

SISTEMA MICROCONTROLADO PARA ANÁLISE E MONITORAMENTO DE HARMÔNICOS NO ACIONAMENTO DE MOTORES ELÉTRICOS

OLIVEIRA, Lorena Paula de¹; SILVESTRE, Whester Saldanha²;
PEREIRA, Marco Antônio Silva³; OLIVEIRA, Patrick Santos de⁴.

¹Estudante de Engenharia Elétrica do IFMG - *Campus* Formiga, E-mail: lorenoliver888@gmail.com

²Estudante de Engenharia Elétrica do IFMG - *Campus* Formiga, E-mail: whsaldanhasilvestre@gmail.com

³Professor Orientador do IFMG - *Campus* Formiga, E-mail: marco.silva@ifmg.edu.br

⁴Professor Coorientador do IFMG - *Campus* Formiga, E-mail: patrick.oliveira@ifmg.edu.br

RESUMO

A necessidade de melhorar a eficiência e o controle dos equipamentos elétricos exige, de maneira geral, o uso intensivo de conversores eletrônicos de energia. Estes conversores são constituídos por dispositivos semicondutores (diodos, tiristores, MOSFET's, IGBT's, etc.) que são caracterizados por comportamentos não lineares, ou seja, as correntes requeridas não são diretamente proporcionais à tensão aplicada, resultando em ondas distorcidas em relação a uma forma de onda senoidal pura. A origem destas distorções é decorrente do surgimento de tensões e/ou correntes, denominadas como harmônicos, cujas frequências são múltiplas inteiras da frequência fundamental em que o sistema elétrico está projetado para operar. São diversos os efeitos danosos acarretados pela presença de harmônicos na rede elétrica, podendo provocar a falha ou má operação dos equipamentos dos consumidores. Sendo assim, normas e regulamentações definem limites, baseados no cálculo do índice de distorção harmônica total de tensão (DTT), que não devem ser ultrapassados para garantir a qualidade da energia elétrica entregue ao consumidor. Neste contexto, surge a necessidade de monitorar se a presença dos harmônicos de uma instalação se encontra dentro dos limites estabelecidos e, o presente projeto de pesquisa, propôs-se a desenvolver um sistema controlado por Arduino, com o auxílio do *software Matlab*, a fim de realizar este monitoramento e verificar a adequação aos limites estipulados por normas regulamentadoras. Como objeto de estudo, o sistema foi utilizado na análise do conteúdo harmônico emitido por chaves eletrônicas de partida para motores elétricos, tais como *soft-starter* e inversor de frequência. Para alcançar este objetivo, foi necessário implementar um sistema de medição, composto por sensores de tensão e corrente, para coletar as grandezas elétricas provenientes da utilização dos conversores e enviar os dados, via comunicação serial, para um computador de forma que os mesmos pudessem ser utilizados pelo *Matlab* nos cálculos de índices para quantização dos níveis de distorção harmônica, os quais foram validados a partir da comparação dos resultados com a medição obtida por um analisador de qualidade de energia da Minipa (modelo 5051-C). Os ensaios laboratoriais mostraram-se coerentes, sendo que nas etapas de aceleração e desaceleração da *soft-starter* houve maior presença de harmônicos e, portanto, maior DTT de corrente e de tensão. Em contrapartida, no estado de regime permanente, este índice se manteve baixo visto que o motor é alimentado diretamente pela rede por meio de uma chave de *by pass*. Para o inversor de frequência, níveis elevados de distorção harmônica foram detectados em todos os instantes de funcionamento, fato que se justifica pela operação básica deste equipamento que, além de auxiliar durante o processo de partida do motor, controla sua velocidade em regime permanente variando a frequência da tensão disponibilizada.

Palavras-chave: Qualidade de energia. Distorções harmônicas. Conversores de energia. Acionamento de motores elétricos.

