

## **Modelagem computacional de cargas não-lineares residenciais via interface gráfica ATPDraw**

### **Computational modeling of residential nonlinear loads via ATPDraw graphical interface**

DOI:10.34115/basrv5n6-004

Recebimento dos originais: 10/11/2021

Aceitação para publicação: 04/12/2021

#### **Luiz Emanuel Mendes Neto**

Bacharel em Ciência e Tecnologia pela Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM)

Instituição: Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM)

Endereço: Avenida Um, 4050, Cidade Universitária, Janaúba – MG – Brasil

E-mail: luiz.emanoel@ufvjm.edu.br

#### **Júlia Oliveira Fernandes**

Bacharel em Ciência e Tecnologia pela Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM)

Instituição: Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM)

Endereço: Avenida Um, 4050, Cidade Universitária, Janaúba – MG – Brasil

E-mail: julia.fernandes@ufvjm.edu.br

#### **João Vitor Gomes Araújo**

Engenheiro Físico pela Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM)

Instituição: Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM)

Endereço: Avenida Um, 4050, Cidade Universitária, Janaúba – MG – Brasil

E-mail: joao.araujo@ufvjm.edu.br

#### **Jáder Fernando Dias Breda**

Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (USP)

Instituição: Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM)

Endereço: Avenida Um, 4050, Cidade Universitária, Janaúba – MG – Brasil

E-mail: jader.breda@ufvjm.edu.br

#### **RESUMO**

Quando um sistema apresenta uma onda senoidal com corrente e tensão em estado de equilíbrio, e a sua frequência e amplitude são constantes, dizemos que isso é representação de uma boa qualidade de energia elétrica. De acordo com o desenvolvimento tecnológico e social, e a crescente demanda de produtos eletroeletrônicos, quando estes são conectados à rede, eles são responsáveis por causar interferências em todo o sistema devido às suas características não lineares. Este trabalho tem como intuito caracterizar os harmônicos decorrentes do uso de tais aparelhos eletroeletrônicos, pelos consumidores residenciais, tal caracterização é dada pelas

simulações computacionais realizadas utilizando o ATPDraw. A partir da escolha de quatro cenários essenciais, baseados em horários de maior fluxo, as simulações individuais de cada aparelho foram feitas, constituindo um conjunto de cargas. E diante disso, foi possível avaliar o seu impacto em forma senoidal de corrente e tensão, e ao volume de harmônicos produzidos, quando não há conexão com a rede da concessionária de energia, e logo após, as simulações foram realizadas com conexão com a rede a fim de mensurar o impacto harmônico causado pelas cargas não lineares provenientes do uso de aparelhos eletroeletrônicos em uma residência específica. Os resultados obtidos mostram que, individualmente, uma residência é capaz de gerar um considerável conteúdo harmônico, e que, a mesma única residência não é capaz de causar um impacto significativo quando conectada à concessionária de energia elétrica.

**Palavras-chave:** Qualidade da Energia Elétrica. Distorção Harmônica. Cargas Não Lineares. ATPDraw. Concessionária de Energia.

### ABSTRACT

When a system presents a sine wave with current and voltage in a steady state, and its frequency and amplitude are constant, we say that this is a representation of a good quality of electrical energy. According to technological and social development, and the growing demand for electronic products, when they are connected to the network, they are responsible for causing interference in the entire system due to their non-linear characteristics. This work aims to characterize the harmonics arising from the use of such electronic devices by residential consumers, such characterization is given by computer simulations performed using ATPDraw. From the choice of four essential scenarios, based on times of greater flow, the individual simulations of each device were made, constituting a set of loads. And in view of this, it was possible to assess its impact in sinusoidal current and voltage, and the volume of harmonics produced, when there is no connection to the energy concessionaire's network, and soon after, the simulations were carried out with connection to the network in order to measure the harmonic impact caused by non-linear loads arising from the use of electronic devices in a specific residence. The results obtained show that, individually, a residence is capable of generating a considerable harmonic content, and that the same single residence is not capable of causing a significant impact when connected to the electric power utility.

**Keywords:** Quality Power. Harmonic Distortion. Nonlinear Loads. ATPDraw. Power distribution company.

## 1 INTRODUÇÃO

A definição de “Qualidade de Energia Elétrica” (QEE) está diretamente relacionada com a variação que ocorre no sistema elétrico. Entre essas variações, podem manifestar problemas na tensão, corrente ou desvio de frequência e amplitudes, que resultem em falhas ou má operação do sistema e equipamentos dos consumidores (DUGAN et al., 1996 *apud* OLESKOVICZ, 2006, p. 4).

