

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS
GERAIS**

Gabriel Rezende Alcântara

**ANÁLISE DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS DURANTE
PARTIDA DE MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO
UTILIZANDO SOFT STARTER**

**Nepomuceno - MG,
2025**

GABRIEL REZENDE ALCÂNTARA

**ANÁLISE DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS DURANTE PARTIDA DE
MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO UTILIZANDO SOFT STARTER**

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. Marcio Wladimir Santana.

Coorientadora:

Prof. Juliana Vilela Loureçoni Botega.

**Nepomuceno - MG,
2025**

GABRIEL REZENDE ALCÂNTARA

**ANÁLISE DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS DURANTE PARTIDA DE
MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO UTILIZANDO SOFT STARTER**

Trabalho apresentado como requisito parcial
para a Conclusão do Curso de Bacharelado
em Engenharia Elétrica do Centro Federal de
Educação Tecnológica de Minas Gerais.

Data de aprovação:

15/07/2025

Prof. Marcio Wladimir Santana

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Juliana Vilela Lourençoni Botega

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Eng. Eletricista Gleisson Abreu Barati

Universidade Federal de São João Del Rei

*Dedico este trabalho com todo amor e em
forma de agradecimento aos meus queridos
pais, Lindalva e Alessandro.*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, expresso minha gratidão à minha família, em especial aos meus pais, Alessandro José Andrade de Alcântara e Lindalva de Rezende Gonçalves Alcântara, cujo apoio foi essencial ao longo da minha jornada acadêmica. Gostaria também de agradecer ao meu irmão Caio Rezende Alcântara pelo estímulo constante e por ser uma fonte inspiradora.

Ao Prof. Marcio Wladimir Santana, meu orientador, e à Prof. Juliana Vilela Lourençoni Botega, minha coorientadora, expresso minha gratidão pela oportunidade concedida, pela orientação dedicada, paciência e pelo compartilhamento de conhecimento ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), que ao longo dos anos da minha graduação, generosamente compartilharam seu valioso conhecimento.

Aos amigos, que sempre estiveram ao meu lado, especialmente aos meus irmãos de vida da república Oitoloco. Expresso minha gratidão pela amizade incondicional e pelo apoio demonstrado ao longo de todo o período dedicado ao curso e a este trabalho.

Agradeço sinceramente a todos que, de alguma forma, me proporcionaram seu apoio e torceram por mim.

“Existem um monte de pequenas razões para as coisas grandes acontecerem em nossas vidas.”

Ted Mosby - How I Met Your Mother

RESUMO

A presença de motores de indução trifásicos nas instalações industriais é predominante devido à sua robustez, simplicidade construtiva e bom desempenho operacional. Entretanto, o processo de partida desses motores pode comprometer a qualidade da energia elétrica, especialmente em função das distorções harmônicas geradas nesse instante. Entre os métodos utilizados para atenuar os impactos da partida direta, destaca-se o uso de soft starters, dispositivos que promovem a aceleração gradual do motor. Este trabalho tem como objetivo analisar os efeitos das partidas de motores de indução trifásicos sobre a forma de onda da tensão e da corrente, com foco nas distorções harmônicas introduzidas pelo uso de um soft starter. Para isso, foram realizadas medições utilizando o analisador de qualidade de energia MAR 722 da Megabrás, e os resultados obtidos foram comparados com os parâmetros estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, da ANEEL. Os dados obtidos permitem avaliar o desempenho do soft starter quanto à preservação da qualidade da energia, indicando se os níveis de distorção permanecem dentro dos padrões normativos durante a partida e após o motor atingir seu regime permanente.

Palavras-chave: Motores de indução trifásicos. Soft starter. Distorção harmônica. Qualidade da energia elétrica.

ABSTRACT

Three-phase induction motors are widely used in industrial environments due to their robustness, simple construction, and reliable operational performance. However, the starting process of these motors can negatively impact power quality, especially due to the harmonic distortions generated during this stage. Among the alternatives to reduce the effects of direct-on-line starting, the use of soft starters stands out, as they allow gradual voltage application to the motor, reducing current peaks and mechanical stress. This work aims to analyze the effects of starting three-phase induction motors on voltage and current waveforms, focusing on the harmonic distortions introduced by using a soft starter. For this purpose, measurements were carried out using the MAR 722 power quality analyzer from Megabrás, and the results were compared to the limits established by Module 8 of PRODIST – Electric Energy Distribution Procedures in the National Electric System, issued by ANEEL. The collected data allow for an evaluation of the soft starter's performance regarding the preservation of power quality, indicating whether distortion levels remain within regulatory standards during motor startup and steady-state operation.

Keywords: Three-phase induction motors. Soft starter. Harmonic distortion. Power quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1–Motor de indução trifásico.	16
Figura 2.2–Componentes típicos de um motor de indução trifásico: estrutura externa e interna.	18
Figura 2.3–Diagrama elétrico da partida direta de motor trifásico. Fonte: <i>ResearchGate</i> (ResearchGate, 2023).	20
Figura 2.4–Diagrama elétrico da partida com soft starter. Fonte: <i>ResearchGate</i> (ResearchGate, 2023).	22
Figura 2.5–Diagrama elétrico da partida com inversor de frequência. Fonte: <i>ResearchGate</i> (ResearchGate, 2023).	23
Figura 2.6–Soft Starter WEG modelo SSW05 para motores trifásicos. Fonte: <i>WEG</i>	25
Figura 2.7–(a) Forma de onda senoidal ideal; (b) Forma de onda senoidal distorcida pela presença de múltiplas frequências harmônicas. Fonte: MARTINHO, 2012, p. 79	31
Figura 2.8–Representação da decomposição de um sinal distorcido. Fonte: (MARTINHO, 2012, p. 78)	31
Figura 3.1–Montagem em partida direta. Fonte: <i>Autor</i>	46
Figura 3.2–Montagem com soft starter. Fonte: <i>Autor</i>	48
Figura 4.1–Distorções Harmônicas de tensão - Partida Direta. Fonte: <i>MEGABRAS - Power View</i>	51
Figura 4.2–Distorções Harmônicas de tensão - Partida Direta em Regime Permanente. Fonte: <i>MEGABRAS - Power View</i>	53
Figura 4.3–Distorções Harmônicas de corrente - Partida Direta. Fonte: <i>MEGABRAS - Power View</i>	54
Figura 4.4–Distorções Harmônicas de corrente - Partida Direta em Regime Permanente. Fonte: <i>MEGABRAS - Power View</i>	55
Figura 4.5–Distorções harmonicas de tensão na partida antes do soft starter. Fonte: <i>MEGABRAS - Power View</i>	57
Figura 4.6–Distorções harmonicas de tensão em regime permanente antes do soft starter. Fonte: <i>MEGABRAS - Power View</i>	58
Figura 4.7–Distorções harmonicas de corrente na partida antes do soft starter. Fonte: <i>MEGABRAS - Power View</i>	59
Figura 4.8–Distorções harmonicas de corrente em regime permanente antes do soft starter. Fonte: <i>MEGABRAS - Power View</i>	60
Figura 4.9–Distorções harmonicas de tensão na partida antes da carga. Fonte: <i>MEGABRAS - Power View</i>	62

Figura 4.10–Distorções harmônicas de tensão em regime permanente antes da carga. Fonte: <i>MEGABRAS - Power View</i>	63
Figura 4.11–Distorções harmônicas de corrente na partida antes da carga. Fonte: <i>MEGABRAS - Power View</i>	65
Figura 4.12–Distorções harmônicas de corrente em regime permanente antes da carga. Fonte: <i>MEGABRAS - Power View</i>	67
Figura 4.13–Distorções harmônicas de tensão na partida antes do inversor de frequência. Fonte: <i>TCC - Eduarda Inácio Pacheco</i>	68
Figura 4.14–Distorções harmônicas de tensão em regime permanente antes do inversor de frequência. Fonte: <i>TCC - Eduarda Inácio Pacheco</i>	69
Figura 4.15–Distorções harmônicas de corrente na partida antes do inversor de frequência. Fonte: <i>TCC - Eduarda Inácio Pacheco</i>	70
Figura 4.16–Distorções harmônicas de corrente em regime permanente antes do inversor de frequência. Fonte: <i>TCC - Eduarda Inácio Pacheco</i>	71
Figura 4.17–Distorções harmônicas de tensão na partida depois do inversor de frequência. Fonte: <i>TCC - Eduarda Inácio Pacheco</i>	72
Figura 4.18–Distorções harmônicas de tensão em regime permanente depois do inversor de frequência. Fonte: <i>TCC - Eduarda Inácio Pacheco</i>	73
Figura 4.19–Distorções harmônicas de corrente na partida depois do inversor de frequência. Fonte: <i>TCC - Eduarda Inácio Pacheco</i>	74
Figura 4.20–Distorções harmônicas de corrente em regime permanente depois do inversor de frequência. Fonte: <i>TCC - Eduarda Inácio Pacheco</i>	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1–Limites de distorção harmônica conforme tensão nominal . .	39
Tabela 3.1–Características do Motor de Indução Trifásico modelo 250512	45
Tabela 3.2–Parâmetros de parametrização do Soft Starter	47
Tabela 4.1–Partida Direta - Parida	50
Tabela 4.2–Partida Direta - Regime Permanente	52
Tabela 4.3–Partida Direta - Partida	53
Tabela 4.4–Partida Direta - Regime Permanente	55
Tabela 4.5–Partida com Soft Starter - Partida	56
Tabela 4.6–Partida com Soft Starter - Regime Permanente	57
Tabela 4.7–Partida com Soft Starter - Partida	59
Tabela 4.8–Partida com Soft Starter - Regime Permanente	60
Tabela 4.9–Partida com Soft Starter - Partida	61
Tabela 4.10–Partida com Soft Starter - Regime Permanente	62
Tabela 4.11–Partida com Soft Starter - Partida	64
Tabela 4.12–Partida com Soft Starter - Regime Permanente	65

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	10
1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivos	14
1.1.1 Objetivo Geral	14
1.1.2 Objetivos específicos	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 Motores de Indução Trifásicos	15
2.1.1 Funcionamento e Componentes	16
2.1.2 Estator	17
2.1.3 Rotor	17
2.1.4 Carcaça e Ventilação	17
2.1.5 Rolamentos e Mancais	17
2.1.6 Caixa de Ligação	17
2.2 Métodos de Partida	18
2.2.1 Partida Direta	18
2.2.2 Partida com Soft Starter	20
2.2.3 Partida com Inversor de Frequência	22
2.3 Soft Starter	24
2.3.1 Princípio de Funcionamento	25
2.3.2 Componentes e Arquitetura	25
2.3.3 Vantagens	26
2.3.4 Limitações	26
2.3.5 Aplicações Industriais	27
2.4 Qualidade de Energia	27

2.4.1	Parâmetros de Qualidade de Energia	28
2.4.2	Regulamentação e Monitoramento	29
2.5	Distorções Harmônicas	29
2.5.1	Fundamentos Teóricos	30
2.5.2	Causas das distorções harmônicas	32
2.5.3	Efeitos das distorções harmônicas	34
2.5.4	Medição e monitoramento	37
2.5.5	Limites regulamentares	39
2.5.6	Técnicas de mitigação	40
3	METODOLOGIA	44
3.1	Materiais e componentes	45
3.2	Partida direta	46
3.3	Partida utilizando o Soft Starter	47
3.4	Comparação de resultados com trabalhos anteriores	48
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
4.1	Partida direta	50
4.1.1	Distorções Harmônicas de tensão	50
4.1.2	Distorções Harmônicas de corrente	53
4.2	Partida com Soft Starter	56
4.2.1	Medição antes do Soft Starter	56
4.2.2	Medição antes da carga (MIT)	61
4.3	Comparação Soft Starter X Inversor de Frequência	67
4.3.1	Medição antes do Soft Starter/Inversor de Frequência	68
4.3.2	Medição depois do Soft Starter/Inversor de Frequência	72
5	CONCLUSÃO	76
	REFERÊNCIAS	77

1 INTRODUÇÃO

Os motores de indução trifásicos ocupam papel central no ambiente industrial, sendo responsáveis por uma parcela significativa do consumo de energia elétrica no Brasil. Sua popularidade está associada à construção simples, elevada confiabilidade e baixa necessidade de manutenção, características que os tornam ideais para aplicações contínuas e exigentes. Apesar de suas vantagens, a etapa de partida desses motores pode representar um desafio para a qualidade da energia elétrica, especialmente em sistemas onde há sensibilidade a distúrbios.

Durante a partida, o motor demanda uma corrente significativamente superior à nominal, o que pode provocar variações na tensão da rede e contribuir para o surgimento de distorções harmônicas. Tais distorções afetam o desempenho de equipamentos eletrônicos, reduzem a eficiência dos sistemas e aumentam a necessidade de manutenção. Nesse contexto, dispositivos como os soft starters surgem como solução viável para atenuar esses efeitos, proporcionando uma rampa de aceleração controlada por meio do disparo gradual de tiristores.

Diante da crescente preocupação com a Qualidade da Energia Elétrica (QEE), diversos setores — incluindo concessionárias, indústrias e órgãos reguladores — têm se mobilizado para identificar, quantificar e mitigar os impactos desses fenômenos. Entre os principais distúrbios destacam-se as distorções harmônicas, desequilíbrios de tensão, flutuações de frequência e variações de curto e longo prazo na amplitude da tensão. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), por meio do Módulo 8 do PRODIST, estabelece diretrizes e limites normativos para esses eventos, orientando tanto o fornecimento quanto o uso da energia elétrica em sistemas industriais. (ANEEL, 2022)

Neste trabalho, propõe-se a análise das distorções harmônicas de tensão e corrente geradas durante a partida de um motor de indução trifásico acionado por um soft starter. Para isso, foram realizados ensaios experimentais utilizando o analisador de qualidade de energia MAR 722 da Megabrás. Os dados obtidos foram analisados e confrontados com os limites estipulados no Módulo 8 do PRODIST, possibilitando uma avaliação do impacto do soft starter na qualidade da energia elétrica em diferentes estágios de operação do motor. A investigação contribui para o entendimento dos efeitos da eletrônica de potência sobre sistemas industriais e fornece subsídios para a adoção de práticas mais eficientes e conformes às normas vigentes. (ANEEL, 2022)

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é realizar um estudo analítico da qualidade da energia elétrica durante a partida de motores de indução trifásicos acionados por soft starters, focando na análise das distorções harmônicas de tensão e corrente, e avaliando sua conformidade com os parâmetros estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST da ANEEL.

1.1.2 Objetivos específicos

- Compreender o funcionamento do analisador de qualidade de energia MAR 722 da Megabrás e suas principais funções;
- Identificar as características técnicas e operacionais dos soft starters utilizados em motores de indução trifásicos;
- Realizar medições das distorções harmônicas de tensão e corrente durante a partida e operação em regime permanente dos motores;
- Comparar os resultados obtidos com os limites normativos estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST;
- Avaliar o impacto do uso do soft starter na preservação da qualidade da energia elétrica;
- Fornecer subsídios para a aplicação industrial do soft starter, visando a melhoria da eficiência energética e a redução de impactos na rede elétrica.
- Realizar um estudo comparativo com trabalhos anteriores

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Os motores de indução trifásicos são amplamente utilizados na indústria devido à sua durabilidade, facilidade de manutenção e custo relativamente baixo. Em geral, eles são responsáveis por grande parte do consumo elétrico em ambientes produtivos, operando em aplicações contínuas como ventiladores, prensas e compressores. No entanto, o processo de partida desses motores pode gerar correntes elevadas, que superam várias vezes a corrente nominal, o que acarreta perturbações no sistema elétrico e possíveis distorções na forma de onda da corrente. (NEVES, 2014).

O funcionamento básico dos motores de indução trifásicos baseia-se na geração de um campo magnético girante no estator, que induz uma corrente no rotor por meio do princípio da indução eletromagnética. Essa corrente, por sua vez, gera um segundo campo magnético que interage com o primeiro, resultando na produção de torque. Uma característica fundamental é o escorregamento, ou seja, a diferença entre a velocidade do campo girante e a rotação real do rotor (FILHO; JÚNIOR, 2021).

Apesar de suas vantagens, a partida desses motores apresenta desafios importantes. A corrente de partida pode ser de cinco a oito vezes superior à corrente nominal, o que pode causar quedas de tensão no sistema elétrico, afetando outros equipamentos e gerando distorções nas formas de onda de corrente e tensão (UTFPR, 2012). Essas distorções podem comprometer a qualidade da energia elétrica, reduzir a vida útil de equipamentos e aumentar os custos de manutenção.

A busca por técnicas que minimizem os impactos da partida direta levou ao desenvolvimento de dispositivos como os *soft starters*. Esses equipamentos atuam controlando gradualmente a tensão aplicada ao motor por meio do disparo faseado de tiristores, reduzindo os picos de corrente e os esforços mecânicos. Além disso, os *soft starters* contribuem para a melhoria do fator de potência e para a mitigação de distúrbios harmônicos durante o processo de aceleração (MOURÁ JÚNIOR, 2021).

Do ponto de vista da Qualidade da Energia Elétrica, o uso de *soft starters* se mostra relevante, principalmente em sistemas sensíveis a flutuações e variações transitórias. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), por meio do Módulo 8 do PRODIST, estabelece diretrizes e limites normativos para esses eventos, orientando tanto o fornecimento quanto o uso da energia elétrica em sistemas industriais (ANEEL, 2022).

A avaliação da qualidade da energia durante a partida de motores é essencial para verificar se os dispositivos utilizados atendem às exigências normativas. Equipamentos como o analisador de qualidade de energia MAR 722 permitem mensurar grandezas como corrente, tensão, potência ativa, fator de potência e, especialmente, os índices de distorção harmônica (ELÉTRICOS, 2020). Tais medições possibilitam a comparação entre os efeitos

causados pela partida direta e pela partida com auxílio de um *soft starter*.

Dessa forma, o estudo da interação entre motores de indução trifásicos, distorções harmônicas e dispositivos de partida progressiva representa um campo relevante para garantir o desempenho eficiente dos sistemas elétricos, com menor impacto à rede e maior conformidade com as normas técnicas vigentes.

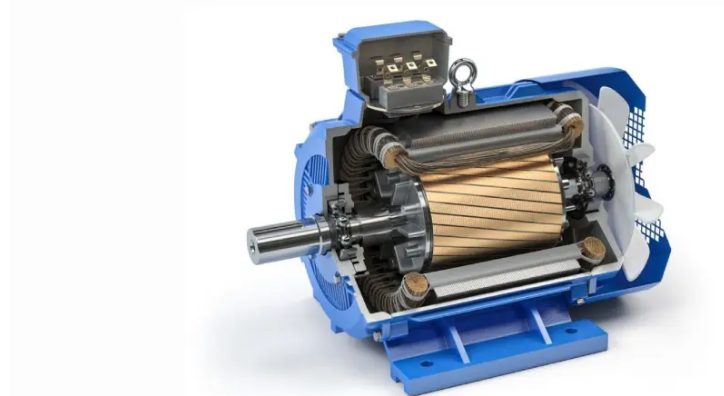


Figura 2.1 – Motor de indução trifásico.

2.1.1 Funcionamento e Componentes

Os motores de indução trifásicos constituem a principal forma de conversão eletromecânica de energia em ambientes industriais. Estima-se que aproximadamente 90% dos motores utilizados em processos industriais sejam do tipo indução trifásica, em razão de sua elevada confiabilidade, construção simples, baixo custo de manutenção e boa eficiência energética ((UNESP), 2015). São aplicados em diversos setores, como sistemas de ventilação, transporte de carga, bombeamento de fluidos, compressores, extrusoras e esteiras industriais.

O princípio de funcionamento desses motores baseia-se na indução eletromagnética, conforme previsto pelas leis de Faraday e Lenz. Quando uma fonte de alimentação trifásica é aplicada aos enrolamentos do estator, forma-se um campo magnético girante no interior do motor. Esse campo, ao cortar os condutores do rotor (seja ele do tipo gaiola ou bobinado), induz correntes elétricas. As correntes geradas no rotor interagem com o campo magnético do estator, produzindo torque, o qual impulsiona o rotor a girar (MEHL, 2012).

Diferentemente dos motores síncronos, os motores de indução operam com escorregamento, ou seja, a velocidade do rotor é ligeiramente inferior à velocidade do campo girante. Esse diferencial de velocidade é essencial para que ocorra a indução de corrente no rotor e, por consequência, a produção contínua de torque (BOLLEN, 2003).

O motor é composto por diversos componentes fundamentais para seu correto funcionamento:

2.1.2 Estator

O estator é a parte fixa do motor, formado por chapas magnéticas empilhadas para reduzir perdas por correntes parasitas. Nessas chapas são inseridos enrolamentos trifásicos, distribuídos de forma a gerar um campo magnético uniforme. A simetria da alimentação trifásica assegura que esse campo possua uma rotação constante dentro da carcaça (SANKARAN, 2017).

