

**UNIVERSIDADE REGIONAL INTEGRADA DO ALTO URUGUAI E DAS MISSÕES
PRÓ-REITORIA DE ENSINO, PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CÂMPUS DE ERECHIM
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS E CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

MATEUS SANTIN

**AValiação COMPARATIVA DE ACIONAMENTOS DE MOTORES DE INDUÇÃO
TRIFÁSICOS COM FOCO NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ERECHIM - RS
2020**

MATEUS SANTIN

**AValiação Comparativa de Acionamentos de Motores de Indução
Trifásicos com Foco na Eficiência Energética**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharias e Ciência da Computação da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – Câmpus de Erechim.

Orientador: Prof. Cássio Luciano Baratieri

**ERECHIM - RS
2020**

MATEUS SANTIN

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE ACIONAMENTOS DE MOTORES DE INDUÇÃO
TRIFÁSICOS COM FOCO NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Elétrica como requi-
sito parcial à obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Elétrica, Departamento de
Engenharias e Ciência da Computação da
Universidade Regional Integrada do Alto
Uruguai e das Missões – Câmpus de Erechim.**

Erechim, 11 de dezembro de 2020.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Cássio Luciano Baratieri (Orientador)
URI Erechim

Prof. Esp. Fernando Luis Tartari Peres (Examinador)
URI Erechim

Prof. Me. Sérgio Bordignon (Examinador)
URI Erechim

Dedico esta caminhada a todos que sempre estiveram junto comigo, me apoiaram e fizeram deste sonho uma realidade, especialmente a Deus, meus pais, minha esposa e a todos os colegas, conseqüentemente amigos.

AGRADECIMENTOS

Desejo expressar meus agradecimentos mais sinceros primeiramente a Deus, responsável por sempre iluminar meu caminho, nunca deixando que eu pudesse desanimar ou abandonar este tão maravilhoso sonho.

Aos meus pais, Valdir José Santin e Olga Tortelli Santin, tão maravilhosos comigo, responsáveis por criarem e educarem esta pessoa que a vós fala. Sempre dispostos a contribuir ao máximo nesta árdua caminhada, mas recompensadora. Eu lhes agradeço e dedico esta realização, sonho este que também sempre foi deles. Muito obrigado meus tão maravilhosos pais.

A minha esposa Fernanda Lira, que mulher maravilhosa comigo, me suportou durante todas e não foram poucas noites sem dormir, ou aquelas reclamações de que não iria conseguir, esta mulher sempre foi sensacional comigo durante toda esta caminhada, muito obrigado meu amor pela vossa dedicação e apoio incondicional em cada desafio e dificuldade superada.

Ao meu orientador Cássio Luciano Baratieri, estes são meus mais sinceros agradecimentos, por sempre me auxiliar e estar disposto independente do horário, a colaborar na disseminação de dúvidas. Quero lhe agradecer por ser um profissional extremamente competente, que realmente junto comigo tornou este sonho uma realidade. Muito obrigado Dr. Cássio Luciano Baratieri. Também quero agradecer aos professores da minha banca, Fernando Luis Tartari Peres e ao Professor Sérgio Bordignon, por todas vossas tão importantes sugestões, que vem para engrandecer este trabalho.

Não posso em hipótese alguma deixar de agradecer a todos meus colegas, que consequentemente tornaram-se meus amigos durante esta caminhada. Agradeço em especial aos guris do nosso grupo de estudo aos finais de semana, feriados e madrugadas, Afonso Carlos Hinkel Júnior, Cristiano Rafael França, Leonardo Szydloski, Lucas Serrano e Ricardo André Kistemacher. Estes caras são maravilhosos, pois contribuíram e muito nesta caminhada, na realização deste sonho. Muito obrigado galera, vocês morram no meu coração.

A Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões por ter concedido vossa infraestrutura para a realização dos testes em laboratório, com vossos equipamentos. A todos meus colegas de trabalho dentro da Universidade, que durante este período estavam dispostos a me auxiliar ao máximo dentro de vossas possibilidades.

Assim mesmo, desejo manifestar meu reconhecimento mais sincero a todas as pessoas que se colocaram à disposição com vossos conhecimentos, auxílio, sugestões e espírito crítico, na construção deste trabalho e consequente realização deste sonho.

Nossa maior fraqueza é a desistência. O caminho mais certo para o sucesso é sempre tentar apenas uma vez mais.

(Thomas Edison)

RESUMO

O presente trabalho trata do desenvolvimento de uma metodologia para análise comparativa da eficiência energética dos sistemas empregados no acionamento de Motores de Indução Trifásicos (MIT), abrangendo suas principais características de funcionamento e aplicabilidades, juntamente com suas vantagens e desvantagens. Uma revisão de literatura foi conduzida para permitir uma análise qualitativa de eficiência energética destas chaves de partidas. Concomitante a esta análise qualitativa, desenvolveu-se uma metodologia comparativa que tem por objetivo a validação em simulação computacional e, em bancada experimental de testes, com o propósito de avaliar de forma quantitativa a eficiência energética dos sistemas de acionamentos aplicados a motores. Esta comparação de eficiência quantitativa desenvolve-se comparando a potência ativa da chave de partida direta com a potência ativa das demais chaves de acionamento implementadas, durante o período de transitório do acionamento do motor. Esta metodologia comparativa é uma ferramenta muito importante para avaliação e validação do estudo. Paralelamente a metodologia comparativa de eficiências das chaves de partidas, foi elaborada uma análise financeira para elucidar o investimento necessário e *payback* para estipular tempo de retorno em caso de substituição da tecnologia aplicada ao acionamento. Por fim, os resultados indicam a melhor eficiência energética apresentada pelo inversor de frequência em detrimento as demais chaves de partida, dentro do cenário utilizado pela metodologia comparativa. O inversor é mais eficiente pois pode operar com rampas de aceleração controláveis, que interferem diretamente no desempenho e na eficácia de todo o sistema de acionamento de um motor de indução trifásico. Já as demais chaves de partidas são menos eficientes devido ao perfil da carga acoplada ao eixo (carga constante), onde ao acionar uma carga com este perfil e com valor próximo ao nominal, torna menos eficiente ou até mesmo impraticável a implementação.

Palavras-chave: Sistemas de Acionamentos. MIT. Eficiência Energética. Simulação Computacional. Bancada Experimental.

ABSTRACT

The present work deals with the development of a methodology for comparative analysis of the energy efficiency of the systems used in the activation of Three-Phase Induction Motors (MIT), covering its main characteristics of operation and applicability, together with its advantages and disadvantages. A literature review was conducted to allow a qualitative analysis of the energy efficiency of these starters. Concomitant to this qualitative analysis, a comparative methodology has been developed that aims to validate in computer simulation and, in an experimental test bench, with the purpose of quantitatively evaluating the energy efficiency of the drive systems applied to engines. This quantitative efficiency comparison is developed by comparing the active power of the direct start switch with the active power of the other implemented switching keys, during the transient period of the motor activation. This comparative methodology is a very important tool for the evaluation and validation of the study. In parallel with the comparative efficiency methodology of the starter keys, a financial analysis was prepared to elucidate the necessary investment and textit payback to stipulate the return time in case of replacement of the technology applied to the drive. Finally, the results indicate the best energy efficiency presented by the frequency inverter to the detriment of the other starting keys, within the scenario used by the comparative methodology. The inverter is more efficient because it can operate with controllable acceleration ramps, which directly interfere with the performance and efficiency of the entire drive system of a three-phase induction motor. The other starters are less efficient due to the load profile coupled to the axle (constant load), where when driving a load with this profile and with a value close to the nominal, it makes implementation less efficient or even impractical.

Keywords: Drive Systems. MIT. Energy Efficiency. Computational Simulation. Experimental Bench.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Gráfico do consumo por setor da energia elétrica produzida no país.....	20
Figura 2 – Função rampas da chave eletrônica <i>soft-starter</i>	26
Figura 3 – Função pulso de tensão (<i>Kick-Start</i>) da chave eletrônica <i>soft-starter</i>	26
Figura 4 – Função proteção sub/sobrecorrente da chave eletrônica <i>soft-starter</i>	27
Figura 5 – Função economia de energia da chave eletrônica <i>soft-starter</i>	27
Figura 6 – Diagrama de blocos simplificado da chave eletrônica <i>soft-starter</i> para o acionamento de MIT.....	28
Figura 7 – Diagrama de blocos simplificado da chave eletrônica "inversor de frequência"	29
Figura 8 – Diagrama de blocos de um inversor de frequência.....	31
Figura 9 – Comportamento do controle escalar.....	33
Figura 10 – Diagrama em corte de um motor de indução trifásico com rotor gaiola de esquilo.....	34
Figura 11 – Rotor típico de um motor de indução trifásico com rotor gaiola de esquilo..	35
Figura 12 – Estator típico de um motor de indução trifásico.....	35
Figura 13 – Fluxograma estrutural implementado no desenvolvimento do trabalho.....	39
Figura 14 – Diagrama de força e comando do acionamento por chave de partida direta..	41
Figura 15 – Diagrama de força do sistema de acionamento estrela-triângulo.....	42
Figura 16 – Diagrama de comando do sistema de acionamento estrela-triângulo.....	43
Figura 17 – Diagramas de força e comando do sistema de acionamento com chave eletrônica <i>soft-starter</i>	44
Figura 18 – Diagramas de força, bloco de controle e circuito de comando do sistema de acionamento com inversor de frequência.....	45
Figura 19 – Diagrama de blocos da plataforma de simulação com partida direta e chave estrela-triângulo.....	48
Figura 20 – Diagrama de blocos da plataforma de simulação com chave eletrônica <i>Soft-Starter</i>	49
Figura 21 – Diagrama de blocos da plataforma de simulação com inversor de frequência	49
Figura 22 – Emulação do sinal de saída PWM, comparando o sinal modulante e a portadora triangular.....	50
Figura 23 – Síntese do sinal de saída por modulação PWM.....	50
Figura 24 – Bancadas de testes dos sistemas de acionamento de motores de 1/2 cv e 1 cv	51
Figura 25 – Plataforma de bancada de testes para partida com chave eletrônica Inversor de Frequência.....	52
Figura 26 – Corrente fase com ajuste do modelo de simulação.....	56
Figura 27 – Correntes simuladas com rampa de 5 s, para motor de 1/2 cv.....	57
Figura 28 – Correntes em bancada experimental com rampa de 5 s, para motor de 1/2 cv	57
Figura 29 – Correntes simuladas com rampa de 3 s, para motor de 1 cv.....	58
Figura 30 – Correntes em bancada experimental com rampa de 3 s, para motor de 1 cv.	58

Figura 31 – Correntes e conjugado para partida com estrela-triângulo de motor acionando carga com conjugado resistente..... 65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros do circuito equivalente do motor de indução trifásico 1/2 cv.....	47
Tabela 2 – Parâmetros do circuito equivalente do motor de indução trifásico 1 cv.....	47
Tabela 3 – Valores dos dispositivos de acionamento para um motor de 1 cv, empresa A.	53
Tabela 4 – Valores dos dispositivos de acionamento para um motor de 1 cv, empresa B.	53
Tabela 5 – Valores de potências ativas e reativas simulados com rampa de 3 s para motor de 1/2 cv.....	59
Tabela 6 – Diferenças absolutas e relativas das potências ativas simuladas com rampa de 3 s para motor de 1/2 cv.....	59
Tabela 7 – Valores de potências ativas e reativas em bancada experimental com rampa de 3 s para motor de 1/2 cv.....	60
Tabela 8 – Diferenças absolutas e relativas das potências ativas em bancada experimental com rampa de 3 s para motor de 1/2 cv.....	60
Tabela 9 – Valores de potências ativas e reativas simulados com rampa de 5 s para motor de 1/2 cv.....	60
Tabela 10 – Diferenças absolutas e relativas das potências ativas simuladas com rampa de 5 s para motor de 1/2 cv.....	60
Tabela 11 – Valores de potências ativas e reativas em bancada experimental com rampa de 5 s para motor de 1/2 cv.....	61
Tabela 12 – Diferenças absolutas e relativas das potências ativas em bancada experimental com rampa de 5 s para motor de 1/2 cv.....	61
Tabela 13 – Valores de potências ativas e reativas simulados com rampa de 3 s para motor de 1 cv.....	62
Tabela 14 – Diferenças absolutas e relativas das potências ativas simuladas com rampa de 3 s para motor de 1 cv.....	63
Tabela 15 – Valores de potências ativas e reativas em bancada experimental com rampa de 3 s para motor de 1 cv.....	63
Tabela 16 – Diferenças absolutas e relativas das potências ativas em bancada experimental com rampa de 3 s para motor de 1 cv.....	63
Tabela 17 – Valores de potências ativas e reativas simulados com rampa de 5 s para motor de 1 cv.....	63
Tabela 18 – Diferenças absolutas e relativas das potências ativas simuladas com rampa de 5 s para motor de 1 cv.....	64
Tabela 19 – Valores de potências ativas e reativas em bancada experimental com rampa de 5 s para motor de 1 cv.....	64
Tabela 20 – Diferenças absolutas e relativas das potências ativas em bancada experimental com rampa de 5 s para motor de 1 cv.....	64
Tabela 21 – Estimativa de valores monetários (R\$) e tempo de retorno (dias) com motor de 1 cv, rampa de 3 s e jornada de 4 h.....	67

Tabela 22 – Estimação de valores monetários (R\$) e tempo de retorno (dias) com motor de 1 cv, rampa de 3 s e jornada de 8 h.....	67
Tabela 23 – Estimação de valores monetários (R\$) e tempo de retorno (dias) com motor de 1 cv, rampa de 3 s e jornada de 12 h.....	67
Tabela 24 – Estimação de valores monetários (R\$) e tempo de retorno (dias) com motor de 1 cv, rampa de 5 s e jornada de 4 h.....	68
Tabela 25 – Estimação de valores monetários (R\$) e tempo de retorno (dias) com motor de 1 cv, rampa de 5 s e jornada de 8 h.....	68
Tabela 26 – Estimação de valores monetários (R\$) e tempo de retorno (dias) com motor de 1 cv, rampa de 5 s e jornada de 12 h.....	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
BEN	Balanco Energético Nacional
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CLP	Controlador Lógico Programável
CPU	Unidade Central de Processamento
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FP	Fator de Potência
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
IHM	Interface Homem Máquina
IR2	Motor de Alto Rendimento
IR3	Motor <i>Premium</i>
MIT	Motor de Indução Trifásico
MME	Ministério de Minas e Energia
NBR	Norma Técnica
PID	Regulador Proporcional-Integral-Derivativo
PROCEL	Programa Nacional de Conservação da Energia Elétrica
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i>
SCR	<i>Silicon Controlled Rectifier</i>
TC	Transformador de Corrente

LISTA DE SÍMBOLOS

B_0	Botoeira Desliga Geral
B_{01}	Botoeira Desliga Geral
B_1	Botoeira Liga
B_2	Botoeira Liga
DJ	Disjuntor
f_c	Frequência de corte [Hz]
h	Horas
K_1	Contator 1
K_2	Contator 2
K_3	Contator 3
kWh	Quilowatts hora
P	Potência Ativa [W]
P_{cu}	Perdas no cobre [W]
P_D	Potência Ativa Partida Direta [W]
P_{fe}	Perdas no ferro [W]
P_m	Perdas mecânicas [W]
P_X	Potência Ativa Chaves de Partidas [W]
P_v	Perdas por ventilação [W]
Q	Potência Reativa [VAr]
R\$	Moeda Nacional Brasileira
R_1	Resistência do Estator [Ω]
R_2	Resistência do Rotor [Ω]
RT	Relé Térmico
T	Temporizador
t_{ano}	Tempo em anos
T_c	Torque de Carga
t_{dias}	Tempo em Dias
t_t	Tempo Total [s]
TWh	Terra Watts hora
X_1	Reatância de Dispersão do Estator [Ω]
X_2	Reatância de Dispersão do Rotor [Ω]
X_m	Reatância Magnetizante [Ω]

V_{cc}	Tensão Contínua
$X_{inv.}$	Valor do Investido [R\$]
N_{eco}	Valor Monetário Economizado [R\$]
V/F	Razão Tensão por Frequência
X_{kWh}	Valor Pago pelo Quilowatts hora [R\$]
N_{pot}	Valor de Potência Economizada [kWh]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Objetivos	18
1.1.1 Objetivo Geral	18
1.1.2 Objetivos Específicos	18
1.2 Estrutura do trabalho	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 Cenário energético na indústria brasileira e normatização	20
2.2 Sistemas de partida e acionamento de motores de indução trifásicos	21
2.2.1 Partida Direta	22
2.2.2 Chave estrela-triângulo	23
2.2.3 Chave Compensadora	24
2.2.4 Soft-Starters	24
2.2.4.1 Principais funções das chaves <i>soft-starter</i>	25
2.2.4.2 Arquitetura das chaves <i>soft-starter</i>	27
2.2.5 Inversores de frequência	29
2.2.5.1 Arquitetura do inversor de frequência	31
2.3 Métodos de partida e controle utilizados em inversores de frequência	32
2.3.1 Controle Escalar	32
2.3.2 Controle vetorial	33
2.4 Dispositivos dos sistemas de acionamento	33
2.4.1 Motores de indução trifásicos	34
2.4.1.1 Motores de indução trifásicos com rotor gaiola de esquilo	34
2.4.1.2 Princípio de funcionamento dos motores assíncronos trifásicos	36
2.4.1.3 Perdas ôhmicas de um motor elétrico	36
2.4.1.4 Ensaio Paramétricos	37
2.5 Estudos de eficiência nos sistemas de acionamento de motores de indução trifásicos	38
3 METODOLOGIA	39
3.1 Sistemas de partida e acionamentos empregados	40
3.1.1 Partida direta	40
3.1.2 Partida chave estrela triângulo	41
3.1.3 Partida com chave eletrônica <i>soft-starter</i>	43

3.1.4 Partida com inversor de frequência	44
3.2 Metodologia e métodos	45
3.2.1 Plataforma de simulação	46
3.2.1.1 Diagramas de bloco da plataforma de simulação computacional	47
3.2.2 Geração do sinal de saída por modulação PWM	50
3.2.3 Implementação em bancada de testes	51
3.3 Análise financeira e <i>payback</i>	52
3.3.1 Metodologia do <i>payback</i>	53
3.3.2 Equacionamento do <i>payback</i>	54
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
4.1 Formas de onda	56
4.2 Comparativos dos valores simulados	59
4.3 Validação do <i>payback</i>	66
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
5.1 Perspectivas de continuação do trabalho	70
REFERÊNCIAS	71

1 INTRODUÇÃO

As crises energéticas iniciadas em 1971, denominadas "crise do petróleo", culminaram com a decisão dos governos e as sociedades de geração de um espírito de conscientização. O objetivo dessas decisões era conter os desperdícios de energia, e para isso foram implementados programas para alcançar tais objetivos por exemplo o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), desenvolvido pelo Ministério de Minas e Energia (MME), no ano de 1985, incumbido de realizar integração das ações de conservação de energia (MAMEDE, 2017).

No Brasil, através da Lei nº 10.847 de 15 de março de 2004, foi instituída a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), cuja finalidade é a prestação de serviços na área de estudos e pesquisas destinadas ao planejamento do setor elétrico, projeções da matriz energética brasileira e a elaboração do Balanço Energético Nacional (BEN) (VIANA et al., 2012).

No cenário atual, as fontes de energia não renováveis estão cada dia mais escassas e a demanda de energia segue em crescimento. Logo, surge a necessidade de obter um melhor aproveitamento da energia produzida, entendendo o comportamento e as formas de consumo pela sociedade e pela indústria (SARDA, 2018).

O setor industrial corresponde a 37,5% do consumo da energia produzida no país, tendo como seu maior consumidor interno, as máquinas elétricas utilizadas para força motriz, que representam 63,2% de todo o consumo da energia demandada pelo setor industrial (EPE, 2019).

Existem muitas oportunidades para realizar melhorias na eficiência energética nos sistemas industriais. Segundo Santos et al. (2006), na força motriz a efficientização pode ser alcançada pela substituição de motores padrão por motores de alto rendimento, readequações de cargas, assim como na instalação de sistemas de acionamentos encarregados de realizar o controle da partida e velocidade de motores, além de realização de manutenções periódicas.

Ao passo de compreender o processo de aprimoramento da eficiência e do rendimento energético nas instalações elétricas, o consumidor poderá alcançar ganhos com redução das faturas de energia elétrica. Por intermédio de um *payback* avaliar sua metodologia comportamental no âmbito do melhor aproveitamento energético.

Este *payback* se dá frente a necessidade da implementação de sistemas de acionamentos mais eficazes, com características que garantam a redução no consumo. Neste contexto, este trabalho propõe uma metodologia avaliativa para verificação da eficiência energética dos sistemas de acionamento aplicados a Motores de Indução Trifásicos (MIT).

O escopo do trabalho é alicerçado pelo estudo dos métodos de acionamentos dos MIT.

Simulação dos *layouts* dos diagramas de força e comando em aplicativos de simulação computacional (CAdESIMU e PSIM). Implementação dos acionamentos em bancada de testes. Além da análise financeira e *payback* para estimação de viabilidade econômica e tempo de retorno do investimento na substituição da tecnologia aplicada ao acionamento do MIT se torne viável.

