

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS**  
**ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**MAURÍLIO DE PAULA MOURA JÚNIOR**

**ANÁLISE DE QUALIDADE DE ENERGIA EM PARTIDA DE MOTOTRES  
ELÉTRICOS DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS: comparação dos métodos de partidas**

**Varginha**  
**2021**

**MAURÍLIO DE PAULA MOURA JÚNIOR**

**ANÁLISE DE QUALIDADE DE ENERGIA EM PARTIDA DE MOTOTRES  
ELÉTRICOS DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS: comparação dos métodos de partidas**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas - UNIS como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel sob orientação do Professor Roberto Lazarino do Prado Mudesto.

**Varginha  
2021**

**MAURÍLIO DE PAULA MOURA JÚNIOR**

**ANÁLISE DE QUALIDADE DE ENERGIA EM PARTIDA DE MOTOTRES  
ELÉTRICOS DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS: comparação dos métodos de partidas**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como pré-requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas - UNIS pela banca examinadora composta pelos membros:

Aprovado em:    /    /

---

Prof.

---

Prof.

---

Prof.

OBS:

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus pela oportunidade de ter chegado a onde estou, pela saúde e força nos momentos difíceis durante esta graduação. A minha mãe Elisa Comunian de Moura pelo incentivo e dedicação. Aos meus amigos e colegas de curso, por terem proporcionado momentos incríveis. E finalmente aos professores e orientares por todo conhecimento passado a classe.

“No meio da dificuldade encontra-se a oportunidade”.

Albert Einstein

## RESUMO

Este trabalho acadêmico irá abordar um estudo referente a qualidade de energia em partida de motores de indução trifásicos, realizando uma comparação dos métodos de partidas. Os principais métodos que serão estudados e comparados são a partida estrela-triângulo, partida eletrônica utilizando soft-starter e a partida com inversor de frequência. Esses estudos se tornam necessários devido as indústrias e máquinas elétricas estarem em grande crescimento e desenvolvimento na sociedade atual, sendo que a qualidade de energia elétrica ruim na rede poderá influenciar em diversos aspectos econômicos, sendo assim, os principais distúrbios que serão estudados e analisados nesta pesquisa são variação, flutuação, surto e desequilíbrio de tensão, variação de frequência, fator de potência, distorções harmônicas e ruídos. O objetivo desta pesquisa será realizar a análise de qualidade de energia no momento de partida do motor elétrico, obtendo os distúrbios dos três métodos de partida mencionados e assim apontar qual ou quais métodos causam menos distúrbios na rede elétrica. As análises foram realizadas em uma indústria de ração, localizada em Três Corações – MG. Foram feitos estudos em motores de exaustores de transporte pneumático de 75cv, sendo instalado o analisador Fluke modelo 435 nos três métodos de partida. Nos ensaios não foi obtidos valores significativos de distúrbios nas partidas estrela-triângulo e soft-starter, obtendo valores dentro dos limites especificados pela Prodist no seu módulo 8. Já na partida utilizando inversor de frequência se obteve um valor elevado de distorções harmônicas de tensão, sendo que para o nível de tensão utilizado, a Prodist permite no máximo 10%, e se obteve 34,5%. Diante disso, após obter todas análises e dados, esta pesquisa irá apresentar o resultado final, com o método mais viável a ser utilizado, para se obter uma qualidade de energia dentro dos padrões.

**Palavras-chave:** Qualidade de Energia. Motores de Indução. Distúrbios. Métodos de partida.

## ABSTRACT

*This academic work will address a study regarding the power quality in starting three-phase induction motors, making a comparison of starting methods. The main methods that will be studied and compared are star-delta starting, electronic starting using soft-starter and starting with frequency inverter. These studies are necessary because industries and electrical machines are in great growth and development in today's society, and the poor quality of electrical energy in the network may influence several economic aspects, thus, the main disturbances that will be studied and analyzed in this research are voltage variation, fluctuation, surge and unbalance, frequency variation, power factor, harmonic distortion and noise. The objective of this research will be to carry out the analysis of power quality at the time the electric motor starts, obtaining the disturbances of the three mentioned starting methods and thus pointing out which method(s) cause less disturbances in the electrical network. The analyzes were carried out in a feed industry, located in Três Corações - MG. Studies were carried out on 75hp pneumatic transport exhaust motors, with the Fluke model 435 analyzer being installed in the three starting methods. In the tests, significant values of disturbances were not obtained in the star-delta and soft-starter starters, obtaining values within the limits specified by Prodist in its module 8. However, in the frequency inverter starter, a high value of voltage harmonic distortions was obtained, and for the level of working voltage used, Prodist allows a maximum of 10%, and 34.5% was obtained. Therefore, after obtaining all the analysis and data, this research will present the final result, with the most viable method to be used, to obtain energy quality within the standards.*

**Keywords:** *Power Quality. Induction Motors. Disorders. Starting methods.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Onda senoidal.....	15
Figura 02 – Construção do motor de indução trifásico .....	16
Figura 03 – Característica torque/corrente em função da velocidade .....	20
Figura 04 – Diagrama de potência da partida estrela-triângulo .....	22
Figura 05 – Diagrama de comando da partida estrela-triângulo .....	22
Figura 06 – Esquema soft-starter com tiristores para o acionamento do MIT .....	23
Figura 07 – Representação da rampa de energização.....	24
Figura 08 – Representação da rampa de desenergização .....	24
Figura 09 – Esquema de controle do chaveamento .....	26
Figura 10 – Comparativo entre os métodos de partida.....	26
Figura 11 – Triângulo de potências .....	31
Figura 12 – Deformação da senoide .....	33
Figura 13 – Funcionamento do filtro ativo.....	38
Figura 14 – Esquema do filtro ativo.....	39
Figura 15 – Filtro passivo.....	40
Figura 16 – Filtro híbrido .....	40
Figura 17 – Partida estrela – triangulo e motor respectivamente .....	43
Figura 18 – Partida com soft-starter e motor respectivamente.....	43
Figura 19 – Partida com inversor de frequência e motor respectivamente. ....	44
Figura 20 – Tela principal do analisador Fluke 435.....	45
Figura 21 – Diagrama de ligação do analisador Fluke 435 na partida estrela-triângulo .....	46
Figura 22 – Resultados das distorções harmônicas de tensão na partida estrela-triângulo.....	47
.....	47
Figura 23 – Resultados das distorções harmônicas de corrente na partida estrela-triângulo...	47
.....	47
Figura 24 – Resultados do desequilíbrio de tensão na partida estrela-triângulo. ....	48
Figura 25 – Resultados da variação de frequência na partida estrela-triângulo.....	48
Figura 26 – Diagrama de ligação do analisador Fluke 435 na partida com Soft-Starter.....	49
Figura 27 – Resultados das distorções harmônicas de tensão na partida utilizando Soft-Starter .....	49
.....	49
Figura 28 – Resultados das distorções harmônicas de corrente na partida utilizando Soft-Starter .....	50
.....	50



Figura 29 – Resultados do desequilíbrio de tensão na partida utilizando Soft-Starter.....	50
Figura 30 – Resultados da variação de frequência na partida utilizando Soft-Starter.....	51
Figura 31 – Diagrama de Ligação do analisador Fluke 435 na partida utilizando inversor de frequência .....	52
Figura 32 – Resultados das distorções harmônicas de tensão na partida utilizando Inversor .....	52
Figura 33 – Resultados das distorções harmônicas de corrente na partida utilizando Inversor .....	53
Figura 34 – Resultados do desequilíbrio de tensão e variação de frequência na partida utilizando inversor .....	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Classificação das variações de Tensão de Curta Duração .....	29
Tabela 02 – Limites para os desequilíbrios de tensão .....	30
Tabela 03 – Ordem, frequência e sequência de harmônicas.....	34
Tabela 04 – Terminologias para cálculos das distorções Harmônicas .....	34
Tabela 05 – Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental).....	36
Tabela 06 – Parâmetros do motor.....	42
Tabela 07 – Comparação dos resultados obtidos após as análises. ....	54
Tabela 08 – Custo médio dos equipamentos para utilização dos métodos de partida. ....	55

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 01 – .....	16
Equação 02 – .....	17
Equação 03 – .....	17
Equação 04 – .....	18
Equação 05 – .....	18
Equação 06 – .....	18
Equação 07 – .....	19
Equação 08 – .....	19
Equação 09 – .....	30
Equação 10 – .....	32
Equação 11 – .....	32
Equação 12 – .....	33
Equação 13 – .....	35
Equação 14 – .....	35
Equação 15 – .....	35
Equação 16 – .....	35
Equação 17 – .....	36
Equação 18 – .....	36

## LISTA DE ABREVIATURAS

MIT – Motor de indução trifásico

MI – Motor de indução

QE – Qualidade de energia

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

PRODIST – Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional

DIT – Detentoras de demais instalações de transmissão

ONS – Operador nacional do sistema elétrico

IN – Corrente nominal

IP – Corrente de partida

PID – Proporcional, integral e derivativo

SCR – Silicon Controlled Rectifier

IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor

PWM – Pulse Width Modulation

VTCD – Variações de tensão de curta duração

CC – Corrente contínua

CA – Corrente alternada

CV – Cavalos-vapor

HZ – Hertz

TP – Transformador de potência

TC – Transformador de corrente

THD – Distorções harmônicas de tensão

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2 MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS.....</b>	<b>15</b>
2.1 Obtenção do conjugado em um motor de indução .....	16
2.2 Torque do motor de indução .....	17
2.3 Escorregamento do rotor .....	17
2.4 Frequência do rotor .....	19
2.5 Corrente de nominal.....	19
2.6 Corrente de partida .....	20
<b>3 MÉTODOS DE PARTIDA DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS.....</b>	<b>21</b>
3.1 Partida estrela-triângulo.....	21
3.2 Partida com soft-starter .....	23
3.2.1 Controle de energização e desenergização .....	23
3.3 Partida com inversor de frequência .....	25
3.4 Comparação dos métodos de partidas .....	26
<b>4 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA.....</b>	<b>27</b>
4.1 Distúrbios relacionados a qualidade de energia .....	28
4.1.1 Variação de tensão.....	28
4.1.2 Variação de tensão de curta duração .....	28
4.1.3 Variação de tensão de longa duração .....	29
4.1.4 Desequilíbrio de tensão .....	30
4.1.5 Surto de tensão ou Spike .....	30
4.1.6 Variação de frequência .....	31
4.1.7 Ruído .....	31
4.1.8 Redução do fator de potência .....	31
4.1.9 Distorções harmônicas .....	33
<b>5 FILTROS.....</b>	<b>38</b>
5.1 Filtros ativos.....	38
5.2 Filtros passivos.....	39
5.3 Filtros híbridos.....	40
<b>6 METODOLOGIA.....</b>	<b>41</b>
6.1 Estudo laboratorial .....	41
6.1.2 Analisador de qualidade de energia .....	44
6.2 Resultados dos estudos e análises laboratoriais.....	45
6.2.1 Partida estrela-triângulo .....	46
6.2.2 Partida com Soft-Starter .....	48
6.2.3 Partida com Inversor de frequência .....	51
6.2.4 Comparação dos resultados .....	54
6.3 Viabilidade de custo para implementação dos métodos .....	54
<b>7 CONCLUSÃO.....</b>	<b>56</b>
7.1 Ponto de continuidade da pesquisa .....	57
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>58</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As indústrias no Brasil vem surgindo e crescendo cada vez mais, sendo que uma das peças fundamentais para seu funcionamento é o motor elétrico trifásico, o seu uso deve-se a que quase toda energia elétrica consumida no meio industrial, é em corrente alternada.

O motor elétrico é uma máquina que tem por principal função transformar a energia elétrica em energia mecânica. No ambiente industrial, onde que esses motores são aplicados para diversas funções e tipos variados de equipamentos, com o passar dos anos foi necessário começar a desenvolver novas maneiras mais sofisticadas para o acionamento do mesmo, assim surgiu as partidas eletrônicas de MIT, como exemplo as soft starter e inversores de frequência. Segundo Neves (2014), do total da energia fornecida pelas concessionárias, cerca de 44% é consumida no setor industrial. Neste setor, mais de 2/3 da demanda está relacionada aos motores. A partir disso, cria se a necessidade de realizar um estudo teórico e prático sobre o comportamento da rede elétrica ao acionar um MIT, certo que a baixa qualidade da energia influência em diversos aspectos, como rendimento do motor e ocasiona grandes distúrbios na rede elétrica.

A PRODIST no seu modulo 8 estabelece os procedimentos relacionados a qualidade da energia elétrica que tem abrangência para consumidores, distribuidoras, agentes importadores ou exportadores de energia elétrica, transmissoras detentoras de demais instalações de transmissão – DIT, Operador nacional do sistema elétrico – ONS. A partir desta norma, muitos estudos relacionados a qualidade de energia vêm acontecendo, por ser um assunto de grande relevância, todos órgãos e consumidores buscam a normatização e redução dos distúrbios, a fim de ter uma energia elétrica dentro dos padrões para o consumo das máquinas elétricas. Os principais distúrbios que vale destacar e analisar em regime permanente e transitório são: tensão em regime permanente, fator de potência, harmônicos, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão, variação de frequência, variações de tensão de curta duração.

Esta pesquisa bibliográfica tem por finalidade abordar os principais efeitos e distúrbios ocasionados em partidas de motores elétricos de indução trifásico bem como propor um método de acionamento ideal.

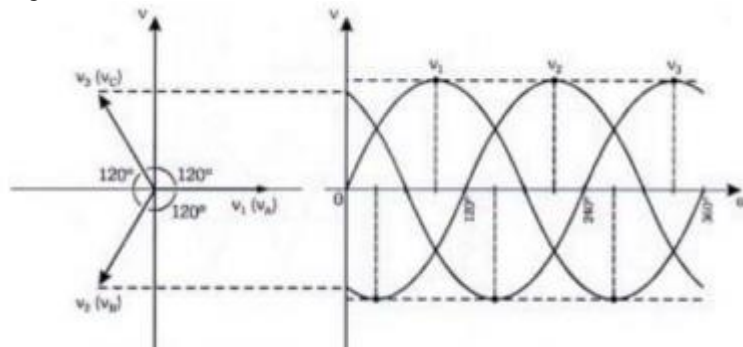
O presente trabalho abordará inicialmente estudos teóricos referente ao funcionamento, características construtivas dos motores elétricos e métodos de partidas. Após isto, a pesquisa trará estudos sobre qualidade de energia e por fim será apresentado a metodologia e estudo de caso do trabalho, que irá propor a instalação do Analisador de qualidade de energia no barramento de potência de uma indústria, afim de analisar os três tipos de partida citados e obter os dados, para assim indicar o melhor método de acionamento, podendo também indicar meios para que possa corrigir ou até reduzir os danos causados pela qualidade de energia ruim.

