

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FUNDAÇÃO ASSIS GURGACZ
GIOVANI COSSA**

**ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA UTILIZANDO PARTIDAS SUAVES EM
MÁQUINAS ELÉTRICAS INDUSTRIAIS**

**CASCADEL-PR
2018**

CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FUNDAÇÃO ASSIS GURGACZ
GIOVANI COSSA

ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA UTILIZANDO PARTIDAS SUAVES EM
MÁQUINAS ELÉTRICAS INDUSTRIAIS

Trabalho apresentado no Curso de Engenharia Elétrica, do Centro Universitário Fundação Assis Gurgacz, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.
Professor orientador: Nelson Chetevik de Oliveira.

CASCADEL-PR
2018

RESUMO

O seguinte trabalho tem o intuito de demonstrar os principais tipos de acionamentos de motores elétricos de indução trifásica, sendo que estes são fundamentais para melhorar a dinâmica elétrica e mecânica das máquinas industriais, devido a estes métodos tem a possibilidade de partir suavemente motores de potência elevada, reduzindo os trancos no momento de saída de inércia, e por consequência aliviar os grandes picos de corrente elétrica e as quedas de tensão na rede interligada durante esse período. Através deste contexto, optou-se por dimensionar as partidas Estrela-Triângulo, chave compensadora, *Soft-Starter* e inversor de frequência, tendo como referência três potências diferentes, sendo estas, 25, 75 e 150 CV com a finalidade de chegar a uma conclusão de viabilidade econômica para a implantação de cada um dos métodos, levando em consideração as três faixas de potência. De acordo com os dados analisados durante o projeto, a melhor viabilidade econômica para as duas menores potências abordadas se deu com o uso da chave de partida estrela-triângulo, no caso da maior potência o melhor equipamento de partida é o *Soft-Starter* sempre considerando em termos de viabilidade econômica.

Palavras-Chave: Acionamento de motores elétricos, máquinas industriais, potência, picos de corrente elétrica, quedas de tensão, viabilidade econômica.

ABSTRACT

The following work has the purpose of demonstrating the main types of drives of electric motors of three-phase induction, these being fundamental to improve the electrical and mechanical dynamics of the industrial machines, because these methods have the possibility of starting gently high power motors, reducing the leaps at the moment of inertia output, and consequently relieving the large peaks of electric current and the voltage drops in the interconnected network during that period. In this context, it was decided to size Star-Triangle, compensating switch, Soft-Starter and frequency inverter, with three different powers, 25, 75 and 150 CV being used in order to arrive at a conclusion of economic feasibility for the implantation of each of the methods, considering the three power ranges. According to the data analyzed during the project, the best economic feasibility for the two smaller power units was the star-triangle starter, in the case of higher power the best starting equipment is the Soft-Starter always considering in terms of economic viability.

Keywords: Electric motors drive, industrial machines, power, electric current peaks, voltage drops, economic viability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Principais partes de um motor MIT.	13
Figura 2: Curva de corrente elétrica no acionamento de motores.	14
Figura 3: Afundamento de tensão devido a resposta dinâmica do motor.	15
Figura 4: Diagrama de força e comando da partida Estrela-Triângulo.	16
Figura 5: Tensão na partida Estrela-Triângulo.	18
Figura 6: Corrente em relação ao tempo com a utilização de partidas diretas e Estrela-Triângulo.	19
Figura 7: Diagrama de força e comando da partida com Auto transformador.	20
Figura 8: Corrente em relação ao tempo com a utilização de partidas com Auto transformador.	22
Figura 9: Demonstração do Auto transformador.	23
Figura 10: Ponte de tiristores do <i>Soft-Starter</i>	24
Figura 11: Aceleração com uma chave de partida <i>Soft-Starter</i>	26
Figura 12: Contator de <i>By-pass</i>	27
Figura 13: Desaceleração <i>Soft-Starter</i>	28
Figura 14: Comparação do <i>Soft-Starter</i> com relação a outros métodos destacados.	29
Figura 15: Ponte de onda completa do inversor de frequência.	30
Figura 16: Barramento CC.	31
Figura 17: Circuito de controle dentro do diagrama de blocos	32
Figura 18: Circuito inversor.	33
Figura 19: Circuito completo inversor de frequência.	34
Figura 20: Figura ilustrativa <i>Soft-Starter</i> SSW07 25 CV.	38
Figura 21: Figura ilustrativa inversor de frequência CFW09 25 CV.	39
Figura 22: Figura ilustrativa <i>Soft-Starter</i> SSW07 75 CV.	42
Figura 23: Figura ilustrativa inversor de frequência CFW09 75 CV.	43
Figura 24: Figura ilustrativa <i>Soft-Starter</i> SSW07 365 A, 150 CV.	46
Figura 25: Figura ilustrativa inversor de frequência CFW11, 150 CV.	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Motor utilizado como base para a retirada de características nominais. ...	35
Tabela 2: Componentes utilizados para partida Estrela-Triângulo 25 CV.	37
Tabela 3: Componentes para partida com chave compensadora 25 CV.	37
Tabela 4: Componentes para acionamento com chave <i>Soft-Starter</i> 25 CV.	39
Tabela 5: Componentes auxiliares para partida com inversor de frequência 25 CV .	40
Tabela 6: Componentes utilizados para partida Estrela-Triângulo 75 CV.	40
Tabela 7: Componentes utilizados para partida com chave compensadora 75 CV. ..	41
Tabela 8: Componentes para acionamento com chave <i>Soft-Starter</i> 75 CV.	42
Tabela 9: Componentes auxiliares para o inversor de frequência 75 CV.	43
Tabela 10: Componentes utilizados para partida Estrela-Triângulo motor 150 CV. ...	44
Tabela 11: Componentes auxiliares para chave compensadora 150 CV.	45
Tabela 12: Componentes auxiliares para chave <i>Soft-Starter</i> 150 CV.	46
Tabela 13: Componentes auxiliares para inversor de frequência 150 CV.	48
Tabela 14: Resultados para partida Estrela-Triângulo 25 CV.	49
Tabela 15: Resultados para partida com chave compensadora 25 CV.	50
Tabela 16: Resultados para <i>Soft-Starter</i> 25 CV.	50
Tabela 17: Resultados para inversor de frequência 25 CV.	51
Tabela 18: Resultados para partida Estrela-Triângulo 75 CV.	52
Tabela 19: Resultados para partida com chave <i>Soft-Starter</i> 75 CV.	52
Tabela 20: Resultados para partida com chave compensadora 75 CV.	53
Tabela 21: Resultados para partida com inversor de frequência 75 CV.	53
Tabela 22: Resultados para partida com chave <i>Soft-Starter</i> 150 CV.	54
Tabela 23: Resultados para partida Estrela-Triângulo 150 CV.	55
Tabela 24: Resultados para partida com inversor de frequência 150 CV.	55
Tabela 25: Resultados para partida com chave compensadora 150 CV.	56

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Resultados de viabilidade econômica para 25 CV.	51
Gráfico 2: Resultados de viabilidade econômica para 75 CV.	54
Gráfico 3: Resultados de viabilidade econômica para 150 CV.	57
Gráfico 4: Variação de custos para as três potências abordadas.....	58

A	Ampère
CA	Corrente alternada
CC	Corrente continua
CV	Cavalo vapor
G	Giga (10^9)
h	Hora
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
IHM	Interface Homem Máquina
CLP	Controlador Lógico Programável
K	Contatores
MIT	Motor de Indução Trifásico
NA	Normalmente aberto
NF	Normalmente fechado
TC	Tranformador de corrente
V	Volts
Y	Estrela
W	Watts

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1 MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO	12
2.2 QUEDA DE TENSÃO NA PARTIDA DE MOTORES ELÉTRICOS EM SISTEMAS INDUSTRIAIS.....	14
2.3 PARTIDA ESTRELA-TRIÂNGULO	16
2.3.1 Diagrama multifilar de força e comando	16
2.3.2 Processos de funcionamento	17
2.3.3 Finalidade da partida Estrela-Triângulo.....	17
2.4 PARTIDA COM CHAVE COMPENSADORA	19
2.4.1 Diagrama multifilar de força e comando	20
2.4.2 Processos de funcionamento	20
2.4.3 Finalidade da partida compensadora	21
2.5 <i>SOFT-STARTERS</i>	23
2.5.1 Processos de funcionamento	24
2.5.2 Circuito de potência.....	25
2.5.3 Circuito de controle.....	25
2.5.4 Aceleração.....	25
2.5.5 Desaceleração	27
2.5.6 Finalidade do <i>Soft-Starter</i>	28
2.6 INVERSOR DE FREQUÊNCIA	29
2.6.1 Processos de funcionamento	30
2.6.2 Retificação e filtragem	30
2.6.3 Controle.....	31
2.6.4 Inversor	32
2.6.5 Finalidade do inversor de frequência	33
3 METODOLOGIA	35
3.1 SELEÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS	35
3.2 MÉTODOS UTILIZADO PARA O DIMENSIONAMENTO DAS PARTIDAS	36
3.3 ACIONAMENTO MOTOR 25 CV	36

3.3.1 Estrela-Triângulo	36
3.3.2 Partida com chave Compensadora	37
3.3.3 Partida com chave <i>Soft-Starter</i>	38
3.3.4 Partida com inversor de frequência	39
3.4 ACIONAMENTO MOTOR 75 CV	40
3.4.1 Estrela-Triângulo	40
3.4.2 Partida com chave Compensadora	41
3.4.3 Partida com chave <i>Soft-Starter</i>	41
3.4.4 Partida com inversor de frequência	42
3.5 ACIONAMENTO MOTOR 150 CV	44
3.5.1 Estrela-Triângulo	44
3.5.2 Partida com chave Compensadora	45
3.5.3 Partida com chave <i>Soft-Starter</i>	45
3.5.4 Partida com inversor de frequência	46
4 RESULTADOS	49
4.1 RESULTADOS PARA MOTORES 25 CV	49
4.2 RESULTADOS PARA MOTORES 75 CV	52
4.3 RESULTADOS PARA MOTORES 150 CV	54
5 DISCUSSÃO	59
6 CONCLUSÃO	60
REFERÊNCIAS.....	61

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um grande consumidor de energia elétrica, em 2016 foi consumido cerca de 459.515 GWh em todos os setores presentes no país, sendo que o setor industrial é o que possui as maiores cargas do sistema elétrico de potência, as indústrias retêm 36% do montante total de energia elétrica produzida no país, em termos de potência ativa o valor estipulado foi de 165.425 GWh para o ano avaliado [1] [2].

Devido à grande quantidade de energia elétrica que as indústrias consomem, suas instalações devem satisfazer as normas vigentes da concessionária local, para que as mesmas não extrapolem a demanda contratada, e afim de prevenir a ocorrência de problemas graves dentro das instalações do proprietário, os quais dependendo da gravidade podem migrar para o sistema interligado, prejudicando dessa maneira outros consumidores vizinhos [3].

Deve-se ter muito cuidado quanto ao planejamento das instalações elétricas industriais, pois nelas estão alocados os motores elétricos, sendo eles grandes causadores de oscilações na rede elétrica, as quais podem danificar CLPs, lâmpadas, contadores, retificadores, microprocessadores, além do risco de alterar o sincronismo das máquinas responsáveis pela produção, o qual poderá submeter o processo de produção a algum tipo de interrupção, acarretando em prejuízos para a empresa [7].

Devido aos grandes surtos ocasionados pelo acionamento de motores de indução trifásica de potências elevadas, há a necessidade de partir essas máquinas de maneira com que os picos de corrente elétrica, durante o estado de saída da inércia sejam reduzidos, para amenizar os efeitos colaterais oriundos das características dos MITs [3].

Desta maneira usa-se as partidas, Estrela-Triângulo, chave compensadora, *Soft-Starter* e inversor de frequência, as quais tem a finalidade de proporcionar ao motor partidas suaves e menos prejudiciais ao sistema elétrico.

O presente trabalho irá demonstrar as características de funcionamento de cada um desses métodos destacados. Com a finalidade de dimensionar as partidas para três potências diferentes de motores, e sucessivamente chegar a uma conclusão de viabilidade econômica para cada faixa de potência escolhida.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO

Os motores de indução trifásica são máquinas que possuem a capacidade de converter energia elétrica em mecânica, são os principais equipamentos das indústrias em escala mundial, estima-se que entre 70 a 80 % da energia elétrica consumida pelos polos industriais é transformada em energia mecânica, entretanto os motores possuem um rendimento na faixa de 80 a 85 %, quando considerado a junção de indústrias de um país inteiro ou até mesmo do mundo todo, se pode dizer que o restante da energia elétrica é transformada em perdas dissipada na forma de calor pelas próprias máquinas elétricas [3].

Os motores trifásicos possuem defasagem de 120° elétricos entre fases para manter equilíbrio, basicamente são constituídos de duas partes principais, sendo elas, o estator e o rotor, além outras partes auxiliares que permitem melhor rendimento e funcionamento da máquina [3].

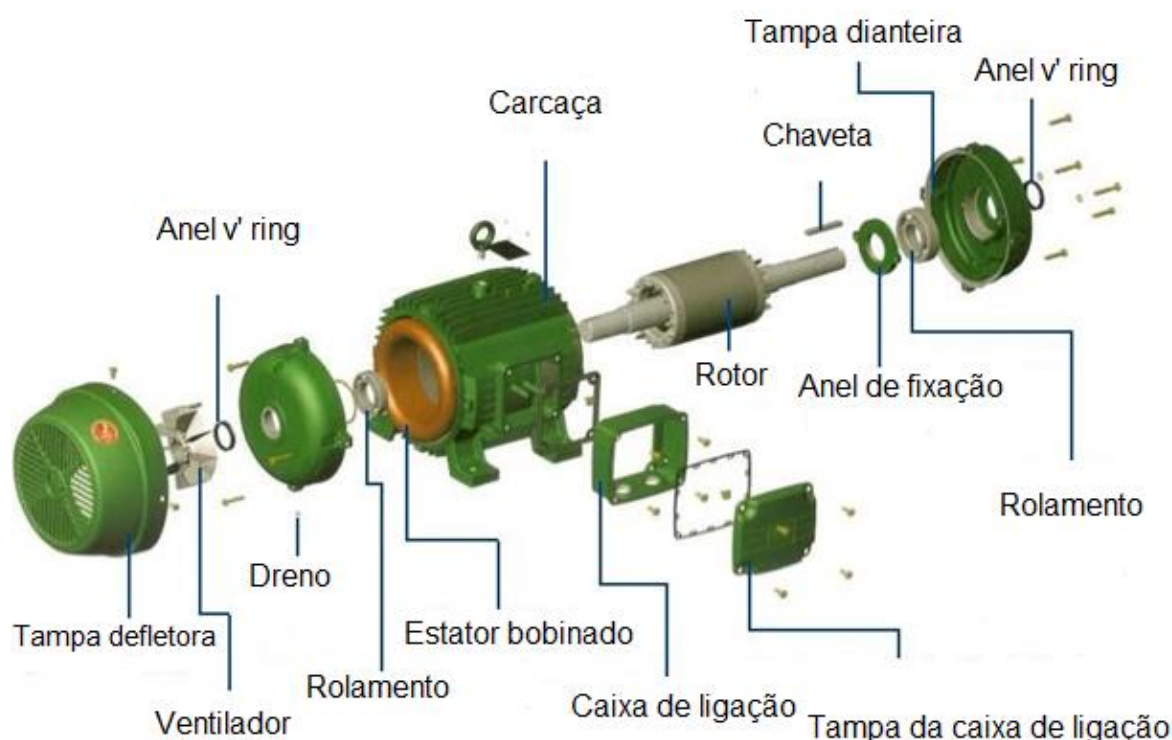
O estator é alocado na carcaça e é formado por um núcleo de placas magnéticas feitas para se ter o mínimo de perdas elétricas possíveis, e para fornecer suporte a bobinagem do motor, ou seja, é a parte aonde é alocada as bobinas feitas de fios de cobre isolado, sendo este o local por onde circula a corrente elétrica responsável por criar o campo magnético girante capaz de rotacionar o motor [4].

