



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Colegiado do Curso de Engenharia de Elétrica



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Caracterização de Harmônicos em
Consumidores Residenciais

Thiago Ferreira dos Santos

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

JOÃO MONLEVADE

2017

Universidade Federal de Ouro Preto
Departamento de Engenharia Elétrica

Thiago Ferreira dos Santos

Caracterização de Harmônicos em Consumidores Residenciais

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Juan Carlos Galvis Manso.

João Monlevade, MG

2017



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Colegiado do Curso de Engenharia de Elétrica



ANEXO X - TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado “**Caracterização de harmônicos em consumidores residenciais**” é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 31 de Agosto de 2017


Thiago Ferreira dos Santos



ANEXO IV - ATA DE DEFESA

Aos 31 dias do mês de agosto de 2017, às 11:30 horas, no bloco C deste instituto, foi realizada a defesa de monografia pelo formando **Thiago Ferreira dos Santos**, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Dr. Willington Guerra Zvietcovich, MSc. Welbert Alves Rodrigues e Dr. Juan Carlos Galvis Manso.

O candidato apresentou a monografia intitulada: **Caracterização de harmônicos em consumidores residenciais**. A comissão examinadora deliberou, por unanimidade, pela APROVAÇÃO do candidato, com a nota média 8,93, de acordo com a tabela 1. Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da comissão examinadora e pelo formando.

Tabela 1 – Notas de avaliação da banca examinadora

Banca Examinadora	Nota
Dr. Willington Guerra Zvietcovich	8,8
MSc. Welbert Alves Rodrigues	9,0
Dr. Juan Carlos Galvis Manso	9,0
Média	8,93

João Monlevade, 31 de Agosto de 2017.

Dr. Juan Carlos Galvis Manso
Professor Orientador

Thiago Ferreira dos Santos
Aluno

Dr. Willington Guerra Zvietcovich
Professor Convidado

MSc. Welbert Alves Rodrigues
Professor Convidado

S237c Santos, Thiago Ferreira dos.
Caracterização de Harmônicos em Consumidores Residenciais [manuscrito] /
Thiago Ferreira dos Santos. - 2017.

44f.f.: il.: color; grafs; tabs; mapas.

Orientador: Prof. Dr. Juan Carlos Galvis Manso.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de
Ciências Exatas e Aplicadas. Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Harmônicos. 2. Consumidores residenciais. 3. Analisador de energia. 4.
Medições em campo. I. Manso, Juan Carlos Galvis. II. Universidade Federal de
Ouro Preto. III. Título.

CDU: 621.3

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela oportunidade da vida e por todo o caminho que tem me reservado.

Agradeço aos meus pais, Aparecida e José, que sempre me apoiaram e deram forças para seguir em frente com meus objetivos, à minha irmã, Viviane, aos meus irmãos Cristiano e Luiz por sempre me ajudar a qualquer hora.

Agradeço a todos os meus amigos e colegas de curso que tive a oportunidade de conhecer, a todos aqueles que de alguma forma estiveram e estão próximos de mim, em especial a Eduardo, Fabiana, Jonas, Melissa e o Welton.

Agradeço a todos que de bom grado me deixaram realizar medições em suas residências.

Agradeço de forma especial também ao professor Juan Carlos Galvis Manso por ter aceitado ser meu orientador neste Trabalho de Conclusão de Curso.

*'O conhecimento serve para
encantar as pessoas, não para
humilhá-las'.- Mario Sergio
Cortella*

Resumo

No decorrer dos anos, a demanda residencial por energia elétrica vem aumentando, consequência do aumento dos eletrodomésticos. Sendo a maioria deles baseados em equipamentos eletrônicos, os quais tem um comportamento não linear. Embora um equipamento operando individualmente irá injetar uma quantidade pequena de corrente harmônica na rede, a soma de vários desses aparelhos pode resultar em uma grande quantidade de distorção harmônica. Num futuro próximo, estes valores de distorção harmônica podem superar os limites determinados pelas normas vigentes, e, conseqüentemente, seus efeitos podem ser danosos aos equipamentos conectados ao sistema elétrico e aos consumidores. Neste cenário, este trabalho tem como objetivo determinar curvas, via simulação e via medição, que caracterizem o nível de distorção harmônica em consumidores residenciais.

Primeiramente tratou-se dos aspectos conceituais envolvidos, bem como a norma nacional e internacional relativas aos limites e os valores de referência para os harmônicos. Posteriormente, é apresentada a metodologia, que denota como foi realizada a medição do consumo diário em 23 residências da cidade de João Monlevade - MG usando o analisador de energia ET-5061C. Apresentou-se também a adaptação de um algoritmo já proposto na literatura que gera curvas de consumo baseado no sistema de poses e hábitos de consumo para construir as curvas de distorção harmônica residenciais.

Com o resultado das medições observou-se que em todas as medições, foi detectado uma distorção harmônica de corrente com valores elevados, destacando-se as harmônicas ímpares de 3 (distorção média de 23%), 5 (distorção média de 13%) e 7 (distorção média de 9%) ordem.

Palavras chave: Harmônicos, Consumidores residenciais, Analisador de energia, Medições de campo.

Abstract

Over the years, the residential demand for electric energy has been increasing, due to the increase of home appliances. Most of them are based on electronic equipment, which has a non-linear behavior. Although individual equipment will inject a small amount of harmonic current in the power grid, the sum of several of these devices can result in a large amount of harmonic distortion. In the near future, these values of harmonic distortion can exceed the limits determined by the current norms, and, consequently, their effects can be harmful to the equipment of the electrical systems and the consumers. This study aims to implement an algorithm to characterize a mean curve for the harmonics from the residential measurements and to construct the average curve of the measurements in residential consumers.

First, we dealt with the conceptual aspects involved, as well as the national and international regulatory standards regarding to the limits and reference values for harmonics. Subsequently, the methodology is presented, which shows how the daily consumption was measured in 23 homes in the city of João Monlevade - MG using the ET-5061C energy analyzer. It was also presented the adaptation of an algorithm already proposed in the literature that generates consumption curves based on the poses system and consumption habits to construct the residential harmonic distortion curves.

With the result of the measurements it was observed that in all the measurements, a harmonic distortion of current with high values was detected, standing out the odd harmonics of 3 (average distortion of 23 %), 5 (average distortion of 13 %) and 7 (mean distortion of 9 %) order.

Keywords: Harmonics, Residential consumers, Energy analyzer, Field measurements.

Lista de figuras

Figura 1 – Evolução do consumo anual de energia por setor	1
Figura 2 – Componentes harmônicas da onda X	5
Figura 3 – Espectro Harmônico	7
Figura 4 – Analisador de energia	14
Figura 5 – Esquema de ligação para rede monofásica	15
Figura 6 – Esquema de ligação para rede bifásica	16
Figura 7 – Equipamento instalado	17
Figura 8 – Fluxograma do algoritmo	19
Figura 9 – Comportamento típico da corrente eficaz na geladeira	20
Figura 10 – Intervalo do DHI da televisão	21
Figura 11 – Intervalo do ângulo da televisão	22
Figura 12 – Fluxograma do algoritmo com harmônicas	23
Figura 13 – Localização das residências medidas	24
Figura 14 – Média e desvio padrão das curvas de consumo medidas	25
Figura 15 – Comparação do DHI e IDD das curvas	26
Figura 16 – Comparação da curva média da simulação com a curva média da medição	27
Figura 17 – Espectro da residência 5	29
Figura 18 – Espectro da residência 21	30
Figura 19 – Comparação da potência ativa e DHT da residência 20	31
Figura 20 – Ordem harmônica da residência 20	31

Lista de tabelas

Tabela 1 – Limites de Distorção da Tensão de Alimentação	11
Tabela 2 – Limites de distorção de corrente para sistemas com classificação de 120V a 69kV	12
Tabela 3 – Valores de referência globais das distorções harmônicas totais(em porcentagem da tensão fundamental)	12
Tabela 4 – Níveis de referência para distorções individuais de tensão	13
Tabela 5 – Descrição do Analisador	15
Tabela 6 – Classificação da Rede	15
Tabela 7 – Faixa de Consumo	16
Tabela 8 – Potência dos aparelhos utilizados na simulação.	20
Tabela 9 – Características das residências 5,20,21	28
Tabela 10 – Características das residências	35

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Trabalhos Correlatos	2
1.3	Objetivo	4
1.3.1	Objetivos Específicos	4
2	MARCO TEÓRICO	5
2.1	Harmônicos	5
2.2	Distorção Harmônica Total (DHT)	5
2.3	Distorção Harmônica Individual($DHI_h\%$)	6
2.4	Distorção de Demanda Total(TDD)	6
2.5	Distorção de Demanda Individual($IDD_h\%$)	7
2.6	Espectro Harmônico	7
2.7	Potência	8
2.7.1	Potência Instantânea	8
2.7.2	Potência Ativa	9
2.7.3	Potência Aparente	9
2.7.4	Potência Reativa	9
2.7.5	Potência Não Ativa	10
2.8	Fator de Potência	10
2.9	Média Aritmética	10
2.10	Desvio Padrão	10
2.11	Normas	11
2.11.1	IEEE-519	11
2.11.2	Prodist	12
3	MATERIAIS E MÉTODOS	14
3.1	Medição	14
3.1.1	Instrumento de Medição	14
3.1.2	Classificação dos Consumidores	15
3.1.3	Aquisição dos Dados	16
3.2	Construção do Algoritmo	18
3.2.1	Construção do algoritmo da curva de carga	18
3.2.2	Construção do algoritmo da curva com harmônicos	21
4	RESULTADOS	24

4.1	Resultados da Medição	24
4.2	Comparação da Medição com a Simulação	26
4.3	Observações pontuais de alguns consumidores	28
5	CONCLUSÃO	32
6	PROPOSTAS DE FUTUROS TRABALHOS	33
	REFERÊNCIAS	43

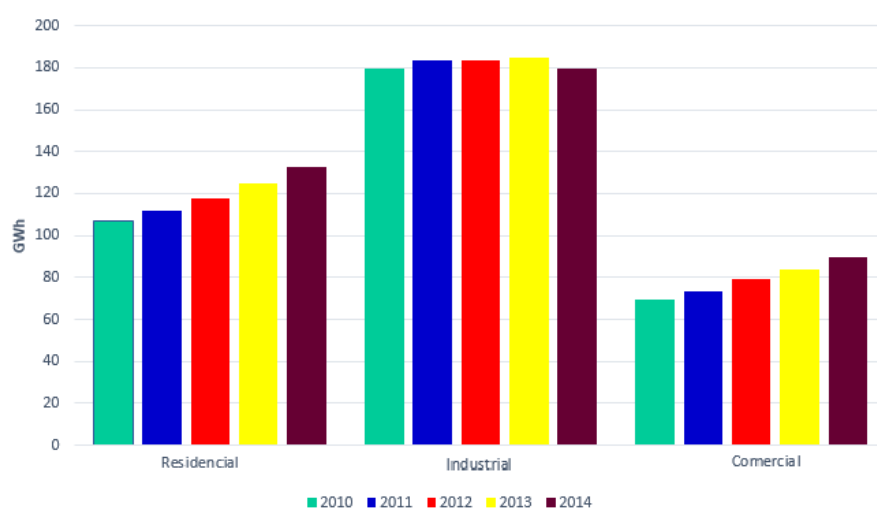
1 Introdução

1.1 Contextualização

Verifica-se atualmente um grande avanço tecnológico na vida do ser humano, associada à descoberta de equipamentos mais eficientes, as quais proporcionam às pessoas mais conforto. Junto a esses avanços é possível observar a ampliação do consumo de energia elétrica. Embora esse aumento possa ser reflexo de melhorias econômicas e na qualidade de vida dos cidadãos, também pode apresentar aspectos negativos, como a injeção de harmônicos, que causam problemas nos condutores, na iluminação, nos equipamentos eletrônicos e em vários outros equipamentos de energia elétrica. Todos esses efeitos podem gerar prejuízos para os consumidores e/ou para a concessionária de energia.

O ano de 2001 foi um ano atípico para o Brasil no setor energético, pois houve muitos apagões e racionamentos de energia elétrica, o que trouxe uma crise energética causada pela falta de planejamento e a ausência de investimentos em geração e distribuição de energia elétrica. Passado o ano de 2001, o governo começou a se preocupar mais com a geração e distribuição energética, trazendo vários investimentos para essa área. O avanço tecnológico aliado aos investimentos trouxe um impacto na distribuição do consumo elétrico nos setores do país, podendo-se destacar o setor residencial (Figura 1) como sendo o que mais cresceu nesses últimos anos.

Figura 1 – Evolução do consumo anual de energia por setor



Fonte: (EPE, 2015)

No setor residencial, houve aumento do consumo energético, fato que está ligado ao aumento populacional e ao número de eletrônicos utilizados atualmente, o que reflete

na mudança de carga nas residências e o comportamento da tensão e corrente que nelas chegam.

Inserido no contexto dessas mudanças, este trabalho visa à análise da distorção harmônica, que tende a aumentar cada vez mais, alterando drasticamente a forma de onda de corrente, podendo gerar prejuízos para os consumidores ou para a concessionária fornecedora. Normalmente essa distorção é causada por dispositivos não lineares, que possuem na sua construção principalmente elementos de estado sólido de conversão com espectro harmônico característico, como ponte de retificadores, compensadores controlados a tiristores; ciclo-conversores, ou equipamentos utilizados em residências, como televisores, computadores, lâmpadas fluorescentes, dimmers de controle de lâmpadas etc.

