# CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS CAMPUS NEPOMUCENO

EDUARDA INÁCIO PACHECO

# ANÁLISE DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS DURANTE PARTIDAS DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

NEPOMUCENO 2024

## EDUARDA INÁCIO PACHECO

# ANÁLISE DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS DURANTE PARTIDAS DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. MSc. Márcio Wladimir Santana

NEPOMUCENO 2024

## EDUARDA INÁCIO PACHECO

# ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA EM MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Prof. MSc. Márcio Wladimir Santana CEFET-MG

Prof<sup>a</sup>. Dra. Cíntia Ribeiro Andrade CEFET-MG

Prof. Dr. Evandro José Ribeiro CEFET-MG

#### AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todos que contribuíram para a realização deste trabalho. Agradeço à minha instituição de ensino pelo suporte acadêmico e recursos disponibilizados. Um agradecimento especial ao meu orientador, cuja orientação e apoio foram fundamentais para o desenvolvimento deste estudo. Também sou grata aos colegas e professores que, com suas contribuições e feedbacks, ajudaram a aprimorar este trabalho. Finalmente, agradeço aos meus familiares e amigos pelo encorajamento e suporte durante o processo de elaboração deste trabalho.

"O sucesso é a soma de pequenos esforços repetidos dia após dia." Robert Collier

#### **RESUMO**

O extenso uso de motores de indução deve-se ao fato de grande parte da energia elétrica utilizada industrialmente ser em corrente alternada. Os motores de indução trifásicos, em particular, são amplamente utilizados nas indústrias devido ao seu alto rendimento e baixo custo de manutenção. Um dos fatores que contribui para a redução de seu rendimento e aumento da manutenção é a presença de distúrbios de qualidade da energia elétrica (QEE) na tensão de alimentação, como o desequilíbrio de tensão, a distorção harmônica de tensão/corrente e as variações de tensão de curta duração (VTCD). Do total da energia fornecida pelas concessionárias, cerca de 50% são consumidas no setor industrial. Neste setor, mais de dois terços da demanda está relacionada aos motores. Diante disso, a necessidade de pesquisas avaliando o comportamento dos motores com relação à qualidade de energia elétrica mostra-se importante. O objetivo principal deste trabalho foi realizar medições das distorções harmônicas de tensão e corrente na partida e em regime permanente em motores de indução trifásicos, utilizando os métodos de partida direta e inversor de frequência. Para isso, foi utilizado o analisador de qualidade de energia MAR 722 da Megabrás. Os resultados foram comparados com os parâmetros estabelecidos no Módulo 8 do PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, da ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, e indicam que a partida direta preserva a qualidade da tensão dentro dos limites normativos, embora ocorram distorções de corrente consideráveis. No entanto, após a instalação do inversor de frequência, houve um aumento significativo nas distorções harmônicas de tensão, o que requer atenção extra para garantir a conformidade com os padrões de qualidade.

Palavras-chave: Motor de indução. Qualidade de energia elétrica. Distorção Harmônica.

## ABSTRACT

The extensive use of induction motors is due to the fact that a large portion of the electrical energy used industrially is in alternating current. Three-phase induction motors, in particular, are widely used in industries due to their high efficiency and low maintenance costs. One of the factors contributing to the reduction in efficiency and increased maintenance is the presence of power quality disturbances (PQD) in the supply voltage, such as voltage imbalance, harmonic distortion of voltage/current, and short-duration voltage variations (SDVV). Of the total energy supplied by utilities, about 44% is consumed in the industrial sector. In this sector, more than two-thirds of the demand is related to motors. Therefore, the need for research evaluating the behavior of motors concerning power quality is essential. The main objective of this study was to measure the harmonic distortions of voltage and current during startup and steady-state operation of three-phase induction motors using direct-on-line (DOL) starting and frequency inverters. For this purpose, a MAR 722 power quality analyzer from Megabrás was used. The results were compared with the parameters established in Module 8 of PRODIST – Distribution Procedures for Electrical Energy in the National Electric System, by ANEEL - National Electric Energy Agency, and indicate that DOL starting preserves voltage quality within normative limits, although considerable current distortions occur. However, after the installation of the frequency inverter, there was a significant increase in harmonic distortions of voltage, which requires extra attention to ensure compliance with quality standards. Keywords: Induction Motor. Power Quality. Harmonic Distortion.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Construção do motor de indução trifásico	15
Figura 2– Circuito de comando e de força de uma partida direta	17
Figura 3 – Diagrama da chave de partida com Inversor de Frequência	18
Figura 4 - Inversor de Frequência ACS355	19
Figura 5 -Representação da decomposição de um sinal distorcido	22
Figura 6 - Presença de terceira e quinta harmônica no sinal fundamental	23
Figura 7 - Deformação da senoide fundamental	23
Figura 8 - Onda fundamental com sua harmônica n = 5	24
Figura 9 - Onda resultante da soma da onda da tensão e da harmônica n = 5	24
Figura 10 - Funcionamento do filtro ativo	25
Figura 11 - Filtro passivo	26
Figura 12 - Analisador de Qualidade de Energia MAR722	32
Figura 13 - Motor de Indução Trifásico	35
Figura 14 - Placa de Identificação do Motor	36
Figura 15 - Configuração da partida direta do motor de indução trifásico	37
Figura 16 - Ponto de medição antes do inversor de frequência	38
Figura 17 - Ponto de medição depois do inversor de frequência	39
Figura 18 - Imagem do Inversor de Frequência ACS355	10
Figura 19 - Etiqueta e Número de Patrimônio	41
Figura 20 - Resultados das distorções harmônicas de tensão na partida direta	45
Figura 21 - Resultados das distorções harmônicas de tensão no regime permanente da partic	da
direta	17
Figura 22 - Resultados das distorções harmônicas de corrente na partida direta	50
Figura 23 - Resultados das distorções harmônicas de tensão na partida antes do Inversor o	de
Frequência	52
Figura 24 - Resultados das distorções harmônicas de tensão no regime permanente da partic	da
antes do Inversor de Frequência	54
Figura 25 - Resultados das distorções harmônicas de corrente na partida antes do Invers	or
de Frequência	57
Figura 26 - Resultados das distorções harmônicas de tensão na partida depois do Inversor o	de
Frequência	59
Figura 27 - Resultados das distorções harmônicas de tensão no regime permanente da partic	da
depois do Inversor de Frequência	51

Figura 28 -	Resultados	das di	storções	harmônica	s de	corrente	na pa	rtida	depois d	lo I	nversor	de
Frequência	•••••									•••••		.63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Funções dos elementos de um motor de indução    1	5
Tabela 2- Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental)29	9
Tabela 3 - Valores de referência globais das distorções harmônicas totais (em percentagem da	a
tensão fundamental)29	9
Tabela 4 - Limites de distorção de corrente para sistemas com tensão nominal de 120 V a 69	9
kV3	1
Tabela 5 -Modo de medição MAR722	3
Tabela 6 - Características do motor de indução trifásico    30	5
Tabela 7- THD e harmônicas individuais na partida direta44	4
Tabela 8- THD e harmônicas individuais no regime permanente       40	5
Tabela 9- THD e harmônicas de corrente individuais na partida direta48	3
Tabela 10- THD e harmônicas individuais no regime permanente       49	9
Tabela 11 - THD e harmônicas individuais na partida antes do Inversor de Frequência5	1
Tabela 12- THD e harmônicas individuais no regime permanente       52	3
Tabela 13 - THD e harmônicas individuais na partida antes do Inversor de Frequência5	5
Tabela 14- THD e harmônicas individuais no regime permanente    50	5
Tabela 15- THD e harmônicas individuais na partida depois do Inversor de Frequência58	8
Tabela 16- THD e harmônicas individuais no regime permanente       60	)
Tabela 17- THD e harmônicas individuais na partida depois do Inversor de Frequência62	2
Tabela 18- THD e harmônicas individuais no regime permanente    62	2
Tabela 19 - Análise THD das tensões na partida e em regime permanente       64	4

# **SUMÁRIO**

1. 1.1.	INTRODUÇÃO
1.1.1.	Objetivo principal13
1.1.2.	Objetivos específicos13
2. 2.1.	REFERENCIAL TEÓRICO
2.2.	Métodos De Partidas16
2.2.1.	Partida Direta16
2.2.2.	Partida Com Inversor De Frequência18
2.3.	ACS355 - Inversor De Frequência18
2.4.	Qualidade De Energia Elétrica20
2.4.1.	Distorções Harmônicas21
2.4.2.	Medidas de mitigação de harmônicos25
2.4.2.1.	Filtro ativo25
2.4.2.2.	Filtro passivo
2.4.3.	Módulo 8 – PRODIST
2.4.3.1.	Indicadores de distorções Harmônicas27
2.4.4.	Normativa IEEE Std 519-2014
2.5.	MAR722 - Analisador de Qualidade de Energia31
3. 3.1.	METODOLOGIA
3.2.	Partida Com Inversor De Frequência
3.2.1.	Parametrização Do Inversor De Frequência ACS355
4. 4.1.	RESULTADOS E DISCUSSÕES    43      Partida Direta    43
4.1.1.	Distorções harmônicas de corrente47
4.2.	Partida com o Inversor de Frequência50
4.2.1.	Ponto de medição antes do Inversor de Frequência51

4.2.1.1.	Distorção harmônica de corrente	54
4.2.2.	Ponto de medição depois do Inversor de Frequência	57
4.2.2.1.	Distorção harmônica de corrente	61
4.3.	Resultados gerais	64
5.	CONCLUSÃO REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66 67

## 1. INTRODUÇÃO

Os motores de indução trifásicos são amplamente utilizados, especialmente em indústrias, representando aproximadamente 25% da demanda elétrica no Brasil, correspondendo a 50% da carga industrial. A principal vantagem desse motor reside em sua capacidade de operar sem contato direto com os enrolamentos do rotor, resultando em um equipamento robusto e com custos de manutenção reduzidos (CAMARGO, 2022). A necessidade de investigar o comportamento dos motores em relação ao rendimento e ao conjugado torna-se evidente diante dessas circunstâncias. A presença de distúrbios de qualidade da energia elétrica (QEE) na alimentação dos motores é um dos fatores que contribui para a diminuição da vida útil e, consequentemente, aumento na manutenção e paradas de processos produtivos.

Os estudos voltados para a qualidade da energia elétrica têm assumido uma importância significativa, envolvendo concessionárias, pesquisadores, órgãos reguladores e, especialmente, os consumidores. Todos esses agentes buscam normatização, identificação, qualificação e redução das causas de distúrbios elétricos. Destaca-se que a tensão fornecida pelas concessionárias pode apresentar distúrbios que a afastam do padrão adequado para um sistema elétrico. Dentre esses distúrbios, incluem-se distorções harmônicas, variação do fator de potência, flutuações de tensão de curta e longa duração, desequilíbrios de tensão, flutuações e variações de frequência. Segundo Neves (2014), esses fenômenos podem impactar o desempenho dos dispositivos conectados à rede, causando efeitos desde mínimos até significativos. Por tais razões, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) desenvolveu um manual de Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, fornecendo conceitos e estabelecendo limites para esses fenômenos (ANEEL, 2018).

