



---

ANDERSON LUIZ AGUIAR VILAÇA

**SISTEMAS ELETRÔNICOS DE PARTIDAS DE MOTORES  
ELÉTRICOS E SEUS EFEITOS SOBRE A QUALIDADE DA  
ENERGIA ELÉTRICA**

---

Uberlândia  
2022

ANDERSON LUIZ AGUIAR VILAÇA

**SISTEMAS ELETRÔNICOS DE PARTIDAS DE MOTORES  
ELÉTRICOS E SEUS EFEITOS SOBRE A QUALIDADE DA  
ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Faculdade Pitágoras, como requisito parcial para a  
obtenção do título de graduado em Engenharia Elétrica.

Orientador: Patrich Magro

ANDERSON LUIZ AGUIAR VILAÇA

**SISTEMAS ELETRÔNICOS DE PARTIDAS DE MOTORES  
ELÉTRICOS E SEUS EFEITOS SOBRE A QUALIDADE DA ENERGIA  
ELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Faculdade Pitágoras, como requisito parcial  
para a obtenção do título de graduado em  
Engenharia Elétrica.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof(a). Titulação Nome do Professor(a)

---

Prof(a). Titulação Nome do Professor(a)

---

Prof(a). Titulação Nome do Professor(a)

Uberlândia, dia de dezembro de 2022

Dedico este trabalho a minha amada Letícia pelo apoio, compreensão, amor, dedicação e incentivo a mim dispensados, essenciais para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço ao nosso bom Deus que, por meio de seus maravilhosos dons e eterna graça, capacitou-me a realizar este trabalho.

Aos meus pais, Edvar e Geralda, que estiveram sempre ao meu lado dando todo apoio e abrindo mão de desejos próprios para concretização desse sonho.

Aos meus irmãos que acompanharam de perto todo o processo de elaboração, apoiando e fazendo companhia nos momentos mais difíceis.

Ao meu amigo, Alexandre de Oliveira, que me incentivou a trilhar esse caminho e quando necessário me apoiou.

Ao coordenadores de curso Maxwell, Marcelo e Mauro.

Ao meu orientador, Patrich Magro (tutor online), por toda dedicação e disponibilidade em atender aos chamados.

VILAÇA, Anderson Luiz Aguiar. **SISTEMAS ELETRÔNICOS DE PARTIDAS DE MOTORES ELÉTRICOS E SEUS EFEITOS SOBRE A QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA**. 2022. 32p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade Pitágoras, Uberlândia, 2022.

## **RESUMO**

Visto que a partida de motores de indução trifásicos pode ter efeitos indesejáveis sobre a rede elétrica, o desenvolvimento deste trabalho acadêmico teve como objetivo estudar, através de uma pesquisa bibliográfica, os tipos e principais características dos métodos de acionamento de motores de indução e seus efeitos sobre a qualidade do suprimento elétrico. Os métodos de partida estudados e comparados são a partida direta, 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 uma qualidade de energia elétrica ruim na rede pode influenciar em diversos aspectos econômicos. Foram descritos os principais distúrbios associados a qualidade do suprimento elétrico e como os métodos de partida podem influenciar nestes distúrbios.

**Palavras-chave:** Motores trifásicos. Métodos de partida de motores. Qualidade da energia elétrica.

VILAÇA, Anderson Luiz Aguiar. **ELECTRONIC STARTING SYSTEMS FOR ELECTRIC MOTORS AND THEIR EFFECTS ON THE QUALITY OF ELECTRIC POWER**. 2022. 32p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade Pitágoras, Uberlândia, 2022.

## **ABSTRACT**

Since the start of three-phase induction motors can have undesirable effects on the electrical network, the development of this academic work aimed to study, through a bibliographical research, the types and main characteristics of the methods of activating induction motors and their effects. on the quality of the electrical supply. The starting methods studied and compared are direct starting, electronic starting using soft-starter and starting with frequency inverter. These studies become necessary because industries and electrical machines are experiencing great growth and development in today's society, and a bad quality of electrical energy in the network can influence several economic aspects. The main disturbances associated with the quality of the electrical supply were described and how the starting methods can influence these disturbances.

**Keywords:** Three-phase motors. Motor starting methods. Electric power quality.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b> – Tensões senoidais e bobinas defasadas de $120^\circ$ .....	16
<b>Figura 2</b> – Campo girante no estator em diferentes instantes (a), (b) e (c). .....	17
<b>Figura 3</b> – Componentes internos de um motor de indução .....	18
<b>Figura 4</b> – Comportamento para a corrente e o torque de um motor em função da rotação .....	19
<b>Figura 5</b> – Diagrama de força da partida direta .....	22
<b>Figura 6</b> – Controle de fases de um motor trifásico utilizando uma soft-starter .....	24
<b>Figura 7</b> – Diagrama de blocos simplificados da soft-starter .....	25
<b>Figura 8</b> – Comportamento para a corrente e o torque de um motor em função da rotação .....	26
<b>Figura 9</b> – Diagrama ilustrativo dos componentes do inversor de frequência .....	27
<b>Figura 10</b> – Modulação por Largura de Pulso (PWM) .....	28
<b>Figura 11</b> – Distúrbios da qualidade de energia elétrica.....	30



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> – Modulação por Largura de Pulso
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
VTCD	Variações de tensão de curta duração
VTLD	Variações de tensão de longa duração

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2. MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO .....</b>	<b>15</b>
<b>3. ACIONAMENTO DE MOTORES .....</b>	<b>21</b>
3.1 PARTIDA DIRETA .....	22
3.2 ACIONAMENTO ELETRÔNICO COM SOFT-STARTER .....	23
3.3 ACIONAMENTO ELETRÔNICO COM INVERSOR DE FREQUÊNCIA .....	27
<b>4. QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA.....</b>	<b>29</b>
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>32</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>33</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O sistema elétrico brasileiro tem como uma de suas principais cargas, o motor elétrico. De acordo com dados que foram apresentados no Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021, 35% da energia elétrica produzida no Brasil é consumida pela classe industrial e que 90% das aplicações industriais fazem o uso deste importante componente, sendo que, significativa parcela da energia consumida pelo setor industrial é utilizada no acionamento dos motores de indução trifásicos. Esta é uma máquina que tem por função a transformação da energia elétrica em energia mecânica. Na indústria, esses motores são aplicados em diferentes tarefas, sendo acoplados aos mais variados tipos de equipamentos, e com o decorrer dos anos, principalmente devido a questão de eficiência energética, foi necessário o desenvolvimento de maneiras mais sofisticadas para o seu acionamento. Sendo assim, surgiram as partidas eletrônicas de motores de indução trifásicos, e tendo como exemplos: soft-starter e inversores de frequência.

Por outro lado, o uso de sistemas eletrônicos para o acionamento de motores de indução trifásicos podem gerar problemas associados a qualidade do suprimento de energia elétrica. Até meados da década de 80, a questão da Qualidade da Energia Elétrica não era considerada tão relevante, por duas questões principais: a primeira delas era porque a maior parte dos usuários não necessitava de um suprimento de energia de alta qualidade, já que os processos e equipamentos não eram tão sensíveis aos distúrbios relacionados com a qualidade. A segunda estava relacionada questão da forma como as empresas brasileiras de eletricidade operavam. Existia um regime de monopólio de tarifas baseado no custo de serviço, significando que todo aumento ou redução de custos não significava em aumento ou redução dos lucros, respectivamente.

