

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

ANDERSON ROBERTO SELL

SISTEMA DE AUTOMAÇÃO DE COMPRESSORES DE AR ALTERNATIVOS DE
PISTÃO POR INVERSOR DE FREQUENCIA COM DESTAQUE PARA EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA

Joinville

2022

ANDERSON ROBERTO SELL

SISTEMA DE AUTOMAÇÃO DE COMPRESSORES DE AR ALTERNATIVOS DE
PISTÃO POR INVERSOR DE FREQUENCIA COM DESTAQUE PARA EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA

Monografia apresentada ao
Curso de Bacharelado em
Engenharia Elétrica do
Campus Joinville do
Instituto Federal de Santa
Catarina para a obtenção do
diploma de Engenheiro
Eletricista.

Orientador: Janderson
Duarte

Joinville
2022

Sell, Anderson Roberto.

Sistema de automação de compressores de ar alternativos de pistão por inversor de frequência com destaque para eficiência energética / Anderson Roberto Sell – Joinville, SC, 2022.

95 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, Joinville, 2022.

Orientador: Janderson Duarte.

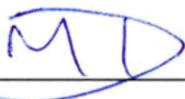
1. Eficiência Energética. 2. Ar Comprimido. 3. Inversor de Frequência. I. Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. II. Título.

ANDERSON ROBERTO SELL

SISTEMA DE AUTOMAÇÃO DE COMPRESSORES DE AR ALTERNATIVOS DE
PISTÃO POR INVERSOR DE FREQUENCIA COM DESTAQUE PARA EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Engenheiro Eletricista
pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, e
aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

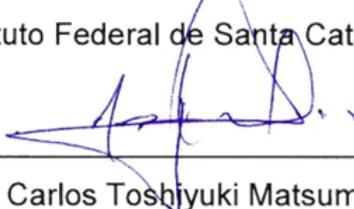
Joinville, 07, Julho de 2022.



Prof. Janderson Duarte, Dr.

Orientador

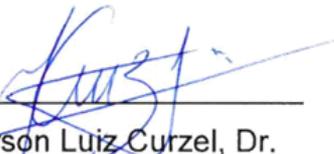
Instituto Federal de Santa Catarina



Prof. Carlos Toshiyuki Matsumi, Dr.

Orientador

Instituto Federal de Santa Catarina



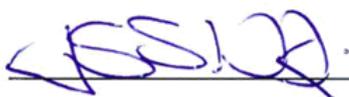
Prof. Jeferson Luiz Curzel, Dr.

Instituto Federal de Santa Catarina



Prof. José Flávio Dums, Dr.

Instituto Federal de Santa Catarina



Juliano Sadi Scholtz, Dr.
Schulz Compressores Ltda.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me conduzir na busca do aprendizado, dedicação e persistência, para o caminho da realização de mais um sonho.

A minha esposa Ketlin pelo amor, ajuda, incentivo, paciência em todos os momentos dessa jornada.

Aos meus filhos e demais familiares, pelo apoio e por torcerem e vibrarem com a minha conquista.

Aos docentes do Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, pelo conhecimento transmitido, não só pelo conteúdo das disciplinas, mas principalmente pela postura em transmitir da melhor maneira possível todo o conhecimento.

Aos colegas e amigos que tiveram uma participação construtiva em mais essa etapa de aprendizado. Em especial aos colegas do IFSC, que estiveram presentes em diversos momentos da formação.

Aos Professores Janderson Duarte e Carlos Matsumi, que orientaram e conduziram na elaboração dessa etapa do formação, com extrema dedicação.

À empresa Schulz Compressores, especialmente à equipe do Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento por todo apoio durante a execução deste trabalho acadêmico.

Aos demais que contribuíram diretamente ou indiretamente, ressalto meu muito obrigado.

RESUMO

Este trabalho consiste no estudo de uma solução para acionamento elétrico para compressores alternativos de pistão utilizando inversores de frequência, uma vez que estes são muito utilizados nas mais diversas áreas, como por exemplo na indústria mecânica, química, de alimentos, automotiva, hospitais, clínicas médicas e odontológicas e muitas outras. Contudo, o que se observa é que nessas aplicações normalmente os compressores não possuem um acionamento elétrico mais elaborado, não permitindo assim uma operação mais eficaz do ponto de vista da fonte de energia. Esse trabalho apresenta a implementação de automação elétrica mais aperfeiçoada, permitindo a variação de velocidade do motor elétrico e conseqüentemente modulação da vazão de ar do compressor, ajustando-se de tal forma à demanda de ar comprimido do usuário final. Após os estudos, análises e testes de aplicação realizados, verifica-se que é possível desenvolver um sistema que viabiliza a aplicação desse tipo de automação em vários modelos e potências de compressores alternativos de pistão, contribuindo para economia de energia elétrica dos usuários, tornando essa classe de equipamentos mais eficientes.

Palavras-Chave: Eficiência Energética. Ar Comprimido. Inversor de Frequência. Automação Elétrica. Energia Elétrica.

ABSTRACT

This work consists of studying a solution for the electric drive of reciprocating piston compressors using frequency inverters, since they are widely used in many different areas, such as the mechanical, chemical, food, automotive industries, hospitals, medical and dental clinics, and many others. However, what is observed is that in these applications the compressors usually do not have a more elaborate electrical drive, thus not allowing a more effective operation from the point of view of the energy source. This work presents the implementation of a more refined electrical automation, allowing the variation of the electric motor speed and consequently the modulation of the compressor air flow, adjusting it to the compressed air demand of the end user. After the studies, analysis, and application tests carried out, it is possible to develop a system that enables the application of this type of automation in various models and powers of reciprocating piston compressors, contributing to users' electricity savings, making this class of equipment more efficient.

Keywords: Energy Efficiency. Compressed Air. Frequency Inverter. Electrical Automation. Electrical Energy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Geração, distribuição e tratamento do ar comprimido	20
Figura 2 - Participação setorial no consumo de eletricidade setor.....	21
Figura 3 - Classificação dos compressores	27
Figura 4 - Tipos de compressores de pistão.....	30
Figura 5 - Admissão e descarga de um compressor de dupla ação.....	30
Figura 6 Compressor alternativo de pistão	31
Figura 7- Motor de indução trifásico gaiola de esquilo.....	33
Figura 8 - Rendimento Nominal para Motores Padrão (IR1), de Alto Rendimento (IR2) e Premium (IR3), 4 Polos	36
Figura 9 - Curva característica de conjugado x velocidade de um motor de indução	40
Figura 10 - Partida estrela-triângulo – circuito de força	43
Figura 11 - Diagrama de blocos inversor de frequência	45
Figura 12 - Curva tensão/frequência (V/f) do controle escalar	46
Figura 13 - Região de enfraquecimento de campo (toque x velocidade)	47
Figura 14 - Curva conjugado x rotação	48
Figura 15 - Fluxograma das etapas empregadas no estudo.....	49
Figura 16 - Osciloscópio Tektronix aplicado nos ensaios.....	53
Figura 17- Corrente de partida com acionamento tipo PD 100 ms– sem alívio.....	54
Figura 18 - Corrente de partida com acionamento tipo PD 500 ms– sem alívio.....	54
Figura 19 - Corrente de partida com acionamento tipo YD – sem alívio.....	55
Figura 20 - Corrente de partida com acionamento tipo YD – com alívio.....	56
Figura 21 - Corrente de partida com acionamento tipo SS – com alívio.....	57
Figura 22 - Corrente de partida com acionamento tipo SS – sem alívio.....	57
Figura 23 - Corrente de partida com inversor de frequência 500ms - sem alívio	59
Figura 24 - Corrente de partida com inversor de frequência 250ms - sem alívio	59
Figura 25 - Corrente de partida com inversor de frequência – com alívio	60
Figura 26 - Pressão [Psi] x Vazão [PCM] com acionamento tipo PD/YD	63
Figura 27 - Rendimento específico [$PCM \cdot psi/kW$] x Rotação bloco compressor [%].....	64
Figura 28 - Potência elétrica [kW] e vazão [%] x Pressão[%] com acionamento tipo PD/YD.....	65
Figura 29 - Desempenho da tensão e corrente na entrada do inversor de frequência	67
Figura 30 - Retificador trifásico, onda completa, não controlado	67
Figura 31 - Formas de onda no lado CA para retificador trifásico – com filtro, onda completa, não-controlado, alimentando diferentes tipos de carga	68
Figura 32 - Desempenho do conjunto em 45, 50, 55, 60 e 65 Hz.....	69
Figura 33 - Comparativo de desempenho em 45 e 55 Hz.....	70
Figura 34 - Comparativo entre demanda média [Velocidade Fixa x Velocidade Variável]	71
Figura 35 - Potência consumida [kW] x Pressão x Vazão (PD e PIF).....	72
Figura 36 - Analisador de energia utilizado nos ensaios	87
Figura 37 - Leitura de tensão, corrente, potência, FP, frequência (valor instantâneo).....	87
Figura 38 - Médias da tensão, corrente, potências e fator de potência (valor instantâneo)	88
Figura 39 - Potências elétricas (valor instantâneo)	88
Figura 40 - Forma de onda, tensão e corrente de cada fase (valor instantâneo).....	89
Figura 41 - Análise gráfica, ângulos de fase (valor instantâneo)	89
Figura 42 - Parte interna da chave de partida com inversor de frequência	90
Figura 43 - Frontal do protótipo da chave de partida com inversor de frequência	90
Figura 44 - Cotação componentes elétricos Andra	91
Figura 45 - Cotação componentes elétricos Eletronacional.....	92
Figura 46 - Cotação componentes elétricos Dimensional	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Perdas de vazão e potências de vazamentos de ar comprimido	26
Tabela 2 - Velocidade síncrona motores.....	34
Tabela 3 - Acoplamentos e seus rendimentos	39
Tabela 4 - Conjugado da carga e suas funções matemáticas.....	41
Tabela 5 - Investimento total do acionamento.....	76
Tabela 6 - Comparativa da energia consumida – PD x PIF (Subgrupo A3)	77
Tabela 7 - Cálculo retorno de investimento (Subgrupo A3)	78
Tabela 8 - Comparativa da energia consumida – PD x PIF (Grupo B - Subgrupo B2).....	79
Tabela 9 - Cálculo retorno de investimento (Grupo B - Subgrupo B2).....	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia

BEN - Balanço Energético Nacional

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

CA - Corrente Alternada

CC - Corrente Contínua

IF - Inversor de frequência

IO's - Entradas e saídas

IHM - Interface Homem Máquina

NA - Normalmente aberto

NF - Normalmente fechado

PB - *Payback*

PD - Partida direta

YD - Partida estrela triângulo

PIF - Partida inversor de frequência

PID – Proporcional Integral Derivativo

SS - Partida *soft starter*

PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

PWM - *Pulse Width Modulation*

ROI - *Return of Investment*

TIR - Taxa Interna de Retorno

TMA - Taxa mínima atratividade

V/f - Tensão/Frequência

VPL - Valor Presente Líquido

VSD – *Variable speed drive*

LISTA DE SÍMBOLOS

A - Ampere

Bar - Unidade de medida para pressão

Co - Conjugado da carga em rotação zero

Ccn - Conjugado nominal da carga

Cn - Conjugado nominal do motor

Cc - Conjugado resistente da carga

cv - Cavalo-vapor

f - Frequência

kV - Quilovolt

kWh - Quilowatt-hora

kWh - Quilowatt-hora

TWh - Terawatt-hora

mA - Miliamper

mm - Milímetro

mm² - Milímetro quadrado

m³/min - Metro cúbico por minuto

MHz - Mega hertz

ms - Mili-segundos

n - Velocidade nominal

η_{ac} - Rendimento acoplamento

rc - Rotação nominal da carga

R\$ - Real

% - Percentual

p - Número de pares de polos

Pc - Potência nominal da carga

PCM - Pés cúbicos por minuto

Pn - Potência nominal do motor

PSI - *Pound force per square inch* ou libra-força por polegada quadrada

rpm - Rotações por minuto

S - Escorregamento

V - Volts

Vca - Tensão corrente alternada

Vcc - Tensão corrente contínua

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivos	16
1.1.1 Objetivo geral	16
1.1.2 Objetivo específico	16
2 REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1 Conceitos e definições técnicas	18
2.1.1 Ar comprimido como energia.....	18
2.1.2 Aplicação do ar comprimido.....	18
2.2. Geração e tratamento do ar comprimido	19
2.3. Eficiência energética na geração do ar comprimido	21
2.4. Gerenciamento do ar comprimido	22
2.5. Tratamento do ar comprimido	24
2.5.1 Filtros	25
2.5.2 Secadores de ar comprimido.....	25
2.6. Vazamentos nas redes e sistemas de ar comprimido	26
2.7. Introdução aos compressores de ar	27
2.7.1 Compressores de deslocamento dinâmico	28
2.7.2 Compressores de deslocamento volumétrico	28
2.7.3 Compressor de ar volumétrico à pistão - Alternativo	28
2.8 O motor elétrico como fonte motriz em compressores	32
2.8.1 Velocidade Síncrona	34
2.8.2 Escorregamento.....	34
2.8.3 Velocidade nominal	35
2.8.4 Rendimento do motor	35
2.9 Eficiência dos motores elétricos	38
2.9.1 Operação do motor elétrico e estudo da carga.....	38
2.9.2 Fonte motriz aplicada nos compressores alternativos de pistão	41
2.10 Tipos de acionamentos elétricos utilizados	42
2.10.1 Partida direta.....	42
2.10.2 Partida estrela-triângulo	42
2.10.3 Partida <i>soft starter</i>	44
2.10.4 Partida com inversor de frequência.....	44
2.11 Tipos de controle	46
2.11.1 Controle escalar.....	46
3 DESENVOLVIMENTO	49
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	52
4.1. Ensaio corrente de partida	52

4.1.1. Ensaio com acionamento do tipo partida direta.....	53
4.1.2. Ensaio com acionamento do tipo partida estrela-triângulo.....	55
4.1.3. Ensaio com acionamento do tipo partida com <i>soft starter</i>	56
4.1.4. Ensaio com acionamento do tipo partida com inversor de frequência	58
4.2. Ensaio de performance do conjunto acionamento-compressor	61
4.2.1. Ensaio com acionamento do tipo PD/YD – operação contínua	61
4.2.2. Ensaio com acionamento via inversor de frequência – operação variável	66
4.3. Comparativo entre velocidade fixa e velocidade variável	70
5 ANÁLISE DA EFETIVIDADE DA SOLUÇÃO PROPOSTA	74
6 CONCLUSÃO	81
REFERÊNCIAS	83
ANEXO A - Analisador de energia, modelo CW240 / Yokogawa, utilizado na aquisições variáveis elétricas.....	87
ANEXO B - Protótipo chave de partida com inversor de frequência, montada para realização dos ensaios	90
ANEXO C - Cotações materiais elétricos para montagem da solução proposta com inversor de frequência	91

1 INTRODUÇÃO

Diante do histórico de crises e apagões enfrentados pelo setor energético brasileiro nas últimas décadas, combinada com a crescente demanda, além da falta de investimentos no segmento, tanto na geração, transmissão e distribuição, bem como na matriz energética de geração pouco diversificada, onde o Brasil possui 64,9% baseada em hidroelétricas, segundo dados do Balanço Energético Nacional (BEN) de 2020, obtidos pela Empresa de Pesquisa Energética (BRASIL, 2020), a procura por soluções eficazes, que permitam uma melhor utilização da energia elétrica produzida no país, passou a ser uma meta a ser alcançada, no mais curto prazo possível, uma vez que combinar a utilização desse produto de consumo e a necessidade não é tarefa fácil para os consumidores, sejam eles residenciais, comerciais ou indústrias.

Dados apresentados pelo BEN (2020), mostram que o consumo de energia elétrica no Brasil no ano de 2019 foi de aproximadamente 651,3 TWh, representando um aumento de apenas 2,3% comparado com o ano anterior. A produção industrial com 30,4% e o setor de transporte de carga e passageiros com 32,7%, representam 63,1% do consumo de energia elétrica do país, dados extremamente significativos. De tal forma, com base no texto, pode-se afirmar que ambos os setores mencionados possuem alto potencial para soluções que permitam o uso mais consciente e eficaz da energia disponibilizada.

O preço da energia elétrica está cada vez mais elevado, de forma que a utilização racional, impacta de maneira positiva ao meio ambiente, visto que a matriz energética nacional está fortemente concentrada na geração por meio das usinas hidroelétricas e as termoeletricas. A primeira delas depende de grandes área para sua instalação combinado com altos investimentos na sua construção. A outra pela queima de material fóssil (não renovável), petróleo ou gás.

