e transformadores, pois indica a capacidade necessária real desses dispositivos para suprirem as cargas do sistema elétrico. Portanto, por englobar a potência efetivamente convertida em trabalho útil e a potência que oscila sem ser consumida, ela representa a verdadeira demanda imposta à rede elétrica.

A relação entre potência ativa, potência reativa e potência aparente pode ser feita utilizando o conceito Triângulo de Potências, onde S é a hipotenusa de um triângulo retângulo, P é o cateto adjacente e Q é o cateto oposto. Essa representação é fundamental para análises e projetos de sistemas elétricos, pois a partir dela é possível compreender a interação das diferentes potências e suas influências no sistema elétrico (ALEXANDER; SADIKU, 2013).

Figura 2 – Triângulo de Potências



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 2 representa o Triângulo de Potências e a Equação 13 é a representação matemática da relação entre as potências S, P e Q.

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (13)$$

## 2.7 Fator de Potência (FP)

### 2.7.1 Conceito

A partir dos conceitos de potência abordados anteriormente, pode-se definir o Fator de Potência (FP) como um parâmetro que mede a eficiência na conversão da energia elétrica fornecida em trabalho útil. Em outras palavras, ele indica qual fração da potência total entregue, potência aparente, é efetivamente aproveitada como potência ativa para o funcionamento dos equipamentos. Esse indicador é determinado pela razão entre P e S, sendo expresso conforme a Equação 14.

$$FP = \frac{P}{S} \quad (14)$$

O FP varia entre 0 e 1, sendo que, quanto mais próximo de 1, menor a presença de potência reativa e, consequentemente, maior a eficiência do sistema elétrico.

### 2.7.2 Correção do Fator de Potência

A partir dos conceitos de potência reativa e fator de potência, surge a necessidade de abordar um conceito essencial para o sistema elétrico: a compensação de potência reativa, também conhecida como compensação reativa ou correção do fator de potência. No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), responsável por diversas regulamentações no setor, é o órgão encarregado de estabelecer as normas para o Fator de Potência.

Atualmente, conforme a Resolução Normativa ANEEL nº 1000/2021, o FP deve ser igual ou superior a 0,92, podendo ser indutivo ou capacitivo. Para atender a essa exigência, a compensação de potência reativa pode ser realizada de duas formas: pela injeção ou pelo consumo de potência reativa.

A forma mais comum de compensação ocorre quando o FP é indutivo, sendo corrigido por meio da injeção de potência reativa capacitiva. Esse processo é realizado por bancos de capacitores, que são normalmente instalados em paralelo com a carga. A função desses capacitores é neutralizar a potência indutiva gerada por equipamentos como motores e transformadores. Além de corrigir o FP para um valor adequado, os bancos de capacitores também contribuem para elevar a tensão no ponto de instalação.

Por outro lado, quando o FP é capacitativo, situação mais comum durante a madrugada, quando a maioria das cargas está desligada, a compensação deve ocorrer por meio do consumo de potência reativa indutiva. Para isso, utilizam-se reatores (indutores), que absorvem a energia reativa excedente da rede. Diferentemente da compensação com capacitores, a instalação de reatores reduz a tensão no ponto onde são conectados.

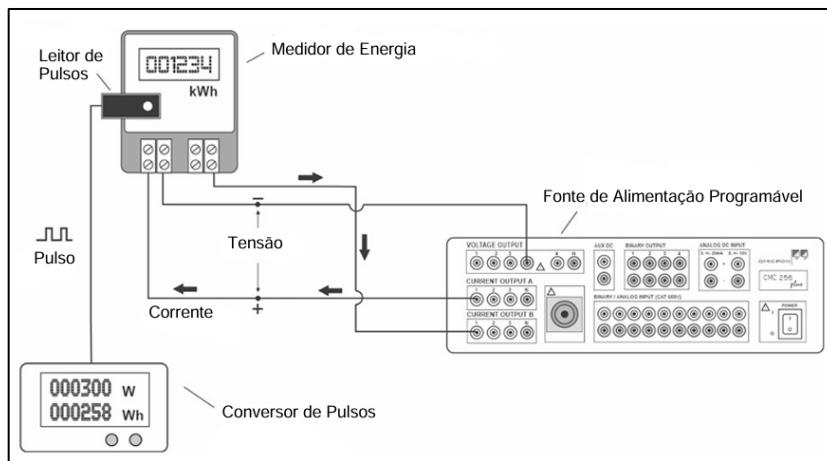
A correção do fator de potência tem como principal objetivo garantir o cumprimento das normas regulatórias, contribuindo para uma maior eficiência no transporte de energia elétrica. Entre os benefícios dessa correção, destacam-se a liberação da capacidade de transformadores e geradores, pois a redução da potência reativa indutiva diminui a sobrecarga causada por motores de indução e reatores, e a melhoria na estabilidade da rede elétrica, evitando flutuações e reduzindo quedas de tensão no sistema (MONTEIRO, 2020).

### 3 TESTES LABORATORIAIS

#### 3.1 Detalhamento dos Testes

O objetivo desta seção é descrever os experimentos laboratoriais realizados para este trabalho, com a intenção de comparar os resultados experimentais com os dados teóricos obtidos através de cálculos matemáticos. Os medidores de energia utilizados são todos eletrônicos e são identificados por letras e números: as letras indicam o fabricante e os números representam o modelo do equipamento. Ao todo, foram realizados experimentos com treze medidores de energia, de cinco fabricantes diferentes: A1, A2, A3, A4, B1, B2, C1, D1, D2, D3, D4, E1 e E2.

Figura 3 – Arranjo laboratorial usado durante os testes



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 3 ilustra o arranjo laboratorial com as conexões e equipamentos utilizados nos testes dos medidores de energia ativa e reativa. Todos os dispositivos possuem certificados de calibração com grau de precisão adequado. As formas de onda de tensão e corrente foram geradas pela fonte de alimentação programável CMC 256 Plus, fabricada pela Omicron Electronics Corp., que permitiu a criação das formas de onda para os testes realizados nos medidores.

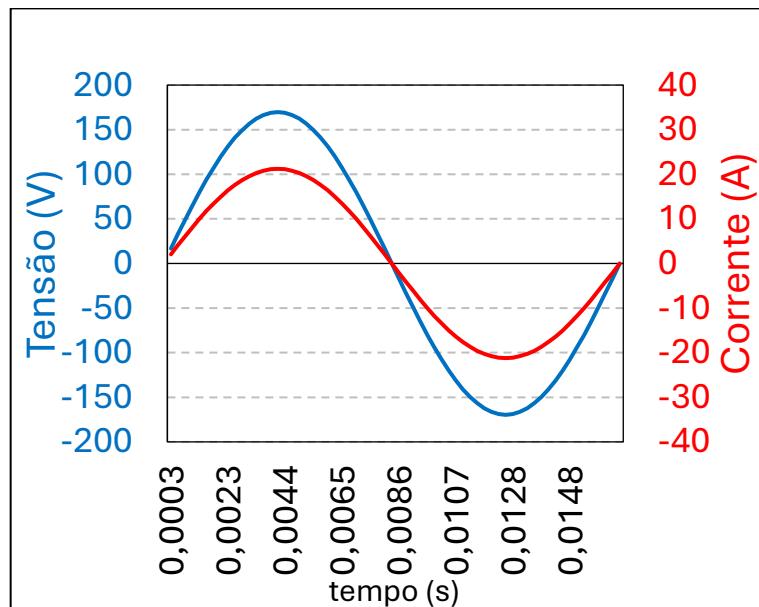
Durante as medições, os medidores eletrônicos emitem pulsos luminosos, cuja frequência de pulsação está relacionada à quantidade de energia medida. Cada medidor possui uma constante de calibração, denominada  $K_h$ , expressa em Wh/pulso para energia ativa e varh/pulso para energia reativa. Esta constante relaciona a quantidade de pulsos emitidos à

energia medida. Cada medidor possui dois LEDs, que emitem pulsos luminosos, um para cada tipo de energia. Para quantificar a energia medida, foi utilizado um dispositivo específico chamado "leitor de pulsos", que processa a quantidade de pulsos luminosos durante um período determinado e converte esses dados em valores de potência ativa e reativa medidas, respectivamente, em W e var.

No total, foram realizados oito testes distintos em todos os medidores, cada um considerando diferentes níveis de distorção harmônica. Em cada teste, foram determinadas a magnitude e o ângulo das tensões e correntes tanto para a frequência fundamental quanto para as distintas ordens harmônicas.

O Teste 1 foi utilizado como referência para os demais, pois as formas de onda eram perfeitamente senoidais, com fator de potência unitário. A tensão aplicada foi de 120 Vrms, enquanto a corrente foi de 15 Arms. A Figura 4 apresenta um ciclo das ondas geradas para o experimento.

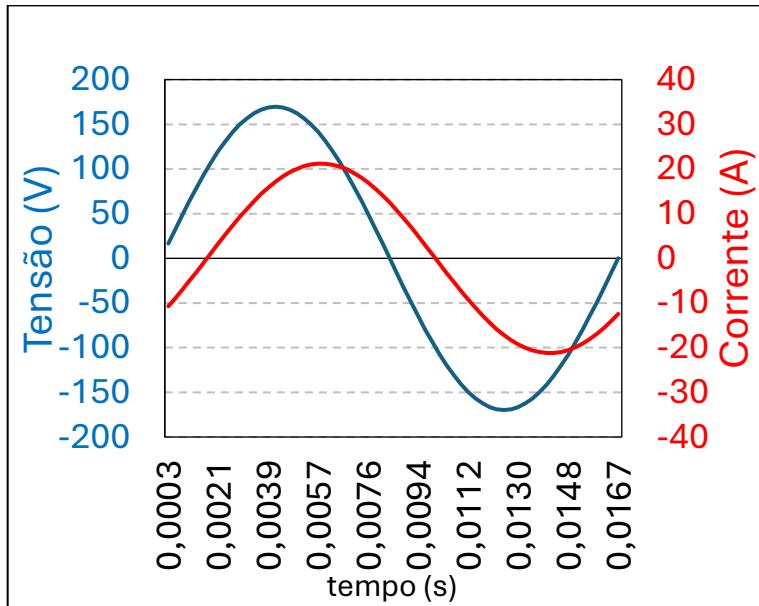
Figura 4 – Formas de onda do Teste 1



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 5 ilustra o Teste 2, que, assim como o Teste 1, possui formas de onda perfeitamente senoidais e mantendo as magnitudes de tensão e corrente. No entanto, neste caso, há um atraso de  $36^\circ$  elétricos na corrente em relação à tensão.