Porém, nos últimos 30 anos, houve preocupação cada vez mais acentuada com os fatores relacionados à Qualidade da Energia Elétrica, doravante denominada de QEE. Isto deveu-se, em parte, a grande quantidade de equipamentos e processos sensíveis, decorrentes, principalmente, da aplicação em larga escala da eletrônica de potência nos controles e processos automatizados, e que podem ser afetados por problemas de QEE. A busca por sistemas mais eficientes e processos mais produtivos, faz com que estes equipamentos se apresentem para o sistema elétrico

como cargas do tipo não linear. O conceito de QEE, está relacionado a uma série de fatores que podem afetar e/ou comprometer o suprimento elétrico oferecido aos consumidores. Normalmente, estes distúrbios, quando se manifestam, originam-se e/ou se fazem presentes em diferentes pontos da rede elétrica. A ocorrência destas anomalias pode ser de natureza local, ou seja, uma perturbação que ocorre dentro da instalação do consumidor, ou de natureza externa ou remota. Assim, qualquer desvio que possa ocorrer na magnitude, forma de onda ou frequência da tensão e/ou corrente elétrica caracteriza uma rede elétrica com a qualidade comprometida. Destaque deve ser dado à tensão de suprimento, a qual, idealmente, deveria ser perfeitamente senoidal, equilibrada, e com amplitude e frequência constantes.

Diante do exposto acima, este trabalho apresentará uma introdução teórica sobre os principais sistemas eletrônicos de acionamento para os motores de indução trifásicos, por acreditar que o tema está em constante avanço tecnológico e merece destaque dentro do atual sistema energético brasileiro, e também, abordar quais são os problemas de QEE associados a esses sistemas de partida. Portanto, deseja-se obter aqui, um documento que auxilie os acadêmicos na compreensão sobre os principais sistemas de acionamentos de motores de indução trifásicos, em especial os sistemas eletrônicos, bem como os eventuais efeitos destes sobre a Qualidade da Energia Elétrica.

O tipo de pesquisa realizado neste trabalho foi uma Revisão de Literatura, onde foram pesquisados livros, dissertações e artigos científicos selecionados através de buscas nas bases disponíveis na biblioteca da faculdade Pitágoras, envolvendo os livros impressos, livros nos repositórios virtuais e também pesquisas na internet que envolvem: artigos publicados, dissertações de mestrado, teses de doutorado e publicações de revistas indexadas da área. O período dos itens pesquisados foram os publicados nos últimos “40” anos, pois os livros utilizados pelos profissionais da área não tem sofrido muitas mudanças. As palavras-chave utilizadas nas buscas foram: “máquinas elétricas”, “acionamento de motores”, “chaves eletrônicas de acionamento”, “máquinas elétricas rotativas” e “qualidade da energia elétrica”.

## 2. MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

Segundo Boldea (1996), existem 3 tipos de máquinas elétricas, no mercado: Máquinas de corrente contínua (CC), Máquinas de corrente alternada (CA), e Máquinas Universais (CA e CC). A simples presença da corrente elétrica, seja contínua ou alternada, garante movimento em um eixo, que pode ser aproveitado de diversas maneiras, dependendo da aplicação do motor. De acordo com Chapman (2013), nas máquinas de CA, um ímã ou eletroímã gira a partir de um campo magnético, produzido por bobinas onde a corrente é alternada. Nas máquinas de corrente contínua (CC), os sentidos dos elétrons são direcionados em único sentido, do polo negativo para o polo positivo).

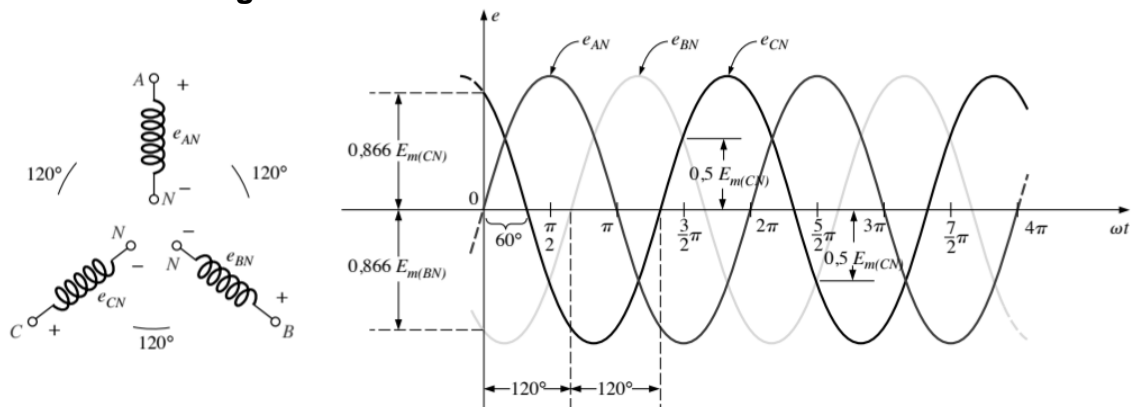
Os motores de corrente alternada (CA), segundo Franchi (2007), podem ser divididos em motores monofásicos e trifásicos. Nos motores monofásicos tem-se uma fase alimentando o motor e um neutro para retorno da corrente elétrica e normalmente possuem uma potência inferior a 5 cv, utilizando um capacitor de partida para suavizar a inercia inicial do motor. Já os motores trifásicos, necessitam três tensões elétricas defasadas de  $120^\circ$  para serem alimentados e normalmente são mais eficientes que os demais modelos de motores, podem também utilizar um cabo neutro para sua ligação. Segundo Chapman (2013), quanto ao funcionamento dos motores de CA, estes podem ser classificados em motores síncronos e motores assíncronos. A principal característica dos motores síncronos é a velocidade única de rotação, independente da variação da carga aplicada sobre o motor isso ocorre por causa da frequência da rede elétrica, que com base no modelo de construção define sua velocidade de rotação. Já os motores assíncronos normalmente possuem uma velocidade menor que o campo girante do estator, dentre estes destaca-se o motor de indução trifásico pelo seu largo emprego nas aplicações industriais, pois combina as vantagens da utilização de energia elétrica – baixo custo, facilidade de transporte, limpeza, simplicidade de comando – com sua construção simples e grande versatilidade de adaptação às cargas dos mais diversos tipos e melhores rendimentos.

De acordo com Gonçalves (2012), os motores de indução trifásicos têm como função a conversão de energia elétrica em energia mecânica. Tais equipamentos trabalham utilizando o princípio da indução eletromagnética, onde se tem um campo magnético girante, que é produzido pela passagem da corrente pelas bobinas que

estão dispostas  $120^\circ$  no espaço. O valor do campo depende da intensidade da corrente elétrica passado pelas bobinas em determinado instante. Se a corrente passar pelo máximo, o campo também será máximo. Se a corrente for mínima ou nula o campo também o será. Segundo Henrique (2007), este campo girante atravessa os condutores do rotor e induzindo corrente nos mesmos. Esta corrente induzida produz um campo magnético em torno dos condutores do rotor, e este campo tende ao alinhamento com o campo do estator. Entretanto, como o campo do estator gira continuamente, o rotor não consegue acompanhar e se alinhar com ele. A velocidade do rotor é sempre menor que a velocidade síncrona, ou seja, a velocidade do campo girante presente no estator.

As correntes nas bobinas são defasadas em  $120^\circ$  umas das outras sendo alimentadas por tensões trifásicas balanceadas e também defasadas em  $120^\circ$ . Ainda segundo Franchi (2007), os três campos que são gerados combinam se em um único campo que atuam sobre o rotor. Em Boylestad (2012), a Figura 1 demonstra um conjunto de ondas senoidais defasadas  $120^\circ$  e balanceadas.