INTRODUÇÃO:

O conceito de qualidade da energia elétrica (QEE) faz-se abrangente, visto que engloba diferentes tipos de distúrbios que afetam o sistema de energia elétrica. É definida por características de continuidade de suprimento e de conformidade com certos parâmetros considerados como desejáveis, tais como a amplitude e forma de onda das grandezas elétricas (DUGAN; et. al, 2012). Dada a crescente relevância da energia elétrica no cotidiano dos consumidores, que se faz presente em âmbitos como educação, comunicação, saúde e trabalho, surge a preocupação em relação a tal temática, visto que se tornou indispensável que a energia

fornecida esteja dentro de condições compatíveis aos equipamentos eletrônicos, garantindo que estes funcionem de maneira correta.

Segundo Roger C. Dugan (2012, p.3), um problema de qualidade de energia pode ser definido como qualquer problema de energia manifestado em desvios de tensão, corrente ou frequência que resulte em falha ou operação incorreta do equipamento do cliente. Estes problemas indicam uma qualidade de energia baixa, e podem causar danos aos equipamentos, como mau funcionamento ou levá-los à falha. Os problemas relacionados à QEE podem ocorrer em várias partes do sistema elétrico, seja nas instalações dos consumidores ou no conjunto de suprimentos da própria concessionária de energia. Estes problemas estão cada vez mais perceptíveis, visto que nos últimos anos ocorreu um aumento considerável na utilização de equipamentos causadores dos distúrbios de qualidade de energia e, também, na sensibilidade de tais equipamentos frente a estes distúrbios. Isto foi alavancado, principalmente, pelo desenvolvimento tecnológico dos dispositivos de eletrônica de potência, que são utilizados, por exemplo, na conversão eletrônica entre energia elétrica em corrente alternada (CA) e contínua (CC) (DECKMANN; POMILIO, 2020).

A caracterização dos distúrbios referentes à qualidade de energia elétrica é realizada considerando o tipo e a duração do fenômeno e é definida por meio de normas e regulamentações. Dentre os distúrbios, destacam-se as distorções harmônicas que, por sua vez, são fenômenos relativos às deformações causadas por tensões ou correntes com frequências que são múltiplas inteiras da frequência fundamental. A distorção harmônica tem origem nas características não lineares de dispositivos e cargas no sistema de energia (DUGAN; et. al, 2012). Um exemplo de cargas que geram harmônicos são os conversores de frequência no acionamento de motores (ROCHA, 2016).

No Brasil, os procedimentos de qualidade de energia são definidos em conformidade com a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) e publicados no módulo 8 do documento PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional), bem como por normas de regulamentação estrangeiras, que determinam a terminologia para os distúrbios e garantem a padronização dos parâmetros relacionados à qualidade de energia para que esta permaneça em limites aceitáveis. Para estar em conformidade com a ANEEL, deve-se considerar na medição efetiva dos componentes harmônicos de um sistema elétrico, uma faixa de frequências que compreenda desde a componente fundamental até, pelo menos, a 40ª ordem harmônica. Para atender este requisito, faz-se necessária utilização de instrumentos específicos como, por exemplo, o Analisador de Energia ET-5062, da Minipa, cujo custo varia de 30 a 35 mil reais (INSTRUM, 2021).

Para quantificar a intensidade das distorções harmônicas de um sinal elétrico, utiliza-se a transformada de Fourier, que realiza a decomposição de um sinal no domínio do tempo para o domínio da frequência, o que permite verificar a grandeza de cada harmônico. Para determinar os níveis de presença harmônica em um sinal elétrico, o indicador mais utilizado é o índice de distorção harmônica total (DHT), o qual pode estar relacionado a distorções de tensão ou de corrente e que corresponde à porcentagem da amplitude das componentes harmônicas em relação à componente fundamental (DUGAN; et. al, 2012).

Na revisão do Módulo 8 do PRODIST, em vigor desde 07 de dezembro de 2021, há uma diferenciação das componentes espectrais em três grupos, com as respectivas definições de DTT (Distorção harmônica total de tensão):

- DTTp%: Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3;
- DTTi%: Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3;
- DTT3%: Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3.

O cálculo destes indicadores é similar ao cálculo do DHT e são realizados até uma ordem harmônica genérica (hmax). Na especificação da instrumentação, indica-se que a medição deve ser feita, no mínimo, até a 40ª harmônica. Isto se deve ao fato de que, embora sinais periódicos possuam um número infinito de harmônicas, a partir de certa frequência as amplitudes dessas harmônicas tornam-se muito baixas e podem ser desprezadas.