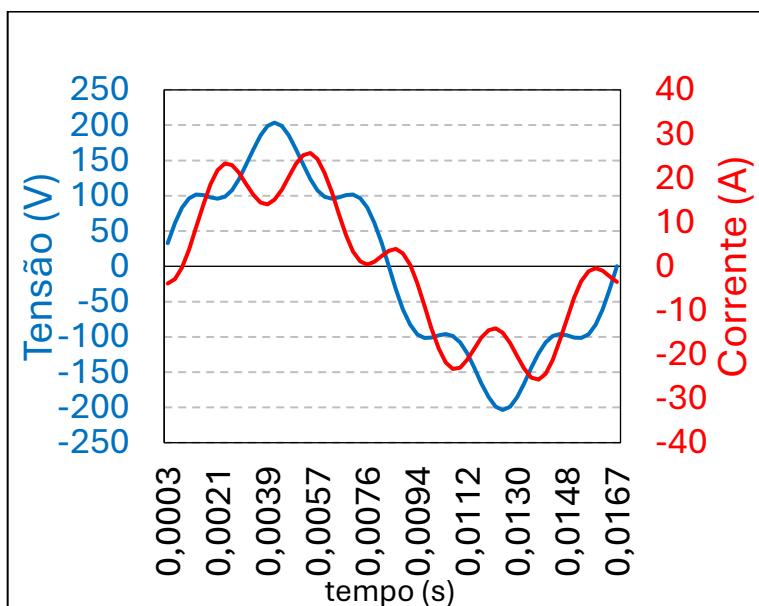
Figura 5 – Formas de onda do Teste 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

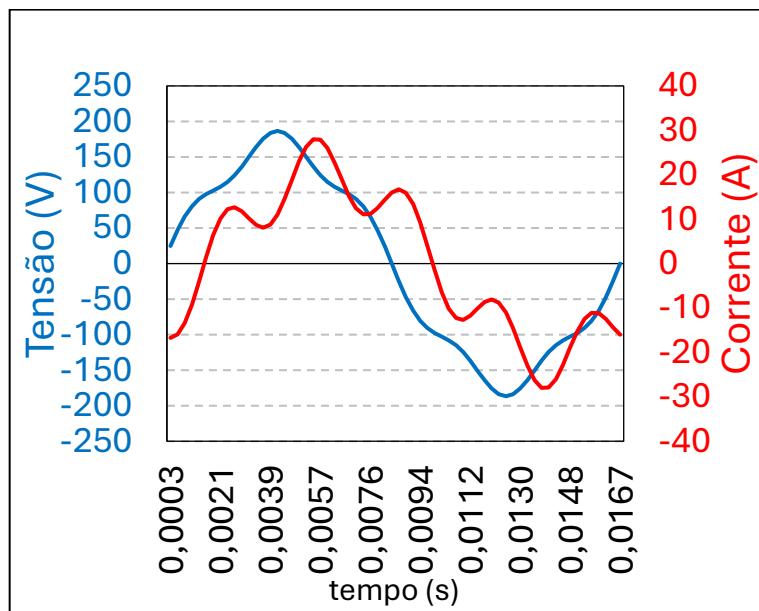
No Teste 3, além da ordem fundamental, foram adicionadas componentes da quinta ordem harmônica, com uma magnitude de 24 Vrms para a tensão e 5 Arms para a corrente. O fator de potência permaneceu unitário, ou seja, não houve defasagem angular entre a tensão e a corrente. A Figura 6 demonstra que as formas de onda resultantes perderam a característica senoidal.

Figura 6 – Formas de onda do Teste 3



Fonte: Elaborado pelo autor.

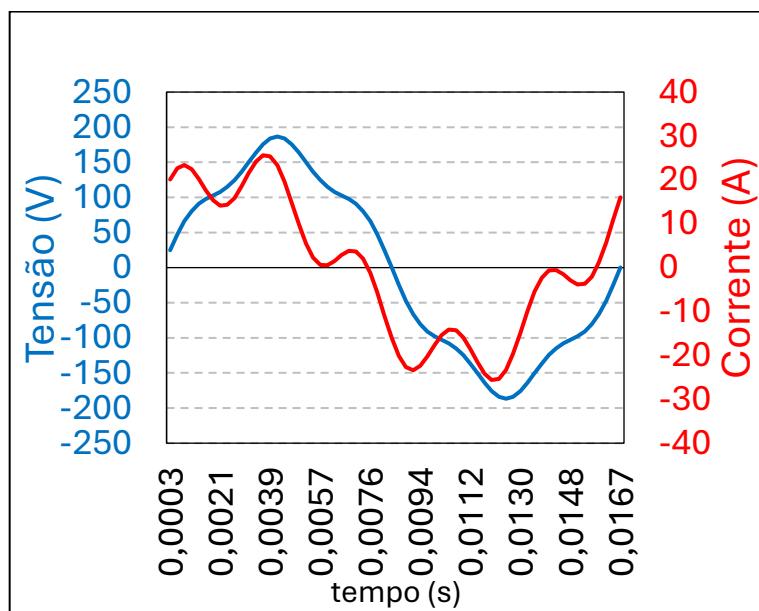
Figura 7 – Formas de onda do Teste 4



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nos Testes 4 e 5 são mantidas as magnitudes de tensão e corrente do Teste 3. No entanto, como ilustrado na Figura 7, no Teste 4, a corrente apresenta um atraso de  $36^\circ$  em relação à tensão na primeira ordem e de  $150^\circ$  na quinta ordem. Já no Teste 5, como demonstrado na Figura 8, as correntes estão adiantadas em  $36^\circ$  e  $30^\circ$  para as ordens 1 e 5, respectivamente.

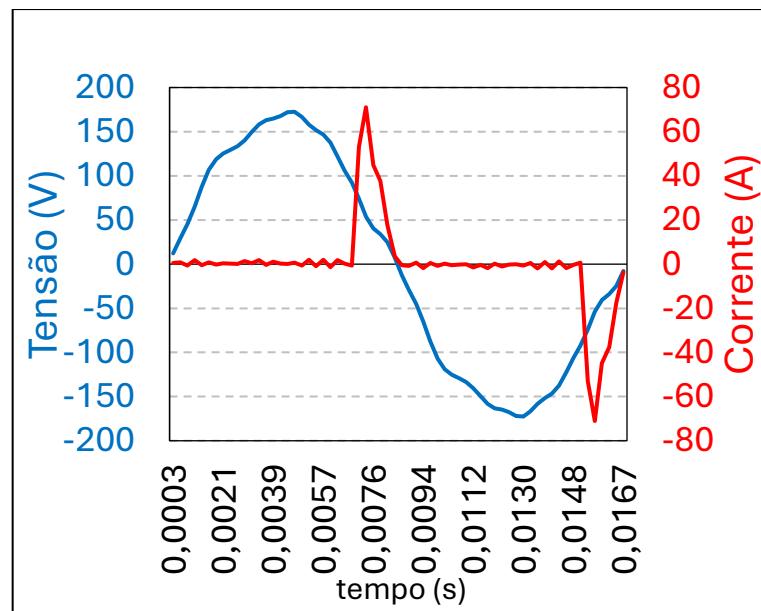
Figura 8 – Formas de onda do Teste 5



Fonte: Elaborado pelo autor.

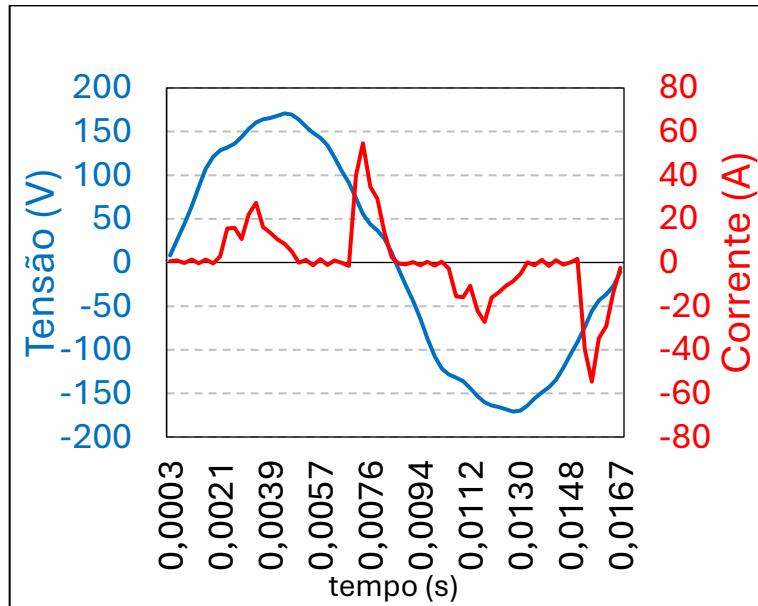
Diferentemente dos testes anteriores, os três últimos experimentos avaliaram a presença de múltiplas ordens harmônicas. Nos Testes 6 e 7, foram geradas componentes harmônicas ímpares, variando da frequência fundamental até a 27<sup>a</sup> ordem, com diferentes magnitudes e ângulos, resultando nas formas de onda apresentadas nas Figuras 9 e 10. A corrente resultante do Teste 7 é tipicamente observada em sistemas de distribuição de baixa tensão, onde há operação simultânea de diferentes tecnologias de lâmpadas eletrônicas.

Figura 9 – Formas de onda do Teste 6



Fonte: Elaborado pelo autor.