2.1.3 Rotor

O rotor é a parte móvel, localizada no interior do estator. O tipo mais comum é o rotor gaiola de esquilo, que possui barras de alumínio ou cobre conectadas por anéis condutores nas extremidades, formando um circuito fechado. Já o rotor bobinado apresenta enrolamentos semelhantes aos do estator, conectados a anéis coletores e escovas, permitindo controle adicional de torque e corrente (MORENO-MUÑOZ, 2007).

2.1.4 Carcaça e Ventilação

A carcaça envolve e protege os componentes internos do motor, além de proporcionar suporte estrutural. Em sua extremidade, geralmente há um ventilador acoplado ao eixo que garante o resfriamento forçado, fundamental para a dissipação térmica durante o funcionamento contínuo (SILVA et al., 2002).

2.1.5 Rolamentos e Mancais

Esses componentes são responsáveis por sustentar o eixo do rotor e permitir sua rotação suave. Rolamentos de qualidade e bem lubrificados reduzem atrito, vibração e aquecimento, fatores cruciais para a vida útil do motor.

2.1.6 Caixa de Ligação

É o compartimento onde se realizam as conexões elétricas entre a alimentação externa e os terminais do estator. Geralmente é projetada com grau de proteção adequado (ex: IP55), evitando a entrada de poeira e umidade em ambientes industriais.

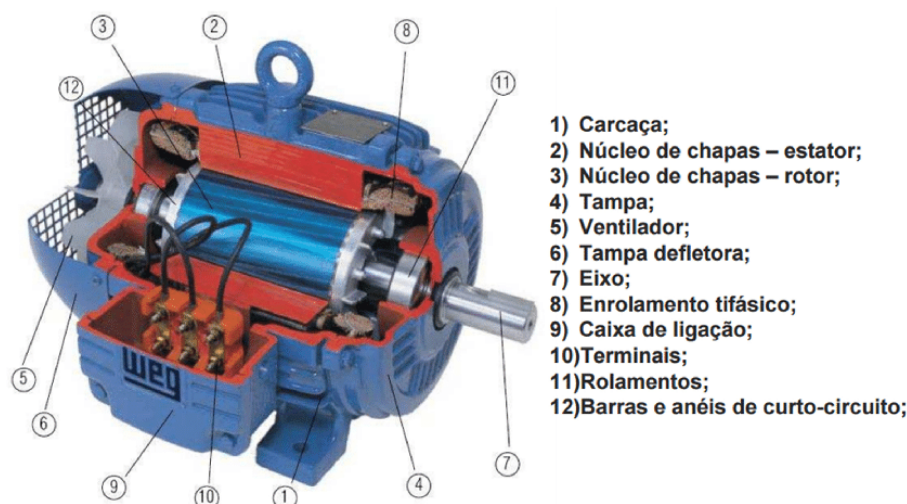


Figura 2.2 – Componentes típicos de um motor de indução trifásico: estrutura externa e interna.

Além de sua eficiência, outra vantagem dos motores de indução trifásicos é sua versatilidade de partida, que pode ser feita de modo direto, estrela-triângulo, por autotransformador ou ainda por dispositivos de controle eletrônico como inversores de frequência e soft starters, que serão discutidos nas próximas seções deste trabalho.

2.2 MÉTODOS DE PARTIDA

A partida de motores de indução trifásicos é uma etapa crítica na operação de sistemas eletromecânicos, pois envolve a aplicação de corrente significativamente superior à corrente nominal. Este pico de corrente pode representar de cinco a oito vezes o valor nominal, impactando negativamente a qualidade da energia elétrica, provocando quedas de tensão e impondo esforços mecânicos excessivos à carga (GIERAS, 2011).

Para mitigar esses efeitos, foram desenvolvidos diversos métodos de partida, que podem ser agrupados em técnicas convencionais e eletrônicas. A seguir, são descritos os principais métodos, acompanhados de seus respectivos diagramas elétricos.

2.2.1 Partida Direta

A partida direta é um dos métodos mais simples e comuns utilizados para o acionamento de motores de indução trifásicos, sendo frequentemente empregada em sistemas onde não há restrições quanto à corrente de partida. Nesse método, o motor é diretamente conectado à rede elétrica, sem a aplicação de nenhum controle para suavizar a corrente inicial. Como resultado, a corrente de partida pode ser até 7 vezes superior à corrente nominal do motor, o que pode gerar picos de corrente significativos e afetar a estabilidade da rede elétrica. Esses picos transitórios podem causar quedas de tensão, sobrecarga nos transformadores e dispositivos de proteção, e podem até mesmo danificar os próprios motores, caso o sistema não seja adequadamente dimensionado para suportá-los.

Ao ser acionado de forma direta, o motor recebe a tensão completa da rede, o que resulta em uma aceleração rápida até a velocidade nominal. Essa aceleração é acompanhada por um aumento imediato na corrente consumida, que diminui gradualmente à medida que o motor atinge sua velocidade de operação estável. Embora esse método seja simples e de baixo custo, ele não oferece controle sobre a aceleração ou o torque de partida, o que pode ser prejudicial em aplicações que exigem uma aceleração mais controlada para evitar danos mecânicos nas cargas acopladas ao motor.

A principal vantagem da partida direta é a sua simplicidade e o baixo custo de implementação, já que não requer a instalação de dispositivos adicionais, como inversores de frequência ou soft starters. Isso a torna uma opção viável em muitos casos, especialmente em sistemas onde as correntes de partida elevadas não representam um risco significativo ou onde o custo inicial deve ser mantido baixo. Além disso, esse método é muito utilizado para motores de menor potência, que não geram impactos tão expressivos na rede elétrica durante o arranque.

No entanto, as desvantagens da partida direta são notáveis. A corrente de partida elevada pode causar distúrbios na qualidade da energia elétrica fornecida ao sistema, impactando não apenas o motor em questão, mas também os equipamentos conectados à mesma rede. Esses distúrbios podem incluir picos de tensão, sobrecarga nos transformadores, e até falhas nos dispositivos de proteção da rede elétrica. Em ambientes industriais, onde múltiplos motores são acionados simultaneamente, os picos de corrente podem afetar a estabilidade do sistema e prejudicar o desempenho de outros equipamentos.

Além disso, a partida direta pode gerar um torque de arranque elevado, o que, em certos casos, pode causar danos mecânicos à carga acoplada ao motor, como vibrações excessivas ou até mesmo falhas em sistemas de transmissão. Em máquinas e equipamentos que exigem uma aceleração controlada, a partida direta pode não ser adequada, pois a aceleração abrupta pode resultar em danos.

Em resumo, embora a partida direta seja uma solução simples e econômica, ela deve ser cuidadosamente avaliada para garantir que seus impactos sobre a qualidade da energia elétrica e sobre o desgaste do motor e da carga sejam aceitáveis. Para sistemas em que os distúrbios de corrente e torque de partida podem causar danos ou degradação dos equipamentos, métodos alternativos, como a partida estrela-triângulo ou o uso de soft starters, podem ser mais apropriados. (CHAPMAN, 2012).

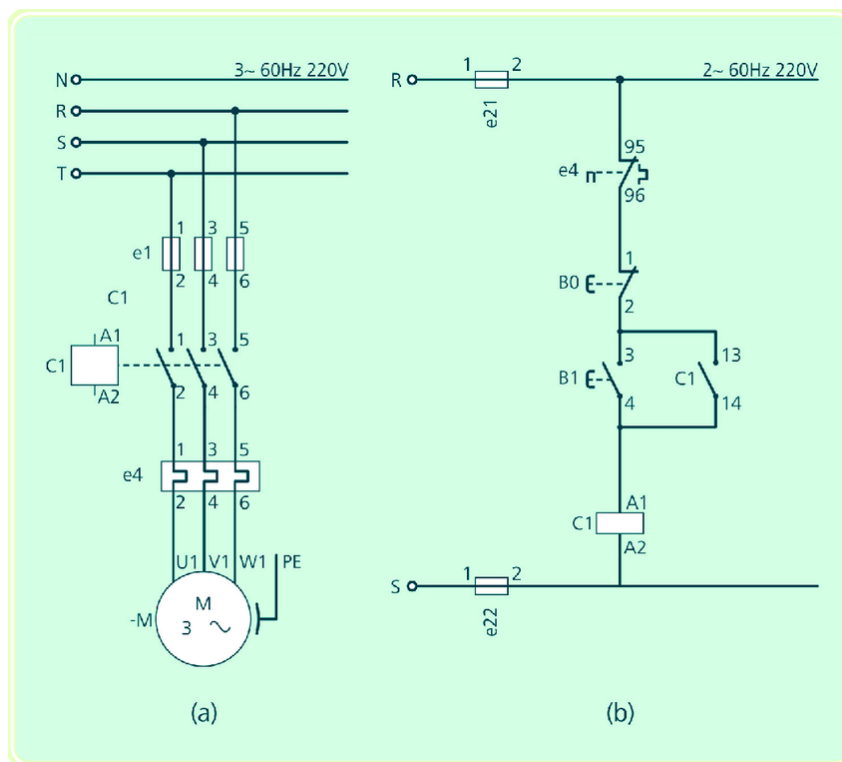


Figura 2.3 – Diagrama elétrico da partida direta de motor trifásico. Fonte: *ResearchGate* (ResearchGate, 2023).

2.2.2 Partida com Soft Starter

A partida com soft starter é uma das alternativas mais eficientes para reduzir a corrente de partida de motores de indução trifásicos, controlando a tensão aplicada ao motor durante o processo de arranque. Esse método é amplamente utilizado em sistemas industriais que demandam um controle mais suave da partida, a fim de minimizar os impactos na rede elétrica e reduzir o estresse mecânico sobre o motor e os equipamentos acoplados. O princípio básico de funcionamento do soft starter é baseado no controle eletrônico da tensão, limitando a corrente de partida e proporcionando uma aceleração gradual do motor até sua velocidade nominal.

Durante o processo de partida, o soft starter aplica inicialmente uma tensão reduzida ao motor, o que resulta em uma corrente de partida significativamente mais baixa em comparação com a partida direta. A tensão é aumentada de forma gradual até que o motor atinja sua velocidade de operação, proporcionando uma aceleração suave. Isso reduz o pico de corrente de partida, que normalmente seria de 5 a 8 vezes a corrente nominal em uma partida direta, para valores muito mais baixos, geralmente entre 2 e 3 vezes a corrente nominal, dependendo da configuração do soft starter.

O uso do soft starter oferece várias vantagens em relação a métodos de partida tradicionais, como a partida direta. Primeiramente, a redução da corrente de partida minimiza os distúrbios na rede elétrica, como quedas de tensão e sobrecarga nos transformadores, além de proteger os dispositivos de proteção da rede, como disjuntores e fusíveis,

de acionamentos indesejados. Além disso, a partida suave reduz o impacto mecânico sobre o motor e a carga acoplada, o que ajuda a prolongar a vida útil desses equipamentos, prevenindo falhas prematuras devido a choques e vibrações excessivas.

Outra vantagem importante do soft starter é sua capacidade de reduzir o torque de partida. Com uma partida controlada, o torque é gradualmente aumentado até que o motor atinja sua velocidade nominal, evitando os picos de torque elevados que são típicos das partidas diretas e podem causar danos às máquinas e ao sistema de transmissão. Esse controle do torque é particularmente útil em aplicações que exigem uma aceleração controlada para evitar danos em sistemas sensíveis ou em máquinas que operam com cargas variáveis.

Apesar de suas vantagens, a partida com soft starter apresenta algumas limitações. Em primeiro lugar, o soft starter não oferece controle sobre a velocidade do motor durante o regime permanente, o que significa que ele não pode ser utilizado em sistemas que exigem ajuste contínuo de velocidade. Além disso, embora a corrente de partida seja significativamente reduzida, o soft starter ainda gera um pequeno pico de corrente durante a transição para a tensão nominal, embora muito menor do que o observado em uma partida direta.

Outro ponto a ser considerado é o custo inicial de instalação de um soft starter, que pode ser mais elevado em comparação com métodos simples como a partida direta ou a partida estrela-triângulo. Contudo, esse custo é justificado pela economia gerada na redução do desgaste do motor e dos sistemas elétricos, além da melhoria na qualidade da energia elétrica fornecida à rede.

Em resumo, a partida com soft starter é uma solução eficaz para reduzir as distorções harmônicas e os picos de corrente durante a partida de motores de indução trifásicos. Embora tenha um custo inicial maior, suas vantagens em termos de proteção dos equipamentos, redução do estresse mecânico e minimização dos impactos na qualidade da energia elétrica tornam este método altamente recomendável para aplicações industriais onde o controle preciso da partida e a proteção da rede elétrica são prioridades. (MOURÁ JÚNIOR, 2021).

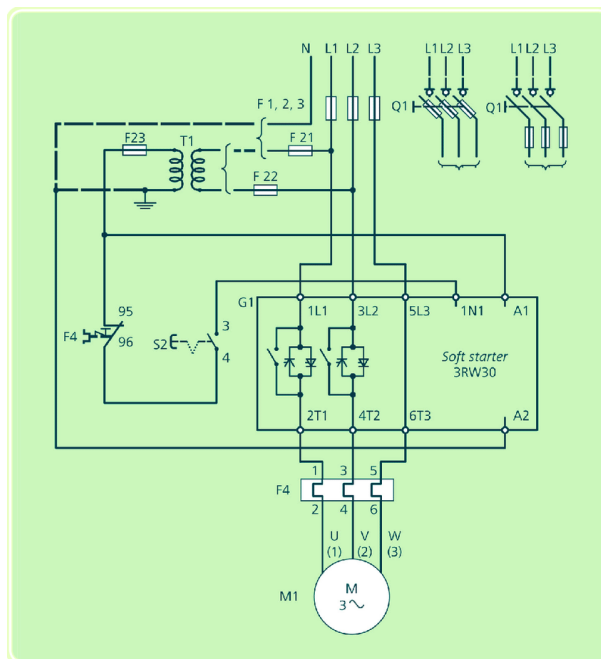


Figura 2.4 – Diagrama elétrico da partida com soft starter. Fonte: *ResearchGate* (ResearchGate, 2023).

2.2.3 Partida com Inversor de Frequência

A partida com inversor de frequência é uma das soluções mais avançadas para o controle de motores de indução trifásicos, proporcionando um controle preciso da aceleração, velocidade e torque do motor. Esse método é amplamente utilizado em aplicações industriais que exigem um controle detalhado da partida, com ênfase na redução de picos de corrente e torque, garantindo uma operação suave e protegida para o motor e os equipamentos conectados.

O inversor de frequência (VFD - Variable Frequency Drive) permite o controle da frequência e da tensão aplicadas ao motor, proporcionando uma partida suave e sem os picos elevados de corrente característicos da partida direta. Durante o arranque, o inversor aplica uma tensão reduzida ao motor e aumenta gradualmente tanto a tensão quanto a frequência, o que resulta em uma aceleração controlada do motor até atingir a velocidade nominal. Esse controle de frequência e tensão evita a sobrecarga do motor e da rede elétrica, além de minimizar as distorções harmônicas geradas durante a partida.

Uma das principais vantagens desse método é a capacidade de controlar não só a partida do motor, mas também sua operação contínua. Com o inversor de frequência, é possível ajustar a velocidade do motor de forma contínua, o que oferece uma grande flexibilidade em aplicações que exigem variação de velocidade ou torque, como bombas, ventiladores, transportadores e sistemas de ventilação. Além disso, o controle de velocidade proporcionado pelo inversor de frequência pode resultar em significativas economias de energia, já que a potência consumida pelo motor é diretamente proporcional à velocidade de operação.

Outro benefício importante do inversor de frequência é a proteção do motor e da carga. Ao controlar a aceleração e o torque durante a partida, o inversor de frequência reduz o estresse mecânico sobre o motor e a carga acoplada, prevenindo falhas prematuras e prolongando a vida útil dos equipamentos. Além disso, o inversor pode ser configurado para fornecer proteção contra sobrecarga, subtensão, sobretemperatura e falha de fase, aumentando a segurança do sistema.

Apesar das vantagens, a utilização de inversores de frequência também apresenta algumas desvantagens. O custo inicial de instalação é significativamente mais alto em comparação com métodos de partida simples, como a partida direta ou estrela-triângulo. Esse custo pode ser um fator limitante em aplicações de motores de menor porte, onde as soluções mais simples são suficientes. Além disso, o inversor de frequência requer manutenção mais complexa e especializada, o que pode aumentar os custos operacionais ao longo do tempo.

Outro ponto a ser considerado é que, embora o inversor de frequência ofereça um controle muito preciso da partida e operação do motor, ele pode gerar distorções harmônicas devido à modulação da forma de onda de tensão. Para mitigar esses efeitos, pode ser necessário utilizar filtros harmônicos ou sistemas de compensação, o que aumenta ainda mais o custo de implementação e manutenção.

Em resumo, a partida com inversor de frequência é uma solução altamente eficaz para o controle da partida e operação de motores de indução trifásicos, especialmente em aplicações que exigem controle de velocidade, torque ou operação em condições variáveis. Apesar do custo inicial elevado e da necessidade de manutenção especializada, o inversor de frequência oferece uma série de benefícios, como redução de distorções harmônicas, proteção do motor e economia de energia, tornando-se uma escolha ideal para sistemas industriais mais complexos e críticos. (BOSE, 2011).

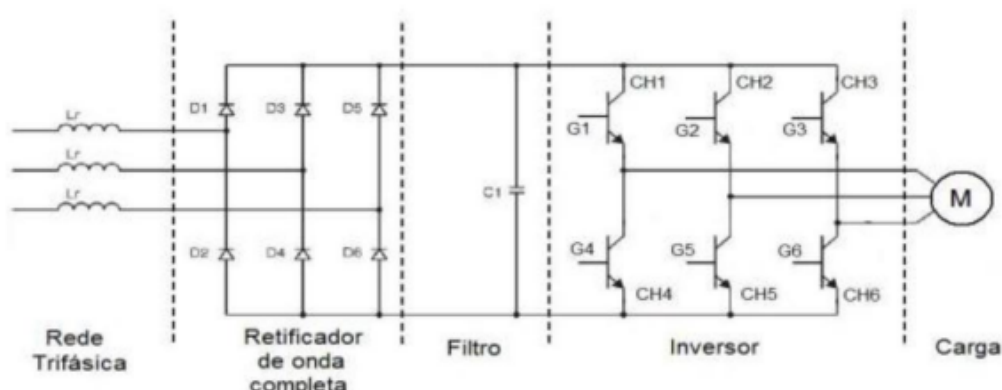


Figura 2.5 – Diagrama elétrico da partida com inversor de frequência. Fonte: *ResearchGate* (ResearchGate, 2023).

2.3 SOFT STARTER

Os motores de indução trifásicos são amplamente utilizados em ambientes industriais devido à sua robustez, eficiência e baixo custo de manutenção. Contudo, a partida desses motores, especialmente em aplicações de alta potência, pode causar impactos significativos tanto no sistema elétrico quanto nos próprios equipamentos mecânicos. Durante o arranque direto, a corrente elétrica absorvida pelo motor pode atingir valores entre cinco a oito vezes a corrente nominal, gerando picos que provocam quedas de tensão substanciais na rede elétrica. Esses picos não só afetam o desempenho de outros equipamentos ligados à mesma rede, como também aceleram o desgaste dos componentes do motor e da carga acoplada.

Para minimizar esses efeitos negativos, diversas soluções foram desenvolvidas ao longo do tempo. Entre elas, os soft starters emergiram como uma tecnologia eficaz e acessível para controlar o processo de partida do motor. Ao limitar a tensão aplicada no início do arranque e aumentá-la gradativamente, o soft starter permite que o motor acelere suavemente, reduzindo significativamente a corrente de partida e o torque inicial. Esse controle progressivo evita choques mecânicos abruptos, prolongando a vida útil dos equipamentos e melhorando a estabilidade da rede elétrica.

Além do impacto positivo sobre a corrente e o torque, o uso do soft starter está diretamente relacionado à melhoria da qualidade da energia elétrica disponível na instalação. Ao diminuir as oscilações transitórias de tensão, esse dispositivo contribui para a proteção de cargas sensíveis e evita interferências que podem comprometer processos industriais críticos. Por isso, o soft starter é amplamente empregado em diversas indústrias onde a confiabilidade e a eficiência operacional são requisitos essenciais.

Dessa forma, o soft starter configura-se como uma solução tecnológica estratégica para a partida de motores de indução, conciliando proteção do sistema elétrico, segurança mecânica e otimização do desempenho operacional. Sua utilização representa um avanço importante frente à partida direta tradicional, especialmente em contextos industriais que demandam alta disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos (MOURÁ JÚNIOR, 2021).