1.1 Objetivos

Os objetivos deste trabalho são classificados em geral e específicos.

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma metodologia comparativa à análise de especificação e eficiência energética dos sistemas de acionamento de Motores de Indução Trifásicos (MIT).

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a eficiência energética que os métodos de acionamento de MITs proporcionam;
- Desenvolver metodologia avaliativa para procedimentos a serem realizados na substituição de uma chave de partida de um MIT;
- Investigar a metodologia em aplicativo de simulação computacional;
- Implementar os sistemas de acionamentos em bancada de testes;
- Realizar análise financeira, com tempo de *payback* do investimento realizado na substituição desta chave de partida.

1.2 Estrutura do trabalho

A estruturação do trabalho divide-se em cinco capítulos. No capítulo primeiro está a introdução, abordando um breve panorama do cenário energético nacional no setor industrial, normatizações vigentes referentes a eficiência energética. A importância do emprego de metodologias eficientes para melhorar o aproveitamento da energia produzida.

No segundo capítulo a revisão bibliográfica contextualiza a realização do estudo, através de publicações de autores especialistas na área de eficiência energética e acionamentos elétricos.

O terceiro capítulo revela a metodologia aplicada para a obtenção do levantamento de dados e resultados, alicerçado nas avaliações realizadas em aplicativos de simulação computacional e desenvolvimento dos testes em bancada experimental. Além de um estudo da viabilidade financeira e *payback* para a substituição da chave de partida do MIT.

No quarto capítulo, estão os resultados e as discussões sobre o estudo realizado, comparando os resultados de simulação e de experimentais, bem como a avaliação de *payback*.

O último capítulo trata das considerações finais sobre os resultados obtidos na realização projeto, e perspectivas futuras para o prosseguimento do mesmo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

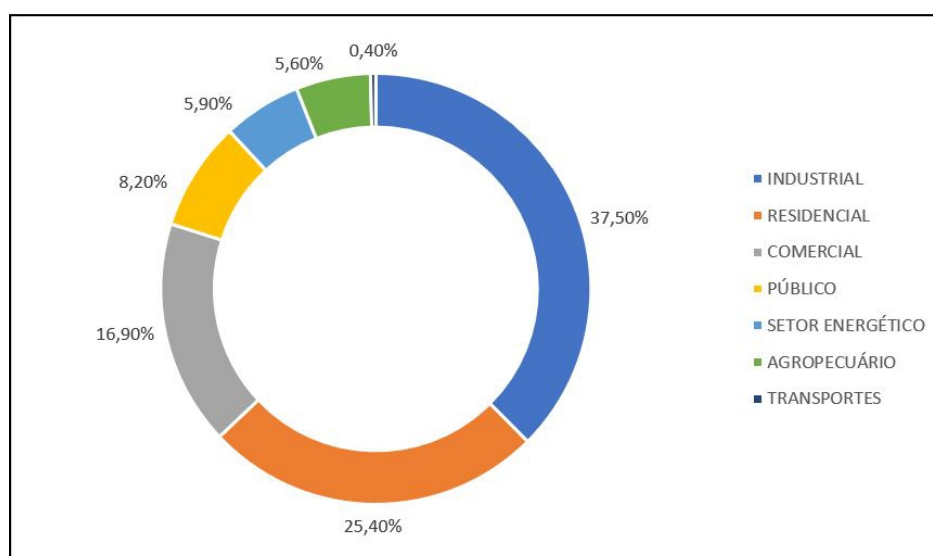
Este capítulo tem por objetivo apresentar um panorama do cenário energético do setor industrial brasileiro, correlacionado a eficiência energética e normatizações vigentes. Além disso, almeja-se conceitualizar acionamentos elétricos e particularidades relacionadas aos motores de indução trifásicos, *soft-starters* e inversores de frequência, explicitando seus métodos de controle e acionamento. Ademais são evidenciados estudos de outros autores sobre a eficiência energética aplicada em sistemas de acionamentos de MIT.

2.1 Cenário energético na indústria brasileira e normatização

O governo brasileiro atualmente desenvolve uma abordagem de política moderada na conservação da energia, buscando reduzir desperdícios, como o PROCEL. O PROCEL é o órgão responsável pelas políticas de efficientização energética dentro do país, com propostas agindo na educação quanto ao uso racional da energia, no incentivo ao uso correto e eficaz do respectivo recurso e também em programas de financiamentos para substituição de equipamentos (MAMEDE, 2017).

Para justificar todo o esforço e a empregabilidade de programas voltados a estudos de eficiência energética, atribui-se ao cenário do consumo da energia produzida no país, que vem crescendo anualmente. O gráfico da Figura 1 expressa as divisões percentuais que cada setor corresponde no cenário do consumo de toda energia produzida.

Figura 1 – Gráfico do consumo por setor da energia elétrica produzida no país



Fonte: Adaptado de EPE (2019)

Segundo a dados do Balanço Energético Nacional (EPE, 2019), realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), ocorreu uma evolução de 1,4% de acréscimo no consumo final da energia produzida, alcançando a totalidade de 535,4 *TWh*, destacando-se os setores industrial e residencial.

Frente ao contexto atual, apresentando a representatividade e aplicabilidades dos motores de indução trifásicos dentro do setor industrial, se justifica a aplicação de políticas voltadas a eficiência energética. Assim aplicam-se as normas para níveis mínimos de eficiência destas máquinas, a ABNT NBR 17094-1:2018, que estabelece os requisitos para estas máquinas, especialmente construtivos e operacionais.

Duas classes de eficiência para motores de indução trifásicos são estabelecidas perante a NBR17094-1:2018, os IR2 ou motores de alto rendimento e os IR3 motores de rendimento “Premium”, ambas equivalentes, respectivamente as linhas IE2 e IE3 estabelecidas pela *International Electrotechnical Commission* (IEC).

Segundo a Portaria Interministerial N° 1 da Lei de Eficiência Energética N° 10.295 do dia de 29 de junho de 2017, fica determinado que os níveis mínimos de motores de indução trifásicos devem ser da classe IR3, estabelecidos pela NBR17094-1:2013, sendo exatamente iguais aos apresentados pela mesma norma em 2018 (MME, 2017).

2.2 Sistemas de partida e acionamento de motores de indução trifásicos

As partidas dos motores elétricos de indução devem ser devidamente projetadas, pois necessitam uma corrente de magnitude 6 à 8 vezes a corrente nominal de trabalho do motor (partida direta), devido à mudança de um estado de inércia (FRANCHI, 2008).

Conforme Lima E Silva (2018), os sistemas de acionamentos foram desenvolvidos para solucionar problemas na operação dos motores. Nas partidas com as altas correntes e o baixo torque, além de evitar o sobreaquecimento e o desgaste dos isolantes das máquinas.

Os sistemas de acionamento dos MIT são a ferramenta necessária para mitigar ou evitar comportamentos de picos de correntes. A adoção de um sistema de partida eficiente é considerada como regra básica para otimização da vida útil dos motores, redução de custos operacionais, segurança e redução com custos de serviços de manutenções na indústria (MAMEDE, 2017).

Quando o motor encontra-se com velocidade praticamente nula, a corrente está no valor máximo, e assim permanecendo até que o motor atinja um valor próximo a sua velocidade de trabalho nominal. Frente a isso, pode-se afirmar que a corrente consumida pelo motor é função da tensão nele aplicada. A principal função das chaves de partidas é a redução dos níveis de

tensão no instante da partida e, posteriormente, a aplicação da tensão nominal ao passo que o motor estiver com sua velocidade plena de trabalho (FRANCHI, 2008).

Diversos critérios são necessários para selecionar o método de partida mais adequado, envolvendo a capacidade da instalação, a carga a ser instalada e capacidade do sistema gerador de energia (MAMEDE, 2017).

Os sistemas de acionamentos clássicos podem ser classificados como: Partida Direta, Chave Estrela-Triângulo, Chave Compensadora com Transformador e partidas eletrônicas através de *Soft-Starter* e Inversores de Frequência.

2.2.1 Partida Direta

A partida direta é o método mais simples de partir um motor, pois não são empregados dispositivos especiais no acionamento. Nesse acionamento, as três fases são ligadas diretamente ao motor ou por intermédio de dispositivos como contadores, disjuntores ou chaves interruptores (FRANCHI, 2008; MAMEDE, 2017). As partidas de motores elétricos com acionamento direto à rede somente podem acontecer caso respeitem tais condições (MAMEDE, 2017):

- A corrente nominal da rede ser elevada ao ponto que a corrente de partida do motor se torne irrelevante;
- A corrente do motor é baixa, porque a potência é pequena, normalmente respeitando os limites máximos de 5 cv, impostos pela concessionária local;
- O motor parte sem carga;

Segundo Franchi (2008), nos sistema de acionamento por partida direta a corrente de partida apresenta o comportamento de ser diretamente proporcional a tensão de alimentação aplicada, reduzindo a medida que a velocidade aumenta. Por outro lado, o conjugado de partida varia proporcionalmente ao quadrado da tensão de alimentação.

Os sistemas de partidas diretas apresentam vantagens e desvantagens pertinentes (FRANCHI, 2008). As vantagens significativas que estas chaves de partidas expressam podem ser definidas por equipamentos simples, que possuem fácil manutenção; possuem conjugado de partida elevado, sendo assim, uma partida rápida e com baixo custo. As desvantagens decorrentes da implementação desta chave de partida são a geração de acentuada queda de tensão no sistema de alimentação da rede, ocasionando interferências em equipamentos instalados nos sistemas; dispositivos e cabos necessitam ser superdimensionados pelos picos de corrente de partida; devem

respeitar limitações impostas pela concessionária para valores de queda de tensão e potência máxima de motores a serem acionados.

2.2.2 Chave estrela-triângulo

Este método de acionamento opera inicialmente de modo que o motor seja ligado na configuração estrela até alcançar velocidade próxima a nominal, onde acontece a troca para a ligação triângulo. Nesta troca de ligação ocorre uma elevação da corrente. Os acionamentos de MIT com chaves estrela-triângulo somente tornam-se possíveis quando este possuir seis terminais para conexão e dispuser de duas tensões nominais (ex. 220/380 V) (MAMEDE, 2017).

Na partida com chave estrela-triângulo, o conjugado e corrente de partida ficam reduzidos a 1/3 de seus valores nominais, assim o motor somente poderá ser acionado através da chave estrela triângulo se seu conjugado for superior ao conjugado da carga no eixo, ficando geralmente submetido a aplicações onde a partida seja à vazio (MAMEDE, 2017).

A chave estrela-triângulo é utilizada quase que exclusivamente para partidas de motores a vazio, ou seja, sem carga. O conjugado de partida é proporcional ao quadrado da tensão de alimentação, tendo assim de 20 à 50% do conjugado nominal. No acionamento mediante chave estrela-triângulo o motor parte em estrela até alcançar velocidade aproximada entre 75% à 85% de sua nominal, onde é realizada a troca da configuração de ligação, alterando-se para ligação triângulo, sendo esta troca comandada através de um temporizador (FRANCHI, 2008).

Os acionamentos mediante partidas estrela-triângulo apresentam relevantes vantagens e desvantagens se comparados ao sistema de acionamento por partida direta (MAMEDE, 2017).

As vantagens de aplicar a chave estrela-triângulo na partida de um motor é que esta chave apresenta custo reduzido; elevado número de manobras; corrente de partida reduzida a 1/3 da corrente nominal; baixas quedas de tensão durante a partida e dimensões relativamente reduzidas.

Na aplicação de uma chave de partida estrela-triângulo existem desvantagens que podem ser elencadas de modo que o motor necessita ter dupla tensão e disponha de no mínimo seis terminais acessíveis; o conjugado de partida é reduzido a 1/3 do conjugado nominal; a tensão da rede deve coincidir com a tensão triângulo do motor, além de que o motor deve alcançar ao menos 90% de sua velocidade de regime permanente, para que a corrente, não atinja valores elevados durante a comutação, similares a uma partida direta.

2.2.3 Chave Compensadora

A chave compensadora é composta por um autotransformador com várias derivações, responsáveis pela regulação do processo de partida. O autotransformador é ligado diretamente ao circuito do estator do motor. O ponto estrela do autotransformador fica acessível, sendo curto-circuitado durante a partida, ligação esta que se desfaz ao passo que o motor é conectado diretamente à rede (MAMEDE, 2017).

Conforme Mamede (2017), este tipo de acionamento geralmente é empregado em partidas de motores de elevadas potências, acionando cargas com altos índices de atrito (britadores, máquinas acionadas por correias transportadoras, calandras e semelhantes).

As chaves de partida compensada com autotransformador, alimentam as bobinas do motor com tensão reduzida na partida. Para que a tensão nas bobinas do motor sejam reduzidas, o autotransformador é ligado em série com as mesmas. Posteriormente a partida as bobinas do motor recebem a tensão nominal da rede (FRANCHI, 2008).

As derivações usualmente são de 65% e 80% (MAMEDE, 2017). Conforme Franchi (2008) as reduções das tensões aplicadas aos motores, ocorrem devido ao (TAP) ao qual se encontram ligadas:

- **TAP 65%** reduz para 42% da tensão da partida direta;
- **TAP 80%** reduz para 64% da tensão da partida direta;

As chaves de partidas compensadoras apresentam algumas vantagens como (poderem partirem motores sob carga, motores com uma única tensão e com apenas três cabos acessíveis), já como desvantagens pode-se elencar (custo superior comparado a chave estrela-triângulo; maior espaço físico requerido e limitação de manobras) (FRANCHI, 2008).

Atualmente, as partidas com chave compensadora por autotransformador caíram em desuso, pois este método apresenta pontos negativos que são preponderantes. Como o sistema de chave compensadora com autotransformador necessita de um espaço físico bem maior que outras chaves de partidas, por utilizar um transformador em sua configuração, e este ser de um porte físico grande, acaba sendo um ponto dificultador dentro de uma planta industrial.

2.2.4 *Soft-Starters*

As chaves eletrônicas estáticas de partidas chamadas de *soft-starters* são empregadas no acionamento de motores de corrente alternada, assegurando a aceleração e desaceleração

progressivas, adaptando-se a velocidade mediante as condições de operação. A variação da alimentação do motor é feita a partir de um aumento progressivo da tensão, permitindo uma partida suave, sem golpes, reduzindo os picos de corrente (FRANCHI, 2008).

Para Amaral (2013), as *soft-starter* são dispositivos empregados na aceleração e frenagem dos motores, tendo como princípio de funcionamento o controle do ângulo de disparo dos tiristores. Este controle do ângulo de disparo permite a redução da tensão de partida dos motores, permitindo um acionamento mais suave, correntes de partida menores, evitando quedas de tensões e solicitações mecânicas indesejadas.

As chaves de partida *soft-starter* são chaves microprocessadas que controlam o ângulo de disparo de um conjunto de tiristores, de modo que seja aplicada uma tensão variável sobre os terminais do motor durante a etapa de aceleração. Esta característica proporciona a redução dos elevados níveis de conjugado de aceleração e corrente de partida, além de gerar proteção aos desgastes mecânicos e a rede elétrica devido aos afundamentos momentâneos de tensão (RAMOS, 2009).

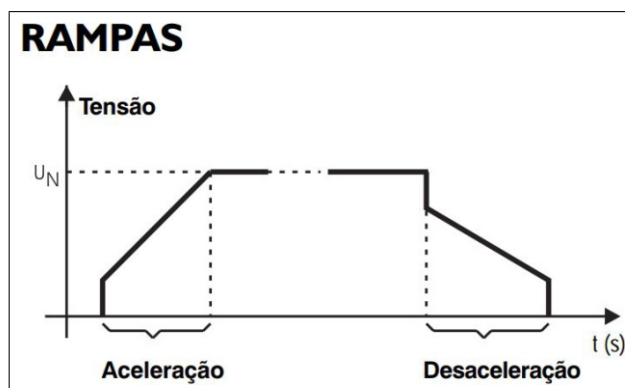
As principais características dos acionamentos com chaves *soft-starter* são:

- Controle das rampas de aceleração e desaceleração;
- Limitação de corrente ajustável;
- Controle de conjugado na partida;
- Controle por impulso de tensão;
- Frenagem por injeção de corrente contínua;
- Proteção do acionamento por sobrecarga;
- Proteção do motor contra aquecimentos, causados por sobrecargas ou partidas frequentes;
- Detecção de desequilíbrio ou falta de fases e defeito nos tiristores;
- Função economia de energia;
- Controle de Fator de potência.

2.2.4.1 Principais funções das chaves *soft-starter*

As principais funções que as chaves eletrônicas de acionamento *soft-starter* apresentam, podem ser expressas pelas Figuras 2, 3, 4 e 5.

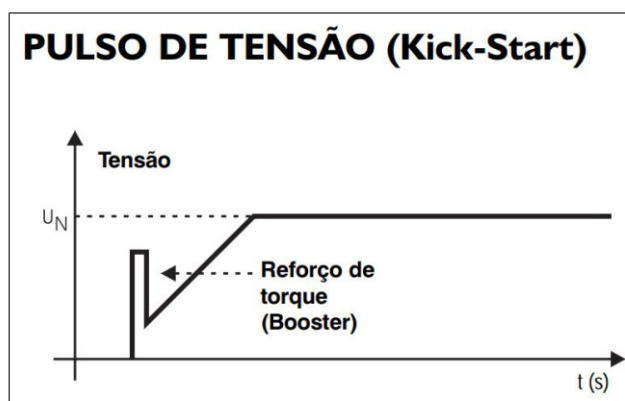
Figura 2 – Função rampas da chave eletrônica *soft-starter*



Fonte: WEG (2001)

A função rampas de uma chave eletrônica *soft-starter* permite que sejam configuradas rampas para a aceleração ou desaceleração do motor de forma suave. Durante a etapa de aceleração são ajustados a tensão de pedestal e na etapa de desaceleração ajusta-se o degrau inicial da tensão (WEG, 2001). Na desaceleração é evitado o Golpe de Ariete em bombas.

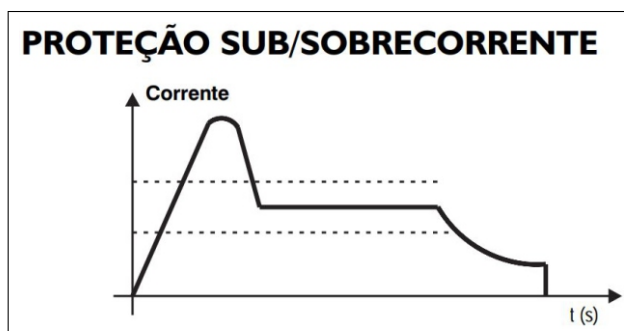
Figura 3 – Função pulso de tensão (*Kick-Start*) da chave eletrônica *soft-starter*



Fonte: WEG (2001)

A função pulso de tensão permite que seja implementado um pulso inicial na tensão aplicada ao motor, proporcionando assim um reforço do torque de partida. Esse reforço torna-se necessário para partidas de cargas que apresentem elevado atrito inicial, ou cargas com grande inércia (WEG, 2001).

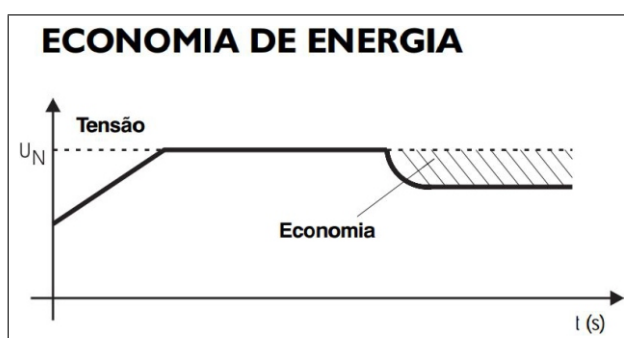
Figura 4 – Função proteção sub/sobrecorrente da chave eletrônica *soft-starter*



Fonte: WEG (2001)

Esta função de proteção tem por finalidade ajustar os limites de subcorrente e sobrecorrente para a proteção do motor. A proteção de subcorrente faz-se a melhor opção quando aplicada em bombas, pois é responsável por evitar o funcionamento à vazio e a consequente queima da mesma (WEG, 2001).

Figura 5 – Função economia de energia da chave eletrônica *soft-starter*



Fonte: WEG (2001)

O objetivo desta função é diminuir as perdas no entreferro do motor, proporcionando uma economia de energia quando estiver operando à vazio ou com carga reduzida (WEG, 2001).