METODOLOGIA:

Os problemas advindos da presença de componentes harmônicos na rede elétrica vão desde o sobreaquecimento dos condutores e equipamentos elétricos até a interferência em sistemas telefônicos e de

comunicação. Percebe-se, então, a necessidade de investigação da qualidade de energia elétrica, a fim de reduzir os danos causados por distorções harmônicas. Sendo assim, o presente projeto de pesquisa tem como objetivo a implementação de um sistema para análise e monitoramento do conteúdo harmônico de determinados sinais elétricos com o auxílio de componentes de baixo custo. Tendo em vista que os conversores eletrônicos de energia apresentam contribuições significativas para este tipo de distúrbio, o sistema proposto tem, como objeto de estudo, sinais emitidos por conversores utilizados no acionamento de motores elétricos, tais como a *soft-starter* e o inversor de frequência.

Para alcançar os objetivos propostos, a execução do trabalho foi dividida em 4 etapas. Inicialmente, foi realizado um levantamento bibliográfico sobre aspectos de qualidade de energia, visando a compreensão e identificação dos diferentes tipos de distúrbios que afetam as características ideais de tensão e corrente elétrica. Na segunda etapa, os estudos foram aprofundados e dedicados, principalmente, para a realização de cálculos dos indicadores de quantização do nível de distorções harmônicas, em especial o DHT (distorção harmônica total). Paralelamente, ainda na segunda etapa do trabalho, foi realizado um levantamento dos componentes necessários para desenvolver a plataforma de aquisição de dados, necessária para realizar a medição adequada das grandezas elétricas em análise. Os principais componentes desta plataforma são: sensor de corrente alternada (CA), modelo *SCT-013-030*; sensor de tensão *Zmpt101b*, plataforma microcontrolada *Arduino MEGA*. A escolha destes componentes levou em consideração o valor de aquisição, visando obter um sistema de baixo custo, e o atendimento aos requisitos necessários de medição, tais como faixa de valores (corrente até 30A e tensão até 250V em CA), velocidade de processamento e capacidade de armazenamento de dados.

O circuito para realização dos testes propostos, o qual foi desenvolvido na terceira etapa do trabalho, pode ser visualizado pela figura 1. Nota-se que, além dos componentes principais citados, há um capacitor de 100 μ F e dois resistores de 10k Ω conectados ao sensor de corrente para estabilização e ajuste de *offset* da leitura analógica, já que o *SCT-013-030* disponibiliza valores entre -2,5V e +2,5V em sua saída e a entrada do Arduino tem referência de valores entre 0V e 5V. Além disso, não foi necessário o uso do comum resistor de carga (*burden*) pelo fato de o *SCT-013-030* já ter este componente acoplado em seu interior. O uso do sensor de tensão *Zmpt101b* não requer componentes adicionais, porém, assim como o sensor de corrente, foi necessário realizar uma calibração, com o auxílio de um multímetro, para obter os valores corretos das grandezas medidas.