Para que se consiga gerar trabalho mecânico através desse campo magnético é necessário o rotor, sendo este a parte girante do MIT, basicamente o rotor é formado por três partes, eixo, núcleo de chapas magnéticas e os filamentos de alumínio, de onde se dá origem ao nome mais conhecido “gaiola de esquilos”, devido à semelhança do formato da injeção dos filamentos dentro das chapas magnéticas [4].

As principais partes são, o estator e o rotor, mas essas máquinas convencionais ainda são compostas por tampas, capa defletora, ventoinha, rolamentos, caixa de ligação, entre outros dependendo do modelo [5].

A figura 1 a seguir mostra as principais partes dos MITs para representar melhor o contexto retratado anteriormente.

Figura 1: Principais partes de um motor MIT.



Fonte: [5].

O funcionamento acontece quando a corrente elétrica é injetada nos terminais do motor, fazendo com que o mesmo crie um campo magnético em seu estator, em sequência inicia-se a interação com o rotor, que ocorre através do acoplamento magnético fazendo com que a gaiola de esquilos comece a sair do estado de inércia [4].

Este ponto de saída da inércia é o foco do estudo, principalmente quando se trata de motores de potência elevada, pois é o momento em que ocorrem os principais surtos no sistema da rede elétrica.

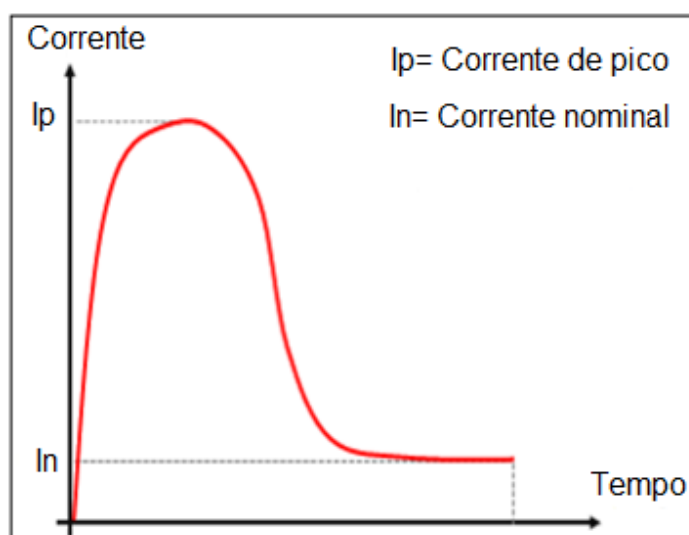
Esse surtos ocorrem devido aos elevados picos de corrente elétrica, os quais são grandes geradores de quedas de tensão, mesmo sendo rápidos exigem muito da rede, principalmente quando é analisado um conjunto com várias indústrias que possuem inúmeros motores, deste modo com todo este montante de acionamentos quando não se tem um método adequado há grandes oscilações no sistema elétrico de potência, pois na partida direta a corrente elétrica chega de 6 a 8 vezes a nominal do motor, dependendo do tipo de carga até 10 vezes [3].

2.2 QUEDA DE TENSÃO NA PARTIDA DE MOTORES ELÉTRICOS EM SISTEMAS INDUSTRIAIS

Um dos principais problemas ocasionados pelas indústrias é o afundamento de tensão, conhecido também como queda de tensão, causado em consequência da partida de grandes motores que necessitam de uma elevada corrente para o tirar do estado de inércia, levando em conta que algumas vezes é necessário realizar o acionamento de vários motores simultaneamente, isso faz com que os distúrbios na rede elétrica se agravem ainda mais [6].

A figura 2 mostra como os motores partindo diretamente reagem em termos de corrente elétrica em relação ao tempo.

Figura 2: Curva de corrente elétrica no acionamento de motores.



Fonte: [6], adaptado pelo autor.

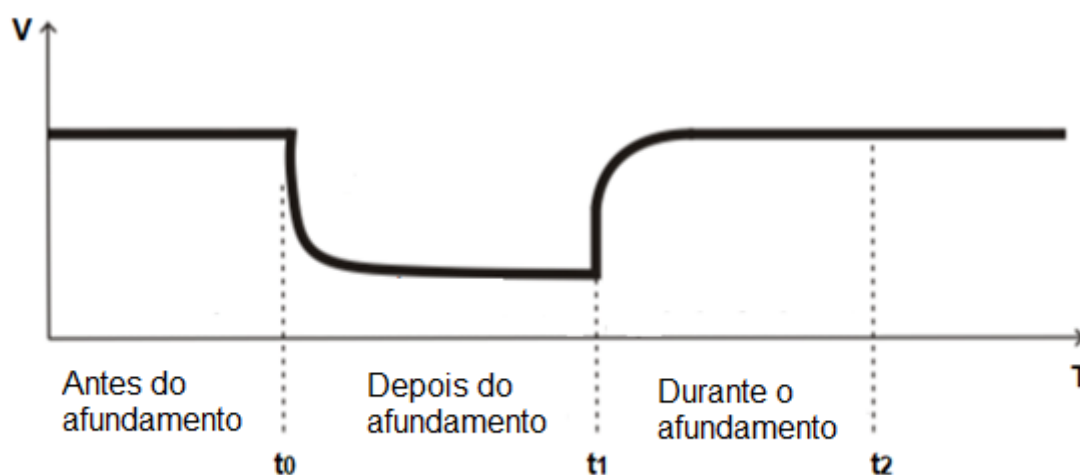
Sendo que o circuito elétrico é projetado para suportar a potência do motor em condições de trabalho em regime permanente, desta forma os picos de corrente elétrica de partida mesmo tendo um período de tempo curto submete o circuito a quedas de tensão, que podem danificar outros equipamentos da indústria, como retificadores, microprocessadores, CLP's, lâmpadas, contadores, sistemas de comando e proteção, equipamentos eletrônicos além de alterar as características de funcionamento de outros, como perder o sincronismo, perda de torque e por

consequência disso a produção pode ser interrompida causando prejuízos a empresa [7].

Os afundamentos de tensão são divididos em duas categorias: grandes perturbações e pequenas perturbações, para o caso dos motores elétricos é considerado como pequenas perturbações, pois é denominado como uma característica normal da carga, devido a sua resposta dinâmica, caso ao contrário as grandes perturbações surgem a partir de curto circuito no sistema elétrico [8].

A imagem 3 mostra o formato da onda de um afundamento de tensão.

Figura 3: Afundamento de tensão devido a resposta dinâmica do motor.



Fonte: [8].

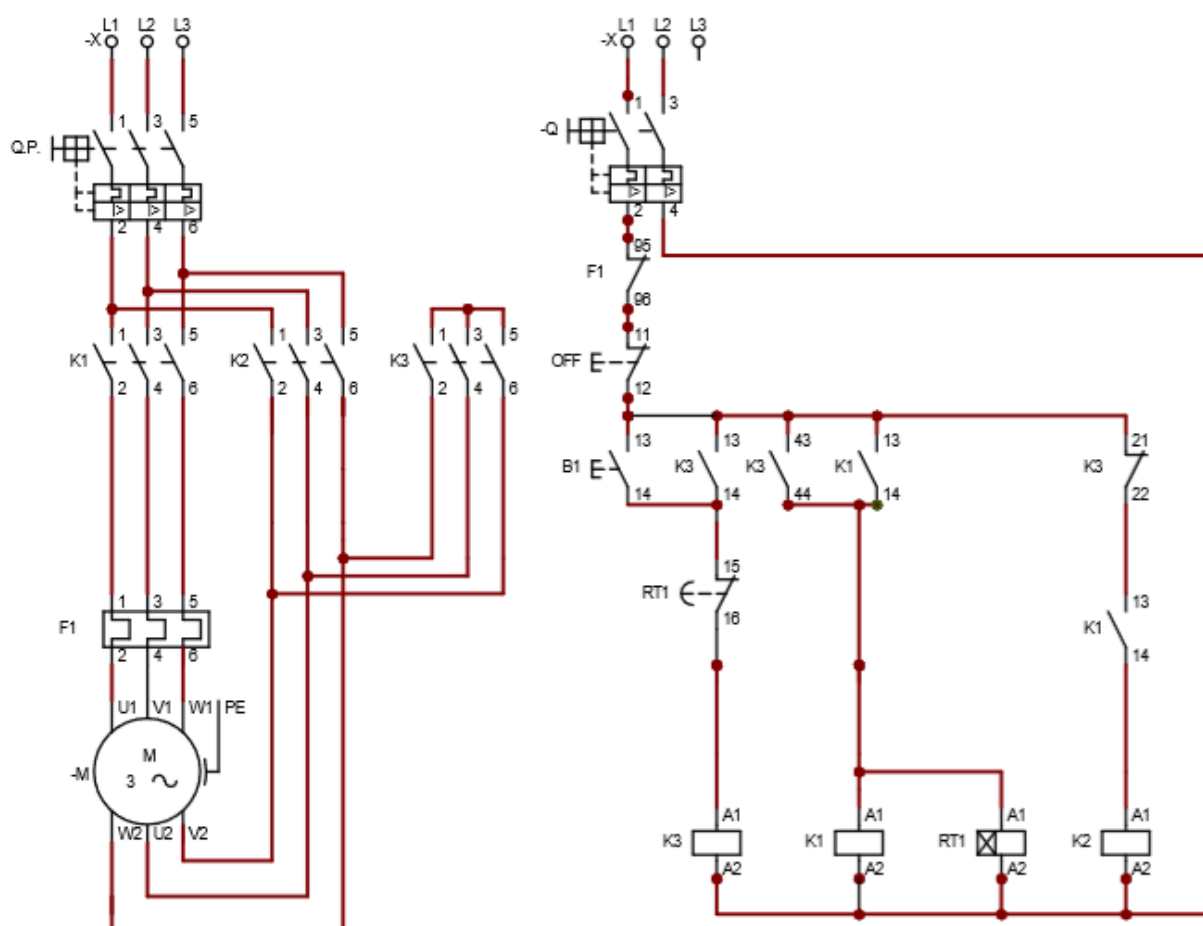
O tempo em que consiste o afundamento varia de acordo com o tipo de motor utilizado e das características da carga, quanto maior for esse tempo será mais prejudicial para o circuito, pois irá exigir mais esforço da rede elétrica, causando mais oscilações no sistema, conforme definido pela norma NBR 5410/ 04 [9]. Deve-se dimensionar os condutores elétricos de tal forma que a queda de tensão do motor em regime permanente não ultrapasse o estipulado pela concessionária local, sendo geralmente 5%, e para as partidas não se pode ultrapassar 10% [9].

2.3 PARTIDA ESTRELA-TRIÂNGULO

As chaves Estrela-Triângulo são muito utilizadas nas indústrias, afim de amenizar os surtos na rede elétrica causados pelas partidas dos MITs de altas potências, para que este método seja implantado existe a necessidade de que o motor satisfaça alguns quesitos básicos, sendo esses possuir tensão dupla nominal tal como 220/ 380, 380/ 660 Volts, dispor de no mínimo 6 terminais de saída, além de respeitar o conjugado e os parâmetros de partida de cada motor, para que não haja problemas por ultrapassar o limite de tempo de rotor bloqueado e por consequência não ocasionar em danos ao mesmo [4].

2.3.1 Diagrama multifilar de força e comando

Figura 4: Diagrama de força e comando da partida Estrela-Triângulo.



Fonte: [3], adaptado pelo autor.

2.3.2 Processos de funcionamento

Esse método é utilizado para partir máquinas a vazio e com alto conjugado de partida [3].

O arranque do motor ocorre com o fechamento de suas bobinas na maior tensão, ou seja, estrela, até que sua rotação alcance em torno de 80 a 90% da nominal, após isso o relé temporizador acionará o outro contator responsável pelo fechamento em triângulo, menor tensão [3]. Como esclarecido nos passos a seguir tendo como referência a figura 4:

1º- Fecha K3- Faz o fechamento em estrela.

2º- Fecha K1- Momento em que é acionado o motor na maior tensão.

3º- Conta tempo- Temporizar programado para comutar os contatos na faixa de 90% da rotação nominal.

4º- Abre K3- Desliga estrela.

5º- Fecha K2- Fecha triângulo, estado em que a máquina funciona em regime permanente.