Como já mencionado em um consumidor residencial, os dispositivos eletrônicos operando isoladamente não geram harmônicos suficientes para prejudicar a rede. No entanto, quando se consideram vários consumidores residenciais e vários dispositivos trabalhando simultaneamente, o efeito de distorção harmônica se torna maior. Sabemos que a qualidade da energia é indispensável para os dias atuais. Por isso é de grande importância conhecer o nível de distorção harmônica injetado pelas unidades residenciais.

1.2 Trabalhos Correlatos

O aumento dos harmônicos na rede elétrica é um tema de suma importância no contexto atual, devido ao aumento das tecnologias mais sensíveis a distorções, o que tem chamado a atenção dos pesquisadores dessa área. Por esse motivo, existem vários trabalhos que abordam as características típicas dos harmônicos que um equipamento, um conjunto de equipamentos ou um sistema (residencial, comercial, industrial) geram de impacto no sistema elétrico. Na literatura pesquisada tem-se, (BAGHZOUZ et al., 2001) no qual é realizado de forma analítica o estudo da influência dos harmônicos, (MANSOOR et al., 1994) utilizada os mesmos critérios e acrescenta a análise nos aparelhos eletrônicos. Já os trabalhos de (PIRES, 2006), (CARVALHO, 2015) e (TOSTES, 2003) focam na análise de harmônicos em sistemas residenciais a partir de medições.

(BAGHZOUZ et al., 2001), apresenta uma análise probabilística de harmônicos no sistema elétrico de potência, apresentando dados que mostram a aleatoriedade dos harmônicos no sistema e evidenciando a dificuldade e a complexidade da análise harmônica devido a vários fatores, tais como a grande diversidade das cargas não-lineares que geram correntes harmônicas dependentes da magnitude e do conteúdo harmônico da alimentação de tensão; a composição da carga de um alimentador que está constantemente mudando; e a modelagem de carga em frequências harmônicas, assunto complexo e não totalmente compreendido ainda.

Em (MANSOOR et al., 1994) foi proposto um modelo analítico para cálculo das

componentes harmônicas da corrente de entrada de um retificador de ponte de diodos filtrado por capacitor, que é utilizado em várias cargas eletrônicas, analisando as respostas do circuito através da transformada de Laplace e do método de Gauss-Seidel. Segundo esses autores, existe uma atenuação significativa dos harmônicos de corrente acima da terceira ordem quando um número de cargas idênticas, como televisores e computadores, compartilha uma impedância de fonte comum. E as correntes harmônicas da 9ª ordem e acima experimentam um cancelamento significativo, decorrente da variação individual e/ou composta no nível de potência, da magnitude da impedância e da relação da impedância X/R .

Por outro lado, (PIRES, 2006) mostra os efeitos negativos da circulação de harmônicos no sistema elétrico e em seus derivados, apresentando medições nos eletrodomésticos encontrados nas residências e medições nos próprios consumidores residenciais e nos comerciais. Entre os vários resultados, destaca-se que as cargas de aquecimento, em sua grande maioria cargas lineares, irão apresentar distorção de correntes iguais aos verificados para a tensão; os aparelhos eletrônicos devido ao processo de conversão CA-CC empregado em suas fontes de alimentação, irão apresentar uma grande produção de harmônicos em relação aos demais; e no consumidor nota-se uma correlação inversa entre a corrente e sua distorção, ou seja, quanto maior o valor da corrente eficaz menor é a distorção;

Em (CARVALHO, 2015) é apresentada uma caracterização do conteúdo harmônico em residências por meio de medições realizadas em seis domicílios de diferentes perfis. Para cada residência levantaram-se as cargas encontradas na instalação e analisou-se de forma individual cada uma delas como forma de avaliar sua influência no comportamento harmônico da instalação. Foram apresentados também, em forma de gráficos, os resultados das medições instantâneas de cada eletrodoméstico e o resultado das medições das residências ao longo de 5 dias. O autor indicou que há variação nos níveis de harmônicas de corrente devido não exclusivamente à carga, mas também ao hábito de utilização dos moradores das residências. Isso se justifica pelo fato de que, embora possam haver equipamentos similares em todas as residências, o horário, o período de utilização dos mesmos e a quantidade utilizada de forma conjunta variam de acordo com o perfil do consumidor.

(TOSTES, 2003), em sua tese, realizou medições na rede de distribuição da cidade de Belém, em consumidores de baixa tensão de diversos níveis de consumo. O procedimento para agrupar esses consumidores consistia em identificar, através de identificação direta, os grupos de consumidores com padrões similares, os que tinham equipamentos parecidos em suas residências. No final, chegou-se à conclusão de que, em vez de estratificar os consumidores pela classe de renda ou pelos equipamentos existentes na residência, seria melhor estratificar por classe de consumo. Observou-se que independentemente da classe de renda, todos os consumidores residenciais geram, de forma predominante, os harmônicos de ordem 3, 5, e 7. A diferença básica entre esses consumidores não está na

ordem dos harmônicos injetados na rede, mas sim no nível da corrente envolvida.

1.3 Objetivo

O objetivo geral deste trabalho é realizar medições via amostragem de um grupo de consumidores residenciais dentro da mesma faixa de consumo mensal, de forma a caracterizar as formas de onda da corrente elétrica residencial, incluindo a análise sobre as componentes harmônicas, visando identificar semelhanças entre esse grupo selecionado.

1.3.1 Objetivos Específicos

- Criar um banco de dados que irá armazenar várias medições residenciais, tais como corrente eficaz fundamental, correntes harmônicas, entre outras.
- Construir curvas médias padrão para a corrente eficaz fundamental e para as correntes harmônicas residenciais.
- Construir curvas de consumo considerando hábitos de consumo e características harmônicas dos eletrodomésticos referenciados na literatura, utilizando um algoritmo aleatório.
- Comparar os resultados obtidos via simulação e via medição para harmônicos residenciais.

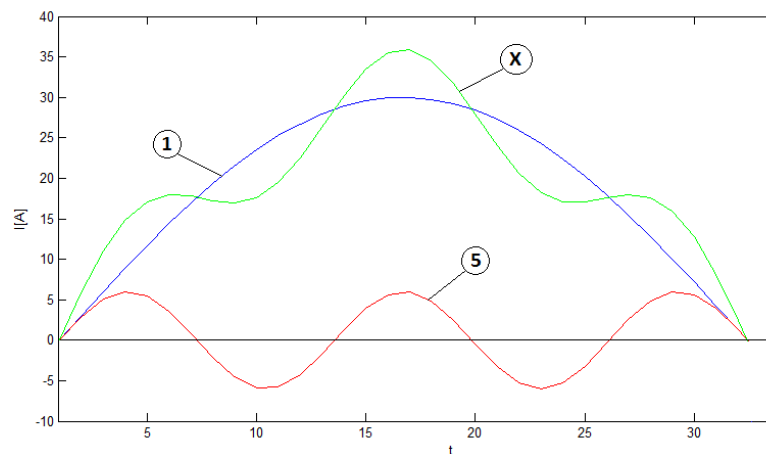
2 Marco Teórico

2.1 Harmônicos

Uma usina de geração de energia fornece uma tensão e uma corrente que tem comportamento senoidal a uma determinada amplitude e frequência para seus consumidores. Quando estes sinais são fornecidos ao usuário, podem apresentar deformação. Uma deformação bastante conhecida é a distorção harmônica (ARRILLAGA; WATSON, 2004), que é determinada como sendo qualquer componente múltipla e inteira da frequência fundamental da onda senoidal de tensão ou corrente. Para o sistema brasileiro, a onda fundamental está na frequência de 60Hz. Segundo o conceito, o harmônico de segunda ordem vai estar na frequência 120Hz, o de terceira ordem está na frequência 180Hz e assim sucessivamente. Os harmônicos podem ser descritos através de fórmulas matemáticas, dentre as quais pode-se citar a decomposição da onda utilizando a série de Fourier.

Para uma melhor compreensão, é apresentada a Figura 2. Esta mostra um sinal X qualquer, que é a soma ponto a ponto do sinal 1 com o sinal 5. O sinal 1 é a onda fundamental e o sinal 5 representa um múltiplo qualquer dessa onda fundamental, que seria um harmônico dessa mesma ordem.

Figura 2 – Componentes harmônicas da onda X



2.2 Distorção Harmônica Total (DHT)

O DHT é o índice de distorção harmônico mais comum visto na literatura que se refere à forma de onda. É um indicador que permite avaliar quantitativamente a taxa de distorção que a onda apresenta. Esta distorção pode ser calculada tanto para a tensão

quanto para a corrente. Pode-se dizer que é a composição das distorções harmônicas individuais que expressa o grau de desvio da onda em relação ao padrão ideal (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2013). Para uma onda de sinal X, a fórmula é descrita como:

$$DHT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} X_h^2}}{X_1} \quad (2.1)$$

onde,

X_h -Valor da componente harmônica na ordem h do sinal;

X_1 -Valor da componente fundamental do sinal.

Os valores de X_1 e de X_h podem ser de pico ou rms. Normalmente o DHT é expresso na forma de porcentagem. Quando se refere a tensão temos:

$$DHT_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} V_h^2}}{V_1} \quad (2.2)$$

onde,

V_h -Valor da tensão harmônica de ordem h;

V_1 -Valor da tensão fundamental.

Quando se refere a corrente temos:

$$DHT_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} i_h^2}}{i_1} \quad (2.3)$$

onde,

i_h -Valor da corrente harmônica de ordem h;

i_1 -Valor da corrente fundamental.

Quando se efetuam os cálculos de DHT não se considera a componente de corrente contínua de acordo com a norma (IEEE-519, 1993).

2.3 Distorção Harmônica Individual($DHI_h\%$)

A taxa individual harmônica expressa o nível individual de uma das componentes que totalizam o espectro de frequências de um sinal distorcido, normalmente referenciada ao valor da componente fundamental.

$$DHI_h\% = \frac{V_h}{V_1} X 100 \quad (2.4)$$

2.4 Distorção de Demanda Total(TDD)

É definida como a distorção harmônica da corrente, em porcentagem da máxima demanda da corrente de carga segundo (ARRILLAGA; WATSON, 2004). Isto significa

que a medição da TDD (do inglês Total Demand Distortion) deve ser feita no pico de consumo. Este índice é semelhante ao DHT, exceto que a distorção é demonstrada como uma porcentagem da corrente de carga nominal ou máxima, em vez da corrente fundamental.

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{14} |I_h|^2}}{|I_L|} \quad (2.5)$$

onde,

I_h -Valor da corrente harmônica de ordem h;

I_L -Corrente de carga móvel máxima (com uma janela média móvel de 5 minutos), para o período de 24 horas.

2.5 Distorção de Demanda Individual($IDD_h\%$)

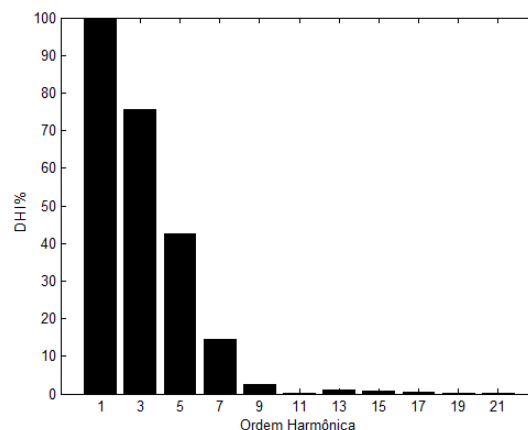
A distorção de demanda individual IDD (do inglês Individual Demand Distortion) expressa o nível individual de uma das componentes que totalizam o espectro de frequências de um sinal distorcido, referenciada ao valor da corrente de carga nominal ou máxima.

$$IDD_h\% = \frac{|I_h|}{|I_L|} \times 100 \quad (2.6)$$

2.6 Espectro Harmônico

O espectro harmônico é a representação das ordens harmônicas e suas respectivas amplitudes em um mesmo gráfico. Normalmente é utilizado o gráfico de barras, pois ele é de melhor visualização e cada barra representa uma ordem harmônica ou a frequência harmônica, como mostra a Figura 3.

Figura 3 – Espectro Harmônico



2.7 Potência

De acordo com a norma (IEEE-1459, 2010), no que se refere a sinais de tensão ou corrente distorcidos podemos classificar a potência de diversas maneiras:

2.7.1 Potência Instantânea

A potência instantânea pode ser descrita como:

$$p(t) = v(t) * i(t) \quad (2.7)$$

onde,

$v(t)$ -Tensão instantânea;

$i(t)$ -Corrente instantânea.