A energia elétrica é fundamental para todos os setores da economia e deve ser utilizada com inteligência. A eficiência energética é o principal instrumento para o combate ao desperdício (MESQUITA, 2009).

A eficiência energética está diretamente ligada ao uso racional de energia, principalmente no que diz respeito ao consumo, que consiste em obter o melhor serviço com o menor desperdício de energia. Inúmeras ações de eficiência energética contribuem para o uso mais adequado da energia elétrica, contemplando principalmente equipamentos e processos mais eficazes para reduzir o consumo.

Eficiência energética significa reduzir o consumo e custos, sem perder, em nenhum momento, a qualidade e eficiência dos serviços (PROCEL, 2012). A eficiência energética, atualmente atrelada às questões ambientais e com a difusão de informações, do conhecimento aplicado e novas tecnologias, é um tema que vem ganhando cada vez mais espaço (MESQUITA, 2009).

O início foi com o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) em 1985, criado pelo Governo Federal através do Ministério de Minas e Energia e da Eletrobrás, com a função de reduzir o consumo de energia e da demanda, com ações de combate ao desperdício (PROCEL, 2012). Em 1991, o PROCEL foi transformado em Programa de Governo, onde sua abrangência e responsabilidade foram ampliadas, tendo como objetivo promover a racionalização da produção e do consumo de energia elétrica para que se elimine o desperdício e se reduza os custos e os investimentos setoriais (PROCEL, 2008).

Em decorrência dos diversos programas de conservação de energia e de medidas punitivas para aqueles que não atendem às normas de qualidade de energia, diversas medidas de combate ao desperdício tem sido adotadas pelos segmentos de consumidores. Como exemplo desta medidas pode-se citar: utilização de equipamentos mais eficientes, dimensionamento correto de máquinas, iluminações mais eficazes, uso de *soft starters* e de inversores de frequência para o acionamento de motores elétricos, entre outros.

A utilização do conjunto: motor de alto rendimento e de inversores de frequência está ganhando cada vez mais espaço no cenário nacional, principalmente na indústria. Esta medida combinada com os incentivos de grandes empresas, produtoras desses equipamentos, para realização de trocas dos mesmos nos parques fabris, suscita de forma clara a possibilidade de retorno do investimento a curto-médio prazo.

Destaca-se também o fato de que em junho de 2017 foi publicada a Portaria Interministerial N° 1 pelo Ministério de Minas e Energia do Brasil, que visa a ampliação dos níveis de rendimento (η) para os motores elétricos trifásicos de indução rotor gaiola de esquilo, máquina motriz amplamente utilizada na indústria, estabelecendo novos níveis mínimos de eficiência energética a serem atendidos, visto que agora passam a integrar a classe IR3 ou Premium.

Diante das informações mencionadas, esse trabalho pretende esclarecer aspectos relacionados ao ar comprimido e sua eficiência energética.

A aplicação do ar comprimido é normalmente realizada sem muito controle, sem um gerenciamento mais eficaz do consumo e preferencialmente da energia utilizada para gerar o mesmo.

O ar comprimido é utilizado em larga escala, principalmente na indústria, devido a sua grande versatilidade, entretanto muitos aspectos impactam na sua correta aplicação, nas quais se destacam: o uso ineficaz, o dimensionamento incorreto dos compressores e suas instalações, salas de compressores inadequadas e mal dimensionadas, vazamentos nas redes de ar comprimido, ineficácia do modelos de gerenciamentos das salas de compressores, sistemas de tratamento do ar impróprios, e principalmente dos tipos de acionamentos e controles elétricos ineficazes.

Este trabalho busca relatar informações referentes à eficiência energética em sistemas de ar comprimido, mencionando os problemas mais comuns existentes, bem como ações que possam tornar o conjunto mais eficaz energeticamente.

Posteriormente serão apontados os principais modelos e características dos compressores ar, com destaque aos alternativos de pistão, alinhada a uma breve explanação sobre motor elétrico, informações relativas ao conjugado, curvas de rendimento, além das características dos principais modelos de acionamentos elétricos empregados nesse tipo de máquina motriz, dando ênfase a proposta de acionamento via inversor de frequência e suas vantagens, além do sistema de controle, entre outros fatores relevantes.

Será exposto a metodologia utilizada na aquisição dos resultados práticos, via ensaios laboratoriais através de acionamento elétrico montado para tal finalidade, onde será possível esclarecer com detalhes a operação do compressor, os obstáculos e problemas com a energia, oportunizando modelo de como melhorar a eficiência do compressor.

Com a realização dos ensaios, será exposto de maneira dinâmica, os resultados obtidos, onde é possível visualizar o comportamento das variáveis mecânicas e elétricas de um compressor alternativo de pistão. Serão apresentadas as curvas que demonstram as diferenças de consumo energético dos sistemas com acionamento convencional e com o sistema proposto.

Finalizando, será apresentado comparativo sobre a viabilidade econômica do modelo de acionamento elétrico proposto e os modelos comumente existentes e utilizados pelos consumidores finais, possível retorno de investimento (ROI), entre outros aspectos analisados durante a realização do estudo.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Efetuar o estudo de uma solução de acionamento elétrico com inversor de frequência (IF) para aplicação em compressores alternativos de pistão, propondo assim um acionamento elétrico de “partida” e “regime de operação” mais eficaz para os motores elétricos aplicados nesse tipo de equipamento, realizando comparativos entre um sistema utilizando inversor de frequência e os modelos de acionamentos convencionais, tais como: PD (partida direta), YD (partida estrela triângulo) e SS (partida via *soft starter*), as quais são normalmente utilizadas pelas pequenas e médias empresas, verificando o ganho energético para o conjunto durante os ciclos de operação.

1.1.2 Objetivo específico

- Estudo da Eficiência Energética nos sistemas de ar comprimido nas indústrias, apontando quais são os maiores desperdícios de energia e quais as soluções normalmente utilizadas.
- Estudo das vantagens e desvantagens do gerenciamento da geração de ar comprimido, apontando as estratégias de controle de compressores.
- Estudo das tecnologias de compressores, explanando o funcionamento de compressores alternativos de pistão.
- Avaliação dos motores elétricos trifásicos utilizados no acionamento de compressores alternativos de pistão, considerando o conjugado das cargas.
- Avaliar o comportamento dos vários tipos de acionamentos elétricos, chaves de partida tradicionalmente utilizadas nos compressores alternativos de pistão.
- Estudar e implementar tipo de automação que permita a utilização de IF.
- Estudar a melhor forma de implementar a referência de velocidade via AI (Entrada Analógica) no inversor, seja via tensão de 0 a 10Vcc ou corrente elétrica de 4 a 20mA.
- Implementar de modo geral a tecnologia de controle de velocidade variável em compressores alternativos.

- Análise do consumo de energia e investimento do acionamento proposto no estudo.
- Análise dos resultados obtidos e contudo a viabilidade econômica na aplicação.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Conceitos e definições técnicas

Esse capítulo apresentará informações e definições importantes relacionadas ao ar comprimido, suas principais aplicações, como são todas as etapas de geração, tratamento e distribuição até o ponto de utilização. Bem como informações preliminares com relação a eficiência energética em estruturas de ar comprimido, além de explicar teoricamente os modelos e tipos de acionamentos elétricos de motores, que integram o objeto de estudo.

2.1.1 Ar comprimido como energia

O ar seco atmosférico é composto quando relacionado a concentração percentual (%), pelo Nitrogênio (78,08%), Oxigênio (20,95%) e Argônio (0,93%) são os gases predominantes na atmosfera terrestre com mais de 99% do total (WALLACE e HOBBS, 2006), além de pequenas quantidades de dióxido de carbono, hélio, neônio e hidrogênio. Ressalta-se também a presença de um componente variável muito importante da atmosfera que é o vapor de água.

O ar comprimido pode ser definido como uma energia potencial acumulada do ar atmosférico. Normalmente aplicado para operar máquinas e equipamentos pneumáticos. Amplamente utilizado nas indústrias, em inúmeros processos de fabricação, exercendo funções de acionamento mecânico, transporte de materiais e propulsão de ferramentas pneumáticas (KARMOUCHE, 2009). Sendo também amplamente aplicado na indústrias químicas, de alimentos, em clínicas médicas, hospitais e consultórios odontológicos.