## 2 MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Os motores de indução trifásico são máquinas que tem como função converter energia elétrica em energia mecânica. Estes tipos de motores trabalham utilizando o princípio da indução eletromagnética, onde tem um campo magnético girante, o mesmo é produzido pela corrente que passa pelos enrolamentos (bobinas), onde que a intensidade do campo depende da intensidade da corrente elétrica passado pelas bobinas naquele instante, se a corrente for máxima o campo também será máximo e se a corrente for mínima ou nula o campo também será. Segundo Henrique (2007), este campo girante corta os condutores do rotor e induz corrente nos mesmos. Esta corrente induzida gera um campo magnético em torno dos condutores do rotor, e este campo tende a se alinhar com o campo do estator. Entretanto, como o campo do estator gira continuamente, o rotor não consegue se alinhar com ele. A velocidade do rotor é sempre menor que a velocidade síncrona (velocidade do campo girante).

As correntes nas bobinas são defasadas em  $120^\circ$  umas das outras sendo alimentadas por tensões trifásicas balanceadas e também defasadas. Os três campos que são gerados combinam se em um único campo que atuam sobre o rotor. A Figura 1 demonstra a onda senoidal defasadas  $120^\circ$  e balanceadas.

Figura 1 – Onda senoidal

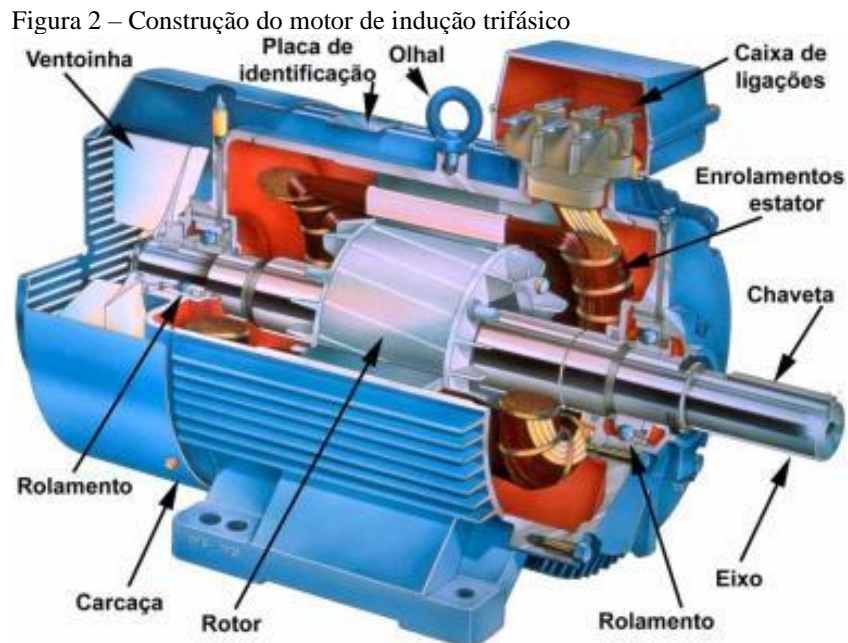


Fonte: (SILVA, 2016, p. 18).

Nos motores de indução trifásico existem duas partes extremamente fundamentais para seu funcionamento, o estator e rotor. O estator é a parte fixa do MIT, presente em diversas máquinas, nele se encontra os enrolamentos das bobinas. O rotor é a parte girante do motor, que possui uma superfície com ranhuras sendo de forma cilíndrica construído com material ferromagnético. Existem dois tipos de rotores, os que são bobinados e os de gaiola de esquilo. O rotor tipo bobinado possui anéis coletores montados sobre o eixo do motor, nestes se encontra os enrolamentos que não estão conectados a nenhuma fonte de alimentação. Já o rotor tipo



gaiola é construído com lâmina de aço (alumínio, latão ou cobre), com os condutores paralelo ao eixo e entranhados nas fendas em volta do perímetro do núcleo. A Figura 2 demonstra a parte interna do MIT.



Fonte: (SANTOS, 2011, p. 4).

## 2.1 A Obtenção do conjugado em um motor de indução trifásico

Um conjunto trifásico de tensões é aplicado ao estator resultando em um conjunto trifásico de correntes circulando no estator. Essas correntes produzem um campo magnético que gira em sentido anti-horário (CHAPMAN, 2013). A velocidade de rotação do campo magnético é calculada pela Equação 1.

$$n_{\text{sinc}} = \frac{120 \cdot f}{P} \quad (1)$$

Onde,

$n_{\text{sinc}}$  = velocidade síncrona (rpm)

$f$  = frequência do sistema no estator (Hz)

$P$  = número de polos da máquina

O campo magnético girante percorre pelas barras do rotor e induz uma tensão nelas. Essa tensão induzida em uma determinada barra é dada pela Equação 2.

$$e_{ind} = (v \times B) \cdot l \quad (2)$$

Onde,

$e_{ind}$  = tensão induzida (V)

$v$  = velocidade da barra em relação ao campo magnético

$B$  = vetor densidade de fluxo magnético

$l$  = comprimento do condutor dentro do campo magnético

De acordo com Chapman (2013), se  $e_{ind}$  for igual a 0, então não haverá corrente nem campo magnético no rotor. Sem campo magnético no rotor, o conjugado induzido será zero e o rotor perderá velocidade como resultado das perdas por atrito. Portanto, um motor de indução pode ganhar velocidade até próximo da velocidade síncrona, sem nunca alcançá-la exatamente.

## 2.2 Torque do motor de indução

O torque de um motor de indução (motor assíncrono) depende, basicamente, da intensidade da interação entre os campos do rotor e do estator, representados pela corrente do rotor e a tensão do estator. O torque é a medida do esforço necessário para girar o eixo do motor. A Equação 3 representa a expressão matemática para obtenção do mesmo.

$$T = \frac{P}{n_r} \quad (3)$$

Onde,

$T$  = torque (N.m.);

$P$  = potência desenvolvida (W);

$n$  = velocidade nominal do rotor (rad/s).

## 2.3 Escorregamento do rotor de indução

De acordo com Chapman (2013), a tensão induzida nas barras do rotor de uma máquina de indução é dependente da velocidade do rotor em relação aos campos magnéticos. Como o desempenho de um motor de indução depende da tensão e da corrente do rotor, regularmente tem mais lógica falar em velocidade relativa. São usados dois termos para definir o movimento relativo do rotor e dos campos magnéticos. Um desses termos é a velocidade de escorregamento, determinada como sendo a diferença entre a velocidade síncrona e a

velocidade do rotor. A equação 4 representa a expressão matemática para obtenção do escorregamento do MI.

$$n_{\text{esc}} = n_{\text{sinc}} - n_r \quad (4)$$

Onde,

$n_{\text{esc}}$  = velocidade de escorregamento da máquina

$n_{\text{sinc}}$  = velocidade dos campos magnéticos

$n_r$  = velocidade mecânica do eixo do motor

Também pode ser utilizado para descrever o movimento relativo é o escorregamento, que é definido pela velocidade relativa expressada em uma base por unidade ou porcentagem. Assim o escorregamento é definido na Equação 5.

$$s = \frac{n_{\text{sinc}} - n_r}{n_{\text{sinc}}} \times 100\% \quad (5)$$

Onde,

$s$  = escorregamento

$n_{\text{sinc}}$  = velocidade dos campos magnéticos

$n_r$  = velocidade mecânica do eixo do motor

De acordo com Chapman (2013), pode observar que, se o rotor estiver girando na velocidade síncrona, então  $s = 0$ , ao passo que, se o rotor estiver estacionário, então  $s = 1$ . Todas as velocidades normais de um motor recaem em algum lugar entre esses dois limites. É possível expressar a velocidade mecânica do eixo do rotor em termos de velocidade síncrona e de escorregamento. A velocidade mecânica pode ser definida pela Equação 6.

$$n_r = (1 - s) \times n_{\text{sinc}} \quad (6)$$

Onde,

$n_{\text{sinc}}$  = velocidade dos campos magnéticos

$n_r$  = velocidade mecânica do eixo do motor

$s$  = escorregamento

## 2.4 Frequência do rotor

Um motor de indução trabalha induzindo tensões e correntes no rotor da máquina e, por essa razão, ele também foi denominado algumas vezes transformador rotativo. Como tal, o primário (estator) induz uma tensão no secundário (rotor). Entretanto, diferentemente de um transformador, a frequência do secundário não é necessariamente a mesma que a frequência do primário (CHAPMAN, 2013).

Para  $n_m = 0$  rpm, a frequência do rotor é  $f_{re} = f_{se}$  e o escorregamento é  $s = 1$ . Para  $n_m = n_{\text{sinc}}$ , a frequência do rotor é  $f_{re} = 0$  Hz e o escorregamento é  $s = 0$ . Para qualquer velocidade intermediária, a frequência do rotor é diretamente proporcional à diferença entre a velocidade do campo magnético  $n_{\text{sinc}}$  e a velocidade do rotor  $n_m$ . O escorregamento do rotor é definido pela Equação 4, a frequência do rotor é definida pela Equação 7.

$$f_{re} = s \times f_{se} \quad (7)$$

Onde,

$f_{re}$  = frequência do rotor (Hz)

$f_{se}$  = frequência do estator (ou da tensão de alimentação) (Hz)

$s$  = escorregamento percentual

## 2.5 Corrente Nominal (IN)

Motores e máquinas elétricas são projetadas e construídas de forma que possuam valores nominais e uma dessas grandezas é a corrente elétrica, seu valor nominal é fornecido pelo fabricante do motor. Na Equação 8 demonstra a representação matemática.

(8)

$$IN = p (CV) \times 0.736 \times fs / \sqrt{3} \times n \times fp \times kv$$

Onde,

$p$  = potência (CV)

$fs$  = fator de serviço.

$n$  = rendimento.

$fp$  = fator de potência.

$kv$  = tensão.

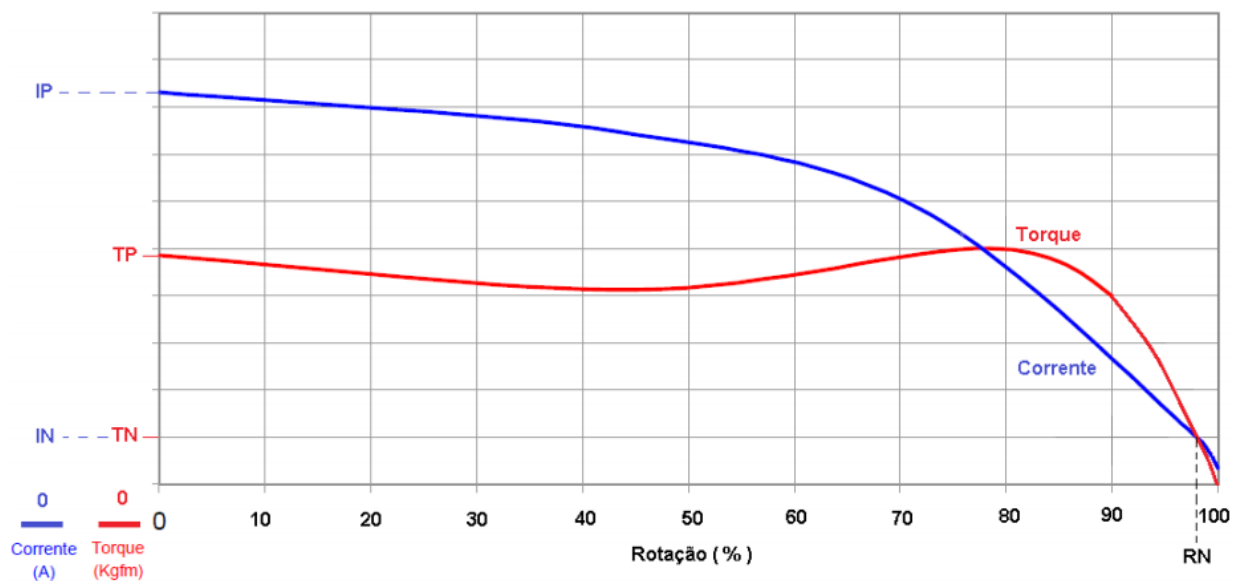
## 2.6 Corrente de partida (IP)

É mais comum encontrar motores com corrente de partida igual a 7 ou 8 vezes a corrente nominal. Este nível de corrente ocorre em um curto período de tempo, onde que ao acionar o motor, demanda de um torque maior para retira-lo do repouso.

Um dos momentos críticos é a partida de motores elétricos. Os motores solicitam muito mais corrente no momento da partida do que em regime contínuo, isto é chamado de pico de corrente de partida. O valor da corrente de partida ou de rotor bloqueado é dado de placa  $IP/IN$ , um valor comum de  $IP/IN$  é 8, isso significa que a corrente de partida para um motor de  $IP/IN = 8$  é de 8 vezes a corrente nominal e dependendo da carga esse valor de corrente pode permanecer por um tempo longo o suficiente para disparar dispositivos de proteção dos circuitos de comando (NASCIMENTO, 2015).

Na Figura 3 representa o comportamento da corrente e torque em função da rotação em %.

Figura 3 – Característica torque/corrente em função da velocidade



Fonte: (NASCIMENTO, 2015, p. 3).

Após esse estudo aprofundado sobre os motores de indução trifásicos, no próximo capítulo será realizada uma pesquisa referindo se aos métodos de partida de motores de indução trifásicos.

### 3 MÉTODOS DE PARTIDA DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

A seguir será apresentado 3 métodos de acionamento de motores de indução trifásico, estes serão utilizados na metodologia para estudo de qualidade de energia.

#### 3.1 Partida estrela-triângulo

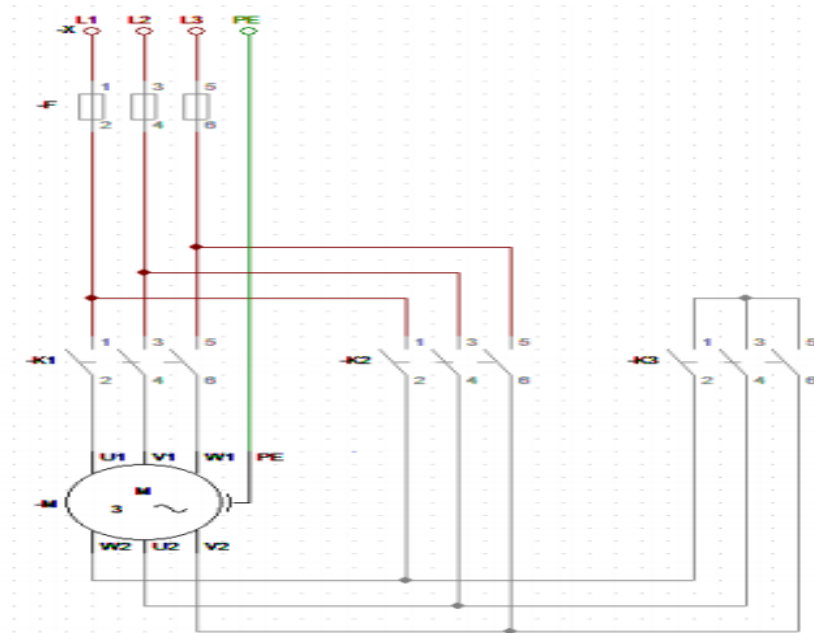
Devido à alta corrente de partida com o passar dos anos foi necessário desenvolver outros métodos e abortar a partida direta tão utilizada. As concessionárias de energia elétrica não permitem partidas diretas para motores de potência acima de 5 cv.