Que pode ser dividida em duas componentes: ativa e não ativa.

$$p(t) = p_a(t) + p_q(t) \quad (2.8)$$

$$p_a = V_0 I_0 + \sum_h V_h I_h \cos \theta_h [1 - \cos(2h\omega t - 2\alpha_h)] \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} p_q = & - \sum_h V_h I_h \sin \theta_h \sin(2h\omega t - 2\alpha_h) + 2 \sum_n \sum_m V_m I_n \sin(m\omega t - \alpha_m) \sin(n\omega t - \beta_n) \\ & + \sqrt{2} V_0 \sum_h I_h \sin(h\omega t - \beta_h) + \sqrt{2} I_0 \sum_h V_h \sin(h\omega t - \alpha_h) \end{aligned} \quad (2.10)$$

onde,

$p_a(t)$ -Potência ativa instantânea;

$p_q(t)$ -Potência não ativa instantânea.

O ângulo $\theta_h = \beta_h - \alpha_h$ é o ângulo de fase entre os fasores V_h e I_h .

Onde $p_a(t)$ é a parte da potência instantânea que é a soma das potências ativas harmônicas, causada pela componente de tensão de ordem h em fase com a componente de corrente de ordem h. Cada potência ativa instantânea de ordem h tem dois termos: uma potência ativa ou potência harmônica $P_h = V_h I_h \cos \theta_h$, e a potência harmônica intrínseca $-P_h \cos(2h\omega t - 2\alpha_h)$, que não contribui para a transferência líquida de energia ou para perda de potência nos condutores. E o segundo termo de p_q não representa uma transferência líquida de energia (isto é, o seu valor médio é nulo). Contudo, a corrente relativa a estes componentes não ativos provoca uma perda de potência adicional nos condutores.

2.7.2 Potência Ativa

A potência ativa média P pode ser dividida em duas componentes: potência ativa fundamental, P_1 , e potência ativa harmônica P_h .

$$P_1 = V_1 I_1 \cos \theta_1 \quad (2.11)$$

$$P_h = V_0 I_0 + \sum_{k \neq 1} V_h I_h \cos \theta_h = P - P_1 \quad (2.12)$$

A potência ativa harmônica também pode incluir componentes não inteiros de h , que são denominados inter-harmônicos e sub-harmônicos. Estes componentes não serão considerados neste trabalho.

2.7.3 Potência Aparente

A potência aparente é definida pela multiplicação dos valores de tensão e corrente (equação 2.13), e também pode ser dividida em potência aparente fundamental e potência aparente harmônica.

$$S = VI \quad (2.13)$$

Sendo a potência aparente fundamental definida por:

$$S_1 = V_1 I_1 \quad (2.14)$$

$$S_1^2 = P_1^2 + Q_1^2 \quad (2.15)$$

A potência aparente não fundamental harmônica é definida por:

$$S_N = \sqrt{S^2 - S_1^2} \quad (2.16)$$

E a potência aparente harmônica é:

$$S_h = V_h I_h \quad (2.17)$$

2.7.4 Potência Reativa

A potência reativa é bem parecida com a potência real, com multiplicações de componentes de corrente e tensão ortogonais de frequência de mesma ordem. A potência reativa fundamental é definida por:

$$Q_1 = V_1 I_1 \sin \theta_1 \quad (2.18)$$

2.7.5 Potência Não Ativa

A potência não ativa não é a mesma que a potência reativa, devido a ela agrupar componentes de potência não ativa fundamental e não fundamental. Sua formula é:

$$N = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (2.19)$$

A potência não ativa não deve ser confundida com a potência reativa, exceto quando as formas de onda da tensão e corrente são puramente senoidais $N = Q_1 = Q$.

2.8 Fator de Potência

O fator de potência é definido pela relação entre a potência ativa sobre a potência aparente.

$$FP = \frac{P}{S} \quad (2.20)$$

Na presença de harmônicos deve-se calcular o fator de potência total ou verdadeiro que engloba as componentes harmônicas do sinal.

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P_1 + P_h}{\sqrt{S_1^2 + S_N^2}} \quad (2.21)$$

2.9 Média Aritmética

A partir de um conjunto de dados, a média pode ser usada para produzir alguma característica da amostra. Sua formula é:

$$\bar{x} = \frac{\sum_1^n x_i}{n} \quad (2.22)$$

onde,

x_i -Um valor do conjunto de dados;

n -Número total de dados da amostra.

2.10 Desvio Padrão

O desvio padrão (σ) mede a dispersão de uma distribuição de dados. Quanto mais dispersa for uma distribuição de dados, maior será seu desvio padrão.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum |x_i - \bar{x}|^2}{n}} \quad (2.23)$$

2.11 Normas

Sabe-se que os harmônicos influenciam negativamente na qualidade da energia. Portanto, é necessária à sua regulamentação através de normas que assegurem o nível máximo tolerável.

2.11.1 IEEE-519

A norma (IEEE-519, 1993) apresenta recomendações para serem praticadas entre a concessionária e clientes para limitar o impacto que tem o aumento de cargas não lineares. Tenta-se reduzir os efeitos dos harmônicos em qualquer ponto do sistema, seja no consumidor ou na concessionária, estabelecendo níveis aceitáveis dos índices harmônicos para as tensões e correntes no ponto de acoplamento comum (do inglês Point of Common Coupling - PCC) e não para cada equipamento individual. O desenvolvimento desses limites foi baseado em:

- Limitar a injeção harmônica de clientes individuais para que não causem níveis de distorção de tensão inaceitáveis para as características normais do sistema;
- Limitar a distorção harmônica geral da tensão do sistema fornecida pela concessionária.

A Tabela 1 contém o limite harmônico de tensão em 8% para o DHT e em 5% da tensão fundamental para qualquer harmônico inteiro. Esses limites são em função dos equipamentos normalmente utilizados na indústria e nos lares, tais como o computador e equipamentos afins. Valores superiores de harmônicos podem resultar em mau funcionamento, às vezes imperceptíveis, do equipamento que pode também, em alguns casos, ser danificado permanentemente.

Tabela 1 – Limites de Distorção da Tensão de Alimentação

Tensão no PCC	Harmônicas Individuais (%)	DHT (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5

Fonte: (IEEE-519, 1993)

A Tabela 2 contém o limite harmônico baseado na relação de curto-circuito (I_{CC}/I_L), que é a relação entre a corrente de curto circuito (I_{CC}) no ponto de acoplamento comum com a concessionária e a corrente de demanda do consumidor. Esses limites vão variar de acordo com tensão utilizada e com a corrente de curto-circuito, sendo que, quanto maior a relação de curto-circuito, maiores serão os limites a serem adotados. Os limites

listados na Tabela 2 devem ser usados como valores de projeto do sistema para o "pior caso" para uma operação normal (condições maiores que uma hora de uso). Em períodos mais curtos, durante as fases de arranque ou em condições excepcionais, os limites podem ser excedidos em 50%.

Tabela 2 – Limites de distorção de corrente para sistemas com classificação de 120V a 69kV

Distorção máxima da corrente harmônica em porcentagem de IL						
Harmônicas Individuais (harmônicos ímpares)						
I_{cc}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Fonte: (IEEE-519, 1993)

2.11.2 Prodist

O Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (Prodist) são documentos que padronizam e regulamentam as atividades técnicas dos sistemas de distribuição brasileiros e que são elaborados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que é o órgão responsável pela regulamentação do setor no Brasil. O Módulo 8 (ANEEL, 2015), especificamente, trata sobre a Qualidade de Energia Elétrica (QEE), no qual se determina as metodologias de medição, os indicadores, os limites e os valores de referência a serem usados para concessionárias. Na resolução são destacados somente os valores de referência para as tensões harmônicas. Na Tabela 3 se mostram os valores de referência para o DHT na rede brasileira.

Tabela 3 – Valores de referência globais das distorções harmônicas totais(em porcentagem da tensão fundamental)

Tensão nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão [%]
$V_N \leq 1KV$	10
$1KV < V_N \leq 13,8KV$	8
$13,8KV < V_N \leq 69KV$	6
$69KV < V_N \leq 230KV$	3

Fonte: (ANEEL, 2015)

E na Tabela 4 mostram-se os valores de referência para distorções individuais da tensão.

Essa norma não cita os valores de referência para as correntes harmônicas.

Tabela 4 – Níveis de referência para distorções individuais de tensão

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]			
	Ordem	$V_N \leq 1KV$	$1KV < V_N \leq 13,8KV$	$13,8KV < V_N \leq 69KV$
Ímpares não múltiplos de 3	5	7,5	6	4,5
	7	6,5	5	4
	11	4,5	3,5	3
	13	4	3	2,5
	17	2,5	2	1,5
	19	2	1,5	1,5
	23	2	1,5	1,5
	25	2	1,5	1,5
>25	1,5	1	1	
Ímpares múltiplos de 3	3	6,5	5	4
	9	2	1,5	1,5
	15	1	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5
	>21	1	0,5	0,5
Pares	2	2,5	2	1,5
	4	1,5	1	1
	6	1	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5
	12	1	0,5	0,5
	>12	1	0,5	0,5

Fonte: (ANEEL, 2015)

3 Materiais e Métodos

Conforme descrito no capítulo anterior, as correntes harmônicas são distúrbios que comprometem a qualidade de energia elétrica. Neste trabalho, para caracterizar os harmônicos em residências serão coletadas várias medições por amostragem. Posteriormente elaborado também um algoritmo que simule os harmônicos produzidos a nível residencial. E no próximo capítulo será exibida a comparação entre esses dados.

3.1 Medição

3.1.1 Instrumento de Medição

Para coletar amostras dos níveis de distorção a nível residencial, foi utilizado o analisador de energia: ET-5061C visto na Figura 4. Esse medidor apresenta de modo amigável as principais grandezas elétricas, tais como: tensão, corrente, potências, entre várias outras funções.

Figura 4 – Analisador de energia



Fonte: (MINIPA, 2017)

Este analisador permite uma verificação completa da qualidade de energia elétrica em rede monofásica, bifásica e trifásica. Junto ao equipamento são fornecidas 4 garras flexíveis de medição de corrente e 5 garras para medição de tensão. O instrumento possibilita uma visualização dos parâmetros através de gráficos em exibição instantânea no seu display e ainda disponibiliza o armazenamento dos dados em memória interna ou externa. Alguns de seus principais parâmetros podem ser observados na Tabela 5.

Tabela 5 – Descrição do Analisador

Item	Descrição
Valores em tempo real	Tensões, Correntes, Potências, Energias, Flicker, Desbalanceamento, DHT, harmônicos
Período de integração	1, 2, 5, 10, 30seg, 1, 2, 5, 10, 15, 30, 60min
Harmônico	Até a 49° ordem
Sistema de operação	Windows CE
Segurança do instrumento	IEC/EN61010-1
Categoria de sobre tensão	CAT IV 600V

Fonte: Manual do ET-5061C

3.1.2 Classificação dos Consumidores

Os consumidores de baixa tensão podem ser classificados em até três faixas diferentes quando se tratando da rede elétrica (CEMIG, 2013). As diferentes classificações podem ser vistas na Tabela 6 com os tipos de fornecimento para instalações residenciais em região urbana de baixa tensão.

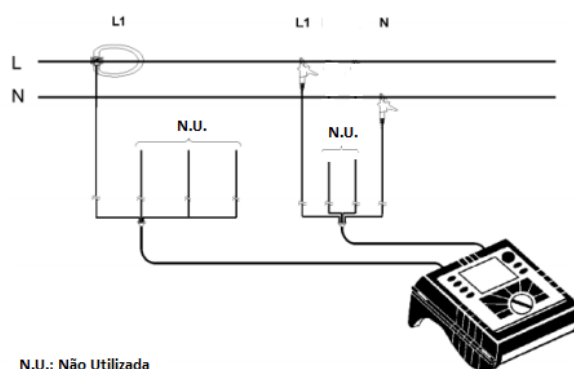
Tabela 6 – Classificação da Rede

Rede	Fornecimento	Carga Instalada[KW]
Monofásica	1 fase + neutro (2 fios)	0-10
Bifásica	2 fase + neutro (3 fios)	10-15
trifásica	3 fase + neutro (4 fios)	15-75

Fonte: (CEMIG, 2013)

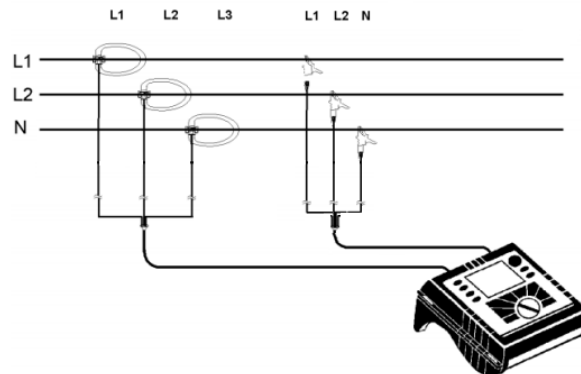
Nas medições realizadas, o analisador foi instalado no quadro de distribuição de circuitos encontrado no interior da residência. Na instalação nas garras de corrente, é indispensável a verificação do sentido da corrente, pois tais garras possuem uma seta indicando o sentido correto da medição. Na Figura 5 mostra-se a forma de instalação do equipamento com todas as conexões utilizadas para a rede monofásica.

Figura 5 – Esquema de ligação para rede monofásica



Na Figura 6 segue a ilustração com todas as conexões utilizadas para a rede bifásica.

Figura 6 – Esquema de ligação para rede bifásica



Os consumidores residenciais são classificados com base na energia elétrica utilizada no mês conforme Tabela 7, sendo que os consumidores do tipo 2 foram os mais encontrados nas medições.