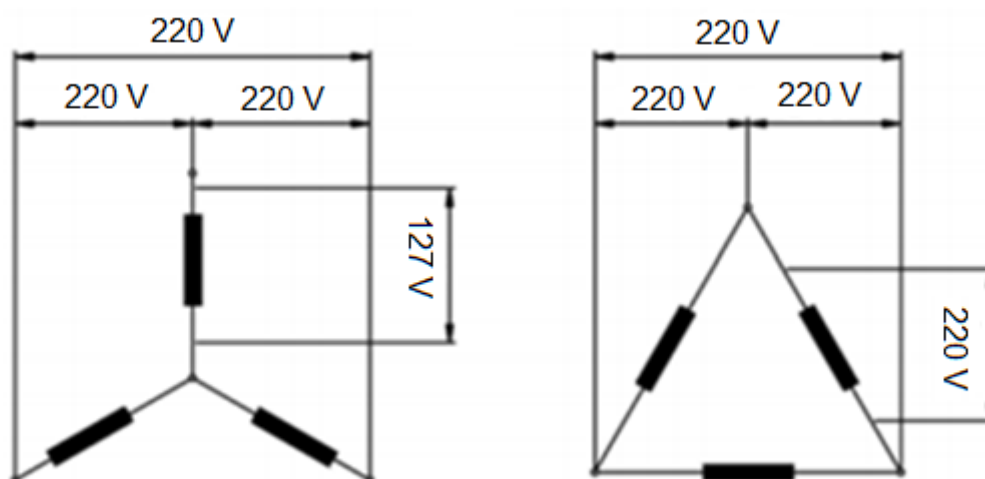
Para que o acionamento aconteça corretamente se deve ter cuidados com os fechamentos dos contadores para não ocorrer curto circuito, através do comando elétrico é feita a lógica de abertura e fechamento de cada um usando contatos auxiliares NA e NF, e respeitando a sequência demonstrada acima além do ajuste fino do relé temporizador [3].

2.3.3 Finalidade da partida Estrela-Triângulo

Ao partir um motor elétrico o nível de corrente de partida reduz em $1/3$ comparado com a partida direta, devido as bobinas estarem ligadas em triângulo e recebendo tensão fornecida para o funcionamento em estrela [10].

Conforme figura 5 a seguir, que mostra a injeção de tensão em Y e Delta.

Figura 5: Tensão na partida Estrela-Triângulo



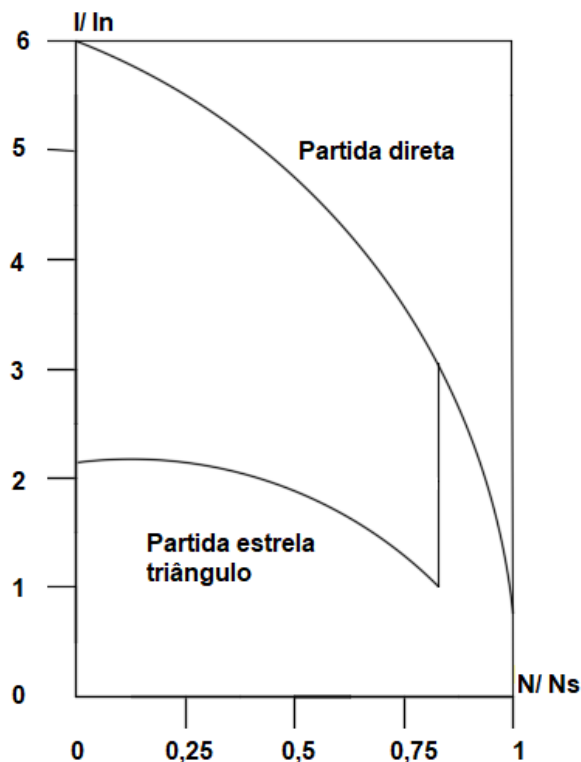
Fonte: [5].

Quando parte o motor em estrela tem-se uma partida mais suave, pois a tensão que circula por fase é reduzida para 127 Volts, a partir do momento em que a máquina passa a funcionar em triângulo a tensão por fase será 220 Volts, conforme demonstrado na figura anterior, por consequência a corrente diminui junto com a tensão, desta maneira reduz os esforços na rede elétrica [5].

Como demonstrado o conjugado de corrente diminui em 1/3 usando esta partida, porém deve-se levar em consideração no projeto que o conjugado de torque também reduz de forma significativa, o que pode ocasionar em problemas para alguns tipos de aplicações [11].

A figura 6 mostra as formas de ondas de corrente em relação ao tempo com e sem a utilização deste processo.

Figura 6: Corrente em relação ao tempo com a utilização de partidas diretas e Estrela-Triângulo.



Fonte: [3], adaptado pelo autor.

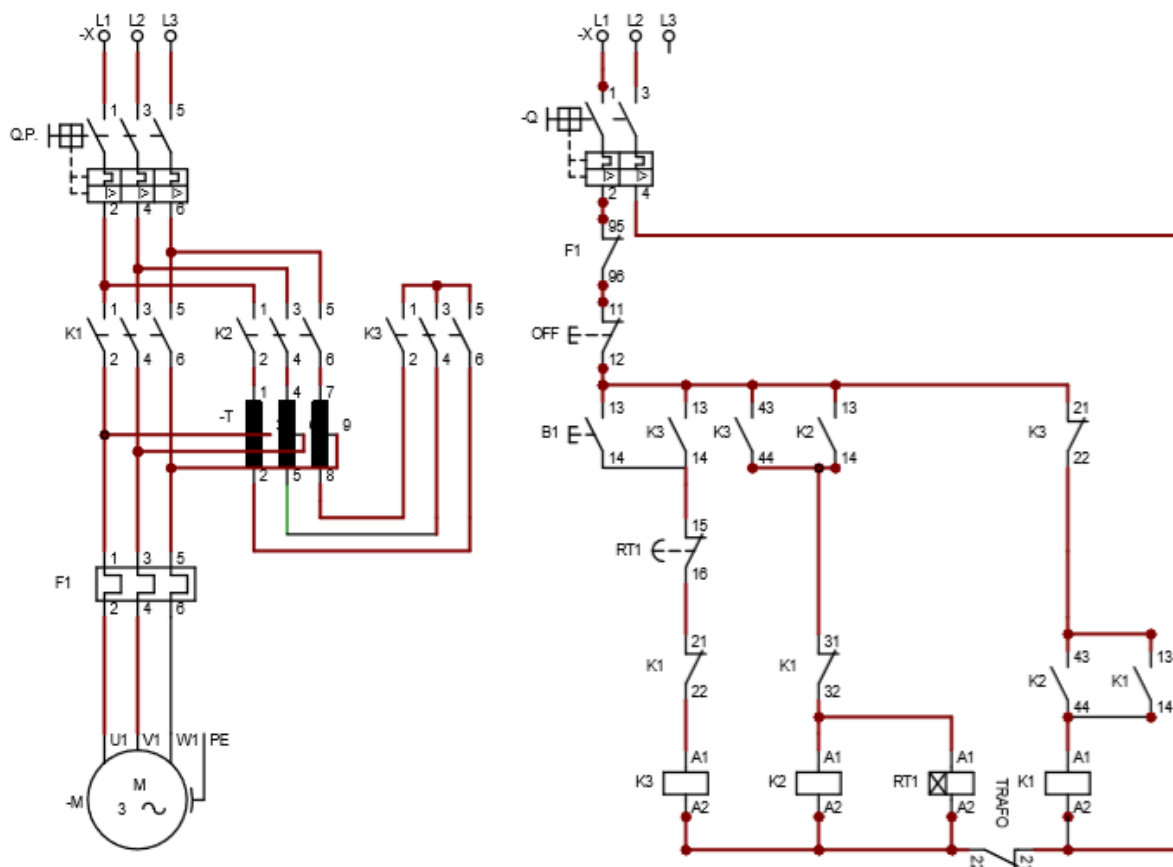
Como observado na figura 6, ocorre um pequeno pico de corrente no momento em que a máquina passa a funcionar em triângulo, além de ser bem menor em comparação a partida direta, ainda possui um tempo muito menor, assim acarretará no alívio da carga na rede elétrica e afundamentos de tensão, responsáveis por vários danos ao sistema elétrico de potência [11].

2.4 PARTIDA COM CHAVE COMPENSADORA

Partidas com Auto transformador podem ser realizadas com carga, diferente da anterior nesse caso o motor não precisa ter necessariamente duas tensões, pois a ligação é feita somente em uma, a tensão de partida é reduzida com auxílio de um Auto transformador que possui um *tap* que pode ser ajustado de acordo com a necessidade, geralmente esses *tap's* possuem regulagem de 50, 65 e 80 % da tensão da rede elétrica, para se ter a diminuição de 1/3 da corrente na partida como na chave Estrela-Triângulo usa-se 65 % do *tap* do compensador [5].

2.4.1 Diagrama multifilar de força e comando

Figura 7: Diagrama de força e comando da partida com Auto transformador.



Fonte: [3], adaptado pelo autor.

2.4.2 Processos de funcionamento

Esse processo é consiste na diminuição de tensão na partida, afim de reduzir a corrente necessária para tirar o motor do estado de inércia, tendo como característica suavizar o arranque da máquina, através de um Auto transformador com os terminais fechados em estrela e ligado em série com as bobinas do motor [12].

A referência de ajuste do *tap* é o tipo de carga utilizada no motor, quando a carga for leve geralmente é usado 50% da tensão nominal, quanto maior for a carga maior vai ser a tensão fornecida pelo transformador, afim de elevar o conjugado da máquina que por consequência faz aumentar a capacidade de aceleração da mesma [13].

A partida ocorre com a assistência do transformador que fica ligado até que a máquina estabilize seu funcionamento em regime permanente, esse processo de ligar e desligar o Auto transformador é feito através do comando elétrico, que conta com um relé temporizador ajustado de acordo com a necessidade da carga, esse relé tem a função de controlar o momento em que os contadores irão comutar, de maneira a partir corretamente e não fechar curto-circuito no sistema elétrico, quando o motor atinge a velocidade de equilíbrio o transformador é desligado e seus terminais passam a receber tensão nominal [3].

Os passos a seguir demonstram a maneira correta das manobras a serem feitas para este método de partida, tendo como referência a figura 7:

1º- Fecha K3- Responsável pela comutação em estrela do Auto transformador.

2º- Fecha K2- Momento do acionamento do motor com tensão ajustada de acordo com a regulação do *tap*.

3º- Conta tempo- Temporizador programado para mudar a posição dos contatos no momento em que ocorrer a estabilização da velocidade de equilíbrio da máquina.

4º- Abre K3- Desliga o fechamento do transformador em estrela.

5º- Fecha K1- Funcionamento em regime permanente, aonde o motor passa a receber a tensão nominal da rede elétrica.

6 º- Abre K2- Momento em que o transformador deixa de fazer parte do sistema.

Como nos outros casos, este método também necessita seguir corretamente a sequência de manobras feitas através do comando elétrico, para que não ocorra problemas com o transformador [3].

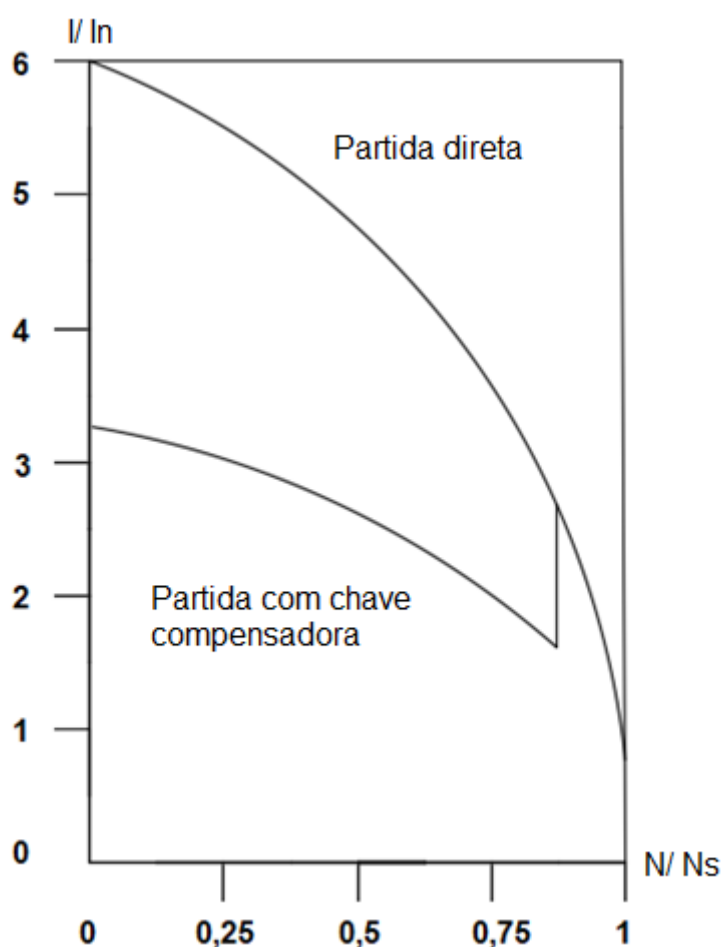
2.4.3 Finalidade da partida compensadora

A partida compensadora é alternativa a chave Estrela-Triângulo, esse método tem como função reduzir a tensão na partida dos MITs através de um Auto

transformador equipado por um *tap* ajustável, projetado para aliviar os picos de corrente elétrica de partida, e para melhorar o sistema de aceleração de máquinas sob cargas, isso para que o motor arranque de maneira suave e por consequência permita maior durabilidade dos mecanismos que formam o equipamento [11].

A figura 8 a seguir mostra o formato de onda de corrente na partida compensadora:

Figura 8: Corrente em relação ao tempo com a utilização de partidas com Auto transformador.



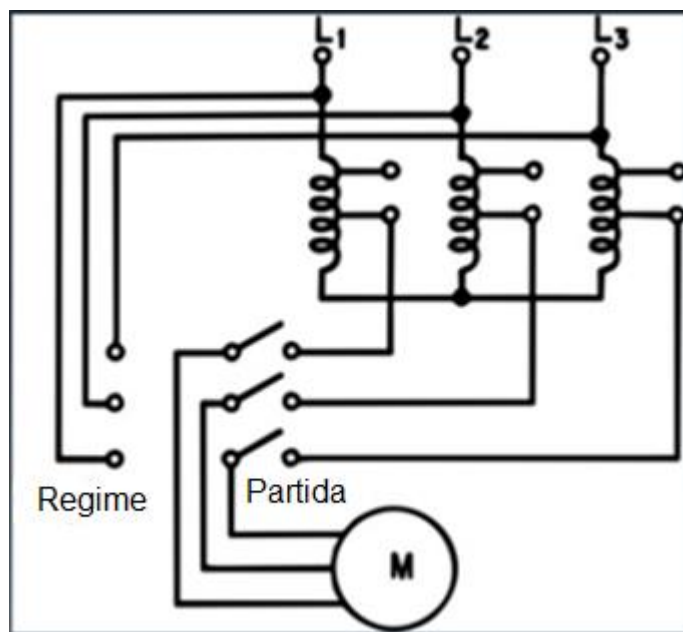
Fonte: [3]. adaptado pelo autor.

O formato de onda dos dois métodos de partidas retratados até o momento é semelhante, porém a partida atual causa um pico de corrente mais leve que a anterior [3].