2.2.4.2 Arquitetura das chaves *soft-starter*

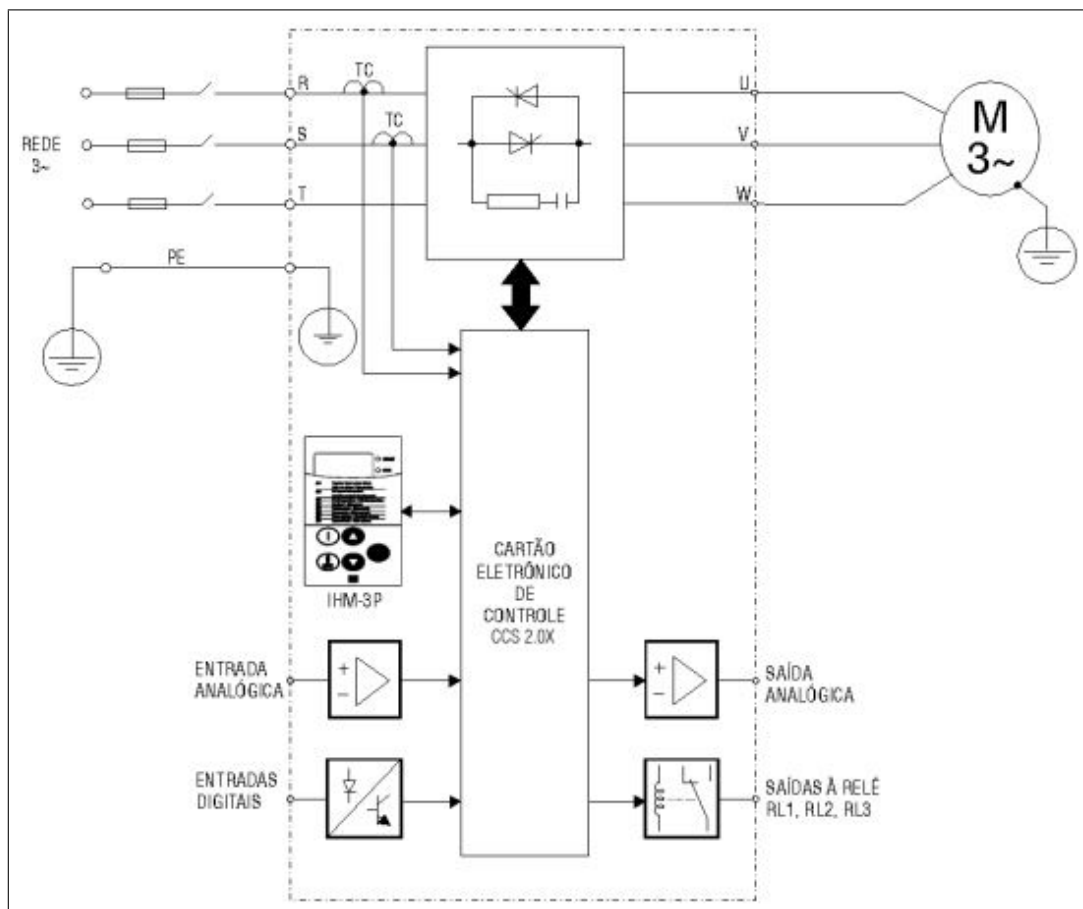
O funcionamento das chaves *soft-starter* baseia-se na utilização de tiristores ou ponte tiristorizada, na configuração antiparalelo, comandada por uma placa eletrônica de controle, com a finalidade de ajustar a tensão de saída para os terminais do motor (FRANCHI, 2008).

Segundo Franchi (2008), a arquitetura de uma chave *soft-starter* está dividida em dois circuitos principais (Circuito de controle e Circuito de potência), que realizam suas funções

características. Assim, na Figura 6, fica expressa a forma construtiva simplificada de uma chave eletrônica de acionamento de máquinas elétricas "soft-starter".

No circuito *snubber* (RC), que está em paralelo com os tiristores, fornece proteção contra variações de tensão aplicadas sobre aos tiristores. Os transformadores de corrente, realizam a monitoração da corrente de saída, e o controle eletrônico efetua a proteção e manutenção dos valores de corrente nos níveis predefinidos (FRANCHI, 2008).

Figura 6 – Diagrama de blocos simplificado da chave eletrônica *soft-starter* para o acionamento de MIT



Fonte: WEG (2000)

Circuito de Controle é o local onde estão os circuitos responsáveis pelo comando, monitoração e proteção dos componentes do circuito de potência, e os circuitos utilizados no comando, sinalização e interface homem/máquina (IHM) (FRANCHI, 2008).

Circuito de Potência é o circuito onde circula a corrente que é fornecida para os terminais do motor. Neste circuito estão localizados os tiristores (SCRs) e suas proteções, além dos transformadores de corrente (TCs) (FRANCHI, 2008).

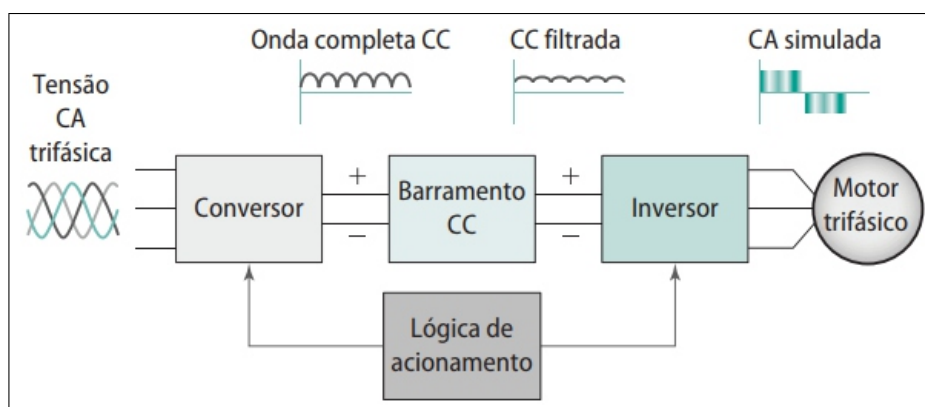
2.2.5 Inversores de frequência

O inversor de frequência, que também é conhecido como unidade de acionamento de velocidade variável, permite que o motor acione cargas que operam em uma ampla faixa de velocidades, contemplando a necessidade de operação da carga. Quando é realizado o controle da velocidade dos motores, automaticamente há um aumento de eficiência dos mesmos e de toda a instalação onde estão inseridos (PETRUZELLA, 2013).

O inversor de frequência é um equipamento versátil e dinâmico que possibilita o controle da velocidade de motores de indução trifásicos de forma mais eficiente e com as menores perdas no dispositivo de acionamento. Este promove o controle e ajuste contínuo da velocidade e conjugado relacionado à carga (FRANCHI, 2008).

No diagrama da Figura 7, é representado a configuração básica de um inversor de frequência.

Figura 7 – Diagrama de blocos simplificado da chave eletrônica "inversor de frequência"



Fonte: Petruzella (2013)

Para Paixao (2009) uma das maneiras mais utilizadas no controle de velocidade de motores são os conversores de frequência ou inversores de frequência.

Os inversores de frequência são dispositivos eletrônicos empregados na operação de motores elétricos de rotor em curto-circuito, convertendo a amplitude da frequência e da tensão, que originalmente são fixas, em largas faixas de amplitudes variáveis. Funcionam retificando a tensão alternada do alimentador de tensão do motor por meio de seis tiristores, modulando a largura do pulso resultante, gerando uma corrente trifásica com frequência e tensão variáveis (MAMEDE, 2017).

Para Petruzella (2013), conforme supracitado na Figura 7, o inversor de frequência pode ser dividido em quatro blocos (conversor, barramento CC, inversor e lógica de acionamento).

Conversor é um retificador de onda completa que realiza a conversão da tensão aplicada em CA para CC (PETRUZELLA, 2013).

Barramento CC conecta a saída do conversor na entrada do inversor. Funciona como um filtro para suavizar a saída irregular, com a finalidade de garantir que a saída retificada assemelhe-se a uma tensão CC pura (PETRUZELLA, 2013).

Inversor recebe uma tensão CC filtrada do barramento CC e realiza a conversão para uma onda CC pulsante. A forma de onda CC pulsante simula uma forma de onda CA de frequência diferentes (PETRUZELLA, 2013).

Lógica de Acionamento é responsável pela geração dos pulsos necessários para controlar os disparos dos semicondutores de potência (SCRs ou IGBTs). Realiza a comutação dos dispositivos de potência em uma sequência correta. Na placa de acionamento é incorporado um microprocessador utilizado para controlar toda a lógica interna e a necessidade de tomada de decisões (PETRUZELLA, 2013).

Os inversores de frequência, por apresentarem ampla gama de características e qualidades, são empregados nas mais diversificadas condições:

- Controle da velocidade angular do motor;
- Controle do conjugado do motor;
- Operação de motores em partidas e paradas suaves;
- Controle e regulação do golpe de aríete em sistemas de bombeamento de água;
- Rendimento de 90% em toda a faixa de frequência;
- Fator de potência de 96%;
- Acionamento de cargas com torque constante ou variável;
- Partidas em rampas:
- Eliminação das altas correntes de partidas;
- Acionamento de motores com frequência que pode variar de 1 a 60Hz;
- Elimina vibrações exageradas.

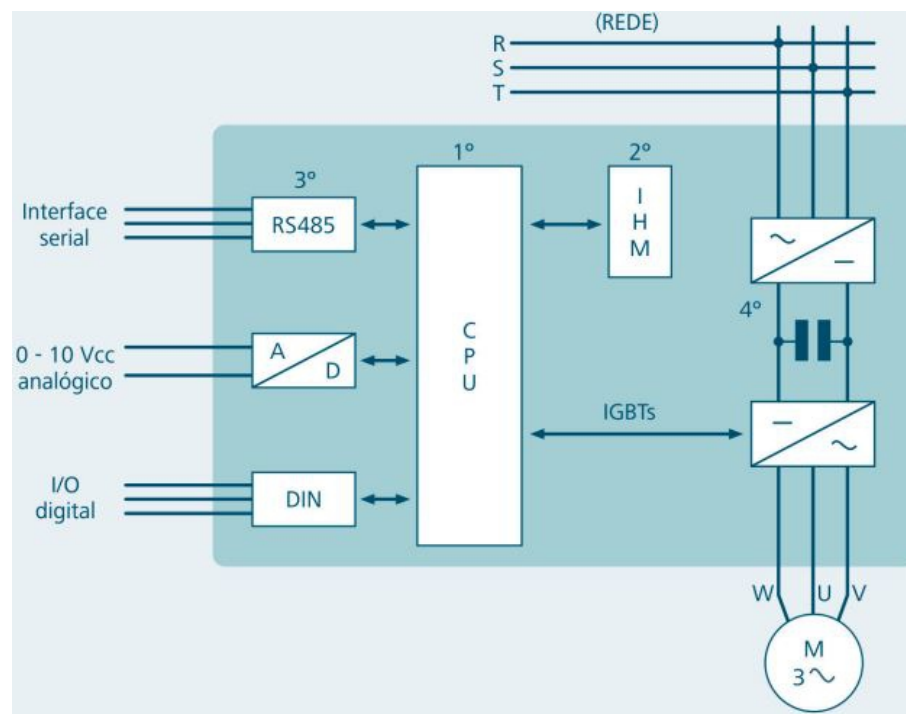
2.2.5.1 Arquitetura do inversor de frequência

Conforme Franchi (2008), o inversor de frequência pode ser dividido em quatro grupos (CPU, IHM, Interfaces, Potência), ficando expresso mediante a Figura 8.

CPU (Unidade Central de Processamento) é formada por um microprocessador ou um microcontrolador. Neste bloco todas as informações (parâmetros e dados do sistema) estão armazenados, além de executar a função de gerar os pulsos de disparos para os *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBTs), por meio de lógica de controle coerente (FRANCHI, 2008).

IHM (Interface Homem Máquina) é através da IHM que é visualizado o que está acontecendo no inversor (*display*), como as grandezas mensuradas no motor (tensão, corrente, frequência, status de alarmes, sentido de giro, modo de operação (local ou remoto), além de possibilitar, ligar ou desligar o inversor, variação de velocidade e alteração de parâmetros de acordo com a aplicação (teclas) (FRANCHI, 2008).

Figura 8 – Diagrama de blocos de um inversor de frequência



Fonte: Adaptado de Franchi (2008)

Interfaces, nos inversores são o conjunto de entradas e saídas que podem ser comandadas por sinais analógicos, digitais ou por comunicação serial (FRANCHI, 2008).

Os sinais analógicos podem ser por tensão ou por corrente, sendo respectivamente (0-10 Vcc) ou (0-20 mA, 4-20 mA), assim realizando o controle de velocidade (entrada) e leituras de

corrente e velocidade (saída). Os sinais digitais funções mais simples como (selecionar sentido de rotação, bloqueio do inversor, seleção de velocidades pré-definidas). A comunicação serial garante que o inversor possa ser controlado ou monitorado externamente por um computador. Esta comunicação ocorre por pares de fios, assim podendo comunicar-se tanto com outros inversores, computadores ou Controladores Lógicos Programáveis (CLPs), e os protocolos de comunicação comumente utilizados são (*field bus*, RS232 e RS485) (FRANCHI, 2008; FRANÇA, 2019).

Potência é constituída por um circuito retificador, circuito intermediário (barramento CC), e o circuito de saída inversor (módulo IGBT) (FRANCHI, 2008).

2.3 Métodos de partida e controle utilizados em inversores de frequência

Os métodos de controle aplicados as chaves eletrônicas de acionamento como inversores de frequência são diversificados. Dentre estes, pode-se elencar os métodos que geralmente são empregados, controle escalar e controle vetorial.

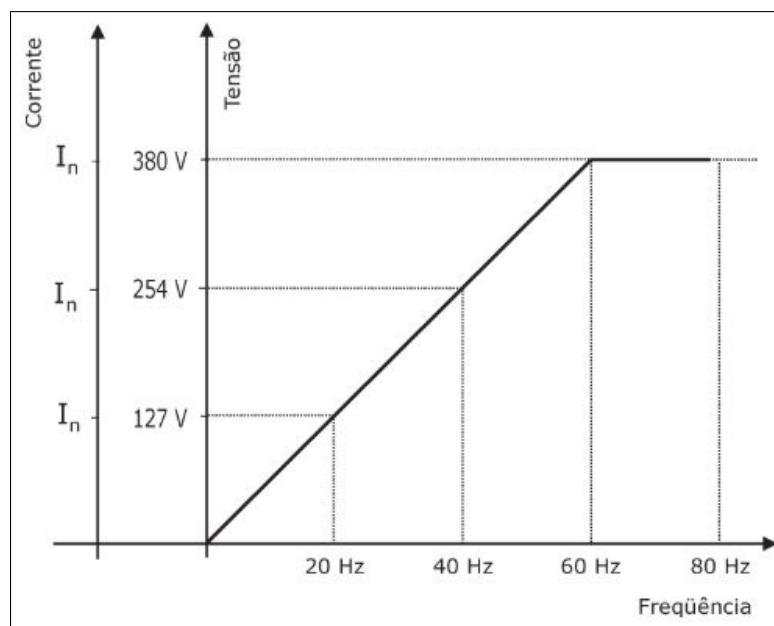
2.3.1 Controle Escalar

É o método de controle do inversor de frequência que faz o motor operar controlando a tensão e a frequência, mantendo sua relação constante para qualquer valor de velocidade na operação. A Figura 9 demonstra o comportamento da tensão pela frequência no controle escalar de um inversor de frequência.

A velocidade do motor pode variar em faixas estreitas em função de seu escorregamento. Utilizado em aplicações rotineiras, que não necessitem controle de conjugado e que o controle de velocidade esteja numa faixa que varia de 6 à 60 Hz. O controle escalar do inversor utiliza a velocidade do motor para variar a tensão e a frequência e disparar os tiristores. São aplicados nos MIT com rotor gaiola de esquilo, com sistema de malha aberta, sem realimentação, por serem mais simples e baratos (MAMEDE, 2017).

A variação de frequência é a forma mais eficiente de controlar a velocidade de rotação de um motor assíncrono, permitindo o controle por este acionados de forma linear desde valores próximos de zero até valores superiores a velocidade de rotação nominal do motor, dependendo do variador de frequência aplicado (LEITE, 2018).

Figura 9 – Comportamento do controle escalar



Fonte: Mascheroni, Lichtblau e Gerardi (2007)

2.3.2 Controle vetorial

O controle vetorial faz o motor operar com elevada precisão de velocidade e rapidez na alteração da velocidade e do conjugado. Esse controle é aplicado em máquinas operatrizes, pois podem controlar a velocidade e o conjugado do motor tendo como referência a corrente do próprio motor, conseqüentemente apresentando um controle mais preciso. O controle vetorial do inversor determina a corrente do estator, a corrente de magnetização e a corrente requerida para produzir o conjugado necessário para a operação do motor (MAMEDE, 2017). Os inversores de freqüência com controle vetorial apresentam-se em duas versões:

- Inversores de freqüência sem sensor (*sensorless*), mais simplificados e que não tem regulação de conjugado;
- Inversores de freqüência com realimentação controlada pelo campo magnético (*encoder*).

2.4 Dispositivos dos sistemas de acionamento

Os dispositivos elétricos são componentes de um sistema manual ou automatizado, responsáveis pela comutação e controle da passagem de corrente elétrica e da potência fornecida para uma determinada carga ou para um ou mais pontos do circuito elétrico de comando e força, empregados no acionamento de máquinas elétricas (FRANCHI, 2008; PETRUZELLA, 2013).

Dentre os dispositivos utilizados no acionamento pode-se citar chaves manuais, chaves de atuação mecânicas, chaves seccionadoras, sensores de monitoração, relés, contadores, fusíveis, temporizadores, CLPs, motores, autotransformadores, *soft-starter*, inversores de frequência, etc (PETRUZELLA, 2013).

2.4.1 Motores de indução trifásicos

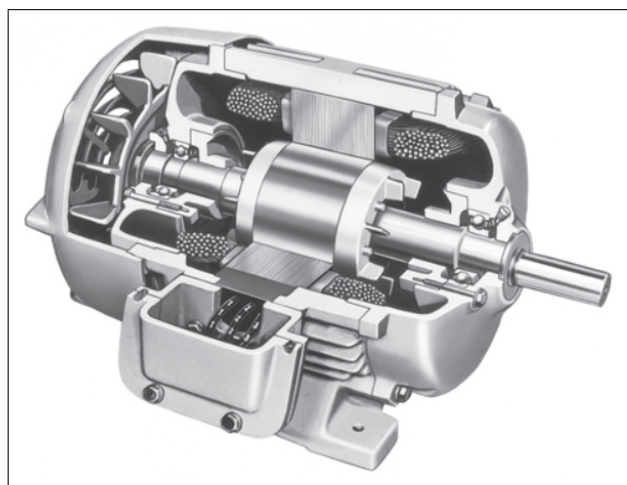
Esta seção tratará dos motores de indução trifásicos, suas principais características de funcionamento e construtivas. Os motores elétricos são dispositivos que transformam a energia elétrica em energia mecânica (cinética), baseados no princípio do magnetismo e nas correntes elétricas (FRANCHI, 2008; PETRUZELLA, 2013).

Os motores de indução assíncronos com rotor gaiola de esquilo, são máquinas amplamente implementadas no setor industrial, por caracterizarem-se como máquinas robustas, de fácil manutenção e apresentarem torque de partida que atende a maioria das necessidades.

2.4.1.1 Motores de indução trifásicos com rotor gaiola de esquilo

Os MIT assíncronos com rotor gaiola de esquilo, são máquinas construídas embasados em duas partes principais (Estator e Rotor). Na Figura 10, é apresentado um diagrama em corte de um motor de indução trifásico com rotor de gaiola de esquilo.

Figura 10 – Diagrama em corte de um motor de indução trifásico com rotor gaiola de esquilo

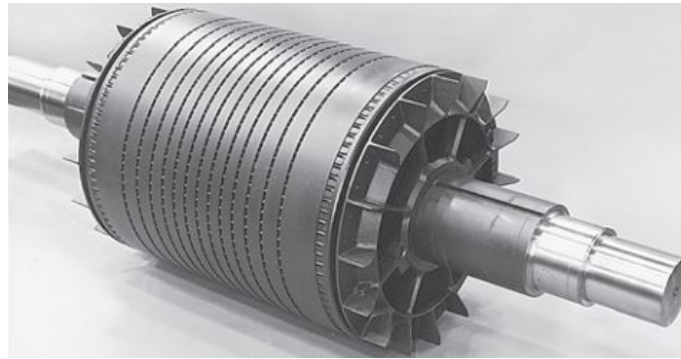


Fonte: Chapman (2013)

Rotor é construído utilizando um determinado número de barras individuais curto-

circuitadas nas extremidades por anéis e configuradas na forma de uma roda de hamster ou gaiola de esquilo (PETRUZELLA, 2013). Figura 11 apresenta um típico rotor de gaiola de esquilo.