Figura 2.6 – Soft Starter WEG modelo SSW05 para motores trifásicos. Fonte: WEG.

2.3.1 Princípio de Funcionamento

O funcionamento dos soft starters baseia-se na modulação da tensão aplicada ao motor, realizada por meio do controle faseado dos semicondutores (geralmente tiristores ou SCRs). Esses componentes eletrônicos são acionados em pontos específicos de cada semiciclo da corrente alternada, determinando a quantidade efetiva de tensão fornecida ao motor.

No início da partida, a tensão é aplicada com ângulo de disparo elevado, ou seja, os tiristores são acionados tardiamente no ciclo, reduzindo a tensão média aplicada. Conforme a rotação do motor aumenta, o ângulo de disparo é progressivamente reduzido, aumentando a tensão aplicada até atingir o valor nominal da rede elétrica. Essa rampa de tensão suave controla diretamente a corrente e o torque durante o arranque, proporcionando uma aceleração gradual e reduzindo os impactos na rede e no equipamento (LIU; WU, 2014).

2.3.2 Componentes e Arquitetura

Um sistema típico de soft starter é constituído por vários componentes fundamentais que garantem seu funcionamento eficiente e seguro:

- **Módulo de Potência:** Consiste nos semicondutores que fazem o controle da tensão. Os tiristores são capazes de suportar altas correntes e realizar o disparo preciso em cada semiciclo da corrente alternada.
- **Unidade de Controle Eletrônico:** Circuitos digitais ou microcontroladores que processam os sinais de entrada e determinam o ângulo de disparo dos tiristores. Esta unidade permite configurar parâmetros como tempo de rampa, corrente máxima permitida, torque inicial, e possibilita a comunicação com sistemas supervisórios.
- **Circuitos de Proteção:** Sensores e circuitos que monitoram condições como sobrecorrente, subtensão, falha de fase, temperatura e outras variáveis críticas, acionando alarmes ou desligando o sistema para evitar danos ao motor ou à instalação.
- **Interface Homem-Máquina (IHM):** Tela e controles que possibilitam a programação, o monitoramento e o diagnóstico do soft starter, podendo incluir também comunicação via protocolos industriais.

2.3.3 Vantagens

A adoção dos soft starters oferece múltiplos benefícios, essenciais para a operação segura e eficiente de motores elétricos em ambientes industriais:

- **Redução dos Picos de Corrente:** Ao limitar a corrente inicial, evita-se a sobrecarga na rede elétrica e o disparo indevido de dispositivos de proteção.
- **Proteção Mecânica:** A partida suave minimiza choques mecânicos na transmissão e na carga acoplada, reduzindo o desgaste prematuro e a necessidade de manutenção.
- **Melhora da Qualidade da Energia:** A redução das distorções harmônicas e das quedas de tensão mantém a estabilidade do sistema e preserva equipamentos sensíveis conectados à rede.
- **Flexibilidade Operacional:** Parâmetros ajustáveis permitem adaptar o perfil de partida às necessidades específicas de cada aplicação.
- **Custo e Complexidade Menores que Inversores:** Em comparação com inversores de frequência, os soft starters apresentam menor custo e simplicidade de instalação, sendo adequados para muitas aplicações sem necessidade de controle de velocidade contínuo.

2.3.4 Limitações

Apesar dos benefícios, os soft starters possuem restrições técnicas importantes a serem consideradas:

- **Controle Limitado da Velocidade:** Soft starters atuam somente durante a partida, sem possibilitar variação de velocidade durante a operação normal do motor.
- **Picos Transitórios:** A transição para tensão plena pode gerar picos momentâneos de corrente, requerendo atenção na configuração e instalação.
- **Geração de Harmônicos:** Embora menores que inversores, os soft starters produzem harmônicos devido ao acionamento faseado dos tiristores, podendo afetar a qualidade da energia.
- **Aplicação Específica:** Indicados principalmente para situações que demandam redução dos impactos da partida, mas sem necessidade de controle dinâmico durante o funcionamento.

2.3.5 Aplicações Industriais

Os soft starters são empregados em diversos segmentos industriais, especialmente onde há a necessidade de partidas frequentes e controle do impacto sobre a rede elétrica e o sistema mecânico:

- **Bombas:** Partida suave evita golpes de aríete e protege tubulações.
- **Compressores:** Reduz o estresse mecânico e elétrico durante o arranque.
- **Transportadores e Esteiras:** Proporciona aceleração controlada para evitar acidentes e danos mecânicos.
- **Ventiladores e Exaustores:** Minimiza ruídos e oscilações na rede.
- **Elevadores e Guindastes:** Melhora a segurança e prolonga a vida útil dos equipamentos.

2.4 QUALIDADE DE ENERGIA

A qualidade de energia elétrica refere-se à adequação da energia fornecida para garantir o funcionamento eficiente, confiável e seguro dos equipamentos conectados à rede elétrica. Ela envolve a manutenção das características da tensão e corrente dentro de limites estabelecidos, assegurando que as variações e distúrbios não prejudiquem os dispositivos consumidores ou o próprio sistema elétrico (BOLLEN, 2003).

No Brasil, a regulamentação da qualidade de energia é conduzida pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que estabelece normas e limites técnicos no manual PRODIST — Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. O Módulo 8 do PRODIST detalha os requisitos e parâmetros para assegurar a qualidade da energia elétrica distribuída, definindo limites para distúrbios, medições e responsabilidades das concessionárias e consumidores (ANEEL, 2022).

2.4.1 Parâmetros de Qualidade de Energia

Para avaliação da qualidade de energia, são medidos diversos parâmetros essenciais que indicam a presença e a severidade de distúrbios no sistema elétrico. Cada parâmetro reflete um aspecto específico do comportamento da tensão e corrente que pode afetar o desempenho e a vida útil dos equipamentos.

2.4.1.1 Tensão

A tensão elétrica deve permanecer estável e dentro de faixas toleráveis para que os equipamentos funcionem corretamente. As variações de tensão são classificadas em:

- **Sobretensão e subtensão:** Desvios prolongados da tensão nominal que podem causar falhas ou danos aos equipamentos.
- **Flutuações de tensão:** Variações rápidas e repetitivas, perceptíveis em equipamentos sensíveis como lâmpadas fluorescentes.
- **Quedas de tensão (dips) e interrupções:** Reduções momentâneas ou totais da tensão, que podem causar reinicialização ou desligamento dos equipamentos.

O PRODIST estabelece limites para essas variações, garantindo que a tensão fornecida não comprometa a operação dos consumidores (ANEEL, 2022).

2.4.1.2 Frequência

A frequência da rede elétrica, geralmente 60 Hz no Brasil, deve ser mantida estável. Desvios significativos ou prolongados podem causar danos em motores e equipamentos eletrônicos, interferindo no sincronismo de máquinas e na operação de sistemas sensíveis (NEVES, 2014).

2.4.1.3 Distorção Harmônica

Distorções harmônicas correspondem à presença de componentes de frequência múltiplos da frequência fundamental (60 Hz), geradas principalmente por cargas não lineares, como conversores eletrônicos, variadores de frequência e equipamentos de informática.

A distorção harmônica pode provocar aumento do aquecimento em motores, transformadores e condutores, além de causar mau funcionamento e redução da eficiência energética. A medida típica é a Distorção Harmônica Total (THD), que deve ser mantida dentro de limites regulamentares definidos pelo PRODIST (BOLLEN, 2003).

2.4.1.4 Fator de Potência

O fator de potência indica a eficiência na utilização da energia elétrica, sendo a relação entre potência ativa e potência aparente. Baixos fatores de potência significam maior corrente circulando no sistema, o que pode resultar em perdas elevadas e sobrecarga dos equipamentos.

O controle do fator de potência é importante para a redução dos custos e melhoria da estabilidade do sistema elétrico, estando regulado por normas específicas (ANEEL, 2022).

2.4.1.5 Desequilíbrio de Tensão e Corrente

Desequilíbrios ocorrem quando as magnitudes ou os ângulos das tensões ou correntes entre as fases trifásicas apresentam diferenças significativas. Essa condição pode causar aquecimento irregular e falhas prematuras em motores e outros equipamentos trifásicos.

O PRODIST estabelece limites máximos para o desequilíbrio permitido, garantindo operação segura e eficiente (ANEEL, 2022).

2.4.2 Regulamentação e Monitoramento

O monitoramento contínuo da qualidade de energia é fundamental para a identificação de distúrbios e a implementação de medidas corretivas. Analisadores de qualidade de energia, como o modelo MAR 722 da Megabrás, são utilizados para medições precisas dos parâmetros citados, possibilitando a avaliação da conformidade com os limites estabelecidos no PRODIST.

2.5 DISTORÇÕES HARMÔNICAS

As distorções harmônicas são um dos principais desafios para a qualidade da energia elétrica em sistemas industriais e comerciais modernos. Elas ocorrem quando a forma de onda de tensão ou corrente, que deveria ser senoidal, é distorcida pela presença de componentes harmônicas. Essas componentes são frequências múltiplas da frequência fundamental do sistema (geralmente 60 Hz no Brasil), que geram distúrbios nas ondas de corrente e tensão, comprometendo o desempenho dos sistemas elétricos e causando diversos impactos em equipamentos e na rede elétrica como um todo.

A crescente utilização de equipamentos eletrônicos, como inversores de frequência, fontes de alimentação comutadas e dispositivos de controle eletrônico, tem sido uma das principais causas do aumento das distorções harmônicas. Esses dispositivos, ao operarem com formas de onda não senoidais, introduzem harmônicas na rede, afetando a qualidade da energia elétrica fornecida a outros sistemas e equipamentos conectados. A presença

dessas harmônicas pode resultar em uma série de efeitos prejudiciais, como o aquecimento excessivo de transformadores e motores, a falha prematura de dispositivos eletrônicos e até mesmo a interrupção de processos industriais críticos.

Dado seu impacto potencial na eficiência e confiabilidade dos sistemas elétricos, as distorções harmônicas têm atraído crescente atenção em pesquisas e regulamentações técnicas. Organismos internacionais, como o IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) e a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), estabeleceram normas e limites para mitigar os efeitos dessas distorções, visando garantir a estabilidade das redes elétricas e a proteção dos equipamentos conectados.

O controle das distorções harmônicas é essencial para otimizar a operação dos sistemas elétricos, prolongar a vida útil dos equipamentos e reduzir custos operacionais. Assim, este estudo visa não apenas compreender a dinâmica das harmônicas, mas também apresentar soluções eficazes para o gerenciamento da qualidade da energia elétrica em ambientes industriais (BOLLEN, 2003).

2.5.1 Fundamentos Teóricos

As distorções harmônicas ocorrem quando a forma de onda da corrente ou da tensão elétrica, que deveria ser senoidal, apresenta componentes de frequências múltiplas da frequência fundamental do sistema. Essas componentes, conhecidas como harmônicas, alteram a pureza da onda senoidal e, conseqüentemente, afetam a qualidade da energia elétrica fornecida aos sistemas e equipamentos conectados.

A frequência fundamental em sistemas elétricos é geralmente de 60 Hz (no Brasil), e as harmônicas podem ser expressas como múltiplos inteiros dessa frequência fundamental, como a 2ª harmônica (120 Hz), a 3ª harmônica (180 Hz), a 5ª harmônica (300 Hz) e assim por diante. Essas harmônicas distorcem a forma de onda da tensão e da corrente, o que resulta em distúrbios na rede elétrica e pode afetar o funcionamento adequado dos dispositivos conectados. A presença dessas componentes harmônicas é especialmente comum em sistemas com cargas não lineares, como conversores de frequência, fontes de alimentação comutadas e equipamentos eletrônicos modernos.

Para ilustrar a diferença entre uma forma de onda ideal e uma forma de onda distorcida, a Figura 2.8 apresenta a forma de onda senoidal ideal (sem distorções) e a forma de onda distorcida devido à presença de harmônicas. A figura mostra claramente a alteração da onda original devido à adição dessas frequências múltiplas da fundamental.

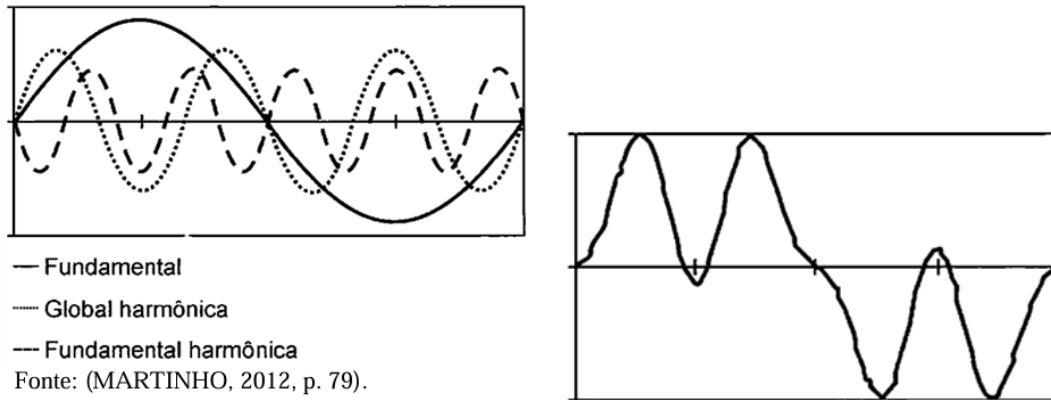


Figura 2.7 – (a) Forma de onda senoidal ideal; (b) Forma de onda senoidal distorcida pela presença de múltiplas frequências harmônicas. Fonte: MARTINHO, 2012, p. 79

A Figura 2.9 mostra o espectro de frequências de uma forma de onda com distorções harmônicas, destacando as harmônicas de ordem ímpar (3^a, 5^a, 7^a e 9^a) que são comumente geradas por cargas não lineares. O gráfico permite visualizar a contribuição de cada harmônica e como elas se somam para criar a forma de onda distorcida.

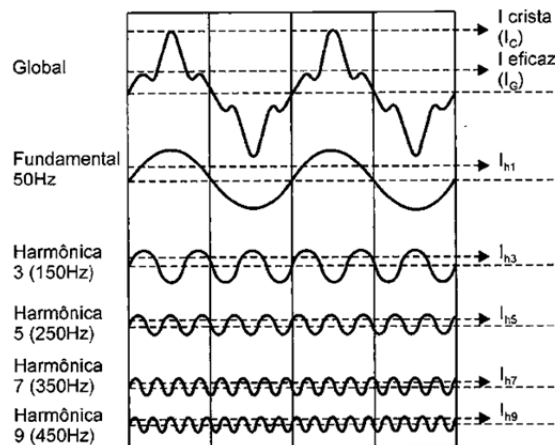


Figura 2.8 – Representação da decomposição de um sinal distorcido. Fonte: (MARTINHO, 2012, p. 78)

A presença dessas harmônicas pode ser quantificada utilizando o parâmetro Distorsão Harmônica Total (THD), que é uma medida da quantidade total de distorção presente em uma forma de onda. A fórmula para calcular o THD é dada por:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N V_n^2}}{V_1} \times 100\%$$

onde V_1 é a amplitude da componente fundamental (60 Hz), e V_n é a amplitude da n -ésima harmônica, com N sendo o número máximo de harmônicas consideradas na análise. O THD é expressado em percentual e fornece uma visão geral da severidade das distorções em relação à tensão ou corrente fundamental.

Além do THD, outro parâmetro importante para caracterizar a contribuição das harmônicas individuais é a Distorsão Harmônica Individual (DHI). A DHI indica a

contribuição percentual de cada harmônica específica em relação à fundamental, sendo calculada pela fórmula:

$$DHI_n = \frac{V_n}{V_1} \times 100\%$$

Este cálculo permite a identificação das harmônicas predominantes, o que é fundamental para a implementação de estratégias de mitigação, como a instalação de filtros passivos ou ativos.

A presença de harmônicas pode comprometer o desempenho dos sistemas elétricos, ocasionando perdas adicionais, superaquecimento de equipamentos, mau funcionamento de dispositivos de proteção e redução da vida útil de máquinas e transformadores. A presença de harmônicas pode causar o aumento das perdas de energia, aquecimento excessivo de transformadores e motores, falhas em dispositivos eletrônicos e interferências em sistemas de comunicação. Além disso, a presença de harmônicas de sequência zero, como as da 3ª, 5ª e 9ª ordem, pode gerar correntes adicionais no condutor neutro de sistemas trifásicos, resultando em sobrecarga e até falhas no sistema de aterramento (BOLLEN, 2003).

2.5.2 Causas das distorções harmônicas

As distorções harmônicas nos sistemas elétricos são causadas principalmente por dispositivos que operam com cargas não lineares. Diferentemente das cargas lineares, que consomem corrente de forma proporcional à tensão aplicada, as cargas não lineares distorcem a forma da corrente, introduzindo componentes harmônicas que afetam a qualidade da energia elétrica fornecida. Este tópico explora as principais fontes das distorções harmônicas, detalhando tanto os dispositivos responsáveis quanto os mecanismos pelos quais essas distorções são geradas.

2.5.2.1 Cargas não lineares

As distorções harmônicas em sistemas elétricos ocorrem, principalmente, devido ao uso de cargas não lineares, que alteram a forma senoidal das correntes ao interagirem com a tensão da rede. Esses dispositivos não mantêm uma relação proporcional entre corrente e tensão, provocando a introdução de componentes harmônicas no sistema. Equipamentos que consomem corrente de maneira não senoidal, como inversores de frequência, fontes chaveadas e dispositivos eletrônicos modernos, são fontes significativas de harmônicas. A distorção ocorre porque esses dispositivos convertem a corrente de forma que não segue a curva senoidal ideal, criando componentes harmônicas.

Entre as principais fontes de cargas não lineares, destacam-se:

- **Inversores de Frequência:** Usados para controlar a velocidade de motores, os inversores de frequência modulação de largura de pulso (PWM) geram harmônicas de

alta ordem devido ao processo de conversão de corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA). Essas harmônicas afetam diretamente a forma de onda da tensão e da corrente, resultando em distorções (LIU; WU, 2014).

- **Fontes de Alimentação Comutadas:** As fontes de alimentação utilizadas em equipamentos eletrônicos modernos, como computadores e televisores, também são grandes geradoras de harmônicas. Isso ocorre devido à comutação rápida de dispositivos de retificação, criando picos de corrente que adicionam componentes harmônicas ao sistema (BOLLEN, 2003).
- **Máquinas de Solda e Retificadores:** Equipamentos como máquinas de solda e retificadores que convertem a corrente alternada em corrente contínua para alimentar dispositivos de soldagem também geram harmônicas, principalmente de ordens ímpares, como a 3ª e 5ª harmônica.
- **Sistemas de Iluminação com Reatores Eletrônicos:** Lâmpadas fluorescentes e sistemas de iluminação com tecnologia de LED, que utilizam reatores eletrônicos, introduzem distorções harmônicas devido ao controle eletrônico de corrente.

Essas cargas não lineares são responsáveis por grande parte das distorções harmônicas observadas em redes elétricas industriais e comerciais. A quantidade e a severidade dessas distorções dependem do tipo de dispositivo, do número de dispositivos conectados à rede e da potência consumida.

2.5.2.2 Outras fontes de distorções harmônicas

Além das cargas não lineares, existem outras fontes de distorções harmônicas que também devem ser levadas em consideração. Embora sua contribuição seja geralmente menor, esses dispositivos ainda têm um impacto significativo na qualidade da energia elétrica:

- **Transformadores:** Embora os transformadores sejam projetados para operar com uma forma de onda senoidal, a saturação do núcleo magnético e as características não lineares dos materiais podem gerar harmônicas, especialmente em transformadores sobrecarregados ou mal dimensionados.
- **Geradores e Motores de Indução:** Os geradores e motores de indução também podem gerar harmônicas devido à saturação do núcleo magnético e ao comportamento não linear durante os processos de partida e operação. As harmônicas geradas por esses dispositivos podem ser especialmente problemáticas em sistemas com múltiplos motores ou geradores trabalhando em paralelo.

- **Chaves de Manobra e Dispositivos de Proteção:** Durante a operação de disjuntores e chaves de manobra, podem ocorrer picos momentâneos de corrente devido ao fenômeno de arco elétrico, o que gera distorções harmônicas de alta frequência.

Essas fontes, embora não sejam tão predominantes quanto as cargas não lineares, podem contribuir para a amplificação das distorções harmônicas já presentes em um sistema, tornando essencial o monitoramento de todo o sistema elétrico para garantir a qualidade da energia fornecida.

