

Caracterização e influência dos harmônicos na qualidade de energia de equipamentos em uma instalação residencial.

Characterization and Impact of Harmonic Distortion on Power Quality in Residential Electrical Equipment.

Lucas Alves da Silva

las11@discente.ifpe.edu.br

Alexandre Manoel de Farias

alexandre.farias@pesqueira.ifpe.edu.br

RESUMO

Este trabalho analisa a influência das correntes harmônicas na qualidade da energia elétrica em uma instalação residencial. As medições foram realizadas com o analisador Minipa ET-5061C em diversos eletrodomésticos comuns no contexto brasileiro, avaliando parâmetros como corrente, fator de potência e distorção harmônica total (DHT). Os resultados indicaram que equipamentos que dispõem de circuitos eletrônicos ou eletromagnéticos em sua composição como, por exemplo, micro-ondas e máquinas de lavar, apresentaram elevados níveis de distorção harmônica, enquanto cargas resistivas, como ferros de passar e sanduicheiras, mostraram baixo impacto. Observou-se que altos níveis de DHT afetam negativamente o fator de potência, mesmo quando a defasagem entre tensão e corrente é baixa. A comparação dos resultados com os limites estabelecidos pelos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) e pela norma IEC 61000-3-2 revelou que, embora a maioria das distorções de tensão se mantenha dentro dos padrões, a distorção de corrente ultrapassou os valores recomendáveis em alguns casos. Conclui-se que a crescente utilização de cargas não lineares em ambientes residenciais representa um desafio para a manutenção da qualidade da energia elétrica, demandando soluções técnicas e maior conscientização dos consumidores.

Palavras-chave: Harmônicos. Qualidade de energia. Instalações elétricas residenciais.

ABSTRACT

This study analyzes the influence of harmonic currents on the quality of electrical energy in a residential installation. Measurements were carried out using the Minipa ET-5061C analyzer on various household appliances commonly found in Brazilian homes, evaluating parameters such as current, power factor, and total harmonic distortion (THD). The results indicated that equipment containing electronic or

electromagnetic circuits, such as microwave ovens and washing machines, exhibited high levels of harmonic distortion, while resistive loads, such as irons and sandwich makers, showed low impact. It was observed that high THD levels negatively affect the power factor, even when the phase shift between voltage and current is low. The comparison of the results with the limits established by the Brazilian National Electric Energy Distribution Procedures (PRODIST) and by the IEC 61000-3-2 standard revealed that, although most voltage distortions remained within acceptable limits, current distortion exceeded recommended values in some cases. It is concluded that the increasing use of nonlinear loads in residential environments represents a challenge for maintaining power quality, requiring technical solutions and greater consumer awareness.

Keywords: Harmonics. Power quality. Residential electrical installations.

1 INTRODUÇÃO

A qualidade da energia elétrica (QEE) tem sido historicamente associada à continuidade do fornecimento, à regulação da tensão e à estabilidade da frequência, aspectos estes que, em décadas passadas, eram satisfatoriamente mantidos graças à predominância de cargas lineares nos sistemas elétricos. Entretanto, a crescente inserção de cargas não lineares nos ambientes residenciais, impulsionada pela evolução da eletrônica de potência, tem modificado esse cenário, intensificando distúrbios como os harmônicos, os quais se destacam por sua natureza contínua e por representarem uma ameaça significativa à integridade dos sistemas elétricos (MARTINHO, 2013).

As distorções, oriundas do consumo residencial, afetam a forma de onda da corrente e da tensão, comprometendo diretamente a qualidade de potência entregue ao consumidor (LOPEZ, 2013). A literatura técnica, por muito tempo, concentrou suas análises no setor industrial, dada sua representatividade no consumo energético nacional; no entanto, com a evolução tecnológica e a maior presença de cargas não lineares em domicílios e comércios, tornou-se urgente o estudo do impacto dessas cargas na Qualidade da Energia Elétrica (QEE) em ambientes residenciais (GALLEGO et al., 2005).

A partir do ano de 2001, com o avanço dos programas de conservação energética, houve uma inserção ainda mais intensa de equipamentos eficientes e não lineares nos lares brasileiros, alterando profundamente o perfil de consumo e os desafios relacionados à qualidade da energia (PROCEL, 2024).

Essa tendência se mantém nas últimas décadas, como indicado no 5º Plano de Aplicação de Recursos do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL, 2024/2025), que destaca a ampliação do uso de cargas não lineares e eletrodomésticos com eletrônica embarcada. Embora o relatório não apresente um valor percentual atualizado das distorções harmônicas causadas por esses aparelhos, ele reforça a necessidade de avaliações mais rigorosas da qualidade da energia e do impacto dessas cargas na rede elétrica, evidenciando a continuidade e ampliação desse desafio no cenário energético nacional (PROCEL, 2024).

A constante substituição de equipamentos por modelos mais modernos e eficientes, aponta para uma elevação contínua dos níveis de distorção harmônica em sistemas de baixa tensão, exigindo novas abordagens técnicas e regulatórias (EPE, 2025). Diante desse cenário, torna-se fundamental a caracterização dos harmônicos gerados por cargas residenciais e a análise de sua influência na qualidade de energia elétrica, uma vez que tais distúrbios, além de afetarem a eficiência e a durabilidade dos equipamentos, podem resultar em prejuízos econômicos consideráveis. (Martins, 2003).

Com efeito, a QEE passou a ser entendida como um conceito multidimensional, que engloba desde a qualidade da tensão e da corrente até a responsabilidade do consumidor na utilização adequada da energia (LOPEZ, 2013), sendo imprescindível o desenvolvimento de estudos que revelem o impacto real dos eletrodomésticos na geração de harmônicos e na degradação da energia fornecida em instalações residenciais.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral.

Compreender, por meio de um estudo de caso em ambiente residencial, as contribuições individuais dos equipamentos lineares e não lineares na geração de distorções harmônicas e seus efeitos sobre a qualidade da energia elétrica.

2.2 Objetivos específicos.

- Comparar o percentual de harmônicos dos equipamentos lineares e não lineares na produção de harmônicos.
- Identificar os principais equipamentos eletroeletrônicos que possuem cargas lineares e não lineares presentes em uma residência típica e suas características de funcionamento que impactam na geração de harmônicos.
- Analisar os níveis de distorções harmônicas gerados por esses equipamentos, com base em medições práticas realizadas com o equipamento analisador de energia.
- Avaliar os impactos da distorção harmônica sobre parâmetros da rede elétrica, como fator de potência e funcionamento de dispositivos.
- Comparar os resultados obtidos com os limites estabelecidos pelas normas técnicas vigentes, como o módulo 8 da PRODIST e IEC 61000-3-2, verificando a conformidade da instalação.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

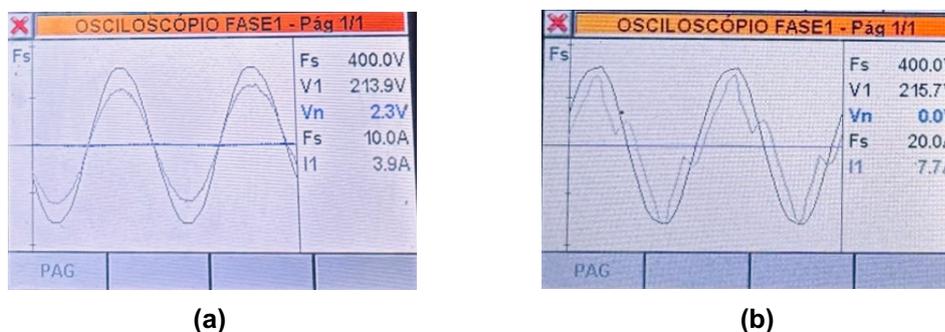
3.1 Qualidade de energia.