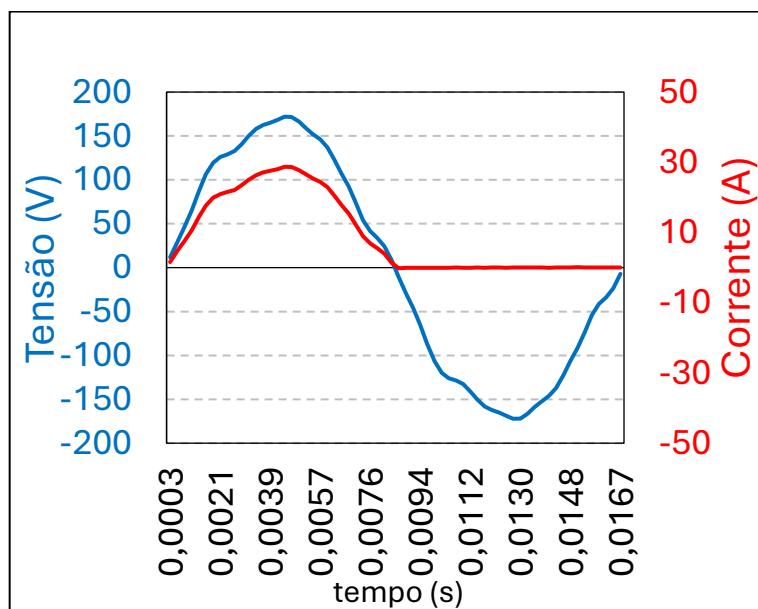
Figura 10 – Formas de onda do Teste 7



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, o Teste 8 foi desenvolvido para simular o comportamento de um retificador de meia onda, um dispositivo composto por diodos que, durante o semicírculo positivo da tensão de entrada, conduz a corrente elétrica (polarização direta), enquanto no semicírculo negativo, bloqueia a condução (polarização reversa). A Figura 11 apresenta a forma de onda resultante dessa configuração.

Figura 11 – Formas de onda do Teste 8



Fonte: Elaborado pelo autor.

O Apêndice A mostra as magnitudes, em valores eficazes, das tensões e correntes das ordens harmônicas, juntamente com os ângulos de defasagem elétrica, utilizados para que as formas de onda dos oito testes.

### 3.2 Distorção Harmônica

As distorções harmônicas são componentes de frequências múltiplas da fundamental que podem afetar a qualidade da energia elétrica em sistemas elétricos. Essas distorções são geradas principalmente por cargas não lineares, como inversores de frequência, fontes chaveadas e motores controlados eletronicamente, podendo comprometer o desempenho de equipamentos sensíveis e aumentar perdas no sistema.

Para compreender e quantificar o impacto dessas distorções nos testes realizados, foram calculadas as Distorções Harmônicas Totais, tanto para tensão quanto para corrente.

Com base nos conceitos teóricos apresentados no item 2.2.3, a Tabela 1 apresenta os valores das distorções harmônicas de tensão, enquanto a Tabela 2 exibe as distorções harmônicas de corrente. Esses dados permitem avaliar o nível de interferência harmônica no sistema, auxiliando na tomada de decisões para mitigação de possíveis impactos adversos.

Tabela 1 – Distorção Harmônica Total de Tensão

| Teste | $\sum V_h$ | $V_1$  | DHT <sub>V</sub> (%) |
|-------|------------|--------|----------------------|
| 1     | -          | 120,00 | -                    |
| 2     | -          | 120,00 | -                    |
| 3     | 576,00     | 120,00 | 20,00%               |
| 4     | 144,00     | 120,00 | 10,00%               |
| 5     | 144,00     | 120,00 | 10,00%               |
| 6     | 35,96      | 120,00 | 5,00%                |
| 7     | 35,96      | 120,00 | 5,00%                |
| 8     | 35,99      | 120,00 | 5,00%                |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 2 – Distorção Harmônica Total de Corrente

| Teste | $\sum I_h$ | $I_1$ | DHT <sub>I</sub> (%) |
|-------|------------|-------|----------------------|
| 1     | -          | 15,00 | -                    |
| 2     | -          | 15,00 | -                    |
| 3     | 25,00      | 15,00 | 33,33%               |
| 4     | 25,00      | 15,00 | 33,33%               |

| Teste | $\sum I_h$ | $I_1$ | DHT <sub>1</sub> (%) |
|-------|------------|-------|----------------------|
| 5     | 25,00      | 15,00 | 33,33%               |
| 6     | 264,01     | 10,00 | 162,48%              |
| 7     | 192,07     | 10,00 | 138,59%              |
| 8     | 1,51       | 10,00 | 12,28%               |

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.3 Valores de Referência

#### 3.3.1 Valores de Referência de Potência Ativa

Neste tópico, serão apresentados os cálculos matemáticos utilizados para a obtenção da potência ativa fundamental ( $P_1$ ), das potências ativas harmônicas ( $Ph$ ) e da potência ativa total ( $P$ ), também denominada simplesmente de potência ativa. Os valores de referência foram calculados em uma planilha no software Excel, por meio da manipulação dos dados dos oito testes realizados, considerando as magnitudes e os ângulos das tensões e correntes das diferentes ordens harmônicas presentes em cada experimento.

Os valores de potência ativa obtidos pelos medidores de energia serão comparados com os valores de referência, a fim de determinar os erros de medição de cada equipamento e analisar seu comportamento em condições de tensão e corrente não senoidais.

Conforme discutido no item 2.4.3,  $P$  corresponde à soma de  $P_1$  e  $Ph$ . Esses componentes são obtidos, respectivamente, a partir da frequência fundamental de 60 Hz (ordem 1) e das componentes harmônicas de ordem  $n$ . A equação geral para o cálculo da potência ativa em diferentes ordens harmônicas é dada pela Equação 15.

$$P_n = V_n I_n \cos (\varphi_n) \quad (15)$$

Onde:

- $P_n$  é a potência ativa para a ordem  $n$  (W);
- $V_n$  é a tensão eficaz para a ordem  $n$  (Vrms);
- $I_n$  é a corrente eficaz para a ordem  $n$  (Irms);
- $\varphi_n$  é a defasagem angular entre tensão e corrente para a ordem  $n$  ( $^{\circ}$ ).

Com base nesses cálculos, a Tabela 3 apresenta os valores de referência de  $P_1$  e  $P$ , obtidos por meio dos procedimentos matemáticos descritos anteriormente.

Tabela 3 – Valores de referência de Potência Ativa

| Teste | P1 (W)  | P (W)   |
|-------|---------|---------|
| 1     | 1800,00 | 1800,00 |
| 2     | 1456,23 | 1456,23 |
| 3     | 1800,00 | 1696,08 |
| 4     | 1456,23 | 1404,27 |
| 5     | 1456,23 | 1508,19 |
| 6     | 439,35  | 398,39  |
| 7     | 1033,23 | 984,17  |
| 8     | 1200,00 | 1202,77 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.3.2 Valores de Referência de Potência Reativa

Neste tópico, serão apresentados os cálculos matemáticos empregados na determinação dos valores de referência da potência reativa fundamental ( $Q_1$ ), das potências reativas harmônicas ( $Q_h$ ) e da potência reativa ( $Q$ ). Esses valores foram obtidos por meio da análise das magnitudes e ângulos das tensões e correntes nas diversas ordens harmônicas presentes nos oito testes realizados, utilizando uma planilha desenvolvida no software Excel.

Para avaliar a precisão das medições realizadas pelos medidores de energia, os valores calculados serão comparados com os dados registrados pelos equipamentos. Esse procedimento permite a identificação de possíveis erros de medição e possibilita uma análise detalhada do desempenho dos medidores em condições nas quais as formas de onda da tensão e da corrente apresentam distorções harmônicas.

Conforme abordado no item 2.3.3,  $Q$  é composta pela soma da potência reativa fundamental, associada à frequência de 60 Hz (ordem 1), e das potências reativas harmônicas, correspondentes às componentes de ordem  $n$ . O cálculo da potência reativa para cada ordem harmônica pode ser expresso pela Equação 16.

$$Q_n = V_n I_n \sin (\varphi_n) \quad (16)$$

Onde:

- $Q_n$  é a potência reativa para a ordem  $n$  (W);
- $V_n$  é a tensão eficaz para a ordem  $n$  (Vrms);
- $I_n$  é a corrente eficaz para a ordem  $n$  (Irms);

- $\varphi_n$  é a defasagem angular entre tensão e corrente para a ordem n ( $^{\circ}$ ).

Com base nesses cálculos, foi possível determinar os valores de Q1 e Q, apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores de referência de Potência Reativa

| Teste | Q1 (var) | Q (var)  |
|-------|----------|----------|
| 1     | 0,00     | 0,00     |
| 2     | 1058,01  | 1058,01  |
| 3     | 0,00     | 60,00    |
| 4     | 1058,01  | 1088,01  |
| 5     | -1058,01 | -1088,01 |
| 6     | 1116,68  | 1096,57  |
| 7     | 610,27   | 593,85   |
| 8     | 0,00     | -0,17    |

Fonte: Elaborado pelo autor.

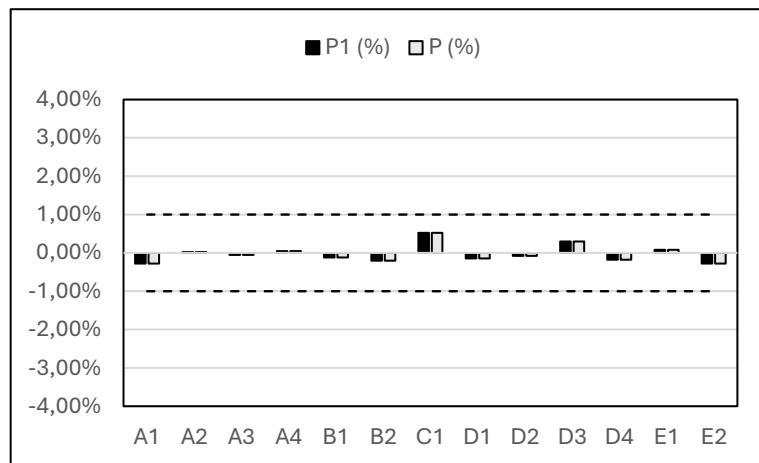
## 4 RESULTADOS

### 4.1 Resultados de Potência Ativa

Após a realização dos oito testes em treze medidores distintos, serão apresentados os resultados por meio de gráficos de desvios percentuais, Figuras 11 a 18. Os valores teóricos calculados de  $P_1$  (W), que corresponde à parcela fundamental da potência ativa, e  $P$  (W), que corresponde à potência ativa total, serão utilizados como referência para análise de comparação das leituras dos medidores de energia ativa.