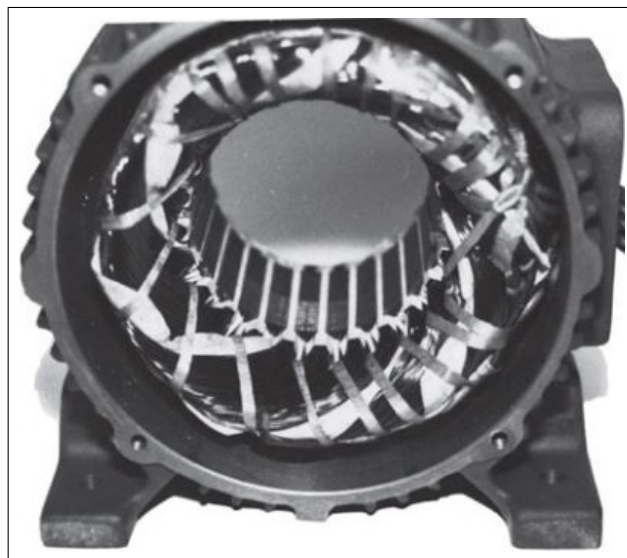
Figura 11 – Rotor típico de um motor de indução trifásico com rotor gaiola de esquilo



Fonte: Chapman (2013)

Estatador é onde são montadas as bobinas de cada fase, responsáveis pelo campo magnético girante trifásico na máquina. Cada bobina é posicionada de modo a apresentarem 120° elétricos de defasagem entre elas, possuindo o mesmo número de bobinas conectadas para o mesmo número de polos (CARVALHO, 2011; PETRUZELLA, 2013). Um estator de uma máquina elétrica trifásica é exemplificado mediante a Figura 12.

Figura 12 – Estator típico de um motor de indução trifásico



Fonte: Chapman (2013)

2.4.1.2 Princípio de funcionamento dos motores assíncronos trifásicos

O princípio de funcionamento dos motores assíncronos trifásicos é baseado em três enrolamentos instalados no estator conectados diretamente a fonte de alimentação e dispostos fisicamente de 120° um do outro. A fonte de alimentação do sistema elétrico trifásico também apresenta defasagem de 120° cada, conseqüentemente, formando um campo magnético girante, numa frequência angular definida pelo sistema de alimentação (MAMEDE, 2017).

O campo magnético girante atravessa o entreferro atingindo a massa rotórica, induzindo nas barras rotóricas forças eletromotrizes. As barras do rotor são curto-circuitadas nas extremidades por anéis, para que haja um fluxo de corrente circulante interagindo com o campo girante estatórico, produzindo o conjugado eletromecânico que arrasta o rotor no sentido deste campo. Para existir o conjugado da velocidade angular do rotor, é necessário que a velocidade angular do campo girante estatórico seja um pouco menor (MAMEDE, 2017).

Estas máquinas ao serem alimentados por uma fonte de excitação equilibrada no estator geram um conjunto de correntes trifásicas alternadas, assemelhando-se a um campo magnético girante, que conseqüentemente induzindo tensões no rotor, gerando novas correntes. Devido a esta interação existente entre os dois campos magnéticos, surge o conjugado eletromagnético responsável por gerar a aceleração do motor (UMANS, 2014).

Os MITs assíncronos apresentam uma velocidade de rotor diferente da velocidade síncrona exercida pelo campo magnético do estator, gerando a chamada velocidade de escorregamento (CHAPMAN, 2013).

2.4.1.3 Perdas ôhmicas de um motor elétrico

O motor, durante o processo de conversão de energia, absorve do circuito de alimentação determinada potência para que esta seja transmitida para o eixo de acionamento da carga. Porém, existem perdas internas que apresentam-se na forma de calor gerado pelo aquecimento das bobinas dos enrolamentos, perdas mecânicas e perdas magnéticas que interferem diretamente nesta eficiência e conversão direta (MAMEDE, 2017).

As perdas existentes em motor elétrico podem ser expressas por:

- Perdas Joule nas bobinas estatóricas: perdas no cobre (P_{cu});
- Perdas Joule nas bobinas rotóricas: perdas no cobre (P_{cu});
- Perdas magnéticas estatóricas: perdas no ferro (P_{fe});

- Perdas magnéticas rotóricas: perdas no ferro (P_{fe});
- Perdas por ventilação (P_v);
- Perdas por atrito dos mancais: perdas mecânicas (P_m).

Esta diferença entre a potência mecânica de saída disponível ao eixo e a potência absorvida do circuito de alimentação é o chamado rendimento do motor, que pode variar de 0 até 1 ou de forma percentual de 0% até 100% (MAMEDE, 2017).

As perdas existentes nos motores, como as perdas no cobre, perdas no ferro do núcleo, perdas por magnetização, perdas mecânicas são características implícitas da máquina, referentes a sua forma construtiva e aos materiais aplicados em sua construção. Para Sarda (2018), os motores são máquinas de elevada eficiência, aproximando-se aos 90%. Todavia existem frente a isto cenários que contribuem para que esta eficiência seja reduzida de forma significativa, como no casos de rebobinagens de motores.

O processo de rebobinagem do motor ocorre substituindo as bobinas danificadas e suas isolações. Estas práticas podem afetar diretamente o rendimento do motor, ao substituir os materiais danificados, por materiais diferentes aos de sua fabricação original, acarretará em perdas extras. Pode-se exemplificar a substituição dos fios utilizados nas bobinas, por fios de uma bitola diferente, causando um aumento das perdas no cobre do motor (SARDA, 2018).

2.4.1.4 Ensaios Paramétricos

Para realizar a simulação com motores de indução, e obter os resultados mais incontestáveis frente aos valores reais, se faz necessária a realização de ensaios para encontrar-se os parâmetros do circuito equivalente do motor R_1 (Resistência efetiva do estator); R_2 (Resistência do rotor); X_1 (Reatância de dispersão do estator); X_2 (Reatância de dispersão do rotor) e X_m (Reatância de magnetização)). Tais parâmetros podem ser obtidos através de ensaios à vazio, ensaios de rotor bloqueado e medições das resistências CC dos enrolamentos do estator.

As normativas vigentes que regulamentam os ensaios para máquinas girantes no Brasil são ABNT NBR17094-1 de 04/2018, que regula os requisitos mínimos para Máquinas Elétricas Girantes-Parte 1- Motores de Indução Trifásicos. A ABNT NBR17094-2 de 03/2016, que regula os requisitos mínimos para Máquinas Elétricas Girantes- Parte 2- Motores de Indução Trifásicos. A ABNT NBR17094-3 de 04/2018, que regula os métodos de ensaios para Máquinas Elétricas Girantes-Parte 3- Motores de Indução Trifásicos, e pela Normativa IEEE Std.112 de 2004.

2.5 Estudos de eficiência nos sistemas de acionamento de motores de indução trifásicos

Segundo Lima E Silva (2018), o dispositivo empregado no acionamento de motores de indução que apresenta um ganho de eficiência e otimiza o funcionamento do sistema é o inversor de frequência, pois este pode proporcionar ao motor maiores níveis de torque e alcançando melhores níveis de eficiência em toda sua faixa de controle de frequência.

Acionar motores com velocidade variável, se torna uma forma eficaz para redução do consumo de energia e conseqüentemente aumentar a eficiência energética dos motores e do sistema. Segundo Borne (2010), ao ser associado um inversor de frequência a um sistema hidráulico ou de ventilação, pode-se proporcionar uma significativa economia de energia com o controle de vazão ou de fluxo de ar, reduzindo também os desgastes dos equipamentos dos sistemas. Ao ser substituído um controle de vazão do estrangulamento por meio de válvula, por um controle com inversor de frequência a economia de energia pode alcançar valores de 74% na vazão de água e até 85% para vazão de ar (BORNE, 2010).

Assim para Borne (2010) apud Peñalba; Pardo (2007) a substituição de válvulas de controle de fluxo por acionamentos variáveis em motores elétricos que não tenham a necessidade de operação em plena carga durante todo o seu tempo (bombas e ventiladores), ajustando-se a velocidade do motor em função da demanda da carga, torna-se um método eficaz no tocante da redução do consumo de energia e conseqüentemente na melhora da eficiência energética do sistema.

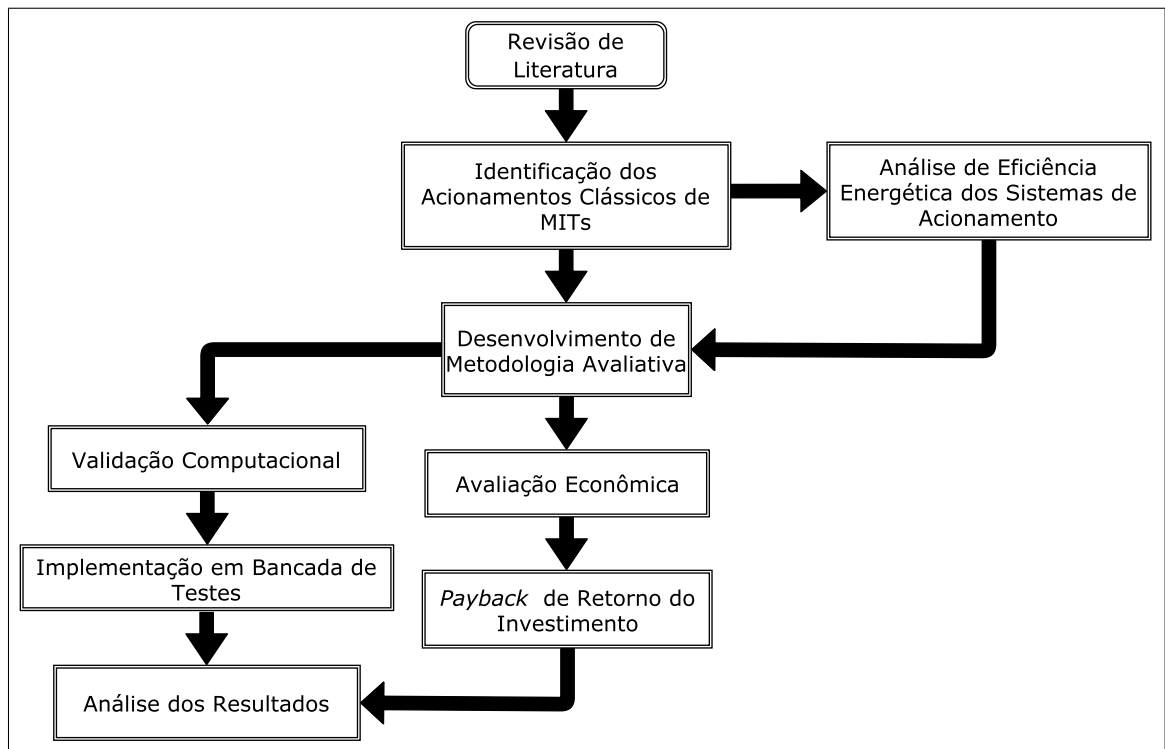
Ainda mediante Borne (2010) apud Pires; Mello (2007), a redução da frequência acarreta na redução das perdas no ferro do motor, permitindo que a indução magnética aumente nas baixas velocidades de operação, possibilitando ao motor manter seu conjugado constante mesmo com valores de corrente menores. Este ganho no fluxo é decorrente do aumento da relação V/F , implementada por meio de um conversor de frequência.

Em estudo de caso na empresa SUDATI PAINÉIS, onde motores utilizados como bombas centrífugas operavam continuamente sem que houvesse tal necessidade, pois eram aplicados até alcançar certas condições de pressão ou enchimento. Assim poderiam operar durante 30% do dia na sua capacidade nominal e os outros 70% em *standy by*. Para tal problema, propôs a utilização de inversor CFW 701 da marca WEG, para realizar o controle do tempo que os motores operam em capacidade nominal e quando ficam em *standy by*, acarretando conseqüentemente numa melhor eficiência do sistema (SARDA, 2018).

3 METODOLOGIA

O objetivo deste capítulo é a descrição dos procedimentos metodológicos aplicados na elaboração do trabalho proposto, elucidando o escopo do trabalho, e apresentando a estrutura guia do mesmo. Na Figura 13, é expresso o fluxograma da estrutura do corpo do trabalho.

Figura 13 – Fluxograma estrutural implementado no desenvolvimento do trabalho



Fonte: Elaborada pelo autor

Para atingir os objetivos propostos, foram seguidas determinadas etapas, divididas da seguinte forma.

- Revisão bibliográfica;
- Estudo dos sistemas de acionamentos aplicados no projeto;
- Desenvolvimento de metodologia avaliativa de análise da eficiência energética dos sistemas acionamentos de MIT;
- Validação computacional dos métodos;
- Implementação em Bancada de testes;
- Análise financeira e estimação de tempo de retorno do investimento.

A revisão bibliográfica desenvolveu-se embasada na leitura de teses, dissertações, trabalhos de conclusão de curso, artigos, manuais técnicos, normas e livros relacionados ao projeto, com a primordial característica, nortear-se pelos principais pontos trabalhados pelos autores.

O estudo dos sistemas de acionamentos foi baseado nos diagramas de ligação desenvolvidos no *software* CAdESIMU V3, para análise do funcionamento e comportamento de cada um dos dispositivos empregados nos sistemas.

A metodologia desenvolvida foi alicerçada frente a simulação dos métodos de acionamentos no *software* PSIM. Nestas simulações utilizou-se os métodos de acionamentos (partida direta, chave estrela-triângulo, chave eletrônica *soft-starter* e inversor de frequência), empregados no acionamento dos motores de indução trifásico de (1/2 cv e 1 cv). Posteriormente as simulações, realizou-se a implementação em bancada de testes para obtenção dos resultados experimentais, e conseqüente validação.

Realizou-se uma avaliação da eficiência energética das chaves de partidas. Analisou-se de forma quantitativa e qualitativa esta eficiência evidenciando uma avaliação econômica e estimação do tempo de retorno, tornando atrativo um futuro investimento necessário a substituição da tecnologia implementada no acionamento de um motor de indução trifásico.

3.1 Sistemas de partida e acionamentos empregados

Nesta seção são abordados os diagramas de ligação, e o modo de funcionamento das chaves de partidas empregados no desenvolvimento do trabalho. Tais diagramas são utilizados como base para a verificação da efetividade da metodologia proposta, e para a análise da eficiência em acionamentos dos MIT. Os diagramas apresentados foram desenvolvidos no *software* de simulação CAdESIMU V3.

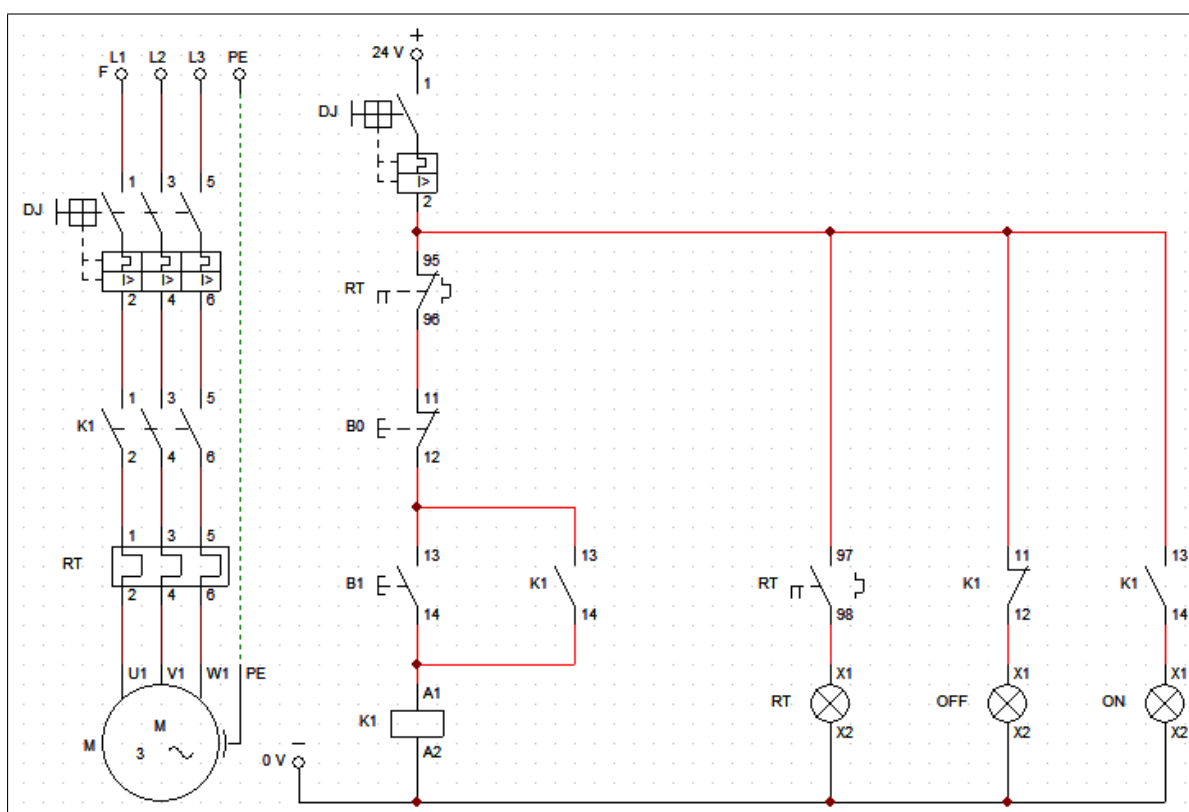
3.1.1 Partida direta

Os diagramas unifilares de força e comando da partida direta para motores de indução são representados conforme Figura 14. No diagrama de força, as três fases estão interligadas aos terminais do disjuntor DJ, que realiza o seccionamento da alimentação para o contator K1. Aos bornes de saída do contator está diretamente acoplado o relé térmico RT de proteção do motor. Os bornes de saída do relé térmico realizam a conexão da alimentação com os terminais do motor.

O diagrama de comando é alimentado por uma rede de 24 Vcc. O circuito é alimentado ao

pressionar a botoeira B1, que alimenta a bobina do contator K1, fechando os contatos 13/14-K1 e realizando o selo do contator. O motor é alimentado pelo circuito de força. As três lâmpadas em paralelo com a linha principal do comando são utilizadas para sinalização de casos de (motor ligado, motor desligado e motor desligado por atuação do relé térmico). No diagrama de comando são apresentados também as proteções para este circuito, como o disjuntor monofásico, o contato normalmente fechado do relé térmico e a botoeira B0 de emergência (desliga geral).

Figura 14 – Diagrama de força e comando do acionamento por chave de partida direta



Fonte: Elaborada pelo autor

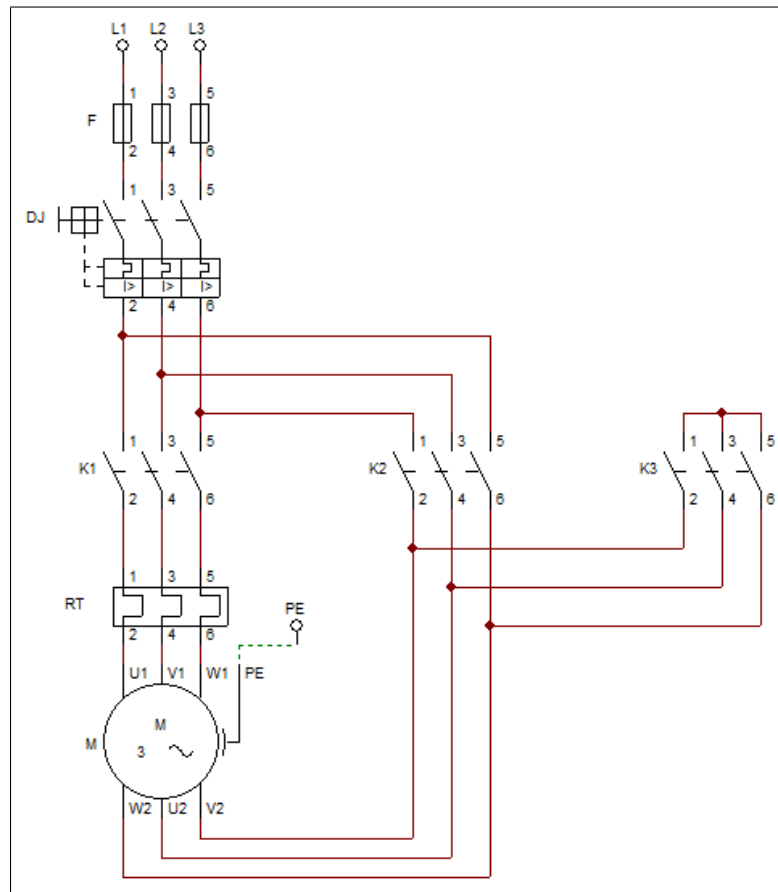
3.1.2 Partida chave estrela triângulo

Nas Figuras 15 e 16 estão representados os diagramas força e comando do sistema de acionamento através da chave estrela-triângulo. O diagrama de força da chave de partida estrela-triângulo é alimentado por uma rede trifásica, com fusíveis para proteção de sobrecorrente do circuito, um disjuntor DJ trifásico que realiza o seccionamento da alimentação para as bobinas dos contatores K1, K2 e K3, o relé térmico acoplado diretamente no contator K1, realiza a proteção térmica de sobrecarga no motor além de ser o ponto de conexão da alimentação entre o contator K1 e o motor.

No primeiro momento, quando o motor partirá em estrela, os contatores K1 e K3 são

acionados. O contator K3 opera criando um ponto comum, caracterizando uma ligação em estrela. Após um determinado tempo designado pelo circuito de comando a configuração se altera, acionando assim os contadores K1 e K2, para operar em regime da configuração triângulo.