Entre os diversos fenômenos que comprometem a qualidade da energia, os harmônicos destacam-se por sua frequência e impacto. Eles surgem da presença de cargas não lineares, como computadores, fontes chaveadas, lâmpadas fluorescentes e equipamentos com dispositivos eletrônicos e mais recente nos equipamentos com tecnologia inverter que utilizam eletrônica de potência para o controle da eficiência. Esses dispositivos, ao operarem de forma diferente da linearidade ideal, distorcem a forma senoidal da corrente, resultando em componentes harmônicas que se somam à corrente e à tensão fundamentais. Essa distorção harmônica provoca o aumento das perdas no sistema, aquecimento de condutores, ressonâncias indesejadas e mau funcionamento de equipamentos (KAGAN, 2010). Um exemplo real é apresentado na Figura 1 onde foi realizada uma medição real em uma residência em duas configurações distintas: Figura 1a, a carga se encontrava praticamente resistiva, apresentando uma corrente senoidal com poucas interferências harmônicas. Já a situação da Figura 1b, ilustra o comportamento da mesma carga após o acionamento de algumas cargas não lineares.

Problemas relacionados à baixa qualidade da energia elétrica impactam diretamente os processos produtivos e operacionais de diversos consumidores, em especial os setores industriais e comerciais. A ocorrência de distúrbios, como oscilações de tensão, interrupções momentâneas e harmônicos, pode afetar o desempenho de sistemas automatizados, provocar falhas em processos sensíveis, resultar em perdas de dados, matéria-prima e até mesmo comprometer a segurança

dos trabalhadores e o meio ambiente (CASTRO et al., 2017). Por isso, manter a estabilidade e a conformidade dos parâmetros elétricos não é apenas uma exigência técnica, mas uma necessidade estratégica para evitar prejuízos e garantir a confiabilidade dos sistemas.

Figura 1 – Onda senoidal em carga linear e não-linear em um medidor de energia.



Fonte: Própria

A inadequação de qualquer um desses parâmetros pode comprometer o funcionamento dos equipamentos elétricos, além de elevar o consumo de energia e as perdas técnicas na rede. Um sistema que não fornece uma amplitude correta de tensão, por exemplo, pode causar mau funcionamento ou até mesmo a queima de dispositivos conectados, além de contribuir para o aumento das perdas na conversão e transmissão de energia (ROCHA, 2016).

3.2 Distorção harmônica

A distorção harmônica total (DHT) representa uma medida da deformação que uma forma de onda sofre em relação à forma puramente senoidal. Essa distorção ocorre pela presença de componentes harmônicas, geralmente múltiplos da frequência fundamental, que alteram a simetria e a periodicidade da onda (MARTINHO, 2013).

A ANEEL, por meio dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST), já definiu os indicadores de distorção harmônica, bem como os valores de referência a serem utilizados como limites legais no futuro (ANEEL, 2022). O valor eficaz de uma grandeza periódica não senoidal, como a tensão, é obtido por meio da soma quadrática das componentes harmônicas, conforme expressa a Equação 1.

$$V_{ef} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{max}} V_h^2} \quad (1)$$

onde V_h é o valor eficaz da componente harmônica de ordem h , e h_{max} é a ordem máxima considerada (ANEEL, 2022).

Além disso, define-se a Distorção Harmônica Individual de Tensão de ordem h como a relação percentual entre a tensão harmônica e a tensão fundamental V_1 , como mostra a Equação 2.

$$DHIv_h \% = \frac{V_h}{V_1} \cdot 100 \quad (2)$$

A Distorção Harmônica Total de Tensão (DHTv) pode ser definida, conforme mostrado na Equação 3, como a relação percentual entre o valor eficaz das componentes harmônicas da tensão (excluindo a fundamental) e o valor eficaz da componente fundamental.

$$DHTv_{\%} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} V_h^2}}{V_1} \cdot 100 \quad (3)$$

Esse índice permite quantificar o impacto dos harmônicos no sistema e é amplamente utilizado na avaliação da qualidade da energia elétrica (ANEEL, 2013). Para a corrente elétrica, a distorção total (DHTi) pode ser expressa pela Equação 4.

$$DHTi_{\%} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} I_h^2}}{I_1} \cdot 100 \quad (4)$$

onde I_h representa as correntes harmônicas de ordem superior e I_1 a corrente fundamental (KAGAN, 2010).

A importância desses parâmetros está no fato de que a presença de harmônicos pode provocar diversos problemas nas instalações elétricas. Harmônicas de ordem ímpar, por exemplo, são predominantes e afetam o funcionamento de equipamentos projetados para operar com ondas senoidais puras, como motores e transformadores. O resultado pode ser o aquecimento excessivo, ruído acústico, perdas adicionais e até falhas prematuras (LOPEZ, 2013). Já as harmônicas de ordem par, embora menos frequentes, causam impactos significativos por induzirem componentes de corrente contínua em dispositivos sensíveis. Em especial, as harmônicas múltiplas de três, em conexões em estrela, são aditivas no condutor neutro, podendo causar sobrecargas e danos ao sistema (LOPEZ, 2013).

A ANEEL estabeleceu, ainda, valores de referência para a distorção harmônica total da tensão conforme a faixa de tensão nominal do sistema. Para tensões inferiores ou iguais a 1 kV em ambiente residencial, o limite estipulado para DHT é de 10% (ANEEL, 2018), evidenciando a preocupação regulatória com os impactos das cargas residenciais na qualidade da energia.

3.3 Fator de potência.

O fator de potência é entendido como a relação entre a potência ativa e a potência aparente, sendo uma medida da eficiência com que a energia elétrica é convertida em trabalho útil. De acordo com Martinho (2013), em sistemas puramente lineares essa relação é expressa pelo cosseno do ângulo φ de defasagem entre a corrente e a tensão que determina o tamanho relativo da potência reativa em relação a potência ativa, de acordo com a Equação 5.

$$FP = \cos(\varphi) \quad (5)$$

No entanto, em sistemas com componentes harmônicos, essa definição torna-se insuficiente para descrever com precisão o comportamento da potência, haverá agora uma parcela adicional associada à distorção harmônica, denominada potência de distorção harmônica. Nesse contexto, a potência aparente S passa a ser calculada de acordo com a Equação 6.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (6)$$

onde P é a potência ativa, Q a potência reativa e D a potência associada à distorção harmônica.

Consequentemente, o fator de potência total de um sistema com harmônicos deve considerar não apenas a defasagem entre corrente e tensão fundamental, mas também o conteúdo harmônico da corrente. Assim, a Equação 7 descreve o fator de potência considerando a DHT de corrente no seu cálculo.

$$FP = \frac{\cos(\varphi)}{\sqrt{1 + DHT_i^2}} \quad (7)$$

Essa expressão mostra que, mesmo quando o cosseno do ângulo φ é elevado, indicando pequena defasagem entre tensão e corrente, o fator de potência pode ser reduzido significativamente em função do conteúdo harmônico.

Na prática, isso significa que instalações com elevado conteúdo harmônico apresentam um fator de potência reduzido, mesmo quando aparentemente bem corrigidas do ponto de vista reativo. Isso compromete a eficiência energética do sistema e pode resultar em penalidades contratuais, além de problemas operacionais como aquecimento de condutores, mau funcionamento de dispositivos de proteção e aumento das perdas técnicas. (MARTINHO, 2013)

Dessa forma, ao analisar a influência dos harmônicos na qualidade da energia elétrica em residências, é imprescindível considerar o seu impacto sobre o fator de potência e não apenas para fins de diagnóstico e correção. É importante também garantir a conformidade com normas técnicas e a segurança operacional das instalações.

