



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

LUCAS CORDEIRO HERCULANO

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DO CONTEÚDO
HARMÔNICO DE UMA TOMADA INTELIGENTE NO CONTEXTO DA INTERNET
DAS COISAS**

FORTALEZA

2017

LUCAS CORDEIRO HERCULANO

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DO CONTEÚDO
HARMÔNICO DE UMA TOMADA INTELIGENTE NO CONTEXTO DA INTERNET
DAS COISAS

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de graduado em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Henrique Silva Colado Barreto.

FORTALEZA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

H464d Herculano, Lucas Cordeiro.

Desenvolvimento de um sistema de medição do conteúdo harmônico de uma tomada inteligente no contexto da internet das coisas / Lucas Cordeiro Herculano. – 2017.
47 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2017.

Orientação: Prof. Dr. Luiz Henrique Silva Colado Barreto.

1. Tomada inteligente. 2. Internet das coisas. 3. Distorções harmônicas. I. Título.

CDD 621.3

LUCAS CORDEIRO HERCULANO

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DO CONTEÚDO
HARMÔNICO DE UMA TOMADA INTELIGENTE NO CONTEXTO DA INTERNET
DAS COISAS

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de graduado em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: 29/11/2017.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luiz Henrique Silva Colado Barreto (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Ícaro Jonas Batista
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos próximos passos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que está em mim e em todos ao meu redor.

Aos meus pais, Márcia Cipriano e Raimundo Cordeiro que sempre me estimularam a gostar de aprender, a ser curioso e a nunca estar satisfeito com o tanto que eu sei do mundo. Sem vocês nenhum passo da minha caminhada até aqui seria possível.

Ao meu irmão Levi Maia, que me faz ver o mundo com os olhos sábios de uma criança e à sua mãe Ana Alacoque por todo o apoio que me dá sempre.

A minha namorada Vanessa Carneiro, companheira nessa caminhada de TCC, por todo o amor, carinho e apoio em todas as áreas da minha vida.

A minha amiga Stefany Monteiro, que também esteve caminhando junto comigo no processo do TCC, por ser tão organizada e prestativa e pelos empurrões que me deu no meio do caminho.

Aos meus amigos Morgana Feijão, Tayná Fiúza e José Amazonílio, por estarem a meu lado há tanto tempo, sempre me apoiando.

A minha família, que está sempre torcendo pelo meu sucesso e felicidade, além de me dar carinho e apoio.

Aos meus colegas de curso, que me ajudaram em toda esta caminhada, direta ou indiretamente, em especial a Ícaro Batista, Ricardo Oliveira, Victor Ferreira, Felipe Carvalho, Andresa Sombra, Túlio Naamã, Kaio Douglas e Lívia Machado.

Aos professores da Universidade Federal do Ceará que contribuíram com a minha formação, em especial o meu orientador Prof. Dr. Luiz Henrique Barreto, ao meu tutor no PET-EE Prof. Dr. René Bascopé e aos professores Raimundo Sampaio, Paulo Praça, Ruth Leão e Natália Barroso, entre muitos outros.

À CAPES e ao Georgia Institute of Technology pela oportunidade de Graduação-sanduíche nos Estados Unidos, a qual foi essencial para a minha formação profissional e pessoal e ao Prof. PhD David Taylor pela oportunidade de pesquisa.

Aos participantes da banca examinadora Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio e Eng. Ícaro Jonas Batista pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

A todos que contribuíram para a minha formação pessoal, profissional e para o presente trabalho.

“O estudo profundo da natureza é a fonte mais fértil de descobertas matemáticas.”

Jean Baptiste Joseph Fourier

RESUMO

O presente trabalho propõe um *software plug-in* em complemento a um sistema de gerenciamento e controle de tomadas residenciais existente, no âmbito da Internet das Coisas, com o objetivo de medir e analisar o conteúdo harmônico da energia elétrica da Rede de Distribuição utilizada pelas tomadas. Com isso, pode-se avaliar a Qualidade da Energia Elétrica utilizada pelas Tomadas Inteligentes, no que diz respeito às distorções harmônicas, baseado no Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Para o desenvolvimento do *software* proposto, foi necessária a implementação de um protótipo de testes para emular uma Tomada Inteligente e de um servidor simplificado para emular o sistema de controle. Para o protótipo foi utilizado um Arduino UNO, com conexão WiFi possibilitada pelo módulo ESP8266-01 da Espressif e com leitura de corrente através do sensor ACS712 da Allegro. O servidor foi programado na linguagem Python. Com a aplicação do *software plug-in* no protótipo de testes, pode-se concluir que ele é um complemento satisfatório para o sistema de Tomadas Inteligentes original, possibilitando dar informações suficientemente precisas para o usuário sobre o conteúdo harmônico da energia elétrica que utiliza.

Palavras-chave: Tomada Inteligente. Internet das Coisas. Distorções Harmônicas.

ABSTRACT

This work proposes a plug-in software to an existing smart outlet control and management system, based on the Internet of Things paradigm, with the goal to measure and analyze the harmonic content of the electrical energy from the Distribution Network used by the outlets. With that, it is possible to evaluate the Electrical Energy Quality used by the Smart Outlets, in regards to harmonic distortions, based on Distribution Procedures established by Brazilian Electricity Regulatory Agency, ANEEL. For the development of the proposed software, it was necessary to implement a test prototype, so it could emulate one of the Smart Outlets and a simplified server to emulate the control system. For the prototype it was used an Arduino UNO, with WiFi connection provided by ESP8266-01 module from Espressif and current reading done by sensor ACS712 from Allegro. The server was programmed in Python. With the application of the plug-in software in the test prototype, it was possible to conclude that it is a satisfactory complement to the original Smart Outlet system, making it possible to give the user sufficiently precise information about the harmonic content of the electrical energy they use.

Keywords: Smart Outlet. Internet of Things. Harmonic Distortion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Decomposição de onda quadrada em harmônicas pela Série de Fourier.	18
Figura 2 – Sinal $x[n]$	19
Figura 3 – Módulo das componentes harmônicas do sinal $x[n]$	20
Figura 4 – Dez primeiras harmônicas de $x[n]$ mostradas no mesmo gráfico.	20
Figura 5 – Sinal de tensão ideal.	21
Figura 6 – Smart plug NEO da marca Ankuoo.	26
Figura 7 – Esquemático do protótipo de testes.	29
Figura 8 – Relação entre tensão de saída e corrente medida pelo ACS712	31
Figura 9 – Conversões desde a corrente medida à saída do CAD.	32
Figura 10 – Fluxograma do software plug-in.	34
Figura 11 – Protótipo de testes para desenvolvimento do plug-in.	36
Figura 12 – Detalhe do Arduino conectado a uma protoboard.	36
Figura 13 – Forma de onda de tensão (V) no tempo (s) para um ciclo.	38
Figura 14 – Forma de onda de corrente (A) no tempo (s) para um ciclo.	39
Figura 15 – Componentes harmônicas da forma de onda de tensão (V) de 0 a 40.	39
Figura 16 – Componentes harmônicas da forma de onda de tensão (V) de 2 a 40.	40
Figura 17 – Componentes harmônicas pares da forma de onda de tensão (V).	40
Figura 18 – Componentes harmônicas ímpares da forma de onda de tensão (V).	40
Figura 19 – Componentes harmônicas múltiplas de 3 da forma de onda de tensão (V).	41
Figura 20 – Comparação entre tensão medida (V) e tensão reconstituída (V) no tempo (ms).	42
Figura 21 – Componentes harmônicas 2, 3, 4 e 5 da forma de onda de tensão (V).	41
Figura 22 – Excerto do programa servidor, exibindo o resultado da análise.	43
Figura 23 – DTT% para cada um dos 1008 ciclos analisados.	44
Figura 24 – DTTp% para cada um dos 1008 ciclos analisados.	44
Figura 25 – DTTi% para cada um dos 1008 ciclos analisados.	44
Figura 26 – DTT3% para cada um dos 1008 ciclos analisados.	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites para os indicadores de distorção harmônica.	22
Tabela 2 – Conversões desde a corrente medida à saída do CAD.	31
Tabela 3 – Conversões desde a tensão medida indiretamente à saída do CAD.	37
Tabela 4 – Taxas de Distorção Harmônica para o ciclo em estudo.	42
Tabela 5 – Análise estatística das Taxas de Distorção Harmônica coletadas em 1008 ciclos.	43

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Contextualização	13
1.2 Justificativa.....	14
1.3 Objetivos.....	15
1.3.1 Objetivo geral	15
1.3.2 Objetivos específicos.....	15
1.4 Estrutura do Trabalho	15
2 HARMÔNICAS E QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA	17
2.1 Série de Fourier para Sinais Periódicos Contínuos	17
2.2 Série de Fourier para Sinais Periódicos Discretos.....	18
2.3 Energia Elétrica e Harmônicas	20
2.4 Prejuízos Causados pelas Distorções Harmônicas	23
3 AUTOMAÇÃO RESIDENCIAL E A TOMADA INTELIGENTE	25
3.1 Automação Residencial	25
3.2 Internet das Coisas na Automação Residencial	25
3.3 A Tomada Inteligente.....	26
4 MEDIÇÃO DE CONTEÚDO HARMÔNICO NA TOMADA INTELIGENTE.....	29
4.1 O Protótipo de Teste	29
4.2 O Programa Servidor.....	31
4.3 O <i>Software Plug-in</i>	32
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
5.1 Montagem do Protótipo de Testes	36
5.2 Obtenção da Resistência da Carga.....	37
5.3 Formas de Ondas Obtidas em um Ciclo	37
5.4 Indicadores de Conteúdo Harmônico para 1008 Ciclos	42
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
6.1 Conclusão	45
6.2 Trabalhos Futuros	47
REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Vivemos o início da Revolução Tecnológica da Internet das Coisas ou *Internet of Things* (IoT), que vem transformando a forma com que interagimos com o mundo ao nosso redor. Este novo paradigma tem como objetivo conectar as “coisas” utilizadas no dia-a-dia através da Internet, como aparelhos eletrodomésticos, *smartphones*, máquinas industriais, meios de transporte etc. É objetivo da IoT também torná-las autônomas e inteligentes, “capazes de coletar e processar informações do ambiente ou das redes às quais estão conectadas.” (OLIVEIRA, 2017, p. 17).

Ainda de acordo com Oliveira (2017), a Internet das Coisas é cada vez mais factível e viável para aplicações como monitoramento e atuação em diversos tipos de cenários e ambientes, desde automação residencial e comercial, passando por sensoriamento ambiental, redes veiculares e trânsito.

Na área de Automação Residencial, a IoT encontra uma grande oportunidade de aplicação. O objetivo da automação utilizando IoT é conectar objetos como tomadas, lâmpadas, geladeira, cortinas, TVs e smartphones de forma que o usuário possa controlar toda a sua casa da forma mais cômoda possível, além de ter muitas atividades sendo realizadas de forma automática, inteligente e eficiente.

No presente trabalho, o objeto de estudo é um dos componentes da Automação Residencial: a Tomada Inteligente. Uma tomada capaz de ser ligada ou desligada remotamente, além de ter funções de coletas de dados sobre a energia elétrica fornecida, entre outras.

A Tomada Inteligente em estudo foi projetada e desenvolvida por Batista (2016) em seu Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Ceará, e tem como objetivo:

Auxiliar o consumidor mostrando de forma fácil e legível dados sobre o consumo de energia elétrica de um equipamento conectado a uma tomada residencial. [...] A Tomada Inteligente, quando conectada, pode ser atuada em qualquer região do mundo de forma a ligar ou desligar o fornecimento de energia elétrica ao equipamento conectado. (BATISTA, 2016, p. 11).

Um dos objetivos da automação das tomadas de uma residência deve ser avaliar a qualidade da energia que elas fornecem, de forma a aumentar a segurança no uso da tomada, assim como aumentar a qualidade e eficiência da energia fornecida.