Figura 15 – Diagrama de força do sistema de acionamento estrela-triângulo

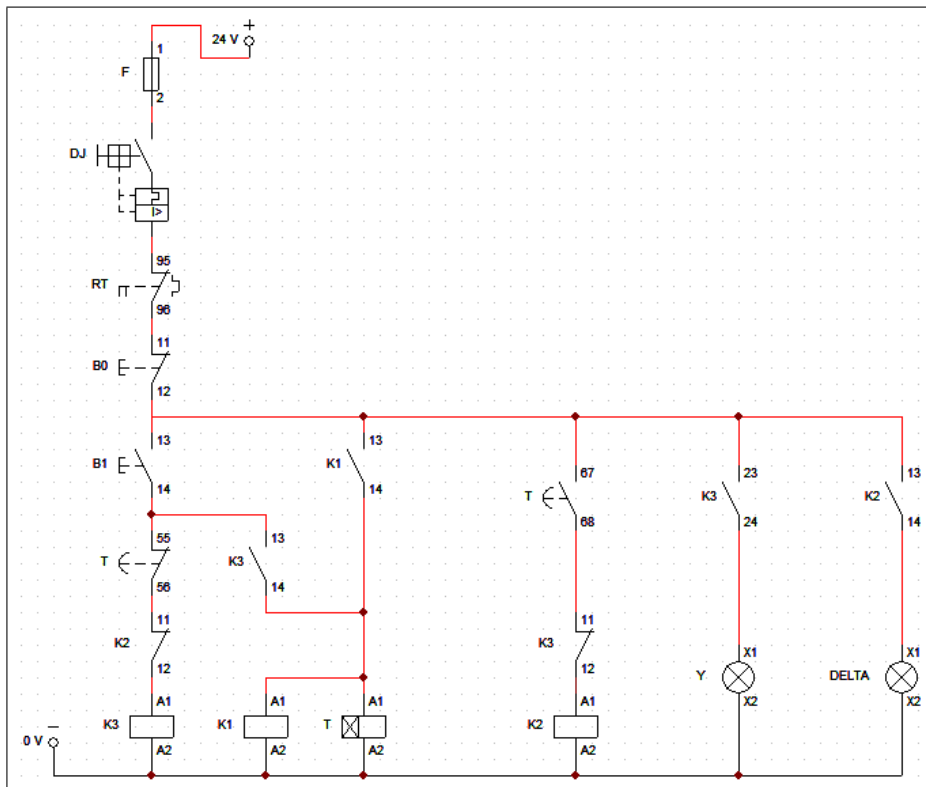


Fonte: Elaborada pelo autor

O circuito de comando da chave de partida estrela-triângulo é alimentado por uma tensão de 24 Vcc. No circuito de comando, ao pressionar a botoeira B1, a alimentação chega até a bobina do contator K3, através do contato normalmente fechado do temporizador T. Quando a bobina do contator K3 é alimentada, ela fecha os contatos auxiliares 13/14 de K3, alimentando a bobina do temporizador T e a bobina do contator K1 que estão em paralelo. O temporizador funciona com o princípio de contagem de tempo pré-determinado para que ocorra a alteração da configuração da estrutura da ligação de alimentação do motor, partindo de estrela para triângulo. Quando o tempo determinado no temporizador ocorrer, é fechado seu contato normalmente aberto 67/68 do T e é alimentada a bobina do contator K2, desligando o contator K3 através de um contato de intertravamento. Este tempo de alteração da configuração fica determinado conforme aplicação pelo projetista, acrescido a um tempo de aproximadamente 100ms de valor

fixo para que não ocorra um curto-circuito referente aos tempos de abertura e fechamento dos contatos mecânicos dos contatores. O circuito de comando apresenta também um fusível de proteção, um disjuntor para seccionamento, um contato do relé térmico para proteção de sobrecarga e uma botoeira B0, que funciona como chave geral, desligando todo o circuito.

Figura 16 – Diagrama de comando do sistema de acionamento estrela-triângulo



Fonte: Elaborada pelo autor

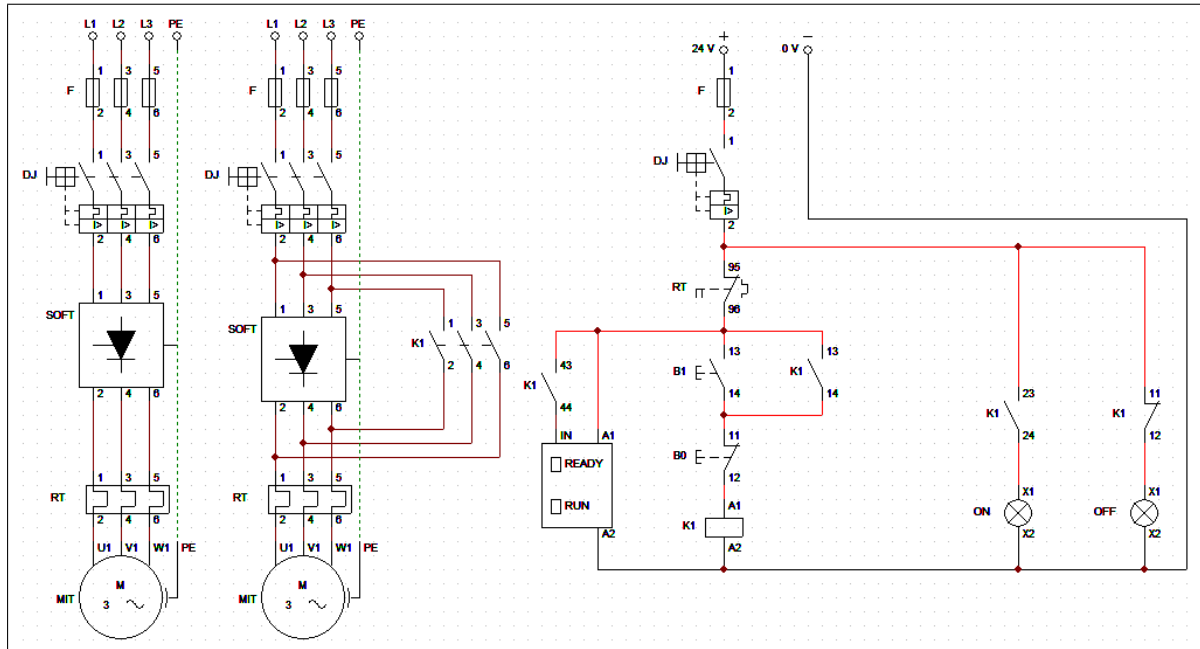
3.1.3 Partida com chave eletrônica *soft-starter*

As partidas, através de chaves eletrônicas com *soft-starter* são amplamente utilizadas quando são necessários que os motores partam de forma suave, em rampa, permitindo que as acelerações e desacelerações sejam progressivas, adaptando a velocidade do motor conforme as condições operacionais da máquina e da carga (FRANCHI, 2008). Na Figura 17 estão apresentados os diagramas característicos de força e comando para a aplicação de uma chave eletrônica *soft-starter*.

O circuito de força de um acionamento por chave eletrônica de acionamento *soft-starter*, pode apresentar alguns modos de configuração, como o modo direto e o modo com contator em paralelo (*bypass*). Nos diagramas apresentados, as chaves são alimentadas por uma rede trifásica, com fusíveis e disjuntor para proteção e seccionamento, um relé térmico de sobrecarga

na linha principal de força, até a alimentação do motor.

Figura 17 – Diagramas de força e comando do sistema de acionamento com chave eletrônica *soft-starter*



Fonte: Elaborada pelo autor

A configuração da ligação de força da chave eletrônica *soft-starter* que apresenta um contator em paralelo (contator de *bypass*), é aplicada para redução das perdas de efeito Joule na *soft-starter*. Quando o motor atinge velocidade de regime normal de trabalho, o contator de *bypass* é chaveado, e conseqüentemente o motor é alimentado através do contator e não mais pelos tiristores da chave *soft-starter* (FRANCHI, 2008).

3.1.4 Partida com inversor de frequência

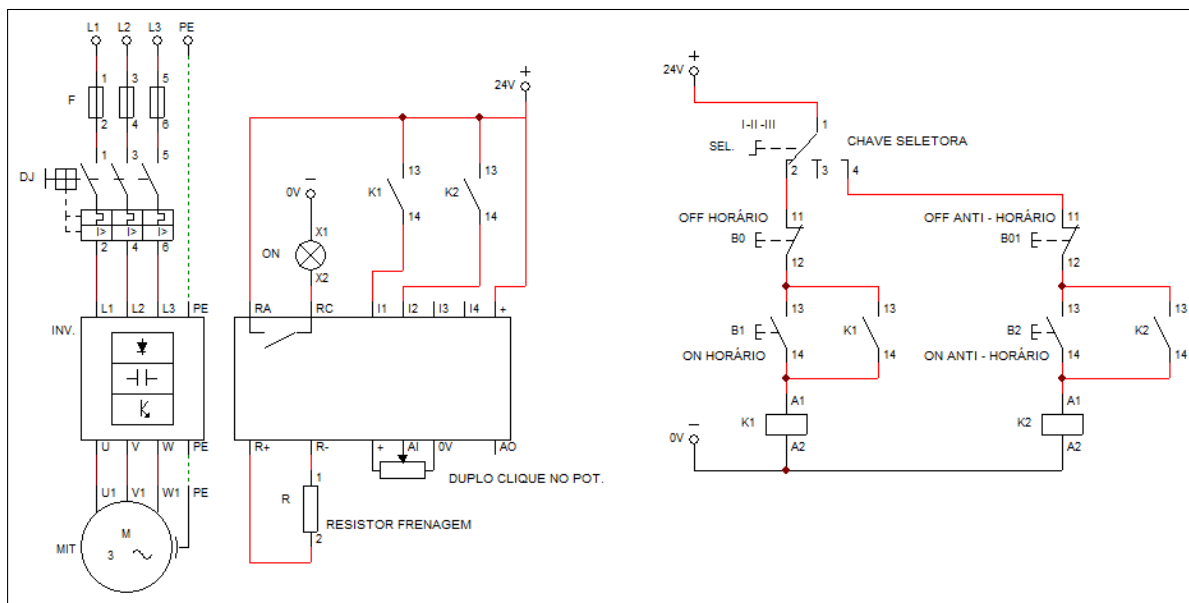
A aplicação de inversores de frequência para controle da velocidade de MIT, é o método mais eficiente utilizado, apresentando as menores perdas de potência no dispositivo. Este método realiza a variação da velocidade do motor, provendo um controle contínuo, tanto da velocidade como do conjugado do motor em relação à carga mecânica (FRANCHI, 2008).

Os diagramas de força, bloco de controle e circuito de acionamento na aplicação de um inversor de frequência no acionamento de um MIT, estão representados conforme a Figura 18.

O circuito de força é simplificado, com uma fonte de alimentação trifásica, os fusíveis de proteção, disjuntor para o seccionamento, o inversor e o motor a ser acionado. No bloco de controle são realizadas as configurações, parametrizações conforme a necessidade de carga,

controlando a velocidade das rampas de aceleração e desaceleração, modos de controle por IHM ou modo remoto, frenagens para grandes cargas, dentre outras. O circuito de comando apresentado é um esquema para ligação de um MIT, onde este pode operar tanto no sentido horário ou anti-horário.

Figura 18 – Diagramas de força, bloco de controle e circuito de comando do sistema de acionamento com inversor de frequência



Fonte: Elaborada pelo autor

O comando apresentado é alimentado por uma rede de tensão 24 V, a chave seletora controla a alimentação dos ramos do circuito de controle do sentido de rotação do motor. Quando fechada entre contato 1-2 habilita o ramo de operação em sentido horário, assim ao pressionar a botoeira B1 a bobina do contator K1 é alimentada, fechando o contato auxiliar normalmente aberto de K1 e alimentando o bloco de controle do inversor de frequência. Se a chave seletora estiver entre 1-4, será habilitado o ramo para operar no sentido anti-horário, assim ao pressionar a botoeira B2, a bobina do contator K2 é alimentada, fechando o contato auxiliar e alimentando o bloco de controle do inversor. As botoeiras B0 e B01, são utilizadas para emergência (desliga geral).

3.2 Metodologia e métodos

O escopo desta seção é apontar as diretrizes da metodologia implementada para a validação do trabalho proposto. Assim, será apresentado a plataforma computacional e as bancadas de testes utilizadas no acionamento dos motores.

Para o desenvolvimento das simulações foram necessários a definição dos seguintes parâmetros: Motor de Indução Trifásico de $1/2\text{ cv}$ e 1 cv ; Torques de Carga $1,52\text{ N.m}$ e $3,348\text{ N.m}$ respectivamente para cada motor; Frequência de Corte 250 Hz ; Rampas de aceleração 3 s e 5 s ; Passo de Solução Numérico $1E - 006$; Tempo de Transitório 0 s à 6 s ; Tempo de Regime Permanente 6 s à 7 s e Tempo Total de Simulação.

Os motores foram definidos através dos equipamentos disponíveis no laboratório de eletrotécnica da URI Câmpus II de Erechim, assim como seus respectivos parâmetros, como os torques de carga, responsáveis para simular uma potência nominal conectada ao eixo do motor. As duas rampas de aceleração para ter assim dados comparativos entre dois tempos distintos de aceleração na partida dos motores, assim como os tempo de transitório e regime permanente. O tempo de transitório foi definido entre 0 s à 6 s , devido a este ser maior que as duas rampas de aceleração definidas e poder dar credibilidade aos resultados encontrados.

Nos testes experimentais, foram desenvolvidos e implementados com três sistemas de partida (partida direta, *soft-starter* e inversor de frequência), para o acionamento dos motores utilizados na simulação em aplicativo computacional e bancada experimental. Estas bancadas experimentais foram montadas com os componentes e equipamentos disponíveis no laboratório de eletrotécnica do Câmpus II da URI de Erechim.

Como método avaliativo nas duas abordagens (simulação computacional e implementação em bancadas de testes) desenvolvidas foram realizadas cinco partidas dentro do intervalo de tempo de uma hora. O cenário proposto, tem o propósito de avaliar de forma quantitativa os valores para potências ativas, reativas e o fator de potência do motor durante seu acionamento. A análise quantitativa se desenvolveu comparando os valores de potências ativa e reativa durante o período de tempo transitório.

Nesta análise de eficiência são comparados os valores de potência de cada um dos sistemas de partida em relação a chave de partida direta, indicando assim o nível de eficácia que o sistema de partida pode desempenhar ao acionar o motor durante os intervalos de tempo definidos. O foco principal do trabalho se dá na avaliação dos dados no regime de transitório operacional dos motores.

3.2.1 Plataforma de simulação

Para as simulações com o motor de $1/2\text{ cv}$ inseridas na plataforma foram utilizados os parâmetros de uma máquina real, encontrados nos ensaios paramétricos (ensaio à vazio e rotor bloqueado), conforme o trabalho realizado por (LAZZARI, 2017).

Na Tabela 1 estão apresentados os parâmetros do circuito equivalente do MIT.

Tabela 1 – Parâmetros do circuito equivalente do motor de indução trifásico 1/2 cv

Motor de Indução Trifásico	
Resistência do rotor	14,04 Ω
Resistência do estator	17,5 Ω
Indutância do rotor	34,66 mH
Indutância do estator	34,66 mH
Indutância magnetizante	699 mH

Fonte: Adaptado de Lazzari (2017)

Para as simulações com o motor de 1 cv inseridas na plataforma foram utilizados os parâmetros encontrados em ensaios paramétricos realizados em bancada de testes. Estes testes foram realizados em conformidade as normas vigentes ABNT NBR17094-1 de 04/2018 e ABNT NBR17094-3 de 04/2018 que correspondem aos requisitos mínimos e métodos de ensaios respectivamente. Os parâmetros apresentados na Tabela 2, são correspondentes ao circuito equivalente do MIT de 1 cv.

Tabela 2 – Parâmetros do circuito equivalente do motor de indução trifásico 1 cv

Motor de Indução Trifásico	
Resistência do rotor	3,927 Ω
Resistência do estator	9,6 Ω
Indutância do rotor	21,564 mH
Indutância do estator	14,664 mH
Indutância magnetizante	504,68 mH

Fonte: Elaborada pelo autor

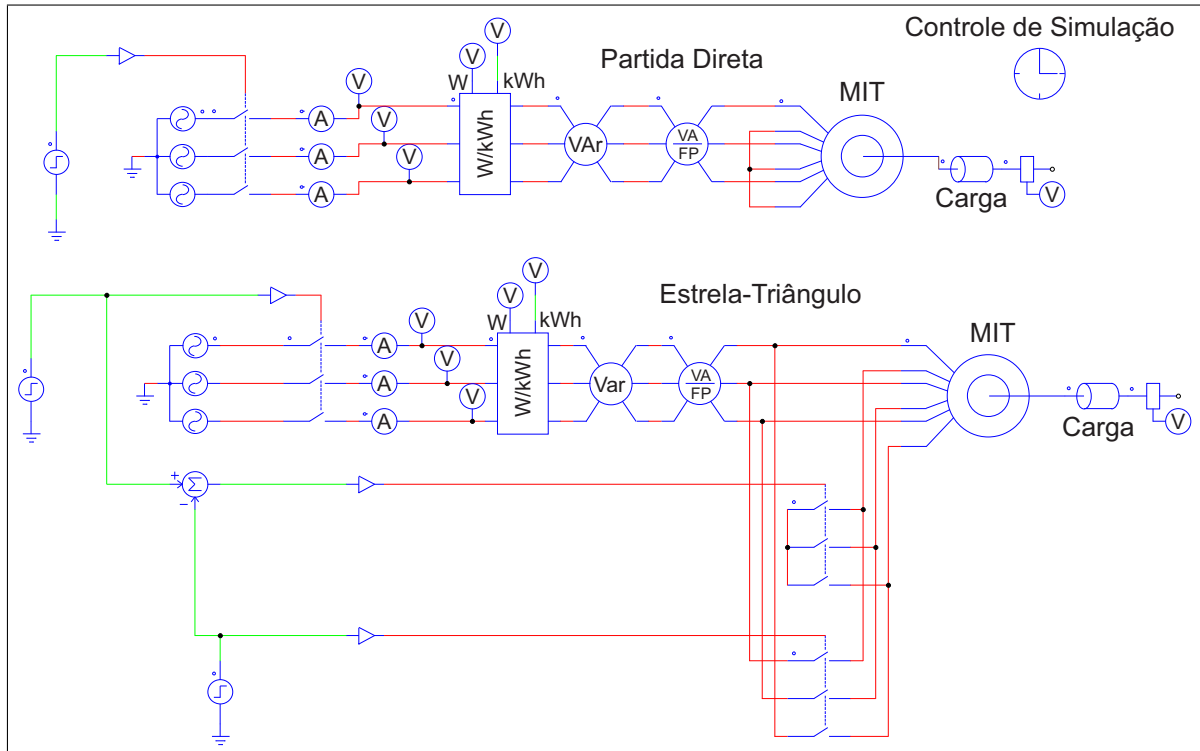
3.2.1.1 Diagramas de bloco da plataforma de simulação computacional

Nesta seção são explanados os diagramas de bloco da plataforma de simulação, conforme as Figuras 19, 20 e 21, sendo compostos pelos quatro métodos de acionamentos avaliados no desenvolvimento do trabalho (partida direta, chave estrela-triângulo, *soft-starter* e inversor de

frequência).

Os quatro sistemas de acionamento apresentam similaridades em alguns dispositivos, como os amperímetros e voltmímetro conectados em cada fase, um wattímetro trifásico, um medidor de potência reativa trifásico, um medidor de fator de potência trifásico, um motor trifásico, uma carga mecânica e um sensor de velocidade no eixo do motor.