3.4 Normas e recomendações

A análise da qualidade da energia elétrica e, em especial, da influência dos harmônicos, requer a observância de normas e diretrizes técnicas que garantam a padronização dos procedimentos de medição, avaliação e controle. No Brasil, essa normatização é conduzida por órgãos reguladores como a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), por meio do PRODIST, e por entidades internacionais como a Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC - *International Electrotechnical Commission*), por meio de suas recomendações técnicas. No entanto, como o PRODIST não apresenta informações e limites de distorções harmônicas específicos para eletrodomésticos residenciais, optou-se também pela utilização da norma IEC 61000-3-2, a qual estabelece limites claros para a Distorção Harmônica Total (DHT) de corrente e para harmônicos individuais, possibilitando uma avaliação mais precisa do desempenho desses equipamentos.

3.4.1 PRODIST – Módulo 8

O PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) é um conjunto normativo publicado pela ANEEL com o propósito de uniformizar as práticas técnicas aplicadas às redes de distribuição elétrica no Brasil. O conteúdo do Módulo 8 é voltado especificamente à qualidade da energia, abordando

aspectos fundamentais como distorções harmônicas, fator de potência, flutuações e variações de tensão, desequilíbrios entre fases e desvios de frequência (ANEEL, 2022).

Essa norma define os limites aceitáveis para a distorção harmônica total de tensão conforme a faixa de tensão nominal do sistema. Para sistemas com tensão nominal menor ou igual a 1 kV que é a condição típica de instalações residenciais, o limite estipulado para a DHT é de 10% como é visto na Tabela 1. (ANEEL, 2022).

Tabela 1 - Limites das distorções harmônicas totais.

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$
DTT _{95%}	10,0%	8,0%	5,0%
DTT _{P95%}	2,5%	2,0%	1,0%
DTT _{95%}	7,5%	6,0%	4,0%
DTT _{395%}	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: ANEEL (2022)

3.4.2 Limites de Emissão Harmônica – IEC 61000-3-2

A norma IEC 61000-3-2 (IEC, 2018) estabelece limites para a emissão de correntes harmônicas geradas por equipamentos elétricos com corrente de entrada até 16A por fase, conectados a sistemas de baixa tensão. Esses limites visam garantir que os equipamentos conectados à rede elétrica pública não causem distorções excessivas na forma de onda da corrente, protegendo assim a integridade da qualidade de energia no sistema como um todo. A norma é amplamente utilizada internacionalmente e serve como base para regulamentações nacionais em diversos países pois apresenta um agrupamento das cargas em categorias, como pode ser no Quadro 1.

Quadro 1 – Classificação dos equipamentos segundo a IEC 61000-3-2.

Classificação dos equipamentos.	
Classe A	Equipamentos trifásicos balanceados (correntes de linha eficazes com diferença menor que 20%) e todos os demais equipamentos, exceto aqueles das classes seguintes.
Classe B	Equipamentos portáteis.
Classe C	Equipamentos de iluminação.
Classe D	Equipamentos que possuem potência ativa fundamental de entrada entre 75 e 600 W. Independentemente da forma de onda de sua corrente de entrada, equipamentos das Classes B, C e, provisoriamente, equipamentos acionados por motor não são considerados como Classe D.

Fonte: IEC 61000-3-2 (IEC, 2018)

Os limites máximos de corrente para cada ordem harmônica são estabelecidos individualmente, com valores mais restritivos para harmônicas de ordens inferiores. Na Tabela 2 são apresentados os limites para equipamentos da Classe A e a Tabela 3 os limites para Classe D.

Tabela 2 – Limites de corrente harmônica (Classe A)

Limite de Corrente Harmônica			
Pares		Ímpares	
Ordem Harmônica	Corrente Máxima	Ordem Harmônica	Corrente Máxima
2 ^a	1,08	3 ^a	2,30
4 ^a	0,43	5 ^a	1,14
6 ^a	0,30	7 ^a	0,77
8 ^a ≤ h ≤ 40 ^a	0,23 x (8/h)	9 ^a	0,40
-----	-----	11 ^a	0,33
-----	-----	13 ^a	0,21
-----	-----	15 ^a ≤ h ≤ 39 ^a	0,15 x (15/h)

Fonte: IEC 61000-3-2 (IEC, 2018)

Tabela 3 – Limites de corrente harmônica (Classe D)

Limite de Corrente Harmônica		
Ordem Harmônica	75W < P < 600W (mA/W)	P > 600W (A)
3 ^a	3,4	2,30
5 ^a	1,9	1,14
7 ^a	1	0,77
9 ^a	0,5	0,40
11 ^a	0,35	0,33
13 ^a	0,296	0,21
15 ^a ≤ h ≤ 39 ^a	3,85/h	2,25/h

Fonte: IEC 61000-3-2 (IEC, 2018)

4 METODOLOGIA

A proposta deste trabalho é realizar medições em eletrodomésticos e eletroeletrônicos de uso comum, entre consumidores residenciais, com o objetivo de avaliar seu impacto na qualidade da energia elétrica. Foram analisados parâmetros como conteúdos harmônicos, fator de potência, corrente e tensão, a fim de identificar o comportamento elétrico desses equipamentos e como eles podem contribuir para distorções na rede. A lista dos eletrodomésticos utilizados nos ensaios, bem como os detalhes das medições realizadas, será apresentada no item 4.2.

4.1 Analisador de energia

O analisador de energia utilizado neste trabalho foi o modelo Minipa ET-5061C, um equipamento portátil e versátil desenvolvido para medições em sistemas trifásicos de baixa e média tensão. Fabricado pela empresa brasileira Minipa, o aparelho permite analisar parâmetros como tensão, corrente, frequência, potência ativa, reativa e aparente, fator de potência e $\cos \varphi$ de maneira distinta como podemos observar na equação 7, além da distorção harmônica total (DHT) e a presença de harmônicos até a 49ª ordem.

Figura 2 – Analisador minipa ET-5061C



Fonte: Manual Minipa ET-5061C (MINIPA, 2025)

A escolha do analisador de energia MINIPA ET5061C foi motivada pela disponibilidade do equipamento no curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do IFPE Campus Pesqueira, bem como pela sua confiabilidade e capacidade de atender com precisão às medições necessárias para o trabalho. A marca MINIPA é amplamente reconhecida internacionalmente pela qualidade e excelência na fabricação de instrumentos de medição, o que reforça a segurança na utilização do equipamento.

Outro diferencial importante do equipamento é sua flexibilidade. Embora venha com funções de medição pré-configuradas para garantir resultados otimizados em diferentes situações, ele também permite ajustes manuais, possibilitando configurações personalizadas de acordo com os parâmetros específicos que se pretende monitorar. Essa adaptabilidade torna o analisador adequado para diversas aplicações, garantindo medições precisas e representativas mesmo em condições variáveis.

Para realizar a configuração do dispositivo, o primeiro passo consiste em ligá-lo e acessar o menu de configurações por meio das teclas localizadas no painel central do equipamento. A partir desse menu, é possível definir os parâmetros necessários para a medição, como as grandezas elétricas a serem monitoradas, o intervalo de tempo entre as amostragens, a frequência da rede e o tipo de garra de corrente utilizada.

A Figura 3 mostra a tela do analisador com as configurações aplicadas. Nessa etapa, foi selecionado o modo de medição monofásico (método "Mono"), o qual exibe diretamente o diagrama de ligação correspondente, facilitando a conexão correta dos cabos de medição para sistemas de uma única fase.