2.5.2.3 Fatores adicionais contribuintes

Além das fontes diretas de harmônicas, existem outros fatores que podem agravar as distorções em um sistema elétrico:

- **Desequilíbrio de Tensão:** Em sistemas trifásicos, o desequilíbrio de tensão pode gerar harmônicas de sequência negativa e zero, que resultam em correntes adicionais no sistema. Esse desequilíbrio pode ser causado por falhas no sistema de distribuição, falhas em transformadores ou conexões desequilibradas (NEVES, 2014).
- **Operação com Carga Variável:** Quando os dispositivos não lineares são operados em condições de carga variável, a quantidade de harmônicas pode aumentar. Isso ocorre devido à interação entre a carga e a fonte de alimentação, o que altera o comportamento não linear dos dispositivos.
- **Frequência de Operação dos Dispositivos:** Dispositivos que operam em frequências diferentes da fundamental (60 Hz) geram harmônicas de alta ordem. Equipamentos que operam com circuitos de comutação rápida, como fontes chaveadas e inversores, podem introduzir harmônicas de altas frequências, que são mais difíceis de mitigar.

Esses fatores adicionais agravam o problema das distorções harmônicas, tornando ainda mais importante o monitoramento contínuo da qualidade da energia elétrica e a implementação de soluções adequadas para mitigar seus efeitos.

2.5.3 Efeitos das distorções harmônicas

As distorções harmônicas causam uma série de efeitos prejudiciais tanto nos equipamentos conectados à rede elétrica quanto na própria rede elétrica. Esses efeitos podem afetar diretamente a eficiência dos equipamentos, a confiabilidade do fornecimento de energia elétrica e a segurança do sistema. Neste tópico, abordaremos os principais impactos das distorções harmônicas em equipamentos, redes elétricas e seus efeitos econômicos.

2.5.3.1 Impactos nos equipamentos elétricos

As distorções harmônicas geradas por dispositivos não lineares podem afetar significativamente o desempenho dos equipamentos elétricos, resultando em aquecimento excessivo, falhas e redução da vida útil dos componentes.

2.5.3.2 Aquecimento excessivo

O aumento das correntes harmônicas provoca perdas adicionais nos equipamentos, como transformadores, motores e cabos, que geram calor extra durante a operação. Essas perdas adicionais são principalmente de natureza *perda de ferro* e *perda de cobre*, o que pode levar ao superaquecimento dos componentes e ao desgaste precoce do material isolante. No caso de motores, as correntes harmônicas aumentam as perdas no rotor e no estator, resultando em temperaturas mais elevadas e redução da eficiência do motor. O aquecimento excessivo não só diminui a vida útil do equipamento, mas também pode levar à falha de componentes vitais do sistema (BOLLEN, 2003).

2.5.3.3 Danos em motores de indução

Os motores de indução trifásicos são particularmente vulneráveis às distorções harmônicas. A presença de harmônicas reduz a eficiência do motor, já que o campo magnético gerado pelas correntes harmônicas afeta o comportamento do motor, resultando em perda de torque e aumento de vibrações. As vibrações adicionais causadas pelas harmônicas podem levar ao desgaste mecânico das partes móveis do motor, como o eixo e as escovas. Além disso, as harmônicas geram perdas de energia no motor, o que contribui para o aumento do consumo de eletricidade e redução do desempenho geral (NEVES, 2014).

2.5.3.4 Falhas em dispositivos eletrônicos

Equipamentos eletrônicos modernos, como computadores, sistemas de controle e dispositivos de automação, são extremamente sensíveis às distorções harmônicas. As harmônicas podem interferir no funcionamento desses dispositivos, provocando falhas operacionais, reinicializações inesperadas e até mesmo danos permanentes aos circuitos eletrônicos. A presença de harmônicas pode afetar a precisão dos sistemas de medição e controle, comprometendo a operação dos sistemas industriais e resultando em custos de manutenção elevados (LIU; WU, 2014).

2.5.3.5 Impactos na rede elétrica

Além de afetar os equipamentos conectados, as distorções harmônicas também impactam diretamente a rede elétrica, gerando problemas na distribuição de energia e na

operação dos sistemas de controle.

2.5.3.6 Sobrecarga de condutores neutros

As harmônicas de sequência zero, especialmente as ímpares, tendem a circular pelo condutor neutro em sistemas trifásicos, resultando em aumento da corrente nesse condutor e, conseqüentemente, em elevação da temperatura que pode causar falhas e comprometimento da segurança do sistema (BOLLEN, 2003).

2.5.3.7 Problemas em dispositivos de proteção

As distorções harmônicas afetam o funcionamento dos dispositivos de proteção, como disjuntores e fusíveis. A presença de harmônicas pode alterar os parâmetros de funcionamento desses dispositivos, resultando em disparos falsos ou, em alguns casos, na incapacidade de detectar falhas reais. Esse problema compromete a segurança da rede elétrica e pode causar interrupções no fornecimento de energia devido a falhas nos sistemas de proteção (GRAINGER; JR., 1994).

2.5.3.8 Redução da eficiência do sistema de distribuição

As distorções harmônicas também afetam a eficiência dos sistemas de distribuição de energia elétrica. As correntes harmônicas aumentam as perdas nos cabos e transformadores, reduzindo a eficiência de transmissão da energia. Isso ocorre porque as correntes harmônicas aumentam a resistência nos condutores e causam aquecimento adicional, exigindo mais energia para gerar o mesmo nível de potência ativa. Em sistemas de grande porte, esse fenômeno pode resultar em perdas significativas e aumento do consumo de energia (LIU; WU, 2014).

2.5.3.9 Impactos econômicos

Os efeitos das distorções harmônicas não são apenas técnicos, mas também têm repercussões econômicas consideráveis. O aumento das perdas de energia, a manutenção frequente de equipamentos e a necessidade de substituir componentes danificados resultam em custos operacionais mais altos.

Equipamentos afetados por harmônicas, como motores, transformadores e sistemas de iluminação, exigem manutenção mais frequente devido ao desgaste adicional causado pelo aquecimento e vibrações. Isso leva a custos elevados com reparos, substituições e períodos de inatividade, o que afeta a produtividade das instalações industriais (GRAINGER; JR., 1994).

2.5.3.10 Perdas na eficiência energética

As harmônicas também resultam em perdas de eficiência energética, uma vez que a presença de harmônicas aumenta o consumo de energia para fornecer a mesma quantidade de trabalho. Isso ocorre porque as correntes harmônicas geram perdas adicionais nos transformadores, motores e cabos, fazendo com que o sistema consuma mais energia do que o necessário para realizar o trabalho desejado. O aumento no consumo de energia resulta em custos mais elevados na conta de energia elétrica e em um sistema menos eficiente (LIU; WU, 2014).

2.5.4 Medição e monitoramento

A medição e o monitoramento das distorções harmônicas são fundamentais para garantir a qualidade da energia elétrica e a operação eficiente de sistemas industriais e comerciais. As distorções harmônicas, que são causadas por cargas não lineares, podem ser detectadas e quantificadas usando equipamentos específicos de medição, como analisadores de qualidade de energia. Este tópico abordará os principais parâmetros a serem monitorados, os instrumentos utilizados e as metodologias de medição aplicadas para identificar e avaliar as distorções harmônicas em sistemas elétricos.

2.5.4.1 Parâmetros a serem monitorados

Os principais parâmetros a serem monitorados para a avaliação das distorções harmônicas incluem a Distorsão Harmônica Total (THD), as harmônicas individuais e o fator de potência. Cada um desses parâmetros fornece informações detalhadas sobre a magnitude das distorções harmônicas e os efeitos no sistema elétrico.

2.5.4.1.1 Distorção harmônica total (THD)

A Distorsão Harmônica Total (THD) é um dos parâmetros mais importantes para avaliar a severidade das distorções harmônicas em um sistema elétrico. O THD quantifica a soma das componentes harmônicas em relação à componente fundamental da tensão ou corrente. A fórmula utilizada para calcular o THD é:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N V_n^2}}{V_1} \times 100\%$$

onde V_1 é a amplitude da componente fundamental da tensão ou corrente, e V_n é a amplitude da n -ésima harmônica. A medição do THD é uma das formas mais comuns de quantificar as distorções em sistemas de energia elétrica e é amplamente utilizada em análises de qualidade de energia (BOLLEN, 2003).

2.5.4.1.2 Harmônicas individuais

Além do THD, é importante analisar as harmônicas individuais para entender qual ordem harmônica está mais presente e como ela afeta o sistema. O cálculo da Distorção Harmônica Individual (DHI) de cada harmônica é dado pela fórmula:

$$DHI_n = \frac{V_n}{V_1} \times 100\%$$

A medição das harmônicas individuais permite identificar as ordens harmônicas predominantes, como a 3ª, 5ª e 7ª harmônicas, que são frequentemente geradas por cargas não lineares, como inversores de frequência e fontes de alimentação comutadas.

2.5.4.1.3 Fator de potência

O fator de potência é outro parâmetro crucial que deve ser monitorado, especialmente em sistemas que lidam com cargas não lineares. O fator de potência é a relação entre a potência ativa (real) e a potência aparente em um sistema elétrico, refletindo a eficiência com que a energia é utilizada. O cálculo do fator de potência é dado pela fórmula:

$$FP = \frac{P}{S}$$

onde P é a potência ativa e S é a potência aparente. A presença de harmônicas pode diminuir o fator de potência, já que as correntes harmônicas geram maior potência reativa. Monitorar o fator de potência é essencial para garantir a eficiência do sistema e evitar sobrecargas nos transformadores e motores (NEVES, 2014).

2.5.4.2 Equipamentos de medição

A medição das distorções harmônicas exige equipamentos especializados, como analisadores de qualidade de energia e espectrômetros de harmônicas, que permitem a coleta de dados em tempo real sobre a corrente e a tensão no sistema elétrico. Esses instrumentos são capazes de medir a distorção harmônica total, as harmônicas individuais, o fator de potência, e outros parâmetros importantes para avaliar a qualidade da energia elétrica.

2.5.4.3 Espectro de frequências

O espectro de frequências de uma forma de onda é uma representação gráfica das componentes harmônicas presentes na corrente ou tensão de um sistema elétrico. Ele permite visualizar as frequências harmônicas presentes e sua intensidade. A medição do espectro harmônico pode ser feita com a ajuda de analisadores de qualidade de energia, que geram gráficos em tempo real das harmônicas em um sistema.

2.5.4.4 Processo e interpretação dos dados

Após a coleta dos dados, é necessário processá-los adequadamente para avaliar a magnitude das distorções harmônicas e seu impacto no sistema elétrico. Os dados obtidos dos analisadores de qualidade de energia podem ser utilizados para gerar relatórios detalhados sobre o THD, as harmônicas individuais e o fator de potência. Esses dados são essenciais para a implementação de soluções de mitigação, como filtros harmônicos, e para o monitoramento da eficácia dessas soluções ao longo do tempo.

2.5.5 Limites regulamentares

A presença de distorções harmônicas nas redes elétricas é regulamentada por normas técnicas que visam garantir a qualidade da energia elétrica fornecida aos consumidores. Estas normas definem limites máximos para as distorções harmônicas de tensão e corrente, visando evitar impactos adversos na operação dos equipamentos e na própria rede elétrica. Este tópico aborda as principais normas e regulamentos que estabelecem esses limites, com ênfase nos requisitos do Módulo 8 do PRODIST da ANEEL e em outras regulamentações internacionais.

2.5.5.1 Módulo 8 do Prodist da ANEEL

No Brasil, o Módulo 8 do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional), da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), estabelece diretrizes para a qualidade da energia elétrica fornecida aos consumidores, incluindo limites para as distorções harmônicas. O PRODIST define os limites máximos de distorção harmônica para tensões e correntes, com base no tipo de rede elétrica e nas características da carga (ANEEL, 2022).

A ANEEL estabelece que os sistemas de distribuição devem manter os níveis de THD de Tensão abaixo de 8% para redes de baixa tensão (até 1 kV) e de 5% para alta tensão. Além disso, a THD de Corrente também é regulamentada, com limites que variam conforme a classificação da instalação.

Tabela 2.1 – Limites de distorção harmônica conforme tensão nominal

Indicador	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
DTT95%	10,0%	8,0%	5,0%
DTT_95%	2,5%	2,0%	1,0%
DTT₃95%	7,5%	6,0%	4,0%
DTT₃95%	6,5%	5,0%	3,0%

Esses limites foram estabelecidos com o objetivo de minimizar os efeitos prejudiciais das distorções harmônicas nos sistemas elétricos e nos equipamentos conectados à rede.

A tabela 2.1 apresenta os limites máximos permitidos para as distorções harmônicas de tensão e corrente, de acordo com a regulamentação do PRODIST (ANEEL, 2022).

2.5.5.2 IEEE 519

O IEEE 519, publicado pela Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), estabelece limites para a Distorsão Harmônica Total (THD) e as harmônicas individuais em sistemas de distribuição elétrica. A norma define os níveis máximos de distorção harmônica permitidos para sistemas de diferentes voltagens e aplica-se a sistemas industriais, comerciais e de distribuição de energia.

De acordo com o IEEE 519, os limites de THD de Corrente são estabelecidos conforme a capacidade do sistema e as características da carga. Para redes de baixa tensão, o limite de THD de Corrente é de até 5%, enquanto para sistemas de média e alta tensão, os limites podem ser mais rígidos (POWER; SOCIETY, 2014).

2.5.5.3 IEC 61000-4-7

A IEC 61000-4-7, emitida pela International Electrotechnical Commission (IEC), descreve os métodos de medição das distorções harmônicas em sistemas elétricos e os parâmetros relacionados, como o THD de Tensão e as harmônicas individuais. A norma fornece diretrizes para a análise e monitoramento da qualidade da energia elétrica, incluindo procedimentos para a medição de harmônicas e os limites aceitáveis para diferentes tipos de sistemas (COMMISSION, 2002).

2.5.5.4 Implicação dos limites regulamentares

Os limites regulamentares para as distorções harmônicas são fundamentais para garantir a operação eficiente e segura dos sistemas elétricos. A conformidade com esses limites não só melhora a qualidade da energia elétrica, mas também prolonga a vida útil dos equipamentos, reduz os custos operacionais e aumenta a confiabilidade dos sistemas.

O monitoramento contínuo das distorções harmônicas, conforme os limites estabelecidos pelas normas, permite a detecção precoce de problemas e a implementação de soluções corretivas, como filtros harmônicos, para minimizar os efeitos das distorções e melhorar a eficiência dos sistemas elétricos.

2.5.6 Técnicas de mitigação

As distorções harmônicas geradas por cargas não lineares representam um dos principais desafios para a qualidade da energia elétrica. Para minimizar seus efeitos, diversas técnicas de mitigação têm sido desenvolvidas. Entre as soluções mais comuns estão os filtros passivos, filtros ativos, filtros híbridos e outras abordagens complementares, como a

correção do fator de potência e a alteração da topologia das cargas. Este tópico aborda as principais técnicas de mitigação, explicando seu funcionamento, vantagens e limitações.

2.5.6.1 Filtros passivos

Os filtros passivos são dispositivos simples e de baixo custo usados para reduzir ou eliminar as distorções harmônicas em sistemas elétricos. Esses filtros utilizam componentes passivos, como resistores, indutores e capacitores, para atenuar ou desviar as harmônicas da corrente ou tensão, permitindo que a energia que chega aos dispositivos conectados seja mais próxima de uma forma de onda senoidal (BOLLEN, 2003).

O funcionamento de um filtro passivo é baseado no princípio de ressonância. O filtro é projetado para que a impedância de seus componentes seja mínima para a harmônica de interesse, permitindo que a corrente harmônica seja desviada para o filtro, onde é absorvida ou dissipada. Filtros passivos são tipicamente sintonizados para uma harmônica específica, tornando-os eficazes em sistemas onde uma ou algumas harmônicas dominam.

2.5.6.1.1 Vantagens e limitações

A principal vantagem dos filtros passivos é sua simplicidade e baixo custo. Eles são bastante eficazes na atenuação das harmônicas de baixa e média ordem e são fáceis de instalar e manter. No entanto, a principal limitação dos filtros passivos é sua falta de flexibilidade. Eles são projetados para eliminar uma ou poucas harmônicas e não se adaptam facilmente a mudanças nas condições de carga ou a múltiplas ordens harmônicas. Além disso, filtros passivos podem ter perdas de energia devido à dissipação de corrente nas resistências e indutores (NEVES, 2014).

2.5.6.2 Filtros ativos

Os filtros ativos oferecem uma solução mais flexível e eficaz para mitigar distorções harmônicas, especialmente em sistemas com múltiplas harmônicas e cargas variáveis. Esses filtros utilizam dispositivos de eletrônica de potência para gerar correntes harmônicas de fase oposta às distorções presentes no sistema, anulando assim as harmônicas.

Os filtros ativos funcionam monitorando as formas de onda de corrente ou tensão no sistema e, com base nas medições, gerando uma corrente compensatória para as distorções harmônicas detectadas. A corrente gerada pelo filtro ativo tem a mesma amplitude das harmônicas, mas é invertida em fase, anulando as componentes harmônicas. Essa solução é particularmente eficaz para sistemas com múltiplas fontes de harmônicas e variações dinâmicas de carga (LIU; WU, 2014).

2.5.6.2.1 Vantagens e limitações

A vantagem dos filtros ativos é a sua capacidade de adaptação. Eles podem corrigir múltiplas harmônicas simultaneamente e ajustar-se dinamicamente às mudanças nas distorções harmônicas. No entanto, os filtros ativos são mais caros e mais complexos do que os filtros passivos, exigindo componentes eletrônicos de potência sofisticados, como conversores de corrente contínua (CC) para alternada (CA) e sistemas de controle. Além disso, os filtros ativos podem gerar perdas de energia devido à conversão de potência.

2.5.6.3 Filtros híbridos

Filtros híbridos são soluções que unem os benefícios dos filtros passivos — como simplicidade e baixo custo — com a eficiência dinâmica dos filtros ativos, permitindo uma compensação mais eficaz das distorções harmônicas presentes na rede elétrica. Em um sistema híbrido, os filtros passivos são usados para compensar as harmônicas de baixa ordem, enquanto os filtros ativos são empregados para mitigar as harmônicas de ordem superior e lidar com as variações dinâmicas (LIU; WU, 2014).

O filtro híbrido é projetado para funcionar de forma complementar aos filtros passivos, com o filtro passivo tratando as harmônicas de baixa frequência e o filtro ativo se encarregando das harmônicas de maior ordem. Isso permite que o sistema combine a eficiência dos filtros passivos com a flexibilidade dos filtros ativos, criando uma solução mais robusta e eficiente para sistemas com distorções harmônicas complexas.

2.5.6.3.1 Vantagens e limitações

A vantagem dos filtros híbridos é que eles combinam o baixo custo dos filtros passivos com a flexibilidade dos filtros ativos. Eles são particularmente úteis em sistemas em que as harmônicas de baixa e alta ordem estão presentes simultaneamente. No entanto, a implementação de filtros híbridos exige um investimento inicial mais alto devido ao uso de dispositivos de eletrônica de potência, o que pode tornar essa solução menos acessível para sistemas pequenos ou com orçamento limitado.

2.5.6.4 Outras soluções para mitigação

Além dos filtros passivos, ativos e híbridos, existem outras técnicas que podem ser aplicadas para mitigar os efeitos das distorções harmônicas em sistemas elétricos.

2.5.6.4.1 correção do fator de potência

A correção do fator de potência é uma técnica que visa melhorar o fator de potência do sistema, que é reduzido pela presença de harmônicas. A instalação de bancos

de capacitores ou compensadores de potência reativa pode ajudar a reduzir as distorções harmônicas e melhorar o fator de potência. No entanto, deve-se ter cuidado para evitar a criação de condições de ressonância, que podem amplificar as harmônicas (NEVES, 2014).

2.5.6.4.2 Mudança na topologia de ligação de cargas

Em alguns casos, a alteração na topologia de ligação das cargas pode ajudar a reduzir as correntes harmônicas. Por exemplo, a configuração estrela em vez de configuração delta pode ajudar a reduzir as harmônicas em sistemas trifásicos. Essa solução não elimina as harmônicas, mas pode ajudar a mitigar os efeitos das distorções em sistemas específicos (GRAINGER; JR., 1994).

3 METODOLOGIA

A pesquisa foi realizada em diversas fases, iniciando com uma análise bibliográfica abrangente sobre motores de indução trifásicos, abordando os métodos de partida mais utilizados e os distúrbios que afetam a qualidade da energia elétrica, com um foco específico nas distorções harmônicas. Além disso, foram analisadas as normas técnicas pertinentes, incluindo o Módulo 8 do PRODIST da ANEEL, que define os limites e as orientações regulatórias para a qualidade da energia elétrica fornecida aos sistemas industriais. Também foram revisadas as normas internacionais, como o IEEE 519, que estabelece os requisitos para controle de harmônicas em sistemas elétricos e os limites de distorção harmônica permitidos em sistemas de distribuição, e a IEC 61000-4-7, que fornece diretrizes sobre os métodos de medição e quantificação das distorções harmônicas, com foco na análise de harmônicas de corrente e tensão. Essas normas são fundamentais para garantir a conformidade dos sistemas elétricos com os parâmetros de qualidade da energia, minimizando os efeitos prejudiciais das distorções harmônicas em equipamentos e na rede elétrica.