Dentro desse contexto, identificou-se a necessidade de avaliar a qualidade da energia elétrica sendo utilizada pelo equipamento implementado por Batista (2016), com foco em um dos distúrbios que caracterizam esta qualidade: a Taxa de Distorção Harmônica (TDH). Desta forma, provou-se necessário desenvolver um software *plug-in* que permita calcular a TDH, bem como verificar se ela está dentro dos padrões normativos estabelecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

1.2 Justificativa

Para o total aproveitamento da potência fornecida pelas distribuidoras de energia elétrica seria necessário que a tensão recebida fosse uma senoide perfeita, com frequência de 60 Hz (padrão do Brasil). Quando existem distorções nessa forma de onda, o fator de potência diminui, aumentando os reativos, trazendo também riscos para alguns tipos de equipamentos.

É impossível não haver distorções na onda de tensão fornecida pelas distribuidoras, mas é possível estabelecer normas que definam uma margem de distorção que não irá danificar nenhum equipamento, nem produzirá muito reativo. Através da decomposição dessa onda de tensão em série de Fourier, conforme será explicitado no Capítulo 2, pode-se medir e limitar a amplitude de cada harmônica, assim como a fração que as harmônicas representam da componente fundamental.

Equipamentos como motores, transformadores, cabos de alimentação, capacitores e eletrônicos num geral podem ser negativamente afetados pelo conteúdo harmônico da tensão utilizada, com efeitos como aumento da corrente e aumento da resistência, levando à elevação das perdas de potência e ao aquecimento do equipamento. Consequentemente, é essencial a regulamentação dos limites da distorção harmônica por órgãos reguladores como a ANEEL (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

Com tudo isso, percebe-se que a taxa de distorção da energia elétrica que é utilizada em uma residência é uma informação importantíssima tanto para o controle da eficiência energética, como para a segurança dos equipamentos utilizados. Com o advento da Automação Residencial, no âmbito da Internet das Coisas, torna-se possível um melhor acompanhamento por parte do consumidor da qualidade da energia que consome.

Portanto, é necessário implementar no projeto de uma Tomada Inteligente uma forma de medir as taxas de distorção harmônica que alimenta a Tomada, assim como determinar se essas taxas estão dentro do padrão normativo. Com esta informação em mãos, o consumidor

pode tomar decisões conscientes sobre o uso de energia, além da possibilidade de essas decisões serem automatizadas.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo implementar um *software plug-in* para uma aplicação de gerenciamento de tomadas elétricas residenciais no âmbito da Internet das Coisas capaz de analisar os níveis de distorção harmônica da rede elétrica estão dentro dos padrões normativos.

1.3.2 Objetivos específicos

- Apresentar o conceito de Automação Residencial no âmbito da Internet das Coisas ou *Internet of Things* (IoT).
- Apresentar as definições da ANEEL sobre os limites de distorção harmônica na distribuição de energia elétrica
- Apresentar *hardware* e *software* da Tomada Inteligente estudada
- Propor e desenvolver *plug-in* para o *software* da Tomada Inteligente
- Aplicar o *plug-in* em protótipo de teste e avaliar o desempenho
- Avaliar o conteúdo harmônico da rede de distribuição de baixa tensão medido pelo *plug-in*.

1.4 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho encontra-se dividido em seis capítulos, conforme descrito a seguir:

O capítulo 1 trata da introdução do trabalho, com a contextualização do problema, a justificativa, os objetivos geral e específicos do estudo e a estrutura do trabalho.

O capítulo 2 trata da análise de Fourier de sinais, com aplicação no cálculo das componentes harmônicas das formas de onda de tensão, além de apresentar as definições da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) sobre os limites dessas distorções na

distribuição de energia elétrica. Por fim, são exibidos alguns dos prejuízos causados pelas distorções harmônicas.

O capítulo 3 trata dos conceitos de Automação Residencial e Internet das Coisas, além de apresentar a Tomada Inteligente desenvolvida por Batista (2016).

O capítulo 4 trata do desenvolvimento de código de um *plug-in* para o *software* da Tomada Inteligente que possibilite a coleta e tratamento de dados sobre o conteúdo harmônico da energia elétrica utilizada pela Tomada.

O capítulo 5 apresenta a aplicação do *plug-in* em um protótipo de testes e a análise da performance do *plug-in*, assim como dos dados coletados.

Ao final, no capítulo 6, tem-se as Considerações Finais, seguidas das Referências.

2 HARMÔNICAS E QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

Neste capítulo analisa-se a aplicação de séries de Fourier para a análise de sinais e cálculo de suas componentes harmônicas. Mostra-se ainda que a energia elétrica utilizada pelo consumidor residencial possui conteúdo harmônico, analisando as definições normativas brasileiras sobre distorções harmônicas, definindo as taxas e indicadores, assim como os limites estabelecidos. Por fim, são expostos alguns prejuízos que as distorções harmônicas podem trazer.

2.1 Série de Fourier para Sinais Periódicos Contínuos

Conforme Lathi (2007), qualquer sinal periódico contínuo $x(t)$ é uma composição de um termo constante e o somatório infinito de senoides de frequências múltiplas à frequência fundamental f_0 , conforme equação abaixo:

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(2\pi n f_0 t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(2\pi n f_0 t)$$

Com os coeficientes calculados por:

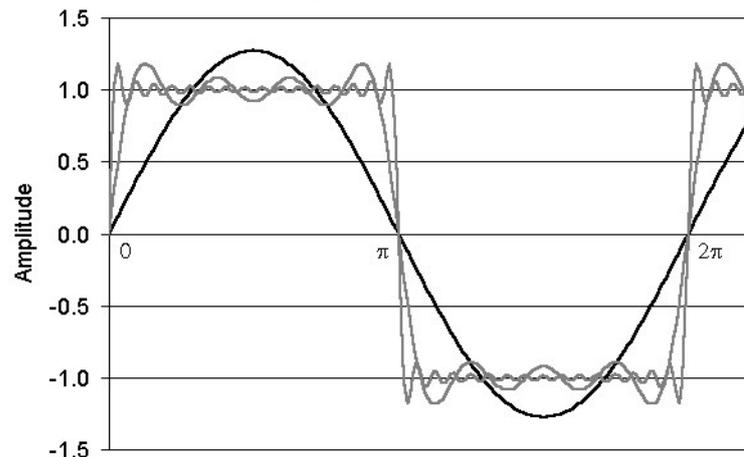
$$a_0 = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} x(t) dt$$

$$a_n = \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} x(t) \cos(2\pi n f_0 t) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} x(t) \sin(2\pi n f_0 t) dt$$

Com este método, pode-se decompor um sinal em suas componentes harmônicas, de forma a analisar a contribuição independente de cada frequência para um dado sistema. Na Figura 1 a seguir é apresentado um exemplo de como até mesmo uma onda quadrada pode ser decomposta em senoides de frequências múltiplas da frequência fundamental.

Figura 1 – Decomposição de onda quadrada em harmônicas pela Série de Fourier.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir dos coeficientes de Fourier, pode-se calcular o módulo das componentes harmônicas H_n através da relação:

$$H_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

No entanto, quando se lida com amostragem de valores de um sinal contínuo, como é o caso do presente trabalho, obtemos um sinal discreto, que deve receber um tratamento matemático diferente para a sua decomposição em componentes harmônicas, o que será exposto na próxima seção.

2.2 Série de Fourier para Sinais Periódicos Discretos

Ainda conforme Lathi (2007), quando se trata de sinais periódicos discretos como $x[n]$, devemos utilizar a Série de Fourier em Tempo Discreto (SFTD). Neste escopo, lidamos com variáveis diferentes como N_0 , número de amostras em um período, Ω_0 , a frequência discreta fundamental, e n , o tempo discreto. Para representar as frequências múltiplas da fundamental, utiliza-se o multiplicador r .

Temos as seguintes relações para a SFTD de um sinal $x[n]$:

$$\Omega_0 = \frac{2\pi}{N_0}$$

$$x[n] = A_0 + \sum_{r=1}^{\infty} C_r \cos(r\Omega_0 n) + \sum_{r=1}^{\infty} S_r \sin(r\Omega_0 n)$$

Para o cálculo dos coeficientes A_0 , C_r e S_r :

$$A_0 = \frac{1}{N_0} \sum_{n=0}^{N_0} x[n]$$

$$C_r = \frac{2}{N_0} \sum_{n=0}^{N_0} x[n] \cos(r\Omega_0 n)$$

$$S_r = \frac{2}{N_0} \sum_{n=0}^{N_0} x[n] \sin(r\Omega_0 n)$$

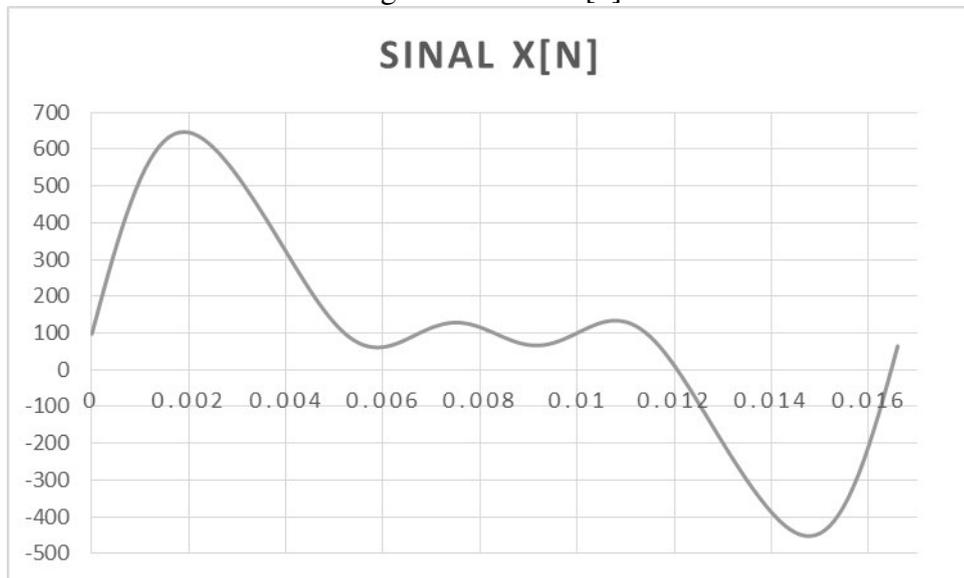
Para calcular o módulo das componentes harmônicas H_r :

$$H_0 = A_0$$

$$H_r = \sqrt{C_r^2 + S_r^2}$$

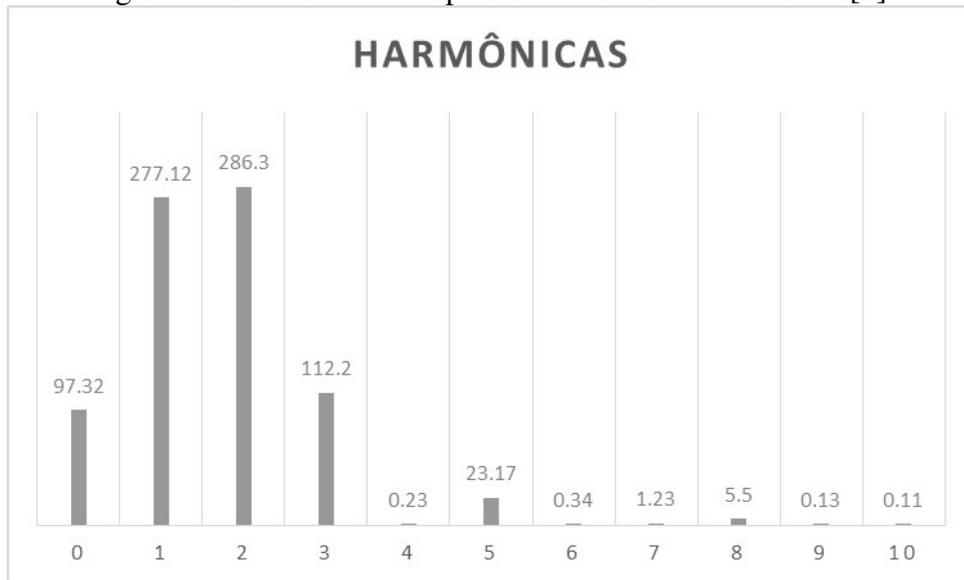
Os gráficos abaixo ilustram o processo de decompor um sinal arbitrário $x[n]$ em suas componentes harmônicas:

Figura 2 – Sinal $x[n]$.