A faixa de erro esperada para os medidores de energia é  $\pm 1\%$ . Isso significa que, ao considerar o valor calculado para cada teste, a leitura dos equipamentos não deve ultrapassar esse limite, seja para mais ou para menos.

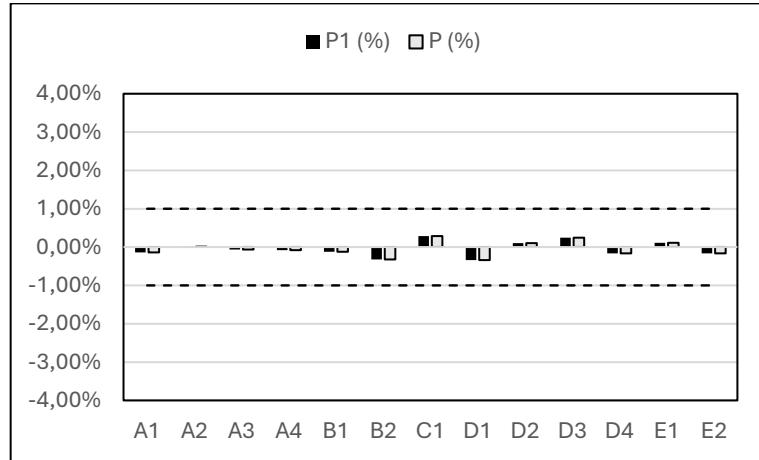
Figura 12 – Desvios percentuais de potência ativa do Teste 1



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nos Testes 1 e 2, cujas formas de onda são perfeitamente senoidais, com fator de potência unitário e indutivo, respectivamente, todos os medidores registraram leituras dentro do erro permitido. As análises foram realizadas comparando os valores de referência  $P$  e  $P_1$  com as leituras de potência obtidas pelo leitor de pulso durante a execução dos experimentos. Assim, para condições senoidais de tensão e corrente, os treze medidores apresentaram medições coerentes e precisas da potência ativa, como mostram as Figuras 12 e 13.

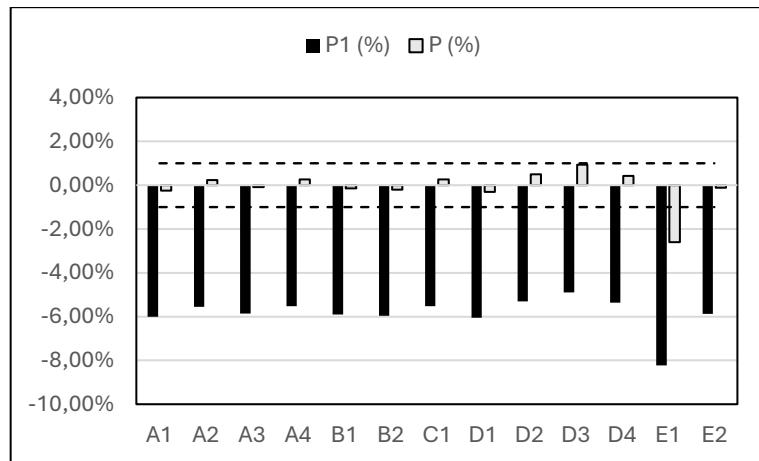
Figura 13 – Desvios percentuais de potência ativa do Teste 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

No Teste 3, que inclui uma componente de quinta ordem harmônica além da fundamental, observou-se que, com exceção do medidor E1, que apresentou um erro de 2,60%, os demais equipamentos mantiveram leituras dentro da margem estabelecida de  $\pm 1\%$  para a potência ativa total. Entretanto, quando se considera a potência ativa fundamental fornecida pela fonte, todos os medidores apresentaram erros superiores a -4,9%. A Figura 14 demonstra graficamente os erros percentuais.

Figura 14 – Desvios percentuais de potência ativa do Teste 3

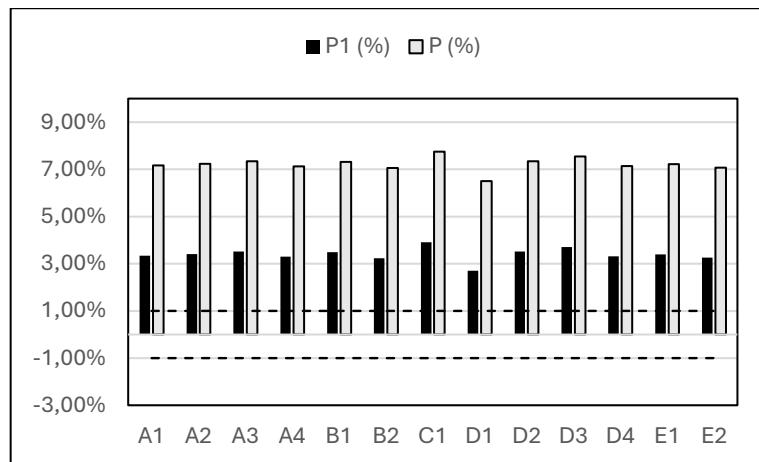


Fonte: Elaborado pelo autor.

No Teste 4, cujas magnitudes das formas de onda são idênticas às do Teste 3, mas com atraso de  $36^\circ$  elétricos na corrente em relação à frequência fundamental, verificou-se um erro percentual médio de aproximadamente 7,2% para os medidores em relação a P. Quando se

considera P1 como referência, o erro médio foi de 3,39%. Destaca-se que o medidor D1 apresentou maior precisão em relação aos demais, embora não tenha atingido o erro mínimo permitido, como se pode observar na Figura 15.

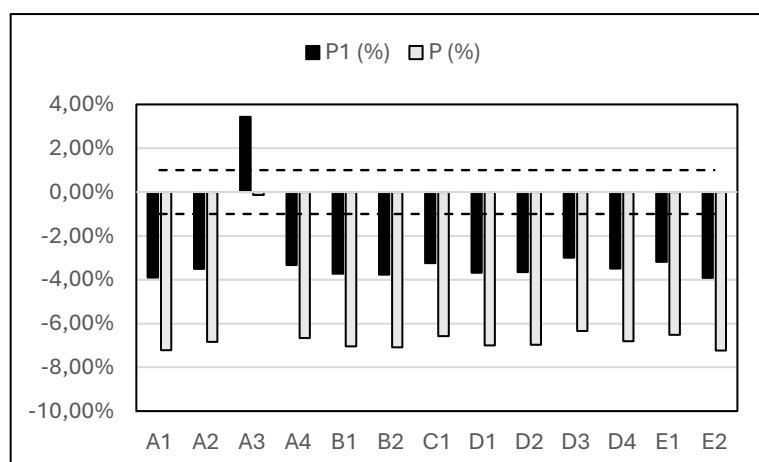
Figura 15 – Desvios percentuais de potência ativa do Teste 4



Fonte: Elaborado pelo autor.

No Teste 5, que segue a mesma estrutura dos testes anteriores, mas com um adiantamento de 36° e 30° para as componentes de ordem 1 e 5, respectivamente, observou-se que, em relação a P1, todos os medidores apresentaram erros superiores a  $\pm 1\%$ , com uma média de -3%. Em contrapartida, como exposto na Figura 16, ao considerar P como referência, todos os equipamentos, exceto o medidor A3, que registrou erro de -0,135%, ultrapassaram a margem estipulada.

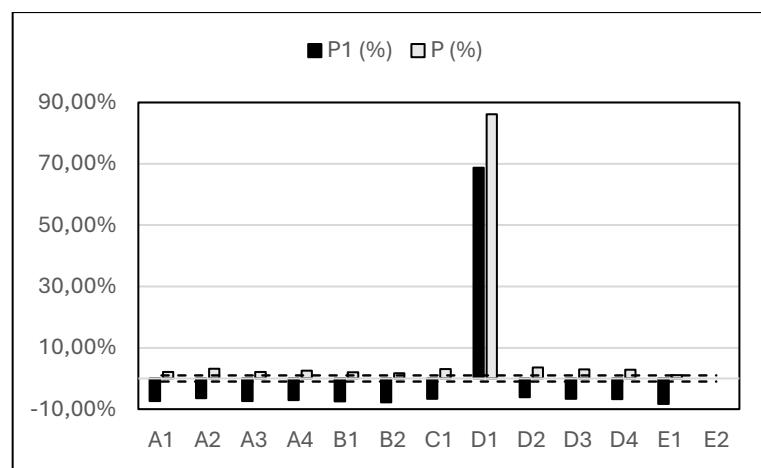
Figura 16 – Desvios percentuais de potência ativa do Teste 5



Fonte: Elaborado pelo autor.

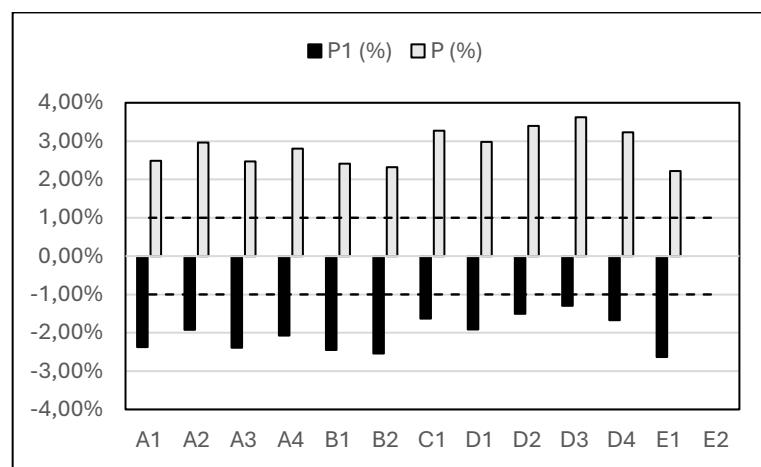
Os resultados do Teste 6 revelaram que todos os medidores de energia apresentaram erros de medição superiores ao estipulado, para ambos os valores de referência. Para P como referência, o medidor E1 obteve 1,14%, o melhor resultado entre os equipamentos, porém ainda fora do limite estabelecido. O medidor D1, como mostra a porcentagem elevada na Figura 17, registrou erros de 86,13% e 68,78% para P e P1, respectivamente. Por outro lado, o medidor E2 não registrou nenhuma leitura de potência ativa.