Figura 3 – Configuração do analisador



Fonte: Manual Minipa ET-5061C (MINIPA, 2025)

4.2 Eletrodomésticos avaliados

Para a conclusão dos objetivos propostos neste trabalho, foram realizadas medições em diversos eletrodomésticos, considerando parâmetros como tensão, corrente, fator de potência e a taxa de distorção harmônica total (DHT) de tensão e corrente. Os dados foram coletados com dois tempos distintos de amostragem, definidos conforme as características de funcionamento de cada equipamento. Para aparelhos com ciclos de operação curtos, como o micro-ondas, foi adotado um intervalo de coleta de 1 segundo, de modo a capturar com maior precisão as variações durante o uso. Já para eletrodomésticos com funcionamento mais contínuo, como o bebedouro tipo “gela-água”, a geladeira e a máquina de lavar roupas, o tempo de coleta adotado foi de 2 minutos.

As medições harmônicas foram realizadas até a 49ª ordem. No entanto, para fins de análise e interpretação, foram consideradas apenas as componentes harmônicas mais relevantes, ou seja, aquelas cuja contribuição percentual para o DHT foi superior a 1%.

Em determinados casos, foram inseridos gráficos para ilustrar a natureza de funcionamento dos eletrodomésticos e o comportamento das correntes harmônicas associadas. Esses gráficos foram analisados com o objetivo de proporcionar uma melhor compreensão dos fenômenos observados durante o funcionamento dos equipamentos.

A seleção dos equipamentos utilizados nas medições teve como critério o uso frequente em residências. A seguir é apresentada a Quadro 2 com os eletrodomésticos analisados.

Quadro 2 – Eletrodomésticos analisados.

Eletrodoméstico	Modelo	Potência (W)	Classe da IEC
Bebedouro elétrico	Bebedouro Electrolux BC01X 220V	75W	Classe A
Bomba de água	Bomba periférica Ferrari Acquapump 220V	1/2CV (370W)	Classe A

Ferro de passar roupa	Ferro de passar Black+Decker fx3060 220V	2kW	Classe A
Forno micro-ondas	Forno micro-ondas Consul CMD20ASBNA 220V	700W	Classe D
Geladeira	Geladeira/Refrigerador combinado BRASTEMP BRM50 127V	135W	Classe A
Liquidificador	Liquidificador Black+Decker 220V	300W	Classe A
Máquina de lavar roupa	Lavadora automática Consul CWC08ABBNA 220V	235W	Classe A
Sanduicheira	Sanduicheira/Grill Britânia Press BGR271	850W	Classe A
Ventilador	Ventilador Arno X-treme7 220V	150W	Classe A

Fonte: Própria

5 RESULTADOS E ANÁLISE

5.1 Bebedouro elétrico.

O bebedouro, embora pareça simples, possui componentes internos que geram harmônicos na rede elétrica devido ao seu modo de operação. Esses harmônicos vêm principalmente dos circuitos eletrônicos de controle de temperatura, das fontes de alimentação e dos dispositivos de comutação. O equipamento liga automaticamente quando a temperatura da água sobe além do valor configurado e desliga ao atingir a temperatura ideal, operando em ciclos de liga-desliga controlados por um termostato eletrônico.

Internamente, a fonte de alimentação utiliza retificadores com diodos e capacitores para converter corrente alternada em contínua, o que resulta em correntes não senoidais com elevado teor harmônico. O compressor de refrigeração, acionado conforme a necessidade de resfriamento, usa um motor de indução que também pode gerar harmônicos, especialmente na partida, sendo normalmente controlado por relés ou circuitos eletrônicos de chaveamento.

Na Tabela 4 é possível observar uma distorção harmônica total de corrente ($DHT_i\%$) de 10,79%, valor considerado elevado, indicando que a corrente consumida pelo equipamento contém uma parcela significativa de harmônicos, o que é comum em cargas não lineares. Por outro lado, a distorção harmônica de tensão ($DHT_v\%$) foi de 2,79%, dentro dos limites normalmente aceitáveis de acordo com o módulo 8 da PRODIST. Dentre os harmônicos de ordem ímpar, percebe-se que os mais relevantes foram o 3^a (5,45%) até o de 9^a ordem (2,38%). Entre os harmônicos de ordem par, o 2^a (5,74%) e o 4^a (1,69%) se destacam.

Tabela 4 – Conteúdo harmônico de um bebedouro elétrico.

DHT%					
$DHT_v = 2,79$			$DHT_i = 10,79$		
$I_{rms} = 0,39A$					
$FP = 0,84$			$Cos \varphi = 0,96$		
Harmônicos de Corrente					
Pares (%)		Ímpares (%)		Harmônicos (A)	
2 ^a	5,74	3 ^a	5,45	2 ^a	0,022
4 ^a	1,69	5 ^a	2,16	3 ^a	0,024
6 ^a	0,61	7 ^a	3,34	4 ^a	0,007
8 ^a	0,62	9 ^a	2,38	5 ^a	0,011
10 ^a	0,56	11 ^a	1,90	6 ^a	0,003
12 ^a	0,56	13 ^a	1,64	7 ^a	0,014
14 ^a	0,82	15 ^a	1,52	8 ^a	0,003
16 ^a	0,57	17 ^a	1,46	9 ^a	0,009
18 ^a	0,56	19 ^a	1,32	10 ^a	0,002
20 ^a	0,55	21 ^a	1,12	11 ^a	0,008

Fonte: Própria

5.2 Bomba de água.

A bomba de água monofásica com partida direta é composta por um motor de indução e um sistema hidráulico com rotor, eixo e carcaça. Seu funcionamento ocorre quando o motor é energizado diretamente da rede, acionando o rotor e impulsionando a água.

O motor utiliza capacitores para criar o campo girante necessário ao seu funcionamento. Durante a partida, há um elevado pico de corrente, com forma de onda distorcida, o que gera harmônicos de baixa ordem na rede elétrica. Mesmo sem inversores, os capacitores de partida, a natureza indutiva do motor e o comportamento transitório na energização tornam a bomba uma carga não linear, capaz de introduzir distorções harmônicas principalmente nos momentos de acionamento.

A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos na análise de uma bomba de água monofásica com partida direta, destacando uma DHT de corrente de 5,86%, corrente eficaz de 1,51A e fator de potência de 0,97. Os principais harmônicos são o 3^a (3,52%) e o 5^a (1,8%), com presença também de harmônicos pares como o 2^a (1,42%), indicando carga não linear com assimetrias.

Tabela 5 – Conteúdo harmônico de uma bomba de água.