2.1.2 Aplicação do ar comprimido

O ar comprimido é segunda forma de energia mais consumida na indústria de transformação perdendo apenas para a energia elétrica, portanto é um elemento de extrema importância. Constitui uma forma de energia mais custosa, utilizada muitas vezes de maneira errada, como na limpeza de equipamentos, objetos, bancadas de trabalho, uniforme dos colaboradores, etc. Existem várias possibilidades de utilização do ar comprimido, pois ele tem uma enorme gama de aplicações, uma vez que é um

elemento de energia simples, flexível, relativamente eficaz quando manipulado de forma segura, amplamente utilizado em diferentes parques fabris, sendo que as principais são:

- Ferramentas pneumáticas;
- Automação pneumática;
- Cabines e sistemas de pintura;
- Ar medicinal (respiração hospitalar);
- Consultórios odontológicos;
- Processamento de alimentos;
- Transporte pneumático de produtos;
- Aeração e agitação de tratamento de efluentes, etc.

2.2. Geração e tratamento do ar comprimido

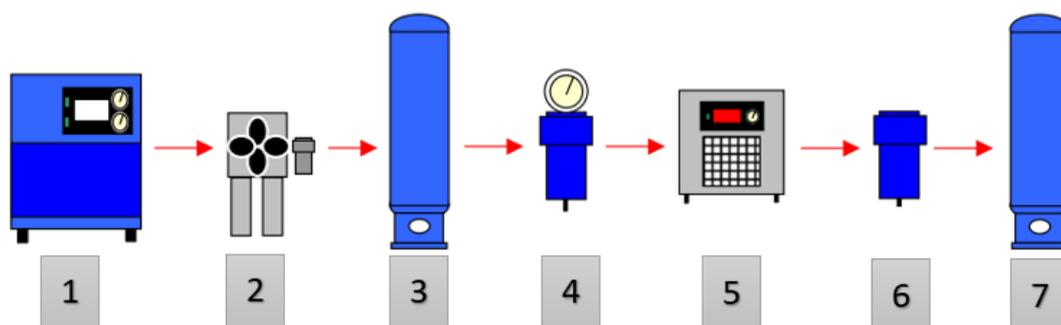
Antes de ser utilizado, o ar comprimido passa por uma série de etapas, que são imprescindíveis para o correto funcionamento dos equipamentos pneumáticos, bem como para permitirem uma maior vida útil de seus elementos. Essas etapas que estão diretamente associadas a produção e ao tratamento do ar até a distribuição aos pontos consumidores, podem ser desmembradas da seguinte maneira (PROCEL, 2009):

- I. Geração: definido como captação, compressão, tratamento e armazenamento;
- II. Distribuição: consiste no transporte do ar comprimido até os elementos de consumo;
- III. Consumo: utilização da energia contida no ar comprimido em trabalho por meio de máquinas, equipamentos e ferramentas.

A Figura 1 apresenta os principais componentes de um sistema de ar comprimido, considerando os elementos necessários para produzir e ar comprimido com qualidade. Resumidamente pode-se observar que é produzido na unidade de geração e subsequentemente distribuído no parque fabril. Entretanto antes de ser distribuído pela rede aos pontos consumidores, o ar comprimido passa por cinco processos de preparação e tratamento, na qual é esfriado, secado, filtrado, calibrado em pressão e lubrificado quando se fizer necessário. O ar comprimido deve de uma

maneira geral, ser tratado com a remoção de impurezas e umidade a fim de atender as necessidades de qualidade do sistema à que ele se destina.

Figura 1 - Geração, distribuição e tratamento do ar comprimido



Fonte: Adaptado www.fargon.com.br (2020)

Conforme a Figura 1, o processo inicia pela admissão no compressor do ar atmosférico contaminado por partículas sólidas (poeira, microrganismos, etc.), vapor d'água (umidade relativa), vapores de hidrocarbonetos (fumaça de óleo diesel, por exemplo), além de dióxido de carbono, monóxido de carbono, óxido nitroso, pelo compressor (número 1), onde o mesmo possui filtro para retirada das partículas contaminantes do ar, com a finalidade de proteger as partes mecânicas. Após essa filtragem inicial, o ar é efetivamente comprimido. Como consequência do processo de compressão, a temperatura do ar se eleva, sendo indispensável a etapa de resfriamento com o auxílio de um elemento resfriador denominado pós-resfriador com separador de condensado (número 2).

Na continuidade do processo o ar comprimido é armazenado no reservatório ou acumulador (número 3), garantindo assim uma reserva em caso de alguma emergência no sistema. São aplicados filtros de ar comprimido (número 4) com a finalidade de remover contaminantes presentes ou gerados na linha de ar comprimido, tais como óleo, água condensada, partículas sólidas, odores, vírus e bactérias.

Em seguida é necessário a secagem do ar (número 5), fase que tem a finalidade de retirar a umidade presente no ar. Por fim, o ar comprimido passa por outro filtro de ar (número 6) para remoção de impurezas restantes do tratamento, seguindo ao armazenado no reservatório (número 7), com a finalidade de garantir uma reserva previa de ar para o sistema, garantindo de tal forma, uma pressão constante na rede durante as oscilações e evitando a operação contínua do compressor, motivo pelo qual é denominado como um sistema de operação intermitente. A etapa seguinte é a

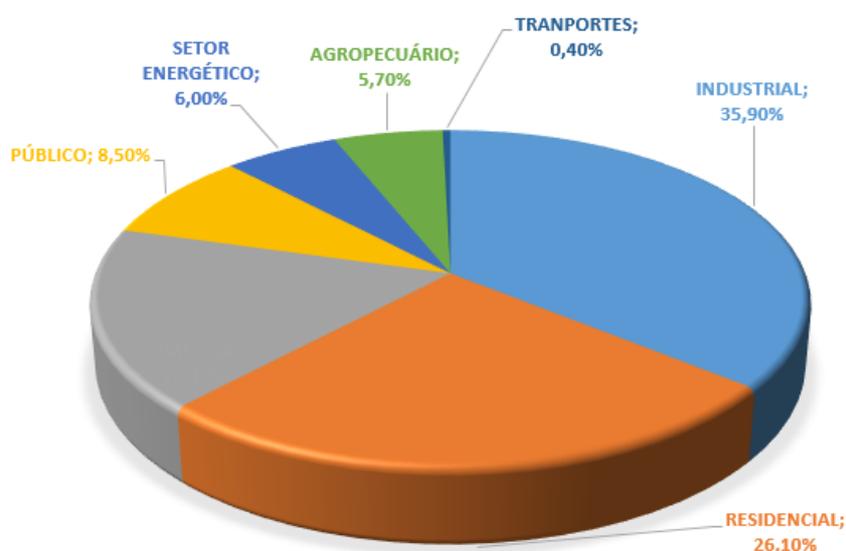
distribuição do ar pela rede, na qual o mesmo é ajustado conforme as necessidades das máquinas ou ferramentas, geralmente com aplicação de unidades de preparação de ar.

2.3. Eficiência energética na geração do ar comprimido

Para se obter eficiência energética na indústria o ideal é utilizar processos, máquinas e equipamentos que sejam mais eficientes, portanto reduzindo o consumo inadequado da energia elétrica, sem que ocorram impactos na qualidade do produto, bem ou serviço.

Considerando os dados apresentados no BEN (2020), o setor industrial é responsável pela maior participação setorial no consumo de eletricidade do país; a Figura 2 apresenta que 35,9% é destinado a esse setor, onde o mesmo possui grande potencial de ganhos em conservação de energia. A maioria dos sistemas consumidores industriais de energia são de características motrizes, compostos de acionamentos eletroeletrônicos, de motores elétricos e de cargas mecânicas acionadas, tais como: bombas, compressores, exaustores, sistemas de transporte, sistemas de exaustão e ventilação, entre outros. Contudo, não se pode desprezar o consumo de suas instalações e seus sistemas de automação.

Figura 2 - Participação setorial no consumo de eletricidade setor



Fonte: Adaptado EPE (BRASIL, 2020)

Existem muitas oportunidades para melhoria da eficiência energética na indústria. Na força motriz, por exemplo, a melhoria da eficiência energética pode ser conseguida por meio de: motores de alto rendimento, adequação à carga, correção do fator de potência, instalação de dispositivos para controle de partida e velocidade, manutenção periódica; balanceamento da tensão de alimentação (MARQUES et al., 2006).