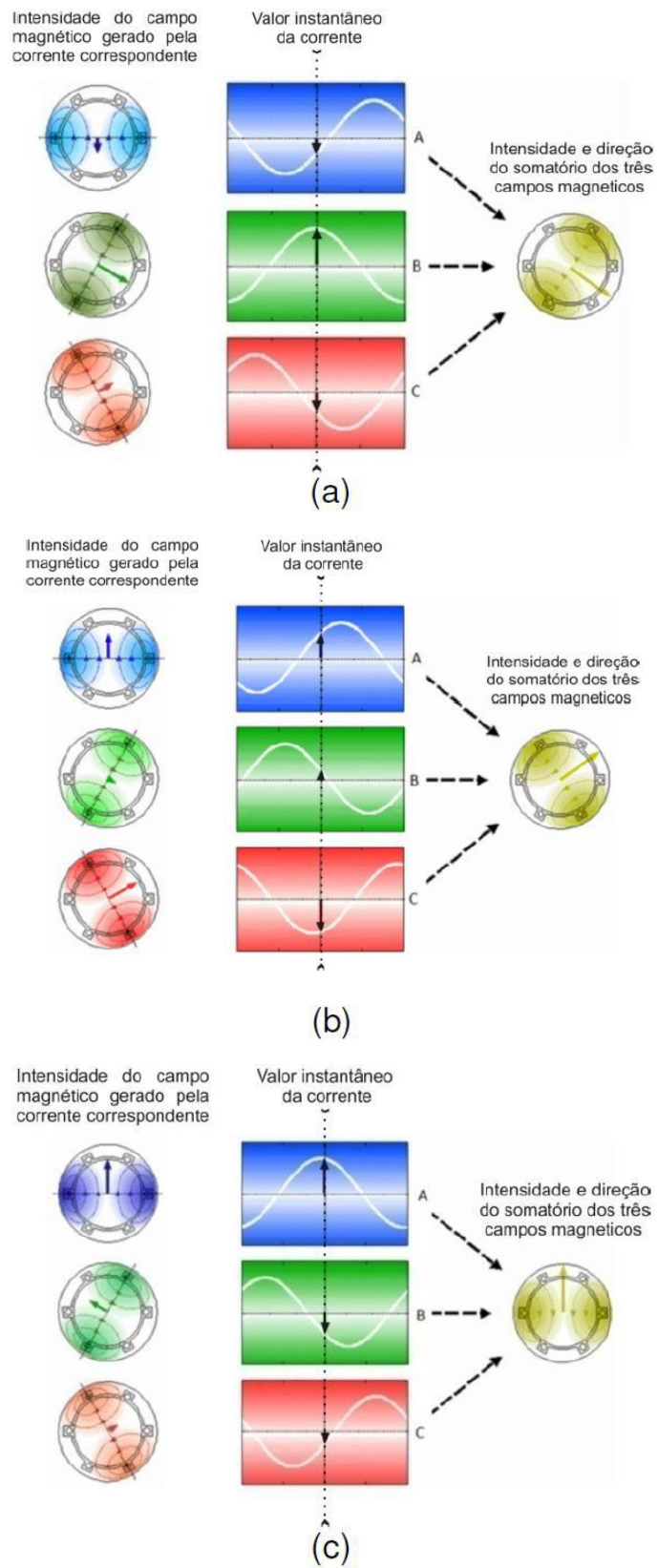
**Figura 1** – Tensões senoidais e bobinas defasadas de  $120^\circ$



**Fonte:** Boylestad (2012).

Ainda de acordo com Gonçalves (2012), o campo girante é uma associação dos campos gerados nas bobinas que estão presentes no estator, sendo é possível observar este fenômeno com clareza na Figura 2. Este campo girante ao atravessar as bobinas, que possuem as mesmas características elétricas e mecânicas, que estão dispostas espacialmente  $120^\circ$  uma da outra, resulta em três tensões iguais defasadas uma da outra em  $120^\circ$ .

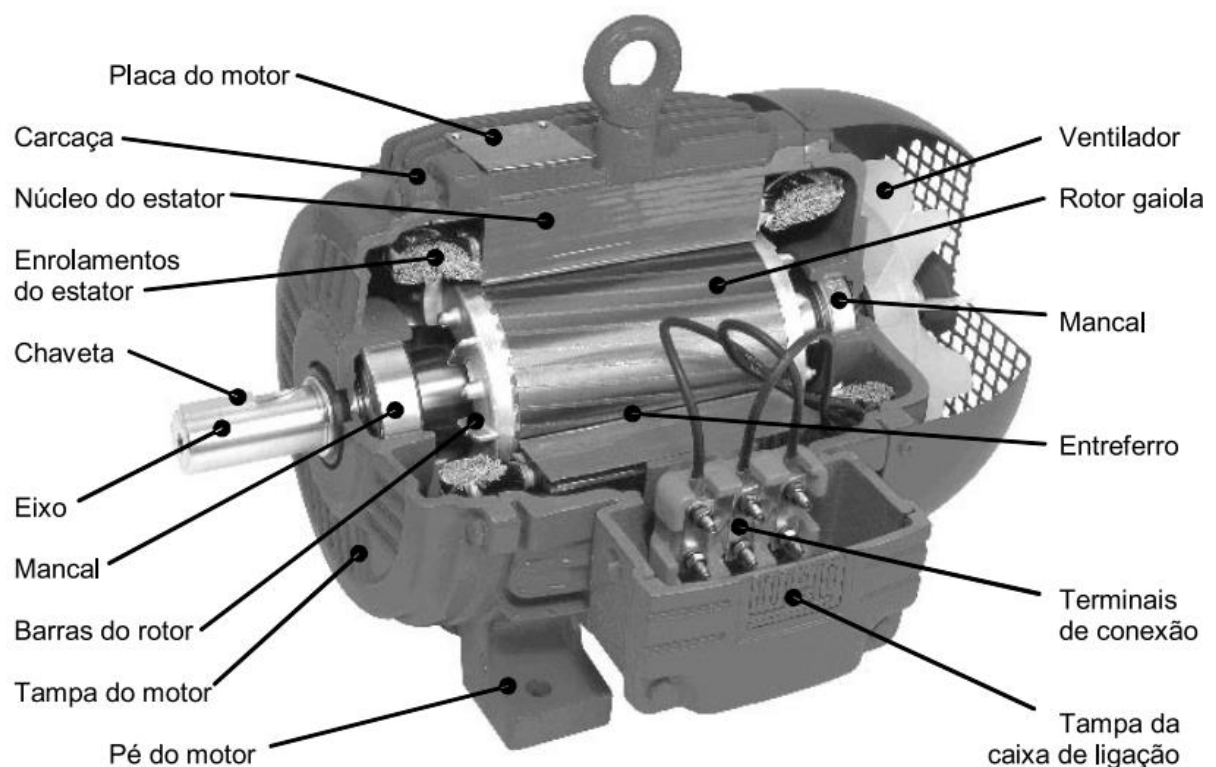
**Figura 2** – Campo girante no estator em diferentes instantes (a), (b) e (c).



Fonte: Gonçalves (2012).

Segundo Chapman (2013), os motores de indução trifásico possuem duas partes que são fundamentais para seu funcionamento: o estator e rotor. O estator é a parte fixa e nele encontram-se os enrolamentos das bobinas. O rotor é a parte móvel do motor, possuindo uma superfície com ranhuras que apresentam a forma cilíndrica e construído com material ferromagnético. Franchi (2007) descreve que existem dois tipos de rotores, os que são bobinados e os em gaiola de esquilo. O rotor do tipo bobinado possui anéis coletores montados sobre o eixo do motor e 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 3 ilustra os principais componentes de um motor de indução trifásico do tipo gaiola de esquilo Santos (2006).