Figura 19 – Diagrama de blocos da plataforma de simulação com partida direta e chave estrela-triângulo

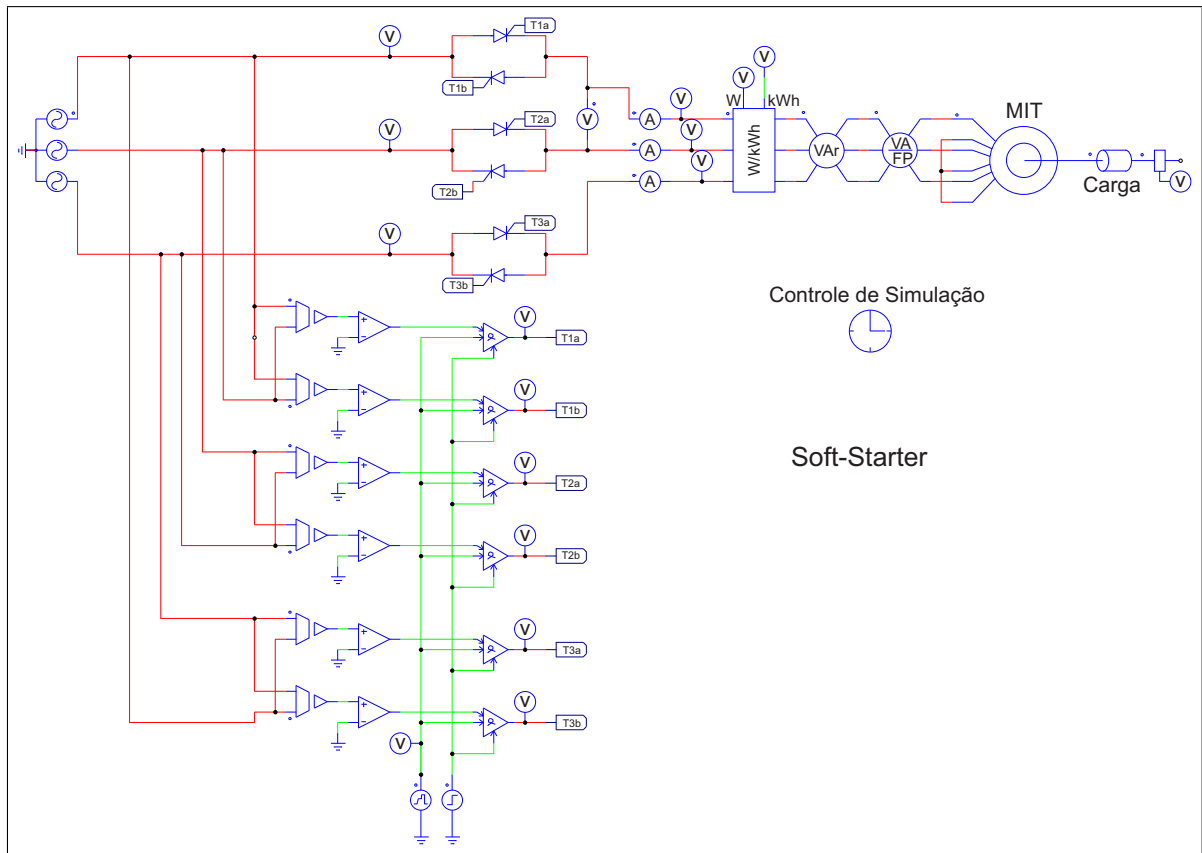


Fonte: Elaborada pelo autor

O acionamento via chave eletrônica *soft-starter*, além dos dispositivos supracitados, apresenta um circuito de sincronização. Neste bloco são controlados os ângulos de disparos dos tiristores de potência da chave eletrônica *soft-starter*. O controle deste ângulo de disparo é responsável pelo controle das rampas de tensão, alterando a tensão RMS. O controle desta tensão RMS emula o comportamento funcional de uma chave de partida *soft-starter*, através do controle dos níveis da tensão de saída para os terminais do motor.

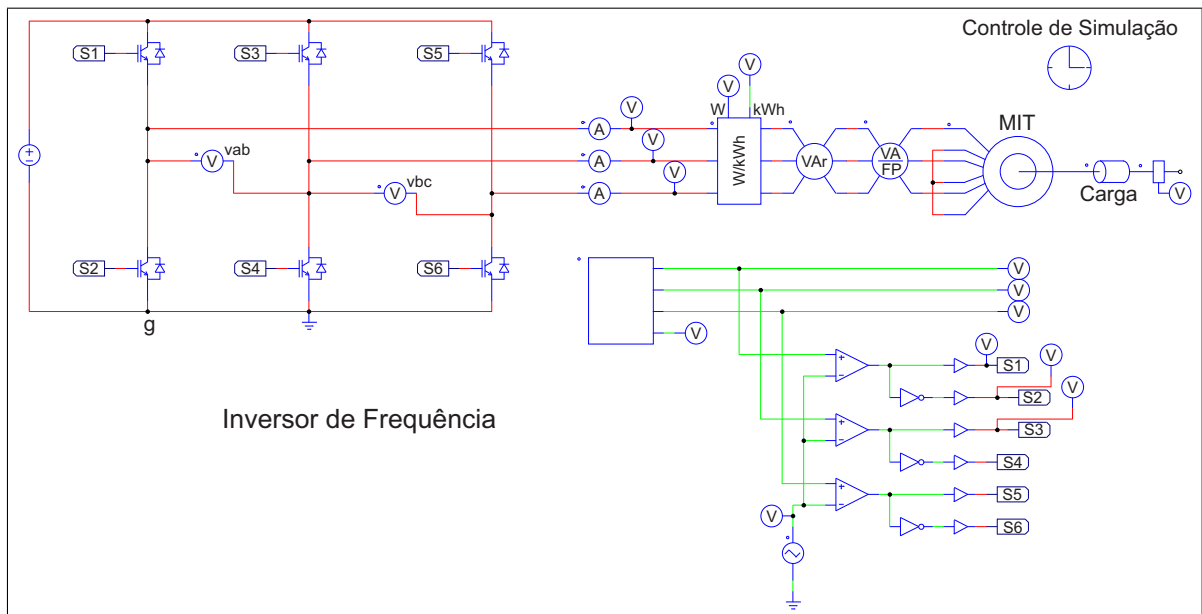
O acionamento por inversor de frequência foi elaborado com os dispositivos multime-
didores, além de um circuito de acionamento trifásico, onde estão os *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBTs), um circuito de comando, interligado ao circuito gerador do sinal *Pulse Width Modulation* (PWM). No bloco de controle é inserido o algoritmo, responsável pelo controle e operacionalização do acionamento do motor, controlando os chaveamentos dos IGBTs, os níveis de tensão e ajustes de frequência da saída conectada aos terminais do motor.

Figura 20 – Diagrama de blocos da plataforma de simulação com chave eletrônica Soft-Starter



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 21 – Diagrama de blocos da plataforma de simulação com inversor de frequência

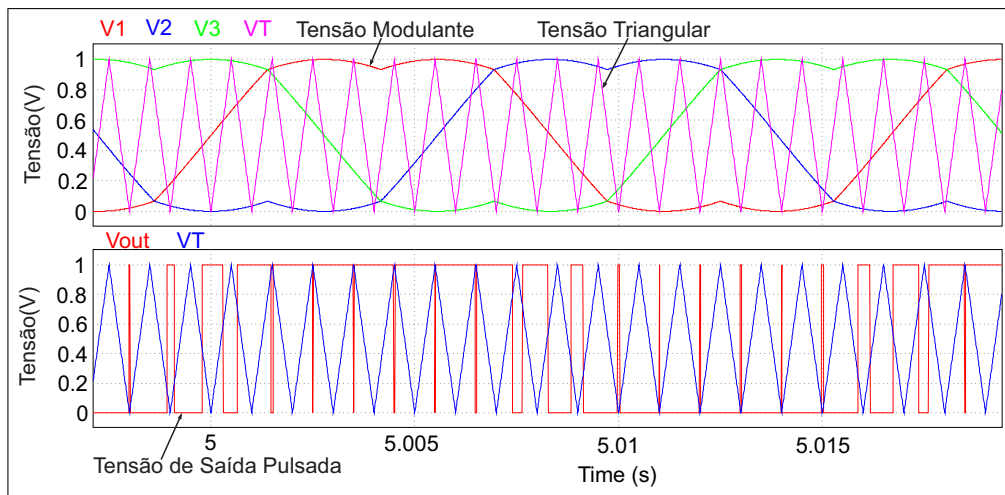


Fonte: Elaborada pelo autor

3.2.2 Geração do sinal de saída por modulação PWM

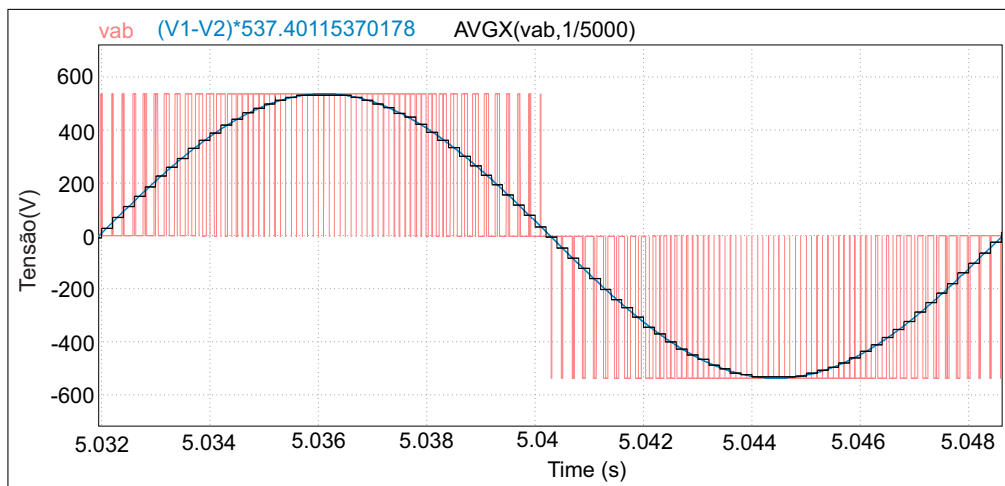
A modulação PWM é baseada na variação da largura de pulsos gerados a partir da comparação de um sinal analógico (onda quadrada ou onda senoidal) com um sinal de referência (onda triangular ou dente-de-serra) (FEROLDI, 2011). Segundo Lazzari (2017), a aplicação da modulação por largura de pulso é amplamente utilizada no controle de inversores por ter a capacidade de gerar saídas com magnitude e frequência controláveis. A Figura 22 representa o padrão de chaveamento da tensão e da corrente resultante para uma fase do motor quando aplicado a técnica PWM para o comando dos transistores de potência de saída do inversor.

Figura 22 – Emulação do sinal de saída PWM, comparando o sinal modulante e a portadora triangular



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 23 – Síntese do sinal de saída por modulação PWM



Fonte: Elaborado pelo Autor

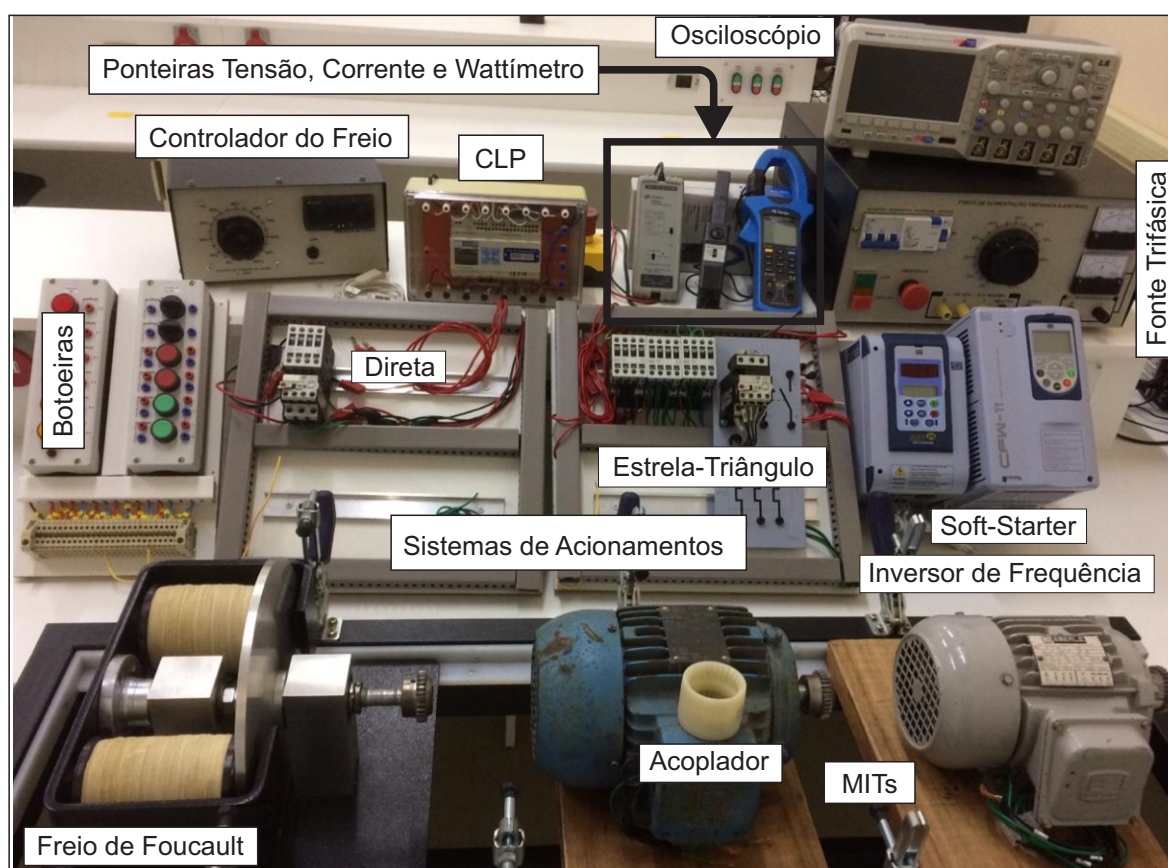
Na Figura 23, é expresso o sinal de saída correspondente à aplicação da modulação por largura de pulso.

Para o funcionamento de uma modulação por PWM, são comparados um sinal senoidal (Tensão Modulante) e uma onda triangular (Tensão Triangular), também conhecida como portadora, para que seja modulado a razão do chaveamentos os IGBTs do inversor (LAZZARI, 2017; MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 2003).

3.2.3 Implementação em bancada de testes

A Figura 24, traz todas as chaves de acionamentos utilizadas para a implementação em bancada experimental, juntamente com os equipamentos responsáveis pela aquisição dos dados.

Figura 24 – Bancadas de testes dos sistemas de acionamento de motores de 1/2 cv e 1 cv

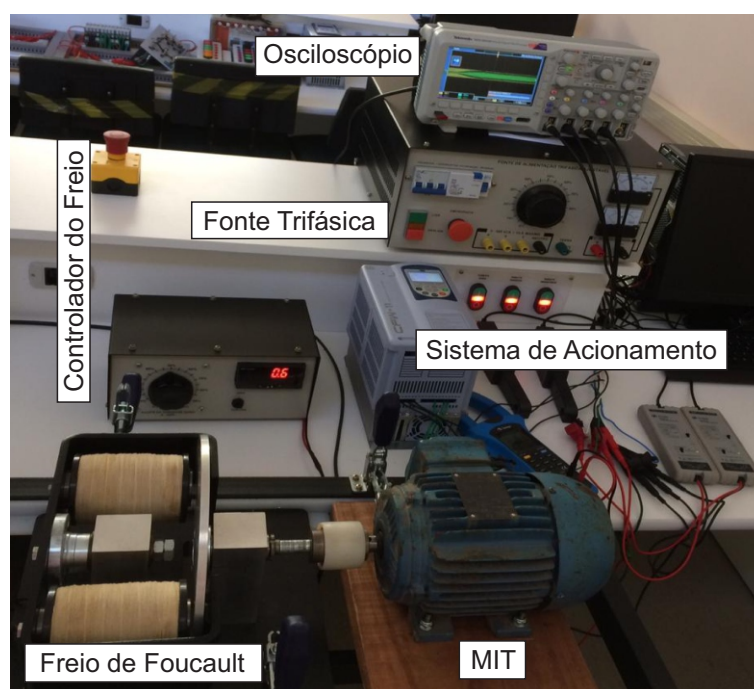


Fonte: Elaborada pelo autor

Como demonstração da metodologia implementada nestas bancadas experimentais, denota-se mediante a Figura 25, o acionamento dos motores de 1/2 cv e 1 cv, através da chave eletrônica inversor de frequência. Para os testes foram utilizados um inversor de frequên-

cia CFW11, da marca WEG. Esta chave de acionamento é um modelo com alimentação principal 380 V, sendo assim, consequentemente alimentado com uma rede trifásica 380 V equilibrada para os testes. Como carga conectado ao eixo do motor utilizou-se um freio de Foucault, de modo que pudesse ser retirado a potência nominal no eixo do motor. Como instrumentação para captação dos dados, foram utilizados um osciloscópio digital Tektronix MSO2014B com largura de banda 100 MHz, com 4 canais analógicos, 16 canais digitais e taxa de amostragem de 1GS/s, um alicate wattímetro ET-4055A MINIPA, duas sondas de corrente modelo A622 Tektronix de 100 kHz e 100 A e duas ponteiros de tensão diferencial N2791A 25 MHz da marca KEYSIGHT.

Figura 25 – Plataforma de bancada de testes para partida com chave eletrônica Inversor de Frequência



Fonte: Elaborada pelo autor

3.3 Análise financeira e *payback*

Payback é o período de tempo necessário para que aconteça a obtenção do retorno de todo o valor empregado em determinada aplicação. É muito utilizado em aplicações elétricas ou para análise de eficiência energética, avaliando sua viabilidade econômica (MIRANDA, 2014).

Para Hermes e Steinbrenner (2016) apud Lapponi (1996); Prates (2013), o *payback* é um instrumento de avaliação fácil e direto, que mede o prazo necessário para recuperar o investimento realizado. Este pode ser definido em anos, meses, semanas ou dias. Assim para

calcular o valor do *payback*, basta somar os valores dos fluxos de caixa auferidos, período a período, até que essa soma se iguale ao valor do investimento inicial.

Conforme Guaresi (2018) apud Figueiredo e Caggiano (2017), o *payback* simples pode ser encontrado pela Equação 3.1

$$Periodo_de_Payback_{Anos} = \left(\frac{Desembolsos_Liquidos}{Entradas_Liquidadas_de_Caixa} \right) \quad (3.1)$$

3.3.1 Metodologia do *payback*

Para a análise financeira e *payback*, foram realizados dois orçamentos em empresas nacionais, prestadoras de serviços e revenda de dispositivos aplicados ao acionamento de motores. Nestes orçamentos constam os valores para os sistemas de acionamento de um motor de 1 cv, todos os dispositivos orçados são de linha industrial com tensão de alimentação em 380 V. Os valores do orçamentos fornecidos pela empresa A e B estão apresentados conforme as Tabelas 3 e 4. Estes valores fornecidos nos orçamentos são referentes a orçamentos realizados no mês de maio de 2020.

Tabela 3 – Valores dos dispositivos de acionamento para um motor de 1 cv, empresa A

Acionamento	Marca/ Modelo/ I_{out}	Valor (R\$)
Partida Direta	WEG PDW04-5V40	324,26
Estrela-Triângulo	SIBRATEC 10HP	809,00
Soft-Starter	WEG SSW-050010T2246PPZ	2.742,72
Inversor de Frequência	CFW-300C10P0T4DB20	1.298,65

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 4 – Valores dos dispositivos de acionamento para um motor de 1 cv, empresa B

Acionamento	Marca/ Modelo/ I_{out}	Valor (R\$)
Partida Direta	WEG PDW04-5V40	198,00
Estrela-Triângulo	WEG ETW-6V25A-V40	1.025,00
Soft-Starter	WEG SSW-050010T2246PPZ	1.380,00
Inversor de Frequência	CFW-300C10P0T4DB20	1.565,00

Fonte: Elaborada pelo autor

Juntamente aos valores repassados pelas empresas A e B para aquisição de cada chave de partida, faz-se necessária a adição um valor para o pagamento do profissional da área elétrica responsável pela substituição da chave de partida, assim como sua configuração, parametrização e acompanhamento durante um período de 4 h de funcionamento. O valor designado foi R\$ 500,00, respeitando os honorários de um profissional capacitado a desenvolver atividades no ramo de automação industrial, que varia de R\$ 100,00 até R\$ 200,00 por hora. Perante a isto, neste trabalho designou-se um valor intermediário dentro desta faixa, R\$ 150,00 por hora.

Para o cenário de cálculo da análise financeira e *payback* foi pré-definido que o motor seria acionado cinco vezes por hora, tendo três modos de jornada de trabalho diária (4 h; 8 h e 12 h), de segunda à sexta-feira, com quatro semanas em um mês e doze meses no período de um ano. O valor médio cobrado pelo *MWh* de energia para o setor industrial no Brasil é R\$ 329,00. Este valor serviu como base, devido cada indústria poder contratar uma demanda e a ajustar conforme sua jornada de trabalho, delimitando os horários de ponta e fora de ponta ou até mesmo tendo a opção de comprar sua energia direto pelo mercado livre. Neste sentido foi delimitado este valor para a tarifa do *MWh*, devido a ser o valor médio cobrado pelo *MWh* dentro do setor industrial no Brasil.

Os resultados obtidos através de simulação computacional são empregados à análise do *payback*, comprando-se aos resultados experimentais de forma a desenvolver uma metodologia que informe o valor de eficiência o mais próximo do real.

3.3.2 Equacionamento do *payback*

A análise, desenvolveu-se seguindo a Equação 3.1 como base. Assim a metodologia do equacionamento desenvolvido nesta seção, dá-se para traduzir o comportamento de um *payback* simplificado. Na Equação 3.2 é determinado a quantidade de *kWh* que são economizados dentro do período de um ano, deste modo, a diferença entre a potência ativa da chave de partida direta com a potência ativa das demais chaves, temos a quantidade de watts economizados. Este resultado é dividido por 1000 para adequar esta potência resultante conforme unidade de medida *kWh*, determinando a quantidade de potência economizada a cada partida do motor.

$$N_{pot} = \left(\frac{P_D - P_X}{1000} \right) \times n_{partidas/hora} \times n_{horas/dia} \times n_{dias/mes} \times n_{meses/ano} \quad (3.2)$$

- N_{pot} = Quantidade de *kWh* economizados no período de um ano;
- P_D = Potência ativa chave partida direta;
- P_X = Potência ativa demais chaves de partidas;

- $n_{partidas/hora}$ = Número de partidas dentro de uma hora;
- $n_{horas/dia}$ = Número de horas trabalhadas por dia;
- $n_{dias/mes}$ = Número de dias trabalhados por mês;
- $n_{meses/ano}$ = Número de meses no período de um ano.