Figura 17 – Desvios percentuais de potência ativa do Teste 6



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 18 – Desvios percentuais de potência ativa do Teste 7



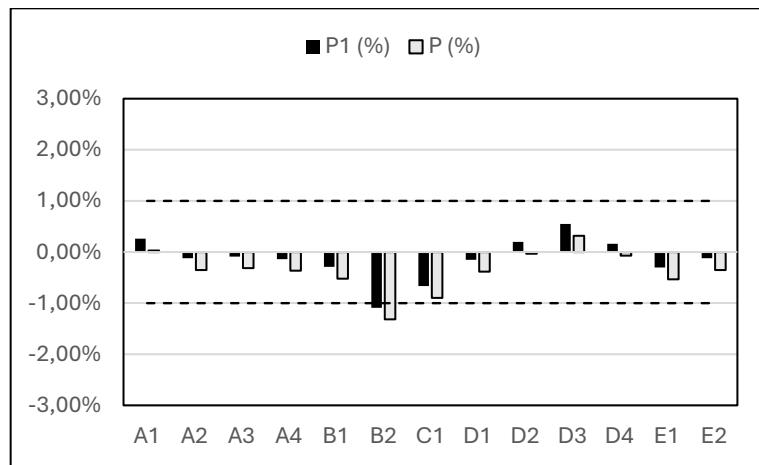
Fonte: Elaborado pelo autor.

No Teste 7, que simula uma forma de onda de corrente comum em sistemas de distribuição de baixa tensão operando com várias lâmpadas eletrônicas, o medidor E2

novamente não registrou leitura de potência ativa, como se pode analisar na Figura 18. Os demais medidores apresentaram erros superiores a 1% para os valores de referência P e P1.

Por fim, no Teste 8, que apresenta uma forma de onda de corrente semelhante à saída de um retificador de meia onda, doze dos treze medidores de energia apresentaram resultados aceitáveis para o desvio percentual estabelecido. Apenas o equipamento B2 apresentou erro superior ao estabelecido, -1,09% e -1,32%, para P1 e P, respectivamente. A Figura 19 expõe os resultados obtidos.

Figura 19 – Desvios percentuais de potência ativa do Teste 8



Fonte: Elaborado pelo autor.

Além disso, o Apêndice B expõe os resultados dos testes de potência ativa de forma mais detalhada. Foram apresentados, em módulo, as diferenças entre os valores medidos nos experimentos e os valores de referência P1 e P.

Por fim, a análise dos resultados obtidos revela que a precisão dos medidores de energia é inversamente proporcional ao aumento da distorção harmônica total. Para valores de DHT de tensão superiores a 5,00% e de DHT de corrente acima de 33,33%, a maioria dos medidores apresentou desvios superiores ao limite considerado aceitável. Destaca-se, nesse contexto, o medidor D1, que no Teste 6 registrou desvios superiores a 68% e 86%, considerando P1 e P como referência, respectivamente.

Além disso, verificou-se que o medidor E2 não realizou nenhuma leitura para distorções harmônicas de corrente superiores a 138%, o que significa que, sob essas condições, não houve registro de energia ativa durante os testes.

Dessa forma, essa análise preliminar, ainda que em pequena escala, evidencia que, independentemente do fabricante ou modelo do medidor, os dispositivos apresentam vulnerabilidades significativas quanto à confiabilidade das medições realizadas. Apesar das diferenças tecnológicas entre os equipamentos, os resultados indicam inconsistências que podem impactar tanto os consumidores quanto as concessionárias de energia.

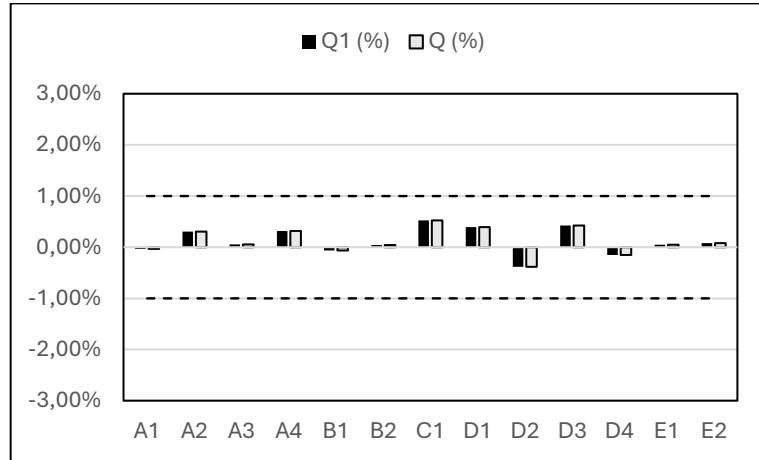
#### 4.2 Resultados de Potência Reativa

De forma semelhante ao item 4.1, onde foram apresentados os resultados para as leituras de potência ativa, neste tópico serão apresentados os resultados para as leituras de Potência Reativa. Os dados obtidos pelos medidores de energia serão comparados à Q1 (var), parcela que corresponde à componente de frequência de ordem 1, e à Q (var), que corresponde à soma das parcelas harmônicas com a fundamental Q1. Além disso, o parâmetro de erro percentual adotado foi, também, de  $\pm 1\%$ , portanto, espera-se que o valor da leitura seja igual ou menor a 2%, positivo e negativo, do valor teórico de referência.

O Teste 1 possui as formas de onda de tensão e corrente em fase, ou seja, não existe defasagem angular entre as grandezas, portanto não há presença de Potência Reativa. Como esperado, os medidores de energia reativa tiveram as leituras zeradas, portanto não houve desvio percentual.

No Teste 2, as formas de onda de tensão e corrente possuem apenas a componente fundamental de 60 Hz, portanto não há presença de componentes harmônicos e os valores de referência Q1 e Q são iguais ( $Q1 = Q$ ). Como exposto na Figura 20, todos os medidores de energia avaliados apresentaram resultados de medição inferiores ao erro estipulado de 1%.

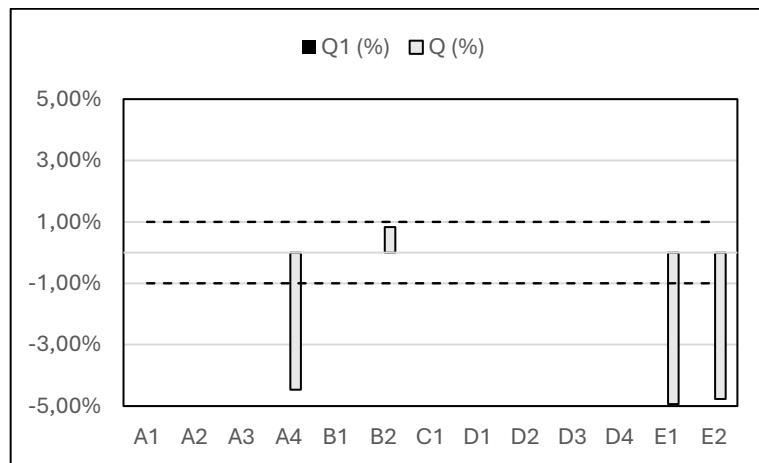
Figura 20 – Desvios percentuais de potência reativa do Teste 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o Teste 3, as formas da frequência fundamental, estavam em fase, portanto, o valor de referência Q1 é igual a zero, porém, devido aos harmônicos do experimento, Q é igual a 60 var. Dos medidores analisados, apenas quatro (A4, B2, E1 e E2) realizaram leitura, e apenas um deles, B2, com desvio dentro da faixa de erro aceitável, como mostra a Figura 21.

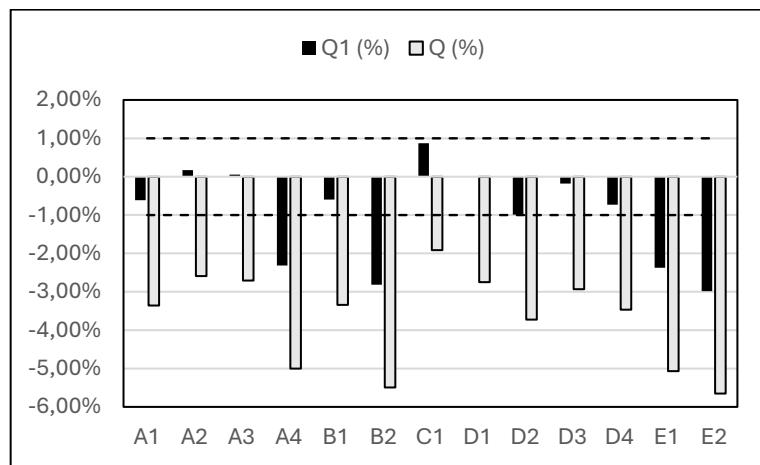
Figura 21 – Desvios percentuais de potência reativa do Teste 3



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já para o Teste 4, existe defasagem angular entre tensão e corrente, de modo que os valores teóricos de Q1 e Q sejam maiores. Adotando Q1, a princípio, como referência, apenas os mesmos quatro medidores que registraram leitura no Teste 3, registraram desvios percentuais superiores à 1%. Já para Q como referência, todos os medidores apresentaram erros superiores ao limite estabelecido, como exposto na Figura 22.

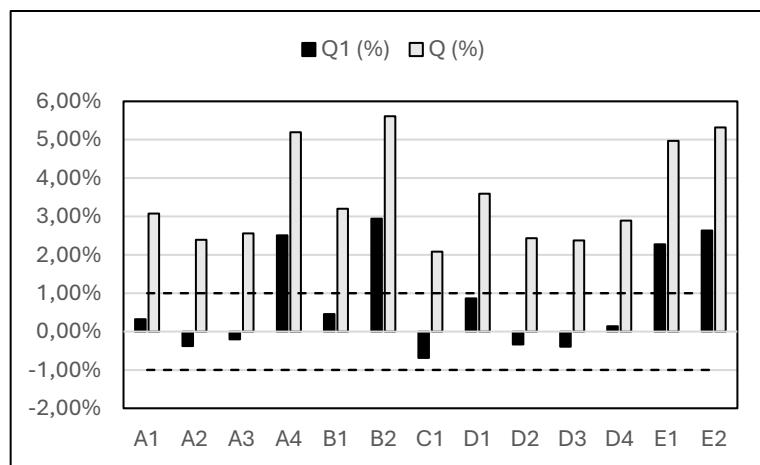
Figura 22 – Desvios percentuais de potência reativa do Teste 4



Fonte: Elaborado pelo autor.