**Figura 3** – Componentes internos e externos de um motor de indução.



**Fonte:** Santos (2006).



Motores elétricos de indução são projetadas e construídos de forma que possuam características e valores nominais para suas grandezas. Uma dessas grandezas é a corrente elétrica, seu valor nominal é fornecido pelo fabricante do motor. A Equação 1 demonstra a representação matemática Franchi (2007).

$$I_N = \frac{P(cv).736.fs}{\sqrt{3}.n.fp.V} \quad (1)$$

Onde,

$P$  = potencia (cv)

$fs$  = fator de serviço.

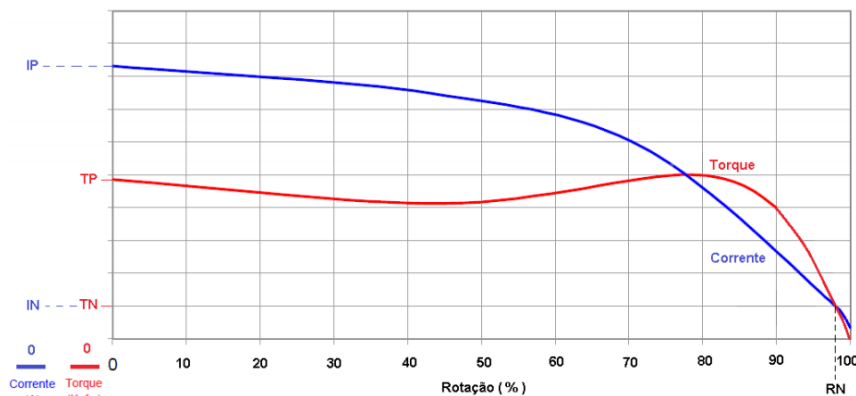
$n$  = rendimento.

$fp$  = fator de potência.

$V$  = tensão.

Ainda segundo Medeiros (1997), durante a partida, os motores elétricos necessitam de uma corrente elevada do sistema de alimentação, muitas vezes entre 6 a 10 vezes a sua corrente nominal de funcionamento. Os motores solicitam muito mais corrente no momento da partida do que em regime contínuo, e isto é chamado de corrente de pico de partida. O valor da corrente de partida, também conhecida por corrente de rotor bloqueado, é dado de placa  $IP/IN$ . Uma relação comum de  $IP/IN$  é 8, significando que a corrente de partida para um motor de  $IP/IN = 8$  é de 8 vezes a corrente nominal e que, dependendo da carga, esse valor de corrente pode permanecer por um tempo suficiente para disparar os dispositivos de proteção do motor, isto de acordo com Nascimento (2015). A Figura 4 apresenta um comportamento típico para a corrente e o torque de um motor em função da rotação em %.

**Figura 4** – Comportamento da corrente e torque de um motor em função da rotação.



Fonte: Nascimento (2015).

Na prática, deseja-se acionar uma carga, limitando-se a corrente de partida, evitando distúrbios na rede elétrica que podem afetar a qualidade da energia elétrica. Desta maneira, a escolha de um sistema de partida adequado, pode trazer benefícios como vida útil prolongada do motor e redução de custos de operação e manutenção, isto de acordo com Franchi (2007).

Com o intuito de atenuar os valores da corrente de partida, e permitir adequado acionamento do motor de indução, métodos de acionamentos são utilizados. De acordo com Guimarães (2018), os principais métodos de partida são: direta, estrela-triângulo, compensadora e as chaves de acionamento eletrônicas (soft-starter e inversor de frequência). A seguir serão apresentados os tipos de acionamento que foram objeto de estudo deste trabalho que são os métodos eletrônicos. Para efeito de comparação é mostrado também o método de acionamento direto.

### 3. ACIONAMENTO DE MOTORES

De acordo com Umans (2014), motores elétricos ao partirem, consomem uma corrente muito maior que em regime normal de funcionamento, devido à mudança de um estado de do motor de parado para movimento, sendo esse pico de corrente prejudicial ao sistema elétrico e podendo atingir várias vezes a corrente nominal do motor. A intensidade e duração dessa corrente inicial dependem das condições de partida do motor. Quando ocorre a partida sob carga, a intensidade e duração dessa corrente será maior ainda do que quando o motor parte sem carga, ou em vazio. Essa alta corrente faz com que os dispositivos de proteção dos circuitos disparem. Além disso, ocorre uma sobrecarga na rede de alimentação, o que prejudica o sistema de distribuição de energia podendo levar a afundamentos de tensão.

Na partida, como pode ser observado na Figura 4, a velocidade do motor é praticamente nula, tem-se a corrente máxima que se mantém neste patamar até um valor próximo da velocidade de trabalho do motor nominal. Com isso, ainda de acordo com Umans (2014), pode-se afirmar que a corrente consumida por um motor é função da tensão aplicada nele, assim, a função das chaves de partida é a redução da tensão durante a partida do motor e depois a aplicação de tensão nominal, quando o motor já estiver na velocidade de trabalho.

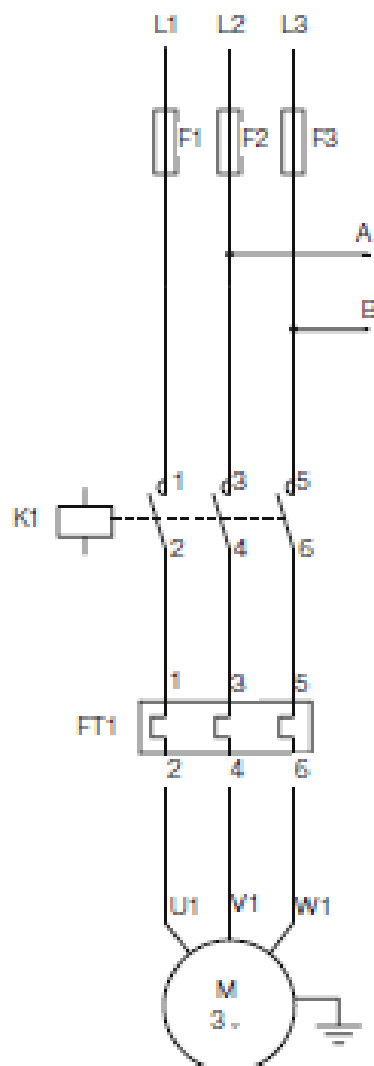
Segundo Kenjo (1984), existem diversas formas de acionamento dos motores de indução trifásicos, sendo que algumas são bem simples e apresentam baixo custo de instalação, porém, são altamente limitadas quando se considera o fator “controle de velocidade”, por exemplo.

Por outro lado, conforme Franchi (2007), existem os sistemas de acionamento mais sofisticados, com um custo de instalação mais elevado, porém, oferecendo uma alta capacidade de regulação da rotação durante a partida, regime de serviço e parada do motor de indução trifásico. Alguns dos diversos sistemas de acionamentos existentes na atualidade são chamados de convencionais que são: Partida direta, Partida Estrela-Triângulo e Partida com Autotransformador Compensador. Os sistemas de acionamentos eletrônicos são: Partida com chave Soft-Starter e Partida com Inversor de Frequência.

### 3.1 PARTIDA DIRETA

A partida direta de um motor, é a maneira mais simples de ligar um motor elétrico, na qual os fios de alimentação são ligados diretamente ao motor, ocorrendo uma corrente de partida alta. Segundo Kenjo (1984), a partida direta de um motor trifásico deve ser efetuada sempre que possível. Por normas de operação de motores fornecida pelos sistemas de distribuição de energia, apenas motores abaixo de 5 cavalos podem utilizar partidas diretas e nas indústrias esse valor vale para motores abaixo de 10 cavalos. A Figura 5 mostra o diagrama de força para acionamento de um motor de indução em partida direta WEG (2014).