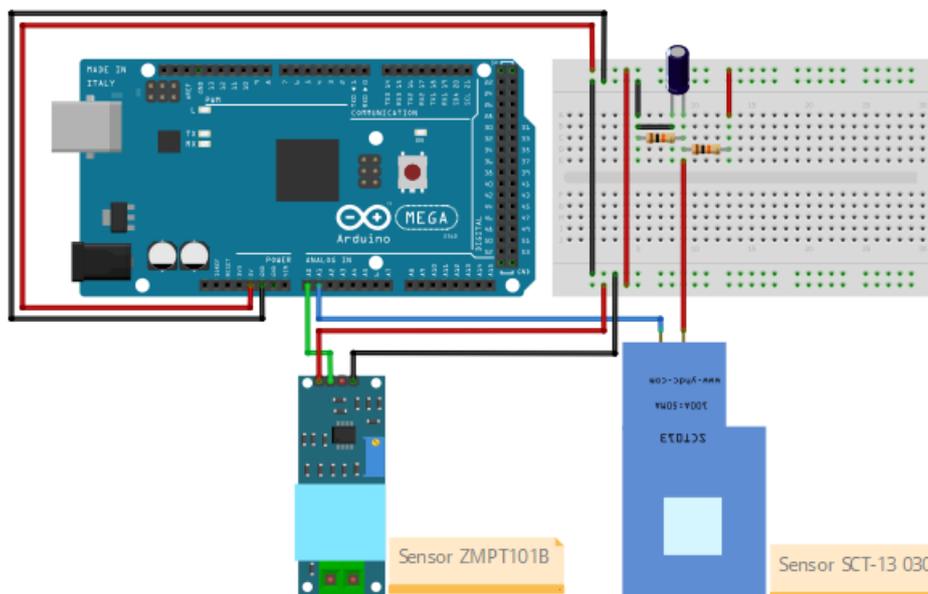


Figura 1: Circuito utilizado para testes e obtenção de resultados (próprios autores, 2022).

Na etapa 4, foi desenvolvida uma rotina computacional que estabelece a comunicação entre o sistema de aquisição de dados (Arduino) e um código implementado no *Matlab*, permitindo o processamento dos cálculos necessários para obtenção dos índices harmônicos. Desta forma, a plataforma Arduino recebe os valores medidos pelos sensores de tensão e corrente, armazena-os em vetores e envia estes valores para o *Matlab*.

O *Matlab* recebe as informações, realiza a Transformada Rápida de Fourier e o cálculo do DHT e, em sequência, comunica ao Arduino que, por sua vez, inicia uma nova coleta de dados. As figuras 2 e 3 apresentam a sequência de operações realizadas no sistema de aquisição de dados e no código implementado no *Matlab*.

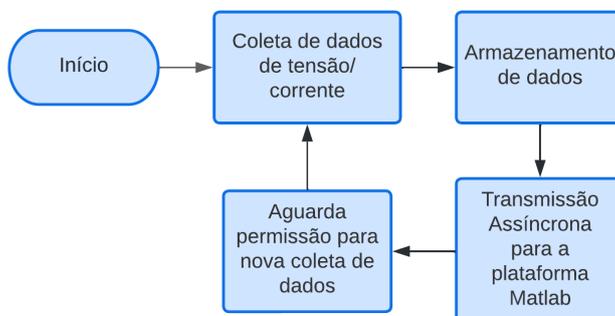


Figura 2: Fluxograma do código implementado na plataforma Arduino (próprios autores, 2022).

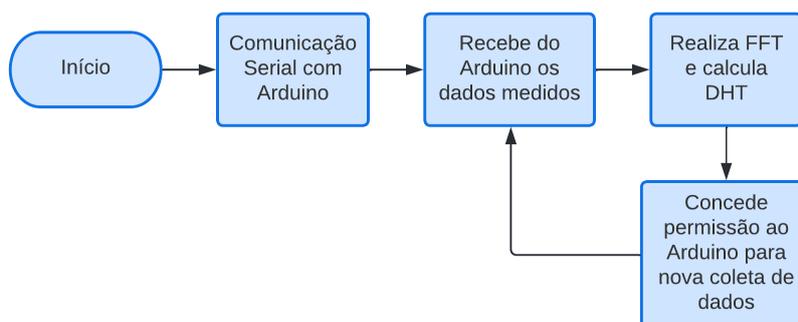


Figura 3: Fluxograma do código implementado na plataforma *Matlab* (próprios autores, 2022).

RESULTADOS E DISCUSSÕES:

O sistema proposto foi submetido a testes, envolvendo o acionamento de motores elétricos por chaves eletrônicas, para validar seu funcionamento. O motor utilizado como carga a ser acionada, possui os dados de placa mostrados na tabela 1.

Tabela 1: Dados do motor de indução trifásico (próprios autores, 2022).

Motor de indução trifásico - VOGES			
IP65	Isol: B	$\eta = 64\%$	$\epsilon = 0,68$
P= 1/4 cv	60 Hz	220V Δ	380V Y
I _p /I _n = 4	1695 rpm	1,11 A	0,64 A

O referido motor foi acionado por uma soft-starter SSW-06 da WEG e por um inversor de frequências CFW-11, também da fabricante WEG. As condições operacionais foram variadas enquanto o sistema de monitoramento harmônico registrava as formas de onda para corrente e tensão (no domínio do tempo e da frequência) para validação dos resultados em comparação com as medições obtidas simultaneamente por um analisador de qualidade de energia (modelo 5051-C da Minipa). A figura 4 ilustra a estação de testes montada.