O pico de corrente elétrica no processo de troca de tensão é bem pequeno,

devido ao motor não ser desligado quando o compensador deixa de fazer parte do circuito, isso faz com que somente ocorra o pico de corrente proporcional a tensão que está mudando de estado, ou seja, tensão nominal de serviço permanente [14].

Figura 9: Demonstração do Auto transformador.



Fonte: [3].

Esse modelo de partida possui restrições de uso, o número de manobras é limitado devido ao esforço exigido pelo transformador, se ocorrer o acionamento a todo momento irá sobreaquecer e danificar o equipamento, alguns modelos possuem termopares limitadores de partida para que não haja danos caso aqueça além do normal, pois este equipamento possui preço elevado comparado com o restante do sistema [15].

2.5 *SOFT-STARTERS*

As chaves eletrônicas *Soft-Starters* são usados para controlar a partida e parada de motores, afim de limitar a corrente de partida para não haver picos prejudiciais à rede elétrica, além de suavizar a aceleração e desaceleração podendo ser ajustado conforme a necessidade da máquina, isso sem alterar a frequência fundamental de trabalho [16].

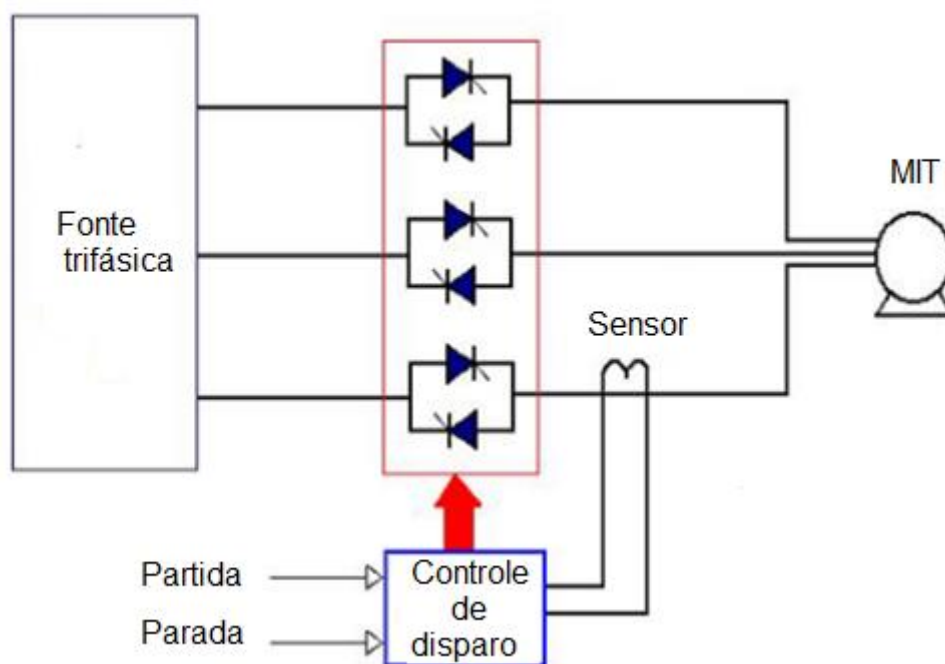
O *Soft-Starter* tem a função de limitar a tensão de partida nos MITs, essa tensão cresce progressivamente com o decorrer do tempo de aceleração tornando esse processo suave e sem trancos, aumentando a vida útil de todo o sistema acoplado, além de reduzir de maneira muito relevante os picos de corrente na partida [3].

2.5.1 Processos de funcionamento

Os *Soft-Starters* funcionam através de microprocessadores que controlam os tiristores compostos em ponte antiparalelo, responsáveis por enviar a tensão para os terminais do motor, o controle de tensão na partida e parada do motor acontece através da variação do ângulo de disparo dos tiristores [3].

A figura 10 mostra como é formada a ponte em antiparalelo do *Soft-Starter*:

Figura 10: Ponte de tiristores do *Soft-Starter*.



Fonte: [16].

Como observado na figura 10 o sistema é formado por 6 componentes eletrônicos de disparo, sendo divididos em dois por fase, alocados na forma antiparalelo, o sistema de controle é o responsável por definir o momento correto de condução de cada componente, de acordo com a rampa de aceleração a ser

utilizada [16].

O processo de funcionamento interno do equipamento é dividido em dois circuitos, sendo eles, circuito de potência e de controle.

2.5.2 Circuito de potência

O circuito de potência é basicamente o local pelo qual circula a corrente levada até o motor, formado por tiristores responsáveis pelos disparos de tensão, e para o monitoramento de corrente de saída há um TC, como demonstrado pela nomenclatura “sensor” na figura 11, isso para que aconteça o controle de limitação de corrente dentro do equipamento eletrônico [3].

2.5.3 Circuito de controle

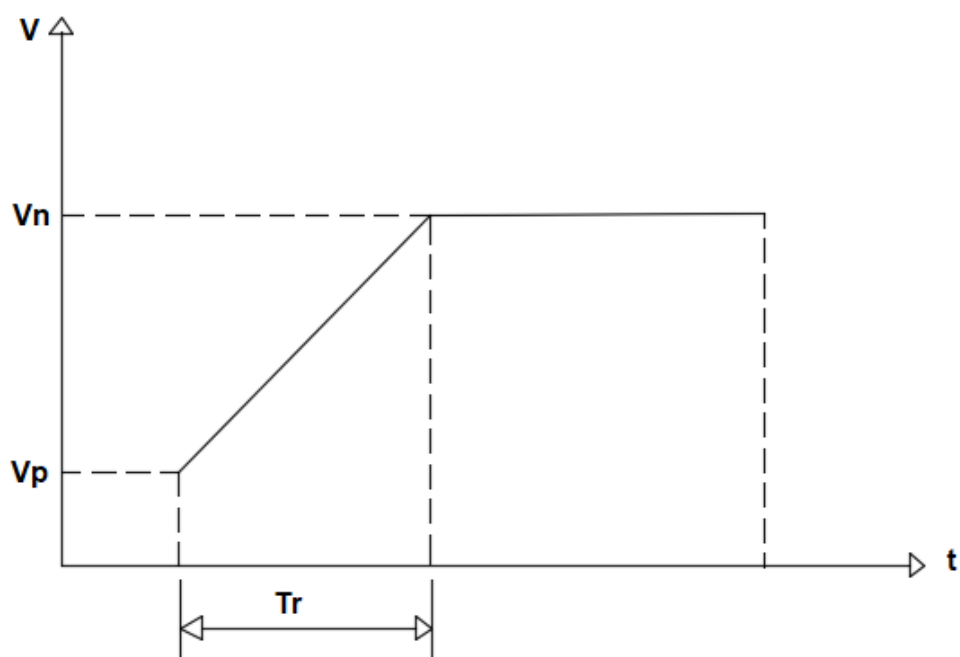
Chamado circuito de controle todo aquele associado aos ajustes de rampas de aceleração, desaceleração, proteção e monitoramento entre outros ajustes finos disponibilizados pelo equipamento, sendo que o operador tem acesso através de uma interface homem máquina digital [3].

2.5.4 Aceleração

Esse processo pode ser ajustado na IHM do equipamento, seguindo os passos presentes no manual de fabricação, para que a partida ocorra de maneira suave é necessário ajustar o tempo de aceleração e a tensão inicial, a partir disso a tensão subirá linearmente como uma rampa em relação ao tempo programado até chegar a nominal [16].

A figura 11 mostra como funciona o processo de aceleração de um motor elétrico através do *Soft-Starter*.

Figura 11: Aceleração com uma chave de partida *Soft-Starter*.



Fonte: [16], adaptado pelo autor.

Sendo que:

V = Tensão

t = Tempo

V_n = Tensão nominal.

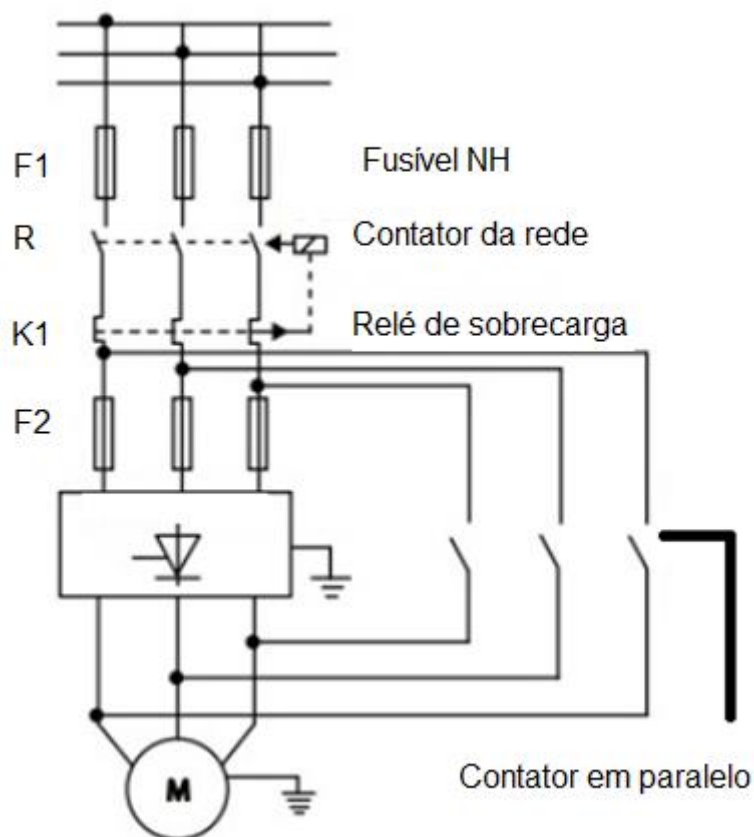
V_p = Tensão de partida.

t_r = Tempo da rampa de aceleração.

A tensão de partida e o tempo de aceleração são ajustados de acordo com a carga e o motor utilizados no sistema [16].

Como equipamentos eletrônicos estão submetidos a aquecimentos normalmente é utilizado o método chamado de *by-pass*, que tem a função de retirar o equipamento de funcionamento a partir do momento em que a tensão de saída for a nominal da rede elétrica, esse processo é feito através de um contator em paralelo, com a finalidade de aumentar a vida útil dos componentes [17].

Figura 12: Contator de *By-pass*.



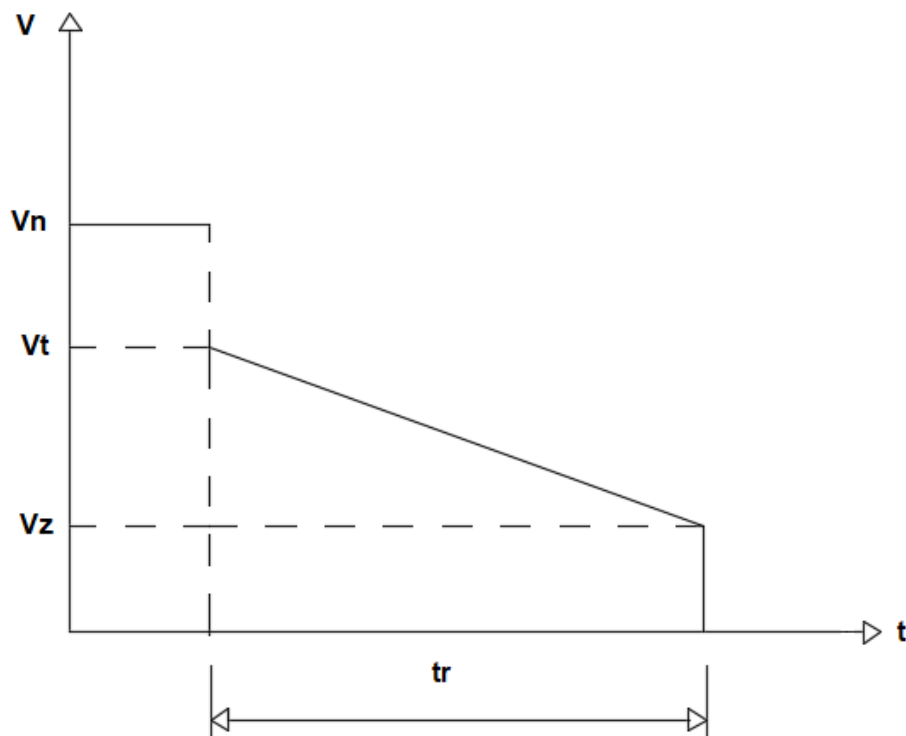
Fonte: [3], adaptado pelo autor.

2.5.5 Desaceleração

A frenagem também pode ser regulada de acordo com a necessidade da máquina, na programação do equipamento é estabelecido os valores de tempo e tensão da rampa de desaceleração [16].

A figura 13 logo em sequência demonstra de maneira mais objetiva a maneira que a rampa de desaceleração do *Soft-Starter* funciona, de acordo com a necessidade da máquina utilizada.

Figura 13: Desaceleração *Soft-Starter*



Fonte: [3], adaptado pelo autor.

Sendo que:

V = Tensão

t = Tempo

V_n = Tensão nominal

V_t = Início da desaceleração

V_z = Tensão de parada do motor

t_r = Tempo de desaceleração

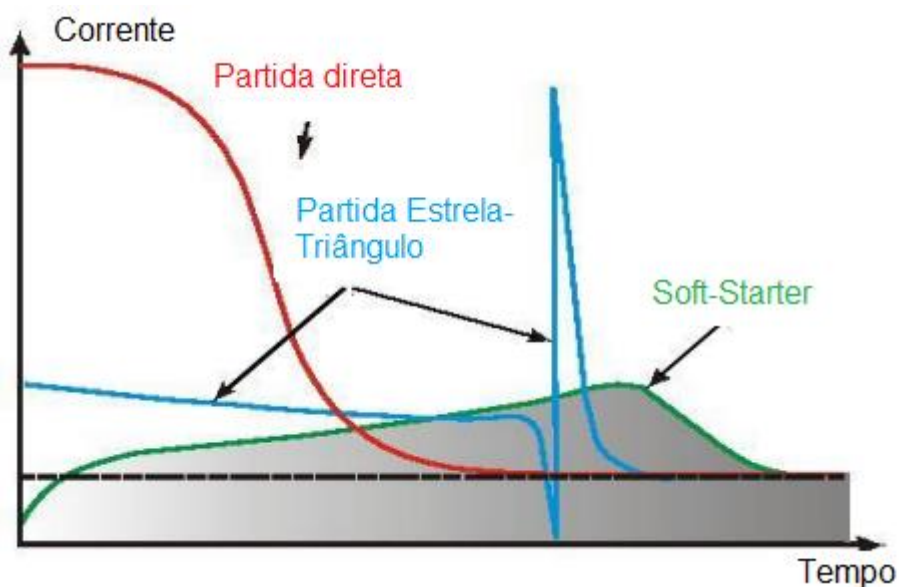
2.5.6 Finalidade do *Soft-Starter*

Tem a finalidade de proporcionar rampas de aceleração e desaceleração suaves sendo controlado através de dispositivos eletrônicos, além dispor da proteção do motor ligado a ele, como proteções contra sobre correntes, subcorrentes, falta de fase, sobrecargas, isso dependendo do modelo utilizado [11].