Este estudo analisou as distorções harmônicas de tensão e corrente durante a partida e em regime permanente de um motor de indução trifásico, utilizando os métodos de partida direta e com inversor de frequência. No Capítulo 1, foram definidos os objetivos e a importância da pesquisa. O Capítulo 2 abordou os fundamentos dos motores de indução, métodos de partida, qualidade de energia elétrica e os requisitos do Módulo 8 do PRODIST da ANEEL. No Capítulo 3, foram detalhados os procedimentos experimentais, incluindo a seleção do motor e o uso do analisador de qualidade de energia.

O Capítulo 4 apresentou e discutiu os resultados das medições das distorções harmônicas, comparando os métodos de partida e avaliando a conformidade com os limites normativos. Concluindo, o Capítulo 5 resumiu os resultados do estudo, destacando a conformidade com os parâmetros normativos.

## 1.1. Objetivos

#### 1.1.1. Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar o comportamento das distorções harmônicas de tensão e corrente em motores de indução trifásicos, tanto na partida quanto em regime permanente, ao utilizar os métodos de partida direta e inversor de frequência.

## 1.1.2. Objetivos específicos

1. Medir as distorções harmônicas de tensão e corrente nos motores durante a partida e em regime permanente.

2. Analisar os dados obtidos para identificar os impactos nos métodos de partida direta e inversor de frequência.

 Comparar os resultados com os parâmetros estabelecidos no Módulo 8 do PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, da ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica.

4. Verificar a conformidade dos resultados com os padrões normativos de qualidade de energia elétrica.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

#### 2.1. Motores De Indução Trifásicos

O motor elétrico é uma máquina projetada para converter energia elétrica em energia mecânica. O motor de indução destaca-se como o tipo mais utilizado, reunindo as vantagens da energia elétrica, como baixo custo, facilidade de transporte, limpeza e simplicidade de controle, com sua construção simples e grande adaptabilidade às diversas cargas, além de proporcionar bons rendimentos (WEG, 2021).

Esses tipos de motores operam com base no princípio da indução eletromagnética, onde um campo magnético giratório é gerado pela corrente que percorre os enrolamentos (bobinas). A intensidade desse campo depende da corrente elétrica nos enrolamentos em um determinado momento, sendo máxima quando a corrente atinge seu valor máximo e mínima ou nula quando a corrente é mínima ou zero. Conforme Henrique (2007) explica, esse campo magnético giratório corta os condutores do rotor, induzindo corrente neles. A corrente induzida cria um campo magnético ao redor dos condutores do rotor, tentando alinhar-se com o campo do estator. Contudo, devido à rotação contínua do campo do estator, o rotor não consegue acompanhar esse alinhamento. Assim, a velocidade do rotor é sempre inferior à velocidade síncrona, que é a velocidade do campo magnético giratório.

Nos motores de indução trifásicos, o funcionamento é essencialmente dividido entre o estator e o rotor. O estator, uma parte fixa do motor, abriga os enrolamentos das bobinas e é uma presença comum em diversas máquinas. Por outro lado, o rotor constitui a parte girante do motor e é construído com um material ferromagnético, apresentando uma superfície cilíndrica com ranhuras. Existem dois tipos principais de rotores: o rotor bobinado, que possui anéis coletores no eixo e enrolamentos não conectados a nenhuma fonte de alimentação, e o rotor de gaiola, construído com lâminas de aço (ou outros materiais) com condutores paralelos ao eixo e embutidos nas fendas ao redor do núcleo (SANTOS, 2011). A Figura 1 demonstra a parte interna do motor de indução trifásico (MIT).



Figura 1 - Construção do motor de indução trifásico

A Tabela 1 apresenta uma descrição detalhada dos principais componentes de um motor de indução trifásico, conforme ilustrado na imagem fornecida. Cada componente desempenha um papel fundamental no funcionamento do motor, desde a geração e controle do campo magnético até a transmissão de movimento e a proteção dos elementos internos.

Componente	Descrição
Ventoinha	Componente que promove a refrigeração do
ventonina	motor, dissipando o calor gerado.
	Contém informações importantes sobre o
Placa de Identificação	motor, como potência, tensão, corrente e
	outras especificações técnicas.
Olhal	Gancho utilizado para facilitar o transporte e
Onnar	manuseio do motor.
Caiva de Ligações	Compartimento onde são feitas as conexões
	elétricas do motor.

Tabela 1- Funções dos elementos de um motor de indução

Fonte: SANTOS, 2011, p. 4.

Enrolamentos Estator	Bobinas de fio condutor que geram o campo magnético necessário para a operação do
	motor.
Chaveta	Elemento de ligação entre o eixo e o rotor,
	garantindo a transmissão de torque.
Fixo	Componente que transmite a rotação gerada
	pelo motor para a máquina acionada.
Rolamento	Suporta o eixo, permitindo sua rotação com
Kolamento	o mínimo de atrito.
Rotor	Parte móvel do motor que gira dentro do
Kotor	estator, gerando o movimento rotativo.
	Estrutura externa que protege os
Carcaça	componentes internos do motor e ajuda na
	dissipação de calor.

Fonte: Adaptado de SANTOS, 2011.

#### 2.2. Métodos De Partidas

A etapa de partida desses motores é de extrema importância em seu funcionamento, e uma variedade de métodos é empregada para iniciar o funcionamento do motor e gerenciar a corrente de partida. A escolha do método de partida adequado é influenciada por diversos fatores, como o tipo de carga acoplada ao motor, as condições da rede elétrica, a necessidade de limitar a corrente de partida para evitar quedas de tensão significativas, bem como os requisitos específicos de controle de torque e aceleração. Além disso, considerações econômicas, como o custo de instalação e operação, também desempenham um papel crucial na seleção do método de partida mais apropriado para cada aplicação.

### 2.2.1. Partida Direta

A maneira mais simples de partir um motor de indução é a partida direta, onde o motor é conectado diretamente à rede através de um contator, recebendo a tensão nominal em seus terminais. Um motor de rotor em gaiola pode ser iniciado a plena carga, com a corrente aumentando de 4 a 8 vezes a corrente nominal, dependendo do tipo e número de pólos. Durante a partida, o conjugado atinge aproximadamente 1,5 vezes o valor nominal. Essa elevação brusca da demanda de energia pode provocar flutuações na rede elétrica e afetar outros dispositivos conectados. Portanto, a partida direta é mais apropriada para motores de menor potência, geralmente até 3,7 kW (5 cv), conforme estabelecido pela norma NBR-5410, quando a alimentação é fornecida por concessionária de energia que não define limites. Para motores com potência acima desse valor, em instalações alimentadas diretamente pela rede de distribuição pública em baixa tensão, é necessário consultar a empresa distribuidora local. Esse método é especialmente adequado quando o motor está operando a vazio ou com cargas leves, onde os impactos da corrente de partida elevada são menos críticos (ABNT, 2004). Essa abordagem de partida não requer dispositivos especiais de acionamento do motor. Apenas contatores, interruptores ou chaves interruptoras são empregados para possibilitar a alimentação do motor com plena tensão no momento da partida (SOUZA, 2009).

A Figura 2 mostra o circuito de comando e de força de uma partida direta, detalhando o esquema e a configuração dos componentes envolvidos.



Figura 2- Circuito de comando e de força de uma partida direta

Fonte: MASCHERONI, 2012, p. 38.

## 2.2.2. Partida Com Inversor De Frequência

O inversor de frequência é um dispositivo eletrônico essencial no controle de motores de indução trifásicos, utilizado tanto para a partida quanto para o ajuste da velocidade desses motores. Esse equipamento permite a variação simultânea da tensão e da frequência fornecida ao motor, o que possibilita um controle preciso de sua velocidade e da potência consumida. O processo de funcionamento do inversor de frequência envolve a retificação do sinal de entrada, convertendo-o em corrente contínua (CC) em um link CC, a partir do qual é gerado um sinal trifásico com a frequência ajustada conforme as necessidades da aplicação. Esse método oferece uma operação mais eficiente e versátil do motor, proporcionando não apenas uma partida suave, mas também a capacidade de controlar com precisão a velocidade e o desempenho do motor de acordo com as exigências do sistema (FRANCHI, 2009). Por essas características, o inversor de frequência é amplamente utilizado em aplicações que demandam flexibilidade operacional, economia de energia e maior controle sobre o processo industrial. A Figura 3 apresenta o diagrama da chave de partida com inversor de frequência, ilustrando a configuração e o funcionamento do sistema de partida controlado por inversor.





#### 2.3. ACS355 - Inversor De Frequência

O inversor de frequência ACS355, desenvolvido pela ABB, utilizado nos experimentos deste estudo, é um dispositivo de controle de motores projetado para otimizar a operação de motores de indução trifásicos em diversas aplicações industriais e comerciais. Este equipamento se destaca por sua capacidade de ajustar a velocidade e o torque dos motores de

Fonte: Adaptado de MASCHERONI, 2005.

maneira eficiente, contribuindo para a melhoria do desempenho dos processos e a economia de energia.

Os inversores oferecem um controle preciso e flexível da velocidade do motor, utilizando tecnologia de modulação por largura de pulso (PWM - Pulse Width Modulation) para ajustar a frequência e a tensão fornecidas ao motor. Isso permite um controle fino sobre o funcionamento do motor, adequando-se a diferentes tipos de cargas e requisitos operacionais (ABB, 2018). Além de sua capacidade de controle, o inversor é reconhecido por sua eficiência energética. O ajuste da velocidade do motor de acordo com a demanda do processo reduz o consumo desnecessário de energia, resultando em economia significativa e redução dos custos operacionais. Essa característica é especialmente vantajosa em aplicações onde o motor opera com variação de carga, como em sistemas de bombeamento, ventiladores e transportadores. A Figura 4 mostra a estrutura do inversor de frequência ACS355.

Figura 4 - Inversor de Frequência ACS355



Fonte: ABB, 2018.

A tecnologia dos inversores inclui diversas funcionalidades avançadas, como proteção contra sobrecarga, monitoramento de falhas e controle de malha fechada, que contribuem para a segurança e a confiabilidade do sistema. A capacidade de integração com redes de comunicação industrial também permite que o inversor se conecte a sistemas de automação existentes, facilitando a implementação em infraestruturas industriais complexas (ABB, 2018).