A partida estrela-triângulo vem com o intuito de diminuir em 33% ou  $1/3$  a corrente de partida do MIT. Esse tipo de partida é dividida em dois estágios, no primeiro inicialmente as bobinas do motor é fechada para receber o maior nível tensão de alimentação, após um tempo definido, até que o motor entre em regime permanente e estabilize a corrente elétrica, inicia-se o segundo estágio onde que as bobinas do motor são fechadas para tensão de alimentação da rede local ou menor tensão. Se torna possível utilizar esse tipo de partida através do tão conhecido comandos elétricos, onde realiza uma comutação automática feita por lógica. O que facilitou realizar esse tipo de acionamento foi devido aos fabricantes dos motores elétricos, deixarem os cabos dispostos na mufla do motor para que seus clientes realizem o fechamento do motor de acordo com sua necessidade. Outros aspectos que são vantajosos para utilização desse tipo de acionamento é o baixo custo em relação a outros tipos de acionamentos e o torque é  $1/3$  menor do valor nominal, conseqüentemente a partida é mais suave.

Resumidamente, a partida estrela triângulo trata-se de uma forma de energizar um motor trifásico com tensão menor para que ele saia da inércia (ligação do motor em estrela), portanto a corrente exigida para esse deslocamento não será tão grande quanto a corrente exigida para a partida direta. Assim que o motor atinge uma determinada velocidade, o circuito é alimentado com a tensão de funcionamento (ligação triângulo) e este passa a atingir o regime de funcionamento (MARTINHO, 2012, p. 46).

Na Figura 4 apresenta o diagrama de potência da partida estrela-triângulo, onde que a mesma possui dispositivos capazes de realizar a comutação com carga.

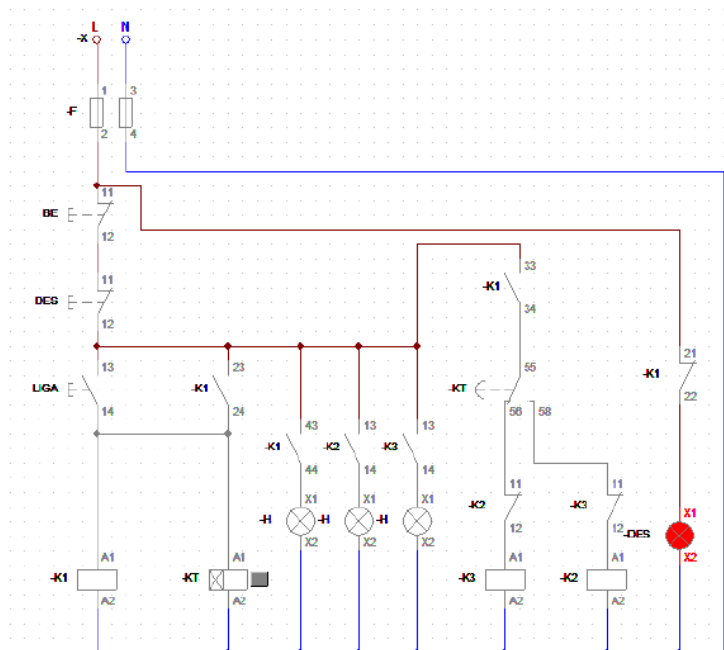
Figura 4 – Diagrama de potência da partida estrela-triângulo



Fonte: O autor.

Já na Figura 5 apresenta o diagrama de comando da partida estrela-triângulo, onde que na mesma possui a lógica mencionadas nos textos anteriores, capazes de atuarem sobre o circuito de potência.

Figura 5 – Diagrama de comando da partida estrela-triângulo

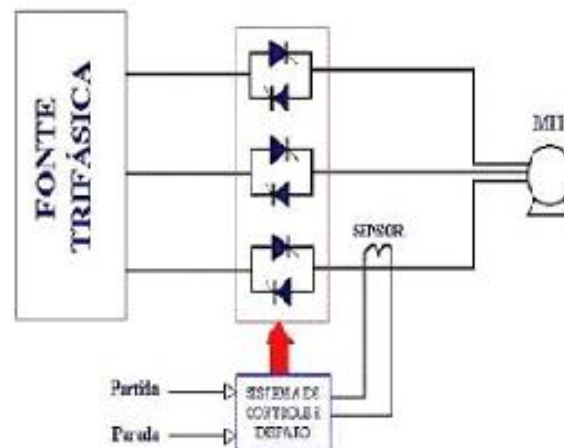


Fonte: O autor.

### 3.2 Partida com *Soft-Starter*

A *Soft-Starter* é um equipamento eletrônico que foi desenvolvido para realizar partidas suaves de motores, no seu interior é composta por pontes de SCR's (tiristores) que são controlados por meio de um circuito eletrônico, com o intuito de controlar a tensão de partida do motor, assim como sua desenergização. A partida com soft-starter é possível suavizar a corrente de partida, evitando picos de corrente elétrica. Para obter esta partida suave é necessário um torque de partida menor no MIT, assim para se obter isso é necessário realizar o controle da tensão aplicada e como consequência terá uma corrente menor. Além disso possui vantagens como paradas suaves e proteção do motor elétrico. Então as soft-starter vêm substituindo outros métodos de acionamentos como partida direta, partida estrela-triângulo, partida com chave compensadora. Na Figura 6 apresenta o esquema de ligação dos tiristores.

Figura 6 – Esquema soft-starter com tiristores para o acionamento do MIT.



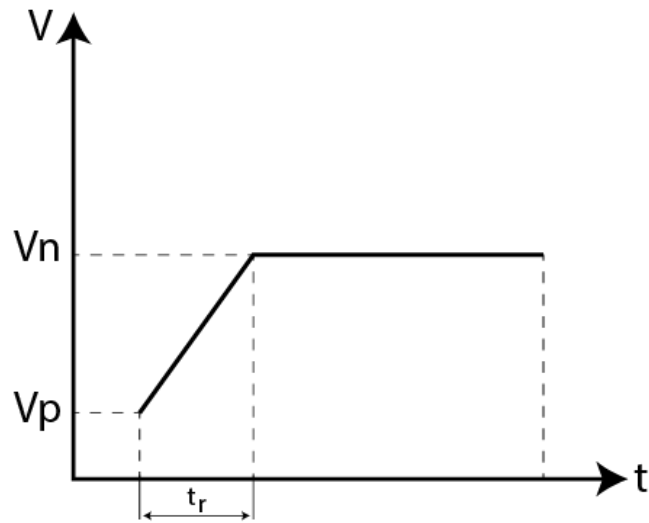
Fonte: (MORAES, 2017).

#### 3.2.1 Controle de energização e desenergização

Aplica-se um nível de tensão inicial nos SCR's que estão ligados em paralelos com sentido invertido, assim estes fazem com que a tensão seja defasada com um atraso de  $180^\circ$  durante um ciclo de meia onda, a partir disso os SCR's irão conduzir. O atraso é reduzido ao decorrer do tempo, então a tensão aumenta gradativamente até alcançar seu valor total. Na Figura 7 demonstra o gráfico da tampa de energização da soft-starter.



Figura 7 – representação da rampa de energização.



Fonte: (MORAES, 2017).

Onde,

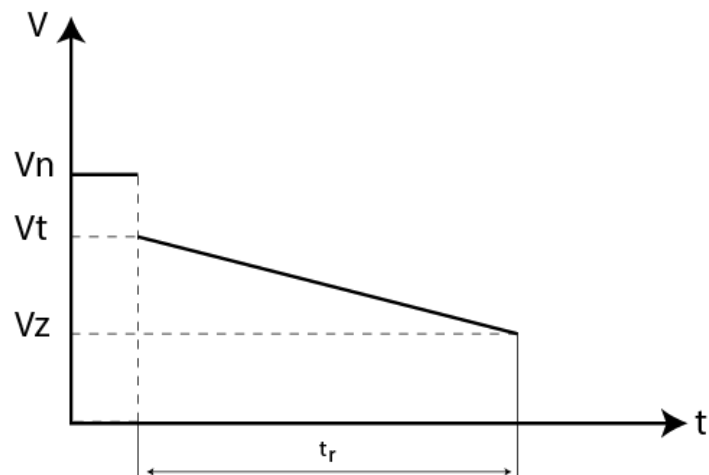
$v_n$  = tensão nominal.

$v_p$  = tensão de partida.

$t_r$  = tempo de rampa de energização.

Para controle de desenergização, utiliza-se o mesmo princípio do controle de energização, fazendo o controle do tempo de desenergização. Na Figura 8 apresenta o gráfico da rampa de desenergização.

Figura 8 – representação da rampa de desenergização.



Fonte: (MORAES, 2017).

Onde,  
 $v_n$  = tensão nominal.  
 $v_p$  = tensão de partida.  
 $t_r$  = tempo de rampa de desenergização.

### 3.3 Partida com inversor de frequência

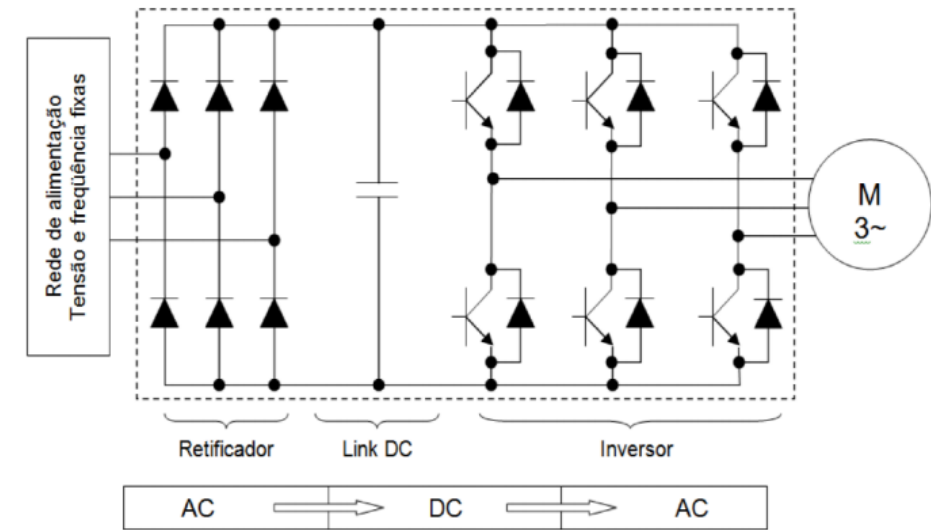
O inversor de frequência trabalha com a rede retificada, filtrada e aplicada a uma ponte de IGBT's, sendo chaveados com uma frequência de até 16kHz. Na saída possui uma frequência variável, que pode ser realizado o ajuste, já na entrada tem uma frequência constante e uma tensão alternada.

Os inversores de frequência foram criados não somente para partir os motores de gaiola, mas também para controlar a velocidade e o torque do motor. Os inversores entregam ao motor as 3 fases da rede com frequências e tensões variáveis, de acordo com a necessidade do processo ou com a necessidade do programador. Os inversores modernos, variam a frequência e calculam a tensão de forma a manter a corrente no motor constante e igual a corrente nominal do motor (NASCIMENTO, 2015).

O inversor de frequência realiza o controle de um motor por vez, entretanto não controla somente a partida do MIT, mais também pode variar sua velocidade de maneira que o torque permaneça constante. Este equipamento realiza o controle de aceleração e desaceleração, frenagem, frequências máximas e mínimas, trabalha como proteção contra falta de fase, fuga para terra e sobrecarga, faz a monitoração de corrente e tensão, além disso possui controle PID e sinais de 4 a 20ma e 0 a 10v, possuindo sinais analógicos e digitais, assim possibilitando comunicar com outros equipamentos e realizar diversos tipos de controles.

De acordo com Guedes (2015), o controle de chaveamento é realizado com uma ponte retificadora na entrada da alimentação trifásica. A tensão continua ligada aos terminais de saída pelos os tiristores, que funcionam no corte ou na saturação como uma chave estática. Os transistores trabalham como botão liga ou desliga, de forma que a onda de tensão de saída do conversor de frequência e sempre quadrada, para ter uma tensão de saída mais próxima da senoidal, os transistores é que modula a largura de pulso através de uma técnica chamada PWN. A Figura 9 demonstra o controle de chaveamento do inversor de frequência.

Figura 9 – Esquema de controle do chaveamento.



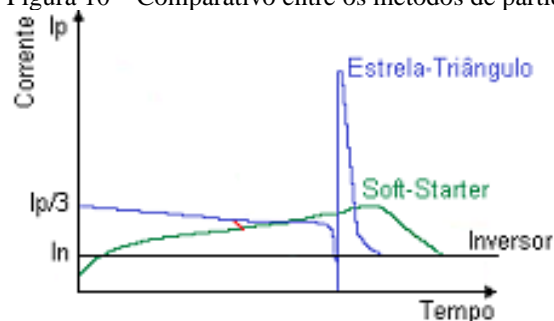
Fonte: (FRANCHI, 2014).

### 3.4 Comparação dos métodos de partida

O método de partida ideal para ser utilizado irá depender da aplicação, necessidade e da disponibilidade para investimento. Todos os métodos apresentados possuem vantagens e desvantagens, vale aos engenheiros que vão projetar as máquinas definir qual vai suprir suas necessidades.

A tradicional partida estrela-triângulo vem ficando para trás nas indústrias, isso porque elas demandam de mais espaços nos painéis, mais cabamentos e ainda possuem um certo pico na corrente de partida, comparando com as partidas dos inversores e soft-starter, ambos possuem partidas bem suaves. A Figura 10 demonstra o comparativo dos métodos de partida.

Figura 10 – Comparativo entre os métodos de partida.



Fonte: (NASCIMENTO, 2015, p. 7).