Nos últimos anos, com a crescente mudança no setor de energia elétrica, a conservação de energia passou a ter um maior enfoque nas concessionárias de energia

elétrica. A qualidade de energia elétrica (QEE) estabelece relativamente um fator primordial para a competitividade de todos os setores industriais e seus serviços, principalmente na indústria eletroeletrônica, onde o desenvolvimento deste setor têm permitido maior conforto para os usuários e também equipamentos mais eficientes, do ponto de vista do consumo de energia (PIRES, 2006).

As alterações que ocorrem no sistema elétrico, sejam no sistema da concessionária ou nas instalações dos consumidores, geram prejuízos econômicos muito elevados, e por essa razão a questão da qualidade da energia elétrica que chega aos consumidores finais é um motivo de grande preocupação.

Tais alterações podem ocorrer de maneira natural ou por falhas no sistema, através de equipamentos, componentes eletroeletrônicos que com as altas tecnologias produzem cargas não lineares, e que direta ou indiretamente prejudicam a QEE.

Vislumbrando este cenário atual, onde equipamentos eletroeletrônicos tem se tornado essenciais ao conforto e bem estar do consumidor, o presente trabalho tem por objetivo realizar a modelagem computacional de cargas não lineares presentes em residências com dados de medições reais realizadas em trabalhos encontrados na literatura correlata, utilizando o software ATP, via sua interface gráfica ATPDraw. Além disso, o trabalho fez uma análise do impacto das cargas presentes nestes equipamentos de maneira individual na rede da concessionária de energia.

## **2 DISTORÇÃO HARMÔNICA**

As distorções harmônicas são os distúrbios que mais se destacam em termos da má qualidade de energia elétrica, visto o significado aumento de cargas perturbadoras nos setores comerciais e residenciais, principalmente nos últimos anos (FERNANDES, 2019).

As distorções harmônicas são fenômenos associados a deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental (ANEEL, 2018, p.13).

A concessionária de energia elétrica deve oferecer aos consumidores uma onda de tensão puramente senoidal, com amplitudes e frequências constantes, que são os objetivos apresentados pelo PRODIST, mas as distorções harmônicas são o oposto desses objetivos. Porém, em consumidores o fornecimento de energia causa deformações no sistema supridor, prejudicando não somente o responsável pelo distúrbio, mas a todos os outros conectados à mesma rede elétrica (OLESKOVICZ, 2006).

### 3 METODOLOGIA PROPOSTA

Nesta seção serão apresentadas as simulações para cada equipamento, de maneira individual, seja ele de carga linear ou não linear. Por meio do software ATPDraw, utilizando a ferramenta HFS Source, cuja função é a varredura da frequência harmônica, calculando e plotando as amplitudes, os ângulos e a frequência de cada carga, representando o conteúdo harmônico. Aqui trataremos dos harmônicos resultantes das correntes dos equipamentos eletroeletrônicos testados nas simulações.

#### 3.1 ATPDRAW (ALTERNATIVE TRANSIENT PROGRAM)

O Alternative Transient Program (ATP) é considerado um dos sistemas de programas gerais mais amplamente utilizados para simulação digital de fenômenos eletromagnéticos transitórios. Através deste programa digital, redes complexas e sistemas de controle de qualquer estrutura podem ser simulados. Além de cálculos transitórios, o ATP também possui modelagem extensa e outras funções importantes.

O ATPDraw é a interface gráfica do ATP para pesquisa eletromagnética, possuindo diversas aplicações e vantagens. Usando este software, é possível modelar o sistema elétrico, reproduzir a configuração elétrica real da rede e ter os recursos para modelar o sistema de transmissão e distribuição na mesma plataforma, para que possa analisar os transitórios eletromagnéticos de diferentes configurações operacionais.

Utilizando este programa é possível modelar uma rede de circuitos, o que torna executável processar vários circuitos ao mesmo tempo e copiar informações entre os circuitos. No ATPDraw, os usuários podem usar o mouse e selecionar componentes predefinidos para construir um modelo digital do circuito a ser simulado. Este programa é uma ferramenta muito flexível e importante para estudos transitórios ou permanentes de sistemas de potência.