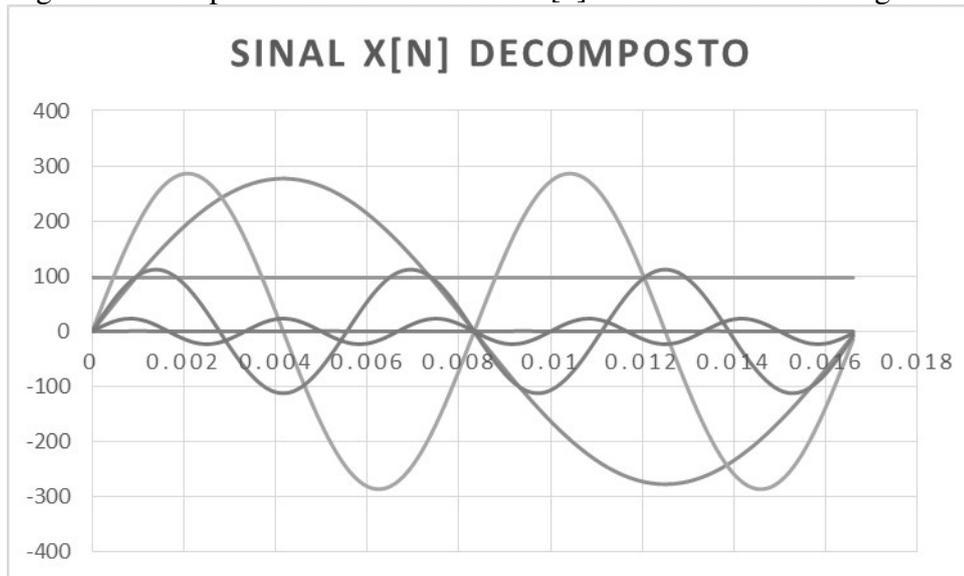
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 3 – Módulo das componentes harmônicas do sinal $x[n]$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 4 – Dez primeiras harmônicas de $x[n]$ mostradas no mesmo gráfico.



Fonte: Elaborada pelo autor.

2.3 Energia Elétrica e Harmônicas

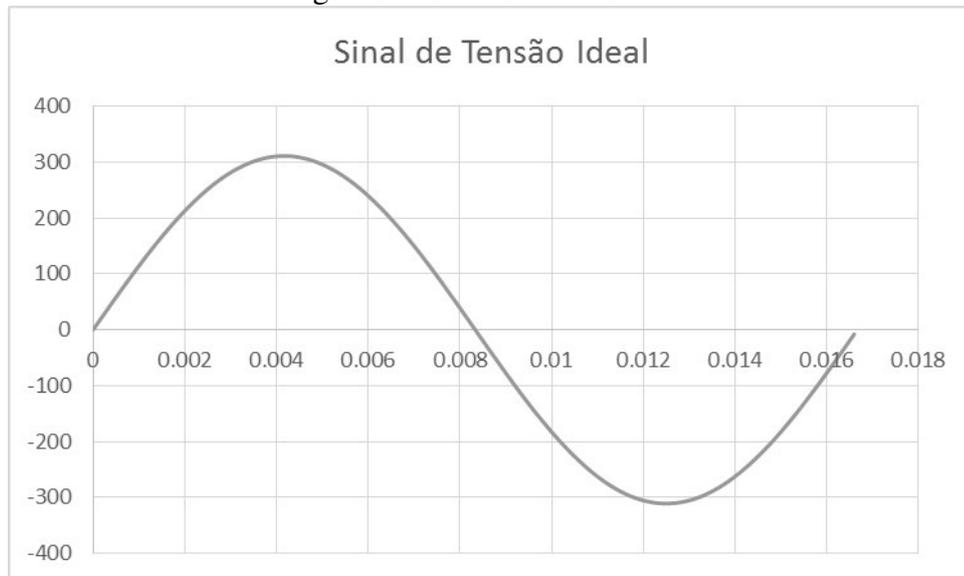
A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) normatiza e padroniza, através dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), “as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica.” (ANEEL, 2015). Um dos focos do PRODIST é a qualidade da energia elétrica que chega ao consumidor através dos agentes distribuidores (como as

concessionárias de energia elétrica), cujas normas são expostas no Módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2016).

A energia elétrica que é fornecida pelas distribuidoras é na verdade uma composição de uma onda fundamental, com amplitude de aproximadamente 311,13 V (no caso por exemplo do Ceará) e frequência 60 Hz, com outras senoides de frequências múltiplas, as harmônicas, tendo frequências de 120 Hz, 180 Hz, 240 Hz e assim por diante, com amplitudes variadas.

Conforme estabelecido pela ANEEL, a energia elétrica tem mais qualidade quanto mais a onda se aproxima da senoide ideal de 60 Hz, que pode ser observada na Figura 5. O PRODIST – Módulo 8 e as ferramentas matemáticas expostas anteriormente possibilitam analisar qual o conteúdo harmônico da energia elétrica recebida pelos consumidores.

Figura 5 – Sinal de tensão ideal.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com uma medição apropriada da tensão, pode-se proceder conforme a seção 2.2 para calcular o módulo das componentes harmônicas H_r do sinal medido, até pelo menos a 40ª harmônica (ANEEL, 2016). De posse desses valores, calcula-se as taxas e indicadores utilizando as seguintes equações (PRODITS, 2016):

$$DTT\% = 100 \times \frac{\sqrt{\sum_{r=2}^{40} (H_r)^2}}{H_1}$$

Com r entre 2 e 40. Tem-se $r = 2, 3, 4, \dots, 40$.

$$DTT_p \% = 100 \times \frac{\sqrt{\sum_{r=2}^{40} (H_r)^2}}{H_1}$$

Com r par e não múltiplo de 3. Tem-se $r = 2, 4, 8, \dots, 40$.

$$DTT_i \% = 100 \times \frac{\sqrt{\sum_{r=5}^{37} (H_r)^2}}{H_1}$$

Com r ímpar e não múltiplo de 3. Tem-se $r = 5, 7, 11, \dots, 37$.

$$DTT_3 \% = 100 \times \frac{\sqrt{\sum_{r=3}^{39} (H_r)^2}}{H_1}$$

Com r múltiplo de 3. Tem-se $r = 3, 6, 9, \dots, 39$.

Este procedimento deve ser repetido 1008 vezes (ANEEL, 2016), obtendo-se 1008 valores para cada uma destas taxas, descartando medições feitas durante “desequilíbrios de tensão e flutuações de tensão, na ocorrência de variações de tensão de curta duração ou de interrupções de longa duração” (ANEEL, 2016).

Com estes 1008 valores para cada uma das quatro taxas, pode-se calcular os indicadores $DTT_{95\%}$, $DTT_p_{95\%}$, $DTT_i_{95\%}$, $DTT_3_{95\%}$, que representam os valores que foram superados em apenas 5% das 1008 leituras válidas de cada taxa (ANEEL, 2016).

Para estes indicadores, a ANEEL (2016) determina os seguintes limites:

Tabela 1 – Limites para os indicadores de distorção harmônica.

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
$DTT_{95\%}$	10,0%	8,0%	5,0%
$DTT_p_{95\%}$	2,5%	2,0%	1,0%
$DTT_i_{95\%}$	7,5%	6,0%	4,0%
$DTT_3_{95\%}$	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: ANEEL, 2016

Para o escopo do presente trabalho, com tensão eficaz de 220 V, a faixa de tensão a ser considerada é $V_n \leq 1,0 \text{ kV}$.

2.4 Prejuízos Causados pelas Distorções Harmônicas

De acordo com Leão, Sampaio e Antunes (2014), um sinal elétrico de qualidade permite que os dispositivos alimentados por ele operem de forma satisfatória, sem afetar seu desempenho ou vida útil. O estudo da Qualidade da Energia Elétrica (QEE) leva em conta uma gama de fenômenos eletromagnéticos que podem desviar ou deformar as formas de onda de tensão e de corrente, sendo um destes fenômenos a distorção harmônica. Conforme os autores, estas distorções se encaixam na categoria de perturbações elétricas sustentadas, que afetam as formas de onda de tensão e corrente em regime permanente.

Altas taxas de distorção harmônica na alimentação de certas cargas podem reduzir a segurança tanto do equipamento alimentado, quanto das pessoas que o utilizam. As distorções harmônicas causam também maior dissipação de energia em alguns dispositivos, o que aumenta o consumo de energia elétrica, aumento da temperatura do dispositivo e consequente redução da vida útil. Esse aumento na dissipação dá-se por diversos motivos, como o efeito pelicular, que restringe a seção condutora para componentes de frequência elevada (HAYT JR; BUCK, 2013).

Outro prejuízo relevante é que a presença de distorções reduz o fator de potência, ou seja, a razão entre a potência útil e a potência aparente. Para calcular o efeito das distorções harmônicas sobre o fator de potência, conforme Hart (2012), usa-se o “fator de distorção”, dado por:

$$FD = \sqrt{\frac{1}{1 + DTT^2}}$$

O fator de potência total é dado pelo produto do “deslocamento do fator de potência” (o cosseno da defasagem entre tensão e corrente) pelo fator de distorção (HART, 2012).

Com a decomposição da forma de onda de tensão em harmônicas, pode-se usar a técnica da superposição para analisar o efeito das componentes de diferentes frequências nos circuitos elétricos. Para capacitores e indutores, as suas reatâncias dependem diretamente da frequência da tensão, portanto as distorções harmônicas têm efeitos relevantes sobre a corrente resultante em circuitos com elementos passivos. A reatância capacitiva, por exemplo, diminui com a tensão, portanto componentes da tensão com frequências altas podem resultar em altas correntes nessa faixa de frequência no capacitor ou na carga que o contém (NILSSON, 2009).

Fora os efeitos já citados, Leão, Sampaio e Antunes (2014) citam ainda a atuação indevida de dispositivos de proteção como relés, disjuntores e fusíveis, medidas incorretas em dispositivos de medição, perda de dados, interferência em sistemas de telecomunicação e flutuação na imagem de vídeos.

Desta forma, a necessidade de o consumidor ter controle sobre o conteúdo harmônico da energia elétrica que consome se faz justificável. A Automação Residencial e o paradigma da Internet das Coisas, assuntos do próximo capítulo, dão ao consumidor o controle sobre a qualidade da energia que utiliza. Com a Tomada Inteligente proposta por Batista (2016), é possível controlar o consumo de energia e o valor eficaz da corrente utilizada. Com o *plug-in* proposto no presente trabalho, torna-se possível avaliar o conteúdo harmônico e ter mais uma ferramenta para manter a eficiência, segurança e exatidão no uso dos equipamentos conectados à rede de distribuição.

3 AUTOMAÇÃO RESIDENCIAL E A TOMADA INTELIGENTE

Neste capítulo, é apresentado o conceito de Tomada Inteligente dentro do âmbito da Automação Residencial, assim como o modelo desenvolvido por Batista (2016). Descreve-se também o protótipo utilizado para o teste do *plug-in* proposto, além de uma explanação sobre as bases matemáticas e o funcionamento do *plug-in* em si.

3.1 Automação Residencial

A área de Automação Residencial, ou Domótica, vem crescendo bastante nos últimos anos. Com dispositivos cada vez mais portáteis e o acesso à internet cada vez mais disseminado, vem se tornando possível, por exemplo, transformar a própria casa em algo como um robô autômato. A Domótica é definida como o conjunto de tecnologias aplicadas ao controle e automação inteligente de uma residência, permitindo uma gestão eficiente da energia elétrica, com segurança e conforto, facilitando a comunicação entre o usuário e o sistema (CEDOM, 2017).

Os primeiros passos da Automação Residencial foram a automatização de serviços domésticos como lavar e secar roupas, lavar pratos, entre outros. Hoje em dia, em países como os Estados Unidos, tornou-se comum ter produtos como robôs que aspiram a casa em horários programados, ou quando detectam poeira, termostatos que aprendem o padrão de temperatura desejada pelos usuários e câmeras inteligentes que avisam os donos da casa quando algum desconhecido está à porta (IROBOT, 2017; NEST, 2017).