Diante aos estudos realizados, na próxima etapa será efetuado um estudo teórico sobre qualidade de energia e seus distúrbios.

## 4 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

No início do século XX e até algumas décadas atrás, as instalações elétricas existentes eram utilizadas, quase que exclusivamente para cargas de natureza linear, sendo cargas somente constituídas por elementos resistivos, indutivos e capacitivos, considerado impedâncias constantes. Essas cargas obedecem a lei de Ohm e tem como características drenar a rede elétrica com correntes proporcionais as tensões a ela aplicada, assim tendo a preservação da forma de onda com comportamentos compatíveis entre si, mesmo que há algum desfasamento com a utilização de capacitor e indutor o comportamento da onde será linear.

Entretanto, o desenvolvimento da eletrônica de potência, com o surgimento dos dispositivos semi-condutores e o aperfeiçoamento da família dos transistores de potência e dos tiristores, foram disponibilizados recursos técnicos capazes de promover o controle do estado operacional de vários tipos de carga como, por exemplo, a dimerização de sistemas de iluminação, o controle de velocidade de motores elétricos e o controle de temperatura em equipamentos eletrotérmicos. Intensificou-se, também, o uso de diversos sistemas envolvendo retificações (conversões estáticas CA - CC) e inversões (conversões estáticas CC - CA). Os circuitos dos equipamentos baseados em tiristores operam geralmente como controladores de condução (como um interruptor fechado) e bloqueio (como um interruptor aberto) em função da polaridade da tensão da rede, diversas aplicações utilizam-se dessa possibilidade para controlar os instantes de condução (através dos ajustes de “gatilhamento” no circuito de disparo dos tiristores) e promover a variação da tensão nas cargas. Isso resulta em uma tensão com forma de onda não senoidal (na carga), gerando-se uma corrente elétrica também não senoidal (ISONI, 2005).

O Termo “O conceito de Qualidade de Energia” está relacionado a um conjunto de alterações que podem ocorrer no sistema elétrico. Uma boa definição para o problema de qualidade de energia é: "Qualquer problema de energia manifestado na tensão, corrente ou nas variações de frequência que resulte em falha ou má operação de equipamentos de consumidores". Tais alterações podem ocorrer em várias partes do sistema de energia, seja nas instalações de consumidores ou no sistema supridor da concessionária (REZENDE, 2007, p. 3).

Existem alguns tipos de distúrbios que influencia na qualidade de energia elétrica. Os distúrbios que destacam são os transitórios impulsivos e oscilatórios, interrupções, variações na tensão de curta e longa duração, desequilíbrios de tensão, harmônicos, entre outros. Estes

distúrbios são acontecem devido às descargas atmosféricas, cargas não lineares e desequilibradas, partidas de motores, variações de cargas entre outros.

A PRODIST (Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional) no seu modulo 8, estabelece todos procedimentos relacionados ao uso da energia elétrica, caracteriza os fenômenos, estabelece os limites ou valores de referência, a metodologia de medição, a gestão das reclamações relativas à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão e os estudos específicos de qualidade da energia elétrica para fins de acesso aos sistemas de distribuição. Assim, a PRODIST tem o objetivo de tratar fenômenos de qualidade do produto em regime permanente ou transitório. (ANEEL, 2018). Em regime permanente são tratados pela PRODIST fenômenos como tensão em regime permanente, fator de potência, harmônicos, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão e variação de tensão. Já em regime transitório a norma regulamentadora trata os fenômenos relacionados a variação de tensão de curta duração (ANEEL, 2018).

#### **4.1 Distúrbios relacionados a qualidade de energia**

A seguir será apresentado um estudo em tópicos sobre os principais distúrbios relacionados a qualidade de energia, objetivando caracteriza-los, afim de aprimorar o entendimento sobre o assunto.

##### **4.1.1 Variação de tensão**

Variação de tensão é caracterizado como uma alteração do nível de tensão inicial que foi estabelecido como valor nominal, podendo variar para mais ou para menos. Essa variação pode ser ocasionada por diversas situações, como por exemplo o chaveamento de cargas de cargas de potência elevada, sendo que ao serem ligadas, demandem de uma energia muito grande da rede elétrica. A variação de tensão pode ser dividida em dois tipos de classes: a variação de tensão de curta duração e a variação de tensão de longa duração.

##### **4.1.2 Variação de tensão de curta duração**

Este tipo de distúrbio pode ser compreendido como variação da tensão em um curto período de duração que acontece entre 0,5 ciclo e um minuto, se houver reduções do valor

nominal da tensão durante 30 segundos a variação de tensão é caracterizada como sendo de curta duração.

Segundo Arruda (2003, p.11) as variações de tensão de curta duração podem ser caracterizadas por alterações instantâneas, momentâneas ou temporárias, dependendo da duração. Tais variações de tensão são, geralmente, causadas por condições de falta, energização de grandes cargas as quais requerem altas correntes de partida ou por intermitentes falhas nas conexões de cabos do sistema. Dependendo do local da falta e das condições do sistema, a falta pode causar tanto um afundamento de tensão temporário, como uma elevação de tensão, ou ainda uma interrupção completa do sistema elétrico.

A PRODIST (2021, p. 20), as variações de tensão de curta duração (VTCD) são desvios significativos na amplitude do valor eficaz da tensão durante um intervalo de tempo inferior a três minutos. Assim essas variações são classificadas de acordo com o Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação das variações de Tensão de Curta Duração

<b>Classificação</b>	<b>Denominação</b>	<b>Duração da Variação</b>	<b>Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência</b>
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 p.u
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Temporário de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior a 1,1 p.u

Fonte: (PRODIST, 2021, p. 20).

#### 4.1.3 Variação de tensão de longa duração

Este distúrbio é compreendido quando a variação de tensão acontece ao longo de um período superior a um minuto. Estes fenômenos são parecidos com as variações de curta

duração, mas o fator de se manterem no sistema elétrico por um tempo superior a três minutos são caracterizados como variações de longa duração.

#### 4.1.4 Desequilíbrio de tensão

O desequilíbrio de tensão pode ser considerado um fenômeno que tem como característica qualquer diferença nas amplitudes entre as três tensões de fase de um sistema trifásico, ou também na defasagem de  $120^\circ$  entre as fases do mesmo sistema. Na Equação 9 demonstra a expressão matemática para cálculo de desequilíbrio de tensão, fornecida pela PRODIST (2021, p. 16).

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} \times 100 \quad (9)$$

Onde,

$FD\%$  = Fator de desequilíbrio de tensão

$V_-$  = Magnitude da tensão eficaz de sequência negativa – frequência fundamental

$V_+$  = Magnitude da tensão eficaz de sequência positiva – frequência fundamental

Na Tabela 2, dada pela a PRODIST (2021, p. 17), fornece os limites para os desequilíbrios de tensão.

Tabela 2 – Limites para os desequilíbrios de tensão

Indicador	Tensão nominal	
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$
FD95%	3,0%	2,0%

Fonte: (PRODIST, 2021, p. 17).

#### 4.1.5 Surto de tensão ou *Spike*

Existem dois tipos de surtos, os diretos e indiretos. O surto direto ocorre quando a descarga atmosférica reflete na instalação ou em locais bem próximos a mesma, assim os elementos metálicos que existem ali passam por uma elevação de potência por frações de segundos, ocasionando circulação de corrente de surto por toda a instalação. Já o surto indireto ocorre quando as descargas atmosféricas alcançam as linhas de transmissão ou distribuição de energia, ou também por meio de indução da descarga em locais próximo a redes.

#### 4.1.6 Variação de frequência

Este distúrbio pode ser considerado como desvios no valor da frequência de um determinado sistema. Esta variação pode atingir de maneira agressiva equipamentos que possuem sensibilidade

Segundo a PRODIST (2021, p.19), o sistema de distribuição e as instalações de geração conectadas ao mesmo devem, em condições normais de operação e em regime permanente, operar dentro dos limites de frequência situados entre 59,9 Hz e 60,1 Hz.

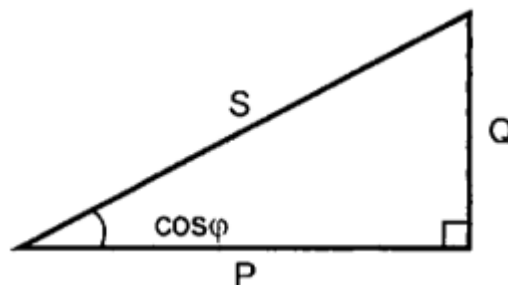
#### 4.1.7 Ruído

O ruído pode ser considerado como a distorção da tensão senoidal, que surge devido à alta frequência em MHz. Pode ser dividido em dois tipos, comuns e normais. Os ruídos comuns possuem a diferença de tensão entre os condutores neutro e terra. Entretanto os ruídos normais possuem diferença de tensão entre os condutores fase e neutro. Estes podem surgir de diversas fontes e atingirem os equipamentos de forma intensa. Também podem ser agravados pelo aterramento inadequado.

#### 4.1.8 Redução do fator de potência

O fator de potência é o ângulo de defasagem entre a potência ativa e a potência aparente no triângulo de potências conforme mostra a Figura 11.

Figura 11 – Triângulo de potências



Fonte: (MARTINHO, 2012, p. 12).

Onde,  
 S = Potência aparente (VA)  
 P = Potência ativa (W)



$Q$  = Potência reativa (VAR)

Potência aparente é definida como potência que é utilizada de uma fonte geradora de energia, Através da Equação 10 pode ser calculado a mesma, sendo que a soma vetorial da potência útil  $P$  (ativa) com a potência reativa ( $Q$ ).

$$S = \sqrt{(P^2 + Q^2)}, \text{ onde o ângulo } \phi = \text{tg}^{-1} (Q/P). \quad (10)$$

Onde,

$S$  = Potência aparente (VA)

$P$  = Potência ativa (W)

$Q$  = Potência reativa (VAR)

O fator de potência pode ser calculado referente aos valores das potências ativa e reativa ( $P$  e  $Q$ ) utilizando a Equação 11.

$$FP = \frac{P}{\sqrt{(P^2 + Q^2)}} \quad (11)$$

Onde,

FP = Fator de potência

$P$  = Potência ativa (W)

$Q$  = Potência reativa (VAR)

Assim podemos caracterizar que potência ativa é aquela utilizada para trabalho sendo representa pela letra  $P$  e sua unidade de medida é em *Watt*. Já a potência reativa é definida como a componente da potência aparente que não realiza trabalho.

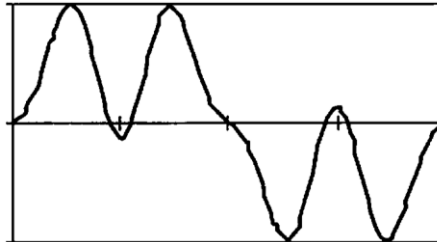
Existem alguns métodos para correção do fator de potência, como banco de capacitores que minimizam o reativo na rede.

Para unidade consumidora ou conexão entre distribuidoras com tensão inferior a 230 kV, o fator de potência no ponto de conexão deve estar compreendido entre 0,92 (noventa e dois centésimos) e 1,00 (um) indutivo ou 1,00 (um) e 0,92 (noventa e dois centésimos) capacitivo, de acordo com regulamentação vigente. (PRODIST, 2021, p. 13).

#### 4.1.9 Distorções Harmônicas

As distorções harmônicas é um fenômeno ligado a deformação das formas de onda das tensões e correntes em relação a onda senoidal e à frequência fundamental. Uma senoide possui uma frequência de 60 Hz, se ao analisar a mesma e obter formas de ondas distorcidas, a rede tem grande chance de possuir componentes harmônicas. As harmônicas são resultadas de cargas não lineares. A alteração na forma de onda é geralmente associada com a sucessiva quantidade de acionamentos que incluem inversores de frequência, fontes chaveadas e vários outros dispositivos eletrônicos. Na Figura 12, apresenta forma de onda distorcida.

Figura 12 – Deformação da senoide



Fonte: (MARTINHO, 2012, p. 79).

Expressão matemática para cálculo da frequência harmônica conforme a Equação 12.

$$f_h = (h) \times (f_{fundamental}) \quad (12)$$

Onde,

$f_h$  = Frequência da harmônica.

$h$  = Ordem harmônica.

$f_{fundamental}$  = Frequência fundamental da rede.

Os harmônicos podem ser considerados não temporários, constantes de natureza própria, diferente dos demais distúrbios citados nos tópicos anteriores. Com o grande crescimento e desenvolvimento das indústrias, a redução das distorções harmônicas se torna um fator necessário, já que seu aumento se deve a cargas não lineares, que são cargas que consomem corrente elétrica e distorcem a forma de onda da corrente e tensão.

Os harmônicos possuem sequência e ordem. São divididos em sequência positiva, sequência negativa e sequência zero. E são ordenadas de acordo com o múltiplo que dá origem a harmônica, sendo a harmônica fundamental de 60 Hz, a 2ª harmônica de 120 Hz e assim por diante, conforme o Quadro 1. Os harmônicos de sequência positiva são os de ordem 7ª, 13ª e

19<sup>a</sup>. Já as de sequência negativas são de ordem 5<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup> e 17<sup>a</sup> e tem como característica auxiliar o aumento do índice de Distorção Harmônica Total (THD) do sistema. E por fim as harmônicas de sequência zero são de ordem múltiplas de três, sendo 3<sup>a</sup>, 9<sup>a</sup> e 15<sup>a</sup>, tendo característica de circular pelo condutor neutro, podendo causar o superaquecimento do fio. Na Tabela 3 apresenta a frequência, sequência e ordem das harmônicas.

Tabela 3 – Ordem, frequência e sequência de harmônicas

Ordem	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>	8 <sup>a</sup>	9 <sup>a</sup>
Frequência (Hz)	60	120	180	240	300	360	420	480	540
Sequência	+	-	0	+	-	0	+	-	0

Fonte: (ANNUNCIACÃO, 2011, p. 51).

Geralmente nos sistemas elétricos, os harmônicos de ordem par são nulos, por consequência de os dispositivos atuarem de forma periódica e simétrica. A presença de indutância no sistema elétrico contribui para que os harmônicos de ordem elevada sejam suaves. Todo componente harmônico possui sua fase e o seu módulo. Na Tabela 4 apresenta as terminologias que são aplicadas para os cálculos de distorções harmônicas.