Para encontrar o valor de potência economizado durante um período de um ano, multiplica-se a potência economizada em cada partida, pelo quantidade de vezes que este motor parte durante um ano. O passo de se conhecer a quantidade de kWh economizados num período de um ano, pode-se multiplicá-lo pelo valor pago por cada kWh , conforme expresso pela Equação 3.3, assim obtendo o valor monetário economizado durante um ano.

$$X_{eco} = (N_{pot} \times X_{kWh}) \quad (3.3)$$

- X_{eco} = Valor monetário economizado por ano com a troca da chave de partida;
- N_{pot} = Quantidade de kWh economizados no período de um ano;
- X_{kWh} = Valor cobrado por cada Quilowatts hora.

Sabendo-se quando foi economizado em dinheiro dentro do período de um ano, pode-se assim frente a Equação 3.4 definir quanto tempo em anos levará para que esta economia monetária pague o valor investido na aquisição desta nova tecnologia implementada para o acionamento do motor.

$$t_{ano} = \left(\frac{X_{inv.}}{X_{eco}} \right) \quad (3.4)$$

- t_{ano} = Tempo em anos para o retorno do investimento na substituição da chave de partida;
- $X_{inv.}$ = Valor monetário investido da nova chave de partida;
- X_{eco} = Valor monetário economizado por ano com a troca da chave de partida.

A Equação 3.5 é a estimação em dias para retorno do investimento desprendido na aquisição da nova chave de partida do motor.

$$t_{dias} = (t_{ano} \times 365) \quad (3.5)$$

- t_{dias} = Tempo em dias para o retorno do investimento na substituição da chave de partida;
- t_{ano} = Tempo em anos para o retorno do investimento na substituição da chave de partida.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

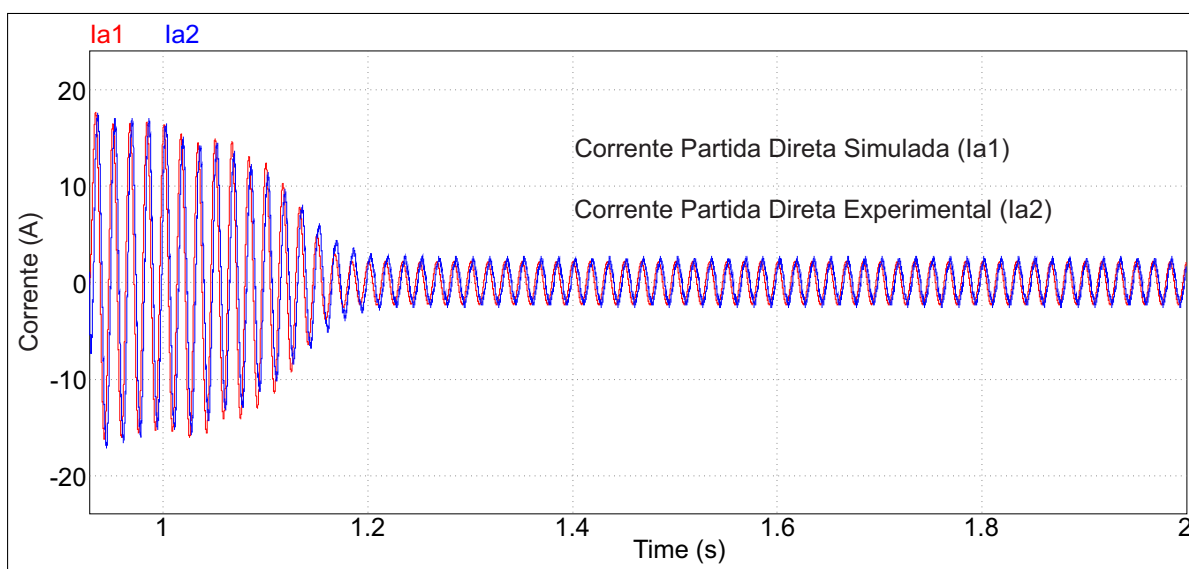
Neste capítulo são discutidos os principais resultados encontrados para a análise comparativa delimitada pela metodologia proposta. Estes dados obtidos, são respectivos as simulações em aplicativo computacional e implementações em bancadas experimentais, para o acionamento dos motores de $1/2\text{ cv}$ e 1 cv . Posteriormente a evidenciação dos resultados, são denotados as principais formas de ondas das simulações e implementações em bancadas experimentais. E finalmente uma demonstração dos resultados do *payback*.

4.1 Formas de onda

A seção subsequente tem por objetivo expor as principais formas de ondas no acionamento dos motores de $1/2\text{ cv}$ e 1 cv , assim como explicar sobre o comportamento das mesmas.

A Figura 26 traduzem o comportamento dos sinais de corrente de uma fase com partida direta, utilizados para fazer o ajuste do modelo de simulação computacional.

Figura 26 – Corrente fase com ajuste do modelo de simulação

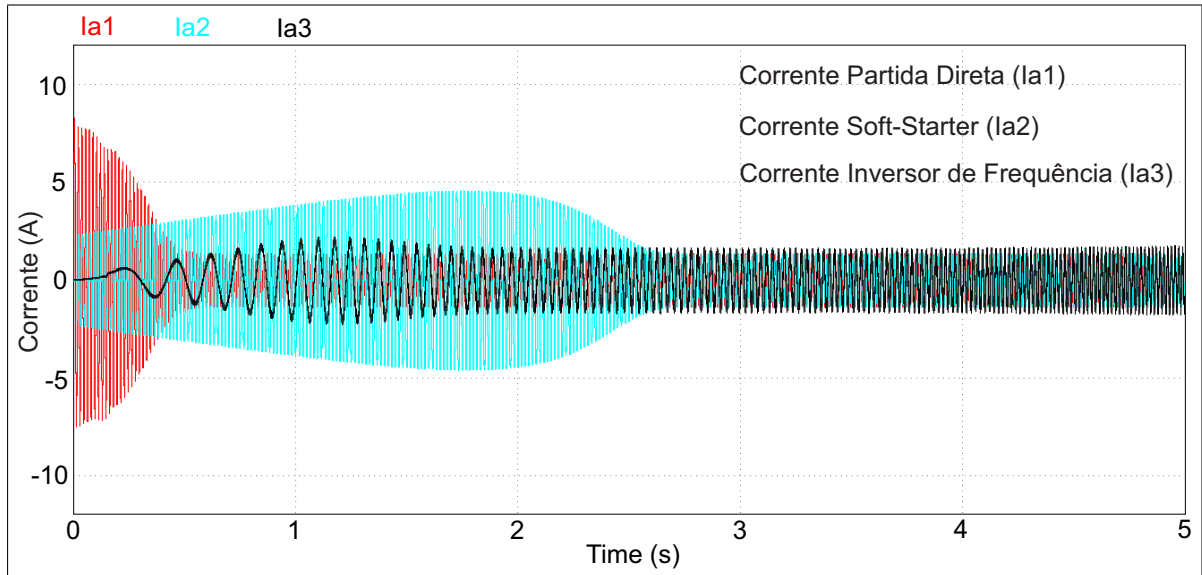


Fonte: Elaborada pelo autor

Para que os resultados das simulações computacionais e implementação em bancada experimental sejam fiéis e corretos, se faz necessário o ajuste do modelo de simulação computacional, designando os valores do coeficiente de atrito e ventilação, assim como o coeficiente de momento de inércia da carga conectada ao eixo. Os valores encontrados para os coeficientes para um motor de $1/2\text{ cv}$ são: coeficiente de atrito e ventilação ($K1 = 0,001$) e o momento de

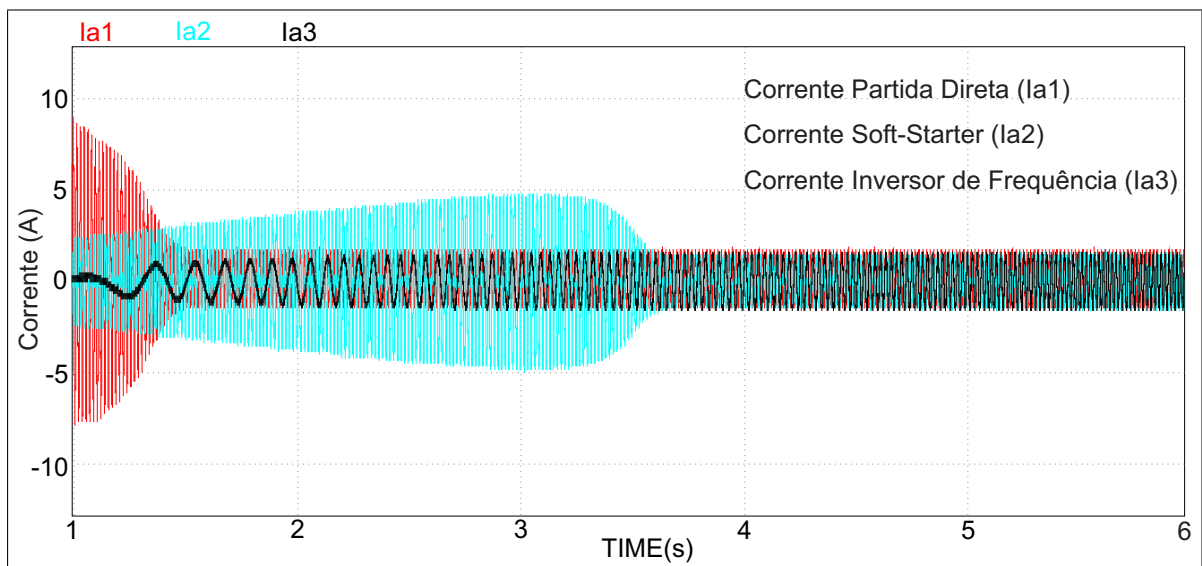
inércia ($MI = 0.0112$). Já para o motor de 1 cv, o coeficiente de atrito e ventilação é ($K1 = 0,001$), e o momento de inércia é ($MI = 0,0056$).

Figura 27 – Correntes simuladas com rampa de 5 s, para motor de 1/2 cv



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 28 – Correntes em bancada experimental com rampa de 5 s, para motor de 1/2 cv



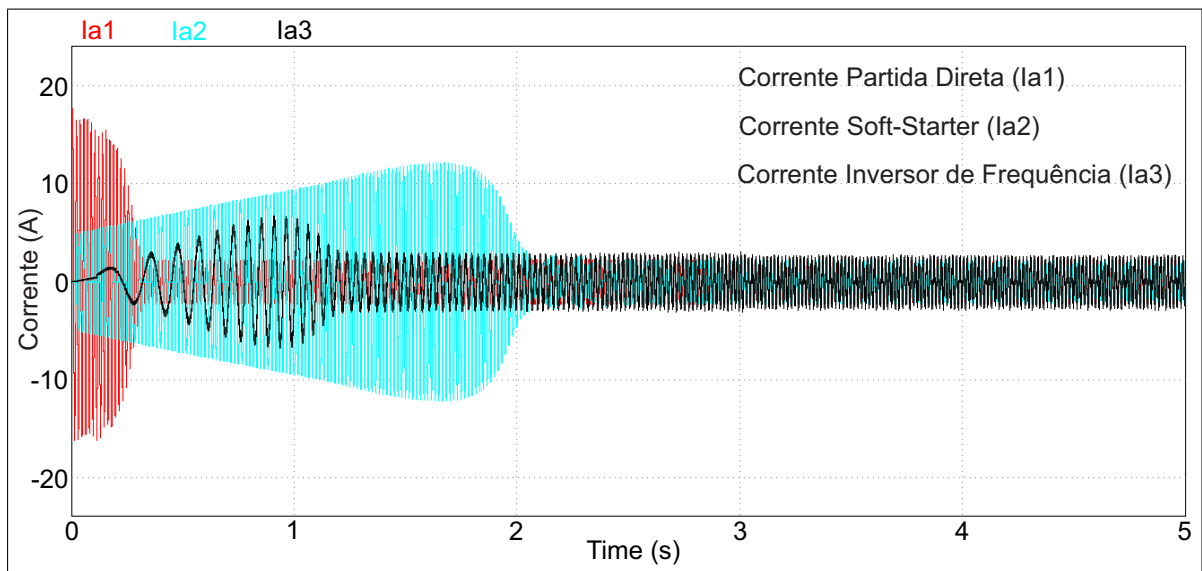
Fonte: Elaborada pelo autor

Nas Figuras 27 e 28, acima apresentadas temos as correntes de fase dos sistemas de acionamentos, através de simulação computacional e implementação em bancada experimental, explicitando seu comportamento no intervalo de tempo de definido como transitório. Os valores de magnitudes das correntes e o comportamento das mesmas assemelham-se entre simulação

computacional e implementação em bancada experimental, inferindo numa confiabilidade dos resultados apresentados pela comparação.

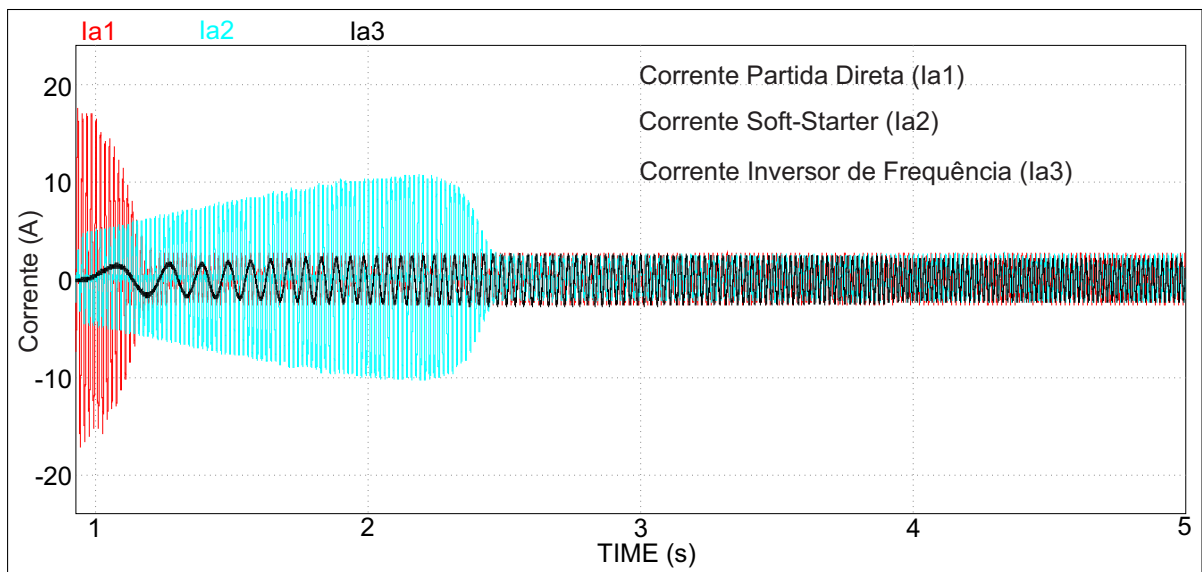
Nas Figuras 29 e 30, são expressas as formas de onda simuladas e implementadas em bancada experimental para um motor de 1 cv, com rampa de aceleração de 3 s.

Figura 29 – Correntes simuladas com rampa de 3 s, para motor de 1 cv



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 30 – Correntes em bancada experimental com rampa de 3 s, para motor de 1 cv



Fonte: Elaborada pelo autor

De maneira similar a análise supracitada com um motor de 1/2 cv, os valores de magnitudes e comportamento das correntes de fase para cada um dos sistemas de acionamento

convergem entre os resultados encontrados em simulação computacional e os resultados encontrados em bancada experimental para o motor de 1 cv, demonstrando que a metodologia avaliativa se demonstra plausível e confiável.

Os sinais de correntes com chave *soft-starter* e inversor de frequência para os dois motores apresentam magnitudes inferiores no instante de partida em comparação a partida direta, graças a estes sistemas de acionamento operarem controlando o comportamento da partida do motor, reduzindo a corrente de partida, os níveis de tensão nos terminais do motor ou partindo os motores através de rampas de aceleração.

4.2 Comparativos dos valores simulados

Os valores obtidos na simulação computacional e em bancadas experimentais, para fins comparativos dos valores de potência ativa, reativa das chaves de partidas dos MITs, são apresentados nas Tabelas 5, 7, 9 e 11 e estão apontando os valores das potências ativas e reativas, simulados e implementados em bancada experimental para um motor de 1/2 cv durante o regime transitório. Os resultados demonstrados são mediante a testes com duas rampas de aceleração (3 s e 5 s). As Tabelas 6, 8, 10 e 12, apresentam os valores referentes as diferenças de potência ativas (absolutas e relativas).

Tabela 5 – Valores de potências ativas e reativas simulados com rampa de 3 s para motor de 1/2 cv

Chave de Partida	P (W)	Q (VAr)
Partida Direta	501,15	573,54
<i>Soft-Starter</i>	550,72	573,29
Inversor de Frequência	339,39	330,33

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 6 – Diferenças absolutas e relativas das potências ativas simuladas com rampa de 3 s para motor de 1/2 cv

Comparação	Diferença Absoluta (W)	Diferença Relativa (%)
Direta/ <i>Soft-Starter</i>	+49,57	+9,8912
Direta/Inversor	-161,76	-32,2777

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 7 – Valores de potências ativas e reativas em bancada experimental com rampa de 3 s para motor de 1/2 cv

Chave de Partida	P (W)	Q (VAr)
Partida Direta	487,54	886,62
<i>Soft-Starter</i>	524,80	1109,50
Inversor de Frequência	309,25	570,12

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 8 – Diferenças absolutas e relativas das potências ativas em bancada experimental com rampa de 3 s para motor de 1/2 cv

Comparação	Diferença Absoluta (W)	Diferença Relativa (%)
Direta/ <i>Soft-Starter</i>	+37,26	+7,6424
Direta/Inversor	-178,29	-36,5693

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 9 – Valores de potências ativas e reativas simulados com rampa de 5 s para motor de 1/2 cv

Chave de Partida	P (W)	Q (VAr)
Partida Direta	501,15	573,54
<i>Soft-Starter</i>	563,20	553,85
Inversor de Frequência	277,98	211,87

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 10 – Diferenças absolutas e relativas das potências ativas simuladas com rampa de 5 s para motor de 1/2 cv

Comparação	Diferença Absoluta (W)	Diferença Relativa (%)
Direta/ <i>Soft-Starter</i>	+62,05	+12,3815
Direta/Inversor	-223,17	-44,5315

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 11 – Valores de potências ativas e reativas em bancada experimental com rampa de 5 s para motor de 1/2 cv

Chave de Partida	P (W)	Q (VAr)
Partida Direta	487,54	886,62
<i>Soft-Starter</i>	547,74	1.185,31
Inversor de Frequência	254,80	519,60

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 12 – Diferenças absolutas e relativas das potências ativas em bancada experimental com rampa de 5 s para motor de 1/2 cv

Comparação	Diferença Absoluta (W)	Diferença Relativa (%)
Direta/ <i>Soft-Starter</i>	+60,2	+12,3477
Direta/Inversor	-232,54	-47,7376

Fonte: Elaborada pelo autor

As potências ativas resultantes dos testes via simulação computacional e implementação em bancada experimental se comportam de forma congruente. A diferença acontece, pois nos testes de bancada experimental ocorrem perdas por atrito e ventilação, que acabam não sendo levadas em consideração na simulação computacional, acarretando tais diferenças de valores.

Para análise do comportamento funcional, quando comparadas as potência ativa da chave eletrônica *soft-starter* e inversor de frequência com a chave de partida direta, pode-se perceber que com a chave eletrônica *Soft-Starter* há um aumento de 9,8912% da potência ativa na simulação, e na bancada experimental este aumento é 7,6424%. Já para inversor de frequência ocorre uma redução no consumo de aproximadamente 32,2777% na simulação e em bancada experimental essa redução é 36,5693%. Estes valores são utilizando uma rampa de aceleração de 3 s. Quanto a rampa de 5 s, este aumento da potência com a chave eletrônica *Soft-Starter* é de aproximadamente 12,3815% na simulação e na bancada de testes é 12,3477%. Quando utilizado inversor de frequência a redução para inversor de frequência é aproximadamente 44,5315% em simulação e 47,7376% aplicado em bancada experimental.

O aumento da potência ativa na *soft-starter* em relação a partida direta, é derivado ao perfil da carga conectada ao eixo. Quando operando com condições de carga constante, próxima do valor nominal, a chave eletrônica *Soft-Starter*, desempenha uma eficiência inferior

a aquela apresentada pela partida direta. Nas implementações desenvolvidas neste trabalho foi implementado como carga ao eixo do motor um Freio de Foucault, que apresenta um perfil de carga constante, o que traduz o comportamento da eficiência da *Soft-Starter*. Já para o inversor de frequência ocorre uma redução significativa na potência ativa, devido a este sistema de acionamento ter a capacidade de controlar a partida do motor, operando no modo de controle V/F, onde controla os valores de tensão e frequência do motor.