3.2 Internet das Coisas na Automação Residencial

De acordo com Atzori, Iera e Morabito (2010), a Internet das Coisas é um novo paradigma que está rapidamente ganhando espaço no cenário atual da telecomunicação sem fio. A ideia básica do conceito é a presença pervasiva de uma variedade de “coisas” ou “objetos” ao nosso redor, como sensores, atuadores, celulares etc., os quais, através de endereços únicos para cada elemento, são capazes de interagir uns com os outros e cooperar com seus vizinhos para alcançar objetivos em comum.

Em Meola (2016) o autor aborda sobre casas inteligentes ou *smart homes*, apontando como benefícios da aplicação da Internet das Coisas à Automação Residencial: a

conveniência de ter operações automatizadas em casa (iluminação, temperatura, limpeza etc.), deixando o residente livre para outras tarefas, redução de custos e economia de energia. O autor dá como exemplo um termostato inteligente que ligue automaticamente o ar-condicionado quando o usuário sai do trabalho, para que encontre sua casa já em uma temperatura agradável ao chegar e, além disso, desligue o aparelho quando não houver ninguém em casa, de forma a reduzir o consumo de energia e diminuir a conta de eletricidade.

Dentro do paradigma da Internet das Coisas, observa-se que a Automação Residencial ganha novas possibilidades. A conexão simples e barata dos equipamentos com a Internet facilita o controle, monitoramento e comunicação com os dispositivos. O uso generalizado do WiFi e dos *smartphones* propiciam a expansão crescente nas aplicações em Automação Residencial.

3.3 A Tomada Inteligente

A Tomada Inteligente é um produto que exemplifica perfeitamente a aplicação da Automação Residencial no âmbito da Internet das Coisas. Sua aplicação está bastante presente fora do país, mas ainda está tendo uma expansão lenta no Brasil. Também conhecida como *smart outlet* ou *smart plug*, a Tomada Inteligente apresenta bastante variação entre uma marca e outra. Na Figura 6 podemos observar um *smart plug* da empresa Ankuoo (2017), cujo nome é NEO.

Algumas características das Tomadas Inteligentes presentes no mercado internacional são: capacidade de ligar e desligar o fornecimento de energia a tomadas da residência à distância, programar previamente a operação de tomadas, aprendizado do padrão de uso de tomadas na residência e operação automática através de sensores de presença. (ANKUOO, 2017).

Figura 6 – Smart plug NEO da marca Ankuoo.



Fonte: ANKUOO, 2017.

A Tomada Inteligente desenvolvida por Batista (2016) envolve vários componentes, formando um sistema de gerenciamento de tomadas no âmbito da Internet das Coisas. A arquitetura de aplicação de rede utilizada foi a cliente-servidor, caracterizada por um hospedeiro sempre em funcionamento que centraliza as informações e comunicações, e clientes que podem estar em funcionamento às vezes ou sempre, usando o servidor para comunicarem-se entre si (KUROSE; ROSS, 2010).

Conforme a arquitetura escolhida, o servidor deve ser uma aplicação que está sempre em funcionamento. No caso do sistema em estudo, o servidor conta com um banco de dados SQL que contém informações sobre os usuários e tomadas, um código PHP para gerar a interface Web utilizada pelo usuário e pela atualização do banco de dados, e a capacidade de comunicação com as tomadas através de uma conexão TCP.

O usuário tem acesso à interface do sistema para cadastramento, controle e monitoramento de suas tomadas através da Web, utilizando os protocolos HTTP na camada de aplicação e TCP/IP nas camadas de transporte e rede. Nesta interface, é possível cadastrar ou excluir tomadas, ligá-las ou desligá-las, verificar o seu status atual e aferir o consumo.

A tomada em si é composta por diversos componentes que dão a ela sua “inteligência”. O núcleo desse sistema é um microcontrolador da família PIC, o 18F4550, fabricado pela *Microchip Technology*. Seguem algumas características deste microcontrolador:

Performance de até 12 MIPS, suporte à interface USB 2.0, comunicação serial assíncrona (EUSART), 13 canais para um conversor analógico-digital de 10 bits, 32Kbytes de memória flash, 2048 bytes SRAM, 256 bytes EEPROM, baixo consumo (low-power), 4 timers e baixo custo (aproximadamente US\$ 4). (BATISTA, 2016, p. 11).

Além disso, temos dispositivos de entrada e saída conectados ao microcontrolador. Para a leitura de corrente fornecida pela tomada, temos um sensor de corrente do modelo ACS712-30A que se utiliza do Efeito Hall, fenômeno físico que promove diferença de potencial em uma área permeada por campo magnético. Para o ligamento e desligamento da tomada é utilizado um módulo relé.

Para a conexão com a internet e comunicação com o servidor, foi utilizado o módulo WiFi ESP8266-01 produzido pela empresa *Espressif*, que combina bom alcance do sinal WiFi, tamanho reduzido e custo baixo. O módulo é comandado através de uma interface serial que utiliza uma linguagem conhecida como *AT Commands*. É através dela que pode-se selecionar o

modo de operação (*access point* ou *station*), conectar-se a internet, estabelecer conexões TCP e UDP, além de enviar e receber mensagens através destas conexões (ESPRESSIF, 2017).

O *software* do microcontrolador foi programado com o interpretador XC8 no IDE (*Integrated Development Environment*) MPLAB em linguagem C.

A tomada inteligente opera em dois modos, o Modo de Configuração de Rede e no Modo de Operação Normal. O primeiro modo serve para informar à tomada a que rede ela deve se conectar para a comunicação com o servidor, devendo ser fornecidas informações de SSID e senha da rede. No segundo modo, o dispositivo conecta-se à rede informada e começa a operação normal, enviando informações de corrente eficaz e recebendo comandos do servidor (ligamento e desligamento).

4 MEDIÇÃO DE CONTEÚDO HARMÔNICO NA TOMADA INTELIGENTE

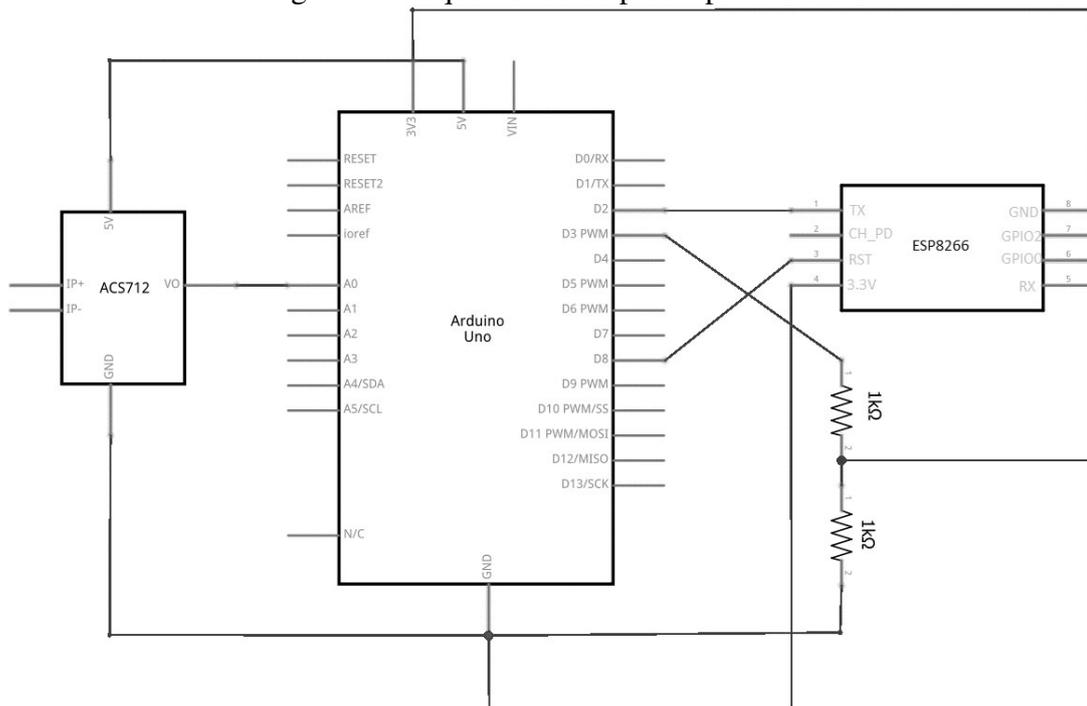
Neste capítulo é descrito o processo de desenvolvimento do *software plug-in* para a Tomada Inteligente proposta em Batista (2016), passando pela idealização e implementação de um protótipo de teste, além de um servidor simplificado.

4.1 O Protótipo de Teste

Com o estudo do projeto apresentado em Batista (2016) e a necessidade de medição e controle das distorções harmônicas na energia elétrica utilizada pelo usuário, propõe-se neste trabalho um *plug-in* que torne a Tomada Inteligente capaz de medir as taxas de distorção harmônica da energia utilizada, assim como verificar se essas taxas estão dentro dos limites normativos estabelecidos pela ANEEL.

Para o desenvolvimento do *software plug-in*, fez-se necessário um protótipo de testes, descrito nesta seção. O objetivo principal deste protótipo é emular a medição de corrente da Tomada Inteligente, assim como o cálculo das taxas de distorção harmônica e seu envio através de rede WiFi, utilizando-se do mínimo de recursos, com o máximo de flexibilidade quanto a reutilização de componentes e alteração do código. Na Figura 7 pode-se observar a estrutura do protótipo de testes montado para o presente trabalho.

Figura 7 – Esquemático do protótipo de testes.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Como componente principal, temos um Arduino UNO, uma placa microcontroladora baseada no ATmega328P da Atmel. O Arduino é muito utilizado para prototipagem, sendo um componente versátil e facilmente reprogramado e reutilizado. O modelo UNO é suficiente para a função que ele desempenha, que é receber, tratar e enviar dados.

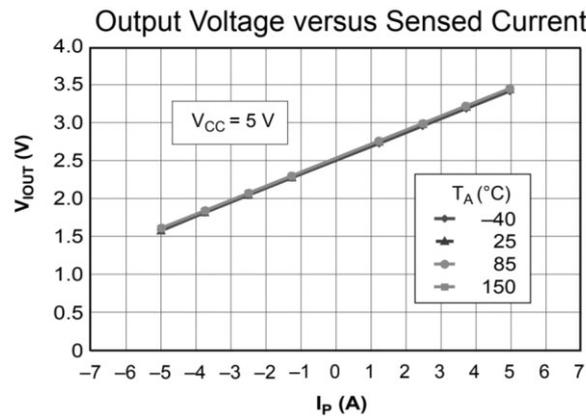
Para a conexão através da Internet, foi utilizado o módulo WiFi ESP8266-01, o mesmo utilizado por Batista (2016) em seu projeto, devido as características de baixo custo, pequenas dimensões e bom sinal WiFi. Como sensor de corrente, foi utilizado um da mesma linha ACS712, por ser uma opção de baixo custo e uso prático, porém foi utilizado um modelo de menor corrente nominal, 5A.

Como carga de teste, foi utilizada lâmpada incandescente de 100 W. Como esta é uma carga resistiva, através da corrente pode-se obter informações sobre a tensão, sem haver distorções consideráveis causadas pela carga em si. Com esta carga e tensão nominal de 220 V, tem-se uma corrente eficaz de aproximadamente 454,55 mA e uma resistência nominal de 484 Ω , que deve ser verificada antes da aplicação do *plug-in*.

Utilizou-se, para a comunicação serial com o ESP8266, portas digitais comuns do Arduino, usando uma comunicação serial virtual, emulada por software (biblioteca *SoftwareSerial*). Isso facilitou a alteração do código para testes, que se utiliza das portas digitais 0 e 1, que são as portas seriais de *hardware* do Arduino. O módulo WiFi utilizado funciona a 3,3 V, portanto foi necessário o uso de um divisor de tensão para a conexão entre ele e o Arduino (que opera em 5 V).

A saída de tensão do sensor ACS712 foi conectada à porta analógica A0, que é ligada a um conversor analógico/digital (CAD), cuja saída pode ser lida como um valor inteiro entre 0 e 1024, obtendo uma resolução de dez bits. Utilizando-se do gráfico do *datasheet* do equipamento mostrado na Figura 8 (ALLEGRO, 2017), pode-se obter relações de conversão entre a saída do CAD, a saída de tensão do sensor e a corrente medida, conforme mostrado Tabela 2 a seguir. Com a resistência real da carga medida, pode-se obter o valor de tensão a partir da corrente.