Tabela 4 – Terminologias para cálculos das distorções Harmônicas

<b>Identificação da Grandeza</b>	<b>Símbolo</b>
Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	DTI <sub>h</sub> %
Distorção harmônica total de tensão	DTT%
Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3	DTT <sub>P</sub> %
Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3	DTT <sub>i</sub> %
Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3	DTT <sub>3</sub> %
Tensão harmônica de ordem h	V <sub>h</sub>
Ordem harmônica	h
Ordem harmônica máxima	h <sub>máx</sub>
Ordem harmônica mínima	h <sub>min</sub>
Tensão fundamental medida	V <sub>1</sub>
Valor do indicador DTT% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	DTT 95%
Valor do indicador DTTP% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	DTT <sub>p</sub> 95%
Valor do indicador DTTI% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	DTT <sub>i</sub> 95%
Valor do indicador DTT3% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	DTT <sub>3</sub> 95%

Fonte: (PRODIST, 2021, p.14).

Logo abaixo será apresentado as expressões para os cálculos das grandezas  $DIT_h\%$ ,  $DTT\%$ ,  $DTT_p\%$ ,  $DTT_i\%$  e  $DTT_3\%$ .

Utilizando a Equação 13, pode-se obter o cálculo para distorção harmônica individual de tensão de ordem  $h$ .

$$DIT_h\% = \frac{v_h}{V_1} \times 100 \quad (13)$$

Onde,

$h$  = ordem harmônica individual.

Por meio da Equação 14, pode-se obter o cálculo para distorção harmônica total de tensão.

$$DTT_P\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (14)$$

Onde,

$h$  = todas as ordens harmônicas de 2 até  $h_{max}$ .

$h_{max}$  = conforme a classe A ou S.

Utilizando a Equação 15, pode-se obter o cálculo para distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3.

$$DTT_P\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_p} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (15)$$

Onde,

$h$  = todas as ordens harmônicas pares, não múltiplas de 3 ( $h = 2, 4, 8, 10, 14, 16, 20\dots$ )

$h_p$  = máxima ordem harmônica par, não múltipla de 3.

Por meio da Equação 16, pode-se obter o cálculo para distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3.

$$DTT_i\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{h_i} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (16)$$

Onde,

$h$  = todas as ordens harmônicas ímpares, não múltiplas de 3 ( $h = 5, 7, 11, 13, 17, 19\dots$ )

$h_i$  = máxima ordem harmônica ímpar, não múltipla de 3.

Utilizando a Equação 17, pode-se obter o cálculo para a distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3.

$$DTT_3\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{hp} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (17)$$

Onde,

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

$hp$  = máxima ordem harmônica múltipla de 3.

Todas essas equações obtidas foram extraídas da PRODIST no seu modulo 8, ambas são de extrema importância. A partir delas se estabelece os limites para distorções harmônicas totais em relação a fundamental. Segundo a PRODIST (2021, p.16), os limites correspondem ao máximo valor desejável a ser observado no sistema de distribuição. No caso de medições realizadas utilizando-se TP's com conexão do tipo V ou delta aberto, os limites permitidos para o indicador  $DTT_{395\%}$  deverão corresponder a 50% dos respectivos valores indicados na Tabela 5.

Tabela 5 – Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental)

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
$DTT_{95\%}$	10%	8%	5%
$DTT_{P95\%}$	2,5%	2%	1%
$DTT_{I95\%}$	7,5%	6%	4%
$DTT_{395\%}$	6,5%	5%	3%

Fonte: (PRODIST, 2021, p. 15).

As distorções harmônicas são eventos constantes e estacionários, tendo origem quando sua fonte estiver em trabalho, a menos que sejam tomadas medidas para sua eliminação. As harmônicas de ordem ímpar são mais incomuns em redes trifásicas.

A sigla mais comum para representação das harmônicas é a THD (Distorção Harmônica Total), utilizada para distorções de corrente e tensão, sendo expressada e dada em percentual, e pode ser calculada através da expressão matemática representada na Equação 18.

$$DTH\% = \frac{\sqrt{\text{Somatório dos quadrados de todas as amplitudes das harmônicas presentes}}}{\text{Amplitude da onda fundamental}} \times 100 \quad (18)$$

Para se obter as distorções harmônicas individuais ou totais que estão presentes em um determinado sistema elétrico é necessário determinar os valores individual de cada componente ou elemento harmônico, assim realizando as medições que são exigidas, sendo consideradas essenciais.

Diante aos distúrbios estudados, faz se necessário uma pesquisa aprofundada sobre meios para que possa extinguir esses distúrbios causados na rede elétrica.

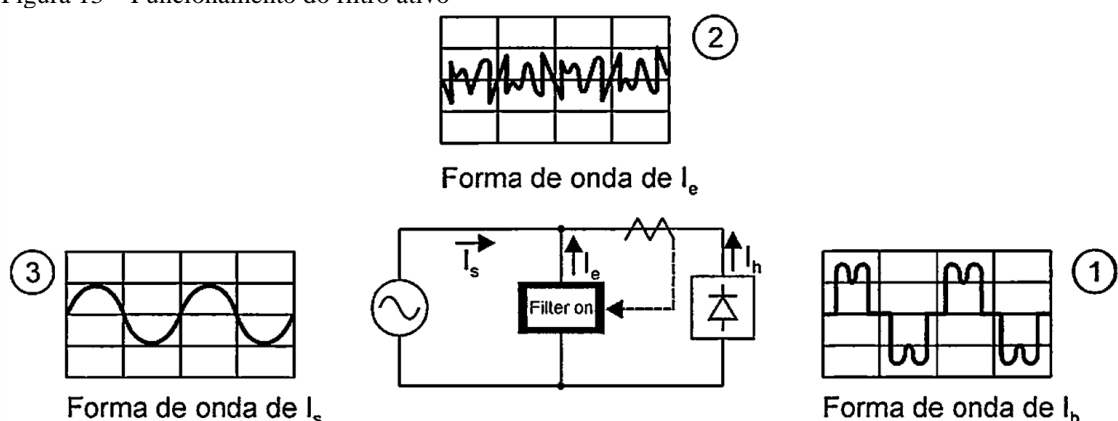
## 5 FILTROS

Normalmente em locais que possui a presença de correntes e tensões harmônicas, a utilização de filtros é uma das soluções para o problema presente, afim de diminuir ou sanar os efeitos das distorções harmônicas. Portanto este método possui um custo elevado, o que leva a procurar novas maneiras de resolver o problema referente a qualidade de energia, desenvolvendo estudos ou equipamentos para solução do problema. Os filtros podem ser separados como ativos, passivos e híbridos.

### 5.1 Filtros ativos

Os filtros ativos utilizam a tecnologia IGBT (transistores de alta velocidade com porta isolada). Este tipo de filtro tem como função injetar na rede elétrica uma forma de onda que seja o oposto da forma de onda harmônica presente ali, ou seja há uma anulação dos sinais de frequências diferentes da onda fundamental, obtendo o sinal de 60Hz. Esse modelo de filtro utiliza-se para eliminação de harmônicas de até a 51ª ordem, sendo na frequência de até  $60 \times 51 = 3060\text{Hz}$ . Na Figura 13 apresenta o funcionamento dos filtros ativos, interpreta se que este modelo de filtro utiliza a energia do circuito para obter a onda contraria, que irá corrigir e eliminar as distorções harmônicas existentes.

Figura 13 – Funcionamento do filtro ativo

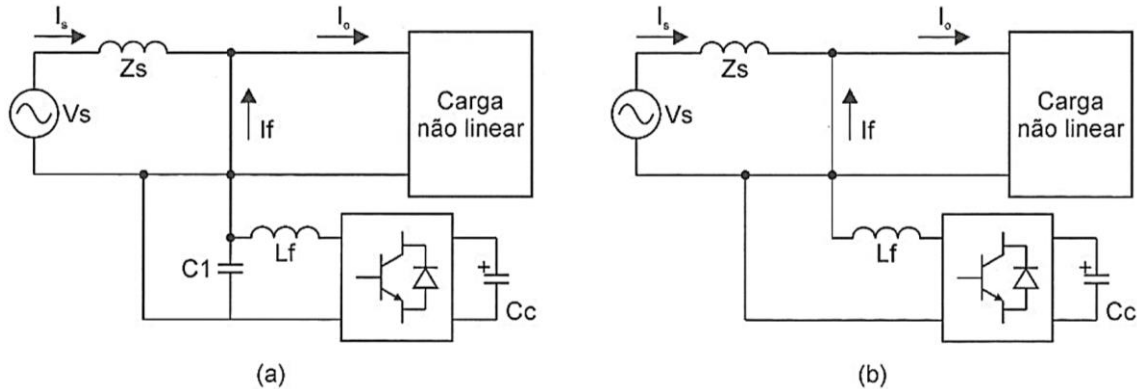


Fonte: (MARTINHO, 2012, p. 118).

Conforme mostra a Figura 13, os filtros ativos trabalham em três estágios. O primeiro estágio apresenta as medições de harmônicas de corrente encontrada na rede, geradas pela carga. Já no segundo estágio demonstra a aplicação da corrente contraria a corrente harmônica. Já no último estágio representa a forma de onda obtida após a utilização do filtro.

Segundo MARTINHO (2012, p 118), os filtros ativos podem ser classificados de várias maneiras, ou seja, a classificação dos filtros pode ser por meio do nível de potência, técnicas de controle ou sistema elétrico (trifásico ou monofásico, 3 ou 4 fios), dentro deste último critério e os mais comuns aplicados no mercado os filtros podem se dividir em paralelos, série e híbridos. A Figura 14 representa o esquema elétrico do filtro ativo.

Figura 14 – Esquema do filtro ativo



Fonte: (MARTINHO, 2012, p. 118).

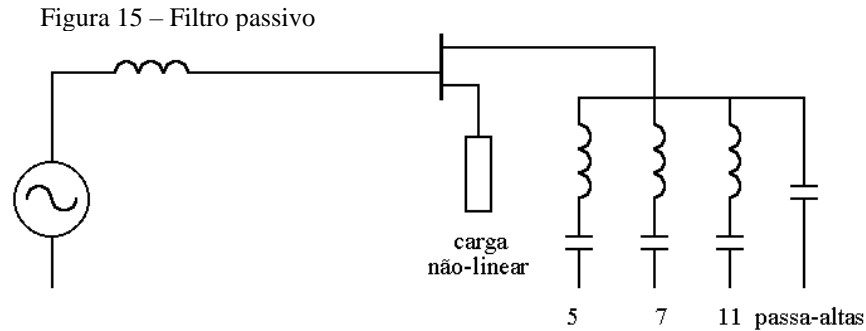
Conforme apresentado na Figura 14, o circuito (a) realiza o monitoramento da tensão de entrada e a corrente da carga, já no circuito (b) tanto a corrente como a tensão de entrada estão sendo monitoradas.

Diferente dos sistemas passivos, os filtros ativos são independentes dos parâmetros da rede, exceto pela tensão, pois vão alimentar os circuitos eletrônicos de controle. O filtro ativo é um sistema totalmente dinâmico que acompanha a variação do sistema. Por ser um sistema praticamente on-line, qualquer alteração da característica da rede é avaliada momentos antes de gerar a forma de onda a ser injetada na rede para a correção (MARTINHO, 2012, p. 119).

## 5.2 Filtros passivos

O filtro passivo é um dispositivo que pode ser sincronizado na sua construção até uma faixa de frequência limite, o que permitirá passar por ele. Esses dispositivos podem ser formados por um conjunto de capacitância, resistência e indutância. Em geral esse tipo de filtro é configurado para uma ordem de harmônica próxima da ordem que deseja eliminar. Pode considerar diversas formas de ligação dos filtros, isso depende do nível de distorção harmônica que pretende extinguir. Na Figura 15 demonstra um exemplo de ligação do filtro passivo.



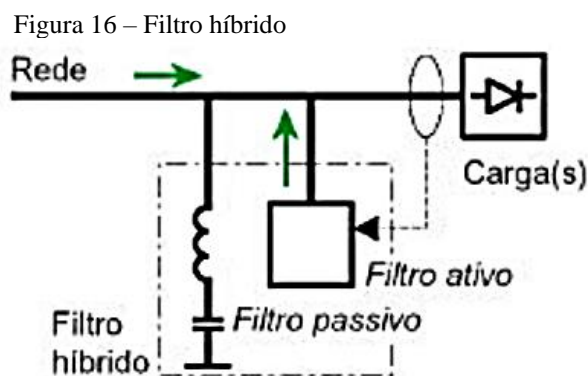


Fonte: (SCHNEIDER, 2010, p. 18).

De acordo com MARTINHO (2012), o filtro passivo, seja para qualquer aplicação, é um sistema inteiramente dependente das características do circuito a que está ligado, sendo assim, depende da corrente, da tensão, da frequência, da impedância da rede. Por essa causa aplicar um filtro passivo exige um estudo aprofundado do sistema de maneira que não sofra alterações ao longo de sua vida útil, possibilitando que suas funções sejam minimizadas, ou eliminadas.

### 5.3 Filtros híbridos

O filtro híbrido é composto por uma associação entre os filtros ativos e passivos, sendo ligados juntos na mesma carga. Esse esquema de ligação é considerado como uma nova solução, permitindo o aumento da eficiência na filtragem, envolvendo um amplo controle de potência. A Figura 16 demonstra o circuito elétrico que representa a ligação de um filtro híbrido na rede.



Fonte: (SCHNEIDER, 2003, p. 17).

Como apresentado na Figura 16, este tipo de filtro híbrido permite a operação de cada filtro de maneira independente.

Após o estudo sobre os filtros, a próxima etapa inicia-se a metodologia do sistema proposto neste trabalho acadêmico.

## 6 METODOLOGIA

Essa metodologia vem com intuito de comprovar e fazer uma análise comparativa, objetivando apontar qual método de partida de motor causa menos distúrbios em relação a qualidade de energia na rede elétrica. A partir disso, o objetivo é realizar os testes em uma indústria, onde que será instalado o analisador de qualidade de energia no barramento de potência de partida de motores de 75CV, ambos com carga. Serão realizadas análises em *partida estrela-triângulo*, partida com *soft-starter* e partida com *inversor de frequência*. Esses motores são responsáveis por realizar transporte pneumático de ração, das extrusoras até secadores. O transporte pneumático é um tipo de equipamento muito utilizado para transporte de grãos dentro da indústria, consiste em uma rede de tubulação que é interligada entre as máquinas onde se deseja fazer o transporte do produto, no mesmo possuem um motor acoplado com um exaustor, onde se tem um fluxo grande de ar, que realiza o deslocamento do produto. O estudo será feito em uma indústria de rações situada no distrito industrial da cidade de Três corações – MG. Diante dos dados analisados durante a pesquisa, conduzira para resolução ou amenização dos distúrbios referente a qualidade de energia.

### 6.1 Estudo laboratorial

Iniciando com os estudos laboratoriais, será realizado o acionamento dos três tipos de partidas mencionados anteriormente, lembrando que ambos métodos já estão prontos para medição, pois são utilizados diariamente na indústria onde será realizado as análises.