Tabela 7 – Faixa de Consumo

Tipo	Consumo Mensal[kWh]
1	0-100
2	100-200
3	200-300

Fonte: (CEMIG, 2013)

3.1.3 Aquisição dos Dados

Para fazer as medições, foi seguido um protocolo, que determinou primeiramente os parâmetros utilizados no equipamento:

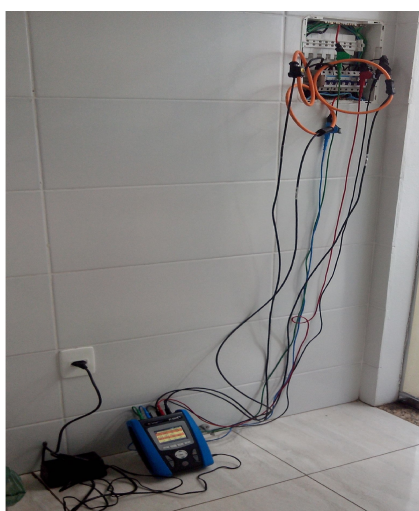
- Intervalo de armazenamento de 5 em 5 minutos, isso é para evitar ultrapassar a capacidade armazenamento do analisador ;
- Tempo total de amostragem: 24 horas, ou seja, 1 dia da semana (segunda a sexta);
- DHT da tensão e da corrente;
- Armazenamento dos harmônicos de tensão e de corrente até a 14^o ordem, isso é para evitar ultrapassar a capacidade armazenamento do analisador ;
- Armazenamento da potência ativa, reativa e aparente;
- Armazenamento do fator de potência.

Estas escolhas e limitações foram feitas dentro do limite de memória do analisador, de modo a facilitar o tratamento dos dados. As medições nas residências foram efetuadas nos diferentes bairros do município de João Monlevade - MG. Em todas as medições foi adotado o mesmo critério de instalação, a fim de que não houvesse discordância entre os dados e para se preservar a segurança. Tais são os critérios:

- Verificação da rede (monofásica ou bifásica);
- Identificação da alimentação principal (Quadro de Distribuição de Carga – QDC), pois quando se faz a ligação dos anéis de medição de corrente, é necessário que a ligação desse anel se dê na entrada da rede, de modo que se consiga medir a corrente total que chega na residência;
- Desliga-se o disjuntor principal no padrão da CEMIG, para não haver risco de choque elétrico e queima de algum equipamento;
- Depois de feitas corretamente as ligações, inicia-se a medição, com tempo total de 24 horas, sendo assim possível caracterizar o consumo diário típico daqueles moradores;
- Entrega-se um questionário visto no Anexo 1, no qual os moradores listam os eletrodomésticos existentes na residência e o horário de utilização naquele dia.

A Figura 7 mostra o equipamento instalado em uma das residências com sistema bifásico, mostrando uma instalação típica.

Figura 7 – Equipamento instalado



3.2 Construção do Algoritmo

3.2.1 Construção do algoritmo da curva de carga

A simulação foi realizada usando o MATLAB (Matrix Laboratory), software computacional para análise e visualização de dados. O MATLAB utiliza uma programação de alto nível, sendo possível a construção de gráficos e compilações de funções complexas de forma mais simples.

Para a construção das curvas diárias residenciais utilizou-se como base o algoritmo apresentado em (SANTOS et al., 2012), conservando os mesmos procedimentos e os mesmos dados. Mesmo existindo um grande número de eletrodomésticos no mercado, foi utilizado um grupo fixo de aparelhos para todas as simulações. Esses aparelhos estão descritos no sistema SINPHA - Sistema de Informação de Posses e Hábitos de Uso de Aparelhos Elétricos, que pode ser visto em (PROCEL, 2017).

O SINPHA apresenta vários indicadores a partir da pesquisa das PPH - Pesquisas de Posse e Hábitos de Consumo de Energia que pode ser visto no site da (??), que é uma pesquisa que coleta várias informações do setor residencial, comercial e até o industrial de todas as regiões do Brasil. Esses dados tornar-se-ão estatísticas para vários fins, tais como observar a eficiência energética do Brasil ou mesmo de cada região, descobrir o horário de ponta do país e várias outras pesquisas que possam necessitar dessas informações sobre os equipamentos e seus consumos.

No setor residencial, o objetivo foi o de quantificar a tipologia da posse e da utilização dos equipamentos elétricos, mediante entrevista direta. Coletou-se as informações sobre posse, marca, modelo, potência e hábitos de consumo de cada entrevistado, com aplicação de um questionário encontrado em (PROCEL, 2017). Quando não foi possível identificar a potência de algum aparelho, foi feito um levantamento das características do mesmo para se fazer uma estimativa dessa potência através de dados próprios da Procel.

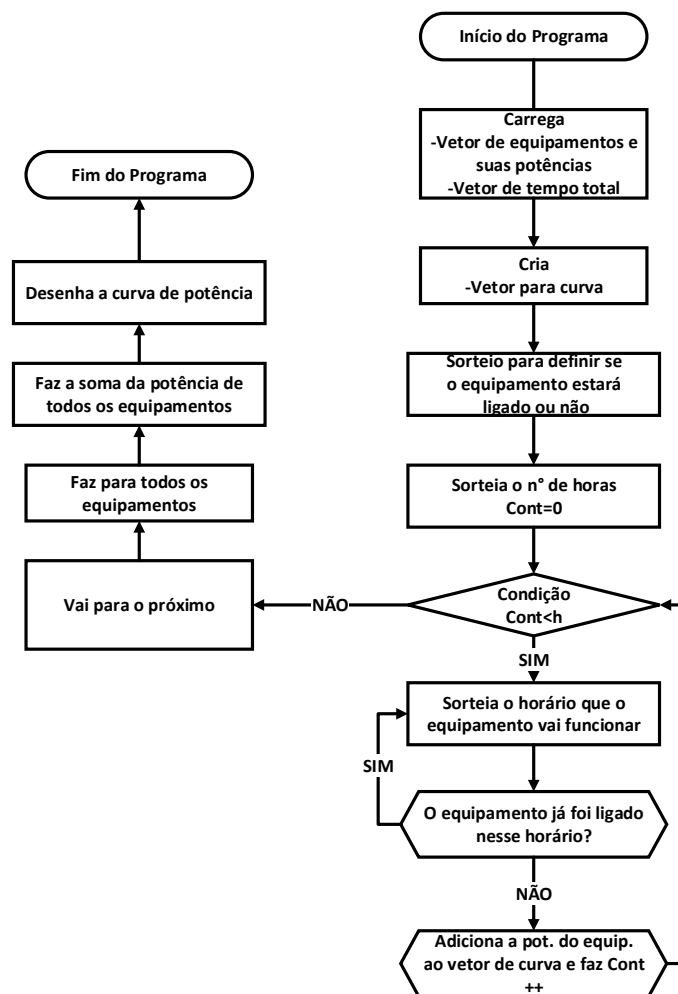
A partir dos dados retirados do simulador do SINPHA, foi definido o tempo médio de permanência de um equipamento ligado durante o dia, assim como os horários mais habituais de uso de cada equipamento. Tudo isso levando-se em consideração o fato de que a utilização de cada aparelho dentro da residência pode seguir um padrão ou não, haja vista que dentro de uma residência normalmente uma mesma pessoa não utiliza o mesmo aparelho no mesmo horário todos os dias.

Sabendo da característica aleatória do consumo de uma residência, foi implementado um algoritmo que escolhe de forma aleatória, mas ponderada, a utilização e o horário de funcionamento dos equipamentos dentro da residência. Esse algoritmo primeiramente tem a intenção de escolher se o equipamento vai estar ligado naquele dia ou não; depois faz-se um “sorteio” para se determinar o tempo total em que o equipamento vai estar ligado, determinando assim a quantidade exata de tempo que o equipamento estará sendo usado naquele dia. Há também o “sorteio” para saber em que horário do dia

o equipamento estará funcionando. Esse funcionamento poderá ocorrer mais de uma vez ao dia, como por exemplo uma TV pode ser ligada mais de uma vez no mesmo dia. Esse “sorteio” leva em consideração os horários mais comumente utilizados de cada aparelho, tendo probabilidades diferentes para cada equipamento e observando também sua maior utilização no horário de ponta, pois este “sorteio” leva em conta os dados da PPH mencionado anteriormente.

A Figura 8 apresenta um fluxograma do algoritmo implementado, para melhor exemplificar a lógica explicada acima.

Figura 8 – Fluxograma do algoritmo



Fonte: Adaptado de (SANTOS et al., 2012)

Na Tabela 8 são apresentadas as informações dos aparelhos e suas respectivas potências, que foram utilizadas nas simulações.

Quando foi construindo o algoritmo, atentou-se para as particularidades de cada aparelho. A geladeira, por exemplo, permanece ligada à tomada durante as 24 horas. Porém, nos estudos feitos e de acordo com (HROMADA, 2011), ela funciona em média

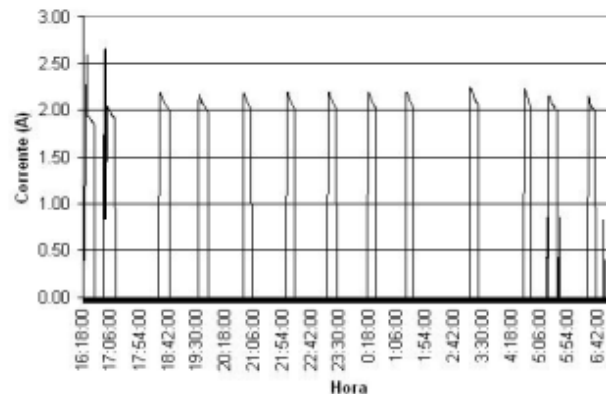
Tabela 8 – Potência dos aparelhos utilizados na simulação.

Posição	Equipamento	Potência[W]
1	Televisão	90
2	Chuveiro	4.400
3	Geladeira	130
4	Computador	120
5	Lâmpada	60
6	Máquina de Lavar	500
7	Aparelho de Som	80
8	Micro-Ondas	1.200
9	DVD	10
10	Ferro de Passar	1000

Fonte: (PROCEL, 2017)

durante um período de 10 (dez) horas no decorrer de um dia, de tal forma que isso se dá em intervalos praticamente fixos durante todo o dia, ligando e desligando seu motor para fazer o seu resfriamento. Na Figura 9 pode-se observar um comportamento típico de uma geladeira. Nessa figura constata-se um comportamento mais espaçado durante a madrugada que se deve à não abertura da porta da geladeira e à baixa temperatura do ambiente.

Figura 9 – Comportamento típico da corrente eficaz na geladeira



Fonte: (PIRES, 2006)

Por outro lado, as lâmpadas de uma residência normalmente são utilizadas em conjunto e não separadamente ao mesmo tempo, por isso no algoritmo foi utilizado em regra mais de uma lâmpada ligada simultaneamente. A iluminação, em sua maioria, é utilizada no horário noturno e no começo da manhã, podendo também ser usada nos outros horários do dia. Quanto à utilização do chuveiro, estimou-se o seu uso em três vezes ao dia. De acordo com (IBJE, 2012), a média nacional de pessoas residentes em uma mesma residência é de 3 pessoas. O número médio de pessoas por domicílio vem diminuindo ao longo das últimas décadas em todas as regiões do país: de 4,3 pessoas por família em 1981, para 3,3

peças em 2001, e 3,0 em 2011 segundo a Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios de 2012.

3.2.2 Construção do algoritmo da curva com harmônicos

Neste trabalho foi realizada uma extensão do algoritmo apresentado na seção anterior, visando a simular também a curva de carga para cada componente harmônica residencial. Não mais se tem uma única curva de carga do dia, e sim várias curvas, pois cada uma delas irá representar uma ordem harmônica, tais como o 3º e o 5º harmônico. Optou-se por representar somente os harmônicos de ordem ímpar, devido ao fato de que as ordens pares apresentarem nenhum ou muito pouco valor individual.

Para expressar o valor individual de cada ordem harmônica para cada eletrodoméstico, foi realizado um levantamento de outros trabalhos que apresentavam estudos sobre os valores de harmônicos produzidos por cada aparelho que foi utilizado no algoritmo (Tabela 8). Nestes trabalhos, foram identificados os valores de distorção reportados, e com estas informações foi construído um intervalo, que mostra os valores máximos e mínimos encontrados para cada ordem harmônica para cada eletrodoméstico. Para exemplificar os valores encontrados na Figura 10, tem-se os valores de amplitude para a televisão, e na Figura 11, tem-se os valores encontrados de ângulo para a televisão, no anexo 3 se encontra os valores de amplitude e ângulo para os outros eletrodomésticos. Como existe esse intervalo optou-se por utilizar novamente o "sorteio", que irá selecionar de forma aleatória o valor de amplitude e ângulo que estarão dentro de seus respectivos intervalos.