DHT%					
$DHT_v = 2,19$			$DHT_i = 5,86$		
$I_{rms} = 1,51A$					
$FP = 0,97$			$Cos \varphi = 0,99$		
Harmônicos de Corrente					

Pares (%)		Ímpares (%)		Harmônicos (A)	
2 ^a	1,42	3 ^a	3,52	2 ^a	0,024
4 ^a	1,02	5 ^a	1,8	3 ^a	0,062
6 ^a	0,19	7 ^a	0,75	4 ^a	0,017
8 ^a	0,19	9 ^a	1,11	5 ^a	0,039
10 ^a	0,14	11 ^a	0,36	6 ^a	0,033

Fonte: Própria

5.3 Ferro de passar roupa.

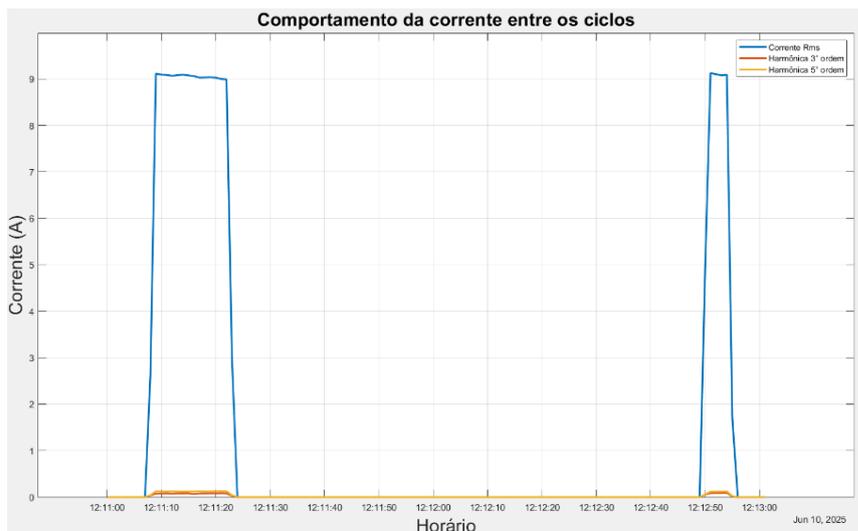
O ferro de passar roupas é um eletrodoméstico que aquece uma base metálica por meio do efeito Joule, utilizando uma resistência elétrica interna. O modelo usado para estudo controla a temperatura com um termostato mecânico que liga e desliga o circuito conforme necessário, sem a presença de componentes eletrônicos avançados. Isso torna o ferro uma carga predominantemente resistiva, com funcionamento simples e direto.

A Figura 4 apresenta o comportamento da corrente elétrica durante os ciclos de acionamento de um ferro de passar roupa. Observa-se que, após o acionamento inicial, a corrente RMS se eleva rapidamente, indicando o funcionamento da resistência elétrica. Após alguns segundos, ocorre a interrupção da corrente, o que corresponde à atuação do termostato interno ao atingir a temperatura de operação. Logo em seguida, a corrente volta a subir, evidenciando o reaquecimento automático para manter a temperatura ideal do ferro.

Além disso, são exibidas as correntes harmônicas de 3^a e 5^a ordem, que permanecem em níveis muito baixos ao longo do tempo. Isso indica que o ferro de passar, apesar de ser uma carga resistiva com controle térmico, apresenta baixo conteúdo harmônico em comparação a outros eletrodomésticos com cargas não lineares,

Os dados da medição que são apresentados na Tabela 6 refere-se ao conteúdo harmônico do ferro de passar roupa, que operou com DHT de corrente de 3,57%, corrente eficaz de 9,1 A e fator de potência de 0,97, indicando comportamento próximo ao de uma carga linear. Os harmônicos mais significativos foram o 5^o (1,34%) e o 3^o (0,91%), com presença mínima de harmônicos pares, como o 2^o (0,31%).

Figura 4 – Comportamento das correntes entre os ciclos liga-desliga do ferro de passar roupa.



Fonte: Própria

Tabela 6 – Conteúdo harmônico de um ferro de passar roupa.

DHT%					
$DHT_v = 2,50$			$DHT_i = 3,57$		
$I_{rms} = 9,1A$					
$FP = 0,97$			$Cos \varphi = 0,99$		
Harmônicos de Corrente					
Pares (%)		Ímpares (%)		Harmônicos (A)	
2 ^a	0,31	3 ^a	0,91	2 ^a	0,054
4 ^a	0,14	5 ^a	1,34	3 ^a	0,092
6 ^a	0,05	7 ^a	0,68	4 ^a	0,025

Fonte: Própria

5.4 Forno micro-ondas

O forno micro-ondas é um eletrodoméstico amplamente utilizado para aquecer e cozinhar alimentos por meio da radiação eletromagnética em alta frequência (2,45 GHz). Os principais componentes de um micro-ondas responsáveis pela geração de harmônicos de corrente são os diodos retificadores e capacitores, que integram a fonte de alimentação e convertem a tensão alternada da rede em corrente contínua pulsante para alimentar o magnetron. Este é o componente responsável por gerar as micro-ondas propriamente ditas, operando com alta tensão e se comportando como uma carga altamente não linear. Além disso, motores auxiliares, como o que movimenta o prato giratório, também contribuem com pequenas distorções. (ROCHA, 2016)

Como resultado, o forno micro-ondas atua como uma carga não linear, injetando harmônicos na rede elétrica residencial, o que pode comprometer a qualidade da energia.

A Tabela 7 mostra os resultados obtidos para um forno micro-ondas, que apresentou DHT de corrente de 33,23%, corrente eficaz de 5,05 A e fator de potência 0,92. Destacam-se os harmônicos 3º (25,41%), 5º (16,74%) e 2º (8,96%).

Tabela 7 – Conteúdo harmônico de um forno micro-ondas.

DHT%					
$DHT_v = 2,73$			$DHT_i = 33,23$		
$I_{rms} = 5,05A$					
$FP = 0,92$			$Cos \varphi = 0,97$		
Harmônicos de Corrente					
Pares (%)		Ímpares (%)		Harmônicos (A)	
2ª	8,96	3ª	25,41	2ª	0,493
4ª	1,6	5ª	16,74	3ª	1,259
6ª	1,1	7ª	5,97	4ª	0,890
8ª	0,69	9ª	3,17	5ª	0,824
10ª	0,11	11ª	1,9	6ª	0,06
12ª	0,1	13ª	1,14	7ª	0,297
14ª	0,08	15ª	0,8	8ª	0,037

Fonte: Própria

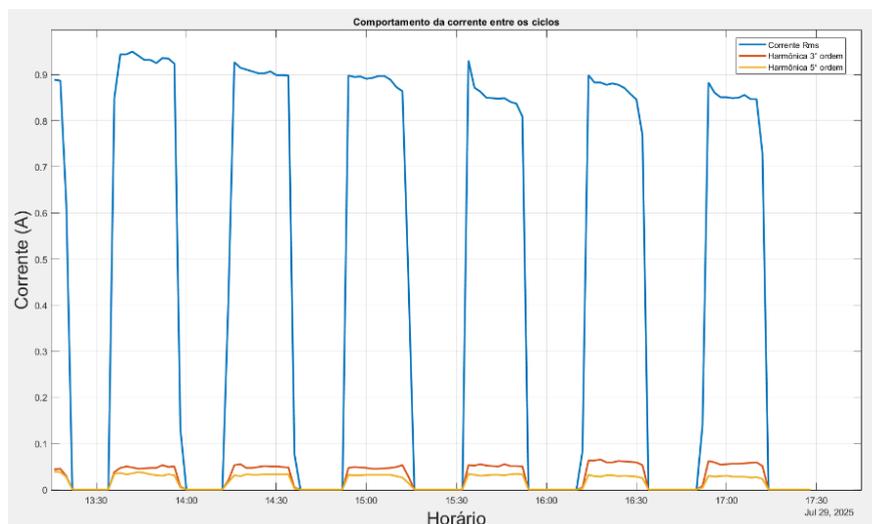
5.5 Geladeira

A geladeira funciona com base no ciclo de compressão de vapor, onde um compressor movimentada o fluido refrigerante para resfriar o interior do equipamento. Em modelos modernos, além do compressor, há placas eletrônicas, sensores e ventiladores, que exigem o uso de fontes chaveadas para alimentar os circuitos de controle com tensões contínuas. Embora a geladeira isolada não cause grandes distúrbios, o uso simultâneo de vários aparelhos com fontes semelhantes pode comprometer a qualidade da energia elétrica da instalação. (ROCHA, 2016)

A Figura 5 ilustra os ciclos de operação da geladeira, com variações periódicas na corrente RMS, características do acionamento do compressor. Observa-se que, após cada desligamento, há um intervalo até o próximo pico de corrente, indicando o controle automático de temperatura. As componentes harmônicas de 3ª e 5ª ordem permanecem visivelmente presentes, com valores mais elevados em comparação a cargas puramente resistivas, o que reforça o comportamento de carga não linear típico de aparelhos com motores e controles eletrônicos.