Sobre os métodos já destacados esse traz ainda mais benefícios a rede

elétrica, pois praticamente não a picos de corrente, e sim leves rampas como demonstrado na sequência tendo em relação ao método direto e Estrela-Triângulo [11].

Figura 14: Comparação do *Soft-Starter* com relação a outros métodos destacados.



Fonte: [16].

2.6 INVERSOR DE FREQUÊNCIA

O inversor de frequência é um equipamento muito utilizado na atualidade, pois ele pode controlar inúmeros parâmetros de um motor elétrico, sendo os mais utilizados controle preciso de torque e velocidade tanto na partida quanto em regime permanente, rampas de aceleração e desaceleração, ajustes para a proteção do sistema acoplado a ele, para se ter um maior nível de segurança além de melhorar o aproveitamento da energia elétrica [18].

A frequência fornecida pela rede elétrica é a responsável por determinar a velocidade síncrona do campo elétrico do motor, o inversor atua na alteração da frequência nos terminais de entrada da máquina elétrica, quando a frequência de saída do equipamento eletrônico for menor que a nominal, a rotação por consequência será menor, caso seja maior a rotação por sua vez também será maior, esses parâmetros de frequência de saída podem ser controlados através da IHM de acordo com a necessidade da máquina interligada a ele [4].

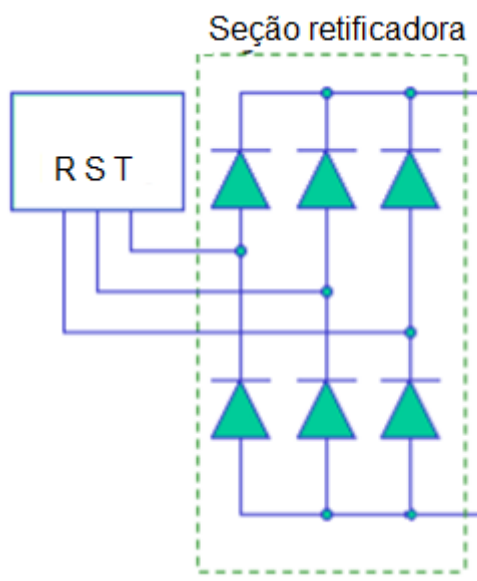
2.6.1 Processos de funcionamento

O circuito de potência dos inversores utilizados em motores elétricos possui três etapas de funcionamento, sendo elas, retificação de entrada, filtragem e por fim o circuito inversor responsável pelo chaveamento, além do controle que é encarregado de controlar as etapas de potência [3].

2.6.2 Retificação e filtragem

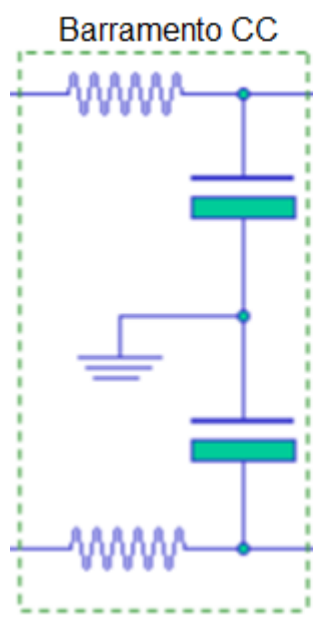
O primeiro processo do inversor de frequência é a retificação da tensão trifásica CA, fornecida pela rede elétrica local, através de um retificador de onda completa a tensão alternada é transformada para contínua, desta forma a tensão CC é levada até o circuito de controle que é responsável por comandar os processos do inversor [18].

Figura 15: Ponte de onda completa do inversor de frequência.



Fonte: [19].

O retificar é composto por 6 diodos responsáveis pelo processo de retificação, com isso é gerada uma certa ondulação que é minimizada através do barramento CC, como representado na figura 16 a seguir [19]:

Figura 16: Barramento CC.

Fonte: [19].

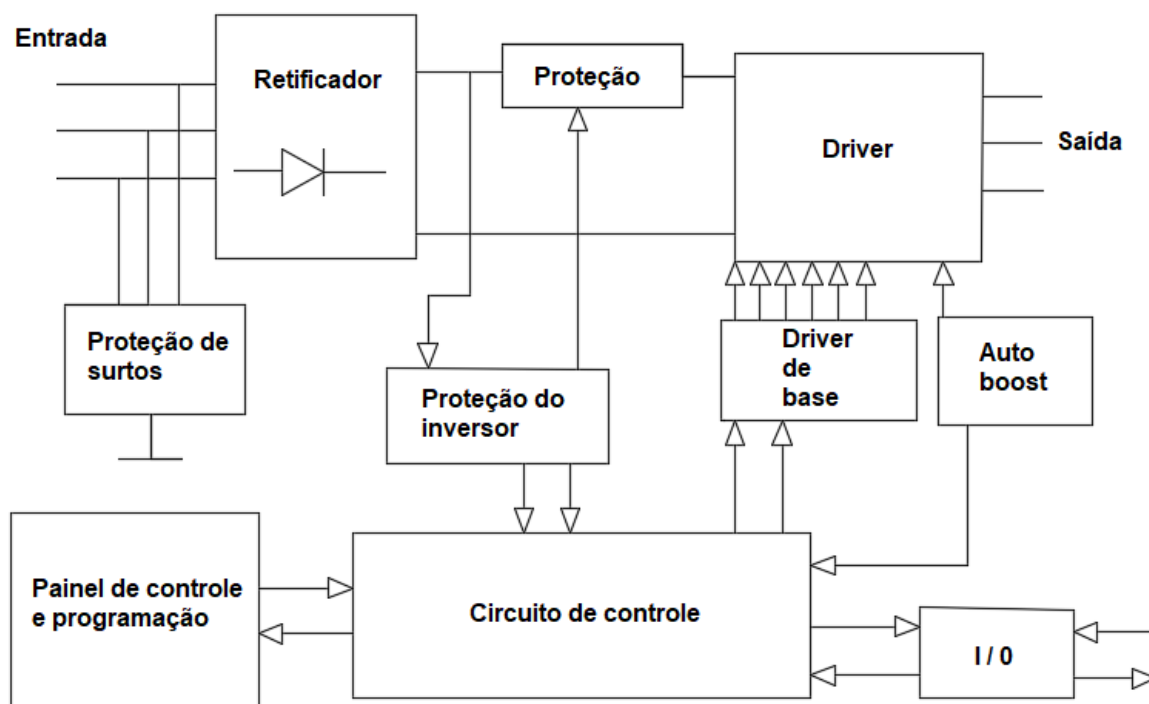
O objetivo desse barramento é suavizar as ondulações geradas pelo processo de retificação, os capacitores têm a finalidade de reduzir as ondulações da tensão e os indutores as oscilações da corrente [19].

2.6.3 Controle

O circuito de controle é formado por inúmeros processos responsáveis por todo o funcionamento do equipamento, é a principal parte do inversor de frequência pois o controle contém os microcontroladores, encarregados de liberar os pulsos responsáveis por comandar os transistores de potência, e o chaveamento de saída do equipamento [3].

A figura 17 em sequência demonstra o diagrama de controle, responsável pela organização e leitura de todo o processo do equipamento eletrônico, expresso através do diagrama de blocos.

Figura 17: Circuito de controle dentro do diagrama de blocos



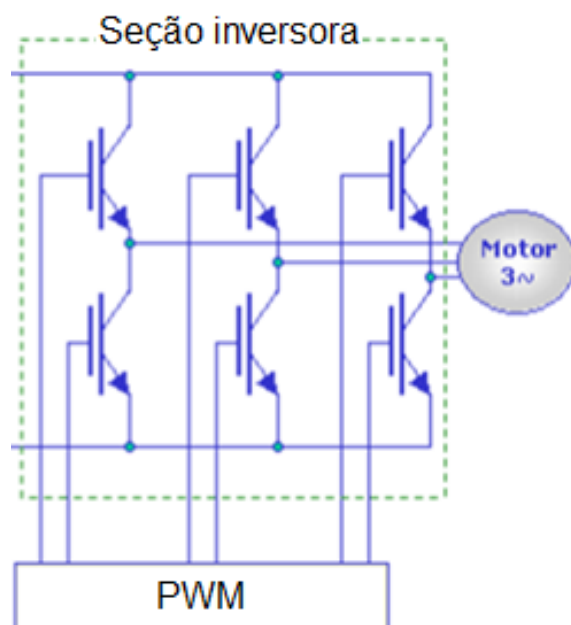
Fonte: [18], adaptado pelo autor.

2.6.4 Inversor

O conjunto inversor é a parte de saída do inversor de frequência, após a passagem pelas etapas de retificação para CC e filtragem, a tensão deverá ser convertida novamente para CA, isso ocorre através de um conjunto de transistores conhecidos como *IGBTs* responsáveis por fechar e abrir de acordo com o sinal enviado pelo controle [19].

A figura 18 a seguir demonstra o diagrama da seção inversora do dispositivo, o qual é responsável por fornecer a tensão de saída do equipamento, a qual irá alimentar a máquina elétrica.

Figura 18: Circuito inversor.



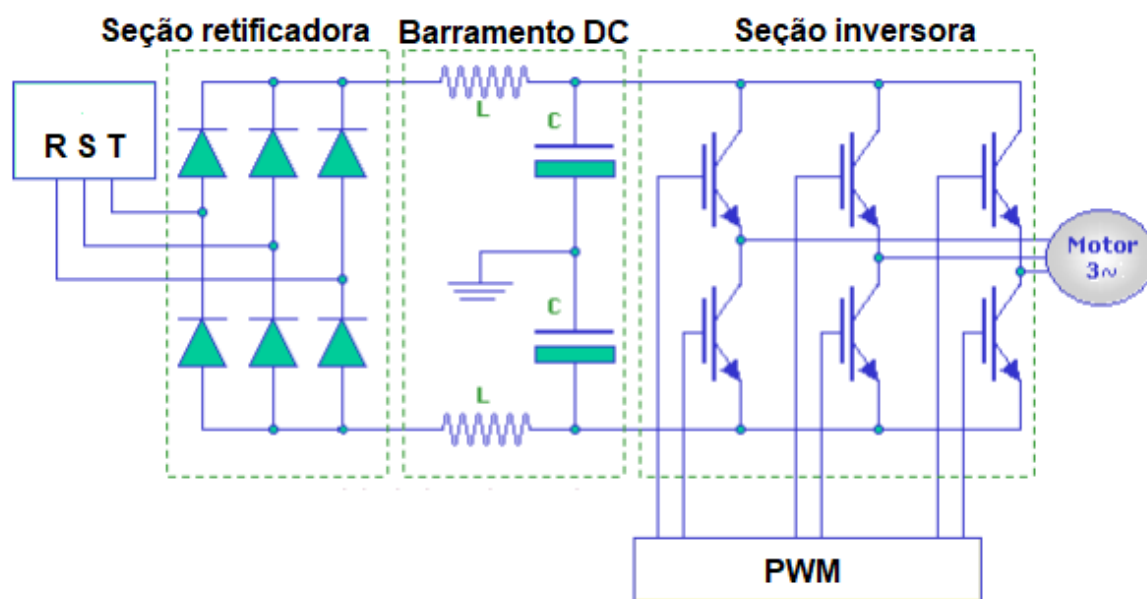
Fonte: [19].

O sinal de saída deve ter defasagem de 120° elétricos entre as fases, o chaveamento dos transistores é responsável pela frequência de saída, se o ciclo de chaveamento for rápido o tempo para completar esse ciclo será menor, por efeito a frequência aumenta, e para o caso contrário se o chaveamento for lento a frequência diminui [19].

2.6.5 Finalidade do inversor de frequência

O inversor de frequência é usado nas indústrias com a finalidade de alterar funcionalidades dos motores elétricos, possui vários parâmetros para ajustes, principalmente a alteração da rotação através da inversão de frequência, ajustes de rampas de aceleração e desaceleração e para o sistema de proteção [3].

Figura 19: Circuito completo inversor de frequência.



Fonte: [19].

Pelas amplas possibilidades de controle e alterações de parâmetros, esse equipamento é muito utilizado em máquinas que devem ter variações de rotação durante o funcionamento, essa tecnologia é muito empregada também para regulação de vazão de água em bombas elétricas, que através da frequência pode-se ajustar a velocidade ideal para o bombeamento de água [20].

3 METODOLOGIA

3.1 SELEÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS

O trabalho baseia-se em dimensionar as partidas retratadas anteriormente, utilizando os dados nominais de três potências de MITs, afim de obter a forma mais viável economicamente, para as determinadas faixas de potência escolhidas, atendendo aos requisitos pré-estabelecidos para cada um dos tipos de motores.

Para a sequência do projeto será feito a análise das partidas utilizando os dados nominais de três motores, sendo que estes modelos somente servirão para a retirada das características nominais de tabela, devido à ausência dessas máquinas para testes, para que em sequência as partidas sejam dimensionadas de acordo com os dados.

A metodologia a ser adotada tem o intuito de escolher a melhor forma de partida em termos de custo benefício para cada uma das potências escolhidas, visando também demonstrar como se comportara os níveis de custo de cada método de partida, em relação a variação das potências escolhidas.

A análise será feita através de características nominais de três motores da WEG de uso industrial, sendo as potências utilizadas de 25, 75 e 150 CV respectivamente, do seguinte modelo relatado na tabela 1 anexada em sequência.

Tabela 1: Motor utilizado como base para a retirada de características nominais.

	Modelo- W22 IR2
	Potências- 25, 75 e 150 CV
	Frequência- 60 Hz
	Tensão- 220, 380 V
	Polos- 2
	Grau de proteção- IPW55
	Forma construtiva- B34D
	Refrigeração- IC411- TFVE
	Eficiência- 91.5- 93.0- 93.8 %
	FP- 0.87- 0.86- 0.89

Fonte: [5], adaptado pelo autor

A partir deste princípio será feito o dimensionamento das partidas, para então analisar a viabilidade econômica desses métodos no sistema industrial, e desta maneira chegar a uma conclusão para a melhor forma economicamente de acionamento dos três modelos de MITs, abordados como referência neste projeto.