Figura 10 – Intervalo do DHI da televisão

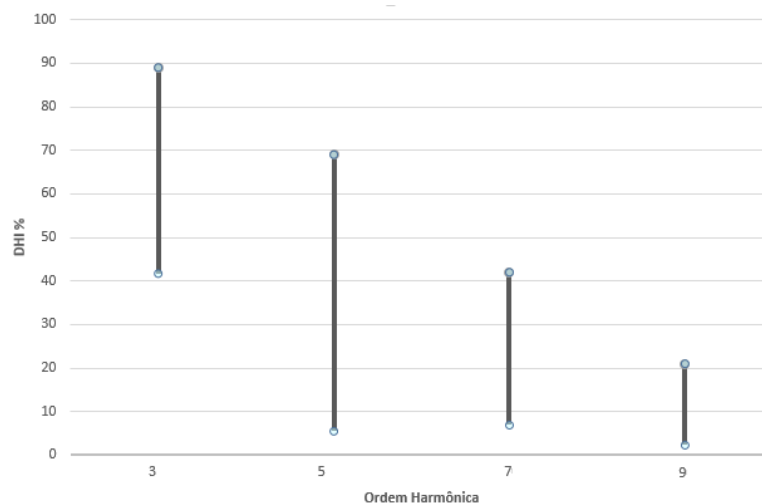
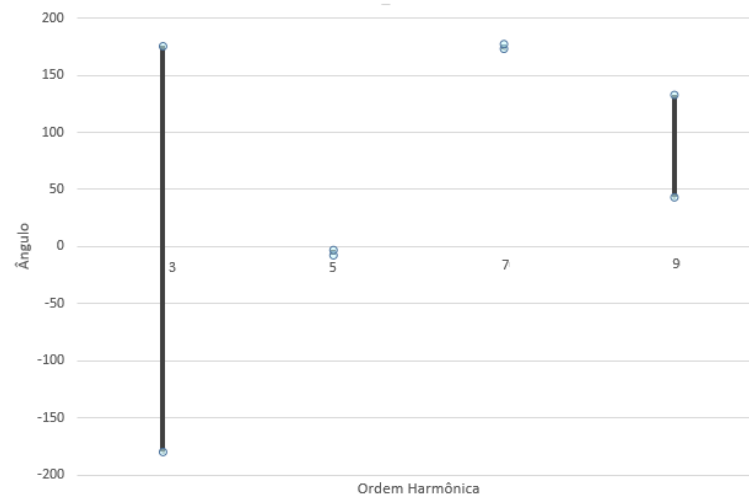
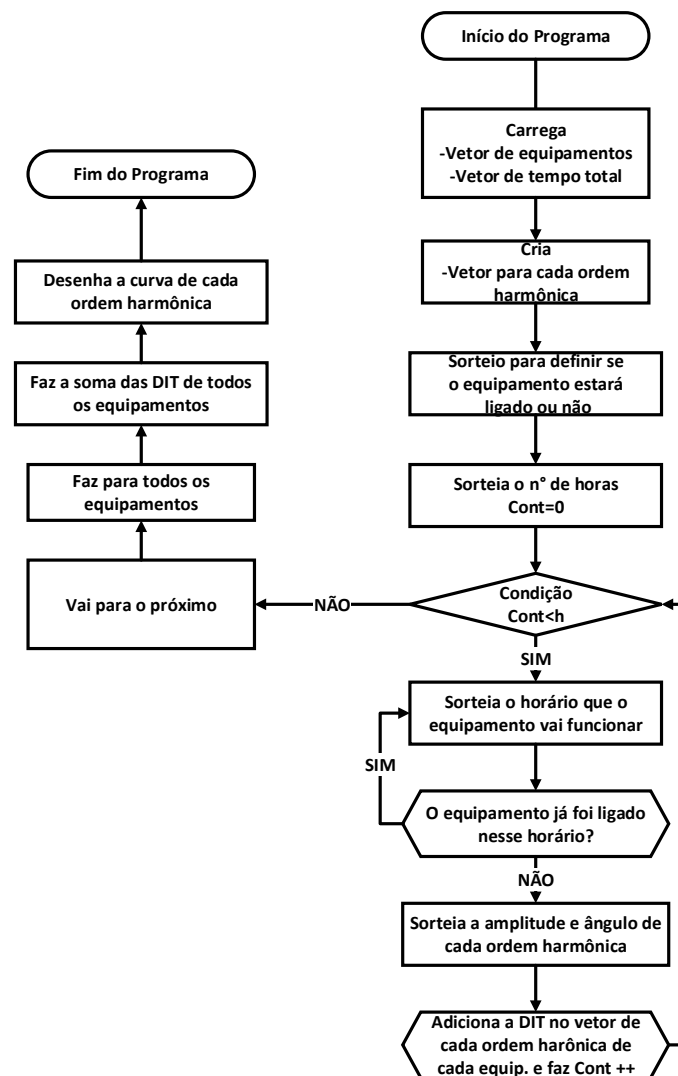


Figura 11 – Intervalo do ângulo da televisão



A Figura 12 apresenta o fluxograma da simulação com os harmônicos, nele existem algumas diferenças das etapas do algoritmo anterior, contudo a criação das curvas harmônicas, acontece simultaneamente com a criação da curva de carga.

Figura 12 – Fluxograma do algoritmo com harmônicas



Fonte: Adaptado de (SANTOS et al., 2012)

4 Resultados

4.1 Resultados da Medição

Neste capítulo é apresentada uma descrição dos harmônicos produzidos em vinte e três residências vistas no mapa da Figura 13, todas localizadas na cidade de Joao Monlevade - MG.

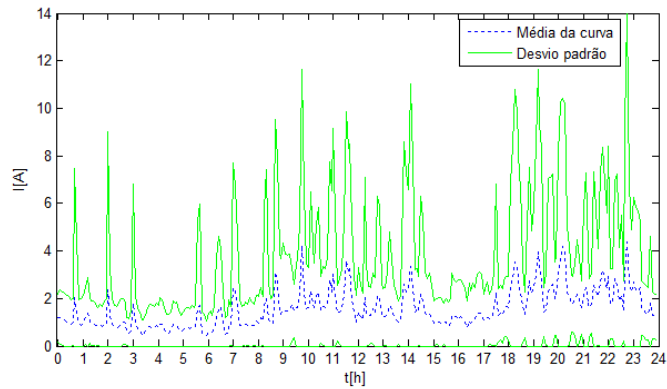
Figura 13 – Localização das residências medidas



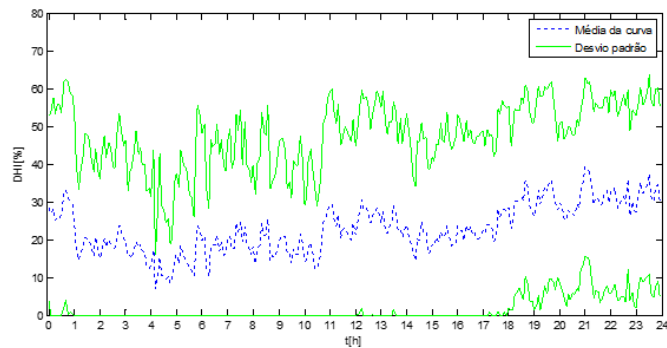
Os resultados das medições, contemplaram diversos consumidores (veja Tabela em anexo 2), com variações nos níveis de harmônicos de corrente no decorrer do dia, devido ao hábito de utilização de cada morador. Mesmo a carga não sendo a mesma nas residências, e por haver mais de um tipo de faixa de consumo, com predominância do tipo 2 (veja Tabela 6), pode-se verificar que a curva média que caracteriza todas as residências expõe uma faixa de ocorrência do 3º harmônico entre 10% e 38%, do 5º harmônico entre 6% e 21%, e o 7º harmônico entre 4% e 16% como visto na Figura 14.

Na Figura 14 ainda se pode visualizar a curva média da corrente fundamental de todas as residências e o desvio padrão dos 3º, 5º, 7º harmônicos.

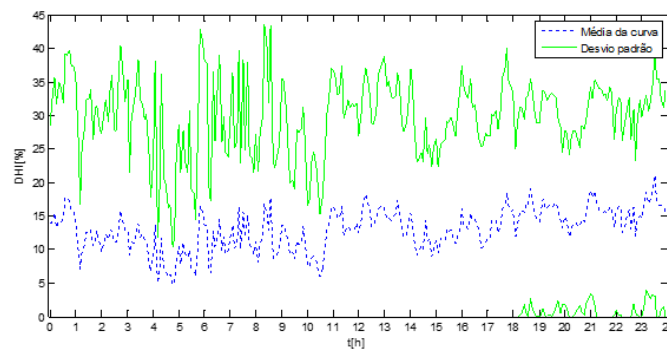
Figura 14 – Média e desvio padrão das curvas de consumo medidas



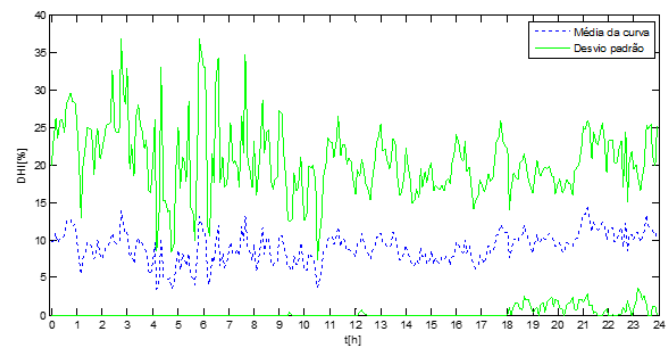
(a) Corrente fundamental



(b) 3º harmônico



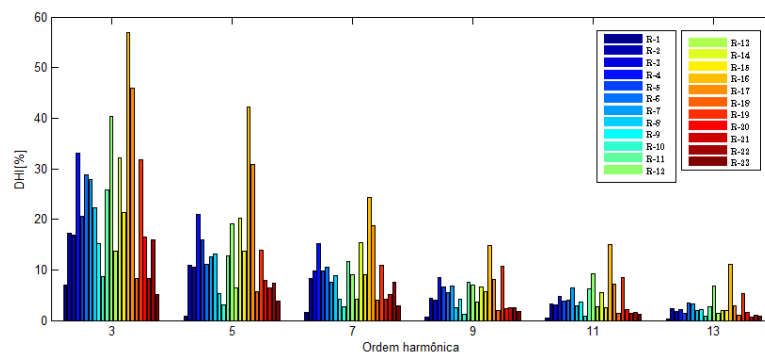
(c) 5º harmônico



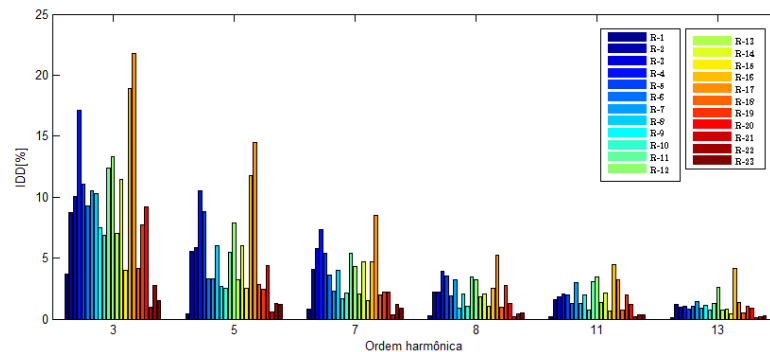
(d) 7º harmônico

Para efeitos de comparação a Figura 15 apresenta os valores médios das harmônicas de ordem ímpar que foram coletados, são apresentados na forma de barras e cada barra representa uma residência, mostra-se todas as medições para cada ordem harmônica. Os níveis de distorção de corrente também podem ser caracterizados por um valor de DHT como visto na Figura 15a, mas como dito em (WANG et al., 2017) pode ser enganador quando a corrente de carga fundamental é baixa. Para evitar tal ambiguidade, foi utilizado o índice IDD na Figura 15b. É visível que quando se usa o índice IDD os valores harmônicos diminuem, e nos dois índices se verifica que as correntes harmônicas de 3°, 5° e 7° ordem tem valores mais elevados, por isso são mais significativas, os outros harmônicos reduzem rapidamente com o aumento da ordem harmônica.