#### 3.2 HFS SOURCE

Uma vez que o ATP é baseado em um modelo temporal ao invés de um simulador de domínio frequência, uma vantagem de usá-lo é a capacidade de interação entre os ângulos de fase da corrente harmônica gerada por várias cargas não lineares (PIRES, 2006).

O *Harmonic Frequency Scan* (HFS) calcula e plota as amplitudes e ângulos de fase da corrente do ponto de acionamento do barramento em uma faixa de frequência especificada pelo usuário.

Quando o Harmônico HFS é selecionado, o HFS executará o caso de dados ATP tantas vezes quanto especificado na fonte harmônica.

A faixa de frequência para varredura é definida pelo usuário, que começa na frequência fundamental e pode ir tão alta quanto o usuário precisar. Esta ferramenta é utilizada para representar a parte harmônica dos equipamentos.

### 3.3 MODELO R-L

Componentes do sistema de distribuição e modelos de fonte de tensão e corrente existem no ATP. Isso é suficiente para simular cargas não lineares e seus conjuntos. Estes são modelados como fontes de corrente harmônica. Utilizam esta modelagem tendo uma ramificação paralela R-L para representar o conteúdo de potência do ambiente e fontes de corrente harmônica com conteúdo não linear (PIRES, 2006).

Ao modelar a carga, o ramo paralelo R-L é usado para representar corrente fundamental. Isso torna possível suprimir algumas das oscilações que ocorrem quando apenas a fonte de corrente é usada na simulação de ATP. Dentre os harmônicos, as fontes de correntes harmônicas tiveram seus módulos e ângulos inseridos (PIRES, 2006).

A partir dos dados levantados e da modelagem R-L utilizado nas cargas, será apresentado agora o cálculo para obter os resultados do modelo R-L.

Como foi apresentado no início deste capítulo os valores nominais da tensão, potência e corrente, a partir destes valores, é possível calcular R e L.

Sabendo que,

$$F_p = P \div S \quad (3.1)$$

Onde,

$$S = V \times I \quad (3.2)$$

Temos que:

$F_p$  = Fator de potência

$P$  = Potência ativa

$S$  = Potência aparente

$V$  = Tensão

$I$  = Corrente

A partir destes cálculos podemos obter o valor do resistor R, pela equação 3.3:

$$P = (V^2) \div R \quad (3.3)$$

Onde,

$$R = (V^2) \div P$$

Calculado o valor do resistor, é possível obter o valor do indutor L, mas para isso primeiro é necessário ter a potência reativa Q, através da seguinte equação:

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (3.4)$$

Sabendo que,

$$Q^2 = S^2 - P^2$$

Com o valor da potência reativa Q calculado, é obtido a reatância X, pela equação 3.5:

$$Q = V^2 \div X \quad (3.5)$$

Onde,

$$X = V^2 \div Q$$

Agora sim, o valor do indutor L é calculado:

$$L = X \div (2 \times \pi \times f) \quad (3.6)$$

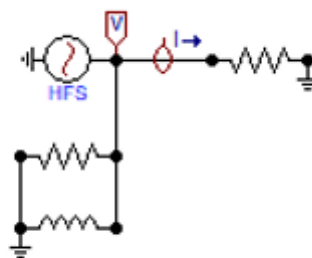
Onde,

f = Frequência

Esses são os cálculos necessários para se ter os valores do resistor R e do indutor L. Foram calculados 20 equipamentos utilizando essas equações.

O modelo adotado para a carga será o modelo R-L, conforme ilustra a figura a seguir:

**Figura 1. Modelo R-L.**



### 3.4 APARELHOS ELETRODOMÉSTICOS E ELETROELETRÔNICOS RESIDENCIAIS

Foram analisados 20 equipamentos entre eletrodomésticos e eletroeletrônicos, presentes nas casas dos consumidores. Serão apresentadas as formas de onda resultantes das correntes de um dos equipamentos encontrados nos consumidores residenciais, além

de seus valores nominais de tensão, corrente e potência. Tais valores foram retirados a partir de outros trabalhos da literatura e também da residência do autor. Os equipamentos analisados a seguir:

- Ar condicionado.
- Carregador Celular.
- Chuveiro elétrico.
- Espremedor de laranja.
- Ferro elétrico.
- Micro-ondas.
- Máquinas de lavar roupa.
- Lâmpada incandescente.
- Computador.
- Televisão LCD.
- Liquidificador.
- Vídeo Game.
- Notebook.
- Cafeteira.
- Geladeira.
- Multiprocessador.
- Ventilador.
- Rádio relógio
- Aparelho de som.