**Figura 5** – Diagrama de força da partida direta.



**Fonte:** WEG (2014).

O motor de indução trifásico é conectado diretamente à rede, por meio de um contator (K1), sendo ainda acrescentado, ao circuito de força, fusíveis (F1, F2 e F3) e relé térmico (FT1), como dispositivos de proteção. Segundo Franchi (2007), por imposição da concessionária, só podem ser partidos motores abaixo de 5 cv em partidas diretas quando ligados diretamente ao sistema de distribuição. Quando estão dentro das instalações industriais, este valor deve estar abaixo de 10 cv.

Segundo Kosow (1982), a partida direta não precisa ser evitada, se a linha de alimentação for de capacidade suficiente para prover a tensão nominal e a corrente requeridas para a partida do motor de indução e desde que tal partida não cause danos ao motor de indução ou distúrbios em outros equipamentos que estejam ligados ao sistema de suprimento.

Ainda segundo Franchi (2014), a partida direta deve ser utilizada quando os motores são de baixa potência, onde as perturbações originadas pelo pico de corrente são limitadas. Em situações onde a máquina acionada não necessita de uma aceleração progressiva e está equipada com algum tipo de dispositivo mecânico (redutor) que evitando uma partida muito rápida, esta abordagem pode ser usada. Outra situação é quando o conjugado de partida é alto. Sendo assim, pode-se dizer as vantagens de se utilizar a chave de partida direta resultam em acionamentos simples, de fácil projeto e construção. Este tipo de acionamento é realizado de forma rápida e com baixo custo.

Na partida direta, de acordo Kenjo (1984), com a presença da grande corrente de partida do motor, apresentam-se algumas desvantagens, que podem ser resumidas em três. A primeira consiste em uma queda de tensão elevada no sistema distribuição de energia da rede, que poderá ocasionar interferências em equipamentos instalados nas proximidades da rede. A segunda é que os sistemas de acionamento (disjuntores, relês, cabos, contactores) devem ser superdimensionados, elevando os custos do sistema. A terceira é que as concessionárias de energia elétrica estabelecem limites para o valor da queda de tensão na rede de distribuição.

### 3.2 ACIONAMENTO ELETRÔNICO COM SOFT-STARTER

Segundo Nagai (1997), com o avanço da tecnologia da Eletrônica de Potência, surgem novos equipamentos, destinados a modernizar as técnicas convencionais de

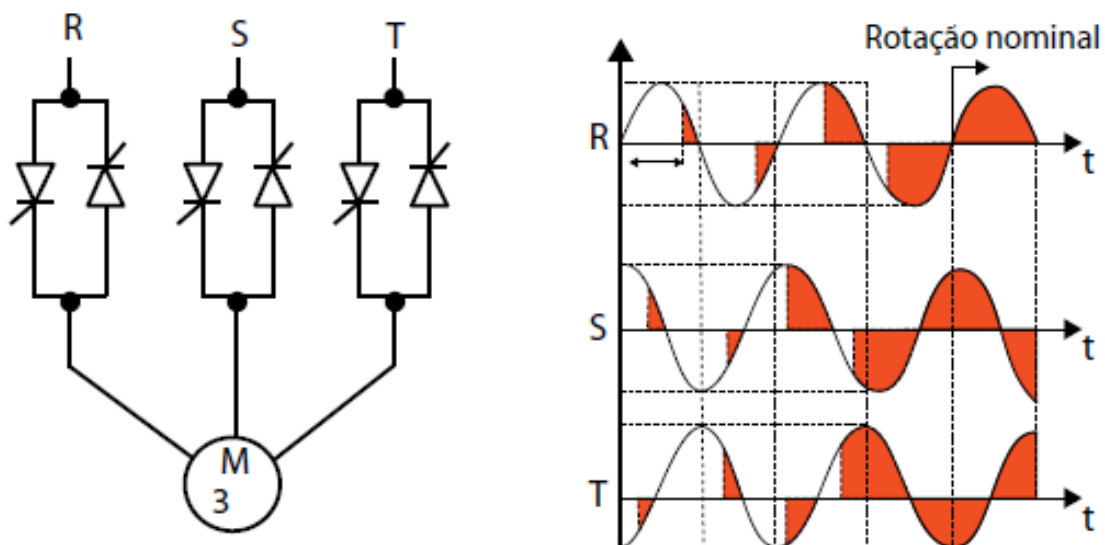
acionamento de motores de indução trifásicos, tornando mais economicamente viável e prático o uso das chaves eletrônicas.

Ainda de acordo com Franchi (2014), as chaves de partida soft-starters podem ser usadas no acionamento de motores de corrente contínua e corrente alternada, assegurando a aceleração e desaceleração gradativas e permitindo uma adequação da velocidade às condições de operação.

O suprimento elétrico do motor, quando colocado em operação, é feito pelo aumento gradual da tensão, permitindo uma partida suave e com significativa redução do pico da corrente de partida. A obtenção desta tensão gradativa é feita por intermédio de um sistema de retificação usando tiristores (SCRs) em antiparalelo, montados de duplas em cada fase da rede conforme mostrado por Franchi (2007).

A Figura 6 mostra os gráficos de variação de tensão em cada fase, controlando as fases de um motor trifásico Dreher (2009).

**Figura 6** – Controle de fases de um motor trifásico utilizando uma soft-starter.



**Fonte:** Dreher (2009).

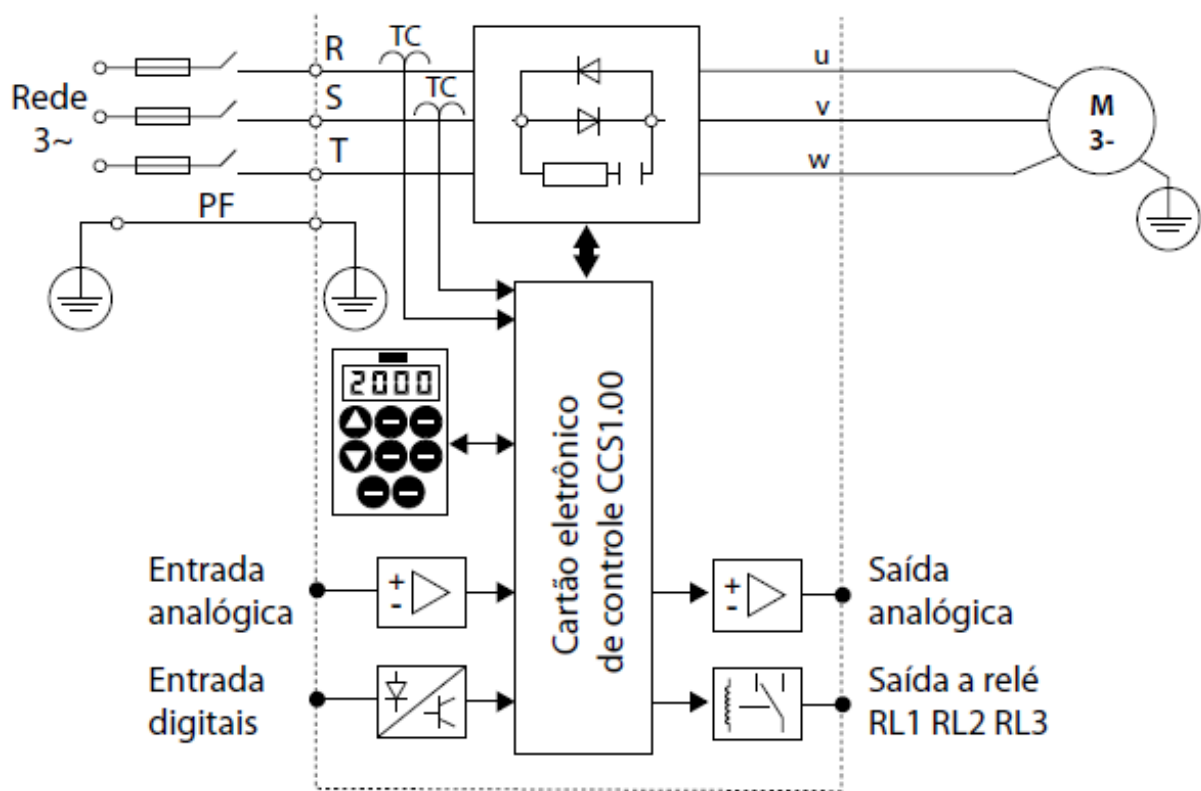
Ainda de acordo com Franchi (2007), a subida progressiva da tensão pode ser controlada por uma rampa de aceleração ou ficar dependente do valor da corrente de limitação, ou ligada aos dois parâmetros. Assim, a soft-starter assegura:

- O controle das características de funcionamento, principalmente durante os períodos de partida e de parada;
- A proteção térmica do motor e do controlador;

- c) A proteção mecânica da máquina movimentada por supressão dos golpes e redução da corrente de partida.

Segundo Franchi (2014), o funcionamento das soft-starters está baseado na utilização da ponte de diodos controlados (SCRs), que é comandada por uma placa eletrônica de controle, a fim de ajustar a tensão de saída, conforme programação feita pelo usuário. A Figura 7 mostra o diagrama de blocos de uma soft-starter.

**Figura 7** – Diagrama de blocos simplificados da soft-starter.



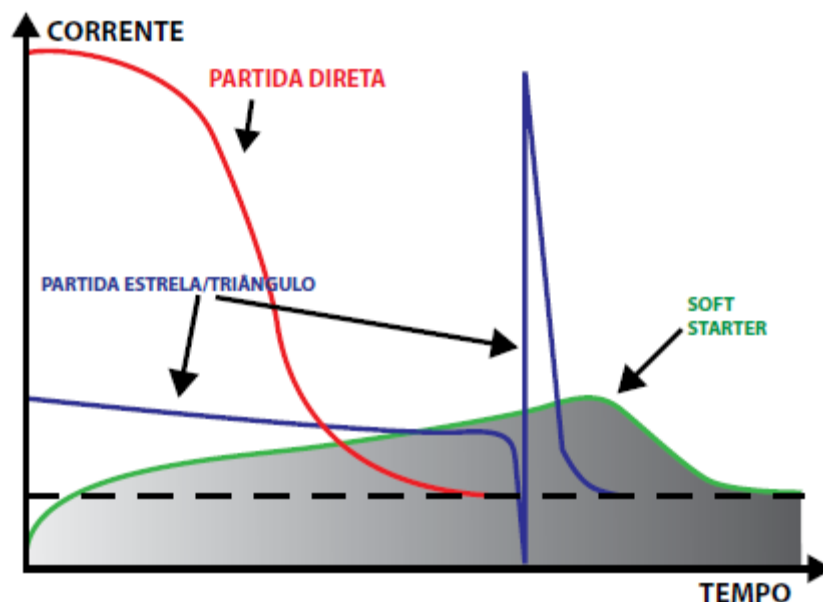
**Fonte:** Franchi (2007).

Como mostra o diagrama de blocos em Franchi (2007), a soft-starter controla a tensão da rede por meio do circuito de potência constituído por diodos retificadores controlados (SCRs), nos quais se varia o ângulo de disparo, e consequentemente, varia-se a tensão eficaz do motor elétrico.

De acordo com Dreher (2009), o principal objetivo do funcionamento da soft-starter é aplicar uma tensão reduzida na partida de um motor elétrico. Como o torque é proporcional a essa tensão, o motor parte com torque reduzido. Na partida com soft-

starter é possível suavizar a corrente de partida, evitando picos de corrente elétrica. Para obter uma partida suave é necessário que o torque de partida seja menor, assim é necessário realizar o controle da tensão aplicada, e como consequência ter-se-á uma corrente menor. Além disso possui vantagens como paradas suaves e proteção do motor elétrico. A Figura 8 mostra um gráfico comparativo da corrente de partida, em função do tempo, para as situações: partida direta, estrela-triângulo e soft-starter.

**Figura 8** – Comparativo da corrente entre partidas direta, estrela-triângulo e soft-starter.



Fonte: Dreher (2009).

As principais funções da soft-starter são:

- Controlar a aceleração e desaceleração do motor;
- Limitar a de corrente do motor;
- Conjugado de partida;
- Realizar a frenagem por corrente contínua;
- Proteção contra sobrecargas;
- Proteção do motor contra aquecimento;
- Avaliação de desequilíbrios ou falta de fases no motor.

Através da Figura 8, fica evidente que a corrente de partida de um motor de indução trifásico é significativamente menor em comparação com os outros métodos não eletrônicos Dreher (2009).



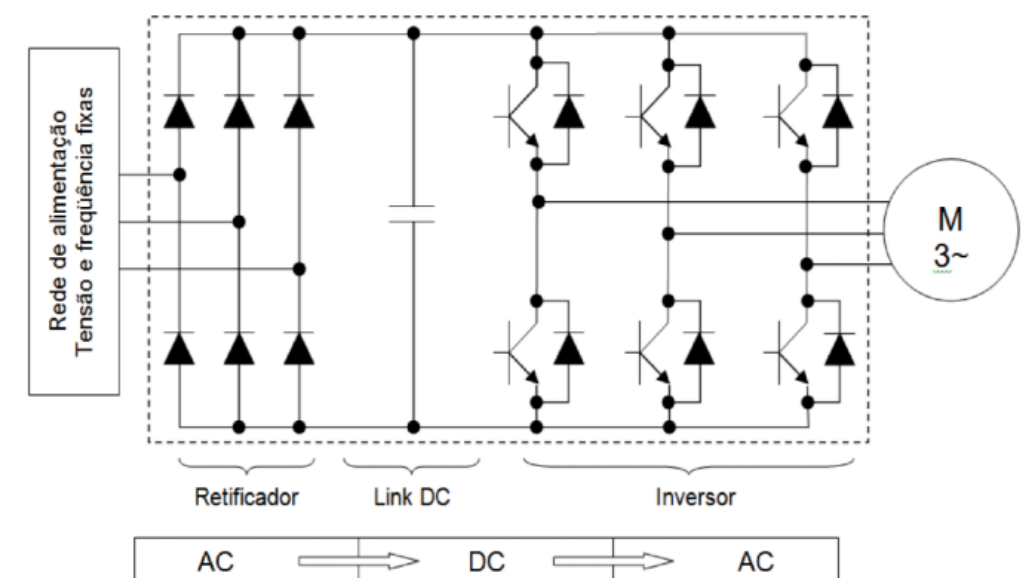
### 3.3 ACIONAMENTO ELETRÔNICO COM INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Segundo Franchi (2014), o inversor de frequência, também conhecido como conversor de frequência, trabalha com a tensão elétrica retificada, filtrada e aplicada a uma ponte de chaves eletrônicas, normalmente do tipo IGBT's, que são chaveadas em uma frequência de até 16kHz. A tensão de saída possui uma frequência variável, que pode ser ajustada.