Figura 15 – Comparação do DHI e IDD das curvas



(a) DHI das curvas



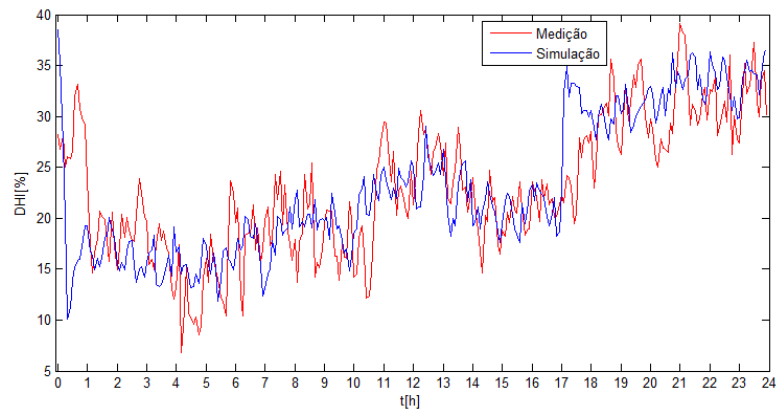
(b) IDD das curvas

4.2 Comparação da Medição com a Simulação

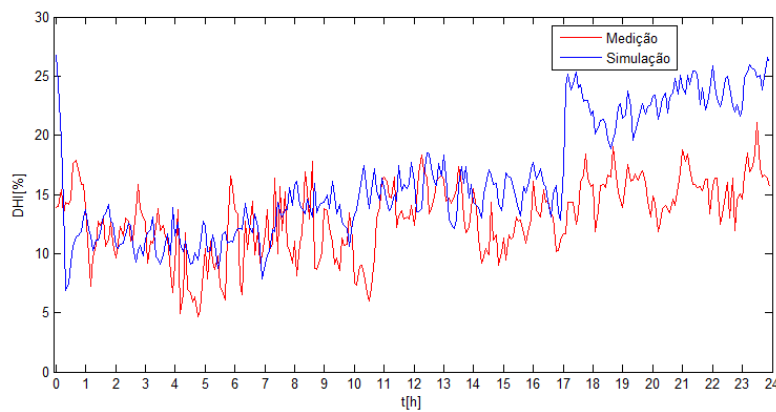
No algoritmo implementado para simulação de curvas de harmônicas realizaram-se 100 simulações, e delas calculou-se a média resultando em somente uma curva diária para o harmônico de 3° ordem. Na Figura 16a, juntamente com a curva de simulação do 3° harmônico inseriu-se a média da curva diária do 3° harmônico das medições. Pode-se visualizar uma certa correlação nas curvas obtidas. Ambas curvas apresentam comportamento crescente ou decrescente, especialmente no período da tarde e da noite

(entre as 12:00 e as 24:00 horas). Foi realizado o mesmo procedimento para os harmônicos de 5° ordem na Figura 16b e de 7° ordem na Figura 16c. Neste caso, as curvas simuladas não apresentam correlação evidente com as medições. Apenas pode-se ilustrar que as harmônicas simuladas apresentam amplitude compatível com os valores medidos.

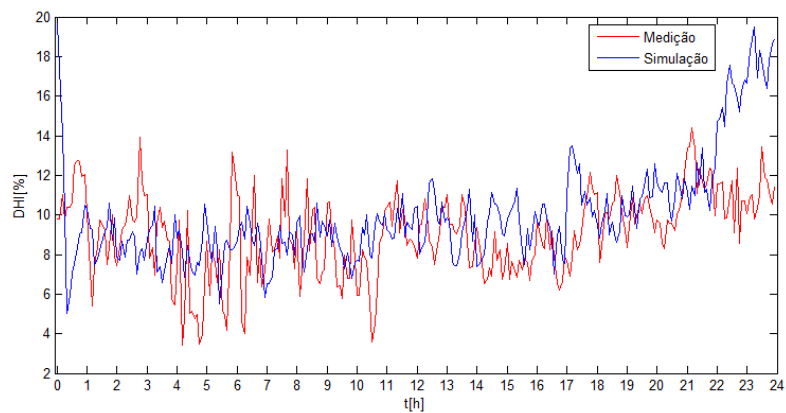
Figura 16 – Comparação da curva média da simulação com a curva média da medição



(a) 3° harmônico



(b) 5° harmônico



(c) 7° harmônico

4.3 Observações pontuais de alguns consumidores

Foram selecionadas três residências, para explicar detalhadamente o perfil de consumo de cada um e exemplificar o conteúdo harmônico que cada um destes produz, suas principais características são vistas na Tabela 9, as características das outras residências estão no anexo 2.

Tabela 9 – Características das residências 5,20,21

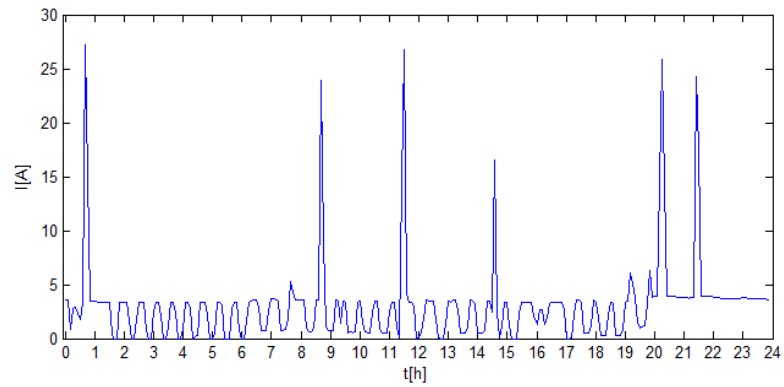
Residência	Moradores	Faixa de Consumo	Rede	Iluminação (Predominância)
5	4	2 ^a	Monofásica	Fluorescente
20	4	2	Bifásica	Fluorescente
21	3	2	Bifásica	Fluorescente

^a Faixa 2: 100-200kWh

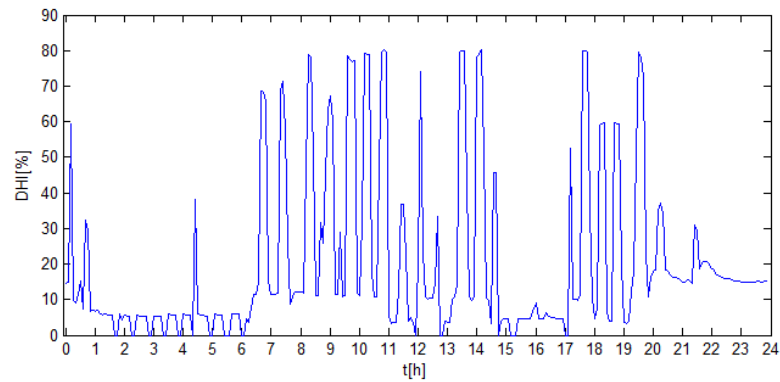
Foi escolhida a residência 5, com as características vistas na Tabela do anexo 2. Os picos que ocorrem na Figura da corrente eficaz são de utilização do chuveiro elétrico (às 08:37, 11:27, 14:32, 20:12 e 21:22), confirmado no formulário (visto no anexo 1) entregue, nesses horários fica mais claro a correlação inversa entre a corrente eficaz e a distorção da corrente mencionada em (PIRES, 2006), pois quanto maior a corrente eficaz menor é a distorção da corrente naquele horário.

No início da manhã, aproximadamente as 06:00 é ligada a televisão, que pode ser confirmado na Figura 17b que mostra o 3^o harmônico, onde o nível do DHI aumenta nesse horário. Outro momento que a televisão é ligada é no horário de 17:00 e pouco depois as 19:00 em conjunto é ligado notebook, este fato é confirmado pela Figura 17a da corrente eficaz, com o aumento da corrente. Em todo gráfico da Figura 17a, percebe-se o ciclo da geladeira, mais especificamente no horário da madrugada de 01:00 até 06:00 sendo visto também na Figura 17b. A partir das 20:00, a residência apresenta um valor de DHI de corrente um pouco mais alto, isto pode ser explicado pelo maior número de lâmpadas ligadas durante a noite.

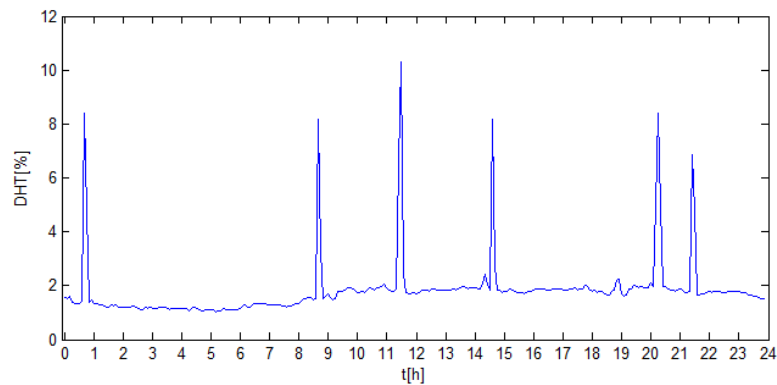
Figura 17 – Espectro da residência 5



(a) Corrente Eficaz



(b) 3º harmônico

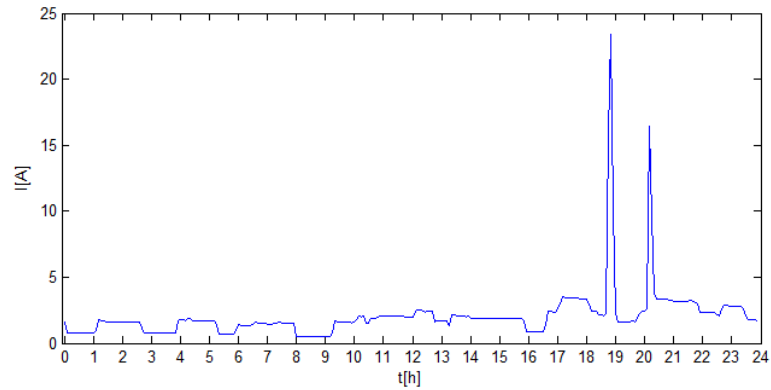


(c) DHT da Tensão

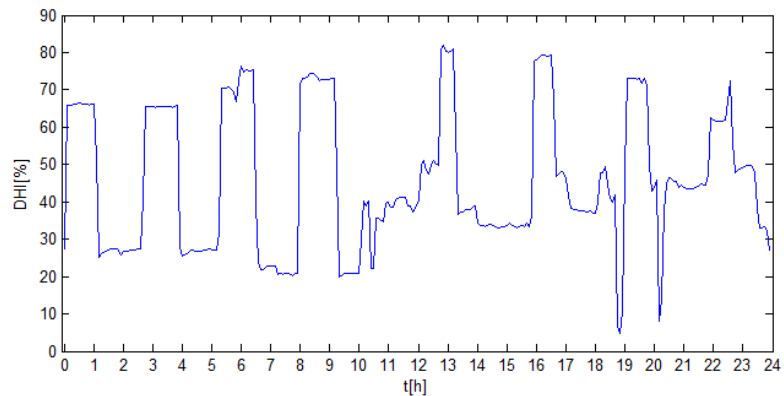
A residência 21, tem características vista na Tabela do anexo 2. Em pesquisa realizada constam três moradores. Como na residência anterior, é visível o ciclo de funcionamento da geladeira, principalmente no horário da madrugada. No período de 00:00 as 09:00 da manhã, onde normalmente funciona somente a geladeira. Também se observou que 2 roteadores de internet e 2 lâmpadas fluorescentes permanecem ligados o tempo todo, por esse motivo a corrente eficaz e seu 3º harmônico não vão a 0. Os picos de corrente da Figura 18a na parte da corrente eficaz representam os chuveiros nos horários 18:45

e 20:05 respectivamente, novamente se constata a correlação inversa da corrente eficaz e a distorção de corrente dito anteriormente. A televisão é ligada no horário de 19:00 e juntamente utilizou-se o ventilador por algum tempo. A partir das 20:00, a residência apresenta um valor de DHI de corrente e DHT de tensão um pouco mais alto, isto pode ser explicado pelo fato de ter um número maior de lâmpadas ligadas durante a noite.

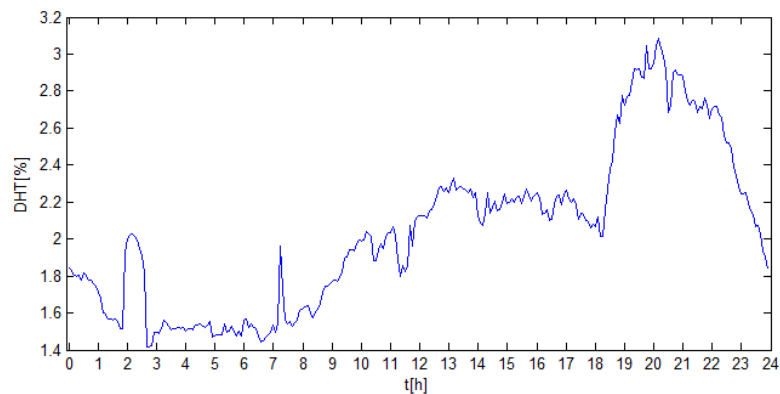
Figura 18 – Espectro da residência 21



(a) Corrente eficaz



(b) 3º harmônico

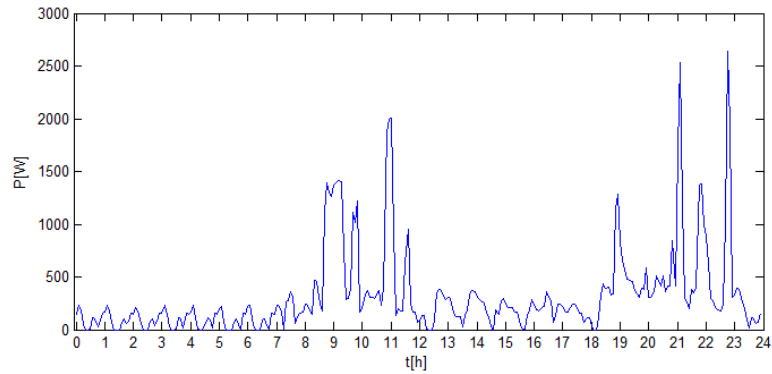


(c) DHT da tensão

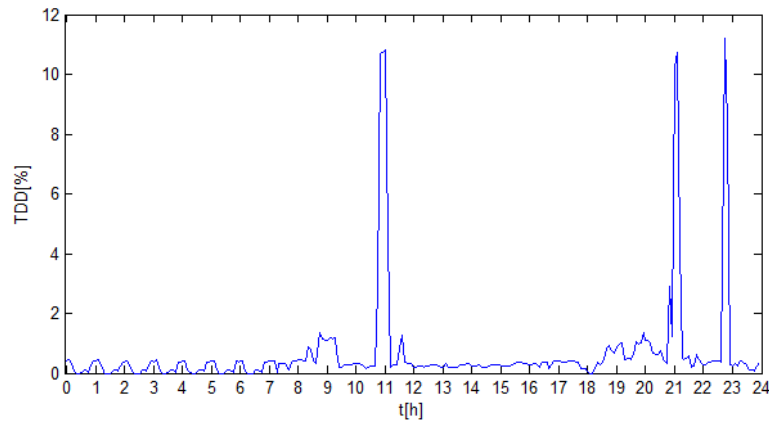
Na Figura 19, que mostra os gráficos da residência número 20, é perceptível que as curvas de potência ativa e TDD apresentam alguma correlação, especialmente durante a

noite e a madrugada, parecido com o visto em (WANG et al., 2017). Já na Figura 20 são apresentados os harmônicos ímpares medidos na residência 20, nesta Figura é possível ver que os harmônicos de 3° e 5° ordem são dominantes, todos parecem seguir o mesmo formato e quanto maior a ordem, menor o valor dos mesmos.