Figura 8 – Relação entre tensão de saída e corrente medida pelo ACS712



Fonte: ALLEGRO, 2017.

Tabela 2 – Conversões desde a corrente medida à saída do CAD.

Corrente medida (A)	Tensão de saída (V)	Saída do conversor
-12.50	0.00	0
-5.00	1.50	307
0.00	2.50	512
5.00	3.50	716
12.50	5.00	1024

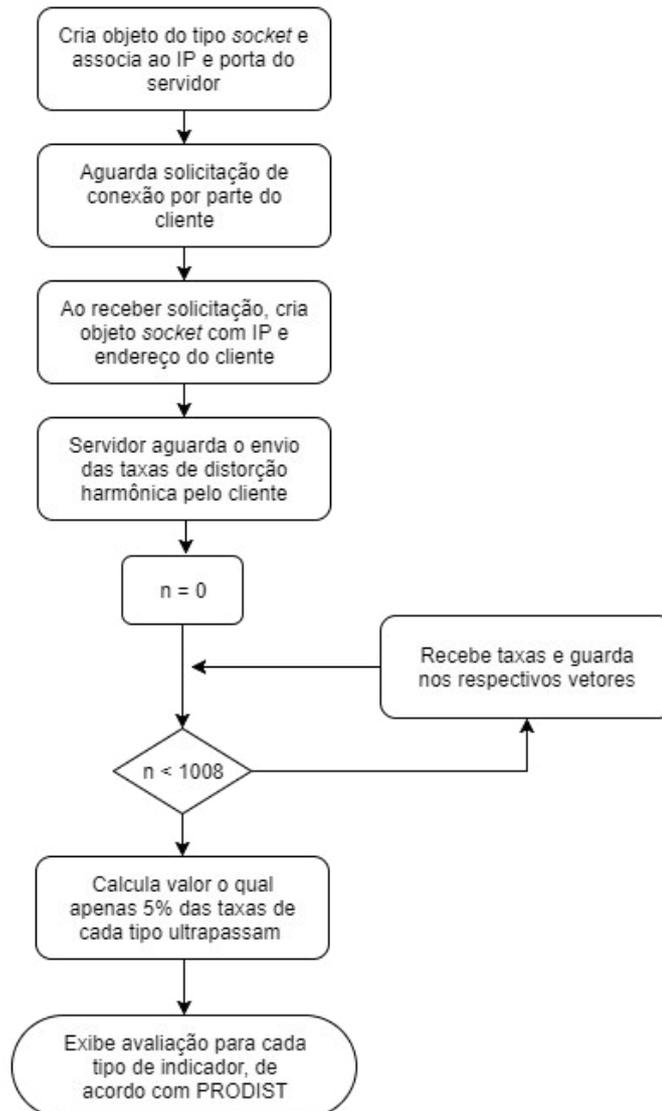
Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2 O Servidor

Para operar junto ao protótipo de teste, foi necessária a implementação de um servidor simples, com o objetivo de receber as informações do Arduino através de uma conexão TCP estabelecida pelo módulo WiFi, tratar os dados e exibir os indicadores e os resultados das análises.

O servidor foi implementado em linguagem Python, utilizando a biblioteca *socket*. Segue fluxograma a seguir, mostrando o funcionamento do servidor:

Figura 9 – Fluxograma do programa servidor.



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3 O Software Plug-in

O programa *plug-in* tem como objetivo calcular e analisar, de acordo com as normas da ANEEL, as distorções harmônicas da tensão utilizada pela Tomada Inteligente, de forma a avaliar a qualidade da energia elétrica utilizada, no que diz respeito às distorções harmônicas.

Inicialmente, o programa inicializa o módulo WiFi ESP8266, conectando-o a rede em que está o servidor e estabelecendo uma conexão TCP com o mesmo. O Arduino então começa a coletar valores de corrente através do sensor ACS712, durante um período (aproximadamente 0,0167 s para uma frequência de 60 Hz), os quais são convertidos através

do processo descrito no Capítulo 5 em valores de tensão. Estes valores são armazenadas no vetor de valores do tipo *float* \mathbf{V} .

Com os valores de tensão, é necessário implementar em código as equações de cálculo de harmônicas, taxas e indicadores apresentadas no Capítulo 2. Para isso, inicialmente calcula-se os valores S e C para cada múltiplo da frequência fundamental, referentes aos somatórios dos termos de seno e cosseno, respectivamente, para então calcular o módulo de cada componente harmônica e armazená-las no vetor \mathbf{H} . Pode-se observar este processo nas equações abaixo:

Para cada r de 0 a 40, representando os múltiplos da frequência fundamental Ω_0 :

$$S = 0$$

$$C = 0$$

Para cada n de 0 a N_0 :

$$S = S + \mathbf{V}[n] * \sin(rn\Omega_0)$$

$$C = C + \mathbf{V}[n] * \cos(rn\Omega_0)$$

Então temos, para cada r :

$$\mathbf{H}[r] = \frac{\sqrt{S^2 + C^2}}{N_0}$$

Ao final, obtem-se o vetor \mathbf{H} , em que $\mathbf{H}[0]$ é o valor médio da tensão \mathbf{V} , $\mathbf{H}[1]$ é a componente fundamental e $\mathbf{H}[r]$ são as componentes harmônicas da tensão \mathbf{V} .

Calculadas as harmônicas, o programa segue com o cálculo das taxas de distorção conforme estabelecido no PRODIST – Módulo 8 (ANEEL, 2016):

$$DTT\% = 100 \times \frac{\sqrt{\sum_{r=2}^{40} (H[r])^2}}{H[1]}$$

Com r entre 2 e 40. Tem-se $r = 2, 3, 4, \dots, 40$.

$$DTT_p\% = 100 \times \frac{\sqrt{\sum_{r=2}^{40} (H[r])^2}}{H[1]}$$

Com r par e não múltiplo de 3. Tem-se $r = 2, 4, 8, \dots, 40$.

$$DTT_1\% = 100 \times \frac{\sqrt{\sum_{r=5}^{37} (H[r])^2}}{H[1]}$$

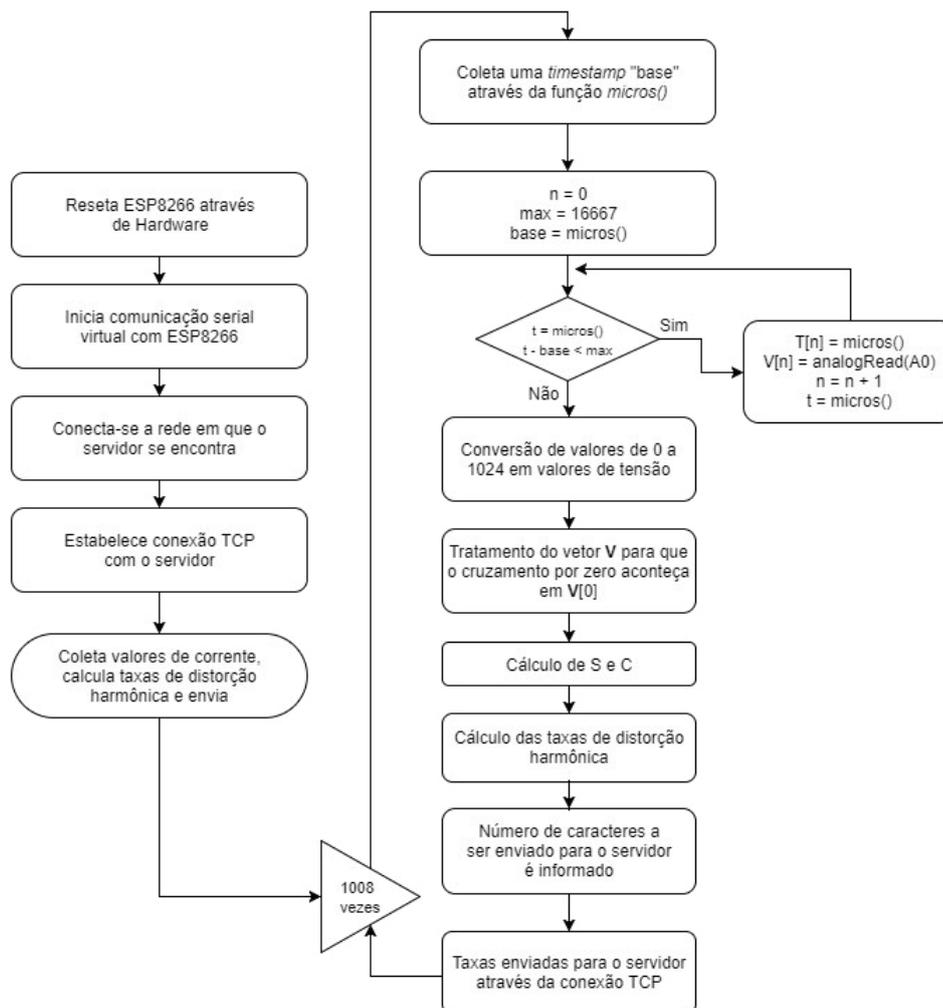
Com r ímpar e não múltiplo de 3. Tem-se $r = 5, 7, 11, \dots, 37$.

$$DTT_3\% = 100 \times \frac{\sqrt{\sum_{r=3}^{39} (H[r])^2}}{H[1]}$$

Com r múltiplo de 3. Tem-se $r = 3, 6, 9, \dots, 39$.

O programa então, utilizando-se da conexão TCP estabelecida anteriormente, envia as quatro taxas para o servidor, que pode então acumular e tratar estes dados de formar a obter os indicadores necessários. Como resumo, segue fluxograma referente ao código implementado no Arduino, na Imagem 10 a seguir:

Figura 10 – Fluxograma do *software plug-in*.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Após acumular 1008 valores para estas 4 taxas, conforme estabelece o PRODIST (2016), o servidor então calcula os indicadores DTT95%, DTT_p95%, DTT_f95% e DTT₃95%, aferindo qual o valor que apenas 5% das DTTs superam para cada categoria. Ao final, verifica se os indicadores estão dentro dos limites normativos estabelecidos pela ANEEL, conforme Tabela 1 do Capítulo 2, exibindo então os resultados.

No próximo capítulo, testou-se o *software plug-in* utilizando o protótipo de testes, comparando com medições de outros equipamentos, de forma a verificar a sua funcionalidade como complemento ao sistema de Tomadas Inteligentes implementado por Batista (2016).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

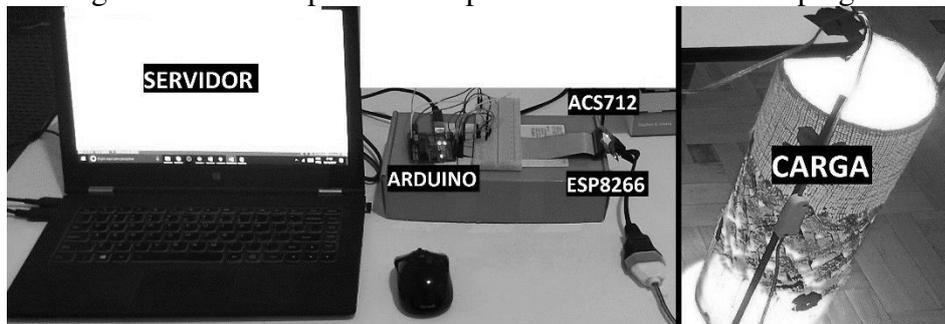
Neste capítulo descreve-se o processo de aplicação do *software plug-in* no protótipo de testes, avaliando a comunicação com o servidor, o tempo de processamento, os resultados obtidos de tensão, corrente, componentes harmônicas, taxas de distorção harmônica e percentis.

5.1 Montagem do Protótipo de Testes

Conforme esquemático apresentado na Figura 7, foram utilizados para a montagem do protótipo de testes um Arduino UNO, um sensor ACS712, módulo WiFi ESP8266, resistores e uma lâmpada incandescente. Um dos objetivos no desenvolvimento do *plug-in* era ser possível desenvolvê-lo com recursos simples, sem a necessidade de recursos de um laboratório de pesquisa, por exemplo. Após comprovada a eficácia do programa, pode-se seguir para a aplicação dele numa Tomada Inteligente real.