Equipamentos que serão utilizados para realizar os experimentos:

- a) Motor de indução trifásico de 75cv;
- b) Inversor de frequência 150cv;
- c) Soft-starter 150cv;
- d) Contatores de potência;
- e) Analisador de qualidade de energia.

Logo abaixo será apresentado os dados de placa dos motores que irão ser utilizados para estudo, conforme a Tabela 6. Em todos métodos de partida serão utilizadas o mesmo modelo de motor, com potência e rotação iguais.

Tabela 6 – Parâmetros do motor

Parâmetros do Motor	
Modelo	225S/M
Potência	75cv
Polos	2 polos
Tensão Y/ $\Delta$	380/660V
Frequência rede	60Hz
Corrente Nominal Y/ $\Delta$	100/57,4A
Velocidade Nominal	3565 rpm
Corrente de partida	8.2 vezes
Fator de potência	0,89
Rendimento	94,2
Bobinas	3 bobinas/ 6 terminais

Fonte: O autor.

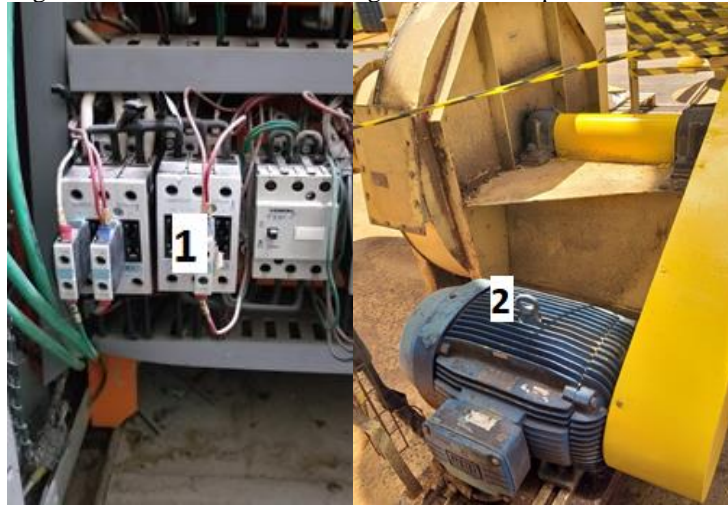
A partir dos dados dos motores que foi apresentado na Tabela 6, logo a seguir será apresentado as instalações dos métodos de partidas e motores que serão utilizados para realizar a análise de qualidade de energia.

No momento de acionamento do motor elétrico de indução trifásico é demandado da rede de alimentação uma corrente de partida bastante elevada, tendo média de 6 a 9 vezes a corrente nominal do motor. A partir desse fator é necessário a escolha do método mais eficiente, para que não possa ocorrer eventos que prejudique o funcionamento do motor e da rede elétrica.

Para realizar a análise de qualidade de energia no momento de partida do motor, será utilizado o analisador Fluke 435. Esse analisador ficará instalado em paralelo ao método de partida, onde que partir dos dados obtidos será feito a comparação dos mesmos.

Na Figura 17 apresenta o painel elétrico onde será instalado o analisador de qualidade de energia. O mesmo se refere a partida estrela-triângulo, possuindo os contadores de potência sendo alimentados pelo disjuntor motor. O analisador será instalado nos terminais de saída do disjuntor motor, afim de obter os resultados antes do método, para observar o comportamento de rede elétrica.

Figura 17 – Partida estrela – triângulo e motor respectivamente.



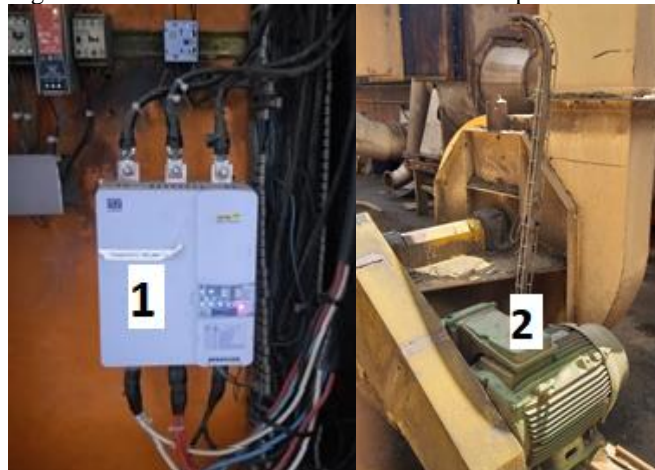
Fonte: O autor.

Itens apresentados na Figura 17:

1. Contatores de potência modelo Siemens: Na partida estrela-triângulo utiliza-se 3 contatores para realizar a comutação;
2. Motor elétrico de indução trifásico acoplado ao exaustor do transporte pneumático.

Após a realização desta etapa será feita a análise de qualidade de energia em uma partida com soft-starter. Conforme apresenta a Figura 18, nessa soft-starter será instalado os TC's para medição nos terminais entrada de energia do equipamento. Esse método como já mencionado faz com que o motor tenha uma partida suave, sem picos de corrente elétrica. Após a medição serão realizadas as primeiras comparações, com a partida estrela-triângulo, obtendo os principais distúrbios de ambos métodos.

Figura 18 – Partida com soft-starter e motor respectivamente.



Fonte: O autor.

Itens apresentados na Figura 18:

1. Soft-starter/Modelo: WEG SSW7;
2. Motor elétrico de indução trifásico acoplado ao exaustor do transporte pneumático.

Na Figura 19 apresenta o inversor de frequência e o motor elétrico que serão utilizados para análises, os TC's de medição será instalado nos terminais de entrada do inversor, assim será feita as medições, e por fim obtendo os resultados dos principais distúrbios que o inversor de frequência causa a rede elétrica no momento de partida do motor elétrico.

Figura 19 – Partida com inversor de frequência e motor respectivamente.



Fonte: O autor.

Itens apresentados na Figura 19:

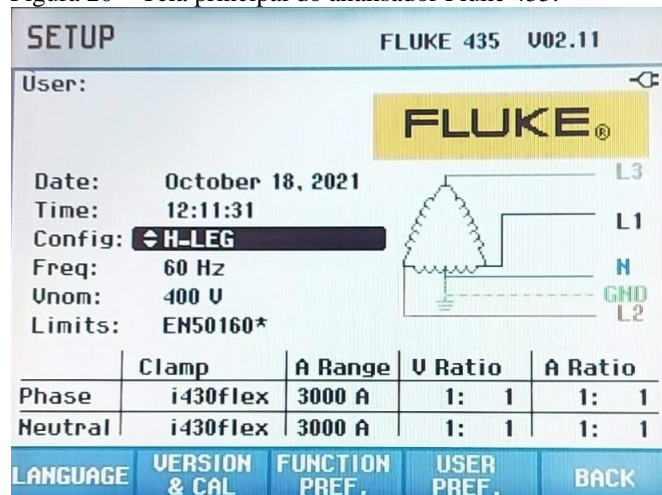
1. Inversor de frequência/Modelo: Allen-Bradley PowerFlex 755;
2. Motor elétrico de indução trifásico acoplado ao exaustor do transporte pneumático.

### 6.1.2 Analisador de qualidade de energia

O analisador de qualidade de energia é um dispositivo que vem com o intuito de realizar a medição do fluxo de energia e potência de um determinado sistema. Essas medições podem ser em corrente alternada (CA) e também em corrente contínua (CC). Este dispositivo pode realizar medições de corrente e tensão da rede, emitindo relatórios dos resultados obtidos. O analisador possui memória de armazenamento, realiza medições por longos períodos sendo armazenadas na memória e também realiza as medições em tempo real.

Neste estudo estará utilizando o analisador de qualidade de energia Fluke 435. Dispositivo que possui um diferencial de ter uma ampla memória para armazenamento. Na Figura 20 apresenta o menu principal do dispositivo, com as configurações básicas utilizadas para medição dos métodos citados anteriormente.

Figura 20 – Tela principal do analisador Fluke 435.



Fonte: O autor.

A seguir será citados as principais funções do analisador Fluke 435:

- Contabilização de energia;
- Avaliação de energia;
- Estudos de cargas;
- Possui apresentação de tabelas e eventos em formas de onda;
- Calculadora de perda de energia;
- Medição de desequilíbrio, tensão, corrente, frequência, potência, harmônicas, transientes.

## 6.2 Resultados dos estudos e análises laboratoriais

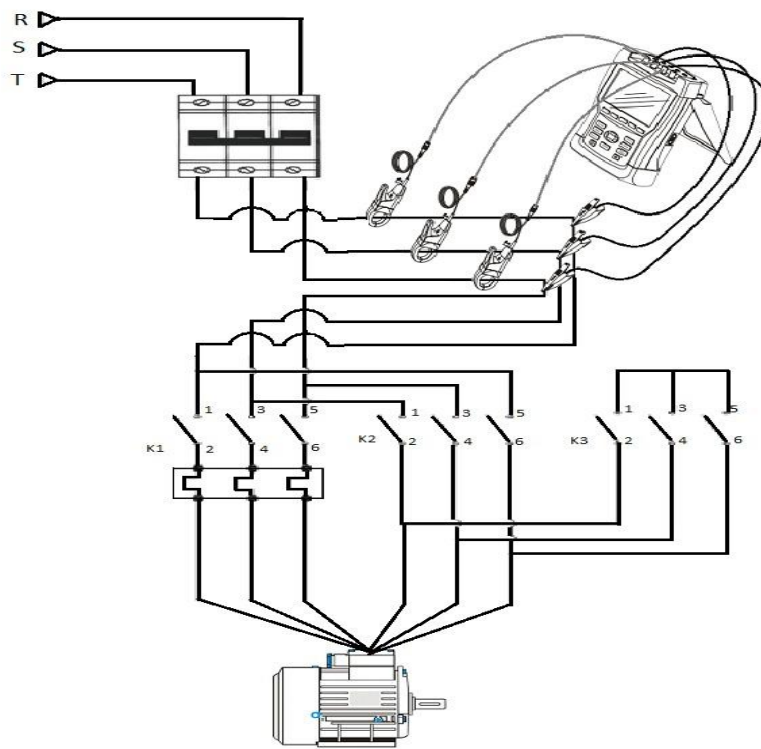
A partir desse tópico será apresentado os resultados das análises feitas, demonstrando os principais distúrbios encontrados no momento do acionamento do motor trifásico. Entre os distúrbios que serão citados, o que ganhará maior destaque será as distorções harmônicas de tensão e corrente. As harmônicas de corrente podem ser caracterizadas como correntes em frequências múltiplas da fundamental. Realizando o somatório destas com frequência fundamental, obtém-se o resultado de uma distorção harmônica, podendo chamar de harmônica de corrente. Se esta distorção harmônica tiver uma interação com a impedância da linha, obtém-

se uma distorção harmônica de tensão. Além desse distúrbio, será apresentado resultados referentes a desequilíbrio de tensão, variação de tensão, corrente e frequência.

### 6.2.1 Partida estrela-triângulo

Iniciando as análises, foi instalado o analisador Fluke 435 na partida estrela-triângulo. Seus transformadores de corrente (TC) foram instalados logo após o disjuntor de proteção do método, afim de avaliar e estudar o comportamento da rede ao acionar o motor elétrico trifásico. Na Figura 21 apresenta o diagrama de ligação do circuito com o analisador de qualidade de energia.

Figura 21 – Diagrama de ligação do analisador Fluke 435 na partida estrela-triângulo.



Fonte: O autor.

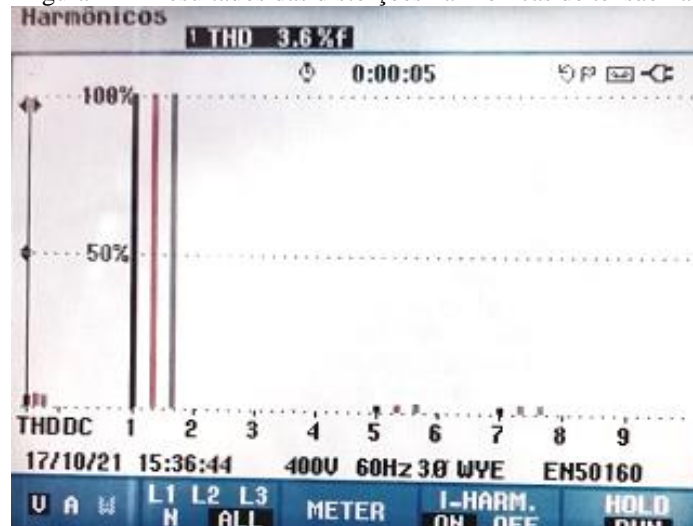
Ao iniciar as medições foram feitas as primeiras análises de distorções harmônicas. De acordo com a PRODIST no seu modulo 8, se a tensão nominal for menor ou igual a 1kV, o limite máximo de distorções harmônicas totais permitido é 10%, conforme a Tabela 5.

Obtendo as análises do ensaio, no método de partida estrela-triângulo as distorções harmônicas de tensão (THD) nas fases L1, L2 e L3, na partida, foram de 3,6% obedecendo os



limites da norma. Conforme apresentado na Figura 22 os resultados da medição de THD de tensão.

Figura 22 – Resultados das distorções harmônicas de tensão na partida estrela-triângulo.



Fonte: O autor.

Lembrando que o tempo de partida do motor com o fechamento estrela é de 10 segundos. Após a comutação o motor trabalha com o fechamento triângulo.

As distorções harmônicas de corrente nas fases L1, L2 e L3, durante o acionamento do motor elétrico trifásico foi de 4,3% conforme apresentado na Figura 23.

Figura 23 – Resultados das distorções harmônicas de corrente na partida estrela-triângulo.



Fonte: O autor.

Na Tabela 02 apresentou os limites para o desequilíbrio de tensão, para as análises, considerando a tensão nominal menor ou igual a 1kV, o limite para o desequilíbrio é de 3%. Conforme demonstra a Figura 24, o desequilíbrio individual das fases, sendo L1 224,2V, L2



223,7V e L3 224,4V, possuindo um desequilíbrio de 0,2%, comprovando estar dentro dos limites estabelecidos pela Prodist no seu módulo 8.