Os dados apresentados na Tabela 8 mostram o conteúdo harmônico de uma geladeira em operação, com DHT de corrente de 9,66%, corrente eficaz de 0,92A e fator de potência de 0,74, indicando baixa eficiência no uso da energia. Os harmônicos mais expressivos foram o 3º (5,17%), 5º (3,82%) e 2º (2,83%).

Figura 5 – Comportamento das correntes entre os ciclos liga-desliga da geladeira.



Fonte: Própria

Tabela 8 – Conteúdo harmônico de uma geladeira.

DHT%					
$DHT_v = 2,73$			$DHT_i = 9,66$		
$I_{rms} = 0,92A$					
$FP = 0,74$			$\cos \varphi = 0,93$		
Harmônicos de Corrente					
Pares (%)		Ímpares (%)		Harmônicos (A)	
2 ^a	2,83	3 ^a	5,17	2 ^a	0,029
4 ^a	1,10	5 ^a	3,82	3 ^a	0,065
6 ^a	0,79	7 ^a	2,05	4 ^a	0,011
8 ^a	0,53	9 ^a	1,07	5 ^a	0,045
10 ^a	0,37	11 ^a	0,87	6 ^a	0,008
12 ^a	0,30	13 ^a	1,18	7 ^a	0,022
14 ^a	0,34	15 ^a	0,44	8 ^a	0,005

Fonte: Própria

5.6 Liquidificador.

O liquidificador é um eletrodoméstico utilizado para triturar, misturar e homogeneizar alimentos. Seu funcionamento baseia-se em um motor universal (funciona tanto em corrente alternada quanto contínua), que gira lâminas acopladas a alta velocidade. A velocidade de rotação é controlada por um seletor que, geralmente, muda a configuração dos enrolamentos e a tensão aplicada ao motor. (ROCHA, 2016)

Motores universais são cargas não lineares e, por isso, são fontes significativas de harmônicos de corrente. A comutação das escovas sobre o comutador gera centelhas e variações abruptas na corrente, distorcendo a forma de onda.

O funcionamento do liquidificador, conforme os dados da tabela 9, resultou em uma DHT de corrente de 15,59%, com corrente eficaz de 0,97A e fator de potência de 0,88. Os harmônicos mais intensos foram o 3º (11,53%), seguido do 5º (2,93%) e 7º (2,63%), além da presença notável do 2º harmônico (1,87%).

Tabela 9 – Conteúdo harmônico de um liquidificador.

DHT%					
$DHT_v = 2,08$			$DHT_i = 15,59$		
$I_{rms} = 0,97A$					
$FP = 0,88$			$cos \varphi = 0,94$		
Harmônicos de Corrente					
Pares (%)		Ímpares (%)		Harmônicos (A)	
2ª	1,87	3ª	11,53	2ª	0,026
4ª	0,99	5ª	2,93	3ª	0,123
6ª	0,28	7ª	2,63	4ª	0,011
8ª	0,24	9ª	1,49	5ª	0,003
10ª	0,22	11ª	0,79	6ª	0,006
12ª	0,25	13ª	0,68	7ª	0,028
14ª	0,29	15ª	0,69	8ª	0,004

Fonte: Própria

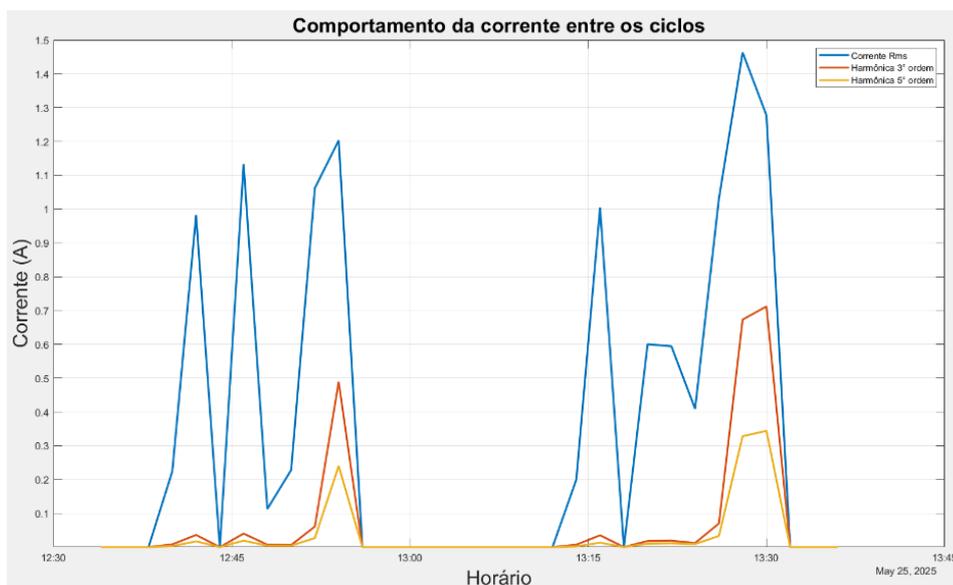
5.7 Máquina de lavar roupas

A lavadora que foi objeto de estudo utiliza componentes eletroeletrônicos para controlar seus ciclos de lavagem, como válvulas solenoides, sensores de nível (pressostato) e, principalmente, um motor elétrico responsável pelos movimentos de agitação e centrifugação. Esse controle eletrônico causa comutações rápidas de corrente, o que distorce o formato da onda de corrente consumida. (ROCHA, 2016)

Essas harmônicas são geradas por dispositivos que não consomem corrente de forma senoidal, como é o caso do motor controlado eletronicamente. Essa distorção pode afetar a qualidade da energia elétrica e aumentar perdas em transformadores, condutores e causar aquecimento anormal.

A Figura 6 mostra os ciclos de operação da máquina de lavar, evidenciando variações abruptas na corrente RMS associadas aos diferentes estágios do processo de lavagem, como acionamento do motor, centrifugação e pausas intermediárias. Nota-se que a corrente não é contínua, com picos concentrados em momentos específicos, caracterizando a natureza intermitente do equipamento. As harmônicas de 3ª e 5ª ordem também apresentam elevação durante os picos de corrente, o que indica a presença de componentes eletrônicos ou motores com controle não linear, gerando distorções harmônicas significativas na rede.

Figura 6 – Comportamento das correntes entre os ciclos da máquina de lavar.



Fonte: Própria

A análise do conteúdo harmônico de uma máquina de lavar roupas, apresentada na Tabela 10, revela uma DHT de corrente de 13,10%, com corrente eficaz de 1,46A e fator de potência de 0,8. Os principais harmônicos observados foram o 3º (19,03%), 5º (9,23%) e 7º (4,36%), além da presença significativa do 2º harmônico (2,05%).

Tabela 10 – Conteúdo harmônico de uma máquina de lavar roupas.