O processo de retificação em inversores de frequência pode introduzir distorções harmônicas no sistema de energia, afetando a qualidade da energia elétrica. Esse fenômeno ocorre devido a vários fatores inerentes ao funcionamento do inversor (IEEE, 2014):

- Retificador: O inversor inicia a conversão da tensão alternada (CA) para tensão contínua (CC) através de um retificador. Durante essa conversão, a forma de onda CA é transformada em uma forma de onda pulsante que contém harmônicos. Esses harmônicos podem se propagar pelo sistema, causando distorções.
- Filtro de Saída: Embora filtros de saída sejam utilizados para suavizar a forma de onda pós-retificação, eles nem sempre conseguem eliminar completamente os harmônicos gerados durante a retificação e o chaveamento. Como resultado, algumas dessas distorções ainda podem ser transmitidas para a carga.
- Chaveamento dos Semicondutores: Dispositivos como IGBTs (Transistores Bipolares de Porta Isolada) realizam chaveamento rápido entre os estados ligado e desligado. Essa alternância de alta frequência cria uma forma de onda de tensão não senoidal, introduzindo novos harmônicos no sistema.
- Modulação por Largura de Pulso (PWM): A técnica de PWM é empregada para aproximar a forma de onda senoidal desejada. No entanto, o processo de chaveamento envolvido gera distorções adicionais, resultando na introdução de harmônicos que podem comprometer a qualidade da energia elétrica.

Em suma, o inversor de frequência é uma ferramenta poderosa e versátil para o controle de motores, oferecendo benefícios significativos em termos de eficiência energética, flexibilidade operacional e facilidade de uso. Sua aplicação em diversas indústrias demonstra sua eficácia e confiabilidade, tornando-o uma escolha preferencial para a otimização de processos industriais. No entanto, o processo de retificação e chaveamento nos inversores de frequência é uma fonte comum de distorções harmônicas, e a mitigação desses efeitos requer o uso de estratégias adequadas de controle e filtragem.

## 2.4. Qualidade De Energia Elétrica

O termo qualidade da energia abrange uma variedade de fenômenos, desde questões relacionadas aos sistemas de energia elétrica até problemas de comunicação em redes de transmissão de dados. Esses fenômenos devem ser reconhecidos e divulgados por todos os setores envolvidos na geração, transmissão e consumo de energia elétrica. A interpretação

desses fenômenos, especialmente distorções em tensões e correntes, tanto nos pontos de acoplamento comuns (PACs) quanto nas instalações dos consumidores, está diretamente ligada à correção do fator de potência, eficiência energética e aumento da produtividade. A ocorrência desses problemas destaca a necessidade de colaboração entre as partes para encontrar soluções práticas e econômicas. Em termos gerais, especialistas na área definem a perda de qualidade da energia como qualquer desvio na magnitude, forma de onda ou frequência da tensão e/ou corrente elétrica, resultando em falhas ou operação inadequada de equipamentos elétricos (PAULILO, 2013).

Na qualidade do produto da energia elétrica, devemos considerar alguns aspectos em regime permanente ou transitório como:

- Harmônicos de corrente e tensão;
- As variações de tensão de curta duração (Elevação e Afundamentos de Tensão);
- A flutuação de tensão;
- Transientes e outros distúrbios de forma de onda;
- Os desequilíbrios de tensão;
- O fator de potência;
- Variação de frequência.

Aprimoramentos na qualidade da energia levam a redução de gastos com manutenção, paralisações e substituição de equipamentos devido a danos, contribuindo para o aumento da produção e a competitividade da empresa. Atualmente, a confiabilidade desempenha papel crucial na redução de custos. Um sistema elétrico com uma onda senoidal sem interferências significativas, ou seja, puro e sem alterações em amplitude e frequência, é classificado como excelente em qualidade (EMF, 2021).

## 2.4.1. Distorções Harmônicas

As distorções harmônicas de tensão referem-se a fenômenos relacionados a deformações nas formas de onda de tensões e correntes em comparação com a onda senoidal da frequência fundamental (ANEEL, 2018). Uma onda senoidal tem uma frequência de 60 Hz, portanto, se forem observadas formas de onda distorcidas, há uma alta probabilidade de a rede conter componentes harmônicas. Essas harmônicas são causadas por cargas, geralmente, não lineares, sendo a alteração na forma de onda geralmente associada à presença de dispositivos eletrônicos como inversores de frequência, fontes chaveadas e outros acionamentos.

As cargas lineares mantêm uma relação proporcional entre corrente e tensão, preservando a forma de onda senoidal, como ocorre com resistores e capacitores. Em contraste,

cargas não lineares, como inversores de frequência e fontes chaveadas, deformam a forma de onda da corrente em relação à tensão aplicada, gerando distorções harmônicas. Essas distorções afetam a qualidade da energia elétrica e exigem medidas para controle e mitigação desses efeitos (EICHELBERGER, 2008).

As cargas, não lineares, têm tensão em seus terminais que não correspondem ao produto da impedância pela corrente que flui por elas. Quando uma carga não linear é submetida a uma tensão puramente senoidal, ela gera uma corrente distorcida. Essa corrente se propaga pela rede, resultando em várias tensões distorcidas. Mesmo as cargas lineares conectadas à rede podem apresentar tensão com conteúdo harmônico. Embora indutores e capacitores não gerem harmônicas, eles podem amplificar os níveis harmônicos existentes (BRITO, 2006). A Figura 5 ilustra a decomposição de uma onda com distorção harmônica.



Figura 5 - Representação da decomposição de um sinal distorcido

Fonte: Adaptado de MARTINHO, 2012.

O somatório de várias frequências em uma senoide torna a forma de onda inicial distorcida, isso pode ser representado nas Figuras 6 e 7.



Figura 6 - Presença de terceira e quinta harmônica no sinal fundamental

Fonte: Adaptado de MARTINHO, 2012.

Figura 7 - Deformação da senoide fundamental



Fonte: MARTINHO, 2012, p. 79.

Como se pode observar, a soma dos sinais de 60Hz com os sinais de 180Hz e 300Hz distorce o sinal original, transformando-o de uma senoide em um sinal periódico simples.

De acordo com Martinho (2012), os harmônicos são de natureza constante e não temporária. Isso significa que os harmônicos se distinguem dos transitórios, afundamentos de tensão ou elevações. Por serem um fenômeno permanente, os harmônicos exigem um tratamento mais detalhado e cuidadoso. A Figura 8 ilustra a componente fundamental da tensão e sua quinta harmônica.



Figura 8 - Onda fundamental com sua harmônica n = 5



Desta forma, a Figura 9 ilustra a forma de onda da tensão resultante da combinação entre a componente fundamental e a sua quinta harmônica.





Fonte: OLIVEIRA, 2013, p.51.

A mudança na forma de onda é um distúrbio característico, frequentemente associado ao uso de dispositivos como conversores de frequência, fontes chaveadas e outros equipamentos eletrônicos.

Alguns fenômenos transitórios, como a energização de transformadores, podem gerar harmônicas na rede. No entanto, esses fenômenos não são considerados no cálculo dos indicadores, que não se aplicam a eventos transitórios ou de curta duração (ONS, 2011).

Para minimizar os impactos causados pelos harmônicos nos motores de indução trifásicos, é essencial implementar medidas de mitigação. Isso pode ser realizado por meio da aplicação de estratégias como a utilização de filtros passivos ou ativos, reatores de linha, transformadores especiais e dispositivos projetados para suprimir os harmônicos.

#### 2.4.2. Medidas de mitigação de harmônicos

Os filtros harmônicos são dispositivos projetados para diminuir as distorções de corrente e tensão em um barramento específico a níveis aceitáveis. A instalação desses filtros oferece diversos benefícios, incluindo a redução de falhas e operações inadequadas de equipamentos, a diminuição das perdas elétricas no sistema, o prolongamento da vida útil de transformadores e motores, e a conformidade dos indicadores com os limites normativos (BONELLI, 2022).

Os sistemas de filtragem harmônica podem ser divididos em filtros harmônicos ativos e filtros harmônicos passivos.

### 2.4.2.1. Filtro ativo

O filtro ativo é constituído por componentes ativos que geram os harmônicos necessários para compensar a carga não linear, eliminando efetivamente a presença desses harmônicos na rede. Existem dois tipos principais de filtros ativos: o filtro ativo em paralelo e o filtro ativo em série (PIRES, 2010). O filtro ativo em série é instalado em série com a carga, proporcionando uma atenuação direta das harmônicos, enquanto o filtro ativo em paralelo é conectado em paralelo à carga, gerando harmônicos opostos para neutralizar as distorções. Ambos os tipos de filtros ativos oferecem soluções personalizadas para melhorar a qualidade da energia, cada um com vantagens específicas em diferentes contextos de aplicação.

A Figura 10 ilustra o funcionamento do filtro ativo, demonstrando como ele opera para reduzir distorções harmônicas e melhorar a qualidade da energia elétrica no sistema.



Figura 10 - Funcionamento do filtro ativo

Fonte: MARTINHO, 2012, p. 118.

Conforme ilustrado na figura, os filtros ativos operam em três estágios. No primeiro estágio, são realizadas medições das harmônicas de correntes presentes na rede, originadas pela carga. No segundo estágio, é aplicada uma corrente contrária à corrente harmônica detectada.

Por fim, no terceiro estágio, a forma de onda resultante é representada após a aplicação eficaz do filtro (MARTINHO, 2012).

#### 2.4.2.2. Filtro passivo

Os filtros passivos-série são empregados para impedir que uma frequência específica (ou uma faixa de frequências) tenha acesso a uma determinada parte do sistema. Semelhante a uma bobina de bloqueio, esse filtro consiste em um capacitor e um indutor em paralelo. Apesar de ser uma solução eficaz, é raramente adotada. Um dos principais inconvenientes é que o filtro deve suportar toda a corrente que passa no ponto específico do sistema onde está instalado (PIRES, 2010). A Figura 11 mostra a composição do filtro passivo.

Figura 11 - Filtro passivo



Fonte: SCHNEIDER, 2003, p. 18.

Conforme destacado por Martinho (2012), o filtro passivo, independentemente da aplicação, é completamente vinculado às características do circuito ao qual está conectado. Dessa forma, sua eficácia depende da corrente, tensão, frequência e impedância da rede. Portanto, a implementação de um filtro passivo requer uma análise detalhada do sistema, assegurando que não sofra modificações ao longo de sua vida útil, garantindo a minimização ou eliminação de suas funções.

#### 2.4.3. Módulo 8 – PRODIST

O Módulo 8 do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) é uma parte do conjunto de normas e procedimentos estabelecidos pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) no Brasil. Ele trata especificamente dos critérios de qualidade de energia elétrica que devem ser seguidos pelas distribuidoras e consumidores conectados ao sistema elétrico de distribuição. A norma tem como principais objetivos estabelecer procedimentos relacionados à qualidade do fornecimento de energia elétrica na distribuição abrangendo a qualidade do produto, a qualidade do serviço, a qualidade comercial e segurança do trabalho e instalações. Isso inclui a definição de fenômenos ligados à qualidade do produto, que se refere à conformidade da onda de tensão em regime permanente e transitório. Este aspecto envolve a especificação de indicadores, valores de referência, metodologia de medição e gestão de reclamações (ANEEL, 2018).

O documento propõe a definição de fenômenos relacionados à qualidade do serviço, contemplando a continuidade do fornecimento de energia elétrica. Isso implica na formulação de uma metodologia para apuração de indicadores de continuidade, atendimento a ocorrências emergenciais, estabelecimento de padrões e responsabilidades. Também define os critérios de qualidade de energia elétrica, estabelecendo limites para distorções harmônicas, desequilíbrio de tensão e variações de tensão de curta duração, o que ajuda a garantir a segurança do trabalho e das instalações elétricas, prevenindo falhas e riscos para os trabalhadores. Além disso, o módulo estabelece procedimentos para a apuração da qualidade comercial, incluindo o atendimento ao cliente, o tratamento de reclamações e a gestão de acidentes de trabalho e com terceiros, promovendo um ambiente de trabalho seguro e eficiente (ANEEL, 2018).