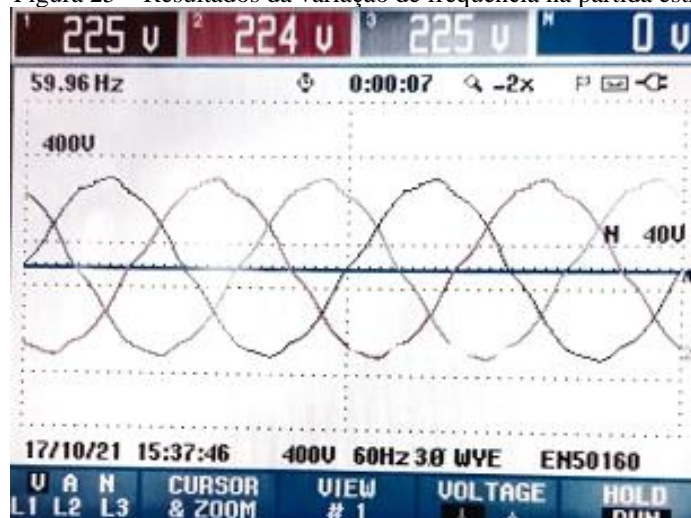
Figura 24 – Resultados do desequilíbrio de tensão na partida estrela-triângulo.

Desequilíbrio				
	Uneg.		Aneg.	
Unbal.(%)	L1	L2	L3	N
	0.2	0.0	1.2	0.8
Vfund	224.2	223.7	224.4	0.0
Hz	59.961			

Fonte: O autor.

De acordo com a PRODIST no seu módulo 8, em regime permanente a frequência deve operar entre 59,9 Hz e 60,1 Hz. Quando há a ocorrência de algum distúrbio a geração deve garantir entre 59,5 Hz e 60,5 Hz, num intervalo de tempo de 30 segundos, para recuperação do equilíbrio. Conforme a Figura 25, a frequência durante a partida utilizando o método estrela-triângulo permaneceu dentro dos limites, apresentando valor de frequência de 59,96 Hz.

Figura 25 – Resultados da variação de frequência na partida estrela-triângulo.



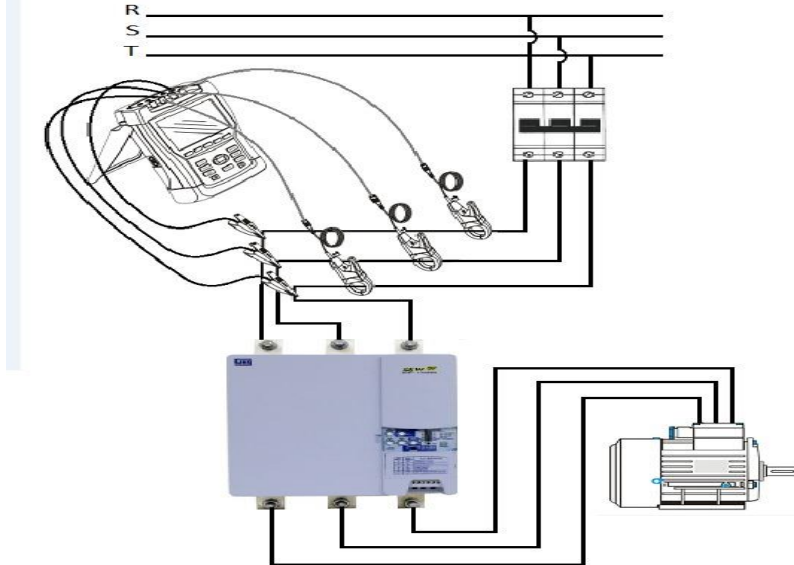
Fonte: O autor.

Em relação ao desequilíbrio de tensão, na Figura 25 também apresenta a onda senoidal, demonstrando um efetivo equilíbrio na defasagem das ondas.

### 6.2.2 Partida com Soft-Starter

Nesse segundo método o acionamento do motor de 75CV é feito através da Soft-Starter modelo SSW7, como já mencionado anteriormente. A ligação do analisador Fluke 435 também é realizado na entrada do método. O tempo de partida/aceleração do motor que está configurado na Soft-Starter é de 20 segundos. A Figura 26 apresenta o diagrama de potência com as ligações da Soft-Starter e do Analisador de qualidade de energia Fluke 435.

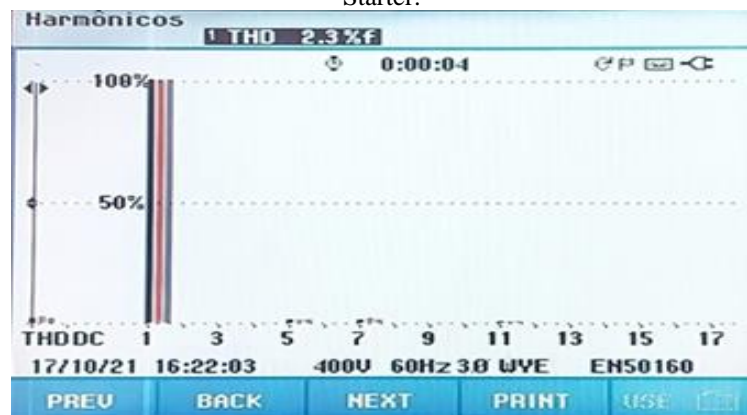
Figura 26 – Diagrama de ligação do analisador Fluke 435 na partida com Soft-Starter.



Fonte: O autor.

Ao iniciar as análises, os primeiros ensaios são referentes as distorções harmônicas. Na Figura 27 apresenta os resultados das distorções harmônicas de tensão nas fases L1, L2 e L3 respectivamente, obtendo uma THD de 2,3% ficando dentro dos limites estabelecidos pela Prodist como já mencionado, sendo 10%.

Figura 27 – Resultados das distorções harmônicas de tensão na partida utilizando Soft-Starter.

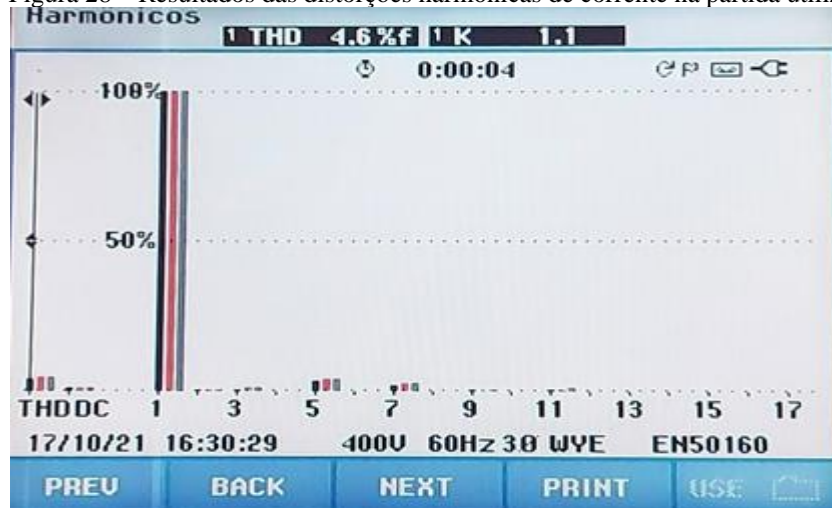


Fonte: O autor.

O valor obtido de harmônica de tensão na partida utilizando a Soft-Starter foi 1,3% menor do que na partida estrela-triângulo que foi de 3,6%.

Na Figura 28 apresenta o gráfico com os níveis de distorção harmônica de corrente nas fases L1, L2 e L3 respectivamente, obtendo um valor de 4,6%, ficando dentro dos valores aceitáveis pela norma.

Figura 28 – Resultados das distorções harmônicas de corrente na partida utilizando Soft-Starter.



Fonte: O autor.

Esse resultado obtido na partida utilizando Soft-Starter é 0,3% maior do que na partida estrela-triângulo que foi de 4,3%.

Na Figura 29 apresenta os resultados obtidos em relação a desequilíbrio de tensão no método com Soft-Starter, ambos resultados referentes as fases L1 226,4V, L2 226,8V e L3 226V, apresentando um valor de desequilíbrio de 0,2%, ambos resultados estão dentro dos valores estabelecidos pela norma que é de 3%.

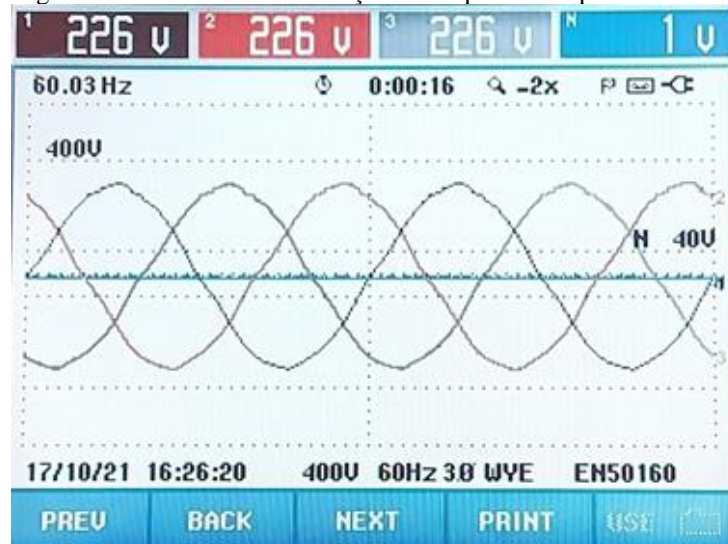
Figura 29 – Resultados do desequilíbrio de tensão na partida utilizando Soft-Starter

Desequilíbrio				
	Uneg.	Uzero	Rneg.	
Unbal.(%)	0.2	0.0	4.6	0.4
	L1	L2	L3	N
Vfund	226.4	226.8	226.0	0.0
Hz	60.068			

Fonte: O autor.

Na Figura 30 apresenta o valor da frequência no momento de partida do motor elétrico. O valor apresentado é de 60,03 Hz, ficando dentro dos valores estabelecidos pela Prodist. Neste gráfico também demonstra a onda senoidal balanceada e defasadas, além dos valores de tensão das 3 fases em equilíbrio.

Figura 30 – Resultados da variação de frequência na partida utilizando Soft-Starter.



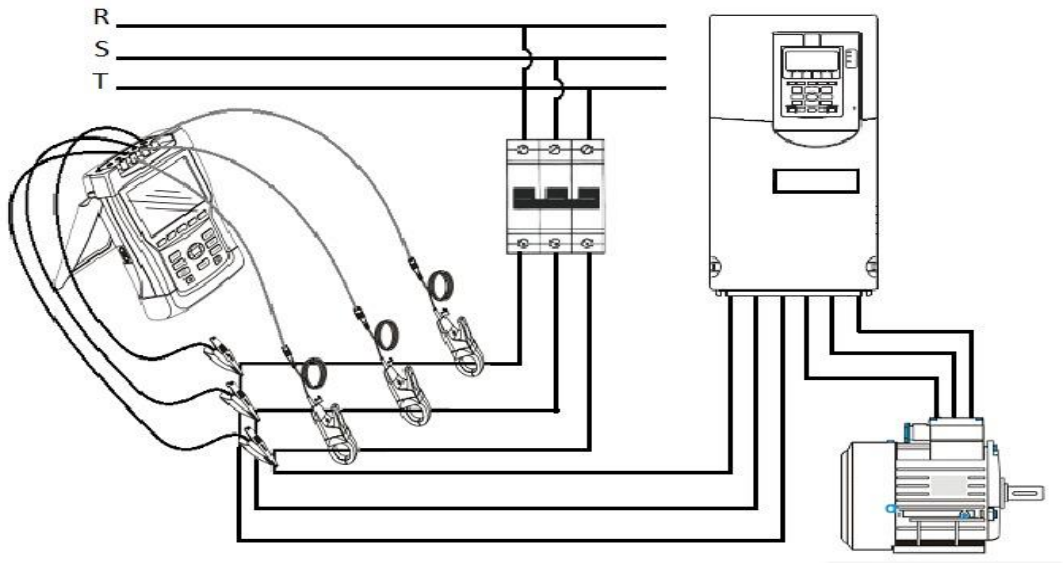
Fonte: O autor.

A partir dos métodos apresentados até neste tópico, pode perceber que as medições até o momento apresentaram um efetivo equilíbrio, comparando a partida estrela-triângulo e a partida utilizando Soft-Starter. Os dados apresentados em todos gráficos estão dentro dos valores estabelecidos pela Prodist no seu módulo 8.

### 6.2.3 Partida com Inversor de frequência

O último método a ser apresentado é a partida utilizando o inversor de frequência. Na Figura 31 apresenta o circuito para acionamento do motor elétrico, junto com o analisador de qualidade de energia Fluke 435 instalado na entrada do inversor de frequência. Neste método o tempo de partida/aceleração programado no inversor é de 20 segundos. As análises durante o acionamento do MIT necessitam ficar dentro do tempo de aceleração. Para esse estudo, como já mencionado, utilizou um inversor de frequência da marca Allen Brandley, modelo Power Flex 755 de 150CV, para o acionamento do MIT de 75 CV.

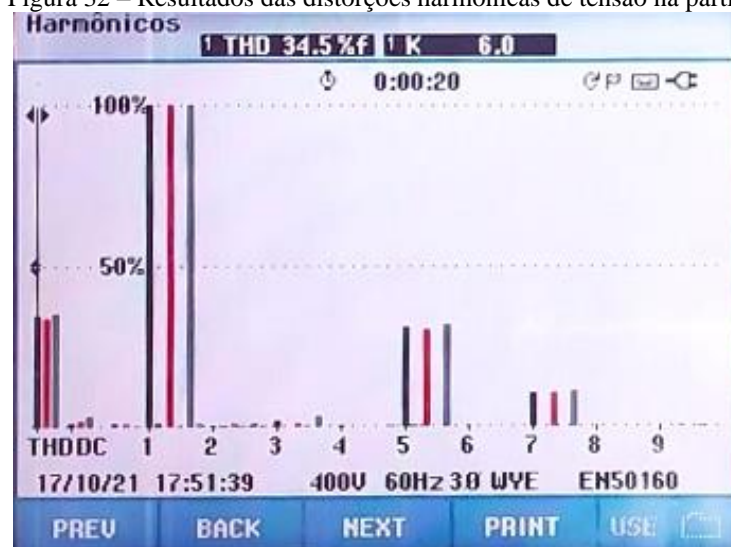
Figura 31 – Diagrama de Ligação do analisador Fluke 435 na partida utilizando inversor de frequência.



Fonte: O autor.

Realizando as medições com esse método, observa-se no gráfico valores significativos de harmônicas de tensão e corrente, ambas de 5ª e 7ª ordem, apresentando um valor de 34,5% tanto na partida como também em regime permanente. A Figura 32 apresenta os valores de THD durante o acionamento do motor elétrico.

Figura 32 – Resultados das distorções harmônicas de tensão na partida utilizando Inversor.