Ainda de acordo com Franchi (2007), os inversores de frequência foram criados não somente para realizar a partida de os motores de indução de gaiola de esquilo, mas também realizar o controle da velocidade de operação e também do torque do motor. Os inversores entregam ao motor as três fases da rede com frequências e tensões variáveis, de acordo com a necessidade da aplicação ou com a necessidade do operador.

Segundo Nascimento (2015), os inversores modernos, controlam a frequência e ajustam a tensão de forma a manter a corrente elétrica no motor constante e em valor igual a corrente nominal. Sendo que cada motor é controlado de forma individual por seu inversor de frequência. Este controle envolve não somente a partida do motor de indução trifásico, mas também a variação de sua velocidade de maneira que o torque permaneça constante. A Figura 9 mostra o diagrama ilustrativo dos componentes típicos presentes em inversor de frequência Franchi (2014).

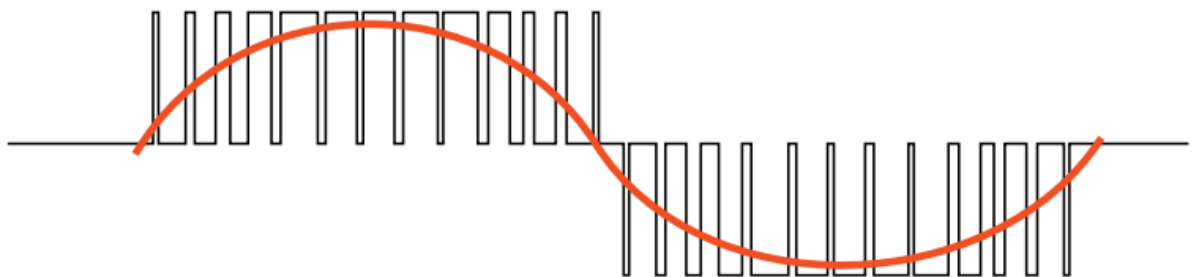
**Figura 9** – Diagrama ilustrativo dos componentes do inversor de frequência.



Fonte: Franchi (2014).

De acordo com Franchi (2014), o controle de chaveamento é realizado com uma ponte retificadora na entrada da alimentação trifásica. A tensão contínua ligada aos terminais de saída pelos transistores, que funcionam em corte ou em saturação como uma chave eletrônica estática. Os transistores trabalham como uma chave liga ou desliga, de forma que a onda de tensão de saída do conversor de frequência é sempre do tipo quadrada. Para ter uma tensão de saída mais próxima da senoidal, os transistores são chaveados através de uma técnica de modulação chamada de PWM (*Pulse Width Modulation* – Modulação por Largura de Pulso) como ilustrado na figura 10.

**Figura 10** – Modulação por Largura de Pulso (PWM).



**Fonte:** Dreher (2009).

De acordo com Dreher (2009), o método de modulação PWM (*Pulse Width Modulation*) fornece ao motor uma corrente senoidal a partir de chaveamentos na faixa de 2KHz.

#### 4. QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Entre os problemas de qualidade de energia, segundo Vilaça (2001), a interrupção do fornecimento é incontestavelmente o que têm maior efeito, uma vez que afeta todos os equipamentos ligados à rede elétrica, à exceção daqueles que estejam sendo alimentados por UPS's (Uninterruptable Power Supplies – sistemas de alimentação ininterrupta) ou por geradores de emergência. Contudo, outros problemas de qualidade de energia, além de levarem à operação incorreta de alguns equipamentos, podem também ser danificados.

De acordo com Dugan et al. (2012), a qualidade da energia elétrica em um determinado barramento do sistema elétrico é afetada de forma adversa por uma ampla variedade de distúrbios, que podem ser resumidos como se segue:

- a) Transitórios tanto impulsivos quanto oscilatórios;
- b) Variações de tensão de curta duração (VTCD): interrupções transitórias, afundamentos de tensão (*voltage sag*) e elevações de tensão (*voltage swell*);
- c) Variações de tensão de longa duração (VTLD): interrupções sustentadas, subtensões e sobretensões;
- d) Desequilíbrios de tensão e correntes;
- e) Distorção da forma de onda (harmônicos, corte de tensão, ruído etc.);
- f) Flutuações de tensão;
- g) Variações de frequência.

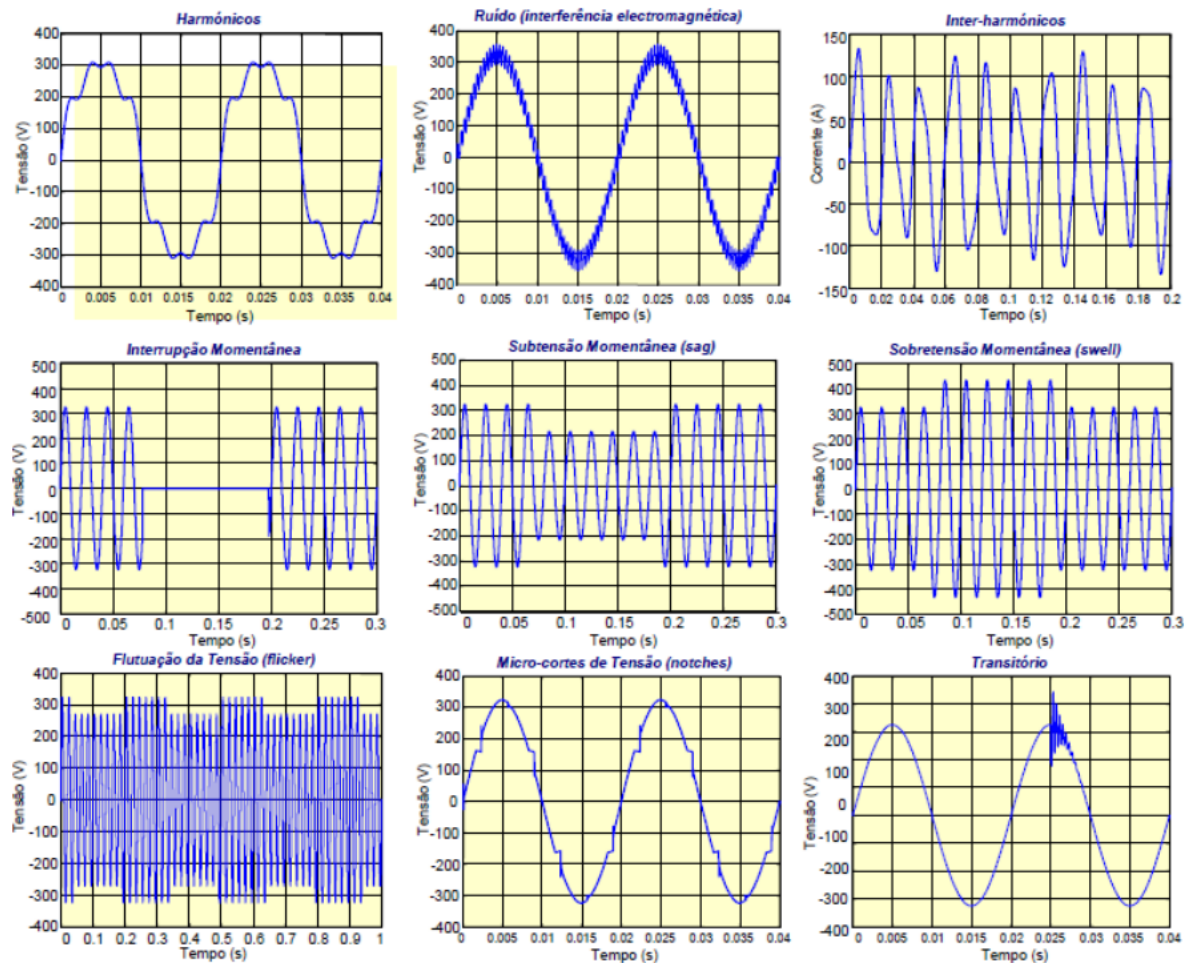
Segundo Martins e Afonso (2004), os distúrbios da qualidade de energia elétrica resultam em alterações nas formas de onda de tensões e correntes como ilustradas pela Figura 11.