## 2.4.3.1. Indicadores de distorções Harmônicas

As harmônicas, cujas formas de onda de tensão ou corrente podem ser representadas por elementos senoidais com frequências múltiplas da frequência fundamental, são descritas pela Equação 1.

$$f_h = (h) x \left( f_{fundamental} \right) \tag{1}$$

onde:  $f_h$  é a frequência da harmônica, h é a ordem harmônica,  $f_{fundamental}$  é a frequência fundamental da rede.

As distorções harmônicas têm aumentado significativamente ao longo do tempo em ambientes industriais, principalmente devido ao crescimento das cargas não lineares. Como resultado, a mitigação dos harmônicos se tornou cada vez mais necessária. Os harmônicos são classificados em sequência positiva, sequência negativa e sequência zero. As correntes harmônicas de sequência positiva incluem as harmônicas de 7<sup>a</sup>, 13<sup>a</sup> e 19<sup>a</sup> ordem. As harmônicas de sequência negativa, como as de 5<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup> e 17<sup>a</sup> ordem, contribuem para o aumento do índice de Distorção Harmônica Total (THD) do sistema. Já as correntes harmônicas de sequência zero

pertencem às ordens múltiplas de três, como 3<sup>a</sup>, 9<sup>a</sup> e 15<sup>a</sup>, circulando pelo condutor neutro e podendo causar superaquecimento do fio (ANEEL, 2018).

Cada harmônico possui sua própria fase e módulo. Em sistemas elétricos, os harmônicos de ordem par geralmente são nulos, devido ao funcionamento simétrico e periódico dos dispositivos. Harmônicos de ordem elevada tendem a ser menores, principalmente porque as variações são suavizadas pela presença de indutâncias no sistema. A presença de harmônicos pares pode indicar um desajuste no controle dos semicondutores, enquanto harmônicos elevados podem ser sinal de variações bruscas de tensão ou corrente (RIBEIRO, 2007, p. 22)

A distorção harmônica individual de tensão de ordem h pode ser calculada por meio da Equação 2.

$$DIT_h\% = \frac{v_h}{v_1} x 100$$
 (2)

onde: h = ordem harmônica individual.

A distorção harmônica total de tensão pode ser calculada por meio da Equação 3.

$$DTT_p \% = \frac{\sum_{h=2}^{h \max V_1^2}}{V_1} x 100$$
(3)

onde: h = todas as ordens harmônicas de 2 até hmáx, h max = conforme a classe A ou S.

A distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3 pode ser calculada pela Equação 4.

$$DTT_p\% = \frac{\sum_{h=2}^{h\max} v_h^2}{v_1} x 100$$
(4)

onde: h = todas as ordens harmônicas pares, não múltiplas de 3 (h = 2, 4, 8, 10, 14, 16, 20...).

A distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3 pode ser calculada por meio da Equação 5.

$$DTT_i\% = \frac{\sum_{h=5}^{h\max} v_h^2}{v_1} x100$$
(5)

onde: h = todas as ordens harmônicas ímpares, não múltiplas de 3 (h = 5, 7, 11, 13, 17, 19...).

É possível calcular a distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3 por meio da Equação 6.

$$DTT_3\% = \frac{\sum_{h=5}^{h\max} v_h^2}{v_1} x100$$
(6)

onde: h = todas as ordens harmônicas múltiplas de 3 (h = 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30...).

Os limites para as distorções harmônicas totais, definidos pelo Módulo 8, constam na Tabela 4 e correspondem ao valor máximo desejável a ser observado no sistema de distribuição. No caso de medições realizadas utilizando-se transformadores de potência (TPs) com conexão do tipo V ou delta aberto, os limites permitidos para o indicador  $DTT_395\%$  deverão corresponder a 50% dos respectivos valores indicados na Tabela 4. Além disso, os acessantes da Rede Básica deverão seguir o que é determinado nos Procedimentos de Rede ou em regulamentação específica.

Indicador	Tensão Nominal				
	Vn ≤ 1,0 kV	1,0 kV < Vn < 69kV	$69 \text{ kV} \le \text{Vn} < 230 \text{ kV}$		
DTT 95%	10%	8%	5%		
$DTT_P95\%$	2,5%	2%	1%		
$DTT_I 95\%$	7,5%	6%	4%		
<i>DTT</i> <sub>3</sub> 95%	6,5%	5%	3%		

Tabela 2- Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental)

Fonte: ANEEL, 2021, p. 15.

A distorção harmônica total de tensão (DTT%) é composta por diferentes componentes: a distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3 (DTTp%), a distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3 (DTTi%), e a distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3 (DTT3%). A Tabela 5 descreve, de acordo com o módulo 8 da Prodist, os níveis aceitáveis de distorções harmônicas totais de tensão nos circuitos.

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

Tensão nominal do Barramento	Distorção total de Tensão (DTT) [%]
$VN \le 1kV$	10
$1kV < VN \le 8,13kV$	8
$13,8kV < VN \le 69kV$	6
69kV < VN < 230kV	3

Fonte: ANEEL, 2021, p. 20.

Pode-se observar que os limites de distorção harmônica total (DTT) diminuem conforme a tensão nominal do barramento aumenta, variando de 10% para tensões até 1 kV, até 3% para tensões entre 69 kV e 230 kV. Isso reflete a necessidade de um controle mais rigoroso das

distorções harmônicas em sistemas de maior tensão para garantir a qualidade da energia elétrica e a proteção dos equipamentos.

#### 2.4.4. Normativa IEEE Std 519-2014

Considerando que o Módulo 8 do PRODIST não contempla limites específicos para os harmônicos de corrente, foi necessário recorrer à norma IEEE 519-2014, a qual estabelece parâmetros internacionais para a limitação de distorções harmônicas. A adoção dessa norma visa assegurar que as medições e análises realizadas estejam em conformidade com padrões amplamente reconhecidos no setor elétrico.

A normativa IEEE 519-2014 é uma atualização do padrão IEEE 519-1992, que trata das distorções harmônicas de corrente e tensão em sistemas elétricos. A principal função da norma é mitigar os efeitos nocivos das harmônicas sobre os equipamentos elétricos e a rede elétrica, assegurando uma maior qualidade de energia. A versão de 2014 introduziu mudanças para refletir as evoluções tecnológicas e aprimorar a forma de controlar as distorções harmônicas (IEEE, 2014).

Comparada à versão anterior de 1992, a atualização de 2014 trouxe uma maior precisão nos limites de distorção e proporcionou mais flexibilidade para acomodar diferentes situações práticas. Os limites para harmônicas individuais também foram ajustados para refletir melhor as condições reais de operação dos sistemas elétricos modernos, que envolvem uma maior diversidade de equipamentos geradores de harmônicas (IEEE, 2014).

Principais pontos da IEEE 519-2014:

- A norma especifica limites para a distorção harmônica total de corrente (THDi) com base na relação entre a corrente de carga e a corrente de curto-circuito no ponto de acoplamento comum (PAC). Isso assegura que a injeção de harmônicas pelas cargas não comprometa a qualidade da energia no sistema de distribuição.
- O PCC é o ponto no sistema onde os limites de distorção harmônica são aplicados. Isso garante que os limites sejam observados no ponto de interação entre o usuário e a rede de distribuição, reduzindo o impacto das harmônicas no sistema como um todo.
- A relação I<sub>SC</sub> / I<sub>L</sub> (corrente de curto-circuito sobre corrente de carga) é usada para definir limites de distorção de corrente. Quanto menor a razão, mais rigorosos os limites de distorção harmônica.

- Além da THD, a norma estabelece limites específicos para cada harmônica individual (3ª, 5ª, 7ª, etc.), de acordo com o nível de tensão e a relação de corrente de curto-circuito. As harmônicas ímpares geralmente têm limites mais restritivos, pois têm um impacto maior no sistema elétrico.
- A norma fornece orientações sobre como as medições de harmônicas devem ser realizadas para garantir que os limites de distorção sejam cumpridos, enfatizando a importância de medições contínuas ou em momentos críticos para evitar que os harmônicos atinjam níveis prejudiciais.

A Tabela 4 a seguir representa os limites de distorção harmônica de corrente para sistemas com tensão nominal de 120 V a 69 kV, incluindo os valores máximos permitidos para a distorção harmônica total e para harmônicas individuais.

**Tabela 4** - Limites de distorção de corrente para sistemas com tensão nominal de 120 V a 69 kV

Máxima distorção harmônica de corrente em percentual de IL						
Ordem harmônica individual (harmônicas ímpares) <sup>a,b</sup>						
$I_{\rm SC}/I_{\rm L}$	$3 \le h < 11$	$11 \le h \le 17$	$17 \le h < 23$	$23 \le h < 35$	$35 \le h \le 50$	TDD
< 20 <sup>c</sup>	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: Adaptado de IEEE, 2014.

A tabela da norma IEEE 519-2014 estabelece que o limite de distorção harmônica total de corrente (TDD) varia entre 5% e 20%, dependendo da relação entre a corrente de curtocircuito (Isc) e a corrente de cargas não lineares (IL). Isso oferece um parâmetro de comparação: valores de TDD abaixo de 20% podem ser considerados aceitáveis, enquanto valores superiores a 20% estão fora dos limites recomendados.

## 2.5. MAR722 - Analisador de Qualidade de Energia

O analisador de qualidade de energia modelo MAR722 é um dispositivo essencial para o monitoramento e análise detalhada dos parâmetros elétricos em sistemas industriais e comerciais. Projetado para capturar uma ampla gama de informações sobre a qualidade de energia, o MAR722 é capaz de registrar dados como tensões, correntes, potências ativa e reativa, distorções harmônicas, fatores de potência, e eventos de transientes, entre outros (MEGABRAS,2017). Essas medições são fundamentais para garantir que os sistemas elétricos operem dentro dos padrões de qualidade exigidos por normas, como o Módulo 8 do PRODIST da ANEEL, que estabelece os limites para distúrbios elétricos em instalações conectadas à rede.

A Figura 12 apresenta o analisador de energia trifásico MAR722, destacando sua estrutura.



Figura 12 - Analisador de Qualidade de Energia MAR722

Fonte: MEGABRAS, 2017, p. 1.

O MAR722 se destaca por sua capacidade de realizar análises em tempo real, permitindo a identificação imediata de problemas como desequilíbrios de tensão, sobrecargas, e a presença de harmônicos que podem comprometer a eficiência e a vida útil dos equipamentos. Além disso, a versatilidade do MAR722 permite que ele seja utilizado em uma variedade de aplicações, desde o monitoramento de pequenos sistemas elétricos até grandes instalações industriais, fornecendo relatórios detalhados que auxiliam na tomada de decisões para a manutenção e otimização dos sistemas (MEGABRAS,2017).