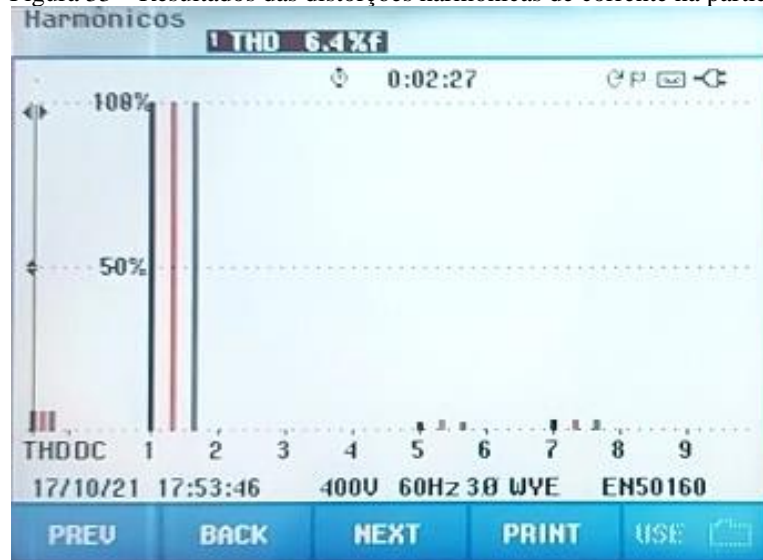
Fonte: O autor.

Lembrando que o valor máximo de THD que a Prodinst permite para o nível de tensão adotado nesses métodos é de 10%. O valor obtido é 30,9% maior que o valor extraído da partida estrela-triângulo e 32,2% maior do valor obtido na partida utilizando Soft-Starter.



Na Figura 33 apresenta o gráfico com os valores de harmônica de corrente obtidos na partida e em regime permanente.

Figura 33 – Resultados das distorções harmônicas de corrente na partida utilizando Inversor.



Fonte: O autor.

As distorções harmônicas de corrente na partida utilizando inversor foram 2,1% maior comparando com a partida estrela-triângulo e 1,8% maior comparando com a partida utilizando Soft-Starter.

Na Figura 34 apresenta a variação de frequência de 59,97Hz, ficando dentro dos padrões estabelecido. O desequilíbrio e variação de tensão nas fases L1 224,1V, L2 223,7V e L3 224,2V, tendo 0,1% de desequilíbrio de tensão negativa, estando dentro dos valores recomendados pela Prodist.

Figura 34 – Resultados do desequilíbrio de tensão e variação de frequência na partida utilizando inversor.

Desequilíbrio				
	Uneg.		Aneg.	
Unbal.(%)	0.1	0.0	210	227
	L1	L2	L3	N
Vfund	224.1	223.7	224.2	0.0
Hz	59.976			

Fonte: O autor.

O motor sendo partido pelo inversor de frequência tem a capacidade de injetar na rede elétrica um nível elevado de harmônicas, que superam os valores recomendados pela norma. Isso acontece pelo motivo do inversor possuir retificadores em sua composição, gerando

harmônicas com características similares na rede elétrica. O Inversor possui na sua construção um filtro, desenvolvido para trabalhar como regulador da tensão retificada, sendo conectados a uma ponte retificadora e uma ponte de transistores, assim realizam a inversão da tensão com as frequências.

#### 6.2.4 Comparação dos resultados

Neste tópico será apresentado conforme a Tabela 7 os resultados obtidos após as análises referentes a qualidade de energia durante o acionamento de motores elétricos de indução trifásicos, comparando os métodos Estrela-triângulo, Soft-Starter e Inversor de frequência. Os principais distúrbios que serão comparados são as distorções harmônicas, desequilíbrio e variação de tensão, variação de frequência.

Tabela 7 – Comparação dos resultados obtidos após as análises.

<b>Método</b>	<b>Harmônicas de Tensão (10%)</b>	<b>Harmônicas de corrente (10%)</b>	<b>Desequilíbrio de tensão (média) (3%)</b>	<b>Variação de frequência (59.5Hz a 60,5 Hz)</b>
<b>Estrela-Triângulo</b>	3,6%	4,3%	224,1 V (0.2%)	59,96
<b>Soft-Starter</b>	2,3%	4,6%	226,4 V (0.2%)	60,03 Hz
<b>Inversor de frequência</b>	34,5%	6,4%	224 V (0.1%)	59,97 Hz

Fonte: O autor.

Entre os métodos analisados o único distúrbio que apresentou valores fora do especificado pela Prodlist no seu módulo 8 é a distorção harmônica de tensão, apresentando valor de quase 3,5 vezes maior do que é especificado na norma, que é 10%.

### 6.3 Viabilidade de custo para implementação dos métodos

As indústrias atualmente estão buscando aderir equipamentos mais econômicos e que tragam benefícios para as mesmas. Diante dos estudos realizados é preciso expor os valores dos equipamentos e analisar a viabilidade de custo para que empregue algum dos métodos apresentados. Na Tabela 8 apresenta o valor médio dos métodos utilizados nesta pesquisa.

Tabela 8 – Custo médio dos equipamentos para utilização dos métodos de partida.

<b>Método</b>	<b>Modelo</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Potência</b>	<b>Custo</b>
Estrela-Triângulo	Siemens 100 cv	1	100cv	R\$2.400,00
Soft-Starter	SSW7 150cv - WEG	1	150cv	R\$8.000,00
Inversor de Frequência	PowerFlex 755 150cv – Allen Bradley	1	150cv	R\$25.000,00

Fonte: O autor.

É perceptível que o uso do método estrela-triângulo é mais econômico, comparado com os métodos utilizando soft-starter e inversor de frequência. A adoção do método depende de quanto a indústria está disposta a investir e para qual tipo de máquina o método será empregado. Atualmente a maioria das indústrias, quando adotam novos maquinários optam por utilizar o inversor de frequência, por ser o equipamento mais completo do que os demais, possui diversas funcionalidades, além de ter o controle de velocidade.



## 7 CONCLUSÃO

A presente pesquisa apresentou resultados englobando três métodos de acionamento do motor de indução trifásico, sendo partida estrela-triângulo, soft-starter e inversor de frequência, afim de obter e comprovar qual desses métodos, causa menos distúrbios em relação a qualidade de energia na rede elétrica do local, onde ambos estarão sendo utilizados. As análises foram realizadas no momento em que a indústria estava sem produção, com os demais maquinários parados, para que não houvesse interferência de outros equipamentos na medição, afim de obter resultados precisos para uma efetiva conclusão. Na rede elétrica onde os motores foram acionados com os respectivos métodos mencionados, não apresentou muitos distúrbios no momento do acionamento.

Os principais distúrbios apresentados e analisados foram as distorções harmônicas, desequilíbrio de tensão e variação de frequência. Nos métodos estrela-triângulo e soft-starter não apresentou nenhum distúrbio em relação aos mencionados, ambos apontaram valores que estão dentro dos limites referenciados pela Prodist no modulo 8. Já na partida utilizando o inversor de frequência, no momento do acionamento do motor de indução trifásico, apresentou valores elevados somente de harmônicas de tensão, resultando em 34,5%, sendo que a norma permite no máximo 10%. Na Tabela 7 evidenciou os resultados obtidos nas análises, junto com os valores limites estabelecidos, afim de obter uma melhor comparação dos resultados.

A partida utilizando o inversor de frequência em comparação com os demais métodos, vem sendo mais utilizadas nas indústrias, por ser um dispositivo com múltiplas funções, por isso, muitas das vezes o inversor é a única opção para as indústrias, pois ele é um dispositivo completo, sendo que a partida estrela-triângulo e soft-starter não supri determinadas características dos inversores de frequência. Mas realizando uma análise comparativa referente a está pesquisa, o inversor causou maior distúrbio harmônico em relação as demais métodos de partidas, e por isso se a indústria resolver adota-lo, em grande quantidade para acionar seus motores, é necessário instalar filtros para que possa gerenciar sua qualidade de energia elétrica.

Diante dos fatos obtidos e citados, referente a está pesquisa, pode-se concluir que os melhores métodos para partir motores de indução trifásicos, em relação a qualidade de energia durante o acionamento, é a partida estrela-triângulo e a partida eletrônica utilizando soft-starter, pois seus distúrbios ficaram dentro dos limites e possuem uma melhor viabilidade econômica.

## **7.1 Ponto de continuidade da pesquisa**

Após todas análises realizadas e finalização das pesquisas, este trabalho fica em aberto para pesquisas futuras, a fim de aprofundar em mais distúrbios em relação a qualidade de energia no momento de partida do motor elétrico de indução trifásico, que não foram abordados e analisados nesta pesquisa, sugere-se realizar análises também abordando fator de potência, flutuação de tensão, afundamento de tensão e outros demais distúrbios que são possíveis realizar medições. Principal motivo de não ter sido possível tratar de todos distúrbios foi devido ao tema de qualidade de energia possuir muitos distúrbios e soluções para os mesmos, tendo um conteúdo extenso para diversas análises.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**. Módulo 8: Qualidade de Energia Elétrica. Brasília, DF: 2021. Disponível em: < [https://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo\\_8-Revis%C3%A3o\\_12/342ff02a-8eab-2480-a135-e31ed2d7db47](https://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo_8-Revis%C3%A3o_12/342ff02a-8eab-2480-a135-e31ed2d7db47) >. Acesso em: 12 mar. 2021.

ANNUNCIACÃO, Luiz de. **Estudo do impacto do sistema de acionamento de um motor de indução trifásico na eficiência energética e na qualidade da energia elétrica**: Um estudo de caso – elevador de canecas. Cuiabá, 2011. 124 f. Dissertação (Pós-graduação) – Universidade Federal do Mato Grosso (UFMT). Disponível em: < [https://www.researchgate.net/publication/282809875\\_Estudo\\_do\\_impacto\\_do\\_sistema\\_de\\_acionamento\\_de\\_um\\_motor\\_de\\_inducao\\_trifasico\\_na\\_eficiencia\\_energetica\\_e\\_qualidade\\_da\\_energia\\_eletrica\\_Um\\_estudo\\_de\\_caso\\_-\\_Elevador\\_de\\_canecas](https://www.researchgate.net/publication/282809875_Estudo_do_impacto_do_sistema_de_acionamento_de_um_motor_de_inducao_trifasico_na_eficiencia_energetica_e_qualidade_da_energia_eletrica_Um_estudo_de_caso_-_Elevador_de_canecas) >. Acesso em: 22 out. 2021.

ARRUDA, Élcio Franklin de. **Análise de distúrbios relacionados com a qualidade de energia elétrica utilizando a transformada de Wavelet**. Escola de engenharia de São Carlos, da universidade de São Paulo. Disponível em: < <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18133/tde-25102007-090916/publico/DissertacaoElcioFarruda.pdf> >. Acesso em: 27 mai. 2021.

CHAMPMAN, Stephen J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. Motores de Indução. Cap. 6, p. 307-394. 5. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2013.

CASTRO, Professor. **Motor de indução trifásico MIT**. Disponível em: < <http://www.ifba.edu.br/PROFESSORES/castro/MIT.pdf> >. Acesso em: 18 mai. 2021.

FIGUEIRA, Leonardo Sampaio. **Desenvolvimento de um gerador de sinal trifásico para aplicações didáticas**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, Campus Vitória da Conquista. Disponível em: < [https://physika.info/site/documents/PFC-Fabiano\(2016\).pdf](https://physika.info/site/documents/PFC-Fabiano(2016).pdf) >. Acesso em: 5 mai. 2021.

FRANCHI, Claiton Moro. **Acionamentos Elétricos**. 5.ed. São Paulo-SP: Érica, 2014.

GALORI, Kleiton Santos. **Inversor de frequência com acionamento de motor**. Centro Universitário UNIFAFIBE de Bebedouro, SP. Disponível em: < <https://www.unifafibe.com.br/revistasonline/arquivos/revistaeletrica/sumario/69/06022019140003.pdf> >. Acesso em: 10 mai. 2021.

HENRIQUE, Hélio. **Motores Trifásicos de CA**. Mossoró, 2007. 67 f. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN). Disponível em: < <http://docente.ifrn.edu.br/heliopinheiro/Disciplinas/maquinas-acionamentos-eletricos/apostila-de-motores-trifasicos-de-ca/view> >. Acesso em: 28 mar. 2021.

ISONI, Marcos. **A moderna Eficientização energética e seus possíveis efeitos sobre o desempenho operacional de equipamentos e instalações elétricas**: distorções harmônicas – uma revisão de conceitos gerais, 2005. Disponível em: < [http://www.engeparc.com.br/cariboost\\_files/4-Harmonicas.pdf](http://www.engeparc.com.br/cariboost_files/4-Harmonicas.pdf) >. Acesso em 10 abr. 2021.

KOSOW, Irving L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. Máquinas de Indução Polifásicas (Assíncronas). Cap. 9, p. 294-345. 15. ed. São Paulo: Globo, 2005.

MORAES, Everton. **Soft-Starter**. Disponível em: < <https://www.saladaeletrica.com.br/o-que-e-um-soft-starter/> >. Acesso em: 17 mai. 2021.

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

NEVES, Ana Bárbara Fernandes. **Análise dos efeitos do desequilíbrio e da distorção harmônica de tensão no conjugado e no rendimento de um motor de indução trifásico**. Distrito Federal, 2014. 174 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília (UnB). Publicação PPGEE.DM – 579/2014. Disponível em: < <http://repositorio.unb.br/handle/10482/17461> >. Acesso em: 02 abr. 2021.

NASCIMENTO, Adilson. **Comandos Elétricos**. Apostila, Cap. 1. 45 f. Valinhos, 2015. Disponível em: < <http://www.seaan.com.br/cursos/comandos-eletricos-basico/apostila/> >. Acesso em: 18 abr. 2021.

OLIVEIRA, Stanley César de. **Influência de Harmônicos no Fator de Potência**. Itatiba, 2011. 67 f. Dissertação (Graduação) – Universidade de São Francisco (USF). Disponível em: < <http://lyceumonline.usf.edu.br/salavirtual/documentos/2092.pdf> >. Acesso em: 29 abr. 2021.

REZENDE, Paulo Henrique Oliveira; SAMESIMA, Milton Itsuo. **Efeitos do Desequilíbrio de Tensões de Suprimentos nos Motores de Indução Trifásico**. Uberlândia, 2007. 30 f. Dissertação (Graduação) – Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Disponível em: < <http://www.seer.ufu.br/index.php/horizontecientifico/article/viewFile/4473/11857> >. Acesso em: 15 mai. 2021.

SCHNEIDER, Eletric. **Qualidade de Energia: Harmônicas**. São Paulo: Apostila Workshop Instalações Elétricas de Baixa Tensão, Edição março, 2003. Disponível em: < <https://www.schneider-electric.com.br/documents/cadernos-tecnicos/harmon.pdf> >. Acesso em: 27 jun. 2021.