3.2 MÉTODOS UTILIZADO PARA O DIMENSIONAMENTO DAS PARTIDAS

Todos os métodos de acionamento foram dimensionados através das características nominais de cada máquina elétrica, cada uma delas foi analisada para que fossem escolhidos os equipamentos adequados para cada tipo de acionamento.

O dimensionamento dos componentes utilizados em cada método foi feito através do catálogo de partidas e proteção de motores elétricos disponibilidade pelo site da WEG [21], para todos foram adotados os mesmos métodos de análise e dimensionamento para chegar no melhor resultado possível.

A grande maioria dos equipamentos escolhidos para a orçamentação foram da marca WEG, sendo estes, contadores, relés, disjuntores, fusíveis, seccionadoras, *Soft-Starter*, inversor de frequência, motores, com algumas exceções, sendo elas, as botoeiras, quadros de comando e Auto transformadores de partida, devido a disponibilidade no mercado de compras e afim de reduzir custos.

3.3 ACIONAMENTO MOTOR 25 CV

Para esta classe de potência foi utilizado como referência os dados de placa de um motor trifásico de 25 CV, do modelo mencionado anteriormente da tabela 1, sendo que os componentes utilizados para o dimensionamento das partidas estão expostos nas tabelas seguintes.

3.3.1 Estrela-Triângulo

A tabela 2 na sequência representa quais os componentes utilizados para o dimensionamento da partida Estrela-Triângulo para o motor 25 CV.

Tabela 2: Componentes utilizados para partida Estrela-Triângulo 25 CV.

Partida Estrela-Triângulo
- Relé falta de fase Weg Rpw-ffd66 220v-240v
- Disjuntor classe D Mpw 65-3-u065 Weg
- K1- Contator tripolar Cwm40-00-30v26 40a 220Vac Weg
- K2- Contator tripolar Cwm40-00-30v26 40a 220Vac Weg
- K3- Contator tripolar Cwb25-11-30d23 25a 220Vac 1na+1nf Weg
- Relé térmico de sobrecarga Weg Rw67-1d3-u040 25 A - 40 A
- Relé eletrônico de tempo Estrela Triângulo 3s-30s 220v Rtw17 Weg
- Botão liga desliga faceado Cew-bdm-11000000 Weg 1na + 1nf
- Botão de emergência 16mm trava Abb Weg Siemens 2nf
- Quadro de comando, caixa montagem 600x400x200 mm

Fonte: [5], adaptado pelo autor.

3.3.2 Partida com chave Compensadora

A tabela 3 a seguir representa quais os componentes usados para o dimensionamento da partida com chave compensadora para o motor 25 CV.

Tabela 3: Componentes para partida com chave compensadora 25 CV.

Partida com Chave Compensadora
- Relé falta de fase Weg Rpw-ffd66 220v-240v
- Disjuntor motor Mpw 65-3-u065 Weg
- K1- Contator tripolar Cwm65-00-30v26 65a 220Vac Weg
- K2- Contator tripolar Weg Cwm50-00-30d23 50a 220v
- K3- Mini contator tripolar Weg Cwc16 1na 220vca 16 ^a
- Relé térmico de sobrecarga Weg Rw67-2d3-u070 57 A - 70 A
- Relé eletrônico de tempo 3s-30s 220v Rtw17 Weg
- Botão liga desliga faceado Cew-bdm-11000000 Weg 1na + 1nf
- Botão de emergência 16mm trava Abb Weg Siemens 2nf
- Auto transformador de partida 25CV, 220v
- Quadro de comando metal 800x 500x 200 mm

Fonte: [5], adaptado pelo autor.

3.3.3 Partida com chave *Soft-Starter*

Para este método o equipamento escolhido para o cálculo de viabilidade econômica é o *Soft-Starter* CV 30/ 60 CV WEG 220, 380 Volts, o qual é representado na figura 20 a seguir:

Figura 20: Figura ilustrativa *Soft-Starter* SSW07 25 CV.



Fonte: [22].

Para sua aplicação é necessário mais alguns itens, sendo estes descritos na tabela 4 apresentada na sequência:

Tabela 4: Componentes para acionamento com chave *Soft-Starter* 25 CV.

Partida com chave <i>Soft-Starter</i>
- Chave de partida <i>Soft-Starter</i> Weg SSW07 85a 30/60 CV 220/380 v
- Quadro de Comando elétrico Ip-66 800 A X 600 L X 250 P
- Mini Ventilador 120mm 110v 220v Em Alumínio Metaltex
- Botão liga desliga faceado Cew-bdm-11000000 Weg 1na + 1nf

Fonte: [5], adaptado pelo autor.

3.3.4 Partida com inversor de frequência

Para este método foi escolhido um inversor de frequência da marca WEG, do modelo CFW09 25 CV 220 Volts, como o demonstrado pela figura ilustrativa 21.

Figura 21: Figura ilustrativa inversor de frequência CFW09 25 CV.



Fonte: [23].

Usando os dados de fabricação para dimensionar o sistema teve-se a necessidade da aplicação dos seguintes equipamentos [3].

Tabela 5: Componentes auxiliares para partida com inversor de frequência 25 CV

Partida com inversor de frequência
- Inversor de frequência Weg CFW09 25CV 220v
- Quadro de comando elétrico Ip-66 800 A X 600 L X 350 P
- Mini ventilador 120mm 110v 220v em alumínio Metaltex
Fonte: [5], adaptado pelo autor.

3.4 ACIONAMENTO MOTOR 75 CV

Para esta categoria de potência foi utilizado um motor trifásico de 75 CV como base, do modelo mencionado anteriormente da tabela 1, sendo que os componentes utilizados para o dimensionamento das partidas estão descritos nas próximas tabelas.

3.4.1 Estrela-Triângulo

A tabela 6 a seguir representa quais os componentes utilizados para o dimensionamento da partida Estrela-Triângulo para o motor 75 CV.

Tabela 6: Componentes utilizados para partida Estrela-Triângulo 75 CV.

Partida Estrela-Triângulo
- Relé Falta De Fase Weg Rpw-ffd66 220v-240v
- Disjuntor Weg Dwb250n185-3df caixa moldada tripolar 200 A
- K1- Contator tripolar Cwm105-00-30v26 105a 220Vac Weg
- K2- Contator tripolar Cwm105-00-30v26 105a 220Vac Weg
- K3- Contator Weg Cwm65-00-30v26 220v
- Relé sobrecarga Weg Rw117-1d3-u112 90-112 A
- Relé eletrônico de tempo Estrela-Triângulo 3s-30s 220v Rtw17 Weg
- Botão liga desliga faceado Cew-bdm-11000000 Weg 1na + 1nf
- Botão de emergência 16mm trava Abb Weg Siemens 2nf
- 1 Quadro de comando 1000x 600x 350 mm
Fonte: [5], adaptado pelo autor.

3.4.2 Partida com chave Compensadora

A tabela 7 a seguir representa quais os componentes utilizados para o dimensionamento da partida com chave compensadora para o motor 75 CV.

Tabela 7: Componentes utilizados para partida com chave compensadora 75 CV.

Partida com chave Compensadora
- Relé falta de fase Weg Rpw-ffd66 220v-240v
- Disjuntor Weg Dwb250n185-3df tripolar 200 A
- K1- Contator tripolar Weg Cwm180-22-30e13 220v 75CV 2na+2nf
- K2- Contator Weg Cwm112-22-30v26 tripolar 112a 2na+2nf 220v 60hz
- K3- Contator tripolar Cwm40-00-30v26 40a 220Vac Weg
- Relé de sobrecarga Rw317-1d3 140-215 Weg
- Relé eletrônico de tempo 3s-30s 220v Rtw17 Weg
- Botão liga desliga faceado Cew-bdm-11000000 Weg 1na + 1nf
- Botão de emergência 16mm trava Abb Weg Siemens 2nf
- Auto transformador De Partida 75CV, 220v, Ip00
- Caixa De Montagem 1200x 800x 350 mm

Fonte: [5], adaptado pelo autor.

3.4.3 Partida com chave *Soft-Starter*

Neste método o equipamento escolhido para o cálculo de viabilidade econômica é o *Soft-Starter* SSW07 200 A para 75 CV da marca WEG 220 Volts, o qual é representado na figura 22 a seguir:

Figura 22: Figura ilustrativa *Soft-Starter* SSW07 75 CV.



Fonte: [22].

Para sua aplicação é necessário mais alguns itens, sendo estes descritos na tabela 8 apresentada na sequência:

Tabela 8: Componentes para acionamento com chave *Soft-Starter* 75 CV.

Partida com chave <i>Soft-Starter</i>
- Chave de partida <i>Soft-Starter</i> Weg SSW07 200a + Ihm Local 220- 575 Volts
- Quadro de Comando Ip-66 1000 A X 600 L X 350 P
- Mini Ventilador 120mm 110v 220v em alumínio Metaltex
- Botão liga desliga faceado Cew-bdm-11000000 Weg 1na + 1nf

Fonte: [5], adaptado pelo autor.

3.4.4 Partida com inversor de frequência

O equipamento escolhido para cálculo de viabilidade econômica é um inversor de frequência da marca WEG, do modelo CFW09 75 CV 220 Volts, como o demonstrado pela figura ilustrativa 23.

Figura 23: Figura ilustrativa inversor de frequência CFW09 75 CV.



Fonte: [23].

Usando os dados de fabricação para dimensionar o sistema se teve a necessidade da aplicação dos seguintes equipamentos [3]. Conforme tabela 9.

Tabela 9: Componentes auxiliares para o inversor de frequência 75 CV.

Partida com inversor de frequência
- Inversor de frequência Weg CFW09 75CV 220 Volts
- Quadro de comando elétrico 1200 A X 800 L X 350 P
- Mini Ventilador 120mm 110v 220v em alumínio Metaltex

Fonte: [5], adaptado pelo autor.

3.5 ACIONAMENTO MOTOR 150 CV

Para a maior potência escolhida afim de analisar a viabilidade econômica dos tipos de acionamentos elétricos, teve como base o uso de dados e características de fábrica de um motor Weg 150 CV como o apresentado na tabela 1, sendo que os componentes utilizados para o dimensionamento das partidas estão descritos nas tabelas seguintes.

3.5.1 Estrela-Triângulo

A tabela 10 em sequência representa quais os componentes utilizados para a realização do dimensionamento da partida Estrela-Triângulo para o motor 150 CV.

Tabela 10: Componentes utilizados para partida Estrela-Triângulo motor 150 CV.

Partida Estrela-Triângulo
-Relé falta de fase Weg Rpw-ffd66 220v-240v
-Fusível Nh-2 retardado 400a 3 Peças
-Chave seccionadora para fusível Weg Fsw-400 Nh2
-K1- Contator tripolar Weg Cwm250-22-30v 220v 100CV 2na+2nf
-K2- Contator tripolar Weg Cwm250-22-30v 220v 100CV 2na+2nf
-K3- Contator tripolar Weg Cwm150-22-30e13 220v 65CV 2na+2nf
-Relé de sobrecarga Rw317-1d3 140-215 Weg
-Relé Eletrônico de tempo Estrela Triângulo 3s-30s 220v Rtw17 Weg
-Botão Liga desliga faceado Cew-bdm-11000000 Weg 1na + 1nf
-Botão de emergência 16mm Trava Abb Weg Siemens 2nf
-Caixa de montagem 1700 mm X 800 mm X 600 mm

Fonte: [5], adaptado pelo autor.

3.5.2 Partida com chave Compensadora

A tabela 11 a seguir representa quais os componentes utilizados para o dimensionamento da partida com chave compensadora para o motor 150 CV.

Tabela 11: Componentes auxiliares para chave compensadora 150 CV.

Partida com chave Compensadora
-Relé falta de fase Weg Rpw-ffd66 220v-240v
-Fusível Nh-2 retardado 400a 3 Peças
-Chave seccionadora para Fusível Weg Fsw-400 Nh2
-K1- Contator Cwm400 bobina 100-240v Cwm400-22-30e36 - 11747363
-K2- Contator Cwm400 bobina 100-240v Cwm400-22-30e36 - 11747363
-K3- Contator tripolar 95a Cwm95-00-30v26 190vca / 220vca Weg
-Relé de sobrecarga Rw317-1d3 140-215 Weg
-Relé eletrônico de tempo 3s-30s 220v Rtw17 Weg
-Botão liga desliga faceado Cew-bdm-11000000 Weg 1na + 1nf
-Botão de emergência 16mm Trava Abb Weg Siemens 2nf
-Auto transformador trifásico 150CV 220v/ 380v/ 440v 45 segundos
-Caixa de montagem 1700 mm X 800 mm X 600 mm

Fonte: [5], adaptado pelo autor.

3.5.3 Partida com chave *Soft-Starter*

Neste método o equipamento escolhido para o cálculo de viabilidade econômica é o *Soft-Starter* SSW07 365 A para 150 CV da marca WEG 220 Volts, o qual é representado na figura 4 a seguir:

Figura 24: Figura ilustrativa *Soft-Starter* SSW07 365 A, 150 CV.



Fonte: [22].

Para sua aplicação é necessário mais alguns itens, sendo estes apresentados na tabela 12 em sequência:

Tabela 12: Componentes auxiliares para chave *Soft-Starter* 150 CV.

Partida com chave <i>Soft-Starter</i>
-Chave de partida <i>Soft Starter</i> SSW07 220v 365a 150CV
-Mini ventilador 120mm 110v 220v em alumínio Metaltex
-Botão liga desliga faceado Cew-bdm-11000000 Weg 1na + 1nf
-Quadro de comando Ip-66 1000 A X 600 L X 350 P

Fonte: [5], adaptado pelo autor.

3.5.4 Partida com inversor de frequência

O equipamento escolhido para este caso é um inversor de frequência da marca WEG, do modelo CFW11 150 CV 380 Volts, nota-se que esse é o único caso

em que se utiliza um equipamento desta tensão para efeito de cálculos, devido à alta corrente elétrica dos motores quando ligados em 220V desta maneira o equipamento se tornaria muito caro, ou seja, inviável, assim a fabricação de inversores da marca WEG a partir de 75 CV é feita em tensões maiores [24].

A figura 25 demonstra o inversor de frequência CFW11:

Figura 25: Figura ilustrativa inversor de frequência CFW11, 150 CV.



Fonte: [24].

Usando os dados de fabricação do inversor CFW11 do tamanho “E” para dimensionar o sistema se teve a necessidade da aplicação dos seguintes equipamentos [24]. Como mostra a tabela 13:

Tabela 13: Componentes auxiliares para inversor de frequência 150 CV.