Com base nos dados obtidos da revisão teórica, foi selecionado um motor de indução trifásico que atendesse às especificações necessárias para os testes, levando em consideração parâmetros como potência, tensão e corrente. Adicionalmente, utilizou-se um analisador de qualidade de energia para monitorar e registrar as distorções harmônicas presentes na rede elétrica durante os testes. O equipamento foi configurado para medir variáveis como tensão, corrente, frequência e as distorções harmônicas de corrente e tensão, de acordo com os objetivos do estudo.

A instalação dos dispositivos foi realizada em um ambiente controlado, garantindo as condições ideais para a precisão das medições. Foram realizadas medições da qualidade de energia para duas configurações de montagem, partida direta e partida com soft starter utilizando rampa de tensão.

3.1 MATERIAIS E COMPONENTES

Neste trabalho foram utilizados três componentes principais: o motor de indução trifásico, o analisador de energia e o soft starter, todos essenciais para a realização dos ensaios de partida e análise da qualidade da energia elétrica.

O motor utilizado foi o modelo 250512, da fabricante VOGES, conhecido por sua robustez, confiabilidade e larga aplicação em sistemas industriais. Seu princípio de funcionamento se baseia na indução eletromagnética, gerando torque a partir da interação entre os campos magnéticos do estator e do rotor. Esse motor opera em 220/380 V, com potência de 1,5 cv, corrente nominal de 14,4/8,3 A, frequência de 60 Hz e rotação de 1725 rpm, conforme apresentado na Tabela 3.1. Seu fator de serviço é de 1,15, garantindo operação segura mesmo sob sobrecargas temporárias.

Tabela 3.1 – Características do Motor de Indução Trifásico modelo 250512

Fabricante	VOGES
Modelo	220512
Potência Nominal	1,5 cv
Tensão de Alimentação	220/380 V
Corrente Nominal	4,2 A
Frequência	60 Hz
Rotação Nominal	1725 rpm
Fator de Serviço	1,15

Para medição dos parâmetros elétricos foi empregado o analisador de energia MAR722, da marca Megabrás. Este equipamento possibilita o monitoramento preciso de tensões, correntes, potência ativa, reativa e aparente, além de fornecer valores de distorção harmônica total (THD). Com capacidade de registro em tempo real e posterior análise via software, o MAR722 foi fundamental para garantir confiabilidade na coleta dos dados.

O acionamento controlado do motor foi feito por meio do soft starter WEG modelo SSW06. Esse dispositivo eletrônico tem como função controlar progressivamente a tensão aplicada ao motor durante a partida, reduzindo o pico de corrente e o torque inicial. Por meio do controle faseado de tiristores, o soft starter proporciona uma aceleração suave, minimizando impactos elétricos e mecânicos.

A integração desses três equipamentos possibilitou a realização dos testes experimentais de forma segura e eficiente, assegurando a confiabilidade dos dados coletados para a análise da qualidade da energia elétrica durante a partida do motor com auxílio do soft starter.

3.2 PARTIDA DIRETA

Para a realização dos testes da partida direta, foi montado um circuito de alimentação do motor de indução trifásico com a configuração em delta, utilizando a tensão de 220 V, conforme as especificações de partida para esse tipo de motor. A configuração em delta foi escolhida, pois é comumente utilizada em sistemas industriais, permitindo a operação do motor em regime nominal com a tensão adequada.

A montagem do circuito foi realizada de forma a garantir que o motor fosse alimentado diretamente pela rede elétrica, sem o uso de dispositivos de controle de partida, como soft starters ou inversores de frequência, foram instaladas apenas botoeiras de partida e parada seguindo o diagrama de montagem.

Em seguida foi aplicado o analisador de energia, ao qual possui três anéis de medição de corrente que foram instalados em cada uma das fases e três garras para medição aplicados também todas as fases.

Durante a partida do motor, foi realizada uma medição contínua das distorções harmônicas de corrente e tensão, utilizando o analisador de qualidade de energia MAR 722 da Megabrás. O tempo de análise da partida foi de 15 segundos, e a medição foi repetida 5 vezes para garantir a precisão e a confiabilidade dos dados obtidos.

Após a partida, foram realizadas medições em regime permanente, durante 30 segundos, também repetidas 5 vezes, para capturar o comportamento do motor em operação contínua.

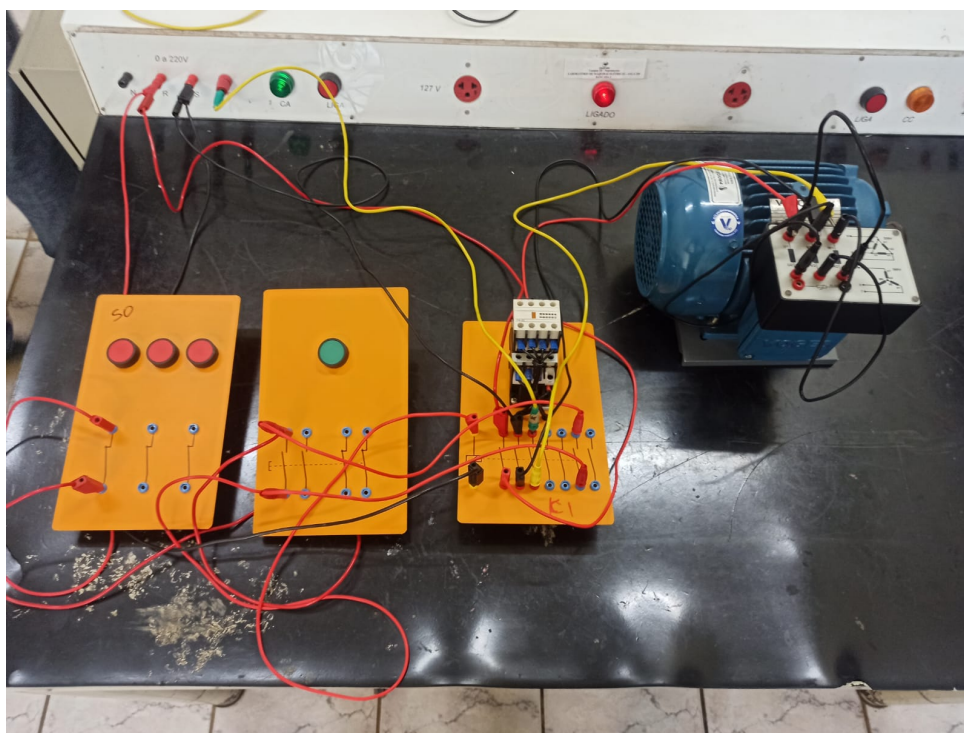


Figura 3.1 – Montagem em partida direta. Fonte: *Autor*.

3.3 PARTIDA UTILIZANDO O SOFT STARTER

Inicialmente, o motor de indução trifásico foi conectado a uma fonte de energia trifásica de 220V. A alimentação da fonte foi direcionada para a parte superior do soft starter, que é responsável por controlar a corrente e a tensão aplicadas ao motor. A parte inferior do soft starter foi conectada diretamente ao motor, alimentando-o com a energia controlada. O motor foi instalado em configuração delta, garantindo que a tensão e a corrente adequadas fossem aplicadas ao motor durante os testes.

Para medir as distorções harmônicas de corrente e tensão, o analisador de qualidade de energia MAR 722 da Megabrás foi utilizado. Este dispositivo tem a capacidade de medir as componentes harmônicas de tensão e corrente em tempo real, capturando as distorções harmônicas nas três fases do sistema trifásico. Foram utilizados três anéis de medição de corrente, aplicados em cada uma das fases da rede, para capturar as distorções harmônicas de corrente. Cada anel foi colocado ao redor de um dos condutores que alimentam o motor, permitindo a medição precisa das correntes harmônicas geradas durante a partida e operação do motor.

Além dos anéis de medição de corrente, o analisador foi equipado com três garras de medição de tensão, que foram conectadas nas três fases do sistema trifásico. Essas garras permitiram a medição das distorções harmônicas de tensão em cada uma das fases, permitindo uma análise detalhada da qualidade da energia elétrica fornecida ao motor durante as diferentes fases do processo de partida e operação.

O soft starter foi configurado para realizar a partida suave do motor, reduzindo a corrente de partida e, portanto, minimizando as distorções harmônicas geradas. Durante os testes, a corrente e a tensão foram monitoradas em tempo real, tanto na partida quanto em regime permanente, para avaliar o impacto do método de partida na geração de distorções harmônicas.

Os seguintes parâmetros de parametrização foram ajustados no soft starter para otimizar o desempenho durante os testes:

Parâmetro	Valor
Idioma português	P201 = 0
Alimentação a 3 fios	P150 = 0
Partida por rampa de tensão	P202 = 0
Tensão inicial de partida em 30%	P101 = 30
Tempo da rampa de aceleração 15s	P102 = 15
Tensão nominal do motor 220V	P400 = 220
Corrente nominal do motor 4,2A	P401 = 4.2
Fator de serviço do motor (sobrecarga máxima admitida = 1,15)	P406 = 1.15
Classe de proteção termina do motor (classe 30)	P640 = 6
Frenagem desabilitada	P500 = 0

Tabela 3.2 – Parâmetros de parametrização do Soft Starter

Foram realizadas 5 medições durante o processo de partida do motor, com tempo de medição de 15 segundos cada, e 5 medições em regime permanente, com duração de 30 segundos para cada medição. Durante os testes, o analisador de qualidade de energia MAR 722 foi posicionado inicialmente antes da fonte de energia, para capturar as distorções harmônicas de corrente e tensão geradas diretamente pela alimentação do sistema. Em seguida, o processo foi repetido, mas desta vez, o analisador foi posicionado antes da carga, no lado do motor de indução trifásico (MIT), para medir as distorções harmônicas após o controle da corrente de partida realizado pelo soft starter.

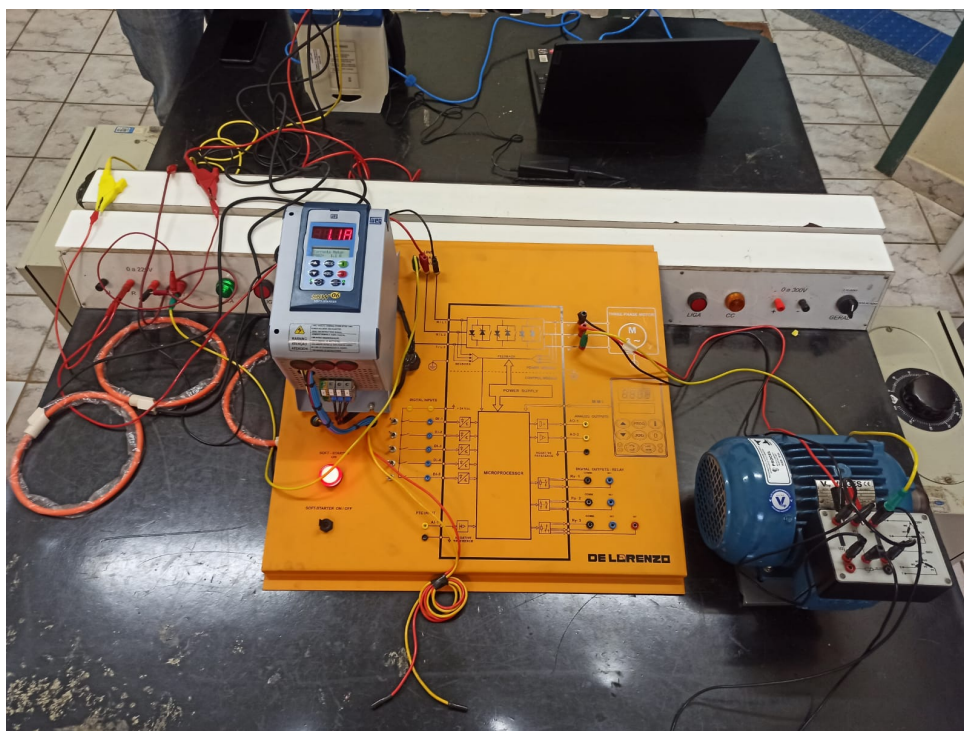


Figura 3.2 – Montagem com soft starter. Fonte: *Autor*.

3.4 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS COM TRABALHOS ANTERIORES

Por fim, foi realizada a comparação dos resultados obtidos com o trabalho anterior realizado pela aluna Eduarda Inácio Pacheco, no qual foi analisada a qualidade da energia elétrica durante a partida de um motor de indução trifásico (MIT) semelhante, utilizando um inversor de frequência e também a partida direta. O trabalho de Eduarda Inácio Pacheco consistiu na análise das distorções harmônicas de corrente e tensão, com foco em avaliar os efeitos do controle da partida do motor por meio do inversor de frequência, comparando-o com a partida direta. Ambos os métodos de partida, tanto com inversor de frequência quanto com partida direta, foram analisados em termos de THD (Distorção Harmônica Total) e as harmônicas individuais geradas durante a partida e em regime permanente.

A comparação entre os resultados obtidos neste trabalho, que utilizou o soft starter, e o trabalho de Eduarda Inácio Pacheco, que utilizou o inversor de frequência, foi realizada com o objetivo de avaliar qual das duas soluções apresenta melhores resultados na mitigação das distorções harmônicas e na qualidade da energia elétrica fornecida ao motor. A análise comparativa levou em consideração os impactos no consumo de energia, a eficiência do sistema, e a redução das distorções harmônicas durante a partida do motor e no regime permanente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta parte do trabalho apresenta os resultados das medições e das análises realizadas ao longo dos testes. As informações coletadas são exibidas por meio de gráficos, tabelas e descrições técnicas, permitindo uma compreensão clara das variações de corrente e tensão tanto no momento da partida quanto no regime permanente dos motores.

A investigação dá ênfase aos impactos que diferentes estratégias de partida exercem sobre a qualidade da energia elétrica, com foco na detecção de harmônicos, na análise crítica dos dados obtidos e na comparação com os parâmetros estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST.

4.1 PARTIDA DIRETA

4.1.1 Distorções Harmônicas de tensão

A análise inicial das distorções harmônicas observadas durante a partida direta exige atenção aos limites máximos estabelecidos para a Distorção Harmônica Total (THD 95%). A tabela 2.1 fornece os valores de referência para diferentes intervalos de tensão nominal, funcionando como base para avaliar a conformidade com os padrões de qualidade da energia elétrica. Em sistemas com tensão igual ou inferior a 1 kV, o limite permitido é de 10%; para tensões entre 1 kV e 69 kV, o limite é de 8%; e, em tensões superiores a 69 kV, o valor aceitável é de 5%.

Durante o experimento com o método de partida direta, foram monitoradas as distorções nas fases L1, L2 e L3. Os dados coletados encontram-se organizados na Tabela 4.1, que apresenta os índices de distorção harmônica total e os valores das componentes individuais mais relevantes. A análise desses resultados demonstra que as harmônicas específicas de baixa ordem têm papel significativo na composição da distorção global.

A comparação entre os valores medidos e os limites normativos da Tabela 2.1 permitiu avaliar a adequação do sistema durante a partida. Com isso, foi possível identificar se os níveis de distorção permanecem dentro do aceitável ou se há necessidade de intervenções corretivas para assegurar a qualidade da energia fornecida.

Tabela 4.1 – Partida Direta - Parida

Fases	Ordem	THD de tensão (%)	Distorção Individual de Tensão (%)
L1	5	0,95	0,5
	7		0,61
L2	5	1,03	0,51
	7		0,71
L3	5	0,94	0,58
	7		0,53

A interpretação dos resultados obtidos indica que os índices de distorção harmônica

total (THD) permanecem consideravelmente abaixo do limite de 10% estabelecido pelas normas técnicas. Com valores que não ultrapassam 1,03%, as medições evidenciam conformidade com os padrões exigidos. Observa-se que, nas fases L1 e L2, a sétima harmônica exerce maior influência sobre o valor total de distorção, enquanto na fase L3, a quinta harmônica se destaca como o principal componente.

Apesar de os níveis gerais de THD estarem dentro dos limites aceitáveis, é notável que as harmônicas específicas — especialmente as de quinta e sétima ordem — são as que mais contribuem para o perfil de distorção em cada fase. A fase L3, por exemplo, apresenta um valor mais baixo de THD, mas é significativamente afetada pela presença marcante da harmônica de ordem cinco.

Esses dados apontam para a importância de monitorar e, se necessário, mitigar as harmônicas individuais, mesmo em sistemas com distorção total controlada, a fim de preservar a integridade da energia fornecida e otimizar o desempenho do sistema elétrico.

A Figura 4.1, registrada por meio do analisador de energia MAR722, apresenta graficamente os valores de distorção harmônica de tensão detectados durante a operação com partida direta, evidenciando as contribuições de cada componente harmônica.

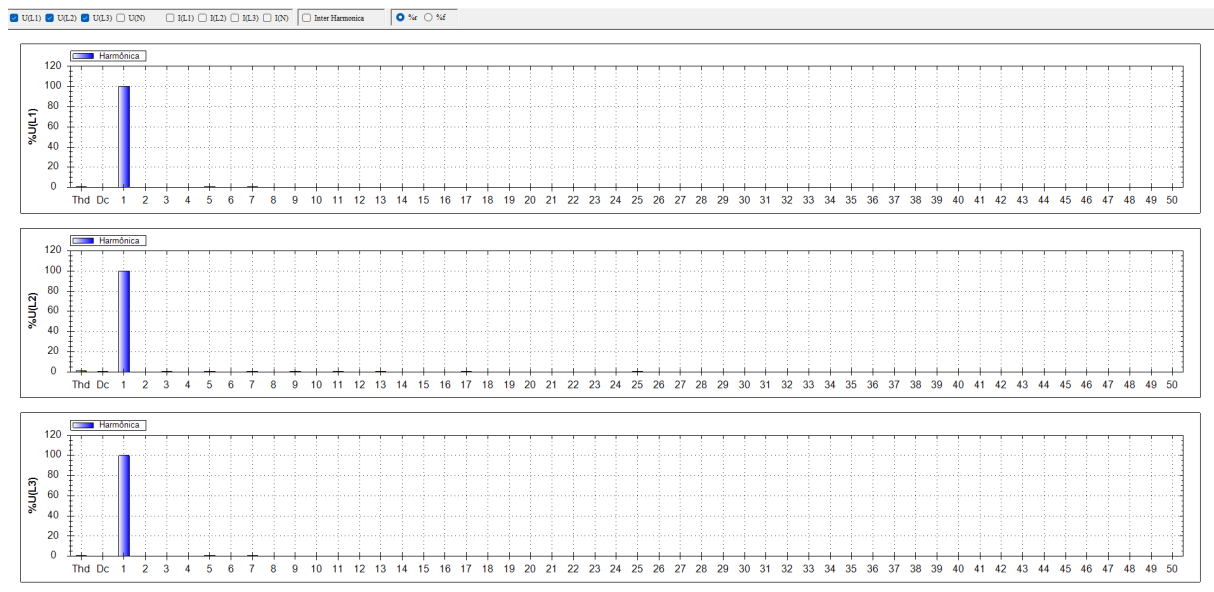


Figura 4.1 – Distorções Harmônicas de tensão - Partida Direta. Fonte: MEGABRAS - Power View.

As imagens apresentadas registram um índice de distorção harmônica total máximo (THD) de 1,03% no instante da partida direta do sistema. Esse valor inicial é relevante como base para as análises posteriores, servindo como referência para o acompanhamento da variação da qualidade da energia ao longo do tempo.

Com o avanço da operação, o THD registrado na partida foi confrontado com o valor correspondente ao regime permanente, possibilitando observar a evolução da distorção e seus efeitos durante o funcionamento contínuo do sistema. Essa comparação é essencial

para avaliar se há tendência de estabilização, redução ou agravamento das harmônicas no decorrer do tempo.

Como complemento à análise realizada na condição de partida, a Tabela 4.2 apresenta os dados medidos no regime permanente, incluindo o THD e as principais harmônicas individuais identificadas. Esses resultados possibilitam identificar quais ordens harmônicas permanecem mais influentes em situação de estabilidade, além de permitir uma avaliação detalhada em relação aos limites normativos vigentes, oferecendo uma visão mais abrangente da performance do sistema sob condições normais de operação.