Lâmpada fluorescente compacta.

### Ar Condicionado

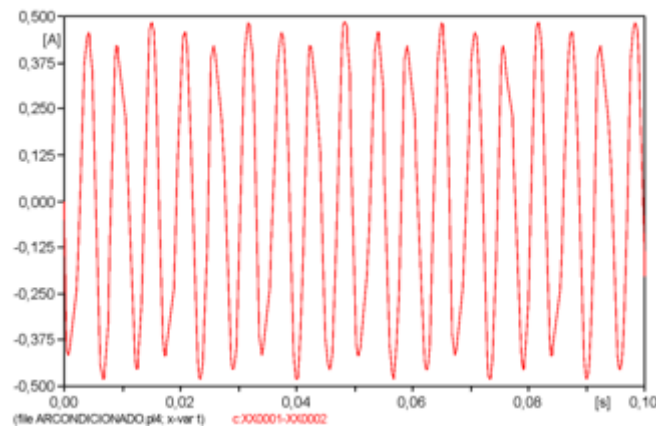
Para cada equipamento foram apresentadas as formas de onda resultantes das correntes. O ar condicionado será utilizado como exemplo, para cada equipamento realizou-se o mesmo processo. Os valores nominais de potência, corrente e tensão para este equipamento foram obtidos a partir da análise de um condicionador de Ar- tipo Split.

**Tabela 1. Valores da potência, tensão e corrente do condicionador de Ar.**

Potência (P)	Tensão (V)	Corrente (i)
750 W	220 V	3.91 A

Na figura 2 é mostrada a forma de onda resultante das correntes do equipamento.

**Figura 2. Forma de onda das correntes do condicionador de Ar.**



Fonte: Próprio Autor.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da simulação de cada equipamento, onde se obteve a forma de onda resultante das correntes harmônicas, foram simulados posteriormente 4 tipos de cenários, onde cada um tem conjunto de cargas residenciais diferentes em 4 horários distintos, sendo um em cada período do dia: manhã, tarde, noite e madrugada.

Primeiro, simulou-se os 4 cenários sem a conexão da concessionária, com o intuito de observar o conteúdo harmônico da tensão e corrente de cada equipamento, para em seguida, simular novamente os 4 mesmos cenários com a conexão da concessionária e avaliar a presença de harmônicos.

Esses 4 cenários foram criados de maneira empírica com base no uso destes equipamentos na própria residência do autor, assim como em residências que o mesmo frequenta. A seguir, estão definidos os horários de cada um dos 4 cenários considerados neste trabalho:

- **Cenário 1:** Conjunto de cargas no período da manhã (07:00h).
- **Cenário 2:** Conjunto de cargas no período da tarde (13:00h).
- **Cenário 3:** Conjunto de cargas no período da noite (20:00h).
- **Cenário 4:** Conjunto de cargas no período da madrugada (02:00h).

Em cada cenário foram observadas as cargas utilizadas com mais frequência em cada período do dia.

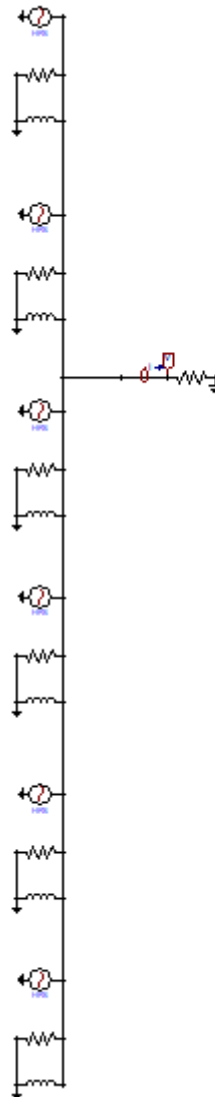
Esta seção tem como objetivo avaliar a distorção harmônica causada por impactos de equipamentos eletrodomésticos de uma residência. Para tal, várias simulações foram feitas a partir das medições e dos cenários propostos.