Figura 19 – Comparação da potência ativa e DHT da residência 20

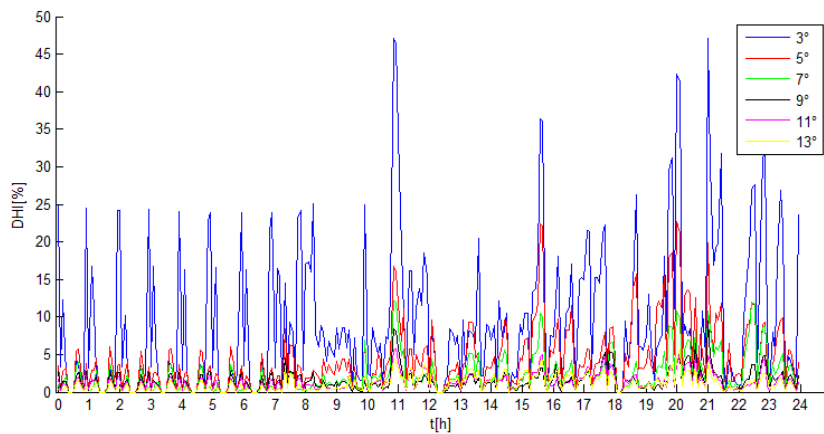


(a) Potência



(b) TDD

Figura 20 – Ordem harmônica da residência 20



5 Conclusão

Este trabalho apresenta algumas características da corrente harmônica em sistemas residenciais com base em extensos dados da medição de campo, obtendo novos resultados e também comparando com os resultados vistos nos trabalhos correlatos. Foi proposto um algoritmo para simular curvas médias para a corrente fundamental e para as correntes harmônicas residenciais. Pode-se concluir que as curvas de distorção individual harmônica simuladas não apresentam correlação evidente com as medições. Entretanto estas curvas apresentam amplitude compatível com os valores medidos em campo. Das curvas construídas, existe uma curva média que caracteriza todas as residências e expõe uma faixa de maior manifestação para o 3°, 5° e 7° harmônico. Pode-se destacar outros dois importantes fatos:

- Com a análise dos dados obtidos nas medições, observou-se que em todas as residências, foi detectado uma distorção harmônica de corrente com valores elevados, destacando-se as harmônicas ímpares de 3°, 5° e 7° ordem.
- Por falta de existir uma regulamentação adequada no setor brasileiro se utilizou a norma (IEEE-519, 1993) para avaliar a distorção harmônica na tensão e corrente das medições. A distorção da tensão foi violada poucas vezes, olhando individualmente. Já a distorção da corrente não foi adequada, ocorrendo muitas violações da norma, principalmente para os harmônicos de ordem 3 e 5.

As cargas residenciais, embora de valores de distorção harmônica com amplitude baixa individualmente, podem coletivamente injetar correntes harmônicas de valores altos. Em resumo as residências são uma fonte significativa de distorções nos sistemas de energia. Há uma necessidade de os órgãos brasileiros darem atenção e estabelecerem limites para a produção de harmônicos, para assim melhorar a qualidade da energia no sistema inteiro.

6 Propostas de futuros trabalhos

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se:

- analisar a relação entre o nível de distorção harmônica e o tipo de aparelhos presente nas residências (ex: impacto dos chuveiros com controle eletrônico de temperatura);
- analisar a variação do ângulo de fase das harmônicas em consumidores residenciais;
- extensão da metodologia para consumidores residenciais dentro de outras faixas de consumo;
- extensão da metodologia apresentada para consumidores comerciais e industriais.

Anexo 2

Tabela 10 – Características das residências

Residência	Moradores	Faixa de Consumo ^a	Rede	Iluminação (Predominância)
1	2	2	Monofásica	Incandescente
2	2	1	Monofásica	Incandescente
3	4	2	Monofásica	Fluorescente
4	3	3	Monofásica	Fluorescente
5	4	2	Monofásica	Fluorescente
6	6	2	Monofásica	Fluorescente
7	2	1	Monofásica	Fluorescente
8	3	2	Monofásica	Fluorescente
9	1	1	Monofásica	Fluorescente
10	3	3	Monofásica	Fluorescente
11	3	2	Bifásica	Fluorescente
12	2	2	Bifásica	Fluorescente
13	4	2	Bifásica	Fluorescente
14	3	2	Bifásica	Fluorescente
15	3	2	Bifásica	Fluorescente
16	3	3	Bifásica	Fluorescente
17	1	1	Bifásica	Fluorescente
18	3	2	Bifásica	Fluorescente
19	1	2	Bifásica	Fluorescente
20	4	2	Bifásica	Fluorescente
21	3	2	Bifásica	Fluorescente
22	5	2	Bifásica	Incandescente
23	2	2	Bifásica	Fluorescente