O afundamento de tensão é caracterizado pela redução do valor rms da tensão durante um tempo de meio ciclo até 1 minuto, podendo ser provocado por um curto-circuito ou ligação de carga perto do sistema analisado, como visto em Dugan et al. (2012). Quando o afundamento da tensão ultrapassa o tempo de um minuto, este fato é caracterizado como subtensão.

A elevação de tensão é caracterizado pelo aumento do valor RMS da tensão entregue a um sistema durante um tempo de meio ciclo até um minuto, podendo ser

causado por desligamento de grandes cargas ou conexão de banco de capacitores Deckmann e Pomilio (2010). Quando a elevação de tensão ultrapassa o tempo de um minuto com tensões acima do valor RMS esperado, ela é chamado de sobretensão.

**Figura 11** – Distúrbios da qualidade de energia elétrica.



**Fonte:** Martins & Afonso (2004).

Em Ferreira (2010), os transitórios impulsivos ocorrem devido as descargas atmosféricas, estas descargas fazem com que as ondas senoidais da rede elétrica ideal seja acrescida ou decrescida de um impulso repentino nas condições de regime permanente da tensão e da corrente. Já os impulsos oscilatórios ocorrem devido à energização de uma linha, corte de cargas indutivas e chaveamento de banco de capacitores e transformadores, e são caracterizados por uma rápida variação nos valores e na polaridade da tensão e da corrente do sistema.

A interrupção pode ser caracterizada pelo tempo de duração. Quando ocorrida por um tempo entre três segundos e um minuto, é denominada interrupção temporária. Esta interrupção ocorre quando um sistema de proteção com religamento automático ligado em conjunto com a rede é acionado após a eliminação de um curto circuito. Quando ultrapassado um minuto de duração, esta interrupção é chamada de permanente. Este efeito ocorre quando não há previsão de religação após um curto circuito na rede Deckmann e Pomilio (2010).

O ruído ocorre devido as interferências eletromagnéticas de altas frequências que podem ser causadas por comutações rápidas dos conversores eletrônicos de potência Martins e Afonso (2004). Enquanto que a distorção harmônica, é caracterizada pela combinação de onda de tensão ou corrente, com componentes de frequência múltipla inteira da frequência fundamental. Os harmônicos ocorrem pelo uso de dispositivos não-lineares como, ponte de retificadores; compensadores controlados a tiristores; diodos; dentre outros Leão, Sampaio e Antunes (2014).

Segundo Deckmann e Pomilio (2010), os distúrbios causados por qualidade de energia elétrica se não forem devidamente tratados, poderão levar a prejuízos materiais (redução da vida útil ou até queima de transformadores, motores, capacitores e equipamentos eletrônicos sensíveis), bem como perturbações físicas em pessoas (incômodo visual devido ao efeito de cintilação, ou incômodo auditivo devido a ressonâncias eletromagnéticas), levando ao comprometimento da capacidade produtiva tanto das máquinas como das pessoas.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao finalizar o desenvolvimento dos capítulos anteriores, pode-se verificar que foi atingido tanto o objetivo geral quanto os objetivos específicos. Abordou-se o princípio de funcionamento dos motores de indução trifásicos, dos métodos de partida eletrônicos e de questões associadas a qualidade da energia elétrica.

De acordo com o princípio de funcionamento dos motores de indução trifásicos foi possível entender que este tipo de motor apresenta uma alta corrente de partida, sendo necessário o uso de métodos de partida que reduzam os efeitos desta corrente na rede elétrica.

Com o que foi apresentado sobre a partida dos motores elétricos, foi possível observar as partidas eletrônicas trazem um significativa melhorias com relação ao controle da corrente de partida. Por outro lado, elas afetam a qualidade do suprimento elétrico através da injeção de correntes harmônicas na rede elétrica.

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se a ampliação dos estudos sobre os efeitos dos métodos de partida eletrônica sobre a suprimento elétrico.

## REFERÊNCIAS

- BOLDEA, I. **Reluctance Synchronous Machines and Drives**. New York: Clarendon Press-Oxford, 1996.
- BOYLESTAD, ROBERT L. **Introdução à análise de circuitos**. 12. ed. – São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2012.
- CHAPMAN, STEPHEN J. **Fundamentos de máquinas elétricas** ; tradução: Anatólio Laschuk. – 5. ed.– Porto Alegre : AMGH, 2013.
- DECKMANN, S, M.; POMILIO, J. A. **Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica**. Campinas: UNICAMP, 2010.
- DREHER, J. R. **Chaves de partida suave soft-starter e inversor de frequência**. Chapecó: CEFET/SC, 2009.
- DUGAN, R. C. et al. **Electrical Power Systems Quality**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2012.
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021 ano base 2020**. Brasil:, Ministério das Minas e Energia, 2021. Disponível em: < [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anu%C3%A1rio\\_2021.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anu%C3%A1rio_2021.pdf)>. Acesso em: 30 abr. 2022.
- FERREIRA, D. D. **Análise de Distúrbios Elétricos em Sistemas de Potência**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2010.
- FRANCHI, C. M. **Acionamentos elétricos**. 4ª Edição. São Paulo: Érica, 2007.
- FRANCHI, C. M. **Sistema de acionamentos elétricos**. 1ª Edição. São Paulo: Érica, 2014.
- GONÇALVES, F. R. **Análise da Partida do Motor de Indução Trifásico pelo Método dos Elementos Finitos**. [Monografia]. 70 p. Rio de Janeiro. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.
- GUIMARÃES, H. O. **Acionamento de motores elétricos**. 1.ed. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A, 2018.
- 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 abr. 2022.

KAGAN, N.; ROBBA, E. J.; SCHMIDT, H. P. **Estimação de indicadores de qualidade da energia elétrica**. São Paulo: Blucher, 2009.

KENJO, T. **Stepping Motors and Their Microprocessor Controls**. New York: Clarendon Press--Oxford, 1984.

KOSOV, I. L. **Máquinas elétricas e transformadores**. Porto Alegre: Globo, 1982.

LEÃO, R. P., SAMPAIO, R. F., & ANTUNES, F. L. **Harmônicos em Sistemas Elétricos**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

MARTINS, J. S., & AFONSO, J. L. **Qualidade da Energia Elétrica**. O Eletricista, 2004. 66-71.

MEDEIROS, S. **Medição de Energia Elétrica**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1997.

NAGAI, S. E. et al. **A Influência de Soft Starter na Qualidade da Energia Elétrica**. II Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica 1997, São Lourenço-MG, 1997.

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: 28 abr. 2022.

SANTOS, A. H. M. et al. **Conservação de Energia: Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos**. 3. ed. Itajubá: Eletrobrás/PROCEL, 2006.

UMANS, STEPHEN D. **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley** ; tradução: Anatólio Laschuk. – 7. ed.– Porto Alegre : AMGH, 2014.

VILAÇA, A. L. A. **Uma Proposta de Instrumento para Medição da Qualidade da Energia Elétrica**. [Dissertação]. 171 p. Uberlândia. Universidade Federal de Uberlândia, 2001.

WEG. **Automação: Guia de Seleção de Partidas**. Disponível em: < <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/haa/h53/WEG-guia-de-selecao-de-partidas-50037327-manual-portugues-br-dc.pdf> >. Acesso em: 01 Mai. 2022.