Figura 4: Estação de testes do sistema proposto (próprios autores, 2022).

Como resultados, a figura 5 ilustra as formas de onda de tensão e corrente para a etapa de aceleração da *soft-starter*, enquanto a figura 6 ilustra suas respectivas representações no domínio da frequência.

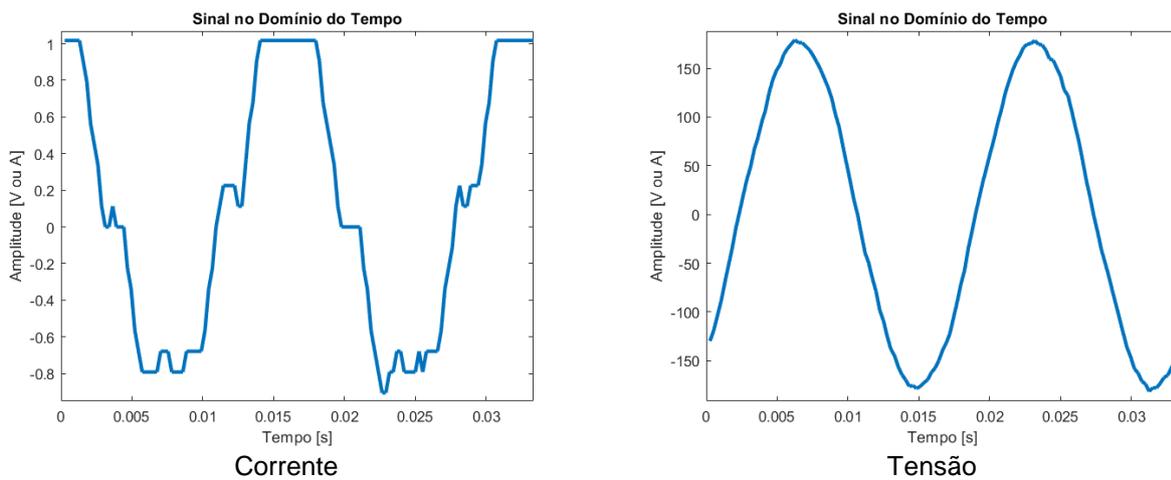


Figura 5: Formas de onda para aceleração da *soft-starter* no domínio do tempo (próprios autores, 2022).

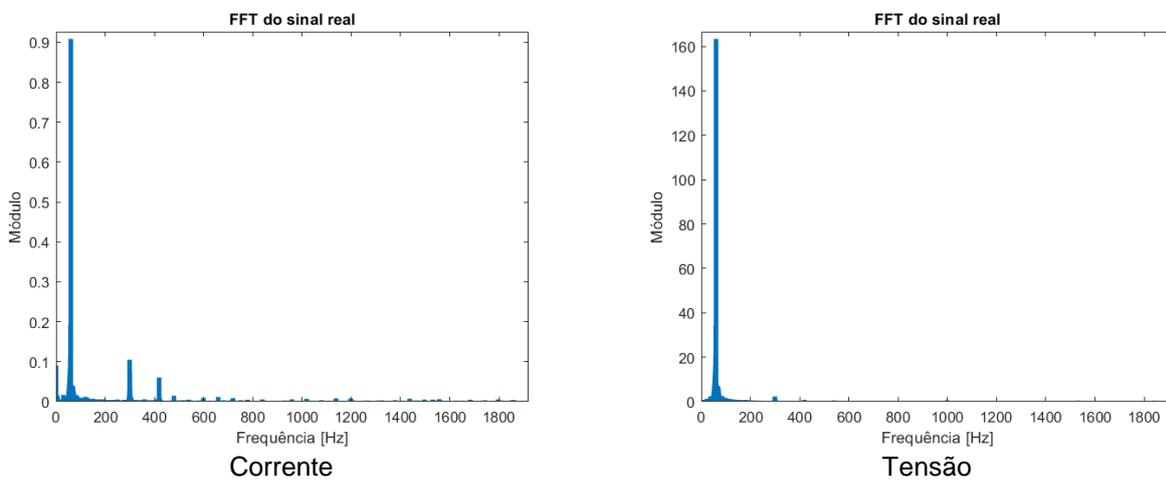


Figura 6: Formas de onda para aceleração da *soft-starter* no domínio da frequência (próprios autores, 2022).