Outro aspecto importante do MAR722 é sua capacidade de registrar eventos de curta duração, como picos de tensão e quedas momentâneas, que podem ser cruciais para a identificação de problemas intermitentes que afetam a qualidade de energia. Esses dados são armazenados e podem ser acessados posteriormente para uma análise mais aprofundada, proporcionando uma visão completa do desempenho do sistema ao longo do tempo. A Tabela 2 fornece uma visão geral dos modos de medição do analisador, incluindo a exibição e a forma dos resultados de medição.

Modo de medição	Exibição	Forma dos resultados de medição			
Scope	Forma de ondas	Mostra formas de onda de tensão ou corrente			
	Tabela	Valores numéricos: tensão, corrente,			
Tensão / Corrente /	Tabela	frequência e fator de forma de onda			
Frequência	Tendência	Tendências de tensão, corrente, frequência e			
	Tendeneta	fato			
	T 10 '	Tendências de atualizações rápidas de tensão			
Dips & Swells	I endencia	e corrente ao longo do tempo			
	Tabela de eventos	Grava os eventos que excedem o limite			
Harmônicos	Gráfico de barras	Tensão, corrente harmônico, inter-harmônico,			
	Tabela	distorção harmônica total, componente CC			
		Valores numéricos: potência ativa, reativa e			
	Tabela	aparente, fator de potência, fator de potência			
Potência e energia		de deslocamento, tensão, corrente, uso de			
i otonora e energia		energia			
	Tendência	Tendências dos valores numéricos na tela			
		Tabela ao longo do tempo			
		Valores numéricos: <i>flicker</i> de tempo curto Pst			
	Tabela	(Flicker de Tempo Curto) (1 minuto), Pst (10			
Flicker		minutos), flicker de tempo longo Plt (Flicker			
		de Tempo Longo)			
	Tendência	Tendências da sensação de <i>flicker</i>			
		instantâneo ao longo do tempo			
		Valores numéricos: tensão, porcentagem de			
Desbalanceamento		desbalanceamento negativo de corrente e			
	Tabela	porcentagem de desbalanceamento zero,			
		tensão fundamental, componente de corrente			
		e ângulo de fase			
	Vetor	Relação de fase e valores numéricos de tensão			
		e corrente			

Tabela 5 - Modo de medição MAR722

Transiente	Formas de onda	Forma de onda de corrente e tensão Grava eventos que excedem o limite
Corrente de partida	Tendência	Grava eventos que excedem o limite
Registro	Tabela	Valor numérico: todas as leituras selecionadas
Monitor	Gráfico de barras	Exibe especificações como tensão, harmônicos, <i>flickers, swells, dips</i> , mudança rápida de tensão, interrupção, desbalanceamento, frequência, etc de parâmetros de qualidade de energia
	Gráfico de barras	Gráfico de barras detalhado de harmônicos.
	Tendência	Tendências de conjunto de dados selecionados ao longo do tempo
	Tabela de eventos	Grava eventos que excedem o limite

Fonte: Adaptado de MEGABRAS, 2017.

## 3. METODOLOGIA

O estudo foi conduzido em etapas, começando com uma revisão bibliográfica abrangente sobre motores de indução trifásicos, métodos de partida e distúrbios de qualidade de energia elétrica, com ênfase em distorções harmônicas. Também foram revisadas normas técnicas, como o Módulo 8 do PRODIST da ANEEL, que regulamentam a qualidade de energia elétrica.

Em seguida, foi selecionado o motor de indução trifásico com especificações adequadas para o estudo, além de um analisador de qualidade de energia com funções específicas para a análise das distorções harmônicas. Os testes foram preparados com a instalação dos motores em um ambiente controlado e a configuração do analisador de acordo com a proposta do trabalho.

A execução dos testes envolveu duas abordagens: a partida direta e a partida com inversor de frequência. Para a partida direta, o motor foi conectado ao sistema de alimentação e as medições de distorções harmônicas, tanto na partida quanto em regime permanente, foram registradas. Para a partida com inversor de frequência, o equipamento foi configurado para controlar a partida do motor, e as mesmas medições foram coletadas.

### 3.1. Partida Direta

Para as medições foi selecionado um motor de indução trifásico da marca Voges, modelo 250512, conforme ilustrado nas Figuras 13 e 14.



Figura 13 - Motor de Indução Trifásico

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.



Figura 14 - Placa de Identificação do Motor

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

A Tabela 6 detalha as características técnicas do motor de indução trifásico.

Características do Motor		
Potência Nominal	1,5 CV (cavalos-vapor)	
Tensão de Operação	220/380 V	
Frequência	60 Hz	
Rendimento	82%	
Rotações por minuto	1725 rpm	
Corrente	4,2 A	
Fator de Potência (cos φ)	0,84	

Tabela 6 - Características do motor de indução trifásico

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Na partida direta, o motor foi fechado na configuração delta (220 V) e acionado diretamente pela fonte de alimentação, sem a utilização de dispositivos de controle adicionais. O tempo total de medição foi de 30 segundos para cobrir todo o período de partida. Foram realizadas 10 medições consecutivas, com o objetivo de obter um maior número de informações e garantir uma análise mais precisa. As medições foram feitas entre a fonte de alimentação e o

contator. Além disso, medições em regime permanente foram realizadas com duração de 1 minuto, após a estabilização do motor, para avaliar o comportamento dos harmônicos.

A Figura 15 exibe a configuração da partida direta do motor de indução trifásico, conforme realizada em laboratório. Ela detalha o arranjo dos componentes e a sequência de conexão utilizada para iniciar o motor durante os testes.



Figura 15 - Configuração da partida direta do motor de indução trifásico

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Os procedimentos de medição adotados neste trabalho foram inspirados na metodologia utilizada por Moura (2018), que abordou a partida e o regime permanente de motores de indução trifásicos. Em seu estudo, Moura estabeleceu um tempo de medição de 10 segundos para a partida estrela/triângulo e de 20 segundos para a partida com inversor de frequência. A abordagem de Moura serviu como referência para determinar os intervalos de tempo utilizados nas medições deste trabalho, permitindo uma análise comparativa entre os diferentes métodos de partida e seus impactos na qualidade da energia.

## 3.2. Partida Com Inversor De Frequência

Na partida utilizando um inversor de frequência, o tempo de medição foi de 15 segundos, cobrindo tanto o início da partida quanto a fase de aceleração do motor. Utilizou-se os mesmos materiais (motor e analisador de qualidade de energia) da partida direta para garantir consistência nas comparações. Assim como na partida direta, foram realizadas 10 medições

consecutivas, visando a coleta de um maior número de dados para uma análise mais detalhada. As medições foram realizadas em dois pontos distintos, antes e depois do inversor, permitindo uma análise detalhada do impacto do inversor na qualidade da energia fornecida ao motor. Da mesma forma, medições em regime permanente foram feitas por 1 minuto após a estabilização do motor com o inversor, para comparar os níveis de harmônicos com aqueles observados na partida direta.

A Figura 16 mostra o ponto de medição antes do inversor de frequência, detalhando a localização e a configuração dos instrumentos de medição para a análise dos parâmetros elétricos antes do tratamento pelo inversor.



Figura 16 - Ponto de medição antes do inversor de frequência

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

A Figura 17 ilustra o ponto de medição depois do inversor de frequência, destacando a localização e a configuração dos instrumentos de medição para analisar os parâmetros elétricos após o tratamento pelo inversor.



Figura 17 - Ponto de medição depois do inversor de frequência

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

## 3.2.1. Parametrização Do Inversor De Frequência ACS355

Nesta seção, será apresentado o inversor de frequência ACS355 utilizado para as análises realizadas. A seguir, são exibidas a imagem do equipamento, sua etiqueta de identificação e o número de patrimônio correspondente. A Figura 18 apresenta uma imagem do inversor de frequência ACS355, que foi utilizado no sistema para controle e otimização das partidas.



Figura 18 - Imagem do Inversor de Frequência ACS355

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

A etiqueta afixada no inversor de frequência ACS355 fornece informações detalhadas sobre o equipamento, incluindo o modelo, o número de série e outras especificações técnicas relevantes. O número de patrimônio, atribuído ao equipamento, é utilizado para fins de controle e gestão dentro do inventário institucional.

A Figura 19 mostra a etiqueta e o número de patrimônio do inversor de frequência ACS355, fornecendo informações de identificação e rastreamento do equipamento.



Figura 19 - Etiqueta e Número de Patrimônio

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

A apresentação visual do inversor e a documentação associada são essenciais para a correta identificação e rastreamento do equipamento durante o período de análise. O número de patrimônio desempenha um papel crucial na administração e no monitoramento do equipamento dentro do sistema de inventário da instituição.

Para otimizar o desempenho do inversor de frequência ACS355 em nossas aplicações, foram configurados os seguintes parâmetros, conforme descrito no manual do usuário:

**9905 – Tensão do Motor:** Ajustado para 220 V, correspondente à tensão nominal do motor, assegurando que o inversor forneça a tensão adequada para a operação segura e eficiente.

**9906 – Corrente do Motor:** Configurada para 4,2 A, garantindo que o inversor opere dentro dos limites de corrente especificados e evitando sobrecargas.

**9907 – Frequência do Motor:** Definida para 60 Hz, alinhando-se com a frequência nominal do motor para otimizar a sincronização entre o inversor e o motor.

**9908 – Velocidade do Motor:** Ajustada para 1725 RPM, permitindo um controle preciso da rotação e garantindo o desempenho desejado da aplicação.

**9909 – Potência do Motor (kW):** Configurada para 1,5 CV (aproximadamente 1,1 kW), assegurando que o inversor forneça a potência necessária sem comprometer a eficiência ou a segurança do sistema.

**1104 – Frequência Mínima de Referência:** Estabelecida para garantir que o motor não opere abaixo de um limite crítico, mantendo a estabilidade e o desempenho do processo.

1105 – Frequência Máxima de Referência: Configurada para limitar a velocidade do motor a um valor seguro, prevenindo sobrecargas e danos ao equipamento.

**2007 – Frequência Mínima de Operação:** Define a frequência mínima de operação do inversor, assegurando que o motor funcione de forma eficaz em condições de baixa carga.

**2008 – Frequência Máxima de Operação:** Ajustada para garantir que o motor não exceda a velocidade máxima especificada.

**2202 – Tempo de Aceleração:** Configurado para 15 segundos, proporcionando uma aceleração mais gradual e suave, ideal para minimizar o estresse mecânico e elétrico durante a partida.

Essas parametrizações foram realizadas para garantir que o inversor de frequência ACS355 funcione de maneira otimizada, proporcionando controle preciso, eficiência energética e proteção adequada para o motor e o sistema. O ajuste cuidadoso desses parâmetros contribui para uma operação segura e confiável, alinhada com os requisitos específicos da aplicação.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, serão apresentados os resultados das medições e análises realizadas. Os dados obtidos, organizados em gráficos, tabelas e descrições detalhadas, oferecem uma visão abrangente das variações de corrente e tensão durante a partida e no regime permanente dos motores.