Tabela 4.2 – Partida Direta - Regime Permanente

Fases	Ordem	THD de tensão (%)	Distorção Individual de Tensão (%)
L1	5	0,86	0,42
	7		0,57
L2	5	1,01	0,45
	7		0,71
L3	5	0,81	0,42
	7		0,54

A análise realizada em regime permanente revela uma leve diminuição nos valores de THD em comparação com a partida, mantendo-se, no entanto, o mesmo padrão de distribuição entre as fases: a fase L2 apresenta o maior índice, seguida por L1 e, por fim, L3, com o menor valor, todos ainda dentro do limite de 10%. No que se refere à distorção harmônica individual, observou-se uma alteração na fase L3, onde a sétima harmônica passou a ser a componente de maior relevância, destacando-se como a principal responsável pela distorção nessa condição operacional.

As imagens 4.2 apresentam os resultados da medição da distorção harmônica de tensão em regime permanente.



Figura 4.2 – Distorções Harmônicas de tensão - Partida Direta em Regime Permanente.
Fonte: MEGABRAS - Power View.

As imagens apresentadas registram um índice de distorção harmônica total máximo (THD) de 1,01% no instante da partida direta do sistema. Essa semelhança no THD ao longo do tempo implica que a distorção harmônica não apresenta alterações significativas entre a partida e o regime permanente.

4.1.2 Distorções Harmônicas de corrente

A Tabela 4.3 reúne os valores referentes ao THD e às principais componentes harmônicas de corrente observadas durante a partida direta. Embora o Módulo 8 do PRODIST não especifique limites para esse tipo de distorção, a análise foi orientada com base nos critérios da norma IEEE 519, que serve como referência técnica para esse contexto. Os dados apresentados oferecem um panorama detalhado da intensidade das distorções harmônicas de corrente, contribuindo para uma avaliação mais precisa do desempenho do sistema nesse estágio inicial de operação.

Tabela 4.3 – Partida Direta - Partida

Fases	Ordem	THD de corrente (%)	Distorção Individual de Corrente (%)
L1	5	5,39	3,72
	7		1,08
L2	5	4,99	2,56
	7		2,32
L3	5	3,7	2,65
	7		1,29

Durante o processo de partida direta, foi realizada uma avaliação detalhada da distorção harmônica de corrente, utilizando como referência os parâmetros da norma IEEE

519-2014. Essa norma define limites para a distorção harmônica total de corrente (TDD) com base na proporção entre a corrente de curto-circuito (I_{sc}) disponível no ponto de acoplamento comum e a corrente das cargas não lineares (I_L). De acordo com essa relação, os valores máximos admissíveis de TDD situam-se entre 5% e 20%.

A partir das medições realizadas, foi possível verificar que, em algumas fases, os índices de distorção ultrapassaram o limite mínimo de 5%. Embora não tenham atingido o valor máximo permitido, esses resultados já indicam a presença de distorções relevantes que podem comprometer o desempenho e a qualidade do fornecimento de energia elétrica. Enquanto L1 se manteve dentro dos parâmetros recomendados, L2 e L3 evidenciaram a necessidade de ações corretivas, como o uso de filtros ou modificações no tipo de partida adotado.

Esses achados revelam que, embora o sistema não tenha, de forma geral, ultrapassado os limites máximos da norma, houve pontos críticos que sinalizam o risco de degradação da qualidade da energia em momentos específicos, como o da partida. A identificação desses pontos é essencial para prevenir impactos negativos sobre a rede e os equipamentos conectados.

A Figura 4.3 exibe os valores registrados de distorções harmônicas de corrente no momento da partida direta, fornecendo uma representação detalhada tanto do THD quanto das componentes harmônicas individuais presentes no sistema.

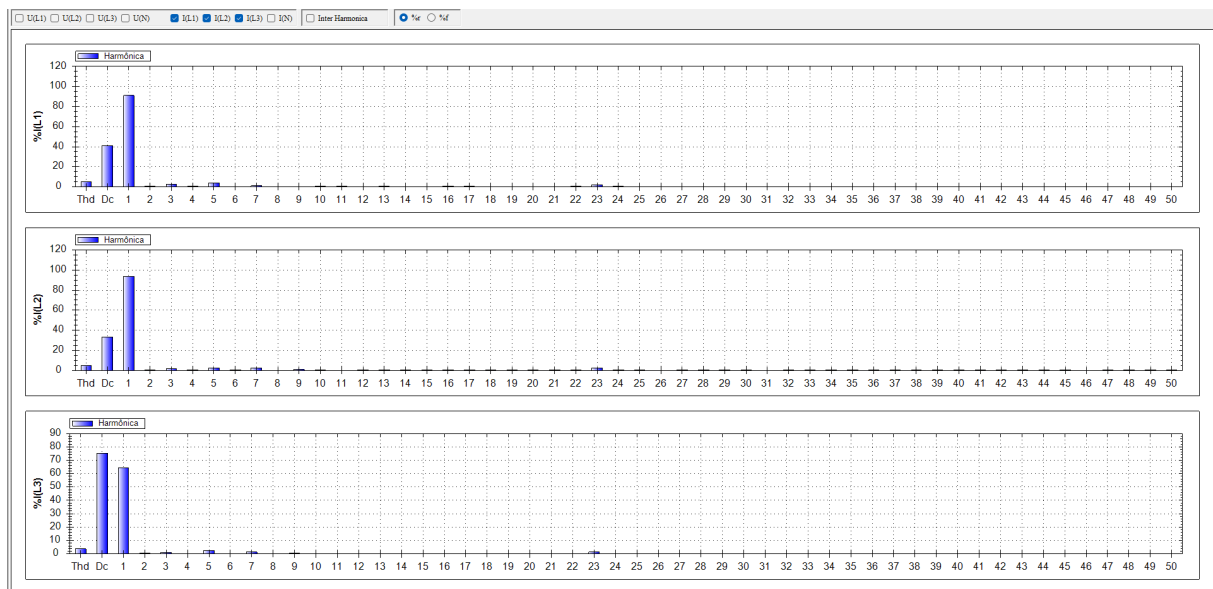


Figura 4.3 – Distorções Harmônicas de corrente - Partida Direta. Fonte: MEGABRAS - Power View.

Complementarmente, a Tabela 4.4 fornece os valores de THD e das harmônicas individuais durante o regime permanente, permitindo comparações com dados obtidos em partida e oferecendo uma visão clara do comportamento das distorções em condições transitórias.

Tabela 4.4 – Partida Direta - Regime Permanente

Fases	Ordem	THD de corrente (%)	Distorção Individual de Corrente (%)
L1	5	4,97	3,21
	7		1,2
L2	5	4,70	2,81
	7		1,84
L3	5	3,59	2,33
	7		1,32

Ao comparar os dados de distorção harmônica de corrente entre a condição de partida direta e o funcionamento em regime permanente, observa-se que, em partida L1 se manteve dentro do limite mínimo e as outras duas fases ficaram a baixo de 5%, já em regime permanente todas ficaram abaixo da referência. Os níveis de distorção individual de corrente tiveram ligeiras alterações tanto para um valor menor quanto para um valor maior, o que indica que, embora a distorção harmônica esteja presente em ambas as condições, ela tende a ser mais significativa no instante de partida do motor.

A Figura 4.4 exibe os valores registrados de distorções harmônicas de corrente no momento de regime permanente da partida direta, fornecendo uma representação detalhada tanto do THD quanto das componentes harmônicas individuais presentes no sistema.

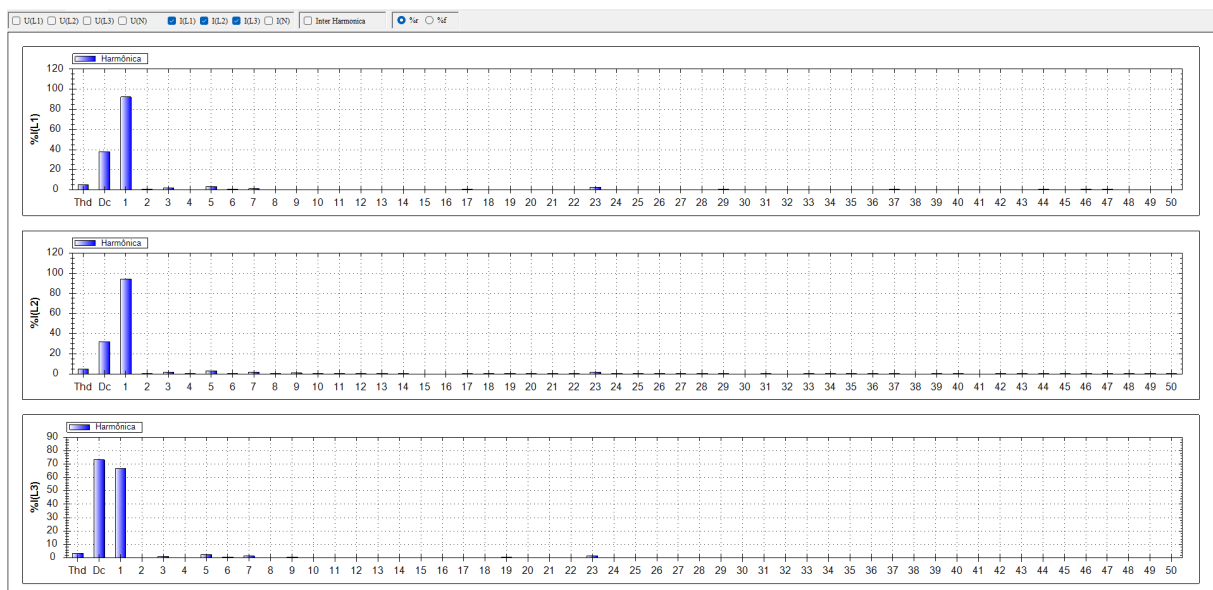


Figura 4.4 – Distorções Harmônicas de corrente - Partida Direta em Regime Permanente.
Fonte: MEGABRAS - Power View.

A avaliação dos resultados da partida direta mostrou que as distorções harmônicas na corrente foram mais evidentes, atingindo um valor máximo THD de 5,39%. Conforme os limites estabelecidos, que variam entre 5% e 20% conforme a relação entre a corrente de curto-circuito e a corrente das cargas não lineares, o valor de ,39% encontra-se dentro do intervalo permitido, embora ainda represente um nível relevante de distorção. Apesar da tensão estar dentro dos parâmetros adequados, a corrente apresenta distorções que

necessitam ser acompanhadas e controladas para assegurar a eficiência e a confiabilidade do sistema elétrico.

4.2 PARTIDA COM SOFT STARTER

Os mesmos procedimentos usados na partida direta foram aplicados na partida com o soft starter. Contudo, durante a partida com o soft starter, as medições foram divididas em duas etapas distintas: antes e depois da do soft starter. Essa divisão possibilitou uma análise mais aprofundada das distorções harmônicas e da qualidade da energia elétrica em cada fase do processo, oferecendo uma compreensão clara das mudanças introduzidas pelo soft starter.

4.2.1 Medição antes do Soft Starter

4.2.1.1 Distorções Harmônicas de Tensão

Durante o ensaio realizado no ponto de medição antes do soft starter, foram examinadas as distorções harmônicas em cada uma das fases, conforme os dados coletados. A Tabela 4.5 mostra os valores do THD e das distorções harmônicas individuais para cada fase do parâmetro de tensão, evidenciando que as harmônicas individuais representaram a maior parcela da distorção identificada. Ao confrontar esses resultados com os limites definidos pelo Módulo 8 da PRODIST, foi possível verificar se as distorções harmônicas estavam dentro dos parâmetros aceitáveis e identificar a necessidade de eventuais ajustes para assegurar a conformidade com os padrões de qualidade da energia elétrica.

Tabela 4.5 – Partida com Soft Starter - Partida

Fases	Ordem	THD de tensão (%)	Distorção Individual de Tensão (%)
L1	5	2,10	1,13
	7		1,02
L2	5	2,49	1,15
	7		1,45
L3	5	2,46	1,41
	7		1,07

A análise da tabela, conforme os critérios da norma, revelou que os níveis de distorção harmônica total permaneciam significativamente abaixo do limite de 10%, demonstrando que a qualidade geral da energia elétrica estava dentro dos padrões aceitáveis.

Observa-se que, nas fases L1 e L3, a maior distorção harmônica ocorre na quinta componente, enquanto na fase L2 a sétima componente é a mais predominante, destacando sua importância na formação do THD. Apesar dos valores dessas harmônicas individuais não serem elevados, elas tiveram uma contribuição relevante para o total de distorção registrado.

A imagem 4.5 apresenta os resultados da medição do THD de tensão, evidenciando as distorções harmônicas identificadas durante a partida, com o ponto de medição situado antes do soft starter.

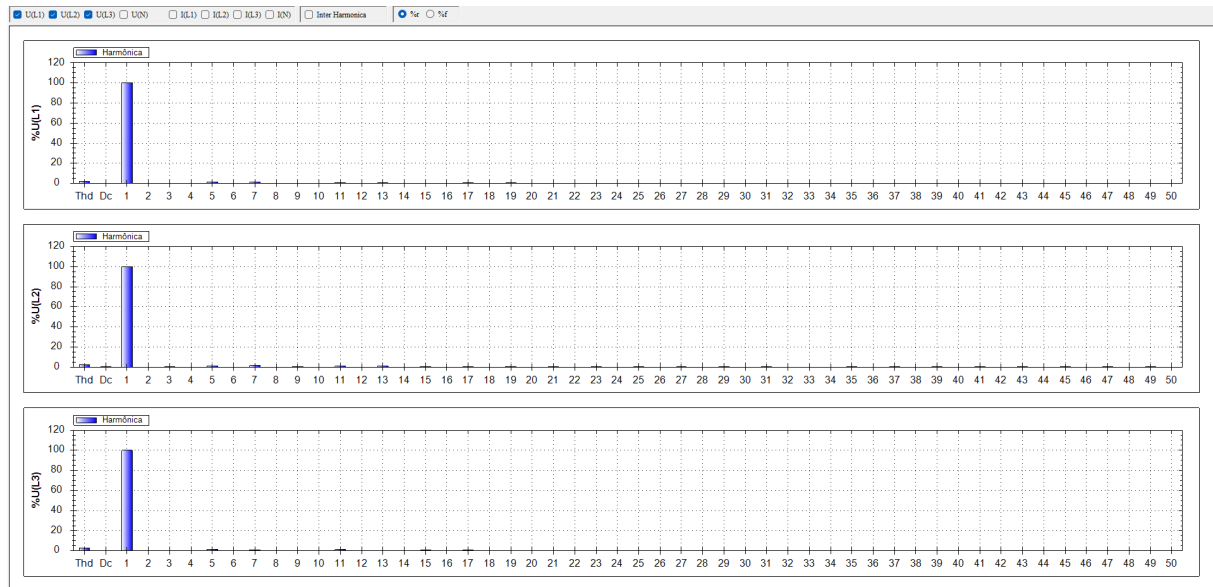


Figura 4.5 – Distorções harmônicas de tensão na partida antes do soft starter. Fonte: MEGABRAS - Power View.

O resultado da distorção harmônica de tensão na partida a medição realizada antes do soft starter mostrou um THD máximo de 2,49%, ficando dentro do limite pré estabelecido pelo módulo 8. Esse valor funciona como uma referência inicial para a análise. Posteriormente, o THD será confrontado com o valor registrado em regime permanente, possibilitando assim a avaliação da evolução da distorção harmônica ao longo do tempo e a identificação de eventuais efeitos sobre a qualidade da energia elétrica durante a operação contínua do sistema.

Para complementar essa avaliação dos dados coletados na partida, com o ponto de medição situado antes do soft starter, a Tabela 4.6 apresenta os valores do THD e das harmônicas individuais no regime permanente.

Tabela 4.6 – Partida com Soft Starter - Regime Permanente

Fases	Ordem	THD de tensão (%)	Distorção Individual de Tensão (%)
L1	5	0,63	0,32
	7		0,24
L2	5	0,73	0,35
	7		0,41
L3	5	0,81	0,41
	7		0,48

A análise dos dados em regime permanente demonstra uma redução significativa no THD das fases L1, L2 e L3, com todos os valores permanecendo abaixo do limite

de 10% estipulado pelas normas. Essa queda contribuiu para uma melhoria ainda mais evidente na qualidade da energia elétrica. Em cada fase, a 5ª e a 7ª harmônicas continuam sendo as componentes predominantes, porém com menor intensidade em comparação ao momento da partida. Esses resultados confirmam que, no regime permanente, as distorções harmônicas de tensão estão bem controladas, mantendo-se dentro dos padrões aceitáveis e reforçando a estabilidade do sistema.

A figura 4.6 apresenta os resultados obtidos na análise das distorções harmônicas de tensão no regime permanente, possibilitando a realização de uma comparação entre os resultados e partida e em regime permanente.

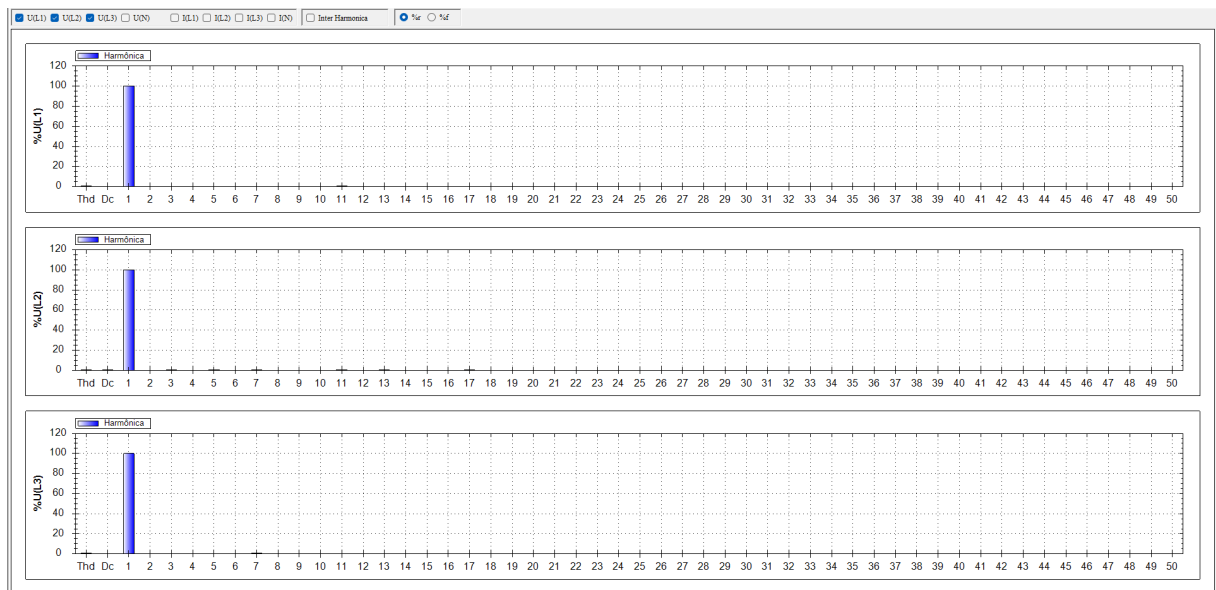


Figura 4.6 – Distorções harmônicas de tensão em regime permanente antes do soft starter.
Fonte: MEGABRAS - Power View.

Os dados mostram que o THD de tensão no regime permanente teve um valor máximo de 0,81%. O que indica a redução do THD ao longo do tempo, mostrando aumento da qualidade de energia.

4.2.1.2 Distorções Harmônicas de Corrente

A Tabela 4.7 exibe os valores do THD e das harmônicas individuais medidos durante a partida, com o ponto de medição localizado antes do soft starter, com foco nas distorções harmônicas de corrente. Essa tabela oferece uma análise detalhada da intensidade dessas distorções, contribuindo para uma compreensão mais aprofundada do comportamento do sistema durante o processo de partida.

Tabela 4.7 – Partida com Soft Starter - Partida

Fases	Ordem	THD de corrente (%)	Distorção Individual de Corrente (%)
L1	5	8,27	6,42
	7		2,41
L2	5	6,74	4,39
	7		3,61
L3	5	6,96	5,37
	7		3,02

A análise da distorção harmônica de corrente, com o ponto de medição antes do soft starter, mostrou que os níveis de THD permaneceram dentro da faixa permitida pela norma IEEE 519-2014, que varia de 5% a 20%, dependendo das características do sistema. O valor máximo registrado foi de 8,27%, indicando que, embora exista uma distorção perceptível, este valor ultrapassa os limites recomendados pela norma IEC 61000-2-4 para ambientes mais sensíveis (Categoria 1). Dessa forma, a presença dessa distorção deve ser analisada com cautela, considerando o ponto da instalação e a criticidade dos equipamentos conectados.

A Figura 4.7 indica os resultados das distorções harmônicas de corrente durante a partida. Esta figura oferece uma visão detalhada dos níveis de THD e das harmônicas individuais.