As simulações iniciaram com cenários harmônicos encontrados em residências devido à interação das cargas presentes nos mesmos. Ou seja, foram simuladas as interações das correntes e tensões harmônicas de vários eletrodomésticos presentes nos consumidores residenciais.

Na figura 3 é mostrado como fica o circuito antes da conexão da concessionária.

**Figura 3. Circuito antes da conexão da concessionária**



Fonte: Próprio Autor

Ainda, para uma análise ainda mais abrangente, também foi simulada a conexão da residência à rede da concessionária de energia, considerando que a mesma possui uma potência de curto circuito infinito. A figura 4 ilustra essa simulação.

Figura 4. Circuito depois da conexão da concessionária.



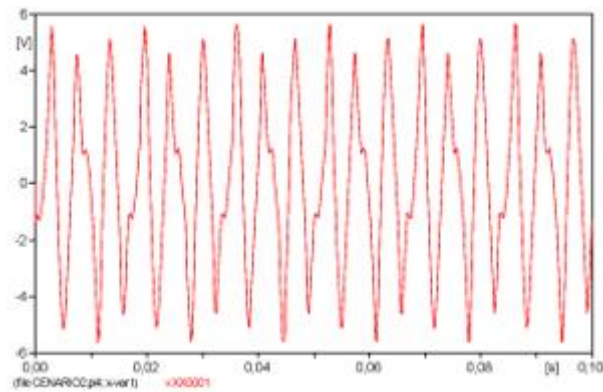
Fonte: Próprio Autor.

Em todos os 4 tipos de cenários, foram simulados os circuitos sem a conexão da concessionária e também com a conexão da concessionária. Serão apresentados somente as simulações do Cenário 2.

#### 4.1 SIMULAÇÃO DO CENÁRIO 2

Foi feita a simulação deste cenário pelo ATPDraw. Pode-se observar na figura 5 a forma de onda da tensão do conjunto de cargas antes de ser conectada à concessionária.

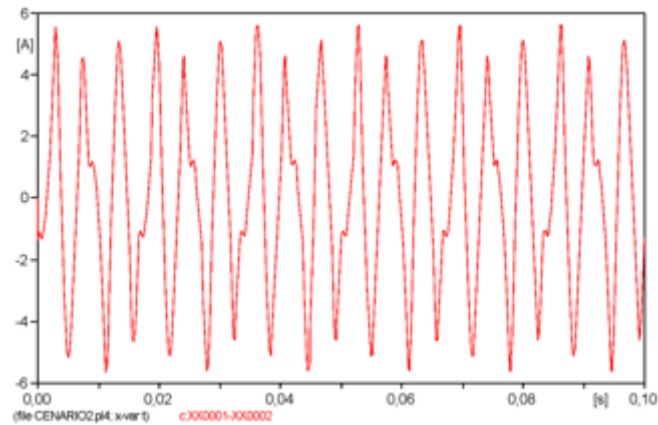
**Figura 5. Forma de onda da tensão do conjunto de cargas do Cenário 2.**



Fonte: Próprio Autor.

A Figura 6 apresenta a forma de onda da corrente do conjunto de cargas do cenário 2.

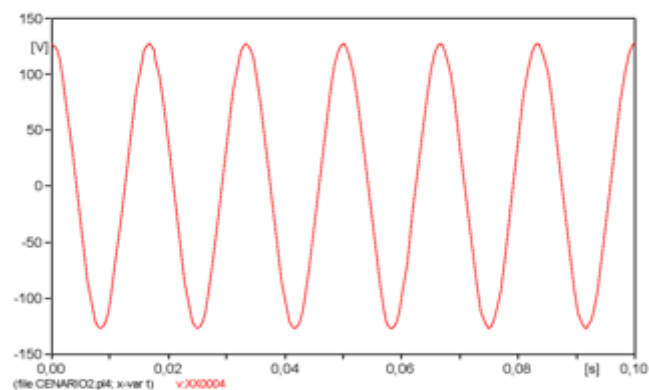
**Figura 6. Forma de onda da corrente do conjunto de cargas do Cenário 2.**



Fonte: Próprio Autor

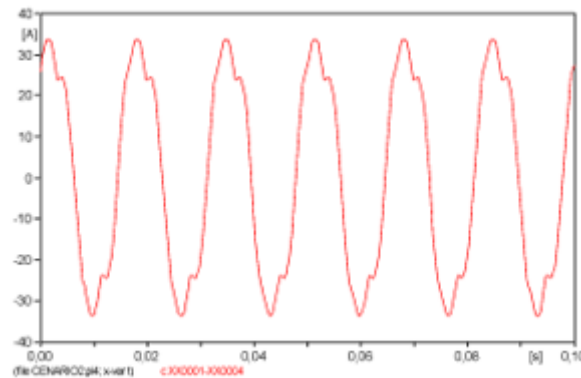
Nas figuras 7 e 8 é observado as formas de onda da tensão e da corrente quando está conectada na concessionária.