Partida com inversor de frequência
-Inversor de frequência CFW11 Tri 380v 150CV Weg
-Quadro de comando 1200 A X 800 L X 400 P
-Mini ventilador 120mm 110v 220v em alumínio Metaltex

Fonte: [5], adaptado pelo autor.

4 RESULTADOS

Os resultados encontrados para os 4 tipos de acionamentos, para as três faixas de potência de motores elétricos foram os seguintes, de acordo com as tabelas a seguir:

4.1 RESULTADOS PARA MOTORES 25 CV

Tabela 14: Resultados para partida Estrela-Triângulo 25 CV.

Estrela-Triângulo motor 25 CV	
Componentes de acionamento	Valor (R\$)
-Relé falta de fase Weg Rpw-ffd66 220v-240v	86,90
-Disjuntor motor Mpw 65-3-u065 Weg	450,00
-K1- Contator tripolar Cwm40-00-30v26 40a 220Vac Weg	235,00
-K2- Contator tripolar Cwm40-00-30v26 40a 220Vac Weg	235,00
-K3- Contator tripolar Cwb25-11-30d23 25a 220Vac 1na+1nf Weg	127,00
-Relé térmico de sobrecarga Weg Rw67-1d3-u040 25 A - 40 A	176,00
-Relé eletrônico de tempo Estrela Triângulo 3s-30s 220v Rtw17 Weg	108,00
-Botão liga desliga faceado Cew-bdm-11000000 Weg 1na + 1nf	35,99
-Botão de emergência 16mm Trava Abb Weg Siemens 2nf	54,99
-Quadro de comando 600x400x200 mm	382,00
VALOR TOTAL	1803,98

Fonte: Autor, 2018.

Tabela 15: Resultados para partida com chave compensadora 25 CV.

Chave compensadora para motor 25 CV	
Componentes de acionamento	Valor (R\$)
-Relé Falta De Fase Weg Rpw-ffd66 220v-240v	86,90
-Disjuntor Motor Mpw 65-3-u065 Weg	450,00
-K1- Contator tripolar Cwm65-00-30v26 65a 220Vac Weg	480,00
-K2- Contator tripolar Weg Cwm50-00-30d23 50a 220v	350,70
-K3- Mini contator tripolar Weg Cwc16 1na 220vca 16a	86,00
-Relé térmico sobrecarga Weg Rw67-2d3-u070 57 A - 70 A	174,99
-Relé eletrônico de tempo 3s-30s 220v Rtw17 Weg	108,00
-Botão liga desliga faceado Cew-bdm-11000000 Weg 1na + 1nf	35,99
-Botão de emergência 16mm trava Abb Weg Siemens 2nf	54,99
-Auto transformador de partida 25CV, 220v	910,00
-Quadro De Comando Metal 800x 500x 200 mm	550,00
VALOR TOTAL	3.200,67

Fonte: Autor, 2018.

Tabela 16: Resultados para Soft-Starter 25 CV.

Chave Soft-Starter para motor 25 CV	
Componentes de acionamento	Valor (R\$)
-Chave de partida Soft-Starter Weg SSW07 85a 30/60CV 220/380v	2290,00
-Mini ventilador 120mm 110v 220v em alumínio Metaltex	45,49
-Botão liga desliga faceado Cew-bdm-11000000 Weg 1na + 1nf	35,99
-Quadro de comando elétrico Ip-66 800 A X 600 L X 250 P	659,00
VALOR TOTAL	2.994,49

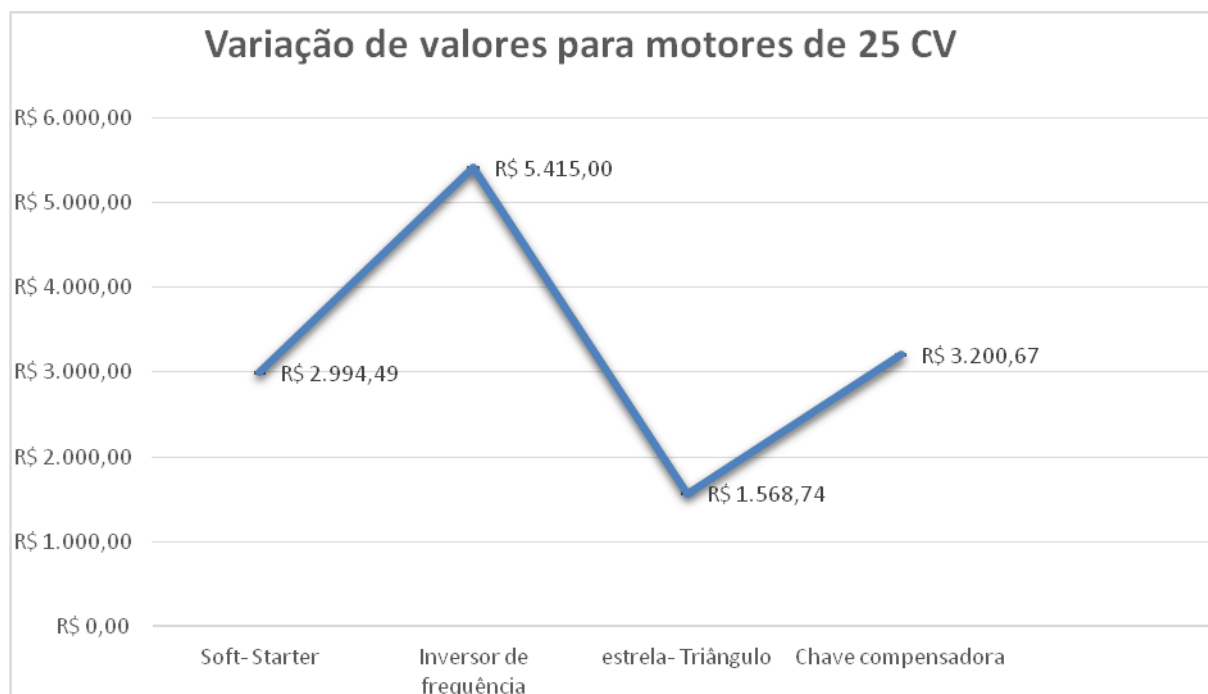
Fonte: Autor, 2018.

Tabela 17: Resultados para inversor de frequência 25 CV.

Inversor de frequência para motor 25 CV	
Componentes de acionamento	Valor (R\$)
-Inversor de frequência Weg CFW09 25CV 220v	4.700,00
-Mini ventilador 120mm 110v 220v em alumínio Metaltex	45,49
-Quadro de comando elétrico Ip-66 800 A X 600 L X 350 P	715,00
VALOR TOTAL	5.460,59

Fonte: Autor, 2018.

Como observado nas tabelas anteriores teve-se variações consideráveis entre cada um dos métodos, para o melhor entendimento os valores totais de cada método estão representados no gráfico 1 a seguir:

Gráfico 1: Resultados de viabilidade econômica para 25 CV.

Fonte: Autor, 2018.

Percebe-se que para este caso o mais viável economicamente é o acionamento usando chave de partida Estrela-Triângulo, tendo um custo muito

reduzido em comparação com os demais.

4.2 RESULTADOS PARA MOTORES 75 CV

Tabela 18: Resultados para partida Estrela-Triângulo 75 CV.

Partida Estrela-Triângulo motor 75 CV	
Componentes de acionamento	Valor (R\$)
-Relé falta de fase Weg Rpw-ffd66 220v-240v	86,90
-Disjuntor Weg Dwb250n185-3df tripolar 200 A	800,00
-K1- Contator tripolar Cwm105-00-30v26 105a 220Vac Weg	790,00
-K2- Contator tripolar Cwm105-00-30v26 105a 220Vac Weg	790,00
-K3- Contator Weg Cwm65-00-30v26 220v	533,00
-Relé de sobrecarga Weg Rw117-1d3-u112 90-112 A	264,00
-Relé eletrônico de tempo Estrela Triângulo 3s-30s 220v Rtw17 Weg	108,00
-Botão liga desliga faceado Cew-bdm-11000000 Weg 1na + 1nf	35,99
-Botão de emergência 16mm trava Abb Weg Siemens 2nf	54,99
-1 Quadro comando 1000x 600x 350 mm	849,00
VALOR TOTAL	4.224,98

Fonte: Autor, 2018.

Tabela 19: Resultados para partida com chave Soft-Starter 75 CV.

Partida com chave Soft-Starter motor 75 CV	
Componentes de acionamento	Valor (R\$)
-Chave de partida Soft-Starter Weg SSW07 200A + Ihm Local 220-575 Volts	5.350,00
-Mini Ventilador Cooler 120mm 110v 220v alumínio Metaltex	45,49
-Botão liga desliga faceado Cew-bdm-11000000 Weg 1na + 1nf	35,99
-Quadro de comando Ip-66 1000 A X 600 L X 350 P	849,00
VALOR TOTAL	6.244,49

Fonte: Autor, 2018.

Tabela 20: Resultados para partida com chave compensadora 75 CV.

Partida com chave compensadora motor 75 CV	
Componentes de acionamento	Valor (R\$)
-Relé Falta De Fase Weg Rpw-ffd66 220v-240v	86,90
-Disjuntor Weg Dwb250n185-3df Caixa Moldada Tripolar 200 A	800,00
-K1- Contator tripolar Weg Cwm180-22-30e13 220v 75CV 2na+2nf	1.607,01
-K2- Contator Weg Cwm112-22-30v26 tripolar 112a 2na+2nf 220v 60hz	1.300,00
-K3- Contator tripolar Cwm40-00-30v26 40a 220Vac Weg	235,00
-Relé de sobrecarga Rw317-1d3 140-215 Weg	368,00
-Relé eletrônico de tempo 3s-30s 220v Rtw17 Weg	108,00
-Botão liga desliga faceado Cew-bdm-11000000 Weg 1na + 1nf	35,99
-Botão de emergência 16mm trava Abb Weg Siemens 2nf	54,99
-Auto transformador de partida 75CV, 220v, Ip00	1.700,00
-Caixa de montagem 1200x 800x 350 mm	999,00
VALOR TOTAL	7.207,99

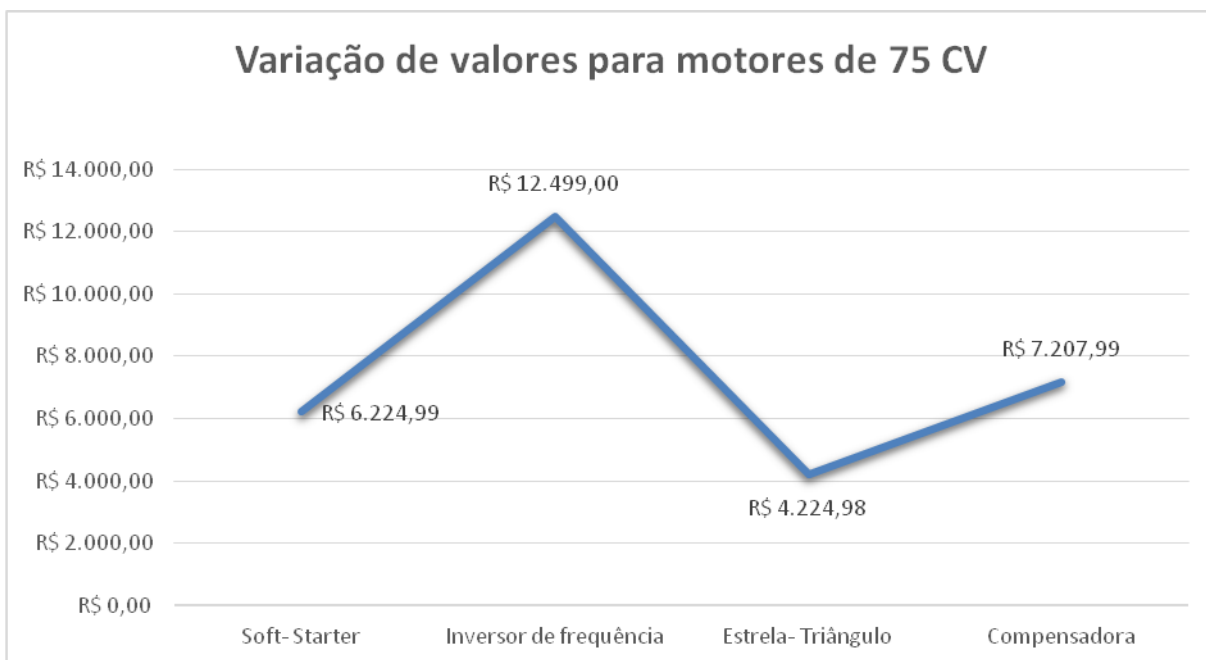
Fonte: Autor, 2018.

Tabela 21: Resultados para partida com inversor de frequência 75 CV.

Resultados para partida com inversor de frequência motor 75 CV	
Componentes de acionamento	Valor (R\$)
Inversor frequência Weg CFW09 75CV 220 Volts	11.500,00
Mini ventilador 120mm 110v 220v Em Alumínio Metaltex	45,49
Quadro de comando 1200 A X 800 L X 350 P	999,00
VALOR TOTAL	12.544,49

Fonte: Autor, 2018.

Como observado nas tabelas anteriores, para motores de indução trifásica da faixa de 75 CV de potência, o método mais viável economicamente ainda é a partida Estrela-Triângulo, como demonstrado no gráfico 2 a seguir:

Gráfico 2: Resultados de viabilidade econômica para 75 CV.

Fonte: Autor, 2018.

Como observado para se ter mais economia no acionamento de um motor de 75 CV, a mais eficaz para isso é a partida Estrela-Triângulo, seguindo pela chave *Soft-Starter*, chave compensadora e inversor de frequência, respectivamente.

4.3 RESULTADOS PARA MOTORES 150 CV

Tabela 22: Resultados para partida com chave *Soft-Starter* 150 CV.

Partida com chave <i>Soft-Starter</i> motor 150 CV	
Componentes de acionamento	Valor (R\$)
-Chave de partida <i>Soft Starter</i> SSW07 220 v 365a 150 CV	7.088,00
-Mini Ventilador Cooler 120mm 110v 220 v alumínio Metaltex	45,49
-Botão liga desliga faceado Cew-bdm-11000000 Weg 1na + 1nf	35,99
-Quadro de comando Ip-66 1000 A X 600 L X 350 P	849,00
VALOR TOTAL	7.782,49

Fonte: Autor, 2018.

Tabela 23: Resultados para partida Estrela-Triângulo 150 CV.