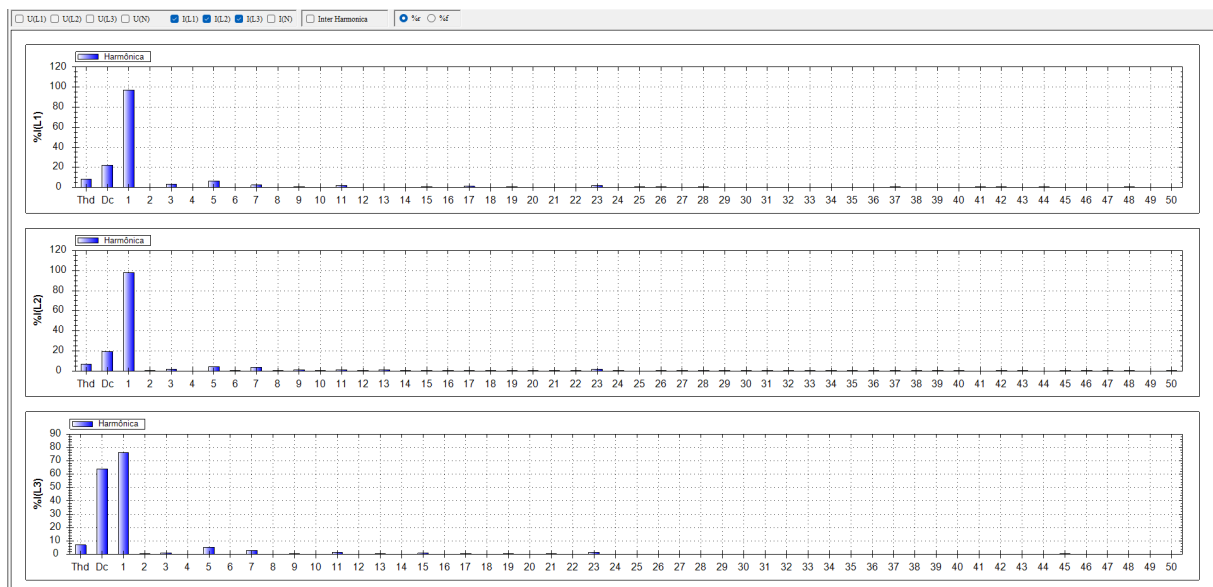


Figura 4.7 – Distorções harmônicas de corrente na partida antes do soft starter. Fonte: *MEGABRAS - Power View*.

Para observar o comportamento das distorções harmônicas de corrente em condições de operação contínua, a Tabela 4.8 apresenta os valores de THD e das harmônicas individuais no regime permanente. Essa comparação permite avaliar a evolução das distorções em relação ao momento da partida.

Tabela 4.8 – Partida com Soft Starter - Regime Permanente

Fases	Ordem	THD de corrente (%)	Distorção Individual de Corrente (%)
L1	5	4,36	2,46
	7		0,64
L2	5	3,47	1,99
	7		0,68
L3	5	3,26	2,05
	7		1,10

No regime permanente, com medições realizadas antes do soft starter, observou-se uma redução expressiva nos níveis de distorção harmônica de corrente em comparação ao momento da partida. O valor máximo de THD registrado foi de 4,36%, representando uma queda de aproximadamente 50% em relação ao valor observado durante a partida.

Além disso, as distorções harmônicas individuais também apresentaram redução significativa, mantendo-se praticamente pela metade dos valores iniciais. A quinta harmônica continuou sendo a componente predominante em todas as fases, o que é comum em sistemas com esse tipo de carga. Esses resultados indicam uma melhoria considerável na qualidade da corrente elétrica em regime permanente, com os níveis de distorção bem mais controlados e dentro dos limites estabelecidos pelas normas.

A Figura 4.8 indica os resultados das distorções harmônicas de corrente durante o regime permanente. Esta figura oferece uma visão detalhada dos níveis de THD e das harmônicas individuais.



Figura 4.8 – Distorções harmônicas de corrente em regime permanente antes do soft starter. Fonte: MEGABRAS - Power View.

4.2.2 Medição antes da carga (MIT)

4.2.2.1 Distorções Harmônicas de Tensão

Durante o ensaio com o ponto de medição posicionado após o soft starter, foram avaliadas as distorções harmônicas presentes nas fases L1, L2 e L3, com base nos dados obtidos. A Tabela 4.9 reúne os valores de THD e das harmônicas individuais para cada fase, evidenciando que essas componentes individuais tiveram papel dominante na composição da distorção total. A comparação dos resultados com os limites estabelecidos pelo Módulo 8 da PRODIST permitiu verificar se os níveis de distorção permanecem dentro dos padrões aceitáveis e apontar a eventual necessidade de correções para assegurar o atendimento aos critérios de qualidade da energia elétrica.

Tabela 4.9 – Partida com Soft Starter - Partida

Fases	Ordem	THD de tensão (%)	Distorção Individual de Tensão (%)
L1	5	0,68	0,37
	7		0,28
L2	5	0,96	0,57
	7		0,57
L3	5	0,75	0,48
	7		0,37

Durante a partida com o ponto de medição localizado após o soft starter, foram avaliadas as distorções harmônicas de tensão nas fases L1, L2 e L3. Os valores de THD de tensão permaneceram baixos em todas as fases, com um valor máximo de 0,96% registrado na fase L2, o que indica uma boa qualidade de tensão mesmo durante o processo de partida.

As harmônicas individuais de maior relevância foram a 5^a e a 7^a ordens, sendo a 5^a harmônica a mais significativa em todas as fases. Na fase L2, tanto a 5^a quanto a 7^a harmônicas apresentaram o maior valor de distorção individual (0,57%), mas ainda assim, mantiveram-se bem abaixo dos limites recomendados pelo Módulo 8 do PRODIST.

Esses resultados indicam que o uso do soft starter contribuiu para manter a qualidade da tensão em níveis adequados durante a partida do sistema, sem gerar distorções excessivas. A baixa magnitude das distorções sugere um impacto mínimo sobre o desempenho da carga e reforça a eficácia do soft starter no controle da tensão aplicada à carga durante a aceleração.

A Figura 4.9 apresenta os resultados das distorções harmônicas de tensão durante a partida, com o ponto de medição posicionado após o soft starter. Essa figura fornece uma visão detalhada dos níveis de THD e das componentes harmônicas individuais nas fases L1, L2 e L3, permitindo avaliar a qualidade da tensão fornecida à carga nesse estágio do processo.

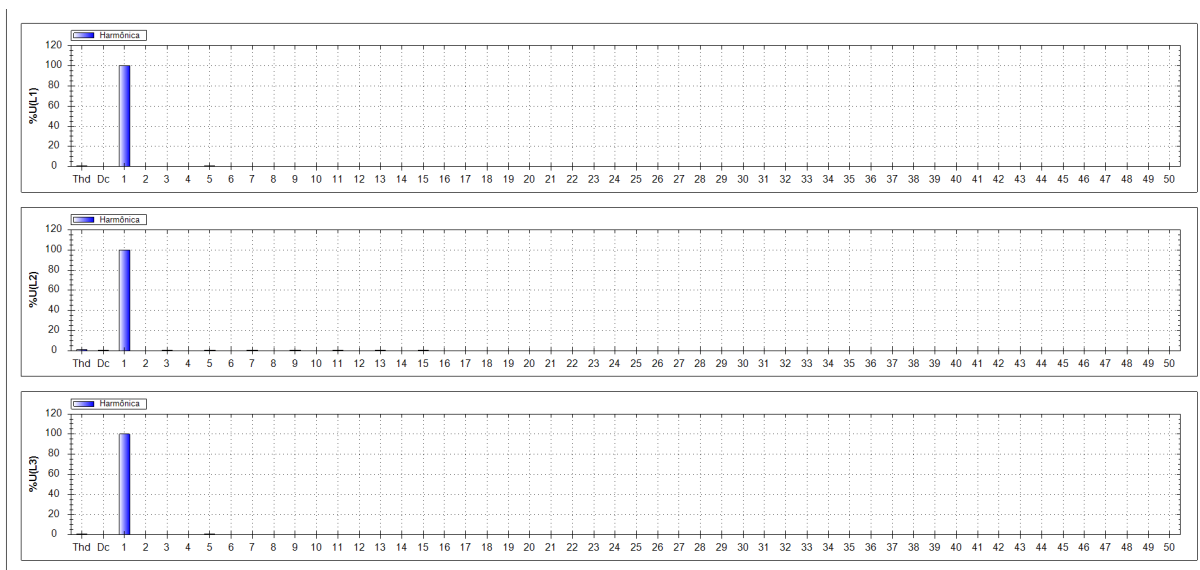


Figura 4.9 – Distorções harmônicas de tensão na partida antes da carga. Fonte: MEGABRAS - Power View.

Para dar continuidade à análise iniciada durante a partida, a Tabela 4.10 apresenta os valores do THD e das distorções harmônicas individuais de tensão no regime permanente, com medições realizadas após o soft starter. Essa etapa do ensaio possibilita a identificação das principais componentes de distorção em condições normais de operação da carga, permitindo também a comparação com os limites estabelecidos pelas normas vigentes. Dessa forma, obtém-se uma visão mais abrangente da qualidade da energia elétrica ao longo do tempo, avaliando a estabilidade do sistema após a conclusão da partida.

Tabela 4.10 – Partida com Soft Starter - Regime Permanente

Fases	Ordem	THD de tensão (%)	Distorção Individual de Tensão (%)
L1	5	0,6	0,31
	7		0,19
L2	5	0,81	0,33
	7		0,49
L3	5	0,72	0,33
	7		0,42

Durante o regime permanente, os valores de THD de tensão nas fases L1, L2 e L3 permaneceram baixos, com destaque para a fase L2, que apresentou o maior valor, de 0,81%. Nas fases L1 e L3, os valores de THD foram 0,6% e 0,72%, respectivamente. Todos esses valores estão bem abaixo do limite de 5% estabelecido pelas normas como o máximo aceitável para sistemas de baixa tensão, o que indica uma excelente qualidade da energia elétrica fornecida à carga.

Quanto às distorções harmônicas individuais, observa-se que as 5^a e 7^a harmônicas continuam sendo as componentes mais significativas, como é comum em sistemas com

cargas não lineares. A fase L3 apresentou um valor levemente elevado na 7ª harmônica (0,42%), mas ainda assim bastante inferior aos limites recomendados.

A presença reduzida dessas harmônicas reforça que, após a partida e com o sistema operando em regime permanente, o soft starter não introduziu distorções relevantes à rede, mantendo a integridade e a estabilidade da tensão fornecida. Essa condição é essencial para preservar o desempenho e a vida útil dos equipamentos conectados à carga.

A Figura 4.10 ilustra os resultados das distorções harmônicas de tensão no regime permanente, com medições realizadas após o soft starter. A figura apresenta os valores de THD e das harmônicas individuais nas fases L1, L2 e L3, permitindo visualizar a baixa presença de distorções e confirmando a boa qualidade da tensão fornecida à carga em condições normais de operação.



Figura 4.10 – Distorções harmônicas de tensão em regime permanente antes da carga.
Fonte: MEGABRAS - Power View.

4.2.2.2 Distorções Harmônicas de Corrente

A Tabela 4.11 apresenta os valores do THD e das distorções harmônicas individuais de corrente durante a partida, com as medições realizadas após a aplicação do soft starter. Essa tabela oferece uma visão detalhada da magnitude das distorções harmônicas de corrente, permitindo uma compreensão mais completa do comportamento do sistema durante a partida.

Tabela 4.11 – Partida com Soft Starter - Partida

Fases	Ordem	THD de corrente (%)	Distorção Individual de Corrente (%)
L1	5	10,83	6,8
	7		6,57
L2	5	13,5	10,95
	7		5,72
L3	5	7,09	5,71
	7		2,84

A análise da distorção harmônica de corrente, com o ponto de medição após o soft starter, revelou níveis de THD que variam entre as fases, porém todos permanecem dentro da faixa permitida pela norma IEEE 519-2014, que estabelece limites entre 5% e 20%, a depender da configuração do sistema e da carga conectada.

A fase L2 apresentou o maior valor de THD de corrente, com 13,5%, seguida da fase L1, com 10,83%, e da fase L3, com 7,09%. Embora os níveis de THD observados estejam acima dos valores típicos recomendados para instalações com equipamentos sensíveis, conforme indicam as normas IEC 61000-2-4 e IEEE 519, sua análise deve levar em conta a natureza da carga e o ponto de medição. Esses índices não implicam necessariamente risco imediato, mas indicam a necessidade de atenção quanto à compatibilidade eletromagnética e à confiabilidade do sistema.

Com relação à distorção individual de corrente, observam-se contribuições significativas das harmônicas de 5^a e 7^a ordem. A 5^a harmônica se destaca na fase L2, com 10,95%, valor que contribui de forma relevante para o THD total dessa fase. A fase L1 também apresenta uma distorção individual elevada na 5^a harmônica, com 6,8%, enquanto a fase L3 apresenta os menores índices de distorção individual, com 5,71% (5^a ordem) e 2,84

Esses resultados indicam que o soft starter introduz distorções harmônicas típicas associadas ao seu funcionamento, especialmente nas ordens ímpares baixas, mas não excede os limites normativos. No entanto, recomenda-se manter o monitoramento periódico, principalmente em sistemas mais sensíveis ou com outros equipamentos eletrônicos, de modo a garantir a qualidade da energia e a vida útil dos componentes.

A Figura 4.11 apresenta os resultados das distorções harmônicas de corrente após o soft starter em partida. Esta figura fornece uma visão detalhada dos níveis de THD e das distorções individuais de corrente para as harmônicas de 5^a e 7^a ordem em cada fase do sistema.

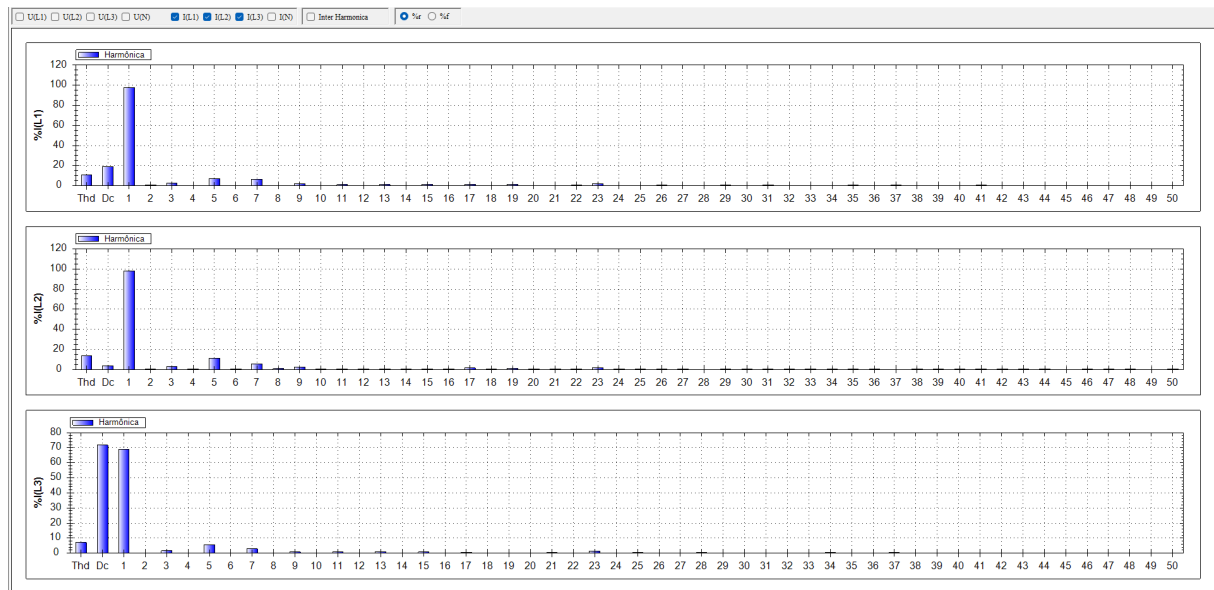


Figura 4.11 – Distorções harmônicas de corrente na partida antes da carga. Fonte: MEGABRAS - Power View.

Para a análise das distorções harmônicas de corrente em regime permanente, a Tabela 4.12 apresenta os valores de THD e das harmônicas individuais de 5^a e 7^a ordem. Essa tabela permite comparar os dados obtidos com aqueles registrados durante a partida, possibilitando uma avaliação mais precisa do comportamento das distorções harmônicas em condições normais de operação.

Tabela 4.12 – Partida com Soft Starter - Regime Permanente

Fases	Ordem	THD de corrente (%)	Distorção Individual de Corrente (%)
L1	5	5,76	2,6
	7		2,42
L2	5	7,88	4,91
	7		1,86
L3	5	3,76	2,38
	7		1,24

A análise das distorções harmônicas de corrente em condições normais de operação evidencia que os valores de THD nas três fases permanecem dentro da faixa permitida pela IEEE 519-2014, a qual recomenda limites de até 8% a 20%, dependendo da categoria da instalação e do ponto de medição.

A fase L2 apresentou o maior valor de THD de corrente, com 7,88%, seguida da fase L1 com 5,76%, e da fase L3, com o menor valor, 3,76%. Esses resultados indicam que, mesmo após o processo de partida, o sistema mantém os níveis de distorção harmônica sob controle, especialmente nas fases L1 e L3.

Em relação à distorção individual de corrente, observa-se que as harmônicas de 5^a ordem continuam sendo as principais componentes responsáveis pela distorção, com destaque para a fase L2, que apresentou 4,91%, valor considerável dentro do espectro

harmônico. As harmônicas de 7^a ordem apresentaram menores contribuições, sendo 2,42% em L1, 1,86% em L2 e 1,24% em L3.

De modo geral, o sistema opera em regime permanente com níveis aceitáveis de distorção harmônica, sem ultrapassar os limites normativos. A presença das harmônicas de ordens ímpares (especialmente a 5^a) é característica típica em sistemas com cargas não lineares, como soft starters, porém os valores observados não indicam necessidade de correção imediata. Ainda assim, recomenda-se o monitoramento contínuo para garantir a estabilidade da qualidade de energia e evitar o acúmulo de efeitos negativos em equipamentos sensíveis.

Comparando os resultados obtidos durante a partida com os valores registrados em regime permanente, observa-se uma redução significativa nos níveis de distorção harmônica de corrente após a estabilização do sistema. Durante a partida, os valores de THD chegaram a 13,5% na fase L2, enquanto em regime permanente esse valor caiu para 7,88%, evidenciando a atuação transitória do soft starter como principal responsável pelo aumento inicial das harmônicas. Da mesma forma, as distorções individuais de corrente, especialmente da 5^a ordem, apresentaram uma diminuição relevante — como no caso da fase L2, que passou de 10,95% para 4,91%. Essa queda reflete a normalização do fluxo de corrente após o término da partida, demonstrando que os efeitos das harmônicas mais elevadas estão concentrados no momento de aceleração do motor, reduzindo-se consideravelmente em condição de operação contínua. Esses dados confirmam que, embora o soft starter introduza distorções temporárias, o sistema retorna a níveis harmônicos aceitáveis após sua atuação.

A Figura 4.12 exibe os resultados das distorções harmônicas de corrente durante o processo em regime permanente, fornecendo uma visão detalhada dos níveis de THD e das componentes harmônicas individuais presentes nas três fases do sistema.



Figura 4.12 – Distorções harmônicas de corrente em regime permanente antes da carga.
Fonte: MEGABRAS - Power View.

4.3 COMPARAÇÃO SOFT STARTER X INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Nesta seção, serão comparados os dados obtidos na análise das distorções harmônicas de tensão e corrente, tanto no momento da partida quanto em regime permanente, de um motor de indução trifásico acionado por um soft starter. Para enriquecer a análise e ampliar a compreensão dos impactos de diferentes dispositivos de partida sobre a qualidade da energia elétrica, os resultados serão confrontados com os dados de um Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) desenvolvido por uma ex-aluna do CEFET-MG - Campus Nepomuceno, Eduarda Inácio Pacheco, que realizou estudo semelhante utilizando um inversor de frequência como método de partida. Essa comparação permitirá avaliar as diferenças no comportamento harmônico entre as duas tecnologias e seus efeitos sobre o sistema elétrico.

4.3.1 Medição antes do Soft Starter/Inversor de Frequência

4.3.1.1 Distorções Harmônicas de tensão

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
	7		0,386
L3	5	0,929	0,563
	7		0,565

Figura 4.13 – Distorções harmônicas de tensão na partida antes do inversor de frequência.
Fonte: TCC - Eduarda Inácio Pacheco.

Durante a análise das distorções harmônicas de tensão na partida, foram comparados os dados obtidos antes do soft starter com os registrados antes do inversor de frequência, com o objetivo de avaliar o impacto de cada tecnologia na qualidade da energia elétrica nesse estágio inicial de operação.