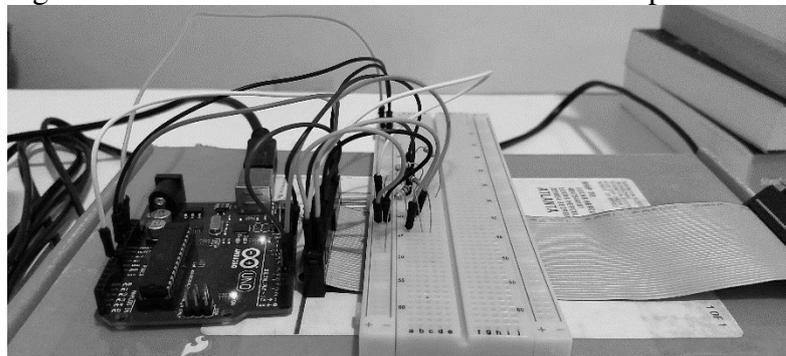
A seguir algumas fotos do protótipo em funcionamento:

Figura 11 – Protótipo de testes para desenvolvimento do plug-in.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 12 – Detalhe do Arduino conectado a uma protoboard.



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.2 Obtenção da Resistência da Carga

Antes de começar a operação do protótipo propriamente dita, foi necessário descobrir a resistência da lâmpada incandescente utilizada como carga. Ela tem potência nominal de 100 W, portanto resistência nominal de 484 Ω .

Para a obtenção do valor real de resistência, mediu-se a corrente que alimenta a lâmpada durante 25 ciclos (aproximadamente 0,4167 s), calculando então o seu valor eficaz através da fórmula abaixo (NILSSON, 2009):

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{n=0}^{N_0-1} I[n]}{N_0}}$$

Obteve-se o valor de $I_{rms} = 0,4129$ A. Com a tensão com valor eficaz de 220 V, calculou-se a resistência como $R_{lamp} = 532,8822$ Ω , um erro de aproximadamente 10% em relação ao valor nominal.

De posse do valor real da resistência, pode-se medir a tensão que alimenta a carga a partir do valor obtido pela leitura analógica do Arduino, através do Conversor Analógico-Digital (CAD). Da Tabela 2 do Capítulo 4 tinha-se:

$$I[n] = 0,0244 \times CAD - 12,6876$$

Como $V = RI$, tem-se:

$$V[n] = 13,0098 \times CAD - 6760,9962$$

As relações de conversão podem ser observadas na Tabela 3 abaixo:

Tabela 3 – Conversões desde a tensão medida indiretamente à saída do CAD.

Tensão medida (V)	Corrente medida (A)	Tensão de saída (V)	Saída do conversor
-6661.03	-12.50	0.00	0
-2664.41	-5.00	1.50	307
-311.13	-0.58	2.38	488
0.00	0.00	2.50	512
311.13	0.58	2.62	535
2664.41	5.00	3.50	716
6661.03	12.50	5.00	1024

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.3 Formas de Ondas Obtidas em um Ciclo

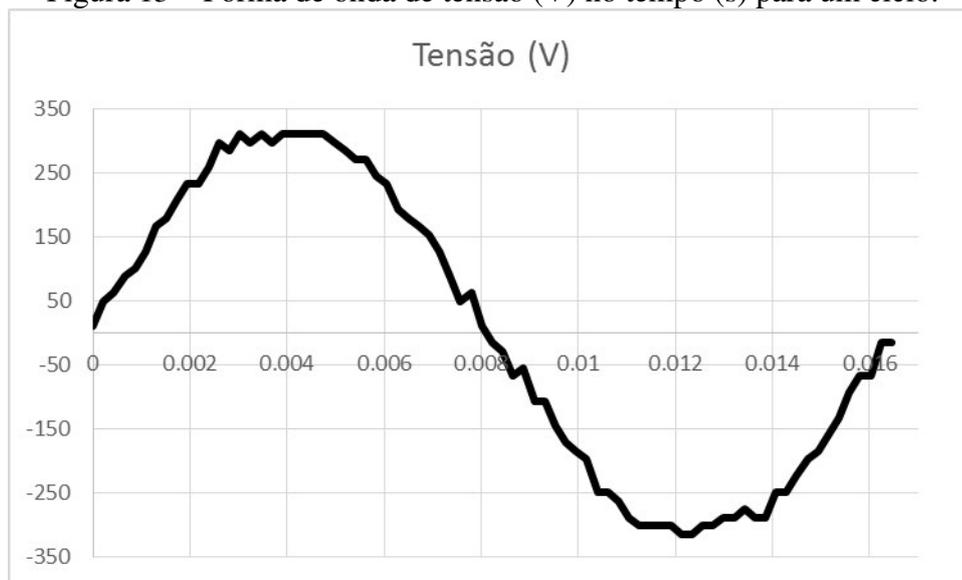
Na fase de coleta de correntes, buscou-se uma redução do tempo entre uma coleta de dados e outra, com o fator limitante da memória do Arduino e a estabilidade da comunicação com o servidor. A taxa de amostragem que mostrou-se bem sucedida ao equilibrar estes dois

objetivos foi de 4620 Hz, resultando em $N_0 = 77$ dados coletados durante o período de aproximadamente 0,0167 s.

Conforme recomendam Leão, Sampaio e Antunes (2014), a taxa de amostragem deve ser de pelo menos duas vezes a maior frequência do sinal analisado. No caso da análise até a 40ª harmônica, a frequência de amostragem deveria ser $2 \times 40 \times 60 = 4800$ Hz. Como as harmônicas de maior ordem têm menor importância e o Arduino mostrou-se instável para a frequência de 4800Hz, considerou-se a taxa de amostragem de 4620 Hz boa o suficiente para a aplicação em estudo.

Para obtenção dos indicadores requeridos pelo PRODIST (ANEEL, 2016), é necessário coletar 1008 dados de cada tipo. Nesta seção, analisamos os resultados obtidos em um ciclo arbitrário de coleta de dados. Para este teste, foram calculadas as harmônicas até a 40ª componente (2400 Hz). A seguir, a forma de onda de tensão obtida para este ciclo:

Figura 13 – Forma de onda de tensão (V) no tempo (s) para um ciclo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

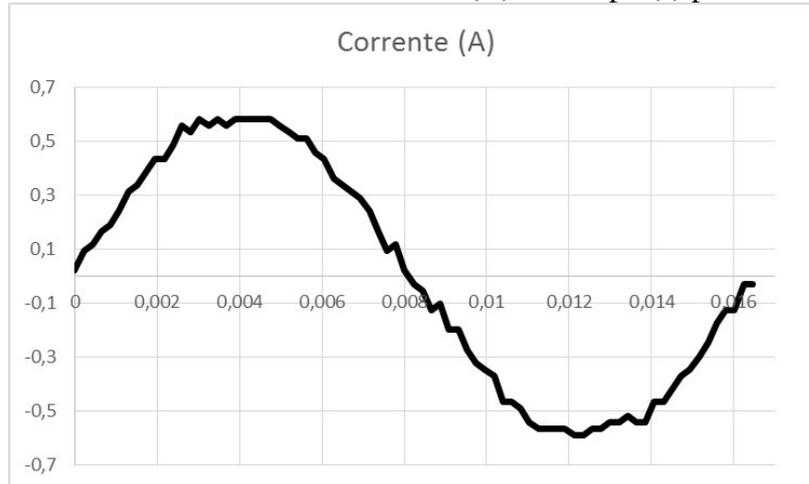
Pode-se observar nesta forma de onda a presença de várias rugosidades na senoide, indicando a presença de distorções harmônicas. Além das harmônicas do próprio sistema de distribuição, deve-se levar em conta o ruído na leitura de tensão através do sensor de corrente.

A partir dos dados coletados, obteve-se o valor eficaz da tensão medida pelo sensor de corrente, que foi $V_{\text{rms}} = 222,3892$ V, resultando em um erro de apenas 1,0860% em relação à tensão nominal de 220V.

Além da tensão eficaz, obteve-se também um valor de pico de 309,54 V, cujo valor teórico seria aproximadamente 311,13 V, e um valor médio de 0,1814 V, próximo ao ideal que seria zero.

Como trata-se de uma carga linear, a forma de onda da corrente é proporcional a de tensão, como pode ser observado na figura a seguir:

Figura 14 – Forma de onda de corrente (A) no tempo (s) para um ciclo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a corrente, tem-se $I_{avg} = 0,3404$ mA, $I_{peak} = 580,88$ mA e $I_{rms} = 417,33$ mA, com um erro de 8,19% em relação a corrente eficaz nominal de 454,55 mA.

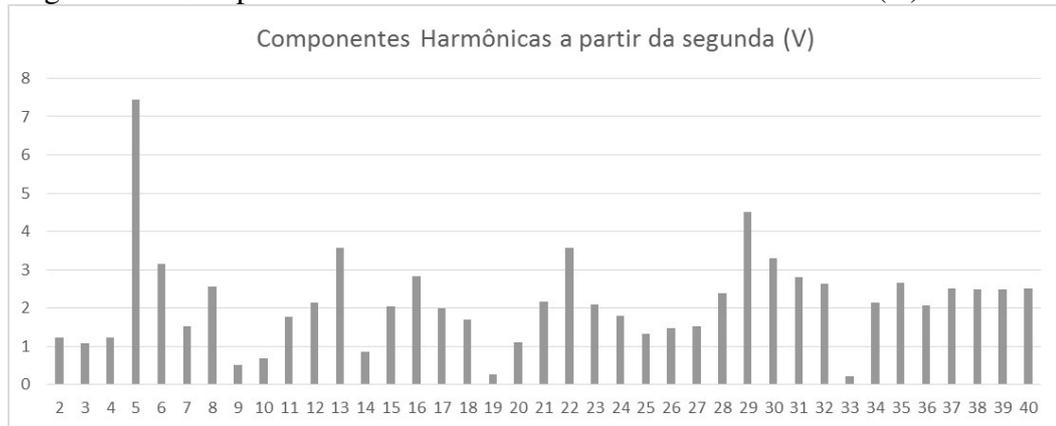
Utilizando-se dos algoritmos descritos no Capítulo 4, foi possível obter as componentes harmônicas da tensão utilizada pelo protótipo. A seguir, as componentes são exibidas de diversas formas: todas as componentes, incluindo o valor médio e a componente fundamental; as harmônicas a partir da segunda componente, para uma melhor noção de escala; as harmônicas pares não múltiplas de três; as harmônicas ímpares não múltiplas de três; e, por fim, as harmônicas múltiplas de três.

Figura 15 – Componentes harmônicas da forma de onda de tensão (V) de 0 a 40.



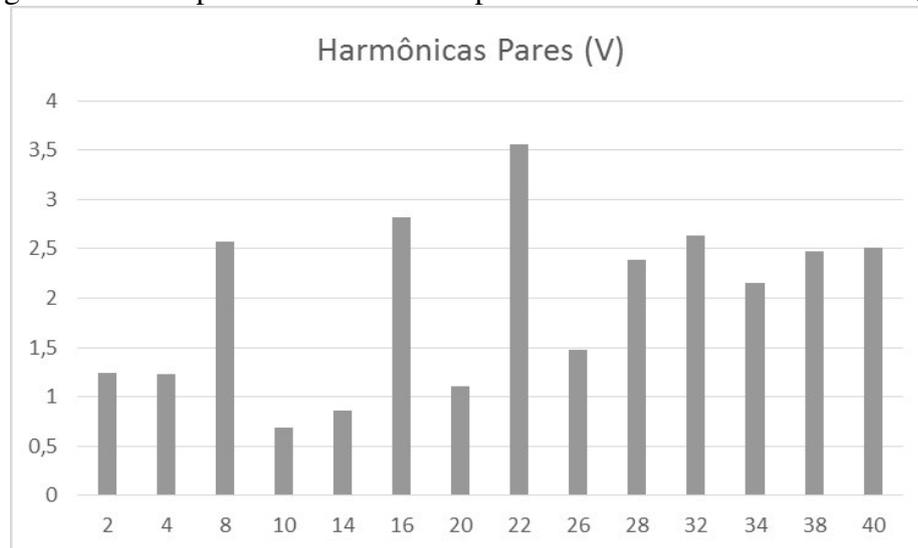
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 16 – Componentes harmônicas da forma de onda de tensão (V) de 2 a 40.