DHT%					
$DHT_v = 3,19$			$DHT_i = 13,10$		
$I_{rms} = 1,46A$					
$FP = 0,8$			$Cos \varphi = 0,88$		
Harmônicos de Corrente					
Pares (%)		Ímpares (%)		Harmônicos (A)	
2ª	2,05	3ª	19,03	2ª	0,035
4ª	1,49	5ª	9,23	3ª	0,781
6ª	0,82	7ª	4,36	4ª	0,028
8ª	0,73	9ª	4,36	5ª	0,385
10ª	0,53	11ª	1,98	6ª	0,024
12ª	0,42	13ª	1,12	7ª	0,144
14ª	0,47	15ª	1,82	8ª	0,021

Fonte: Própria

5.8 Sanduicheira

A sanduicheira elétrica é um eletrodoméstico utilizado para aquecer e prensar alimentos, funcionando por meio do efeito Joule, semelhante ao ferro de passar. Seu interior possui uma ou mais resistências elétricas que aquecem as chapas metálicas.

O controle de temperatura é geralmente feito por um termostato simples, que liga e desliga o circuito conforme o aquecimento atinge um determinado ponto.

Por ser uma carga resistiva pura, a sanduicheira não gera harmônicos significativos durante seu funcionamento normal. Entretanto, o acionamento do termostato pode provocar picos de corrente na rede. Esses efeitos são pontuais e de curta duração, com impacto harmônico praticamente desprezível em comparação a dispositivos com controle eletrônico. (CARVALHO, 2015)

No caso da sanduicheira, os dados da Tabela 11 indicam uma DHT de corrente de 2,11%, corrente eficaz de 3,83 A e fator de potência de 0,99, sinalizando uma carga quase linear. Os harmônicos presentes são baixos, com destaque para o 3º (1,12%) e o 2º (0,58%), valores típicos de aparelhos resistivos com controle térmico simples. Isso mostra que a sanduicheira tem baixo impacto na distorção harmônica da rede elétrica.

Tabela 11 – Conteúdo harmônico de uma sanduicheira.

DHT%					
$DHT_v = 1,94$			$DHT_i = 2,11$		
$I_{rms} = 3,83A$					
$FP = 0,99$			$Cos \varphi = 0,99$		
Harmônicos de Corrente					
Pares (%)		Ímpares (%)		Harmônicos (A)	
2ª	2,05	3ª	19,03	2ª	0,037
4ª	1,49	5ª	9,23	3ª	0,048
6ª	0,82	7ª	4,36	4ª	0,015

Fonte: Própria

5.9 Ventilador

O ventilador é um eletrodoméstico utilizado para promover a circulação de ar e melhorar o conforto térmico em ambientes. Seu funcionamento se baseia em um motor elétrico, geralmente do tipo monofásico de indução, que aciona as hélices. A velocidade do motor é controlada por chaves seletoras que inserem resistores ou capacitores no circuito, alterando a tensão ou o defasamento e a rotação das pás.

O comportamento harmônico de um ventilador em funcionamento é apresentado na tabela 12, com DHT de corrente de 11,61%, corrente eficaz de 0,97A e fator de potência de 0,92. Os harmônicos mais relevantes foram o 2º (3,42%), 3º (2,77%), 5º (2,34%) e 7º (2,38%).

Tabela 12 – Conteúdo harmônico de um ventilador.

DHT%					
$DHT_v = 2,14$			$DHT_i = 11,61$		
$I_{rms} = 0,97A$					
$FP = 0,92$			$Cos \varphi = 0,97$		
Harmônicos de Corrente					

Pares (%)		Ímpares (%)		Harmônicos (A)	
2 ^a	3,42	3 ^a	2,77	2 ^a	0,030
4 ^a	1,38	5 ^a	2,34	3 ^a	0,027
6 ^a	0,39	7 ^a	2,38	4 ^a	0,014
8 ^a	0,36	9 ^a	1,73	5 ^a	0,025
10 ^a	0,31	11 ^a	1,09	6 ^a	0,005
12 ^a	0,35	13 ^a	1,05	7 ^a	0,002
14 ^a	0,42	15 ^a	0,91	8 ^a	0,004
16 ^a	0,35	17 ^a	0,74	9 ^a	0,014

Fonte: Própria

6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1 Eletrodomésticos que mais geraram distorções e análise comparativa com o módulo 8 da PRODIST.

A análise dos dados obtidos por meio das medições revelou importantes aspectos sobre o comportamento elétrico dos eletrodomésticos residenciais quanto à geração de harmônicos e seus impactos na qualidade da energia elétrica. Os valores de distorção harmônica total (DHT) da corrente variaram significativamente entre os equipamentos, indicando diferentes graus de contribuição para a poluição harmônica da rede.

Os resultados mostram que os equipamentos com dispositivos eletrônicos e fontes chaveadas, como o forno micro-ondas ($DHT_i = 33,23\%$) e a máquina de lavar ($DHT_i = 13,10\%$), estão entre os que mais geram distorções. Esses dispositivos apresentam forte presença de harmônicos de ordem ímpar, especialmente o 3^o, 5^o e 7^o, conforme já relatado na literatura técnica. Além disso, foram observados níveis significativos de harmônicos pares, como o 2^o e o 4^o, o que indica assimetrias na forma de onda da corrente que é algo comum em equipamentos que operam com retificadores e controles eletrônicos.

Em contrapartida, cargas predominantemente resistivas, como o ferro de passar ($DHT_i = 1,96\%$) e a sanduicheira ($DHT_i = 2,11\%$), apresentaram baixos níveis de distorção, com comportamento mais próximo ao linear, contribuindo de forma quase insignificante para os harmônicos da instalação.

Outro ponto relevante foi as diferenças entre o fator de potência (FP) e o cosseno φ ($\cos \varphi$). Enquanto o $\cos \varphi$ indica apenas a defasagem angular entre corrente e tensão, o FP real é reduzido pela presença de distorções harmônicas, o que evidencia a importância de se considerar esse parâmetro em análises de qualidade de energia.

Nos equipamentos de natureza resistiva, como ferro de passar ($DHT_i = 3,57\%$) e sanduicheira ($DHT_i = 2,11\%$), observou-se que o FP praticamente coincidiu com o $\cos \varphi$ (0,97/0,99 e 0,99/0,99, respectivamente), confirmando que a baixa distorção harmônica não compromete o desempenho energético.

Já em cargas não lineares, como o micro-ondas ($DHT_i = 33,23\%$) e a máquina de lavar ($DHT_i = 13,10\%$), a diferença entre FP e $\cos \varphi$ foi significativa como pode ser visto no Quadro 3. No micro-ondas, o $\cos \varphi$ foi elevado (0,97), mas o FP real caiu para 0,92 devido à forte presença de harmônicos. Na máquina de lavar, a diferença foi

ainda mais acentuada ($\cos \varphi = 0,88$ e $FP = 0,80$), confirmando que a redução do fator de potência total não se deve apenas à defasagem, mas principalmente ao conteúdo harmônico. Esse comportamento também foi verificado em equipamentos como geladeira ($FP = 0,74 / \cos \varphi = 0,93$) e liquidificador ($FP = 0,88 / \cos \varphi = 0,94$).

Ao comparar os valores medidos com os limites estipulados pelo módulo 8 da PRODIST, observa-se que, embora a maioria dos equipamentos tenha mantido a DHT de tensão abaixo dos 10% exigidos para sistemas de até 1 kV, a DHT de corrente ultrapassou valores recomendáveis em vários casos. Esse fato não configura, por si só, uma não conformidade normativa, mas serve como alerta para o impacto cumulativo que essas cargas podem causar na instalação e no sistema de distribuição como um todo. A Tabela 13 apresenta um resumo dos principais resultados obtidos neste trabalho.

Tabela 13 – Resumo dos resultados.