O DHT calculado para a corrente foi de 13,8661%, observando-se maior contribuição das 5ª (300 Hz) e 7ª (420 Hz) harmônicas na distorção total. Em contrapartida, a forma de onda de tensão se manteve com poucas deformações, com DHT em 2.0578 %. É importante ressaltar que, analisando o comportamento dinâmico dos indicadores e dos formatos de onda, percebe-se que há mais distorções nos instantes de início da aceleração e fim da desaceleração da soft-starter, o que é justificado pela alteração mais significativa no formato da onda a ser disponibilizada para o motor.

De modo similar, a figura 7 ilustra as formas de onda de tensão e corrente para o caso de velocidade nominal do motor ao ser acionado pelo inversor de frequências. A figura 8 ilustra as respectivas representações no domínio da frequência.

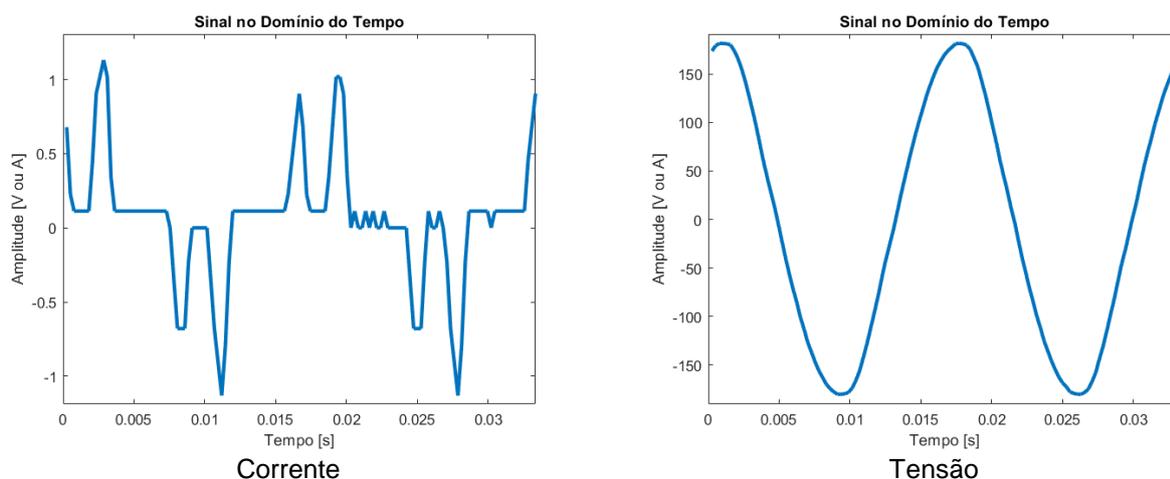


Figura 7: Formas de onda para inversor de frequência no domínio do tempo (próprios autores, 2022).