As potências reativas encontradas pela implementação em bancada experimental demonstram discrepâncias maiores nos valores em relação aos encontrados em simulação computacional. Esta discrepância é referente ao perfil da carga utilizado, proveniente do Freio de Foucault, além da transição que ocorre durante a partida. Essa transição pode ser diretamente ligada a velocidade de partida do motor, pois para as chaves de partida eletromecânicas o motor tende a alcançar a velocidade nominal mais rapidamente em relação aos acionamentos por chaves de partidas eletrônicas, assim essa diferença de velocidade de partida interfere diretamente no transitório de partida, alterando seu valor médio.

Os valores de potências reativas sofrem interferência direta através do perfil da carga conectada ao eixo, devido a este alterar o transitório de partida. Também sofrem interferência pela tipo da chave de partida, devido a cada uma destas propiciarem uma velocidade de partida que além de alterar o transitório de partida, conseqüentemente altera seu valor médio, e as magnetizações das chaves de partidas, como por exemplo o inversor de frequência apresenta magnetização constante nas bobinas do motor.

Nas Tabelas 13, 15, 17 e 19 estão indicando os valores para as potências ativas e reativas simulados e implementados em bancada experimental para um motor de 1 cv, durante o regime transitório. Os resultados demonstrados são mediante a testes com duas rampas de aceleração (3 s e 5 s). As Tabelas 14, 16, 18 e 20 apresentam os valores referentes as diferenças de potência ativas (absolutas e relativas).

Tabela 13 – Valores de potências ativas e reativas simulados com rampa de 3 s para motor de 1 cv

Chave de Partida	P (W)	Q (VAr)
Partida Direta	890,49	845,08
<i>Soft-Starter</i>	1.101,90	856,84
Inversor de Frequência	631,15	473,75

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 14 – Diferenças absolutas e relativas das potências ativas simuladas com rampa de 3 s para motor de 1 cv

Comparação	Diferença Absoluta (W)	Diferença Relativa (%)
Direta/ <i>Soft-Starter</i>	+211,41	+23,7408
Direta/Inversor	-259,34	-29,1232

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 15 – Valores de potências ativas e reativas em bancada experimental com rampa de 3 s para motor de 1 cv

Chave de Partida	P (W)	Q (VAr)
Partida Direta	906,26	1.650,99
<i>Soft-Starter</i>	963,73	1.948,30
Inversor de Frequência	549,66	833,11

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 16 – Diferenças absolutas e relativas das potências ativas em bancada experimental com rampa de 3 s para motor de 1 cv

Comparação	Diferença Absoluta (W)	Diferença Relativa (%)
Direta/ <i>Soft-Starter</i>	+57,47	+6,3414
Direta/Inversor	-356,6	-39,3485

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 17 – Valores de potências ativas e reativas simulados com rampa de 5 s para motor de 1 cv

Chave de Partida	P (W)	Q (VAr)
Partida Direta	890,49	845,08
<i>Soft-Starter</i>	1.157,35	794,78
Inversor de Frequência	519,98	304,38

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 18 – Diferenças absolutas e relativas das potências ativas simuladas com rampa de 5 s para motor de 1 cv

Comparação	Diferença Absoluta (W)	Diferença Relativa (%)
Direta/ <i>Soft-Starter</i>	+266,86	+29,9677
Direta/Inversor	-373,51	-41,9443

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 19 – Valores de potências ativas e reativas em bancada experimental com rampa de 5 s para motor de 1 cv

Chave de Partida	P (W)	Q (VAr)
Partida Direta	906,26	1.650,99
<i>Soft-Starter</i>	1.027,96	2.223,20
Inversor de Frequência	429,96	763,05

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 20 – Diferenças absolutas e relativas das potências ativas em bancada experimental com rampa de 5 s para motor de 1 cv

Comparação	Diferença Absoluta (W)	Diferença Relativa (%)
Direta/ <i>Soft-Starter</i>	+121,70	+13,4288
Direta/Inversor	-476,30	-52,5566

Fonte: Elaborada pelo autor

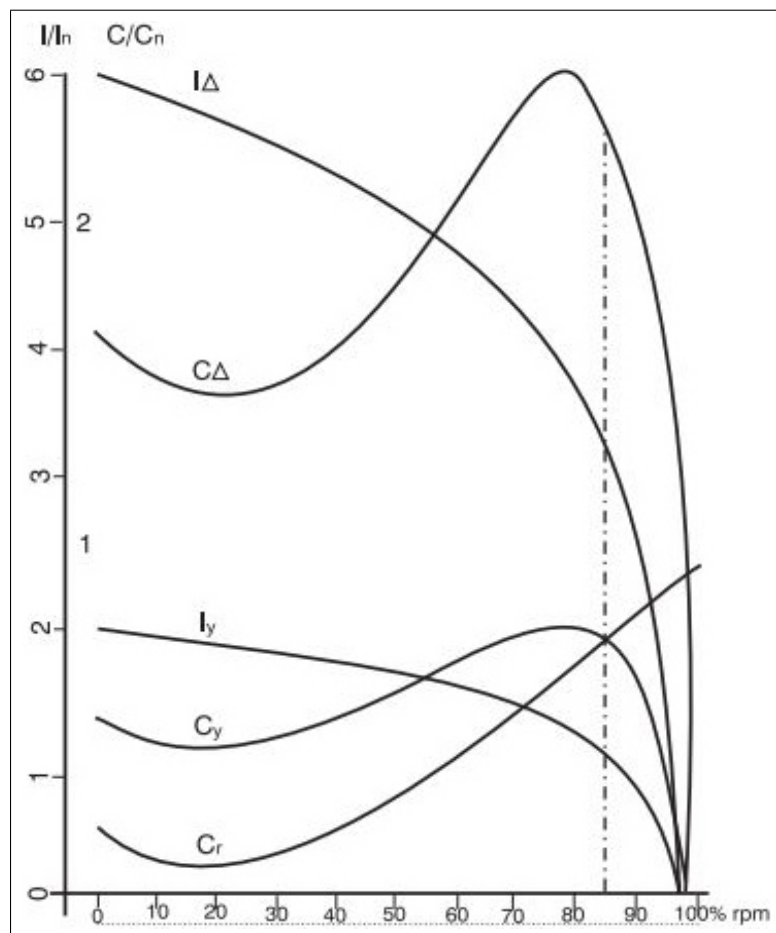
Assemelhando-se aos resultados obtidos em simulação computacional e implementação em bancada experimental para o motor de 1/2 cv, as potências ativas e reativas no motor de 1cv tendem a seguirem um comportamento congruente, desenhando-se de forma similar, com o aumento para a chave *Soft-Starter* e redução para o sistema de acionamento por inversor de frequência em comparação a chave de partida direta.

Para a potência ativa com uma rampa de 3 s, nas chaves eletrônicas *soft-starter*, ocorre um aumento de 23,7408% na simulação e em bancada experimental de 6,3414%. Para o acionamento via inversor de frequência tem uma redução significativa, em comparação a chave de partida

direta, alcançando valores de 29,1232% quando simulado e 39,3485%, quando aplicado em bancada experimental. Ao passo de ser utilizado uma rampa de 5 s, estes valores correspondem à 29,9677% em simulação e 13,4288% em implementação experimental de aumento, utilizando-se uma chave eletrônica *soft-starter*. Quando acionando via inversor de frequência, ocorre uma redução significativa, representando 41,9443% em simulação e 52,5566% em bancada experimental.

Essas diferenças nos valores de potência, são propiciadas pelo padrão da rampa utilizada na partida do motor, pelo perfil da carga conectada ao eixo do motor, assim como o tempo desta rampa de partida especificado, tendo influência direta na eficiência energética do sistema de acionamento do motor.

Figura 31 – Correntes e conjugado para partida com estrela-triângulo de motor acionando carga com conjugado resistente



Fonte: WEG (2020)

As avaliações com chave estrela-triângulo não puderam ser realizadas, pois os motores implementados são de Curva N. Esta curva de conjugado do motor não é elevada o suficiente ao ponto de garantir a aceleração da máquina com corrente reduzida. Para que este sistema de

acionamento possa ser realizado com segurança e eficiência, os valores de corrente devem estar numa faixa de 25% a 33% na ligação estrela, referentes ao valor da corrente da ligação triângulo (WEG, 2020).

A Figura 31 acima citada, pode explicar de forma mais plausível a não implementação com chave estrela-triângulo no acionamento dos motores. Quando temos este acionamento com um conjugado resistente alto acabamos tendo um pico de corrente extremamente elevado na troca entre a ligação estrela para a ligação triângulo, tornando este sistema de acionamento ineficaz e desvantajoso.

No desenvolvimento do trabalho definiu-se a utilização do Freio de Foucault como carga acoplada ao eixo. Este equipamento possui um perfil de carga constante, o que acaba inferindo um conjugado resistente alto, e conseqüentemente impossibilitando o acionamento destes motores devido suas curvas de conjugado.

4.3 Validação do *payback*

Nesta seção foram abordadas as respectivas validações para o *payback*, estimando o tempo necessário para que a substituição da tecnologia implementada na chave de partida do motor se torne atrativa e assim podendo ser vantajosa tanto no âmbito financeiro assim como no sentido de ser mais eficiente energeticamente, levando em consideração o menor consumo de energia (potência ativa) durante o período de transitório.

Nas Tabelas 21, 22 e 23 estão apresentados os índices de economia em valores de moeda corrente nacional brasileira durante o período de um ano e o tempo estimado em dias para o retorno do investimento da substituição de uma chave de partida para o motor de 1 cv com rampa de aceleração de 3 s. Nestas tabelas estão dispostos os valores correspondentes para três jornadas de trabalho diferentes, definidas em 4 h, 8 h e 12 h, respectivamente.

- Valor1 = Valor monetário economizado pela substituição da chave de partida no período de um ano, simulação;
- Tempo1 = Tempo em dias para o retorno financeiro da substituição da chave de partida, simulação;
- Valor2 = Valor monetário economizado pela substituição da chave de partida no período de um ano, experimental;
- Tempo2 = Tempo em dias para o retorno financeiro da substituição da chave de partida, experimental.

Tabela 21 – Estimação de valores monetários (R\$) e tempo de retorno (dias) com motor de 1 cv, rampa de 3 s e jornada de 4 h

Chaves	Valor1 (R\$)	Tempo1 (Dias)	Valor2 (R\$)	Tempo2 (Dias)
Direta/ <i>Soft-Starter</i>	-333,86	–	-90,76	–
Direta/Inversor	409,55	1.693	563,15	1.231

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 22 – Estimação de valores monetários (R\$) e tempo de retorno (dias) com motor de 1 cv, rampa de 3 s e jornada de 8 h

Chaves	Valor1 (R\$)	Tempo1 (Dias)	Valor2 (R\$)	Tempo2 (Dias)
Direta- <i>Soft-Starter</i>	-667,72	–	-181,52	–
Direta-Inversor	819,10	847	1.126,29	616

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 23 – Estimação de valores monetários (R\$) e tempo de retorno (dias) com motor de 1 cv, rampa de 3 s e jornada de 12 h

Chaves	Valor1 (R\$)	Tempo1 (Dias)	Valor2 (R\$)	Tempo2 (Dias)
Direta- <i>Soft-Starter</i>	-1.001,58	–	-272,27	–
Direta-Inversor	1.228,65	565	1.689,43	411

Fonte: Elaborada pelo autor

Pode-se perceber que quanto maior foi a jornada de trabalho, mais atrativo e mais rapidamente a substituição da tecnologia da chave de acionamento torna-se relevante. Isto é notado quando motor de 1 cv operando em uma jornada de 12 h diárias, obtém uma redução financeira de R\$ 1.689,43, assim em 411 dias o investimento da substituição da chave de partida direta por inversor de frequência irá pagar-se apenas com a energia economizada frente aos valores obtidos em implementação em bancada experimental.

Nas Tabelas 24, 25 e 26 estão apresentados os valores de economia em valores de moeda corrente nacional brasileira durante o período de um ano e o tempo estimado em dias para o retorno do investimento da substituição de uma chave de partida para o motor de 1 cv com rampa

de aceleração de 5 s. Tais tabelas corresponde as jornadas de trabalho definidas em 4 h, 8 h e 12 h, respectivamente.

Tabela 24 – Estimação de valores monetários (R\$) e tempo de retorno (dias) com motor de 1 cv, rampa de 5 s e jornada de 4 h

Chaves	Valor1 (R\$)	Tempo1 (Dias)	Valor2 (R\$)	Tempo2 (Dias)
Direta-Soft-Starter	-421,43	–	-192,19	–
Direta-Inversor	589,85	1.175	752,18	922

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 25 – Estimação de valores monetários (R\$) e tempo de retorno (dias) com motor de 1 cv, rampa de 5 s e jornada de 8 h

Chaves	Valor1 (R\$)	Tempo1 (Dias)	Valor2 (R\$)	Tempo2 (Dias)
Direta-Soft-Starter	-842,86	–	-384,38	–
Direta-Inversor	1.179,70	588	1.504,35	461

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 26 – Estimação de valores monetários (R\$) e tempo de retorno (dias) com motor de 1 cv, rampa de 5 s e jornada de 12 h

Chaves	Valor1 (R\$)	Tempo1 (Dias)	Valor2 (R\$)	Tempo2 (Dias)
Direta-Soft-Starter	-1.264,28	–	-576,57	–
Direta-Inversor	1.769,55	392	2.256,52	308

Fonte: Elaborada pelo autor

Assim como na rampa de aceleração de 3 s, o motor se comporta similarmente quando acionado com rampa de aceleração de 5 s. Portanto, quanto maior a jornada de trabalho que o motor esteja submetido, maior será a geração de economia financeira e conseqüentemente um tempo de retorno mais rápido para o valor investido quando substituída a chave de partida. Os resultados para bancada experimental com jornada de 12 h a economia financeira alcança o valor R\$ 2.256,52, e o tempo de retorno para o investimento fica em 308 dias.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Atualmente, o setor industrial agrega a cada dia mais o contexto da implementação de Indústria 4.0 em sua planta fabril, muito frente a uma busca incessante na eficiência energética dos sistemas. Perante a isto, o presente trabalho propôs o desenvolvimento de uma metodologia avaliativa da eficiência energética aplicada aos sistemas de acionamentos para motores de indução trifásicos.

As conclusões deste trabalho vêm ao encontro deste contexto buscado pelo setor industrial, quanto a aplicação de sistemas mais eficientes, além da contribuição para uma melhor compreensão das teorias aplicadas ao controle e acionamento das máquinas elétricas, de forma a garantir uma análise mais precisa dos resultados.

Formulou-se uma revisão bibliográfica sobre o cenário energético do setor industrial brasileiro, sobre os sistemas partidas e acionamentos aplicados à MIT, métodos de controles aplicados em inversores de frequência, dispositivos básicos que compõem um sistema de acionamento.

Considerando uma avaliação de eficiência energética das chaves de partidas para MIT, foi proposto um trabalho que pudesse avaliar de forma quantitativa e qualitativa a eficiência energética de cada um destes sistemas, que tivesse a capacidade de trazer uma análise simples, sendo confiável. Para isso, desenvolveu-se os diagramas de ligação de cada método de acionamento, para conseqüente simulação e validação dos mesmos. Posterior a validação das simulações computacionais, a metodologia de avaliação desenvolvida complementou-se com a implementação prática em bancada de testes. Juntamente as validações, ratificou-se uma avaliação financeira e *payback* para estimação de tempo de retorno do investimento procedente da substituição da chave de partida.

Na análise dos resultados pode-se perceber que a metodologia avaliativa convergiu para os resultados esperados. A comparação entre as rampas de aceleração se mostraram eficientes, pois as rampas de aceleração interagem diretamente na eficiência do motor, assim como as diferentes jornadas de trabalhos. Quando a rampa de aceleração e a jornada de trabalho do motor foram maiores, a eficiência da chave de partida e a redução dos valores potência aumentaram, gerando um tempo de retorno do investimento mais rápido.

Além das rampas de aceleração, o perfil da carga conectada ao eixo demonstrou-se ser fator preponderante para a eficácia das chaves de partida. Pois como este interfere diretamente no transitório da partida, acaba tendo interferência direta nos valores de potências das chaves de partidas.

Dentro do contexto proposto no trabalho, avaliando os sistemas de acionamento para motores de $1/2 cv$ e $1 cv$, com uma carga constante conectada ao eixo, ficou evidente que o inversor de frequência é o sistema de acionamento que consegue alcançar a melhor eficiência energética. A chave *soft-starter*, nestas condições operacionais acaba tendo sua eficiência reduzida e tornando-se não atrativa para uma substituição.

A metodologia desenvolvida neste trabalho alcançou resultados condizentes, de modo a atingir os objetivos propostos, sendo viável para uma futura aplicação em uma planta fabril.

5.1 Perspectivas de continuação do trabalho

Para a sequência do trabalho, seguem algumas propostas:

- Validar a metodologia proposta com perfis de carga diferentes (carga linear, carga quadrática e carga inversa);
- Aprimorar metodologia do *payback* (incluir custos de manutenção e ciclo de vida da máquina).

REFERÊNCIAS

- AMARAL, R. S. do. **Aplicação da Soft-Starter para acionamento de motores de indução acoplados a diferentes tipos de cargas mecânicas**. 54 p. Tese (Monografia de Especialização) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2013.
- BORNE, L. S. **Eficiência energética em instalações elétricas**. 102 p. Tese (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.
- CARVALHO, G. **Máquinas Elétricas Teoria e Ensaio**. 4. ed. São Paulo: Editora Érica, 2011. 260 p.
- CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: Editora AMGH, 2013. 684 p.
- EPE, E. P. E. **Balanco Energético Nacional 2019: Ano base 2018**. Rio de Janeiro, 2019. 303 p.
- FEROLDI, R. T. **Modulação senoidal bipolar PWM aplicada em inversores de frequência**. 100 p. Tese (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Estadual de Londrina, 2011.
- FRANÇA, C. R. **Estudo e desenvolvimento da automação de uma linha de montagem industrial**. 84 p. Tese (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões - Campus de Erechim, 2019.
- FRANCHI, C. M. **Acionamentos Elétricos**. 4. ed. São Paulo: Editora Érica, 2008. 240 p.
- GUARESI, J. **Análise de investimento para aquisição de sistema de soldagem robotizada em uma indústria metalúrgica da serra gaúcha**. 79 p. Tese (Monografia) — Universidade de Caxias do Sul, 2018.
- HERMES, T. R.; STEINBRENNER, A. F. **Análise da viabilidade econômico financeira para implantação do produto totem digital**. 116 p. Tese (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2016.
- LAZZARI, T. **Desenvolvimento de uma plataforma experimental ao acionamento e controle de motores de indução trifásicos**. 85 p. Tese (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões - Câmpus de Erechim, 2017.
- LEITE, F. A. **Comparativo entre variadores de velocidade e inversores de frequência**. 60 p. Tese (Trabalho de Conclusão de Curso) — Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá, 2018.
- Lima E Silva, L. P. **Normatização, linhas comerciais e operação ótima de motores de indução trifásicos**. 119 p. Tese (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Federal do Ceará, 2018.

- MAMEDE, J. F. **Instalações Elétricas Industriais**. 9. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2017. 1616 p.
- MASCHERONI, J. M.; LICHTBLAU, M.; GERARDI, D. **Guia de aplicação inversores de frequência**. Jaraguá do Sul: WEG Automação, 2007. 264 p.
- MIRANDA, A. B. C. M. **Análise de viabilidade econômica de um sistema fotovoltaico conectado à rede**. 98 p. Tese (Trabalho de Conclusão de Curso) — Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.
- MME. **Portaria Interministerial Nº 1 de 29 de junho de 2017**. 2017. 3 p.
- MOHAN, N.; UNDELAND, T. M.; ROBBINS, W. P. **Power electronics: Converters, applications and design**. 3rd. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2003.
- PAIXAO, J. P. **Controle de velocidade de motores elétricos**. 65 p. Tese (Monografia de Especialização) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2009.
- PETRUZELLA, F. D. **Motores Elétricos e Acionamentos**. 1. ed. Porto Alegre: Editora AMGH, 2013. 372 p.
- RAMOS, M. C. D. E. S. **Metodologia para avaliação e otimização de motores elétricos de indução trifásicos visando a conservação de energia em aplicações industriais**. 246 p. Tese (Tese de Doutorado) — Universidade de São Paulo - USP, 2009.
- SANTOS, A. H. M. et al. **Conservação de energia**. 3. ed. Itajubá: Eletrobrás/ PROCEL Educação, 2006. 597 p.
- SARDA, J. A. d. S. **Estudo de eficiência energética aplicado a indústria Sudati Painéis**. 86 p. Tese (Trabalho de Conclusão de Curso) — Centro Universitário INIFACVEST, 2018.
- UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e kingsley**. 7. ed. Porto Alegre: Editora AMGH, 2014. 708 p.
- VIANA, A. N. C. et al. **Eficiência Energética: Fundamentos e Aplicações**. 1. ed. Campinas: Elektro – Eletricidade e Serviços S.A., 2012. 315 p.
- WEG, A. **Manual do Usuário Soft-Starter SSW-03 Plus**. Jaraguá do Sul: [s.n.], 2000. 122 p.
- _____. **Catálogo Soft-Starters SSW-03 Plus e SSW-04**. Jaraguá do Sul: WEG Automação, 2001. 8 p.
- WEG, M. **Guia de especificação**. Jaraguá do Sul: [s.n.], 2020. 68 p.