O Teste 5, como mostra a Figura 23, apresenta resultados semelhantes aos encontrados no Teste 4, porém os valores teóricos e medidores são negativos, devido ao fato da corrente estar adianta em relação à tensão. Contudo, os mesmos quatro medidores apontaram erros superiores a 1%, para Q1 como referência. Além disso, para Q como referência, todos os medidores de potência reativa indicaram leituras com desvios superiores ao limite estabelecido.

Figura 23 – Desvios percentuais de potência reativa do Teste 5

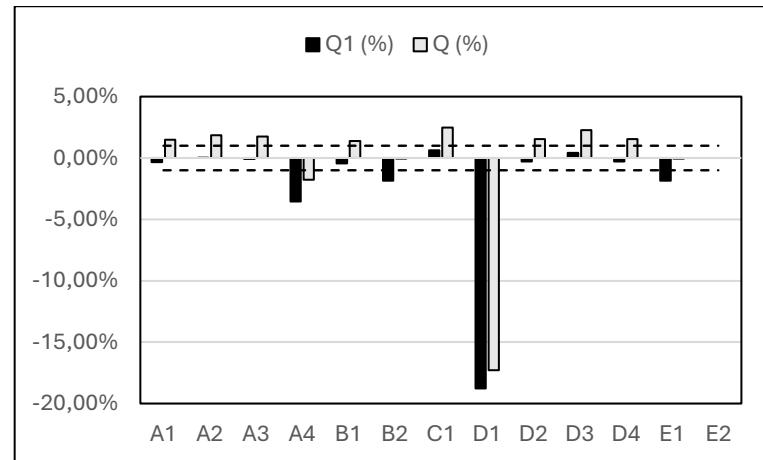


Fonte: Elaborado pelo autor.

No Teste 6, que apresentou maior nível de distorção harmônica total de corrente, 162,48%, o medidor de energia D1, de forma similar à leitura apresentada neste mesmo teste para Potência Ativa, indicou medições discrepantes em relação aos valores teóricos, como demonstra a Figura 24. Para Q1 como referência, o erro do medidor foi -18,78%, e, para Q

como referência, -17,29%. Além disso, o medidor de energia E2 não registrou nenhuma leitura de potência reativa. Os demais dispositivos apresentaram erros percentuais superiores ao limite de 1% para um dos valores de referência utilizados.

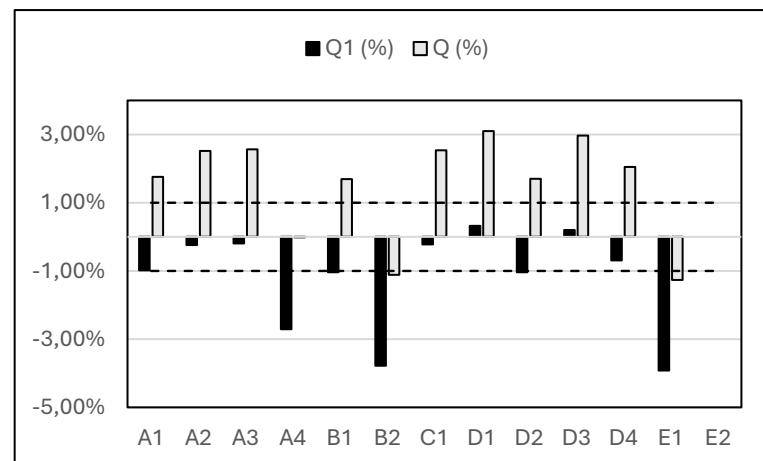
Figura 24 – Desvios percentuais de potência reativa do Teste 6



Fonte: Elaborado pelo autor.

No Teste 7, que possui elevada distorção harmônica total de corrente, na ordem de 138,59%, o medidor E2 também não registrou leitura de potência reativa, da mesma forma como ocorreu nos testes 6 e 7 de medição de potência ativa. Ademais, os medidores A4, B1, B2, D2 e E1 apresentaram erros elevados de medição para Q1 como referência teórica e todos os outros, com exceção de A4, apresentaram desvios superiores à 1% para Q como referência, como mostra a Figura 25.

Figura 25 – Desvios percentuais de potência reativa do Teste 7



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, o Teste 8 foi realizado com a forma de onda de corrente de retificador de meia onda, o qual possui distorção harmônica total de tensão igual a 5,00% e de corrente igual a 12,28%. Os valores teóricos de referência indicam uma potência reativa esperada zerada, para Q1, e apenas -0,17 var, para Q. Dos treze medidores submetidos aos testes, seis deles apresentaram leituras de potência reativa com valores positivos e significativos, como mostra a Tabela 5.

Tabela 5 – Valores de referência e medidor de potência reativa do Teste 8

| Teste | Medidor | Q1 (W) | Q (W) | Qmed (W) |
|-------|---------|--------|-------|----------|
| 8     | A1      | 0      | -0,17 | 0        |
|       | A2      | 0      | -0,17 | 75       |
|       | A3      | 0      | -0,17 | 70,64    |
|       | A4      | 0      | -0,17 | 82,63    |
|       | B1      | 0      | -0,17 | 77,83    |
|       | B2      | 0      | -0,17 | 126,8    |
|       | C1      | 0      | -0,17 | 142,46   |
|       | D1      | 0      | -0,17 | 0        |
|       | D2      | 0      | -0,17 | 0        |
|       | D3      | 0      | -0,17 | 0        |
|       | D4      | 0      | -0,17 | 0        |
|       | E1      | 0      | -0,17 | 210,92   |
|       | E2      | 0      | -0,17 | 0        |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ademais, o Apêndice C demonstra os valores medidos, em módulo, de potência reativa durante a realização dos testes 3, 4, 5, 6 e 7, juntamente com os desvios em relação aos valores de referência Q1 e Q.

Portanto, a análise da performance dos medidores de energia reativa, de forma semelhante aos resultados de potência ativa, mostra que as condições não senoidais de tensão e corrente interferem na precisão e confiabilidade do equipamento para medição de energia. O grau de distorção harmônico total das formas de onda, especial de corrente, é diretamente proporcional ao aumento dos erros de medição de energia reativa, ou seja, quanto mais distorcida a corrente, maior imprecisão do equipamento.

Além disso, é importante que seja destacado que os diferentes modelos de medidores, de fabricantes iguais, adotam maneiras distintas de realizar a medição de potência reativa. Esse efeito pode ser visto nos testes realizados, com exceção do 1 e 2, pois alguns dispositivos

realizam a leitura de potência, enquanto outros não, e alguns deles, com destaque para A4, B2, E1 e E2, apresentaram desvios de erros de medição superiores aos demais medidores.

No Teste 3, os medidores de energia citados acima realizaram leituras coerentes com o valor teórico de referência Q, enquanto os outros não mediram potência ativa, como previsto em Q1. Já no Teste 7, todos os medidores, com exceção de A4, B2 e E1, apresentaram desvios percentuais inferiores ao valor estipulado para Q1 como referência, entretanto os mesmos medidores apresentaram erros dentro do esperado para Q como valor teórico de referência.

## 5 CONCLUSÃO

Portanto, os ensaios demonstraram que a exatidão dos medidores de energia se degrada de maneira acentuada à medida que aumentam as distorções harmônicas presentes na rede. Desse modo, sempre que a Distorção Harmônica Total de Tensão ultrapassou 5 % ou a de corrente superou 33 %, a maioria dos treze equipamentos avaliados passou a registrar desvios superiores ao limite de  $\pm 1\%$  previsto para sua classe de precisão. Em condições ainda mais críticas — como no Teste 6, em que a DHT de corrente alcançou cerca de 162 % — os erros atingiram 86 % para potência ativa e aproximadamente 19 % para potência reativa, evidenciando a vulnerabilidade dos algoritmos de medição diante das componentes harmônicas.

Nesse contexto, é importante destacar o comportamento do medidor E2, o qual foi, aparentemente, projetado para operar com formas de onda perfeitamente senoidais ou, no máximo, com baixos níveis de distorção. Em função disso, o dispositivo deixou de registrar qualquer valor de potência ativa e reativa nos testes em que a DHT de corrente ultrapassou 138 %. Essa interrupção completa das leituras evidencia a fragilidade do equipamento diante de distorções elevadas e acarreta perda total de informação sobre o consumo, inviabilizando a composição correta da fatura e comprometendo indicadores operacionais da concessionária, sobretudo no que se refere à estimativa de perdas técnicas e não técnicas.

Adicionalmente, outro aspecto crítico diz respeito às leituras incoerentes de energia reativa observadas nos ensaios envolvendo harmônicos. Em vários casos, parte dos medidores realiza o cálculo da potência reativa considerando apenas a componente fundamental (Q1), enquanto outros adotam a potência reativa total (Q), a qual inclui as parcelas harmônicas. Tal adoção de referências distintas causou divergências significativas: no Teste 8, por exemplo, cujo valor teórico de Q era praticamente nulo, seis medidores apresentaram resultados positivos bastante expressivos, ultrapassando inclusive 200 var. Dessa forma, torna-se clara a ausência de padronização no tratamento de grandezas não senoidais, o que pode gerar faturamentos indevidos, pois consumidores tecnicamente equivalentes seriam tarifados de maneira desigual a depender do modelo de medidor instalado.

Por fim, os achados indicam a necessidade de revisar as normas de ensaio, de modo a incluir rotinas que reproduzam níveis de distorção harmônica compatíveis com o panorama atual, bem como estabelecer um critério único para o cálculo da potência reativa em regime distorcido. Caso essas providências não sejam tomadas, persistirão inconsistências na contabilização de energia, gerando impactos econômicos tanto para as distribuidoras quanto para os usuários finais.

## REFERÊNCIAS

ALEXANDER, C. K.; SADIQU, M. N. O. **Fundamentos de circuitos elétricos**. 5<sup>a</sup>. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

BOYLESTAD, R. L. **Introdução à análise de circuitos**. 12<sup>a</sup>. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2014.

COTRIM, A. A. **Instalações elétricas**. 7<sup>a</sup>. ed. São Paulo: Érica, 2017.

DUGAN, R. C. *et al.* **Electrical power systems quality**. 3<sup>a</sup>. ed. New York: McGraw-Hill, 2012.