Os resultados demonstram que o uso do soft starter gera níveis mais elevados de distorção harmônica de tensão em todas as fases do sistema. Na fase L1, o THD foi de 2,10% com o soft starter, enquanto com o inversor de frequência foi de apenas 1,081%. O mesmo comportamento se repete nas fases L2 e L3, com valores de 2,49% e 2,46% para o soft starter, contra 0,976% e 0,929% para o inversor, respectivamente. Esses dados indicam que o soft starter introduz uma maior distorção na forma de onda de tensão durante a partida do motor.

A distorção individual de tensão também reforça esse cenário, especialmente para as harmônicas de 5ª e 7ª ordem, que apresentaram valores consistentemente mais altos no sistema com soft starter. Por exemplo, na fase L2, a distorção individual da 7ª harmônica foi de 1,45% com o soft starter, enquanto o inversor de frequência registrou apenas 0,386%. De modo semelhante, na fase L3, a 5ª harmônica foi de 1,41% no sistema com soft starter e de 0,563% no sistema com inversor.

Dessa forma, pode-se concluir que, em termos de distorção harmônica de tensão durante a partida, o inversor de frequência apresenta um desempenho mais eficiente na mitigação de harmônicas, contribuindo para uma melhor qualidade da energia fornecida ao motor.

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
L2	5	0,683	0,325
	7		0,417
L3	5	0,921	0,505
	7		0,625

Figura 4.14 – Distorções harmônicas de tensão em regime permanente antes do inversor de frequência. Fonte: TCC - Eduarda Inácio Pacheco.

Durante a análise das distorções harmônicas de tensão em regime permanente, foram comparados os dados obtidos antes do soft starter com os registrados antes do inversor de frequência, com o objetivo de avaliar o impacto de cada tecnologia na qualidade da energia elétrica fornecida ao motor em operação contínua.

Os resultados demonstram que, neste regime, o uso do inversor de frequência gera, em geral, níveis mais elevados de distorção harmônica de tensão em determinadas fases do sistema. Na fase L1, por exemplo, o THD foi de 1,001% com o inversor de frequência, enquanto com o soft starter foi de apenas 0,63%. O comportamento se inverte nas fases L2 e L3: na fase L2, o THD foi de 0,683% com o inversor e 0,73% com o soft starter; na fase L3, os valores foram 0,921% (inversor) e 0,81% (soft starter). Esses dados indicam que a distorção total de tensão apresenta variações entre os métodos, sendo ligeiramente maior com o inversor em L1 e L3, e com o soft starter em L2.

A distorção individual de tensão também apresenta variações relevantes. Na fase L1, por exemplo, a distorção da 5ª harmônica foi de 0,808% com o inversor, contra 0,32% com o soft starter; já a 7ª harmônica foi de 0,448% (inversor) e 0,24% (soft starter). Em contrapartida, na fase L2, a distorção da 7ª harmônica foi de 0,417% com o inversor e 0,41% com o soft starter, praticamente equivalentes. Na fase L3, os valores da 5ª harmônica foram 0,505% (inversor) e 0,41% (soft starter), enquanto a 7ª foi de 0,625% (inversor) e 0,48% (soft starter).

Dessa forma, pode-se concluir que, em regime permanente, nenhum dos métodos de partida apresenta supremacia absoluta em relação à distorção harmônica de tensão, sendo o desempenho variável entre as fases. No entanto, observa-se uma tendência de maior distorção individual nas harmônicas de ordem 5 e 7 quando se utiliza o inversor de frequência, especialmente na fase L1, o que pode influenciar na escolha da tecnologia

conforme as exigências de qualidade da energia da instalação.

4.3.1.2 Distorções Harmônicas de corrente

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		85,790
L3	5	167,331	93,66
	7		80,808

Figura 4.15 – Distorções harmônicas de corrente na partida antes do inversor de frequência.
Fonte: TCC - Eduarda Inácio Pacheco.

Durante a análise das distorções harmônicas de corrente na partida, foram comparados os dados obtidos após o soft starter com os registrados antes do inversor de frequência, com o objetivo de avaliar o impacto de cada tecnologia na qualidade da corrente elétrica durante o acionamento inicial do motor.

Os resultados mostram uma diferença extremamente significativa entre os dois dispositivos. As medições realizadas antes do inversor de frequência apresentaram valores extremamente elevados de THD de corrente, chegando a 208,503% na fase L2, 191,204% na fase L1, e 167,331% na fase L3. Já no sistema com soft starter, os valores de THD foram muito inferiores, com 8,27% em L1, 6,74% em L2 e 6,96% em L3. Essa diferença evidencia que o inversor de frequência, quando analisado na entrada (antes do equipamento), gera uma distorção de corrente muito mais intensa durante a partida.

A distorção individual de corrente também reforça esse cenário. No sistema com inversor, os valores das harmônicas de 5ª e 7ª ordem ultrapassam 80% em todas as fases, com destaque para a fase L2, onde a 5ª harmônica atingiu 98,899%. Em contraste, com o soft starter, a distorção individual da 5ª ordem ficou entre 4,39% e 6,42%, e da 7ª ordem entre 2,41% e 3,61%, dependendo da fase. Essa diferença revela que, embora o soft starter também introduza distorções durante a partida, seu impacto na forma de onda da corrente é muito menor em comparação ao inversor de frequência nesse ponto de medição.

Dessa forma, conclui-se que, durante a partida, o soft starter apresenta um desempenho superior ao inversor de frequência no que se refere à distorção harmônica de corrente, ao menos do ponto de vista do impacto na entrada do sistema. A elevada

distorção observada com o inversor destaca a importância de um tratamento adequado da corrente em sua entrada, seja por meio de filtros ou estratégias de mitigação harmônica.

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		77,705
L3	5	168,726	93,372
	7		80,299

Figura 4.16 – Distorções harmônicas de corrente em regime permanente antes do inversor de frequência. Fonte: TCC - Eduarda Inácio Pacheco.

Durante a análise das distorções harmônicas de corrente em regime permanente, foram comparados os dados medidos antes do inversor de frequência e antes do soft starter, com o objetivo de avaliar o impacto que cada tecnologia de partida causa na rede elétrica a montante, ou seja, no ponto de alimentação dos dispositivos.

Os resultados mostram uma diferença marcante entre os dois métodos. As medições realizadas antes do inversor de frequência apresentaram níveis extremamente elevados de distorção harmônica total de corrente (THD), com valores de 192,293% na fase L1, 191,901% na fase L2 e 168,726% na fase L3. Em contraste, as medições realizadas antes do soft starter revelaram valores muito mais baixos de THD, com 4,36% em L1, 3,47% em L2 e 3,26% em L3. Esses dados indicam que o inversor de frequência injeta uma quantidade significativamente maior de distorções harmônicas na rede elétrica em comparação ao soft starter.

A análise da distorção individual de corrente nas harmônicas de 5ª e 7ª ordem reforça essa constatação. No caso do inversor, a distorção da 5ª harmônica alcançou 83,616% em L1, 94,713% em L2 e 93,372% em L3, enquanto a da 7ª ordem foi de 77,640% (L1), 77,705% (L2) e 80,299% (L3). Já para o soft starter, os valores da 5ª harmônica foram muito inferiores, com 2,46% em L1, 1,99% em L2 e 2,05% em L3, e os da 7ª harmônica ficaram em 0,64% (L1), 0,68% (L2) e 1,10% (L3).

Esses resultados mostram claramente que, embora ambas as tecnologias causem distorções na corrente, o inversor de frequência impacta negativamente de forma muito mais intensa a qualidade da energia elétrica do ponto de vista da alimentação da rede. O soft starter, por outro lado, apresenta um comportamento muito mais amigável à rede,

gerando baixos níveis de distorção harmônica mesmo durante o regime permanente de operação.

4.3.2 Medição depois do Soft Starter/Inversor de Frequência

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		5,216

Figura 4.17 – Distorções harmônicas de tensão na partida depois do inversor de frequência.
Fonte: TCC - Eduarda Inácio Pacheco.

Durante a análise das distorções harmônicas de tensão, foram comparados os dados medidos após o inversor de frequência com aqueles registrados após o soft starter, com o objetivo de avaliar o impacto de cada tecnologia na qualidade da tensão fornecida ao motor durante o processo de partida.

Os resultados demonstram que o inversor de frequência introduz níveis significativamente mais elevados de distorção na tensão. A Distorção Harmônica Total de Tensão (THD) registrada após o inversor atingiu 11,192% na fase L1, 10,636% na fase L2 e 11,299% na fase L3. Em contraste, após o soft starter, os valores de THD foram muito inferiores: 0,68% em L1, 0,96% em L2 e 0,75% em L3. Esses dados evidenciam que o inversor impacta de maneira muito mais intensa a forma de onda da tensão entregue ao motor, resultando em maior conteúdo harmônico.

Além disso, a distorção individual de tensão, representando o impacto de ordens específicas de harmônicas, também reforça essa diferença. No caso do inversor, a 2ª ordem apresentou distorções de 3,152% (L1), 3,719% (L2) e 3,695% (L3), enquanto a 10ª ordem chegou a 5,417% (L1), 4,635% (L2) e 5,216% (L3). Já com o soft starter, os valores individuais das harmônicas de 5ª e 7ª ordem foram muito mais baixos, variando de 0,28% a 0,57% em todas as fases, mostrando um comportamento mais estável e menos agressivo à qualidade da tensão.

Partida depois do Inversor de Frequência– Regime Permanente			
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

Figura 4.18 – Distorções harmônicas de tensão em regime permanente depois do inversor de frequência. Fonte: TCC - Eduarda Inácio Pacheco.

Durante a análise das distorções harmônicas de tensão em regime permanente, foram comparados os dados obtidos após o inversor de frequência com os registrados após o soft starter, a fim de avaliar como cada tecnologia influencia na forma de onda da tensão entregue ao motor durante sua operação contínua.

Os resultados revelam um contraste expressivo entre os dois métodos. As medições realizadas após o inversor de frequência indicam altos níveis de Distorção Harmônica Total de Tensão (THD), atingindo 14,370% na fase L1, 14,637% na fase L2 e 14,766% na fase L3. Em contrapartida, os valores de THD após o soft starter foram extremamente reduzidos, com 0,60% em L1, 0,81% em L2 e 0,72% em L3. Isso evidencia que o inversor de frequência continua a introduzir uma quantidade significativa de harmônicos mesmo após o processo de partida, afetando de forma constante a qualidade da tensão no sistema.

A distorção individual de tensão por ordem harmônica reforça ainda mais essa diferença. Após o inversor, a 2ª ordem apresentou distorções de 4,593% (L1), 4,920% (L2) e 4,650% (L3), enquanto a 10ª ordem atingiu 6,618% (L1), 7,143% (L2) e 7,410% (L3). Já no sistema com soft starter, os valores individuais das harmônicas foram muito mais baixos, com a 5ª ordem variando entre 0,31% e 0,33%, e a 7ª ordem entre 0,19% e 0,49%, dependendo da fase analisada.

Esses resultados demonstram que, mesmo após o motor atingir o regime permanente, o inversor de frequência mantém um elevado nível de distorção na tensão, o que pode prejudicar a operação de outros equipamentos conectados à mesma rede, reduzir a vida útil de componentes sensíveis e provocar aquecimento excessivo. Por outro lado, o soft starter mostra um comportamento muito mais estável e com baixa interferência na qualidade da energia, mesmo durante a operação contínua do motor.

Partida depois do Inversor de Frequência			
Fases	Ordem	THD de corrente (%)	Distorção Individual de Corrente (%)
L1	3	4,066	1,389
	5		2,769
L2	3	6,492	4,728
	5		3,146
L3	3	4,205	0,593
	5		3,062

Figura 4.19 – Distorções harmônicas de corrente na partida depois do inversor de frequência. Fonte: TCC - Eduarda Inácio Pacheco.

Durante a análise das distorções harmônicas de corrente durante a partida, foram comparadas as medições feitas após o inversor de frequência e após o soft starter, com o objetivo de avaliar o impacto que cada tecnologia de acionamento exerce sobre a qualidade da corrente fornecida ao motor no momento de maior esforço de partida.

Os resultados mostram que o soft starter apresenta níveis significativamente mais altos de distorção harmônica total de corrente (THD) em comparação com o inversor de frequência. Após o soft starter, os valores de THD de corrente chegaram a 10,83% em L1, 13,5% em L2 e 7,09% em L3. Já após o inversor de frequência, os valores de THD foram inferiores, com 4,066% em L1, 6,492% em L2 e 4,205% em L3. Esses números indicam que, embora o soft starter seja mais simples e menos custoso, ele causa maior distorção na forma de onda da corrente elétrica durante a partida.

A distorção individual de corrente também confirma essa diferença. Após o soft starter, as harmônicas de 5^a e 7^a ordem apresentaram valores expressivos: por exemplo, na fase L2, a 5^a harmônica atingiu 10,95% e a 7^a 5,72%, enquanto na fase L1 os valores foram 6,8% (5^a) e 6,57% (7^a). Em contrapartida, no sistema com inversor de frequência, as maiores distorções individuais ocorreram nas harmônicas de 3^a e 5^a ordem, sendo: 2,769% (L1 – 5^a), 4,728% (L2 – 5^a) e 3,062% (L3 – 5^a), todos consideravelmente inferiores aos valores observados com o soft starter.

Esses dados evidenciam que, em termos de distorções de corrente no momento da partida, o inversor de frequência apresenta desempenho superior, causando menor impacto na rede elétrica e fornecendo uma corrente com menor conteúdo harmônico. Por outro lado, o soft starter, apesar de ser eficaz na redução do pico de corrente na partida, introduz distorções mais significativas na forma de onda da corrente.

Partida depois do Inversor de Frequência– Regime Permanente			
Fases	Ordem	THD de corrente (%)	Distorção Individual de Corrente (%)
L1	3	3,670	1,179
	5		1,853
L2	3	5,444	3,663
	5		2,819
L3	3	3,846	0,880
	5		2,735

Figura 4.20 – Distorções harmônicas de corrente em regime permanente depois do inversor de frequência. Fonte: TCC - Eduarda Inácio Pacheco.

Durante a operação em regime permanente, foram analisados os níveis de distorção harmônica de corrente após o inversor de frequência e após o soft starter, com o objetivo de avaliar o impacto de cada tecnologia na qualidade da corrente elétrica fornecida ao motor.

Os dados mostram que o inversor de frequência apresenta, de modo geral, menores níveis de distorção harmônica total de corrente (THD) em comparação ao soft starter. Após o inversor, os valores de THD registrados foram de 3,670% na fase L1, 5,444% na fase L2 e 3,846% na fase L3. Em contrapartida, os valores obtidos após o soft starter foram mais elevados: 5,76% na fase L1, 7,88% na fase L2 e 3,76% na fase L3. Essa diferença evidencia que, em regime permanente, o inversor de frequência gera uma corrente mais limpa, com menos conteúdo harmônico.

A análise da distorção individual de corrente também confirma esse cenário. Com o inversor, os valores foram: 1,179% (3ª ordem) e 1,853% (5ª ordem) na fase L1, 3,663% (3ª ordem) e 2,819% (5ª ordem) na fase L2, e 0,880% (3ª ordem) e 2,735% (5ª ordem) na fase L3. Já com o soft starter, os valores das ordens 5 e 7 foram mais expressivos, como 2,6% e 2,42% na fase L1, 4,91% e 1,86% na fase L2, e 2,38% e 1,24% na fase L3. Nota-se que o inversor de frequência, embora ainda gere distorções harmônicas, mantém os níveis mais baixos nas principais ordens, especialmente nas fases L1 e L2.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo principal a análise das distorções harmônicas de tensão e corrente geradas durante a partida e o regime permanente de motores de indução trifásicos utilizando o método de acionamento com soft starter. Por meio de medições experimentais realizadas com o analisador de qualidade de energia MAR 722 da Megabrás, foi possível avaliar a conformidade dos parâmetros observados com os limites estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST da ANEEL, bem como compreender os impactos do uso do soft starter na qualidade da energia elétrica.

Os dados obtidos mostraram que, apesar do soft starter ser eficaz na redução da corrente de partida — contribuindo para a diminuição de impactos na rede elétrica e na carga mecânica acoplada —, há um aumento moderado nas distorções harmônicas de tensão, especialmente durante a fase de aceleração. Entretanto, os níveis de distorção registrados mantiveram-se dentro dos limites normativos para a maioria dos cenários, evidenciando que o soft starter é uma alternativa viável e segura para aplicações que exigem partidas suaves, sem a necessidade de controle contínuo de velocidade.

Além disso, a análise evidenciou que as distorções harmônicas de corrente, embora não sejam diretamente reguladas pelo PRODIST, apresentam comportamento significativo e devem ser monitoradas para garantir a confiabilidade dos sistemas industriais, evitando sobrecargas e falhas em equipamentos sensíveis. A comparação com dados de trabalhos anteriores, que utilizaram inversores de frequência e partida direta, reforça que o soft starter proporciona uma solução intermediária em termos de qualidade de energia: menos agressivo que a partida direta e menos poluente harmonicamente que o inversor de frequência.

Dessa forma, conclui-se que o uso do soft starter representa uma opção técnica eficaz para mitigar os efeitos negativos das partidas diretas, promovendo maior estabilidade na rede elétrica e maior vida útil dos componentes do sistema. No entanto, é recomendável que sua utilização seja acompanhada de uma análise prévia das condições do sistema elétrico, incluindo possíveis interações com outras cargas não lineares.

REFERÊNCIAS

- ANEEL. **PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional: Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica**. 2022. <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_prodist_modulo_8_v13.pdf>. Aprovado pela Resolução Normativa nº 956, de 16 de dezembro de 2021. Vigente a partir de 10 de janeiro de 2022.
- BOLLEN, M. H. J. What is power quality? **Electric Power Systems Research**, Elsevier, v. 66, n. 1, p. 5–14, 2003.
- BOSE, B. K. **Modern Power Electronics and AC Drives**. [S.l.]: Prentice Hall, 2011.
- CHAPMAN, S. J. **Fundamentals of Electric Circuits**. [S.l.]: McGraw-Hill, 2012.
- COMMISSION, I. E. **IEC 61000-4-7: General Guide on Harmonics and Interharmonics Measurements and Instrumentation**. [S.l.]: IEC, 2002.
- ELÉTRICOS, M. I. **Manual Técnico – Analisador de Qualidade de Energia MAR 722**. 2020. Manual técnico disponível via fabricante.
- FILHO, J. M.; JÚNIOR, M. d. P. M. **Estudo do comportamento da corrente de partida em motores de indução trifásicos**. [S.l.]: Rede BIM / Revista FT, 2021. Compara métodos de partida em motores industriais.
- GIERAS, J. F. **Induction Motor: Analysis and Design**. [S.l.]: CRC Press, 2011.
- GRAINGER, J. J.; JR., W. D. S. **Power System Analysis**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1994.
- LIU, X.; WU, T. Soft starters for induction motors: A review. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 61, n. 9, p. 4851–4860, 2014.
- MEHL, E. L. M. Qualidade da energia elétrica: fundamentos e aspectos práticos. **UFPR**, p. 1–21, 2012.
- MORENO-MUÑOZ, A. **Power Quality**. [S.l.]: Springer, 2007.
- MOURÁ JÚNIOR, M. d. P. Análise da qualidade de energia em partida de motores elétricos de indução trifásicos. **Rede BIM / Revista FT**, 2021.
- NEVES, F. **Qualidade da Energia Elétrica: distúrbios e impactos nos sistemas elétricos**. [S.l.]: Blucher, 2014.
- POWER, I.; SOCIETY, E. **IEEE Standard 519-2014: Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems**. [S.l.]: IEEE, 2014.
- ResearchGate. **Figuras técnicas sobre métodos de partida de motores elétricos**. 2023. Disponível via ResearchGate.
- SANKARAN, C. **Power Quality**. [S.l.]: CRC Press, 2017.
- SILVA, A. J.; MUNHOZ, F. C.; CORREIA, P. B. Qualidade na utilização de energia elétrica no setor rural: problemas, legislação e alternativas. **SciELO Brasil**, 2002.

(UNESP), U. E. P. **Motores de Indução Trifásicos**. 2015. Disponível em repositório da FEIS-UNESP.

UTFPR. Análise de partida direta de motores de indução e seus impactos na qualidade de energia. **Repositório UTFPR**, 2012. Monografia sobre os métodos de partida e distorções eletromagnéticas.



RELATÓRIO FINAL DE CURSO Nº 30/2025 - CEENP (11.51.21)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 25/07/2025 11:09)

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: 30, ano: 2025, tipo:
RELATÓRIO FINAL DE CURSO, data de emissão: 25/07/2025 e o código de verificação: 040585e35e