Desde a menor indústria até os parques fabris gigantes, é certo que todas possuem algum modelo de sistema de ar comprimido, onde utilizam ferramentas pneumáticas, acionamentos mecânicos, controle de equipamentos e transporte de materiais. Dentre os inúmeros processos industriais, os sistemas de ar comprimido têm papel importante na produção, respondendo por isso por uma grande parcela do consumo energético da unidade industrial.

Portanto, é de suma importância que os sistemas de ar comprimido estejam em perfeitas condições de operação, redes sem vazamentos e tratamento do ar eficaz, compressores dimensionados de maneira correta, pois sistemas ineficientes geram gastos desnecessários à indústria.

Existem muitos problemas que aumentam o consumo de ar de uma instalação, destacando principalmente os vazamentos, dimensionamento inadequado dos compressores, problemas no gerenciamento dos compressores em uma mesma rede, conjunto de vários compressores operando em paralelo e a maneira de como os mesmos são gerenciados. Quando a rede de ar está com os níveis de pressão baixa, é muito comum o aumento da pressão alvo ou pressão limite do compressor, sendo que esta prática é totalmente equivocada, pois soluciona momentaneamente o problema, onde a médio/longo prazo, pode representar um aumento significativo do consumo de energia.

2.4. Gerenciamento do ar comprimido

Para que um sistema de ar comprimido tenha um rendimento eficaz, é imprescindível o estudo da vazão necessária na aplicação, além do controle da geração. Ambos devem estar integrados para que não ocorram problemas nos momentos em que o consumo for elevado, gerando picos de demanda.

Sistemas que possam garantir o suprimento de ar comprimido durante as variações de consumo são extremamente importantes, destacando-se os conjuntos de compressores que operam em simetria. A utilização de equipamentos de controle,

de armazenamento e de gerenciamento da demanda são maneiras que podem garantir a operação mais eficiente. O gerenciamento também tem que ser eficaz nos momentos em que o consumo de ar comprimido é baixo, portanto é nas flutuações que se faz necessário o controle, para conseguir um sistema eficaz energeticamente. Dentre os inúmeros sistemas de controle de compressores utilizados na indústria, destacam-se os seguintes:

- I. Controle por cascata: Maneira mais comum de controlar os compressores instalados em uma mesma sala, onde cada compressor é ajustado para um ponto mínimo e máximo de pressão de acordo com a demanda de ar comprimido do sistema. Cada máquina possui faixas distintas de operação, valores mínimos (onde o compressor entra em operação) e valores máximos (desligamento, quando atinge a pressão limite).
- II. Controle carga/alívio: Para que os motores não sejam forçados a realizarem um grande número de acionamentos (ciclos de liga/desliga), além de permitir que o sistema seja pressurizado aos níveis necessários, cada equipamento possui dois estados com os motores operando: carga/alívio. Quando a pressão máxima é atingida, o compressor entra em alívio; ou seja, abre uma válvula, normalmente mecânica, onde o compressor deixar de realizar a compressão do ar. Entretanto, o motor continua em funcionamento por tempo pré-determinado pelo usuário, consumindo cerca de 20% da energia necessária para operar o compressor a plena carga (PROCEL, 2005), caso a demanda de ar aumente, momento em que a pressão da rede diminui, o equipamento volta a comprimir, portanto entrará em carga novamente.
- III. Inversores de frequência: Quando o consumo de ar comprimido é inferior a vazão máxima do compressor, normalmente a utilização de inversores de frequência é aceitável, pois o compressor irá se adequar a demanda, permanecendo sempre em carga plena e pressão constante, assim modulação do motor proporcionará níveis de economia ao sistema (velocidade de operação menor que a nominal), pois a rotação do motor será variável de acordo com o consumo do ar. Ressalta-se que o compressor alternativo é uma máquina que não possui comportamento linear quando analisado sua curva de conjugado e potência. O uso de inversores de frequência é eficaz quando aplicado em sistemas com consumos variáveis.

- IV. Controle via gerenciador ou central de ar comprimido: Tipo de controle que está baseado na utilização de equipamento eletrônico de automação, utilizado no gerenciamento de uma sala de compressores. Nesse caso os compressores devem possibilitar a interação, como o controle liga/desliga, além da comunicação via rede industrial (compressor → gerenciador → compressor), portanto uma malha entre os equipamentos instalados. Nesse sistema podem ser agrupados compressores de diversas capacidades volumétricas, para que o controle possa permitir a operação do sistema em diferentes níveis de consumo. Normalmente a sala de compressores é composta com compressores de velocidade constante (vazão plena) e de velocidade variável (VSD), nesse caso são operados com inversores de frequência (vazão variável).

2.5. Tratamento do ar comprimido

Para utilização do ar comprimido em suas diversas aplicações, seja em máquinas, ferramentas, sistemas ou equipamentos, o mesmo deve estar livre de impurezas, tais como: óleo, água, partículas sólidas, odores, vírus e bactérias, pois caso aplicado dessa maneira irá comprometer toda uma linha produtiva, lote de produtos, planta industrial, etc. Quando aplicado no segmento da saúde, médico, hospitalar ou odontológico, o ar, em hipótese alguma, pode apresentar elementos e ou partículas contaminantes que possam comprometer a saúde. O tratamento do ar proporciona os seguintes benefícios:

- Utilização eficaz dos equipamentos;
- Melhora na vida útil das ferramentas e máquinas;
- Redução no condensado (água) nas tubulações da rede;
- Melhora na qualidade do produto final que depende diretamente do ar (exemplo: máquinas injetoras);
- Custos e perdas na manutenção corretiva e preditiva de equipamentos;
- Perdas com energia, devido a necessidade de operação com impurezas na rede e nos sistemas, provocando resistência na distribuição do ar comprimido, etc.

2.5.1 Filtros

Os filtros são normalmente instalados antes e depois do secador de ar e também nos pontos de uso, onde a principal função é de reter as partículas sólidas e óleo que estão presentes no sistema em condições seca ou úmida.

São dispositivos aplicados na filtragem do ar comprimido, responsáveis por manter a quantidade de sujeira e elementos abrasivos dentro dos limites aceitáveis para o funcionamento adequado e vida útil do sistema. Existem alguns tipos de elementos filtrantes, sendo que os principais aplicados são: os coalescentes, os de carvão ativo e esterilizantes.

2.5.2 Secadores de ar comprimido

Os secadores de ar são equipamentos destinados a remoção da umidade presente após a geração do ar comprimido, portanto eliminam as partículas de vapor d'água presentes nas redes de ar, pois a presença de umidade na rede de ar pode causar sérios danos na estrutura dos sistema, como as conexões e tubulações, além de impactar de forma negativa as máquinas e ferramentas ligados a mesma. Assim a utilização correta de equipamentos destinados ao tratamento do ar melhoram o processo produtivo, a eficiência do sistema e a qualidade do produto final.

Os secadores de ar se diferenciam pela forma na qual retiram o vapor d'água do ar comprimido e seu nível de secagem, dentre os inúmeros tipos de secadores de ar existentes (PROCEL, 2009, p.95), destacam-se os seguintes processos e suas respectivas características:

Secagem por absorção: Trata-se de um processo químico que consiste no contato do ar comprimido com o elemento secador. A água ou vapor, em contato com esse elemento, mistura-se quimicamente com ele formando um barro que deverá ser removido periodicamente do absorvedor. Portanto, o elemento secador deve ser trocado de duas a quatro vezes por ano, dependendo da umidade relativa do ar da região.

Secagem por adsorção: A secagem por adsorção é um processo físico em que o ar comprimido entra em contato com um elemento secador que tem a função de reter a umidade e liberar o ar seco. Esse elemento, constituído de quase 100% de dióxido de silício (SiO_2), é conhecido no mercado como sílica gel.

Secagem por Resfriamento: A secagem por resfriamento é feita diminuindo a temperatura do ar comprimido, para que a umidade nele contida se condense e passe ao estado líquido. Com isso o ar entra no secador quente e úmido e sai frio e seco.

2.6. Vazamentos nas redes e sistemas de ar comprimido

Todas as redes e sistemas de ar comprimido possuem vazamentos, onde são comuns perdas de até 40% de todo o ar comprimido produzido. Assim, identificar, eliminar e reduzir os vazamentos é uma das maneiras mais simples e eficientes de economizar a energia necessária para a compressão do ar. (PROCEL, 2009).