**Figura 7. Tensão conectada na concessionária no Cenário 2.**



Fonte: Próprio Autor.

**Figura 8. Corrente conectada na concessionária no Cenário 2.**



Fonte: Próprio Autor.

A partir dos cenários simulados, fica evidente que, independentemente do cenário, o impacto de uma única residência na rede elétrica da concessionária de energia é insignificante no nível de tensão. Quanto ao nível de corrente, a distorção harmônica varia de acordo com o cenário analisado, mas também com valores baixos em comparação com a componente fundamental.

Ainda, vale lembrar que o foco principal deste trabalho se concentra em avaliar a distorção harmônica gerada pelos equipamentos eletrodomésticos da residência, neste sentido, pensando num caso mais próximo da realidade, considerando um universo com um número maior de residências. Provavelmente, o impacto causado na rede da concessionária de energia seria maior ainda a nível da corrente, entretanto a nível da tensão, a distorção não deve mudar muito, visto a potência de curto-circuito muito elevada da concessionária de energia, em comparação com as residências.

## 5 CONCLUSÃO

Frente ao número crescente de equipamentos eletrônicos e eletroeletrônicos que são cada vez mais sensíveis a distúrbios recorrentes da rede elétrica, surge uma enorme preocupação das concessionárias de energia elétrica quanto ao seu produto fornecido. O presente trabalho caracterizou os harmônicos produzidos por equipamentos eletrônicos e eletroeletrônicos de consumidores residenciais e o impacto que estes harmônicos causam no sistema de energia elétrica da concessionária.

Dentre os inúmeros distúrbios presentes nos parâmetros de qualidade de energia existentes, o estudo levou em consideração as harmônicas. Para tal, foi realizado o levantamento dos componentes harmônicos de aparelhos eletrodomésticos presentes nos consumidores residenciais, sendo feita a simulação de 20 equipamentos.

Após o levantamento dos componentes harmônicos, foi realizada a modelagem das cargas no ATPDraw e a validação da mesma. Para modelar a carga, utilizou da ramificação paralela R-L, que representa a corrente fundamental. Dentre os harmônicos, as fontes de correntes harmônicas tiveram seus módulos e ângulos inseridos.

Em seguida, várias simulações foram feitas no ATPDraw a partir de conjuntos de cargas em um determinado horário e feita a validação de tais conjuntos. Foram simulados 4 cenários diferentes, onde cada cenário foi apresentado um horário, sendo eles: 07:00 horas, 13:00 horas, 20:00 horas e 02:00 horas.

Por fim, foi verificado o impacto da residência a partir do momento em que ela é conectada à concessionária de energia. Devido à infinita potência de curto circuito da concessionária de energia, não apresenta nenhuma distorção na forma de onda da tensão e a distorção na forma de onda da corrente é baixa para a maioria dos casos analisados.

Os objetivos do trabalho proposto foram alcançados, lembrando que, o foco principal era avaliar a distorção harmônica obtida pelos aparelhos eletrodomésticos de uma residência. Assim, para trabalhos futuros, poderá ser considerado um aumento do número de residências, de maneira que possam impactar de maneira mais eficiente a distorção harmônica da rede da concessionária de energia.

## REFERÊNCIAS

ANEEL. **PRODIST: Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica**, Agencia Nacional de Energia Elétrica, 2018.

FERNANDES, Julia Oliveira. **Estimação de Estado Harmônico para Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Frente a Condições Reais de Operação e Monitoramento**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado) – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Janaúba, 2019.

OLESKOVICZ, Mário. **Qualidade da Energia Elétrica**. 2006, São Carlos.

PIRES, Igor. **Caracterização de harmônicos causados por equipamentos eletroeletrônicos residenciais e comerciais no sistema de distribuição de energia elétrica**. 2006. Dissertação (pós-graduação) – UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.