FILHO, S. D. M. **Medição de energia elétrica**. 4<sup>a</sup>. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 1997.

GRAINGER, J. J.; STEVENSON, W. D. **Análise de Sistemas de Potência**. São Paulo: Makron Books, 1994.

GUSSOW, M. **Eletricidade básica**. 2<sup>a</sup>. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2013.

HOLLISTER, V. L. The induction watt-hour meter. **Proc Am Inst Electr Eng**, v. 34, n. 10, 1915. ISSN 2407-2434. <https://doi.org/10.1109/PAIEE.1915.6590211>

**IEEE. Std 1459-2010 - IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions**. [S.l.]: IEEE, 2010. <https://doi.org/10.1109/ieeestd.2000.93398>

KOTHARI, D. P.; NAGRATH, I. J. **Modern Power Systems Analysis**. 4<sup>a</sup>. ed. New Delhi: Tata McGraw-Hill, 2011.

MACEDO JR, J. R. *et al.* An update on the performance of active energy meters under non-sinusoidal conditions. **Electrical Engineering**, v. 103, p. 117-124, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00202-020-00991-y>

MONTEIRO, P. R. D. Capacitores: Instalação e Correção do Fator de Potência, 2020. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/346060871\\_CAPACITORES\\_Instalacao\\_e\\_Correcao\\_o\\_do\\_Fator\\_de\\_Potencia\\_2020](https://www.researchgate.net/publication/346060871_CAPACITORES_Instalacao_e_Correcao_do_Fator_de_Potencia_2020). Acesso em: 8 abril 2025.

MORENO, H. **Harmônicas nas instalações elétricas**. São Paulo: Procober Brasil, 2019.

XAVIER, G. L. *et al.* An update on the performance of reactive power under non-sinusoidal conditions. **Electrical Engineering**, v. 103, p. 55-63, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00202-020-00970-3>

## APÊNDICE A – DETALHAMENTO DOS TESTES

**Tabela A.1 – Detalhamento das tensões e correntes dos testes realizados**

| Teste | Ordem (pu) | Tensão (Vrms) | Ângulo (°) | Corrente (Arms) | Ângulo (°) |
|-------|------------|---------------|------------|-----------------|------------|
| #1    | 1          | 120,00        | 0,00       | 15,00           | 0,00       |
|       | 5          | -             | -          | -               | -          |
| #2    | 1          | 120,00        | 0,00       | 15,00           | -36,00     |
|       | 5          | -             | -          | -               | -          |
| #3    | 1          | 120,00        | 0,00       | 15,00           | 0,00       |
|       | 5          | 24,00         | 0,00       | 5,00            | -150,00    |
| #4    | 1          | 120,00        | 0,00       | 15,00           | -36,00     |
|       | 5          | 12,00         | 0,00       | 5,00            | -150,00    |
| #5    | 1          | 120,00        | 0,00       | 15,00           | 36,00      |
|       | 5          | 12,00         | 0,00       | 5,00            | 30,00      |
| #6    | 1          | 120,00        | 0,00       | 10,00           | 291,48     |
|       | 3          | 1,30          | 68,92      | 9,34            | 327,87     |
|       | 5          | 4,51          | -103,90    | 8,16            | 7,97       |
|       | 7          | 3,10          | -138,32    | 6,65            | 47,10      |
|       | 9          | 0,12          | -91,31     | 4,98            | 93,38      |
|       | 11         | 1,62          | 18,62      | 3,51            | 142,64     |
|       | 13         | 1,04          | -60,37     | 2,44            | 202,60     |
|       | 15         | 0,71          | 4,21       | 2,04            | 268,65     |
|       | 17         | 0,25          | 54,50      | 2,12            | 335,49     |
|       | 19         | 0,14          | 133,17     | 2,10            | 28,85      |
|       | 21         | 0,10          | -152,38    | 1,90            | 81,10      |
|       | 23         | 0,05          | -29,87     | 1,63            | 137,93     |
|       | 25         | 0,04          | -4,68      | 1,43            | 193,58     |
|       | 27         | 0,01          | 63,01      | 1,23            | 254,29     |
| #7    | 1          | 120,00        | 0,00       | 10,00           | 329,43     |
|       | 3          | 1,30          | 68,92      | 8,42            | 292,77     |
|       | 5          | 4,51          | -103,90    | 7,00            | 29,42      |
|       | 7          | 3,10          | -138,32    | 5,31            | 36,49      |
|       | 9          | 0,12          | -91,31     | 3,69            | 91,98      |
|       | 11         | 1,62          | 18,62      | 2,62            | 141,14     |
|       | 13         | 1,04          | -60,37     | 2,57            | 199,10     |
|       | 15         | 0,71          | 4,21       | 0,79            | 310,74     |
|       | 17         | 0,25          | 54,50      | 2,59            | 315,75     |
|       | 19         | 0,14          | 133,17     | 1,03            | 63,93      |
|       | 21         | 0,10          | -152,38    | 2,25            | 71,60      |
|       | 23         | 0,05          | -29,87     | 0,73            | 147,90     |
|       | 25         | 0,04          | -4,68      | 1,47            | 185,19     |

| Teste | Ordem (pu) | Tensão (Vrms) | Ângulo (º) | Corrente (Arms) | Ângulo (º) |
|-------|------------|---------------|------------|-----------------|------------|
| #8    | 27         | 0,01          | 63,01      | 0,86            | 260,62     |
|       | 0          | 0,00          | 0,00       | 6,36            | 90,00      |
|       | 1          | 120,00        | 0,00       | 10,00           | 0,00       |
|       | 2          | 0,06          | 145,10     | 4,27            | -90,42     |
|       | 3          | 1,30          | 68,92      | 0,10            | 79,33      |
|       | 4          | 0,07          | 154,15     | 1,00            | -73,09     |
|       | 5          | 4,51          | -103,90    | 0,38            | -106,90    |
|       | 6          | 0,07          | 94,96      | 0,42            | -108,30    |
|       | 7          | 3,10          | -138,32    | 0,26            | -141,10    |
|       | 8          | 0,07          | 70,38      | 0,19            | -177,60    |
|       | 9          | 0,12          | -91,31     | 0,01            | -106,80    |
|       | 10         | 0,05          | 30,05      | 0,11            | 162,40     |
|       | 11         | 1,62          | 18,62      | 0,13            | 15,86      |
|       | 12         | 0,04          | 179,64     | 0,09            | -89,50     |
|       | 13         | 1,04          | -60,37     | 0,08            | -62,90     |
|       | 14         | 0,02          | 62,57      | 0,11            | -155,60    |
|       | 15         | 0,71          | 4,21       | 0,06            | 3,20       |
|       | 16         | 0,03          | -65,20     | 0,10            | -128,60    |
|       | 17         | 0,25          | 54,50      | 0,02            | 64,65      |
|       | 18         | 0,04          | 97,53      | 0,06            | -123,60    |
|       | 19         | 0,14          | 133,17     | 0,01            | 132,80     |
|       | 20         | 0,04          | 118,26     | 0,04            | -131,20    |
|       | 21         | 0,10          | -152,38    | 0,01            | -157,00    |
|       | 22         | 0,03          | -133,89    | 0,03            | 152,80     |
|       | 23         | 0,05          | -29,87     | 0,00            | 20,63      |
|       | 24         | 0,02          | -48,15     | 0,03            | -148,40    |
|       | 25         | 0,04          | -4,68      | 0,00            | 56,58      |
|       | 26         | 0,02          | 43,16      | 0,02            | -153,10    |
|       | 27         | 0,01          | 63,01      | 0,00            | 62,71      |