A análise concentra-se na influência dos diferentes métodos de partida sobre a qualidade da energia elétrica, destacando a identificação de harmônicos, avaliação e comparação com os indicadores do Módulo 8 - PRODIST.

## 4.1. Partida Direta

No início da análise dos resultados de distorções harmônicas durante a partida direta, é crucial considerar os limites estabelecidos para a distorção harmônica total (DTT 95%) conforme especificado na Tabela 3. Esta tabela define os limites máximos permitidos para diferentes faixas de tensão nominal, oferecendo um padrão essencial para a avaliação da qualidade da energia elétrica. Para tensões menores ou iguais a 1 kV, o limite é de 10%. Para tensões entre 1 kV e 69 kV, o limite é de 8%, e para tensões superiores a 69 kV, o limite é de 5%.

Durante o ensaio do método de partida direta, foram analisadas as distorções harmônicas nas fases L1, L2 e L3, conforme os dados apresentados na Tabela 7. Esta tabela apresenta os valores do THD e das distorções harmônicas individuais para cada fase, destacando que as harmônicas individuais são as componentes predominantes na distorção observada. Comparando esses dados com os limites estabelecidos pela Tabela 3, foi possível avaliar se as distorções harmônicas observadas durante a partida direta estão dentro dos limites permitidos e identificar a necessidade de possíveis ajustes para atender aos requisitos de qualidade da energia elétrica.

	Partida Direta			
Fases	Ordem	THD de tensão (%)	Distorção Individual de Tensão (%)	
L1	5	1,205	0,954	
	5		0,889	
L2	7	0,768	0,586	
L3	5	1,298	0,886	
	7		0,873	

Tabela 7- THD e harmônicas individuais na partida direta

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

A análise dos dados revela que os níveis de distorção harmônica total estão bem abaixo do limite máximo de 10% estabelecido pela norma. Com um THD de até 1,3%, essas fases estão dentro dos parâmetros aceitáveis. A quinta harmônica é a principal responsável pela distorção observada nas fases L1 e L3, enquanto a sétima harmônica domina na fase L2, contribuindo significativamente para o THD.

Mesmo com todos os valores de THD estando abaixo do limite de 10%, as harmônicas individuais são as principais componentes da distorção. A fase L2, apesar de ter um THD mais baixo, ainda é significativamente afetada pela sétima harmônica. Isso sugere que, embora as distorções estejam controladas, a mitigação das harmônicas individuais, especialmente a quinta e a sétima, continua sendo importante para garantir a qualidade ideal da energia elétrica e melhorar o desempenho geral do sistema.

A Figura 20, gerada pelo analisador de energia MAR722, ilustra o resultado da medição de THD de tensão, destacando as distorções harmônicas observadas na partida direta.



Figura 20 - Resultados das distorções harmônicas de tensão na partida direta

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

A imagem apresentada ilustra um THD de 1,3% durante a partida direta do sistema. Este valor serve como um ponto de referência inicial, sendo fundamental para a análise subsequente. Posteriormente, esse THD foi comparado com o valor obtido em regime permanente, o que permitiu avaliar como a distorção harmônica evolui ao longo do tempo e identificar possíveis impactos na qualidade da energia elétrica durante a operação contínua do sistema.

Para complementar a análise dos dados obtidos durante a partida direta, a Tabela 8 a seguir, mostra os valores do THD e das distorções harmônicas individuais no regime permanente. Esta análise permitiu identificar as principais componentes de distorção em condições normais de operação e comparar os resultados com os limites regulamentares, oferecendo uma visão mais completa da qualidade da energia elétrica ao longo do tempo.

	Partida Direta – Regime Permanente		
Fases	Ordem	THD de tensão (%)	Distorção Individual de Tensão (%)
L1	5	1,164	0,931
	7		0,616
L2	5	0,726	0,296
	7		0,493
L3	5	1 209	0,838
	7	1,207	0,773

Tabela 8- THD e harmônicas individuais no regime permanente

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

A análise dos dados no regime permanente revela que as fases L1 e L3 apresentam níveis de distorção harmônica total semelhantes aos observados durante a partida, mantendo-se sempre abaixo do limite regulamentar. Em L1 e L3, a quinta harmônica continua a ser a principal responsável pela distorção, enquanto na fase L2, o THD é menor e a sétima harmônica domina como a principal componente de distorção. Esses resultados evidenciam que as distorções harmônicas de tensão no regime permanente do motor com partida direta estão bem controladas, com todos os valores estando abaixo dos limites estabelecidos.

A Figura 21 ilustra os resultados das distorções harmônicas de tensão no regime permanente, permitindo uma comparação visual com os dados obtidos durante a partida direta.



Figura 21 - Resultados das distorções harmônicas de tensão no regime permanente da partida direta

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Os dados mostram que o THD de tensão no regime permanente é de 1,3%, o mesmo valor registrado durante a partida direta. Essa estabilidade no THD ao longo do tempo sugere que a distorção harmônica não apresenta variações significativas entre a partida e a operação contínua.

## 4.1.1. Distorções harmônicas de corrente

A Tabela 9 apresenta os valores do THD e das harmônicas individuais durante a partida direta, com foco nas distorções harmônicas de corrente. Embora o Módulo 8 não defina parâmetros específicos para essas distorções, usamos como referência a norma IEEE 519-2014 para avaliar se os valores estão dentro dos limites estabelecidos. A tabela oferece uma visão detalhada sobre a magnitude das distorções harmônicas de corrente, permitindo uma compreensão mais completa do comportamento do sistema durante a partida.

	Partida Direta			
Fases	Ordem	THD de corrente (%)	Distorção Individual de Corrente (%)	
L1	5	6,259	5,256	
	7		2,165	
L2	5	3,773	2,406	
L_	7		1,210	
1.3	5	5 324	4,424	
	7 3,324	1,673		

Tabela 9- THD e harmônicas **de corrente** individuais na partida direta

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

A análise da distorção harmônica de corrente medida durante a partida direta foi comparada aos limites estabelecidos pela norma IEEE 519-2014, que considera a relação entre a corrente de curto-circuito (Isc) e a corrente das cargas não lineares (IL), com limites de distorção total harmônica de corrente (TDD) que variavam entre 5% e 20%. Com base nos valores registrados, observou-se que, em algumas fases, a distorção total harmônica excedeu o limite inferior de 5%, indicando que a distorção estava acima do aceitável em certos casos.

Embora a norma permitisse valores de TDD até 20%, os valores medidos que superaram 5% já foram indicativos de uma distorção acima dos níveis ideais para garantir a qualidade da energia. Dessa forma, algumas fases apresentaram distorção dentro dos limites estabelecidos, enquanto outras exigiram medidas corretivas para reduzir a distorção harmônica e evitar impactos negativos no sistema. Em resumo, os resultados mostraram que a distorção harmônica estava, em parte, dentro do permitido, mas com alguns pontos críticos que ultrapassaram os limites inferiores recomendados pela norma.

Para analisar as distorções harmônicas de corrente em condições normais de operação, a Tabela 10 apresenta os valores de THD e harmônicas individuais. Esta tabela permite comparar os dados com os obtidos durante a partida direta e avaliar o comportamento das distorções no regime permanente.

	Partida Direta – Regime Permanente		
Fases	Ordem	THD de corrente (%)	Distorção Individual de Corrente (%)
L1	5 7	5,731	4,473
L2	5	3,676	3,880
L3	5	4,933	3,880
25	7		1,857

Tabela 10- THD e harmônicas individuais no regime permanente

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Comparando os resultados da distorção harmônica de corrente entre a partida direta e o regime permanente, nota-se que em ambos os casos algumas fases ultrapassaram o limite de 5% estabelecido como referência inferior. No entanto, os valores de distorção no regime permanente foram, em geral, ligeiramente mais baixos do que os registrados durante a partida direta. Isso sugere que, embora a distorção harmônica seja uma preocupação em ambos os momentos, ela tende a ser mais acentuada durante a partida do motor.

A Figura 22 apresenta os resultados das distorções harmônicas de corrente durante a partida direta. Esta figura oferece uma visão detalhada dos níveis de THD e das harmônicas individuais.



Figura 22 - Resultados das distorções harmônicas de corrente na partida direta

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

A análise dos resultados da partida direta revelou que as distorções harmônicas de corrente foram mais pronunciadas, com o THD de corrente alcançando 6,5%. De acordo com os limites estabelecidos, que variam entre 5% e 20% dependendo da relação entre a corrente de curto-circuito e a corrente das cargas não lineares, o valor de 6,5% está dentro do intervalo permitido, mas ainda indica níveis significativos de distorção. Embora a tensão esteja adequada, a corrente apresenta distorções que devem ser monitoradas e gerenciadas para garantir a eficiência e a confiabilidade do sistema elétrico.

## 4.2. Partida com o Inversor de Frequência

Os mesmos métodos utilizados para a realização da partida direta foram empregados na partida com o inversor de frequência. No entanto, para a partida com o inversor, as medições foram divididas em duas fases distintas: antes e depois do inversor. Essa separação permitiu uma análise mais detalhada das distorções harmônicas e da qualidade da energia elétrica em cada etapa do processo, proporcionando uma visão clara das alterações introduzidas pelo inversor de frequência.

#### 4.2.1. Ponto de medição antes do Inversor de Frequência

Durante o ensaio realizado no ponto de medição antes do inversor de frequência, foram analisadas as distorções harmônicas nas fases L1, L2 e L3, conforme os dados apresentados. A Tabela 11 apresenta os valores do THD e das distorções harmônicas individuais para cada fase, destacando que as harmônicas individuais foram as componentes predominantes na distorção observada. Ao comparar esses dados com os limites estabelecidos pelo Módulo 8 da PRODIST, foi possível avaliar se as distorções harmônicas observadas estavam dentro dos limites permitidos e determinar se eram necessários ajustes para garantir a conformidade com os requisitos de qualidade da energia elétrica.

F	Partida antes do Inversor de Frequência			
Fases	Ordem	THD de tensão (%)	Distorção Individual de Tensão (%)	
L1	5	1 081	0,860	
7	,	0,516		
L2	5	0.976	0,349	
112	7	0,970	0,386	
13	5	0.929	0,563	
	7	0,929	0,565	

Tabela 11 - THD e harmônicas individuais na partida antes do Inversor de Frequência

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Ao analisar a tabela fornecida de acordo com a norma, verificou-se que os valores de distorção harmônica total estavam bem abaixo do limite de 10%, indicando que a qualidade geral da energia elétrica estava adequada.

As distorções harmônicas individuais, nas 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> ordens, foram as mais proeminentes na análise, refletindo a sua relevância na composição do THD. Embora essas harmônicas individuais não tenham apresentado valores elevados, elas desempenharam um papel significativo na contribuição para a distorção total observada.

A Figura 23 ilustra o resultado da medição de THD de tensão, destacando as distorções harmônicas observadas na partida com ponto de medição antes do inversor de frequência.