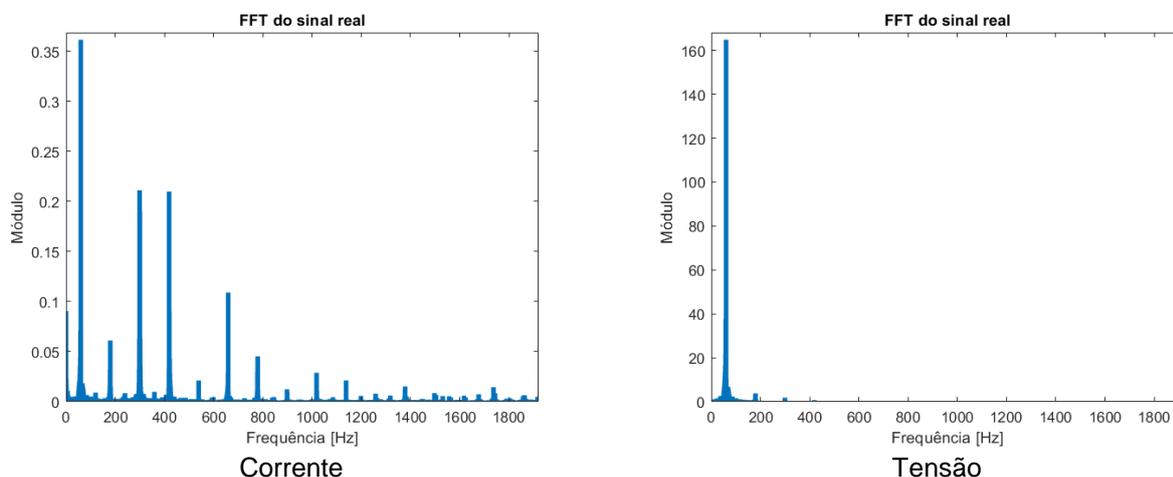


Figura 8: Formas de onda para inversor de frequências no domínio da frequência (próprios autores, 2022).

Na utilização do inversor de frequências, nota-se uma maior distorção na forma de onda de corrente, resultando em DHT de 91.4664%. Isto se justifica pelo fato de o inversor alterar de forma mais significativa o formato da tensão disponibilizada para a carga através de técnicas de modulação *SPWM*. No entanto, a deformação da corrente não é suficiente para distorcer a tensão de entrada, a qual permanece em formato senoidal e com DHT de 2.7812%. O motivo pelo qual a tensão não sofre deformações é em função da baixa corrente requerida pelo motor.

CONCLUSÕES:

Como objetivava-se, os sensores de tensão e corrente, bem como o *Arduino MEGA*, que foram utilizados na implementação do sistema para análise e monitoramento do conteúdo harmônico, são componentes de baixo custo e, por meio destes, foi possível obter resultados satisfatórios visto que, em comparação com medições

realizados pelo analisador de qualidade de energia, as formas de onda no domínio do tempo e da frequência, assim como os valores dos indicadores de distorção, foram similares nos testes realizados.

Os ensaios laboratoriais referentes a sinais emitidos pela *soft-starter* e pelo inversor de frequência no acionamento do motor elétrico mostraram-se coerentes. Como esperado, nas etapas de aceleração e desaceleração da *soft-starter* houve maior presença de harmônicos e, portanto, maior DHT de corrente e de tensão. Já na etapa de regime permanente, este índice se manteve baixo visto que o motor é alimentado diretamente pela rede por meio de uma chave de *by pass*. Para o inversor de frequência, notou-se um alto valor de DHT em toda a análise, o que indica significativa distorção harmônica dos sinais emitidos ao motor por meio deste equipamento que, além de auxiliar durante o processo de partida do motor, controla sua velocidade variando a frequência da tensão disponibilizada.

São possibilidades de desdobramento para este projeto: Inclusão de uma interface gráfica ao sistema desenvolvido, permitindo melhor interação entre usuário e o sistema, e a substituição do *Arduino MEGA* pelo *Arduino DUE*, que possui maior memória RAM, de forma a permitir a análise até a 40ª harmônica, conforme indica a legislação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) - Módulo 8: Qualidade da Energia Elétrica. Vigente a partir de 07/12/2021.

DECKMANN, S. M.; POMILIO, J. A. Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica. UNICAMP/FEEC/DSE - Campinas: 2020, versão revisada e atualizada.

DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; SANTOSO, S. and BEATY, H. W. Electrical Power Systems Quality. McGraw Hill – 2a ed., 2012.

INSTRUM, Instrumentos de Medição e Laboratório de Calibração. Analisador de energia ET-5062 Minipa (3000a true rms). Disponível em: <<https://www.instrumbrasil.com.br/eletrica/analizador-de-energia/analizador-de-energia-et-5062-minipa-3000a-true-rms.phtml>> Acesso em: 18 de fevereiro de 2021.

ROCHA, J. E. Qualidade da Energia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UFTP. Curitiba, 2016.

ROCHA, P. A. da. Plataforma de aquisição de dados e algoritmo não embarcado para medição de distorção harmônica na rede elétrica. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) - Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná – UFPR. Curitiba, 2016.