Partida Estrela-Triângulo motor 150 CV	
Componentes de acionamento	Valor (R\$)
-Relé falta de fase Weg Rpw-ffd66 220v-240v	86,90
-Fusível Nh-2 retardado 400a 3 Peças	204,38
-Chave seccionadora para fusível Weg Fsw-400 Nh2	720,00
-K1- Contator tripolar Weg Cwm250-22-30v 220v 100CV 2na+2nf	2.843,00
-K2- Contator tripolar Weg Cwm250-22-30v 220v 100CV 2na+2nf	2.843,00
-K3- Contator tripolar Weg Cwm150-22-30e13 220v 65CV 2na+2nf	1.409,00
-Relé de sobrecarga Rw317-1d3 140-215 Weg	368,00
-Relé eletrônico de tempo Estrela Triângulo 3s-30s 220v Rtw17 Weg	108,00
-Botão liga desliga faceado Cew-bdm-11000000 Weg 1na + 1nf	35,99
-Botão de emergência 16mm, Abb Weg Siemens 2nf	54,99
-Caixa de montagem 1700 mm X 800 mm X 600 mm	1.760,00
VALOR TOTAL	10.433,26

Fonte: Autor, 2018.

Tabela 24: Resultados para partida com inversor de frequência 150 CV.

Partida com inversor de frequência motor 150 CV	
Componentes de acionamento	Valor (R\$)
-Inversor de frequência CFW11 Tri 380v 150CV Weg	26.914,00
-Mini ventilador 120mm 110v 220v alumínio Metaltex	45,49
-Quadro de comando 1200 A X 800 L X 400 P	999,00
VALOR TOTAL	28.003,98

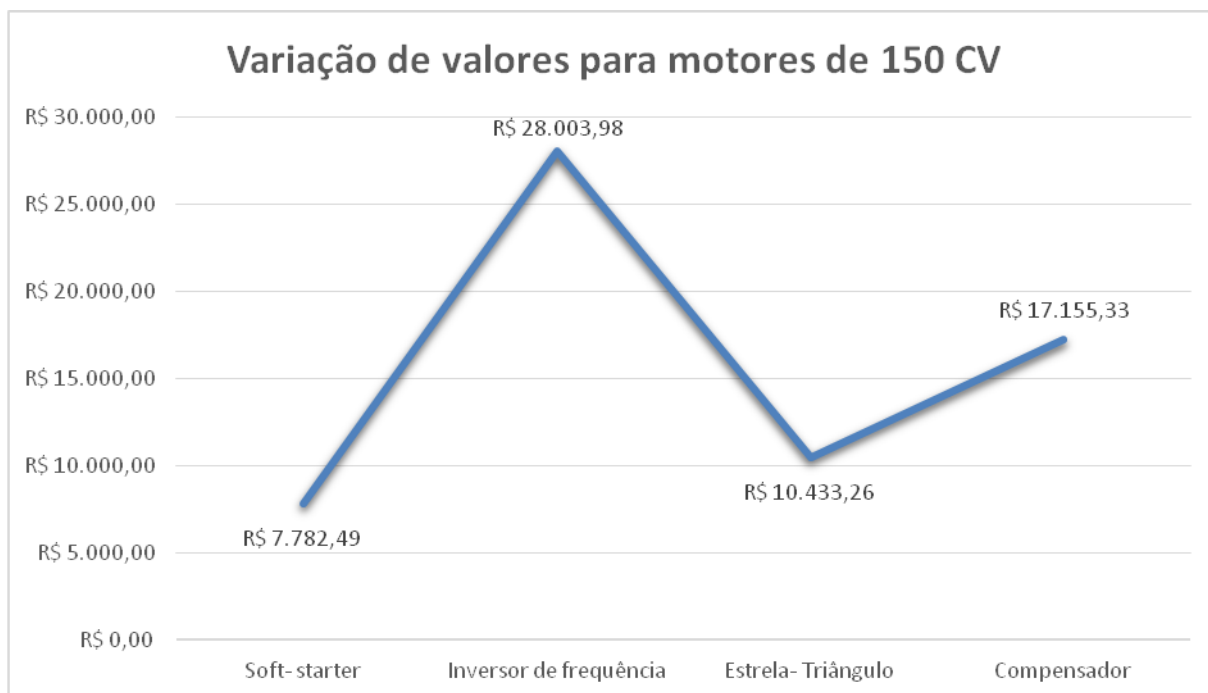
Fonte: Autor, 2018.

Tabela 25: Resultados para partida com chave compensadora 150 CV.

Partida com chave compensadora motor 150 CV	
Componentes de acionamento	Valor (R\$)
Relé falta de fase Weg Rpw-ffd66 220v-240v	86,90
Fusível Nh-2 retardado 400a 3 Peças	204,38
Chave seccionadora para fusível Weg Fsw-400 Nh2	720,00
K1- Contator cwm400 bobina 100-240v Cwm400-22-30e36	5.251,81
K2- Contator cwm400 bobina 100-240v Cwm400-22-30e36	5.251,81
K3- Contator tripolar 95a Cwm95-00-30v26 190vca / 220vca Weg	863,45
Relé de sobrecarga Rw317-1d3 140-215 Weg	368,00
Relé eletrônico de tempo 3s-30s 220v Rtw17 Weg	108,00
Botão liga desliga faceado Cew-bdm-11000000 Weg 1na + 1nf	35,99
Botão de emergência 16mm Abb Weg Siemens 2nf	54,99
Auto transformador trifásico 150 CV 220v/ 380v/ 440v 45 Segundos	2.450,00
Caixa de montagem 1700 mm X 800 mm X 600 mm	1.760,00
VALOR TOTAL	17.155,33

Fonte: Autor, 2018.

O gráfico 3 na sequência demonstra melhor quais foram os resultados obtidos para o acionamento de um motor 150 CV de indução trifásica:

Gráfico 3: Resultados de viabilidade econômica para 150 CV.

Fonte: Autor, 2018.

Diferentemente das potências analisadas anteriormente, neste caso o método de partida mais viável economicamente é o acionamento com chave *Soft-Starter*, seguido por Estrela-Triângulo, chave compensadora e por final inversor de frequência, como observado no gráfico 3.

O gráfico 4 a seguir representa a variação de custos entre as três potências abordadas no projeto, para o melhor entendimento das situações encontradas para cada um dos motores elétricos.

Gráfico 4: Variação de custos para as três potências abordadas.

Fonte: Autor, 2018.

Observa-se segundo o gráfico 4 demonstrado anteriormente, que para os motores de 25 e 75 CV se teve variações parecidas, como demonstrado pelas linhas azul e vermelha, tendo como o método mais viável economicamente a partida Estrela-Triângulo.

A relação encontrada para que o valor do Soft-Starter subiu muito pouco para o modelo de 150 CV, com relação aos anteriores, se da pela forma construtiva, pois o tamanho foi pouco alterado [22].

Para o caso do motor de 150 CV, também analisando o gráfico 4, nota-se através da linha verde que houveram muitas mudanças, as variações de valores monetários foram muito mais elásticas, ao contrário das menores potências o método mais viável para este caso passa a ser o uso de chave *Soft-Starter*.

5 DISCUSSÃO

Segundo informações coletadas no desenvolvimento do trabalho, e como já demonstrado anteriormente, motores de altas potências devem possuir métodos de acionamento bem dimensionados.

Como observado nas tabelas e gráficos anteriores, com o aumento da potência do motor elétrico tem-se variações de preços, um método que é viável para pequenos motores passa a ser inviável para outros maiores.

Todos os componentes escolhidos no decorrer do projeto foram pesquisados e analisados para terem uma margem satisfatória, tanto de custos quando de qualidade.

Através dos dados coletados, os motores de 25 e 75 CV demonstraram que o método mais viável economicamente foi o uso de chave de partida estrela-triângulo, sendo que para os dois casos se teve variações semelhantes de preços.

Para o último caso de 150 CV a melhor viabilidade econômica foi através do *Soft-Starter*, como demonstrado nos gráficos esse método de acionamento teve um preço bem reduzido comparando com os demais, além disso o custo teve um leve aumento com relação ao acionamento do motor de 75 CV.

6 CONCLUSÃO

Através deste trabalho notou-se o quanto é importante o uso de partidas suaves em motores elétricos de indução, principalmente para amenizar as quedas de tensão nas indústrias, e consequentemente no sistema de energia elétrica interligado.

Desta maneira foram escolhidos os principais métodos de acionamento elétrico utilizados na atualidade, com o intuito de dimensioná-los para diferentes tipos de motores, afim de chegar a uma conclusão de viabilidade econômica para cada faixa de potência escolhida.

Dentre os motores escolhidos, 25, 75 e 150 CV de potência, ocorreram variações bem visíveis de preços, sendo que todos os métodos foram dimensionados utilizando materiais de mesmas marcas e qualidade, para manter uma boa performance.

Notou-se durante este processo, que para motores menores como no caso 25 e 75 CV, tem-se como o método mais viável economicamente a partida com chave Estrela-Triângulo.

A partir do momento que se passa de 75 CV, ocorreram algumas variações de valores monetários, sendo que para o motor de 150 CV o método mais viável passou a ser o uso da chave *Soft-Starter*, isso tudo demonstrado através dos gráficos e tabelas anteriores.

O método menos viável para fazer o acionamento de motores, foi com o uso de inversor de frequência, tendo uma larga variação de custos em relação aos demais, (exceto se o motor for utilizado em condições específicas, aonde se deve ser feita a variação da frequência, afim de alterar a rotação de trabalho do mesmo).

Já o método de acionamento com chave compensadora se demonstrou inviável economicamente para todos os casos analisados no projeto, devido ao valor elevado do Auto transformador de partida.

Para novas etapas que venham a ocorrer em outro momento sobre o projeto abordado, é válido o estudo dos benefícios que as partidas destacadas anteriormente trazem dentro do sistema industrial, através de testes e ensaios, com a finalidade de demonstrar por meio da prática a importância da utilização dos métodos suaves para o acionamento de motores elétricos.

REFERÊNCIAS

- [1] BEN. **Balanço energético nacional**. Ministério de Minas e Energia, Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final%202017%20Web.pdf>, acesso em: 23 mar. 2018.
- [2] EPE. **Empresa de pesquisa energética**. Brasil, 2017. Disponível em: <http://epe.gov.br/pt>, acesso em: 23 mar. 2018.
- [3] FRANCHI, Claiton Moro. 2008. **Acionamentos elétricos**. São Paulo: Érica, 2008.
- [4] MAMEDE FILHO, João. 2010. **Instalações Elétricas Industriais**. Rio de Janeiro: LTC, 2010.
- [5] WEG. **Comando e proteção**. Disponível em: <[https://docente.ifsc.edu.br/rafael.grebogi/MaterialDidatico/Eletromecanica/EletricidadeIndustrial\(OLD\)/M1 - Comando e Proteção.pdf](https://docente.ifsc.edu.br/rafael.grebogi/MaterialDidatico/Eletromecanica/EletricidadeIndustrial(OLD)/M1-ComandoeProtecao.pdf)>. Acesso em: 04 abr. 2018.
- [6] BRUNA, Breno Pereira Dela et al (Ed.). **Estudo de acionamentos das chaves de partidas elétricas e eletrônicas para motores elétricos**, Santa Catarina, v. 3, n. 1, p.504- 512. 2012
- [7] OSE- O SETOR ELÉTRICO. **Queda de tensão na partida de motores em sistemas industriais**. 2018. Disponível em: <https://www.osetoelettrico.com.br/queda-de-tensao-na-partida-de-motores-em-sistemas-industriais/>, acesso em: 24 mar. 2018.
- [8] DUGAN, Roger C., et al. 2002. **Electrical power systems quality**. 2. s.l.: McGrawHill, 2002.
- [9] NBR, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410**: Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro: Abnt, 2004. 209 p.
- [10] ROHILLA, Akshay; JOSHI, Harish Chand; NEGI, Anurag. STAR DELTA

STARTER OF INDUCTION MOTOR, v. 1, n. 6, p.1741-1742, 2014.

[11] CARVALHO, Geraldo Carvalho. **Máquinas elétricas**, Teoria e ensaios, 2006, 1 edição

[12] PRAXEDES, Marcos Fernando. **A evolução dos sistemas de partida dos motores elétricos trifásicos**. 2011. 101 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade São Francisco, Itatiba, 2011.

[13] RAGEMG, Rdt. **Chave de partida compensadora**. Disponível em: <<https://www.robertdicastecnologia.com.br/2014/02/chave-de-partida-compensadora/>>. Acesso em: 26 fev. 2014.

[14] SIBRATEC. **Circuitos elétricos industriais**. Rio do Sul- SC, 2012. 75 p.

[15] IFSC. Instituto federal de educação e tecnologia de Santa Catarina. **Partida compensadora**. Araranguá, 2009. 5 p.

[16] UNESP (São Paulo). Universidade Estadual Paulista. **Soft-Starter**. Disponível em: <<http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/softstarter.pdf>>. Acesso em: 01 maio 2018.

[17] SOUZA, Neemias S. **Apostila de acionamentos elétricos**. Rio Grande do Norte, 2009.

[18] BRAGA, Newton C. **Os inversores de frequência (MEC125)**. Disponível em: <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/automacao-industrial/5443-mec125>>. Acesso em: 05 maio 2018.

[19] SILVA, Clodoaldo. **Inversores de frequência**. 2009. Disponível em: <http://www.clubedaeletronica.com.br/Automacao/PDF/Apoio_004_-_Inversores_de_frequencia.pdf>. Acesso em: 21 maio 2018.

- [20] SOUSA, Eduardo da Costa; SILVA, Victor de Paula e. **Inversor de frequência e a sua contribuição para a eficiência energética em sistemas de bombeamento**. 2012. Disponível em: <http://www.brasilengenharia.com/portal/images/stories/revistas/edicao609/609_art_inversors.pdf>. Acesso em: 05 maio 2018.
- [21] WEG. **Partida e proteção de motores**. Disponível em: <http://ecatalog.weg.net/TEC_CAT/partidamotormostra.asp>. Acesso em: 30 out. 2018.
- [22] WEG. **WEG Automation Catalog Soft Starters**. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hb5/hfb/WEG-Soft-Starters-us-mini-catalog-en.pdf>>. Acesso em: 31 out. 2018.
- [23] WEG. **Seleção de produtos**. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/>>. Acesso em: 30 out. 2018.
- [24] WEG. **CFW11 Inversor de Frequência**. Disponível em: <http://www.transmitechredutores.com.br/admin/docs_upload/CatalagoInversorCFW11.pdf>. Acesso em: 30 out. 2018.