Figura 23 - Resultados das distorções harmônicas de tensão na partida antes do Inversor de Frequência

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

O resultado da distorção harmônica de tensão na partida com ponto de medição antes do inversor de frequência mostrou um THD de 1,1%. Esse valor serve como um ponto de referência inicial para a análise. Em seguida, o THD será comparado com o valor obtido em regime permanente, o que permitirá avaliar como a distorção harmônica evolui ao longo do tempo e identificar possíveis impactos na qualidade da energia elétrica durante a operação contínua do sistema.

Para complementar a análise dos dados obtidos durante a partida com ponto de medição antes do inversor de frequência, a Tabela 12 apresenta os valores do THD e das distorções harmônicas individuais no regime permanente.

Partida antes do Inversor de Frequência – Regime				
	Permanente			
Fases	Ordem	THD de tensão (%)	Distorção Individual de Tensão (%)	
L1	5	1,001	0,808	
	7		0,448	
1.2	5	0,683	0,325	
	7		0,417	
L3	5	0,921	0,505	
	7		0,625	

Tabela 12- THD e harmônicas individuais no regime permanente

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

A análise dos dados no regime permanente revela que o THD nas fases L1, L2 e L3 se mantém abaixo do limite regulamentar de 10%, refletindo uma boa qualidade geral da energia elétrica. Em todas as fases, tanto a 5<sup>a</sup> quanto a 7<sup>a</sup> harmônicas se destacam como as principais componentes da distorção. Esses resultados evidenciam que as distorções harmônicas de tensão no regime permanente estão bem controladas, com todos os valores abaixo dos limites estabelecidos.

A figura 24 ilustra os resultados das distorções harmônicas de tensão no regime permanente, permitindo uma comparação visual com os dados obtidos durante a partida com ponto de medição antes do inversor de frequência.



Figura 24 - Resultados das distorções harmônicas de tensão no regime permanente da partida antes do Inversor de Frequência

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Os dados mostram que o THD de tensão no regime permanente é de 1,1%, o mesmo valor registrado durante a partida. Essa estabilidade no THD ao longo do tempo sugere que a distorção harmônica não apresenta variações significativas entre a partida e a operação contínua.

#### 4.2.1.1. Distorção harmônica de corrente

A Tabela 13 apresenta os valores do THD e das harmônicas individuais durante a partida com ponto de medição antes do inversor de frequência, focando nas distorções harmônicas de corrente. Essa tabela fornece uma visão detalhada sobre a magnitude das distorções harmônicas de corrente, permitindo uma compreensão mais completa do comportamento do sistema durante a partida.

]	Partida antes do Inversor de Frequência			
Fases	Ordem	THD de corrente (%)	Distorção Individual de Corrente (%)	
L1	5	191,204	83,996	
	7		82,364	
L2	5	208 503	98,899	
7	7	200,000	85,790	
L3	5	167 331	93,66	
LJ	7	107,001	80,808	

Tabela 13 - THD e harmônicas individuais na partida antes do Inversor de Frequência

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

A análise da distorção harmônica de corrente antes da instalação do inversor de frequência revelou níveis muito acima do limite máximo de 20% estabelecido pela norma IEEE 519-2014. Esses resultados indicam uma distorção severa, sugerindo a necessidade de medidas corretivas para melhorar a qualidade da energia.

Para analisar as distorções harmônicas de corrente em condições normais de operação, a Tabela 14 apresenta os valores de THD e harmônicas individuais. Esta tabela permite comparar os dados com os obtidos durante a partida e avaliar o comportamento das distorções no regime permanente.

Partida antes do Inversor de Frequência – Regime				
	Permanente			
Fases	Ordem	THD de corrente (%)	Distorção Individual de Corrente (%)	
L1	5	192,293	83,616	
	7		77,640	
L2	5	191 901	94,713	
	7	191,901	77,705	
L3	5	168 726	93,372	
7	100,720	80,299		

Tabela 14- THD e harmônicas individuais no regime permanente

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Comparando os resultados da distorção harmônica de corrente no ponto de medição antes do inversor de frequência, observou-se que, tanto durante a partida quanto no regime permanente, a distorção foi extremamente elevada, muito além do limite máximo de 20% estabelecido pela norma IEEE 519-2014. A distorção foi ainda mais pronunciada no regime permanente, com THD de corrente ligeiramente superior em comparação com os valores medidos durante a partida. Isso indica que, mesmo após o período inicial de partida, a distorção harmônica permanece significativamente alta.

A Figura 25 apresenta os resultados das distorções harmônicas de corrente durante a partida. Esta figura oferece uma visão detalhada dos níveis de THD e das harmônicas individuais.



Figura 25 - Resultados das distorções harmônicas de corrente na partida antes do Inversor de Frequência

A análise dos resultados da partida revela que as distorções harmônicas de corrente foram mais pronunciadas, com o THD de corrente atingindo 199,5%, o que está muito acima dos limites estabelecidos pela norma, evidenciando níveis significativos de distorções harmônicas.

#### 4.2.2. Ponto de medição depois do Inversor de Frequência

Durante o ensaio realizado no ponto de medição depois do inversor de frequência, foram analisadas as distorções harmônicas nas fases L1, L2 e L3, conforme os dados apresentados. A Tabela 15 apresenta os valores do THD e das distorções harmônicas individuais para cada fase, destacando que as harmônicas individuais foram as componentes predominantes na distorção observada. Ao comparar esses dados com os limites estabelecidos pelo Módulo 8 da PRODIST, foi possível avaliar se as distorções harmônicas observadas ultrapassaram os limites permitidos e determinar a necessidade de ajustes para garantir a conformidade com os requisitos de qualidade da energia elétrica.

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Pa	Partida depois do Inversor de Frequência			
Fases	Ordem	THD de tensão (%)	Distorção Individual de Tensão (%)	
L1	2	11.192	3,152	
	10		5,417	
L2	2	10,636	3,719	
	10		4,635	
L3	2	11 299	3,695	
	10	11,277	5,216	

Tabela 15- THD e harmônicas individuais na partida depois do Inversor de Frequência

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Ao analisar as medições no ponto depois do inversor de frequência, foi observado uma alteração nas distorções harmônicas de tensão, com destaque para as ordens harmônicas de 2ª e 10ª. Esse fenômeno pode ser explicado pelos processos de conversão e modulação realizados pelo inversor.

Inicialmente, o inversor realiza a retificação da tensão alternada (AC) da rede para uma tensão contínua (DC). Em seguida, essa tensão contínua é modulada para gerar uma nova forma de onda AC com a frequência desejada, utilizando a técnica de modulação por largura de pulso (PWM). A modulação PWM ajusta a amplitude e a frequência da tensão fornecida ao motor, mas pode introduzir harmônicas adicionais na forma de onda resultante. Essas harmônicas são múltiplas da frequência fundamental e surgem devido aos ciclos de comutação dos dispositivos semicondutores no inversor, como transistores ou tiristores. A comutação rápida desses dispositivos pode gerar novas harmônicas e distorcer a forma de onda original.

No ponto de medição antes do inversor, os níveis de distorção harmônica estavam dentro dos limites estabelecidos pela norma. No entanto, no ponto de medição depois do inversor, as ordens harmônicas de 2<sup>a</sup> e 10<sup>a</sup> se tornaram mais evidentes e ultrapassaram os limites regulamentares. Isso sugere que, apesar da instalação do inversor, a alteração na distribuição das harmônicas não foi suficiente para controlar adequadamente as principais ordens harmônicas, resultando em níveis elevados de distorção harmônica total.

Para mitigar os impactos causados, é importante monitorar continuamente as distorções harmônicas e implementar filtros harmônicos específicos para reduzir ou eliminar as harmônicas indesejadas introduzidas pelo inversor, garantindo que a qualidade da tensão esteja em conformidade com os padrões regulamentares. Além disso, ajustes no sistema e uma análise detalhada das características do inversor podem ser necessários para otimizar a eficiência e a confiabilidade do sistema elétrico.

A Figura 26 ilustra o resultado da medição de THD de tensão, destacando as distorções harmônicas observadas na partida.

Figura 26 - Resultados das distorções harmônicas de tensão na partida depois do Inversor de Frequência



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

A imagem apresentada ilustra um THD de 14,2% durante a partida do sistema. Este valor serve como um ponto de referência inicial, sendo fundamental para a análise subsequente. Posteriormente, esse THD foi comparado com o valor obtido em regime permanente, o que permitirá avaliar como a distorção harmônica evolui ao longo do tempo e identificar possíveis impactos na qualidade da energia elétrica durante a operação contínua do sistema.

Para complementar a análise dos dados obtidos durante a partida, a Tabela 16 a seguir, mostra os valores do THD e das distorções harmônicas individuais no regime permanente. Esta análise permite identificar as principais componentes de distorção em condições normais de operação e comparar os resultados com os limites regulamentares, oferecendo uma visão mais completa da qualidade da energia elétrica ao longo do tempo.

Partic	Partida depois do Inversor de Frequência– Regime		
		Permane	nte
Fases	Ordem	THD de tensão (%)	Distorção Individual de Tensão (%)
L1	2	14,370	4,593
	10		6,618
L2	2	14,637	4,920
	10		7,143
L3	2	14,766	4,650
	10		7,410

Tabela 16- THD e harmônicas individuais no regime permanente

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

No ponto de medição depois do inversor de frequência, os resultados mostraram níveis elevados de distorção harmônica de tensão, especialmente nas ordens harmônicas de 2ª e 10ª, que ultrapassaram os limites estabelecidos pela norma. Esses níveis elevados indicam que a qualidade da energia elétrica não está em conformidade com os padrões regulamentares.

Comparando com os resultados obtidos na partida depois do inversor, onde as distorções harmônicas de tensão também mostraram valores elevados, a análise revela que, apesar da redução de algumas ordens harmônicas individuais, o THD continua a ser significativo. A diferença entre os resultados sugere que, embora haja uma variação nas ordens harmônicas específicas, a distorção harmônica total ainda está comprometida, refletindo a necessidade de melhorias no sistema.

A Figura 27 ilustra os resultados das distorções harmônicas de tensão no regime permanente, permitindo uma comparação visual com os dados obtidos durante a partida.



Figura 27 - Resultados das distorções harmônicas de tensão no regime permanente da partida depois do Inversor de Frequência

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

A análise dos resultados após a instalação do inversor de frequência revela um aumento significativo nas distorções harmônicas de tensão. Enquanto o THD de tensão na partida antes do inversor foi de 1,1%, os valores aumentaram para 14,2% na partida e 14,8% no regime permanente no ponto de medição após a instalação do inversor. Esse incremento nas distorções harmônicas sugere que, embora o inversor possa trazer benefícios em termos de controle e eficiência, também pode introduzir desafios adicionais em relação à qualidade da tensão.

## 4.2.2.1. Distorção harmônica de corrente

A Tabela 17 apresenta os valores do THD e das harmônicas individuais durante a partida, focando nas distorções harmônicas de corrente, fornecendo uma visão detalhada sobre a magnitude das distorções harmônicas de corrente, permitindo uma compreensão mais completa do comportamento do sistema durante a partida.