Quando ocorre à união de vazamentos e a má utilização do ar comprimido, certamente o sistema se torna ineficaz, como consequência a vazão solicitada à geração de ar comprimido aumenta de maneira elevada, diminuindo a pressão da rede. Caso existam mais compressores, os mesmos entrarão em operação para que a rede permaneça no nível de pressão necessário. Se a sala de compressores não estiver dimensionada para uma sobre demanda, os compressores ali existentes passarão a operar continuamente, fato que irá contribuir para o consumo elevado de energia elétrica.

“Embora não seja impossível acabar com todos os vazamentos de um sistema, estes não devem passar de 5% da capacidade instalada. Os vazamentos de ar são proporcionais ao quadrado do diâmetro do furo e crescem com a elevação da pressão do sistema” (KARMOUCHE, 2009).

Para uma melhor análise das perdas causadas por vazamentos, é apresentada a Tabela 1, que relaciona a potência perdida em vazamentos (entre 1 a 10 mm) e vazão para um sistema, considerando pressão interna do sistema de 6,0 Bar:

Tabela 1 - Perdas de vazão e potências de vazamentos de ar comprimido

Diâmetro do orifício (mm)	Vazamento de ar (m ³ /min)	Potência de compressão (kW)	Consumo mensal de energia (kWh)
1	0,06	0,3	216
3	0,6	3,1	2.232
5	1,62	8,3	5.976
10	6,3	33	23.760

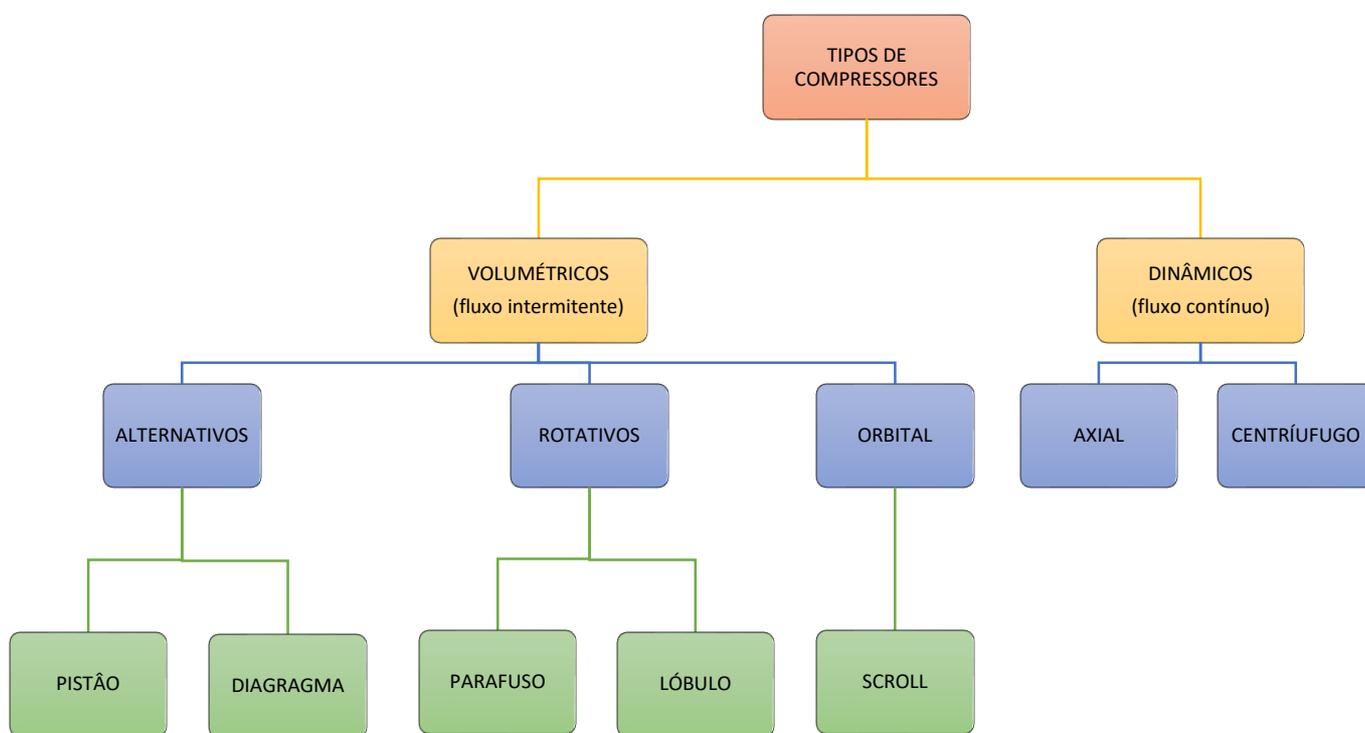
Fonte: Adaptado Cal Vazão (2019) Rocha e Monteiro (2005)

2.7. Introdução aos compressores de ar

Os compressores de ar são equipamentos destinados a elevar a pressão de um certo volume de ar admitido nas condições atmosféricas, até uma determinada pressão exigida na execução do trabalho a ser realizado pelo ar comprimido. O ar comprimido executa este trabalho, seja por expansão ou por aplicação direta do mesmo.

Existem vários tipos de compressores, que podem ser classificados de acordo com a forma construtiva: rotativo, alternativo, orbital, axial e centrífugo. A Figura 3 apresenta a classificação dos compressores.

Figura 3 - Classificação dos compressores



Fonte: O Autor (2022)

Conforme a Figura 3, existem muitos tipos e classificações de compressores de ar, sendo que neste trabalho foi utilizado compressor volumétrico alternativo à pistão, para o qual será dado maior ênfase.

2.7.1 Compressores de deslocamento dinâmico

A alta pressão é obtida pelo aumento de energia cinética com a passagem do gás por difusores, palhetas, hélices ou rotores de máquinas. Principais tipos: Axial e Centrifugo (Radial).

Os compressores dinâmicos, ou turbo-compressores, operam por meio da elevação da pressão, assim obtida pela conversão da energia cinética em pressão na passagem do ar pelo equipamento. São baseados exclusivamente no princípio rotacional de trabalho. Realizam o processo de compressão de forma contínua, portanto correspondem exatamente ao que se denomina, em termodinâmica, um volume de controle (CONSUAR, 2022).

2.7.2 Compressores de deslocamento volumétrico

O aumento da pressão é conseguido por rápidas e sucessivas reduções de volume do gás aspirado e comprimido através de elementos móveis, onde destacam os seguintes: Rotativos e Alternativos.

Um compressor de deslocamento volumétrico é um equipamento no qual uma certa quantidade de ar ou gás ocupa um determinado espaço, que é reduzido mecanicamente, resultando em um aumento de pressão. Os vários tipos de compressores, recíprocos ou rotativos conseguem isso através de diferentes estratégias (ROLLINS, 2004).

2.7.3 Compressor de ar volumétrico à pistão - Alternativo

A compressão é realizada através do movimento alternativo dos pistão, este utiliza o sistema biela-manivela para conversão do movimento rotativo de um eixo virabrequim, em movimento translacional de um pistão ou embolo, desta forma conforme o movimento de rotação do acionador (virabrequim), o pistão efetua o percurso de ida e volta na direção do cabeçote, configurando o ciclo de operação.

Existe uma grande variação nos compressores recíprocos, quanto a sua forma construtiva. Há compressores nos quais o bloco compressor é acionado diretamente pelo eixo do motor através do virabrequim, esses denominados moto-compressores, como existem também aqueles em que o funcionamento se dá através de uma correia que liga a polia fixada no eixo do motor ao volante fixado no eixo do bloco compressor.

O conjunto é acionado normalmente por um motor elétrico e este transmite através da polia, correia e volante, rotação ao virabrequim do bloco compressor.

A biela ligada ao virabrequim proporciona um movimento alternado de sobe e desce do pistão, mencionado anteriormente.