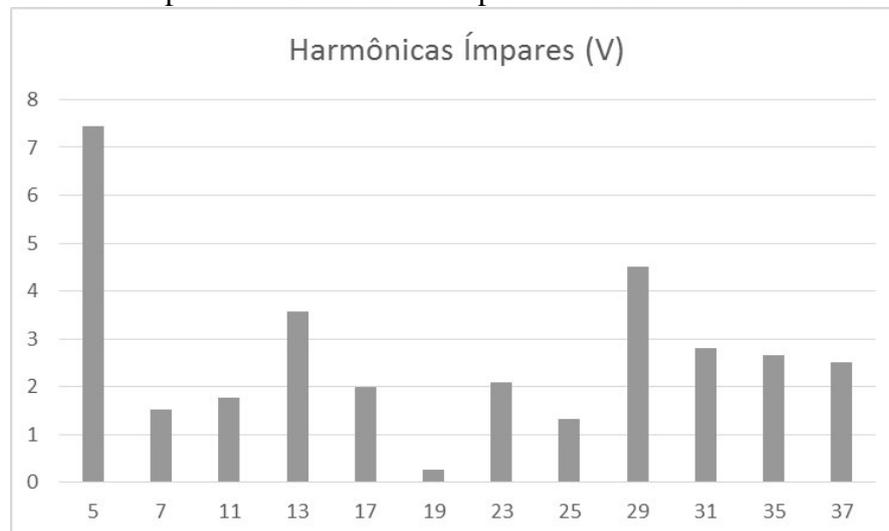
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 17 – Componentes harmônicas pares da forma de onda de tensão (V).



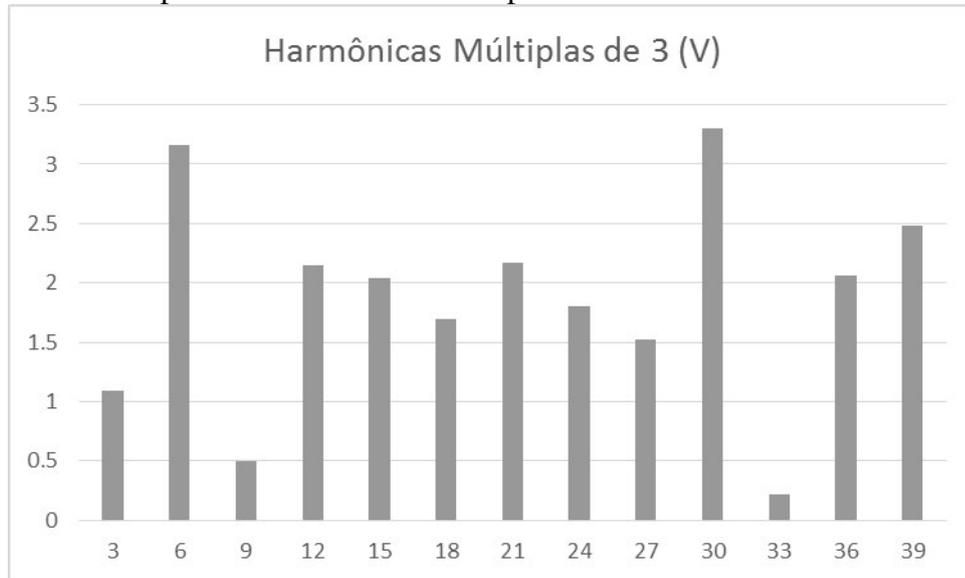
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 18 – Componentes harmônicas ímpares da forma de onda de tensão (V).



Fonte: Elaborada pelo autor.

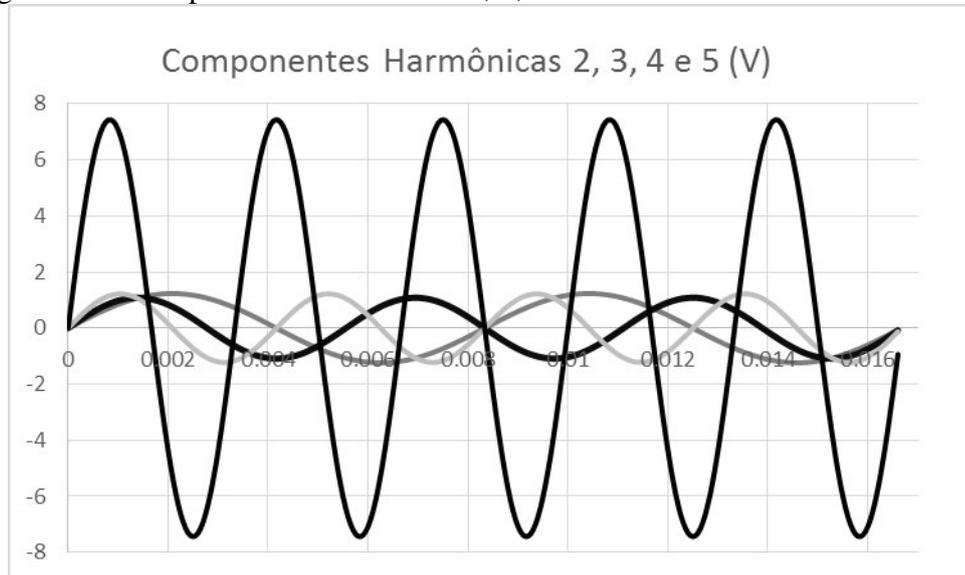
Figura 19 – Componentes harmônicas múltiplas de 3 da forma de onda de tensão (V).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Como ilustração das harmônicas que compõem a forma de onda de tensão, seguem, no mesmo gráfico, as componentes 2, 3, 4 e 5 (120 Hz, 180 Hz, 240 Hz e 300 Hz).

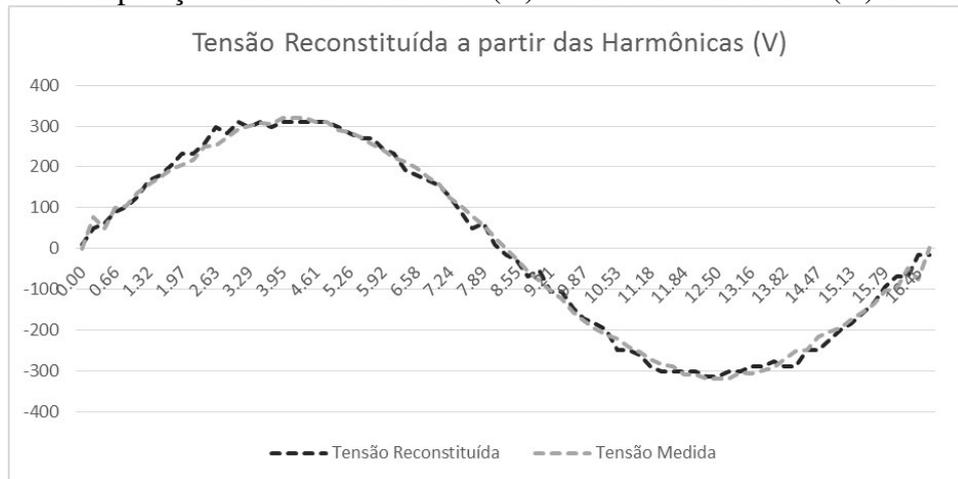
Figura 20 – Componentes harmônicas 2, 3, 4 e 5 da forma de onda de tensão (V).



Fonte: Elaborada pelo autor.

De forma a testar o algoritmo utilizado, reconstituiu-se a forma de onda de tensão através das harmônicas calculadas, conforme gráfico a seguir. Pode-se observar que as 40 primeiras harmônicas são suficientes para recompor o sinal original quase perfeitamente, demonstrando a eficácia do algoritmo e dos parâmetros utilizados.

Figura 21 – Comparação entre tensão medida (V) e tensão reconstituída (V) no tempo (ms).



De posse dos valores das componentes harmônicas, prossegue-se a calcular as taxas $DTT\%$, $DTT_p\%$, $DTT_i\%$ e $DTT_3\%$. Para o ciclo analisado nesta seção, obteve-se as seguintes taxas:

Tabela 4 – Taxas de Distorção Harmônica para o ciclo em estudo.

DTT%	4.977224
DTT_p%	2.558457
DTT_i%	3.56287
DTT₃%	2.483757

Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se que são valores abaixo ou próximos aos limites estabelecidos pela ANEEL (2016), ultrapassando-o apenas no caso das harmônicas pares. Como será possível observar na próxima seção, as medições de $DTT\%$ não variam muito, com um desvio padrão de menos de 1%.

5.4 Indicadores de Conteúdo Harmônico para 1008 Ciclos

Para obtenção dos indicadores $DTT_{95\%}$, $DTT_{p95\%}$, $DTT_{i95\%}$ e $DTT_{395\%}$, foram coletados informações de tensão por 1008 ciclos. Devido a capacidade de processamento do Arduino e necessidade de baixa velocidade de transmissão para evitar perdas de dados, não foi possível que os ciclos fossem seguidos uns dos outros, havendo um intervalo de pouco menos de um segundo entre cada coleta de dados. Desta forma, para os 1008 ciclos, o programa demora cerca de 15 minutos para processar e enviar todas as informações necessárias. Com isso, o

usuário teria acesso ao conteúdo harmônico da energia que utiliza a cada 15 minutos, o que pode ser considerada uma frequência satisfatória.

Com estas informações, pode-se elaborar algumas análises estatísticas sobre cada tipo de taxa, como mostrado na Tabela 4. Em seguida, exibe-se a saída do servidor, mostrando os indicadores e a análise deles de acordo com os limites normativos.

Tabela 5 – Análise estatística das Taxas de Distorção Harmônica coletadas em 1008 ciclos.

	DDT (%)	DTTp (%)	DTTi (%)	DTT3
Limite ANEEL	10.0000	2.5000	7.5000	6.5000
Percentil 95%	5.8727	3.6426	3.7984	3.5690
Média	5.1743	2.9922	3.0484	2.8641
RMS	5.1919	3.0181	3.0797	2.8918
Desvio Padrão	0.4271	0.3947	0.4379	0.3996
Adequação	Dentro do limite	Fora do limite	Dentro do limite	Dentro do limite

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 20 – Excerto do programa servidor, exibindo o resultado da análise.

```

1008 ciclos completos
Análise dos indicadores:

DTT95:
5.8727
DTT dentro dos limites

DTTp95:
3.6426
DTTp fora dos limites

DTTi95:
3.7984
DTTi dentro dos limites

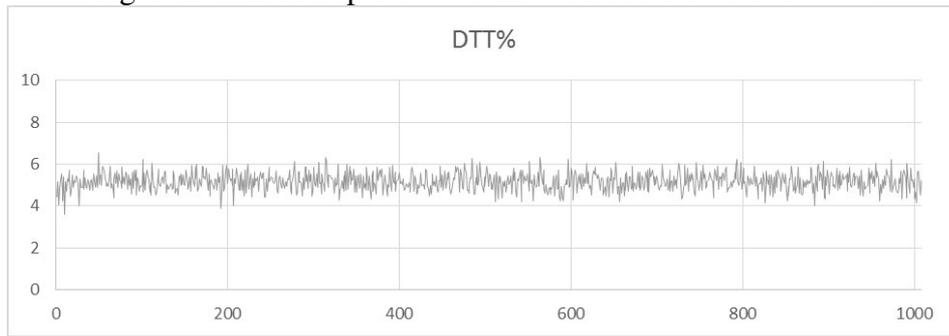
DTT395:
3.569
DTT3 dentro dos limites

```

Fonte: Elaborada pelo autor.