	Partida depois do Inversor de Frequência			
Fases	Ordem	THD de corrente (%)	Distorção Individual de Corrente (%)	
L1	3	4,066	1,389	
	5	1,000	2,769	
L2	3	6.492	4,728	
	5	0,192	3,146	
L3	3	4 205	0,593	
	5	1,200	3,062	

Tabela 17- THD e harmônicas individuais na partida depois do Inversor de Frequência

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

A análise dos resultados com ponto de medição depois do inversor de frequência revelou uma redução significativa na distorção harmônica de corrente. Os níveis de THD de corrente foram reduzidos para valores que agora estão dentro dos limites estabelecidos pela norma IEEE 519-2014. Os valores de THD são significativos, com variações entre as fases, indicando uma presença notável de harmônicas.

Para analisar as distorções harmônicas de corrente em condições normais de operação, a Tabela 18 apresenta os valores de THD e harmônicas individuais. Esta tabela permite comparar os dados com os obtidos durante a partida e avaliar o comportamento das distorções no regime permanente.

TT 1 1 10		1 ^ •	. 1 1 .	•	
Tabela 1	K- THI)	e harmonicas	1nd1v1d11a1s	s no regime	nermanente
140014 10		e marmonieas	illui v luuuli	, no regnine	permanence

Partida depois do Inversor de Frequência– Regime							
Permanente							
		THD de	Distorção				
Fases	Ordem	corrente	Individual de				
		(%)	Corrente (%)				
L1	3	3 670	1,179				
	5	2,070	1,853				

L2	3	5 444	3,663
	5	3,111	2,819
L3	3	3 846	0,880
	5	5,010	2,735

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Comparando os resultados entre a partida e o regime permanente no ponto de medição após a instalação do inversor de frequência, observou-se uma melhoria significativa na distorção harmônica de corrente. No regime permanente, os níveis de THD de corrente foram reduzidos para valores que estão dentro dos limites estabelecidos pela norma.

A Figura 28 apresenta os resultados das distorções harmônicas de corrente durante a partida. Esta figura oferece uma visão detalhada dos níveis de THD e das harmônicas individuais.

Figura 28 - Resultados das distorções harmônicas de corrente na partida depois do Inversor de Frequência



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

A análise dos resultados da partida revelou que as distorções harmônicas de corrente diminuíram no ponto de medição após a instalação do inversor de frequência. O THD de corrente foi reduzido para 3,5%, que está dentro dos limites da norma, o que representa uma melhoria significativa em relação aos níveis anteriores, mas ainda pode indicar a presença de algumas distorções harmônicas.

#### 4.3. Resultados gerais

Neste capítulo, foi analisado exclusivamente o THD de cada partida, alinhando-se às diretrizes do Módulo 8 da PRODIST, que considera este parâmetro para avaliação. Todas as informações de tensão foram utilizadas como base para essa comparação, considerando que a análise da partida direta foi incluída apenas como método comparativo.

A Tabela 19, a seguir, contém os principais dados coletados durante o estudo, fornecendo uma visão clara e detalhada das variáveis analisadas e suas respectivas comparações.

THD de tensão					
Ponto de medição	THD de tensão na partida (%)	THD de tensão em regime permanente (%)			
Partida direta	1,3	1,3			
Antes do inversor de frequência	1,1	1,1			
Depois do inversor de frequência	14,2	14,8			

Tabela 19 - Análise THD das tensões na partida e em regime permanente

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

A avaliação dos níveis de distorção harmônica total de tensão forneceu informações importantes sobre o comportamento dos sistemas em diferentes condições de operação. Para a partida direta e com ponto de medição antes do inversor de frequência, os níveis de THD de tensão demonstram estabilidade, tanto na partida quanto em regime permanente, e estão em conformidade com o limite de 10% estabelecido pela norma. Esses resultados indicam que, nesses pontos, as distorções harmônicas mantêm-se consistentes e dentro dos parâmetros regulatórios, sugerindo uma operação mais previsível e controlada.

Em contraste, a medição depois o inversor de frequência mostra um aumento acentuado no THD de tensão durante a partida, que se intensifica ainda mais em regime permanente. Este aumento significativo sugere que o inversor de frequência pode introduzir ou amplificar as distorções harmônicas, afetando de forma relevante a qualidade da energia elétrica. É importante observar que os níveis de THD após o inversor de frequência excedem o limite de 10% estabelecido pelo Modulo 8 da PRODIST, indicando que esses níveis estão fora dos parâmetros regulatórios e podem exigir medidas corretivas.

A análise comparativa entre os diferentes pontos de medição evidencia o impacto do inversor de frequência nas distorções harmônicas e destaca a necessidade de estratégias adequadas para mitigar seus efeitos, a fim de garantir a conformidade com os padrões normativos e manter a eficiência e a qualidade da energia elétrica no sistema.

### 5. CONCLUSÃO

Este trabalho visou analisar as distorções harmônicas de tensão e corrente na partida e em regime permanente de motores de indução trifásicos, empregando os métodos de partida direta e inversor de frequência. Utilizando o analisador de qualidade de energia MAR722 da Megabrás, foram realizadas medições detalhadas para avaliar a conformidade com os parâmetros estabelecidos no Módulo 8 do PRODIST, da ANEEL, sendo o limite de THD de tensão estabelecido pela norma de 10%.

Os resultados mostraram que, na partida direta e antes do inversor de frequência, as distorções harmônicas de tensão estavam dentro dos limites normativos, com THD de 1,3% e 1,1%, respectivamente. Após a instalação do inversor de frequência, observou-se uma elevação significativa nas distorções harmônicas de tensão, com THD de 14,2% durante a partida e 14,8% no regime permanente. Estes valores excedem o limite de 10% estabelecido pela norma, indicando a necessidade de medidas adicionais para controlar essas distorções e garantir a conformidade com os padrões de qualidade da energia elétrica.

Além disso, observou-se que as distorções harmônicas de corrente variaram conforme o método de partida: 6,5% durante a partida direta, 199,5% na partida com ponto de medição antes do inversor de frequência e 3,5% depois do inversor. Enquanto as distorções no ponto de medição antes do inversor estavam extremamente acima dos limites estabelecidos pela norma IEEE 519-2014, a instalação do inversor foi altamente eficaz em reduzir as distorções de corrente para um nível que está dentro dos limites aceitáveis. Embora as distorções harmônicas de corrente não tenham sido o foco principal do Módulo 8 da PRODIST, é crucial um gerenciamento eficaz para garantir a eficiência e a confiabilidade geral do sistema elétrico.

Em síntese, a análise comparativa dos métodos de partida revela que a partida direta e a operação antes do inversor de frequência mantêm uma qualidade de tensão estável e em conformidade com a norma, enquanto o uso do inversor de frequência exige uma abordagem cuidadosa para gerenciar e mitigar as distorções harmônicas. Para garantir a eficácia do sistema elétrico e o cumprimento dos requisitos normativos, é essencial adotar estratégias adequadas de controle das distorções harmônicas de tensão. Como sugestão de trabalhos futuros, recomendase a análise dos métodos de partida estrela-triângulo e soft-starter, avaliando o impacto desses métodos sobre a qualidade de energia e as distorções harmônicas.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

#### ABB. Manual do utilizador: Conversores de frequência ACS355. 2018. 474 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão. 4. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 209 p.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **PRODIST - Procedimentos de Distribuição** de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. Módulo 8 - Qualidade da Energia, 2018.

BONELLI, A. F., Bonelli, M. L., & Block, P. A. B. A importância de uma especificação técnica detalhada para aquisição de filtros harmônico, 2022.

BRITO, C. M. C. e Leão, R. P. S. Desempenho de um Motor de Indução Trifásico Submetido a Distorções Harmônicas na Tensão de Alimentação, 2006.

CAMARGO, Ivan Marques de Toledo. Conversão de energia. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2022.

EMF, Engenharia e Serviços Técnicos. Análise da qualidade de energia elétrica – QEE, 2021.

EICHELBERGER, Rafael; OLIVEIRA, Ronieri Henrique de; KASSICK, Enio V. Cargas Lineares e Não-Lineares e Fator de Potência. SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (SENDI), 2008, 12p.

FRANCHI, Claiton Moro. Acionamentos Elétricos. 5.ed. São Paulo-SP: Érica, 2009.

HENRIQUE, Hélio. **Motores Trifásicos de CA.** Mossoró, 2007. 67 f. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN).

IEEE Std. 519-2014, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, 2014.

MARTINHO, Edson. Distúrbios da Energia Elétrica. 137 f. 2. ed. São Paulo: Érica, 2012.

MASCHERONI, José M. et al. Guia de aplicação de inversores de frequência. Santa Catarina: WEG Automação, 238p, 2005.

MEGABRAS. Manual do usuário: analisador de qualidade de energia MAR722. 2017. 57 p.

MOURA, Maria Caroline de Paula. Qualidade de energia durante partidas de motores de indução trifásicos: análise de distorções harmônicas. Varginha, 2018.

NEVES, Ana Bárbara Fernandes. Análise dos Efeitos do Desequilíbrio e da Distorção Harmônica de Tensão no Conjugado e no Rendimento de um Motor de Indução Trifásico. 2014.

OLIVEIRA, Wesley Rodrigues de Oliveira. **Uma análise sobre Inversores de Frequência e Distorções Harmônicas e Inter-Harmônicas**. Brasília, 2013. 83 f. Dissertação (Graduação) – Universidade de Brasília (UnB). Publicação FT.TG-nº02/2013.

ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico. Procedimentos De Rede, Submódulo 2.8: Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e de seus componentes, 2011.

PAULILO, Gilson. **Conceitos gerais sobe qualidade de energia**. Cap. 1. 7 f. São Paulo: Revista O Setor Elétrico, 2013.

PIRES, Igor Amariz. Capítulo XII: Medidas de mitigação de harmônicos. 2010.

RIBEIRO, Cristiano Felipe. Influência dos Harmônicos na Qualidade da Energia Elétrica. Ouro Preto, 2007. 56 f. Dissertação (Graduação) – Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

SANTOS, Rafael Simões dos. **Distúrbios nas Partidas de Motores de Indução Trifásicos.** Viçosa, 2011. 55 f. Dissertação (Graduação) – Universidade Federal de Viçosa (UVF).

SCHNEIDER, Eletric. **Qualidade de Energia: Harmônicas**. São Paulo: Apostila Workshop Instalações Elétricas de Baixa Tensão, Edição março, 2003.

SOUZA, Neemias S. **Apostila de Acionamentos Elétricos**, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnológica do Rio Grande do Norte, Campus – Central, novembro de 2009.

WEG, Guia de especificação motores elétricos, 2021.



#### RELATÓRIO FINAL DE CURSO Nº 15/2025 - CEENP (11.51.21)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 09/04/2025 18:18) MARCIO WLADIMIR SANTANA PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO CTETTNP (11.50.36) Matrícula: ###520#9

Visualize o documento original em https://sig.cefetmg.br/documentos/ informando seu número: 15, ano: 2025, tipo: RELATÓRIO FINAL DE CURSO, data de emissão: 09/04/2025 e o código de verificação: bc14e68c04