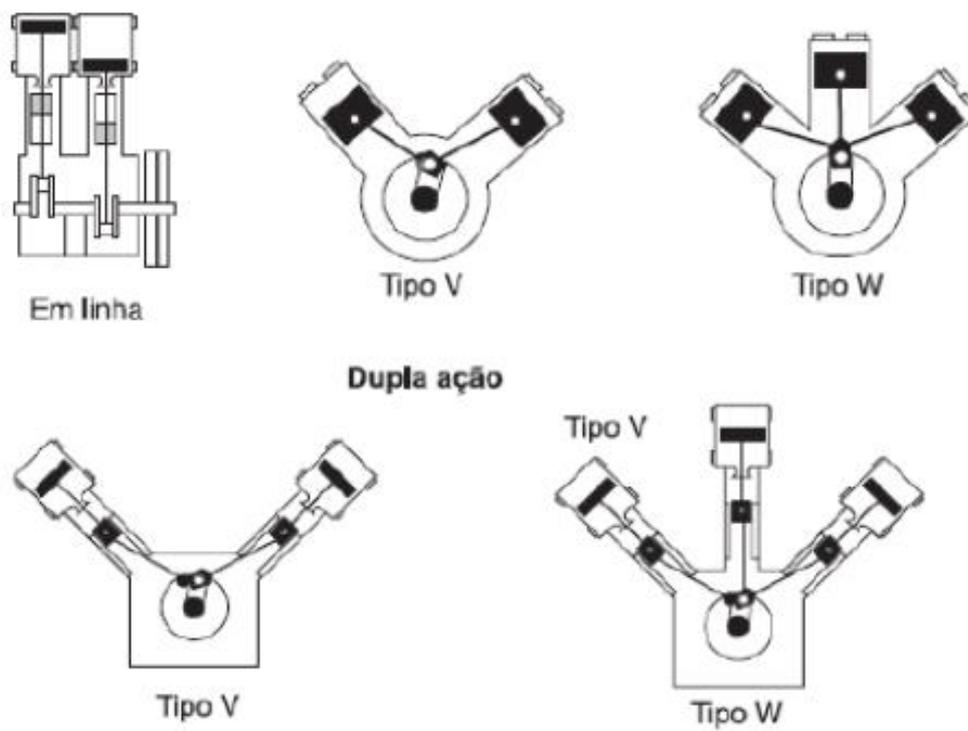
Quando o pistão desce, ocorre uma depressão no interior do cilindro, fazendo com que o ar seja admitido pela válvula de sucção pôr ação da pressão atmosférica. No momento que o pistão atingir o ponto mais baixo dentro do cilindro, denominado ponto morto inferior (PMI), a pressão interna é igual a pressão externa (pressão atmosférica) e a válvula de sucção se fecha.

A compressão do ar tem início com o movimento de subida do pistão. Após obter-se uma pressão suficiente para abrir a válvula de descarga, o ar é descarregado para o reservatório ou para a rede através da serpentina.

Esses compressores podem ser constituídos com mais de um cilindro e pistões, denominados de efeito simples ou dupla ação. Quando possuem mais de um cilindro, os mesmo podem estar dispostos nas mais variadas maneiras, por exemplo: em Linha (L), V ou W, conforme mostra a Figura 4.

- I. Simples efeito ou simples ação: Cilindro possui uma única câmara de compressão, onde em cada revolução do virabrequim há uma sucção e uma compressão;
- II. Duplo efeito ou dupla ação: quando o cilindro é dividido em duas câmaras separadas pelo pistão, sendo que em uma face do cilindro há uma compressão, enquanto da outra, há uma sucção, de forma que em cada revolução do virabrequim ocorre duas sucções e duas descargas.

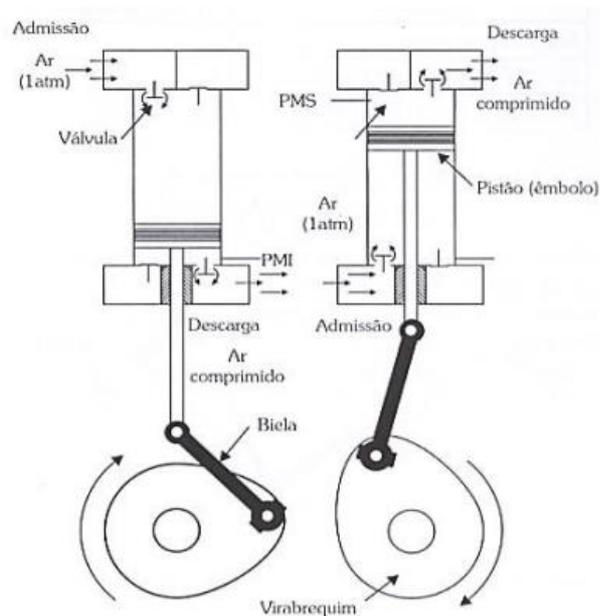
Figura 4 - Tipos de compressores de pistão



Fonte: Adaptado (Rocha e Monteiro, 2005)

A Figura 5 apresenta esquema explicativo do processo de admissão e descarga do compressor alternativo de dupla ação.

Figura 5 - Admissão e descarga de um compressor de dupla ação



Fonte: Fialho (2006)

Os compressores alternativos (pistão) de um estágio são usados em sistemas de ar comprimido de pequeno porte. Normalmente utilizados em oficinas mecânicas, marcenarias e também em equipamentos de construção civil acionados por ar comprimido (como grampeadores pneumáticos). A Figura 6 apresenta um compressor alternativo de pistão, modelo comercial.

Figura 6 Compressor alternativo de pistão



Fonte: Wayne (2022)

Como o compressor de ar é uma máquina dinâmica, onde qualquer alteração nas condições operacionais pode afetar o funcionamento do mesmo. O movimento de rotação é uma das características mais importantes, pois está diretamente relacionada à vazão proporcionada pelo compressor. Pode-se destacar outros fatores que afetam o desempenho: pressão de operação, temperatura do ambiente (admissão) e temperatura de descarga, composição do ar atmosférico, óleo lubrificante (quando esse existir), projeto mecânico, por exemplo da tubulação de admissão e descarga, curso dos pistões, projeto das válvulas e das placas de válvulas, etc.

Uma característica que será amplamente abordada durante a parte de testes e ensaios nesse trabalho, é a questão da velocidade de operação do bloco compressor.

2.8 O motor elétrico como fonte motriz em compressores

O motor elétrico é a máquina destinada a transformar energia elétrica em energia mecânica. O motor de indução é o mais utilizado de todos os tipos de motores, destacando o baixo custo, a facilidade de transporte, estrutura para limpeza, simplicidade de acionamento, além de possuir uma construção simples e grande versatilidade de adaptação as cargas dos mais diversos tipos e melhores rendimentos. Os tipos mais comuns são:

- I. Motores de corrente contínua: São motores de custo mais elevado e, além disso, precisam de uma fonte de corrente contínua, ou de um dispositivo que converta a corrente alternada da rede em contínua. Podem funcionar com velocidade ajustável entre amplos limites e se prestam a controles de grande flexibilidade e precisão. Por isso, seu uso é restrito a casos especiais em que estas exigências compensam o custo muito mais alto.

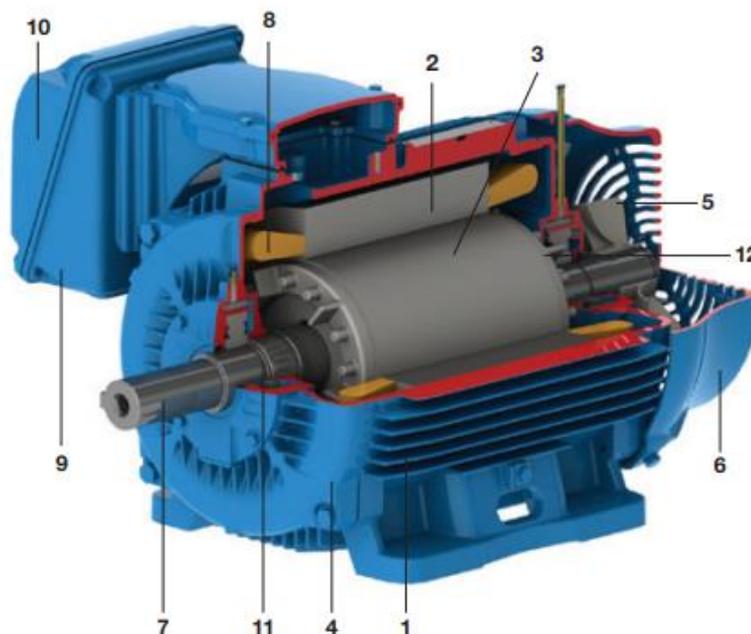
- II. Motores de corrente alternada: São os mais utilizados porque a distribuição de energia elétrica é feita normalmente em corrente alternada. Os principais tipos são:
 - Motor síncrono: Funciona com velocidade fixa; utilizado somente para grandes potências (devido ao seu alto custo em tamanhos menores) ou quando se necessita de velocidade invariável.
 - Motor de indução: Funciona normalmente com uma velocidade constante, que varia ligeiramente com a carga mecânica aplicada a eixo. Devido a sua grande simplicidade, robustez e baixo custo é o motor mais utilizado de todos, sendo adequado para quase todos os tipos de máquinas, encontradas na prática. Atualmente, é possível o controle da velocidade dos motores de indução com o auxílio de inversores de frequência. (WEG, 2022).