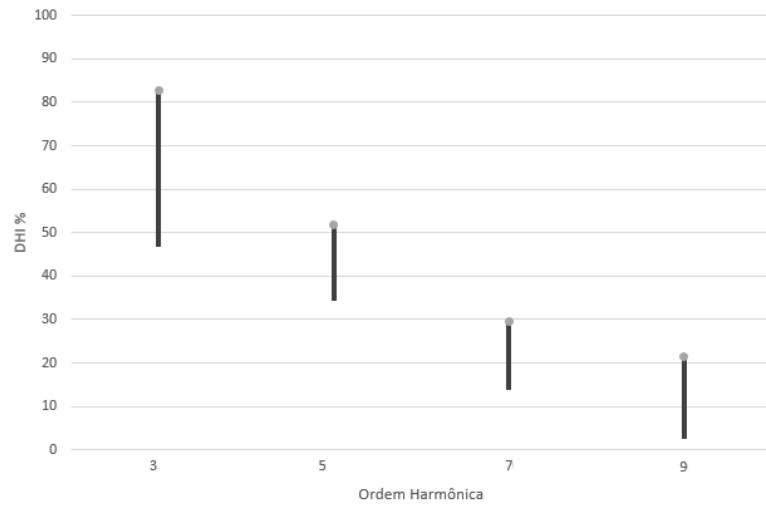
^a Faixa 1: 0-100kWh

Faixa 2: 100-200kWh

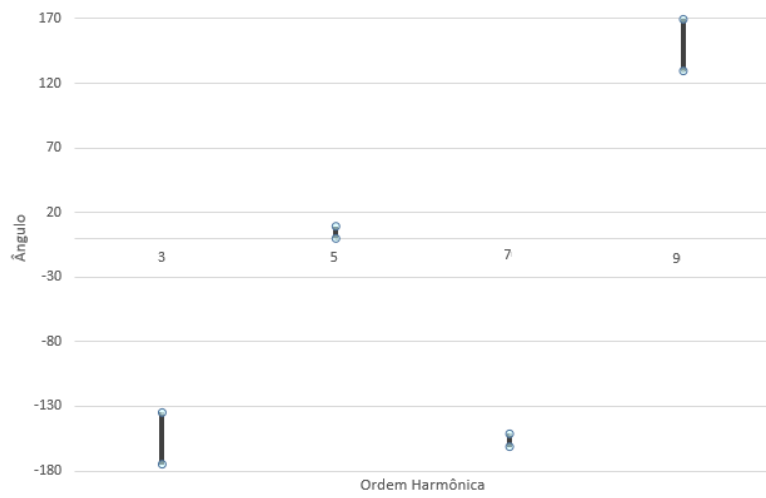
Faixa 3: 200-300kWh

Anexo 3

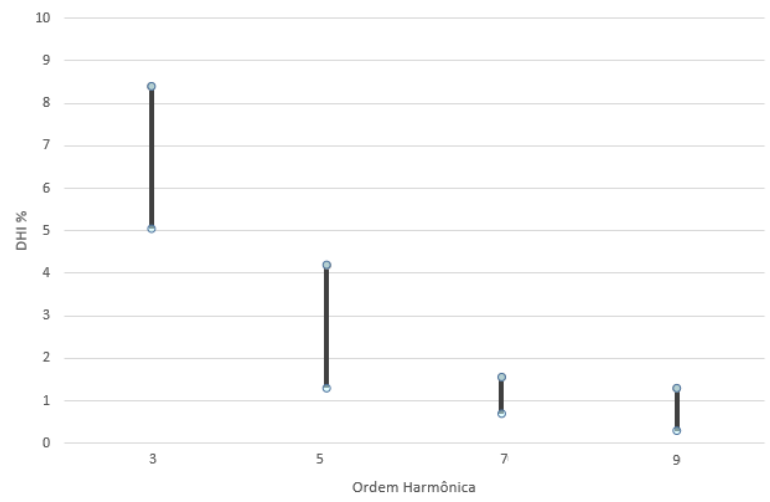
(a) Intervalo do DHI da computador



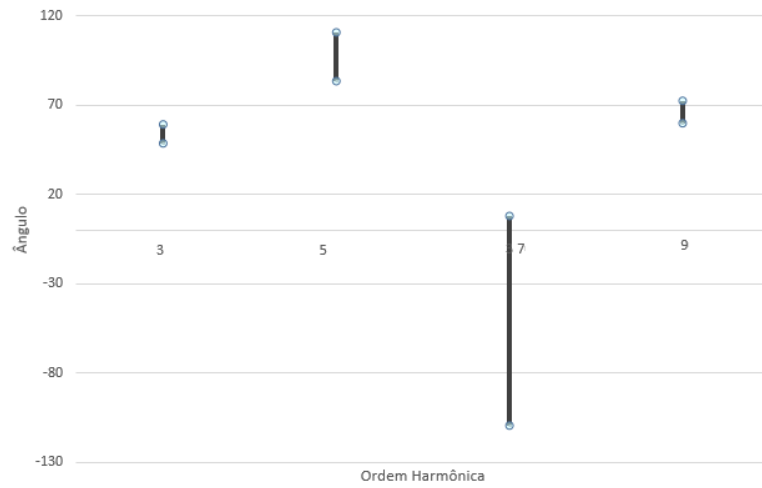
(b) Intervalo do ângulo da computador



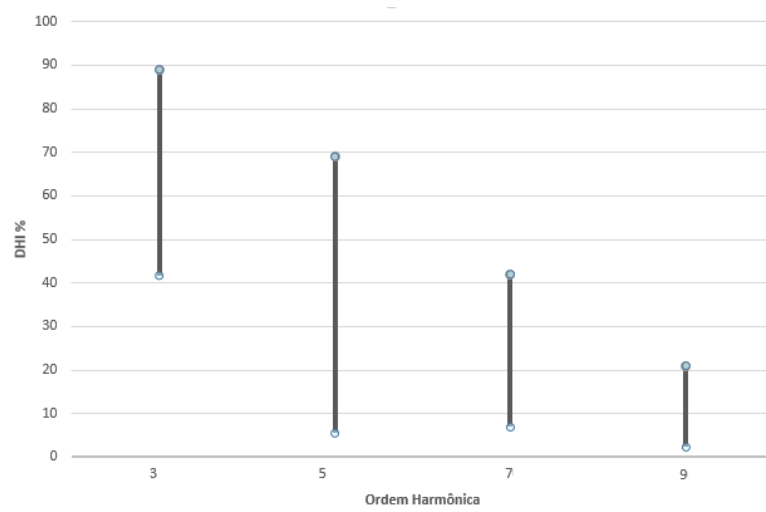
(a) Intervalo do DHI da geladeira



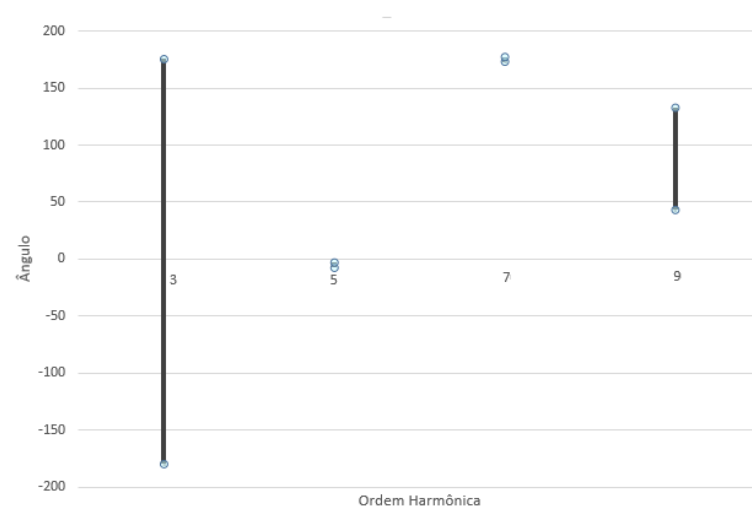
(b) Intervalo do ângulo da geladeira



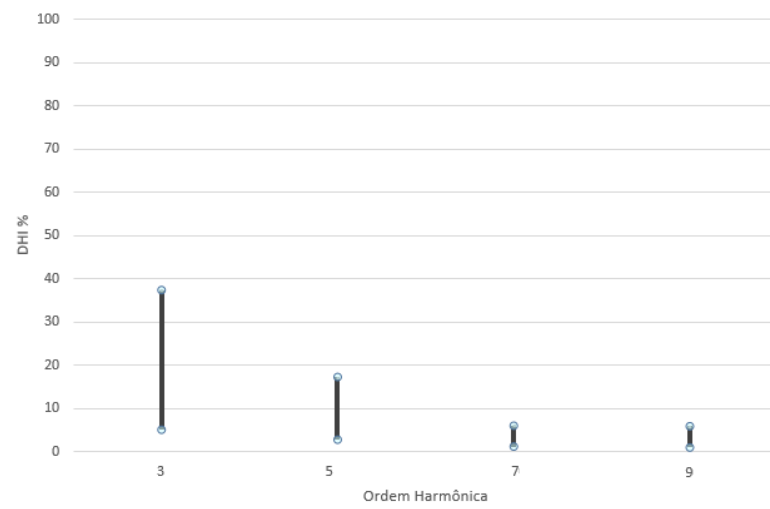
(a) Intervalo do DHI da televisão



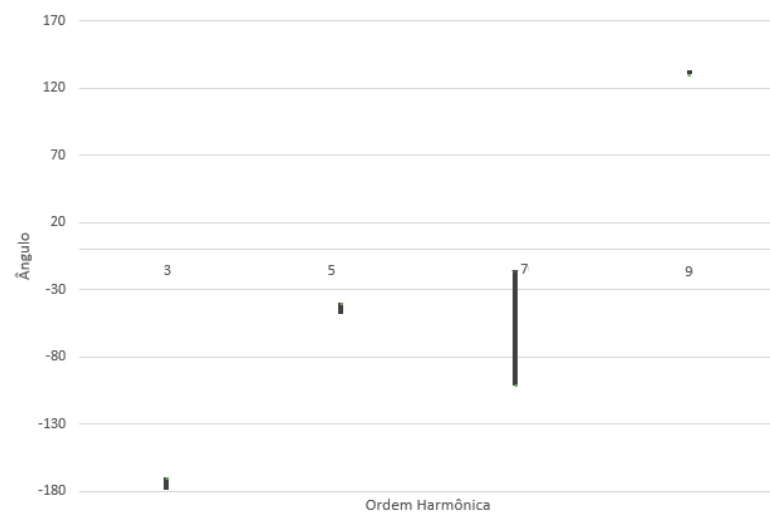
(b) Intervalo do ângulo da televisão



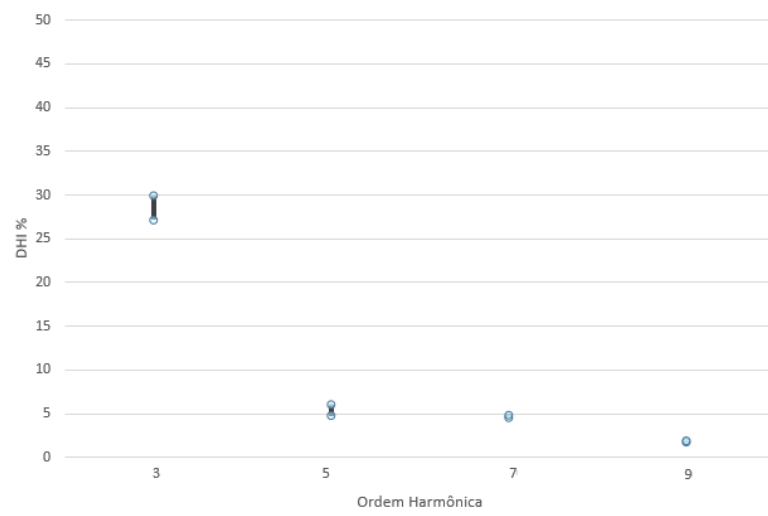
(a) Intervalo do DHI da aparelho de som



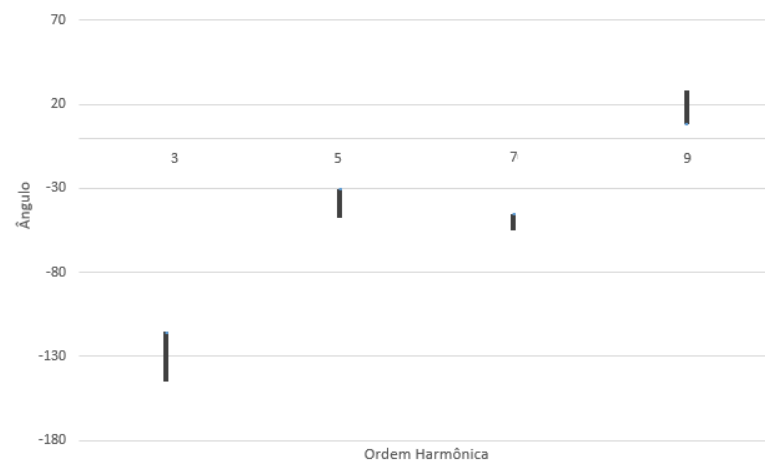
(b) Intervalo do ângulo da aparelho de som



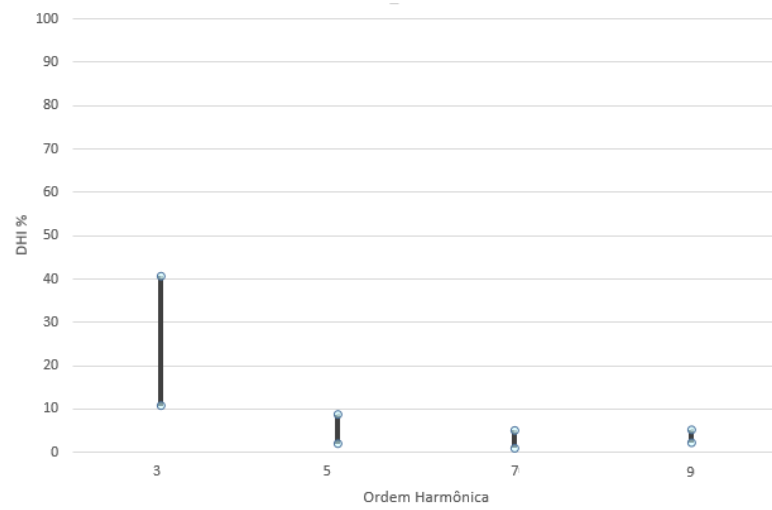
(a) Intervalo do DHI da micro-ondas



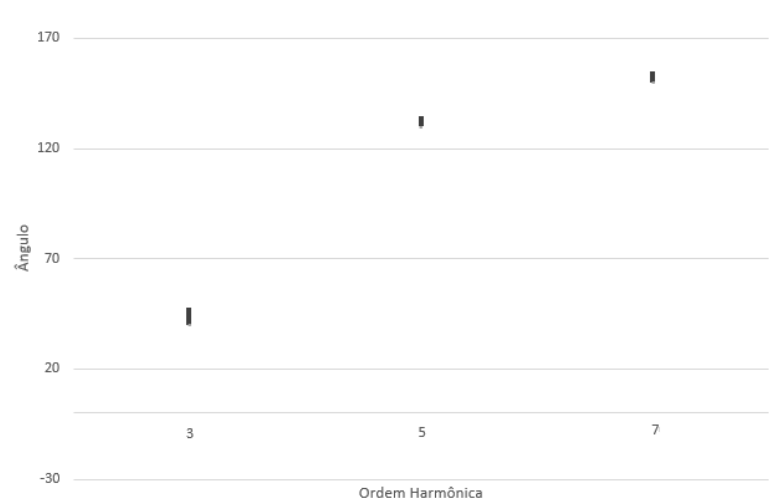
(b) Intervalo do ângulo da micro-ondas



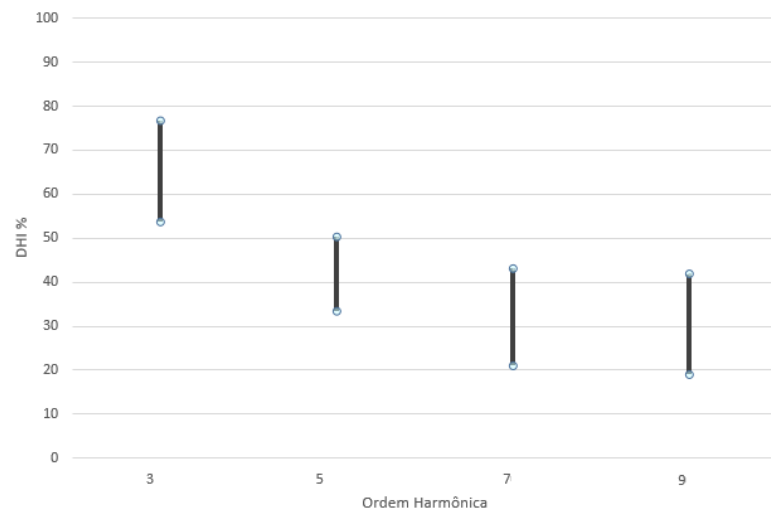
(a) Intervalo do DHI da máquina de lavar



(b) Intervalo do ângulo da máquina de lavar



(a) Intervalo do DHI da lâmpada



(b) Intervalo do ângulo da lâmpada



Referências

- ANEEL, P. d. D. d. E. Elétrica no sistema elétrico nacional—prodist: Módulo 8-qualidade de energia elétrica. *ANEEL Resolução Normativa*, v. 6, p. 75, 2015.
- ARRILLAGA, J.; WATSON, N. R. *Power system harmonics*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2004.
- BAGHZOUZ, Y. et al. Time-varying harmonics: Part ii-harmonic summation and propagation. *IEEE Power Engineering Review*, IEEE, v. 21, n. 10, p. 64–64, 2001.
- CARVALHO, F. G. *Caracterização do conteúdo harmônico em ambientes residenciais: estudo de caso*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal da Paraíba, 2015.
- CEMIG. *Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Secundária Rede de Distribuição Aérea - Edificações Individuais*. [S.l.], 2013.
- EPE. Anuário estatístico de energia elétrica 2013. *Empresa de Pesquisa Energética*, 2015.
- HROMADA, B. *Compensação do fator de potência em unidades residenciais e seus impactos na rede elétrica*. Bacharel em Engenharia Elétrica, 2011.
- IBJE. *Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios*. Brasil: IBJE, 2012.
- IEEE-1459. *IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions*. [S.l.], 2010. 1-50 p.
- IEEE-519. *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*. [S.l.], 1993. 1-112 p.
- LEÃO, R.; SAMPAIO, R.; ANTUNES, F. *Harmônicos em Sistemas elétricos*. 1 edição. ed. Brasil: Elsevier, 2013. ISBN 978-85-352-7439-4.
- MANSOOR, A. et al. An investigation of harmonics attenuation and diversity among distributed single-phase power electronic loads. In: IEEE. *Transmission and Distribution Conference, 1994., Proceedings of the 1994 IEEE Power Engineering Society*. [S.l.], 1994. p. 110–116.
- MINIPA. *(Analisador de Energia ET-5061C)*. 2017. Disponível em: <<http://www.minipa.com.br/categoria/3/linha-industrial/medidores-de-potencia/analísadores-de-energia/283-et-5061c>>.
- PIRES, I. A. *Caracterização de harmônicos causados por equipamentos eletro-eletrônicos residenciais e comerciais no sistema de distribuição de energia elétrica*. Dissertação (Mestrado) — UFMG, 2006.
- PROCEL. *(Pesquisa de Posse e Hábitos)*. 2017.
- SANTOS, K. et al. Desenvolvimento de um algoritmo para determinar curvas de carga a partir da posse e dos hábitos de consumo para consumidores: Residenciais, comerciais e industriais. *SBSE-Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos Goiânia*, 2012.

TOSTES, M. d. L. *Avaliação dos impactos causados pela geração de harmônicos na rede de distribuição em Consumidores em baixa tensão*. Tese (Doutorado) — Tese de Doutorado, PPGEE/CT/UFGA, Belém/PA, 2003.

WANG, Y. et al. Characteristics of harmonic distortions in residential distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 32, n. 3, p. 1495–1504, June 2017.