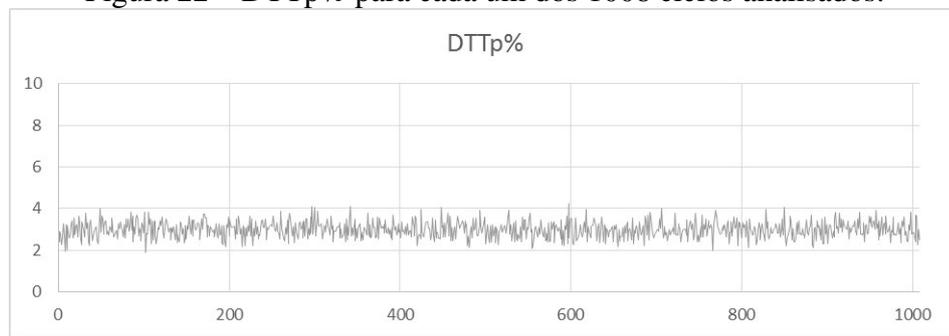
Nos gráficos abaixo pode-se observar a baixa variância dos dados obtidos visualmente. Além disso, vê-se que as taxas DTT%, DTT_i% e DTT₃% ficam sempre bastante abaixo do limite estabelecido no PRODIST (ANEEL, 2016), enquanto a DTT_p% varia ao redor do limite de 2,5%, com o indicador DTT_{p95}% ultrapassando o limite normativo em 1,14%. Levando em consideração o ruído introduzido pelo sensor de corrente e a natureza dos instrumentos de medição utilizados no presente trabalho, não é possível concluir a partir desta diferença de apenas 1,14% que a Rede de Distribuição está inadequada.

Figura 21 – DTT% para cada um dos 1008 ciclos analisados.



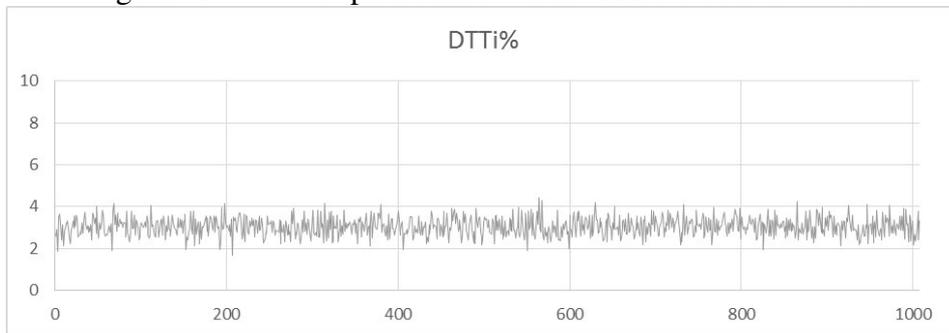
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 22 – DTTp% para cada um dos 1008 ciclos analisados.



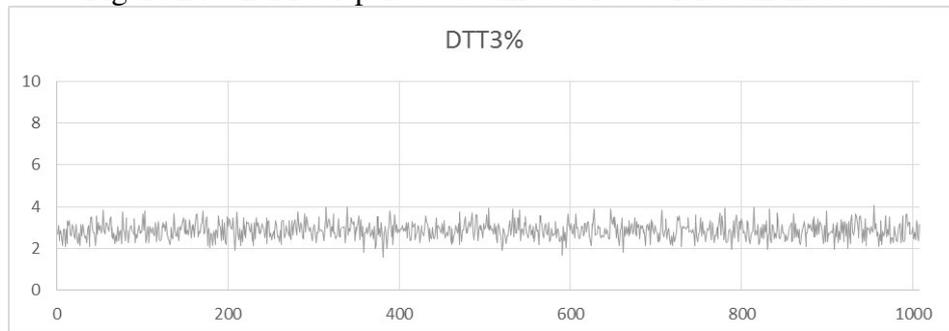
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 23 – DTTi% para cada um dos 1008 ciclos analisados.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 24 – DTT3% para cada um dos 1008 ciclos analisados.



Fonte: Elaborada pelo autor.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Conclusão

Neste trabalho foi mostrada a implementação de um *software plug-in* para uma aplicação de gerenciamento de tomadas elétricas residenciais no âmbito da Internet das Coisas, com o objetivo de verificar se os níveis de distorção harmônica da rede elétrica de distribuição utilizada estão dentro dos padrões normativos.

De forma a definir distorção harmônica, apresentar os padrões normativos utilizados e justificar a importância do complemento à Tomada Inteligente de Batista (2016), o referencial teórico trata de Séries de Fourier para sinais contínuos e discretos, discute as definições sobre Qualidade de Energia Elétrica no que diz respeito a conteúdo harmônico presentes nos Procedimentos de Distribuição (PRODIST) – Módulo 8 da ANEEL (2016) e expõe os principais prejuízos que podem ser causados por níveis altos de distorção harmônica.

Com este estudo, foi possível concluir que fornecer ao usuário da Tomada Inteligente informações sobre a qualidade da energia que utiliza pode ser bastante útil, de forma que ele possa tomar decisões conscientes sobre seu uso de energia, tendo inclusive condições de exigir mais qualidade no produto que consome.

Em seguida, foi apresentado histórico e atual estado da Automação Residencial com base no paradigma da Internet das Coisas, mostrando como tomadas inteligentes integram este panorama. Descreveu-se então a Tomada Inteligente em estudo, falando de seus principais componentes de *hardware* e das características do *software*.

A partir do que foi exposto, partiu-se para o desenvolvimento do *software plug-in* em si, utilizando-se, para isso, de um protótipo de testes e de um servidor simplificado. O objetivo foi emular os componentes da Tomada Inteligente de Batista (2016) essenciais para a implementação do complemento proposto neste trabalho, com custo reduzido, materiais simples e facilidade de reprogramação.

Seguindo esta proposta, foram utilizados um Arduino UNO, um sensor de corrente ACS712, um módulo WiFi ESP8266, uma lâmpada incandescente como carga e um computador pessoal como servidor em linguagem Python. Pode-se focar então na leitura de valores de tensão a partir do sensor de corrente, no tratamento dos dados de forma a obter as taxas e indicadores requeridos e na transmissão destes dados para o servidor através de WiFi.

Ao aplicar o *plug-in* proposto no protótipo de testes, foram analisados os valores de tensão, corrente e componentes harmônicas para um ciclo arbitrário do sinal de 60Hz, além de fazer uma análise estatística e normativa das taxas de distorção harmônica coletadas em 1008 ciclos.

Pode-se observar que os valores médios de tensão e corrente para um ciclo ficaram bem próximos do valor ideal nulo e que o valor eficaz de tensão ficou a aproximadamente 1% do valor ideal de 220V. As componentes harmônicas tiveram suas magnitudes visualmente comparadas em diversos gráficos, para diferentes seleções de harmônicas. Demonstrou-se ainda que as 40 primeiras harmônicas, mínimo definido pela ANEEL (2016), são suficientes para reconstituir o sinal original com boa precisão.

Para a análise das taxas de distorção harmônica em 1008 ciclos, pode-se observar que a variância entre estes ciclos é bem pequena, demonstrando a estabilidade das medições e cálculos feitos com o *software plug-in* proposto, já que pressupõe-se que o conteúdo harmônico da rede de distribuição deve variar bem pouco em um curto período de tempo.

Pode-se mensurar também o tempo de processamento para a coleta, tratamento, análise e exibição dos dados nestes 1008 ciclos, que foi de pouco menos de um segundo para cada ciclo e de aproximadamente 15 minutos para o processo completo, o que considerou-se uma frequência de atualização suficiente.

Por fim, os limites estabelecidos no PRODIST (ANEEL, 2016) foram aplicados à saída de dados: os indicadores $DTT_{95\%}$, $DTT_p95\%$, $DTT_i95\%$ e $DTT_395\%$. Para $DTT_{95\%}$, $DTT_i95\%$ e $DTT_395\%$, os indicadores ficaram bastante abaixo dos limites normativos, indicando conformidade da rede de distribuição, além de coerência nos dados obtidos.

Para a $DTT_p95\%$, o valor ultrapassou o limite normativo, porém não o suficiente para ser possível concluir se isso se deu pelo ruído introduzido pelo sensor de corrente, pelo tipo de equipamento utilizado no protótipo ou por baixa qualidade na energia elétrica utilizada. Como não fez parte do escopo deste trabalho definir a precisão da medição feita, não é possível avaliar se o valor obtido para a $DTT_p95\%$ estaria dentro de uma margem de erro da medição.

Por fim, é possível concluir que o *software plug-in* é um complemento satisfatório para o sistema de Tomadas Inteligentes original, possibilitando dar ao usuário uma boa noção sobre o conteúdo harmônico da energia elétrica que utiliza.

6.2 Trabalhos Futuros

Como visto nos capítulos anteriores, o *software plug-in* foi implementado através de um protótipo de testes, que possibilitava repetidas modificações no código e reestruturação do circuito. O próximo passo deste projeto seria implementar o *plug-in* na Tomada Inteligente, confirmando o que foi concluído no presente trabalho.

De forma a aumentar a precisão do cálculo do conteúdo harmônico da tensão utilizada pela Tomada Inteligente, seria necessário sensoriamento direto da própria tensão, recurso que a Tomada Inteligente de Batista (2016) não possuía. Como o próprio autor afirma, “o sistema é capaz de armazenar e tratar os dados de tensão, necessitando apenas da implementação de um circuito para a sensibilização dos níveis de tensão da rede”.

Para que seja possível tirar conclusões acertadas sobre a Qualidade da Energia Elétrica utilizada pela Tomada Inteligente, no que diz respeito ao conteúdo harmônico da tensão, seria necessário o cálculo de taxas de precisão para os indicadores obtidos pela Tomada. Desta forma, haveria uma margem de erro conhecida para a análise de quando determinado indicador ultrapassasse o limite normativo.

REFERÊNCIAS

- ALLEGRO. **ACS712 Datasheet**. Disponível em: <www.allegromicro.com/~media/Files/Datasheets/ACS712-Datasheet.ashx>. Acesso em: 13 nov. 2017.
- ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: módulo 1 – introdução**. Brasília, 2015.
- ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: módulo 8 – qualidade da energia elétrica**. Brasília, 2016.
- ANKUOO. **Ankuoo Products**. Disponível em: <<http://www.ankuoo.com/products/>>. Acesso em: 12 nov. 2017.
- ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G.. The Internet of Things: A survey. **Computer Networks**, Cagliari, v. 54, n. 15, p.2787-2805, 28 out. 2010.
- BATISTA, Ícaro Jonas. **Tomada inteligente baseada em internet das coisas (IoT) com leitura de energia em tempo real**. 2016. 38 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.
- CEDOM, Asociación Española de Domótica e Inmótica. **Qué es Domótica**. Disponível em: <<http://www.cedom.es/sobre-domotica/que-es-domotica>>. Acesso em: 12 nov. 2017.
- ESPRESSIF. **ESP8266EX Datasheet**. Disponível em: <http://espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex_datasheet_en.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2017.
- HART, Daniel. **Eletrônica de Potência: análise e projeto de circuitos**. Porto Alegre: AMGH, 2012.
- HAYT JR, William; BUCK, John. **Eletromagnetismo**. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.
- IEEE. **IEEE STD 519-2014: IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power System**. New York: IEEE, 2014.
- IROBOT. **Roomba Robot Vacuum**. Disponível em: <<http://www.irobot.com/For-the-Home/Vacuuming/Roomba.aspx>>. Acesso em: 12 nov. 2017.
- KUROSE, James; ROSS, Keith. **Redes de Computadores e a Internet: Uma Abordagem Top-Down**. 5. ed. São Paulo: Addison Wesley, 2010.
- LATHI, B. P.. **Sinais e Sistemas Lineares**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2007.
- LEÃO, R. P. S.; SAMPAIO, R. F.; ANTUNES, F. L. M.. **Harmônicos em Sistemas Elétricos**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.
- MEOLA, Andrew. **How IoT & smart home automation will change the way we live**. 2016. Disponível em: <<http://www.businessinsider.com/internet-of-things-smart-home-automation-2016-8>>. Acesso em: 16 nov. 2017.

NEST. **Nest Products**. Disponível em: <<https://nest.com/>>. Acesso em: 12 nov. 2017.

NILSSON, James. **Circuitos Elétricos**. 8. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

OLIVEIRA, Sérgio de. **Internet das coisas com ESP8266, Arduino e Raspberry Pi**. São Paulo: Novatec Editora, 2017.