## APÊNDICE B – RESULTADOS DOS TESTES PARA POTÊNCIA ATIVA

**Tabela B.1 – Resultados em módulo dos testes para potência ativa**

| Teste | Medidor | Pmed<br>(W) | Desvio<br>P1 (W) | Desvio<br>P (W) | Teste | Medidor | Pmed<br>(W) | Desvio<br>P1 (W) | Desvio P<br>(W) |
|-------|---------|-------------|------------------|-----------------|-------|---------|-------------|------------------|-----------------|
| #1    | A1      | 1795,0      | -5,00            | -5,00           | #2    | A1      | 1454,2      | -2,05            | -2,05           |
|       | A2      | 1800,4      | 0,38             | 0,38            |       | A2      | 1456,2      | 0,01             | 0,01            |
|       | A3      | 1799,0      | -0,97            | -0,97           |       | A3      | 1455,4      | -0,87            | -0,87           |
|       | A4      | 1800,8      | 0,83             | 0,83            |       | A4      | 1455,1      | -1,17            | -1,17           |
|       | B1      | 1797,8      | -2,22            | -2,22           |       | B1      | 1454,4      | -1,81            | -1,81           |
|       | B2      | 1796,3      | -3,66            | -3,66           |       | B2      | 1451,5      | -4,69            | -4,69           |
|       | C1      | 1809,4      | 9,42             | 9,42            |       | C1      | 1460,4      | 4,14             | 4,14            |
|       | D1      | 1797,3      | -2,66            | -2,66           |       | D1      | 1451,3      | -4,98            | -4,98           |
|       | D2      | 1798,6      | -1,42            | -1,42           |       | D2      | 1457,7      | 1,48             | 1,48            |
|       | D3      | 1805,3      | 5,34             | 5,34            |       | D3      | 1459,8      | 3,55             | 3,55            |
|       | D4      | 1796,8      | -3,21            | -3,21           |       | D4      | 1453,9      | -2,34            | -2,34           |
|       | E1      | 1801,4      | 1,44             | 1,44            |       | E1      | 1457,8      | 1,59             | 1,59            |
|       | E2      | 1795,0      | -5,00            | -5,00           |       | E2      | 1453,9      | -2,34            | -2,34           |
| #3    | A1      | 1691,8      | -108,23          | -4,31           | #4    | A1      | 1504,9      | 48,66            | 100,62          |
|       | A2      | 1700,2      | -99,85           | 4,07            |       | A2      | 1505,8      | 49,60            | 101,56          |
|       | A3      | 1694,6      | -105,45          | -1,53           |       | A3      | 1507,4      | 51,18            | 103,14          |
|       | A4      | 1700,6      | -99,45           | 4,47            |       | A4      | 1504,3      | 48,03            | 99,99           |
|       | B1      | 1693,7      | -106,32          | -2,40           |       | B1      | 1507,0      | 50,74            | 102,70          |
|       | B2      | 1692,6      | -107,44          | -3,52           |       | B2      | 1503,3      | 47,09            | 99,05           |
|       | C1      | 1700,6      | -99,45           | 4,47            |       | C1      | 1513,1      | 56,87            | 108,83          |
|       | D1      | 1691,0      | -109,03          | -5,11           |       | D1      | 1495,5      | 39,29            | 91,25           |
|       | D2      | 1704,6      | -95,43           | 8,49            |       | D2      | 1507,4      | 51,18            | 103,14          |
|       | D3      | 1711,9      | -88,14           | 15,78           |       | D3      | 1510,3      | 54,02            | 105,98          |
|       | D4      | 1703,4      | -96,64           | 7,28            |       | D4      | 1504,6      | 48,35            | 100,31          |
|       | E1      | 1651,9      | -148,05          | -44,13          |       | E1      | 1505,6      | 49,41            | 101,37          |
|       | E2      | 1694,2      | -105,85          | -1,93           |       | E2      | 1503,6      | 47,40            | 99,36           |
| #5    | A1      | 1399,4      | -56,83           | -108,79         | #6    | A1      | 407,1       | -32,29           | 8,67            |
|       | A2      | 1405,1      | -51,10           | -103,06         |       | A2      | 411,0       | -28,37           | 12,59           |
|       | A3      | 1506,2      | 49,92            | -2,04           |       | A3      | 407,1       | -32,29           | 8,67            |
|       | A4      | 1407,6      | -48,63           | -100,59         |       | A4      | 408,6       | -30,77           | 10,19           |
|       | B1      | 1401,9      | -54,32           | -106,28         |       | B1      | 406,5       | -32,82           | 8,14            |
|       | B2      | 1401,3      | -54,92           | -106,88         |       | B2      | 405,2       | -34,15           | 6,81            |
|       | C1      | 1409,0      | -47,25           | -99,21          |       | C1      | 410,4       | -28,93           | 12,03           |
|       | D1      | 1402,7      | -53,56           | -105,52         |       | D1      | 741,5       | 302,18           | 343,14          |
|       | D2      | 1402,9      | -53,29           | -105,25         |       | D2      | 412,7       | -26,65           | 14,31           |
|       | D3      | 1412,6      | -43,66           | -95,62          |       | D3      | 410,3       | -29,07           | 11,89           |
|       | D4      | 1405,4      | -50,82           | -102,78         |       | D4      | 409,7       | -29,70           | 11,26           |
|       | E1      | 1409,8      | -46,41           | -98,37          |       | E1      | 402,9       | -36,43           | 4,53            |
|       | E2      | 1399,1      | -57,10           | -109,06         |       | E2      | -           | -                | -               |

| Teste | Medidor | Pmed<br>(W) | Desvio<br>P1 (W) | Desvio<br>P (W) | Teste | Medidor | Pmed<br>(W) | Desvio<br>P1 (W) | Desvio P<br>(W) |
|-------|---------|-------------|------------------|-----------------|-------|---------|-------------|------------------|-----------------|
| #7    | A1      | 1008,7      | -24,56           | 24,5            | #8    | A1      | 1203,2      | 3,16             | 0,39            |
|       | A2      | 1013,4      | -19,88           | 29,18           |       | A2      | 1198,6      | -1,44            | -4,21           |
|       | A3      | 1008,5      | -24,71           | 24,35           |       | A3      | 1199,0      | -1,04            | -3,81           |
|       | A4      | 1011,8      | -21,45           | 27,61           |       | A4      | 1198,4      | -1,64            | -4,41           |
|       | B1      | 1007,9      | -25,32           | 23,74           |       | B1      | 1196,5      | -3,47            | -6,24           |
|       | B2      | 1007,0      | -26,26           | 22,8            |       | B2      | 1186,9      | -13,09           | -15,86          |
|       | C1      | 1016,4      | -16,88           | 32,18           |       | C1      | 1192,0      | -7,99            | -10,76          |
|       | D1      | 1013,5      | -19,74           | 29,32           |       | D1      | 1198,2      | -1,84            | -4,61           |
|       | D2      | 1017,6      | -15,59           | 33,47           |       | D2      | 1202,4      | 2,36             | -0,41           |
|       | D3      | 1019,8      | -13,43           | 35,63           |       | D3      | 1206,6      | 6,58             | 3,81            |
|       | D4      | 1015,9      | -17,31           | 31,75           |       | D4      | 1202,0      | 1,95             | -0,82           |
|       | E1      | 1006,0      | -27,23           | 21,83           |       | E1      | 1196,4      | -3,64            | -6,41           |
|       | E2      | -           | -                | -               |       | E2      | 1198,6      | -1,44            | -4,21           |

## APÊNDICE C – RESULTADOS DOS TESTES PARA POTÊNCIA REATIVA

**Tabela C.1 – Resultados em módulo dos testes para potência reativa**

| Teste | Medidor | Qmed<br>(var) | Desvio<br>Q1 (var) | Desvio<br>Q (var) | Teste | Medidor | Qmed<br>(var) | Desvio<br>Q1 (var) | Desvio<br>Q (var) |
|-------|---------|---------------|--------------------|-------------------|-------|---------|---------------|--------------------|-------------------|
| #2    | A1      | 1057,7        | -0,35              | -0,35             | #5    | A1      | -1054,6       | 3,44               | 33,44             |
|       | A2      | 1061,3        | 3,24               | 3,24              |       | A2      | -1062         | -4,02              | 25,98             |
|       | A3      | 1058,6        | 0,59               | 0,59              |       | A3      | -1060,2       | -2,14              | 27,86             |
|       | A4      | 1061,4        | 3,39               | 3,39              |       | A4      | -1031,5       | 26,53              | 56,53             |
|       | B1      | 1057,4        | -0,65              | -0,65             |       | B1      | -1053,2       | 4,86               | 34,86             |
|       | B2      | 1058,4        | 0,43               | 0,43              |       | B2      | -1026,9       | 31,09              | 61,09             |
|       | C1      | 1063,6        | 5,58               | 5,58              |       | C1      | -1065,3       | -7,31              | 22,69             |
|       | D1      | 1062,2        | 4,16               | 4,16              |       | D1      | -1048,9       | 9,12               | 39,12             |
|       | D2      | 1054,0        | -4,06              | -4,06             |       | D2      | -1061,6       | -3,55              | 26,45             |
|       | D3      | 1062,5        | 4,49               | 4,49              |       | D3      | -1062,2       | -4,17              | 25,83             |
|       | D4      | 1056,4        | -1,59              | -1,59             |       | D4      | -1056,6       | 1,43               | 31,43             |
|       | E1      | 1058,5        | 0,51               | 0,51              |       | E1      | -1033,9       | 24,09              | 54,09             |
|       | E2      | 1058,9        | 0,88               | 0,88              |       | E2      | -1030,2       | 27,86              | 57,86             |
| #3    | A1      | 0,0           | 0,00               | -60,00            | #6    | A1      | 1112,9        | -3,81              | 16,30             |
|       | A2      | 0,0           | 0,00               | -60,00            |       | A2      | 1116,8        | 0,15               | 20,26             |
|       | A3      | 0,0           | 0,00               | -60,00            |       | A3      | 1115,8        | -0,92              | 19,19             |
|       | A4      | 57,3          | 57,32              | -2,68             |       | A4      | 1077,1        | -39,57             | -19,46            |
|       | B1      | 0,0           | 0,00               | -60,00            |       | B1      | 1111,6        | -5,05              | 15,06             |
|       | B2      | 60,5          | 60,50              | 0,50              |       | B2      | 1095,9        | -20,74             | -0,63             |
|       | C1      | 0,0           | 0,00               | -60,00            |       | C1      | 1123,8        | 7,12               | 27,23             |
|       | D1      | 0,0           | 0,00               | -60,00            |       | D1      | 907,0         | -209,69            | -189,58           |
|       | D2      | 0,0           | 0,00               | -60,00            |       | D2      | 1113,4        | -3,30              | 16,81             |
|       | D3      | 0,0           | 0,00               | -60,00            |       | D3      | 1121,4        | 4,67               | 24,78             |
|       | D4      | 0,0           | 0,00               | -60,00            |       | D4      | 1113,4        | -3,30              | 16,81             |
|       | E1      | 57,0          | 57,04              | -2,96             |       | E1      | 1096,0        | -20,72             | -0,61             |
|       | E2      | 57,1          | 57,14              | -2,86             |       | E2      | -             | -                  | -                 |
| #4    | A1      | 1051,5        | -6,52              | -36,52            | #7    | A1      | 604,3         | -5,97              | 10,45             |
|       | A2      | 1059,8        | 1,83               | -28,17            |       | A2      | 608,8         | -1,47              | 14,95             |
|       | A3      | 1058,6        | 0,59               | -29,41            |       | A3      | 609,1         | -1,17              | 15,25             |
|       | A4      | 1033,6        | -24,46             | -54,46            |       | A4      | 593,75        | -16,52             | -0,10             |
|       | B1      | 1051,7        | -6,33              | -36,33            |       | B1      | 603,92        | -6,35              | 10,07             |
|       | B2      | 1028,2        | -29,77             | -59,77            |       | B2      | 587,22        | -23,05             | -6,63             |
|       | C1      | 1067,2        | 9,21               | -20,79            |       | C1      | 608,9         | -1,37              | 15,05             |
|       | D1      | 1058,1        | 0,12               | -29,88            |       | D1      | 612,26        | 1,99               | 18,41             |
|       | D2      | 1047,5        | -10,49             | -40,49            |       | D2      | 603,95        | -6,32              | 10,10             |
|       | D3      | 1056,1        | -1,90              | -31,90            |       | D3      | 611,48        | 1,21               | 17,63             |
|       | D4      | 1050,3        | -7,74              | -37,74            |       | D4      | 606,03        | -4,24              | 12,18             |
|       | E1      | 1032,9        | -25,11             | -55,11            |       | E1      | 586,32        | -23,95             | -7,53             |
|       | E2      | 1026,5        | -31,53             | -61,53            |       | E2      | -             | -                  | -                 |