Eletrodoméstico	Classe da IEC	Fator de potência	$\cos \varphi$	THD_v	THD_i
Bebedouro elétrico	Classe A	0,84	0,96	2,79	10,79
Bomba de água	Classe A	0,97	0,99	2,19	5,86
Ferro de passar roupa	Classe A	0,97	0,99	2,50	3,57
Forno micro-ondas	Classe D	0,92	0,97	2,73	33,23
Geladeira	Classe A	0,74	0,93	2,73	9,66
Liquidificador	Classe A	0,88	0,94	2,08	15,59
Máquina de lavar roupa	Classe A	0,80	0,88	3,19	13,10
Sanduicheira	Classe A	0,99	0,99	1,94	2,11
Ventilador	Classe A	0,92	0,97	2,14	11,61

Fonte: Própria

6.2 Análise comparativa com a IEC 61000-3-2

Os eletrodomésticos analisados neste estudo, como o micro-ondas, geladeira, máquina de lavar, ferro de passar e sanduicheira, se enquadram na Classe A da IEC 61000-3-2, que abrange a maioria dos equipamentos eletrodomésticos tradicionais. O micro-ondas, por apresentar consumo maior que 600 W com características específicas de chaveamento eletrônico, pode também ser analisado sob a Classe D, que impõe restrições ainda mais rígidas à emissão harmônica.

De modo geral, verificou-se que a maioria dos equipamentos manteve suas correntes harmônicas individuais abaixo dos limites máximos. O forno micro-ondas,

apesar de ser a carga mais crítica em termos de distorção, apresentou corrente de 3ª harmônica de 1,259 A, dentro do limite de 2,30 A definido para a Classe A. Ainda assim, por possuir potência de entrada superior a 600 W e eletrônica de chaveamento, esse equipamento poderia ser analisado também sob os critérios da Classe D, que apresentam limites proporcionais mais rigorosos

A máquina de lavar roupas, com corrente de 5ª harmônica de 0,385 A, também se manteve dentro do limite de 1,14 A estabelecido pela norma. Equipamentos essencialmente resistivos, como ferro de passar e sanduicheira, registraram valores muito baixos de correntes harmônicas, todos em conformidade com a IEC.

Outro ponto importante refere-se às harmônicas pares (2ª e 4ª ordens), que apresentam limites proporcionalmente menores. Em grande parte dos equipamentos, esses valores foram pouco expressivos; no entanto, no micro-ondas observou-se maior assimetria, com corrente de 0,493 A na 2ª ordem, ainda assim dentro do limite permitido.

Portanto, a comparação direta com a IEC 61000-3-2 (IEC, 2018) mostra que, embora diversos eletrodomésticos apresentem níveis elevados de DHT de corrente, os valores absolutos de correntes harmônicas individuais permaneceram em conformidade com a norma. Isso sugere que, do ponto de vista normativo, os equipamentos atendem aos requisitos de emissão, mas que, na prática, a operação simultânea de várias cargas não lineares pode resultar em impacto cumulativo significativo na qualidade da energia em instalações residenciais.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante a realização deste trabalho, analisamos a influência das distorções harmônicas na qualidade da energia elétrica em uma instalação residencial, a partir de medições práticas realizadas com eletrodomésticos comumente utilizados no cotidiano. Com base nas análises efetuadas por meio do analisador de energia Minipa ET-5061C, foi possível identificar a presença de distorções significativas nas formas de onda da corrente elétrica e nos valores do fator de potência, especialmente em equipamentos que utilizam dispositivos eletrônicos ou operam com fontes chaveadas.

Os resultados mostraram que eletrodomésticos como micro-ondas, máquinas de lavar e liquidificadores são fontes expressivas de distorção harmônica, apresentando níveis elevados de DHT de corrente e contribuindo para a degradação da qualidade da energia elétrica. Em contrapartida, equipamentos de natureza predominantemente resistiva, como ferros de passar e sanduicheiras, apresentaram comportamento praticamente linear, com baixo impacto harmônico.

Também foi possível observar que, em muitos casos, o fator de potência dos equipamentos analisados foi reduzido devido à presença de harmônicos, mesmo em situações de baixa defasagem entre tensão e corrente. Isso reforça a necessidade de considerar a distorção harmônica como componente fundamental na análise da eficiência energética e no dimensionamento de instalações elétricas residenciais.

Em relação à conformidade normativa, a DHT da tensão permaneceu dentro dos limites estipulados pelo módulo 8 da PRODIST, demonstrando que, embora as cargas não lineares causem distorções locais, o impacto na rede de distribuição ainda se mantém controlado. No entanto, os altos níveis de DHT de corrente identificados alertam para o risco cumulativo que essas cargas podem representar, especialmente

em instalações com grande número de dispositivos eletrônicos operando simultaneamente.

Conclui-se, portanto, que a crescente presença de equipamentos eletrônicos nos lares brasileiros representa um desafio crescente para a manutenção da qualidade da energia elétrica. Torna-se essencial o desenvolvimento de soluções que envolvam tanto a conscientização dos consumidores quanto o aprimoramento de dispositivos de compensação e filtragem harmônica em instalações residenciais. Além disso, este trabalho contribui com dados reais e contextualizados, reforçando a importância de estudos práticos para compreensão e mitigação dos impactos causados por cargas não lineares no ambiente doméstico.

REFERENCIAS

ANEEL. *Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST. Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica*. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2022.

CARVALHO, Flávio Gomes de. *Caracterização do conteúdo harmônico em ambientes residenciais: estudo de caso*. 2015. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal da Paraíba, Centro de Energias Alternativas e Renováveis, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, João Pessoa, 2015.

CASTRO, Nivalde José de et al. *Qualidade do fornecimento de energia elétrica: aspectos regulatórios e perspectivas*. Rio de Janeiro: Publit, 2017.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Anuário Estatístico de Energia Elétrica. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>. Acesso em: 21 maio. 2025.

GALLEGO, L. E.; TORRES, H.; PAVAS, F. A.; URRUTIA, D. F.; CAJAMARCA, G. A.; RONDON, D. A methodological proposal for monitoring, analyzing and estimating power quality indices: the case of Bogota-Colombia. In: *INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE)*. 2005.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61000-3-2: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-2: *Limits – Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase)*. 5th ed. Geneva: IEC, 2018.

KAGAN, N. ; ROBBA, E.J. ; SCHMIDT, H. P. *Estimação de indicadores de qualidade da energia elétrica*. SÃO PAULO: Edgard Nlucher, 2010.

LOPEZ, Ricardo Aldabó. *Qualidade na energia elétrica: efeitos dos distúrbios, diagnósticos e soluções*. São Paulo: Artliber, 2013.

Manual analisador de qualidade de energia MINIPA ET-5062. Disponível em: https://www.minipa.com.br/images/proposta_tecnica/ET-5061C-1303-BR.compressed.pdf Acesso em: 20 abril. 2025.

MARTINHO, E. *Distúrbios da Energia Elétrica. Conceitos de Distúrbios que Influenciam na Qualidade de Energia*. p.35-87. Editora Erica, 2a Edição, São Paulo 2013.

MARTINS, J. S .; COUTO, C .; AFONSO, J. L. *Qualidade de Energia Elétrica*. 3º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia – CLME'2003 Engenharia e Inovação para o Desenvolvimento. Maputo, Moçambique, 19-21 agosto 2003,

PROCEL. Ministério de Minas e Energia (MME). Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel) – *Relatório de Resultados 2024* (ano-base 2023). Publicado em: 11 dez. 2024.

ROCHA, Joaquim Eloir. *Qualidade da energia elétrica*. 2016. 37 f. Monografia (Especialização em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.