A Figura 7 mostra um motor de indução trifásico, de rotor gaiola de esquilo em corte, sendo que o mesmo é composto basicamente por duas partes: estator e rotor.

Os principais componentes e suas características são:

- Carcaça (1): estrutura suporte do conjunto de construção robusta, podendo ser em ferro fundido, aço ou alumínio injetado e normalmente com aletas (característica que auxilia na refrigeração);
- Núcleo de chapas do estator (2): são de aço magnético;
- Enrolamento trifásico (8): três conjuntos iguais de bobinas, uma para cada fase (R, S, T), formando um sistema trifásico equilibrado ligado à rede trifásica de alimentação;
- Eixo (7): elemento que transmite a potência mecânica desenvolvida pelo motor;
- Núcleo de chapas (3): possuem as mesmas características das chapas do estator;
- Barras e anéis de curto-circuito (12): normalmente são de alumínio injetado sob pressão numa única peça;
- Tampa dianteira (4);
- Ventilador (5);
- Tampa traseira/defletora (6);
- Caixa de ligação (9) e terminais - contidos na caixa de ligação (10);
- Rolamentos dos mancais (11).

Figura 7- Motor de indução trifásico gaiola de esquilo



Fonte: WEG (2022)

2.8.1 Velocidade Síncrona

Determinada pela velocidade de rotação do campo girante ou velocidade nominal, a qual depende do número de polos ($2p$) do motor e da frequência (f) da rede, em Hertz. Os enrolamentos das bobinas podem ser construídos com um ou mais pares de polos, que se distribuem alternadamente (um “norte” e um “sul”) ao longo da periferia do núcleo magnético. O campo girante percorre um par de polos (p) a cada ciclo (WEG, 2022). A velocidade síncrona (n_s) é dada pela equação (1):

(1)

$$n_s = \frac{120 * f}{p}$$

Onde:

$n_s =$ Rotação [rpm];

$f =$ Frequência da rede [Hz];

$p =$ Número de polos.

A Tabela 2 apresenta as velocidades síncronas, considerando as frequências e número de pólos mais utilizados, a velocidade (em rpm) é uma característica importante, que normalmente é apresentada na placa de identificação dos motores:

Tabela 2 - Velocidade síncrona motores

Nº de polos	Rotação síncrona por minuto	
	60 Hertz	50 Hertz
2	3600	3000
4	1800	1500
6	1200	1000
8	900	750
10	720	600

Fonte: Adaptado WEG (2022)

2.8.2 Escorregamento

No motor de indução trifásico assíncrono, o movimento do campo do estator é denominado como uma velocidade síncrona (n_s). Entretanto, o rotor acompanha esse movimento a uma velocidade assíncrona (n) normalmente inferior à velocidade síncrona.

Onde o escorregamento indica, em relação à velocidade síncrona, o movimento relativo entre o campo girante, com velocidade (n_s) e os enrolamentos do rotor, com velocidade (n). É como se o rotor escorregasse em relação ao movimento do campo girante do estator. Portanto a diferença entre a velocidade do motor (n) e a velocidade síncrona (n_s) chama-se escorregamento (S) segundo CHAPMAN (2013), dada pela seguinte equação (2):

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} * 100 \quad (2)$$

Onde:

$S =$ Escorregamento [%];

$n_s =$ Velocidade do campo girante [rpm];

$n =$ Rotação [rpm].

2.8.3 Velocidade nominal

A velocidade nominal (n) é caracterizada pela operação do motor à potência nominal, portanto com carga, sob tensão e frequência nominais, dependendo também do escorregamento e da velocidade síncrona. Sua relação é dada pela equação (3):

$$n = \frac{120 * f * (1 - S)}{p} \quad (3)$$

$n =$ Rotação [rpm];

$f =$ Frequência da rede [Hz];

$p =$ Número de polos;

$S =$ Escorregamento

2.8.4 Rendimento do motor

O rendimento (η) do motor elétrico é uma característica definida pelo fabricante, consequência do projeto e da tecnologia empregada. Os motores fabricados no Brasil seguem valores mínimos de rendimento, pré-estabelecidos em 2017 pelo Ministério de

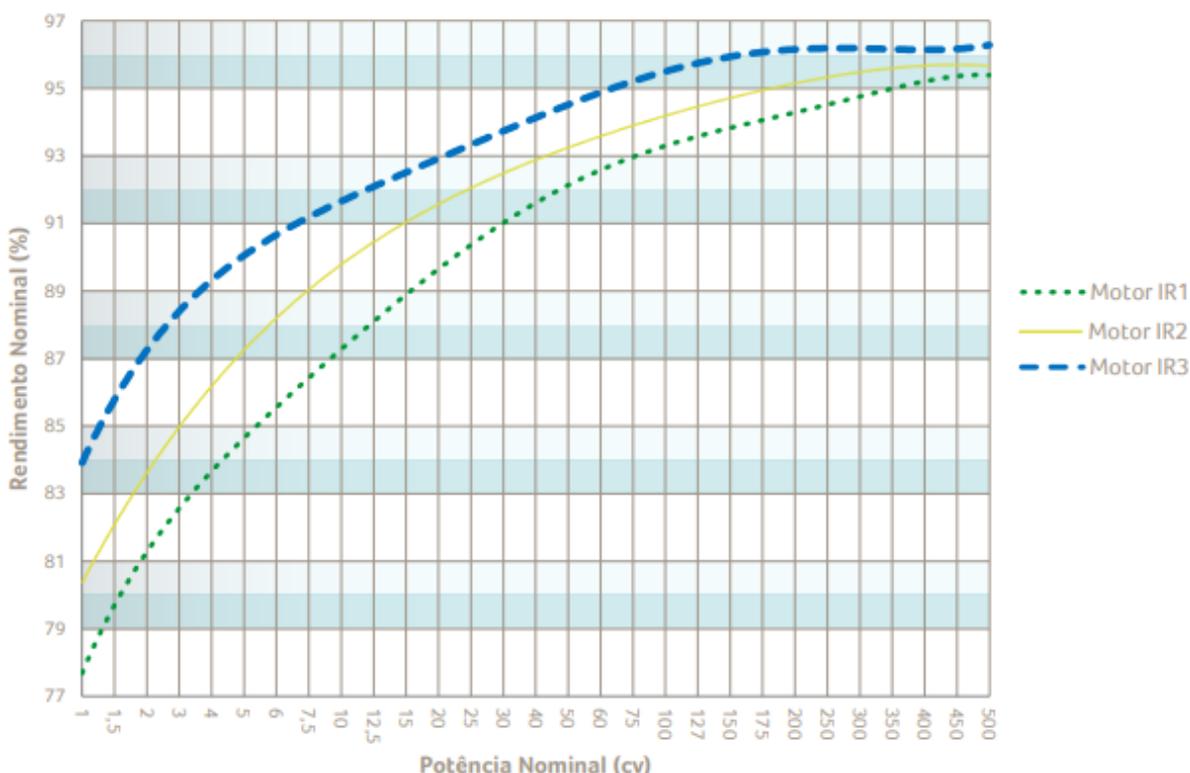
Minas e Energia, por meio da Portaria Interministerial Nº 1, de 29 junho de 2017. Segundo este documento o rendimento mínimo estabelecido para motores de indução com gaiola de esquilo passa a ser determinado pela classe IR3 ou Premium, onde consta uma relação com diversas potências (valores entre 0,16 a 500 cv) associadas à motores de 2, 4, 6 e 8 polos.

Os motores de indução são máquinas eficientes, porém “não basta simplesmente usar um motor elétrico dito de alto rendimento. É necessário usá-lo bem e da forma mais eficiente possível, procurando eliminar as principais causas de desperdício no seu uso” (PINTO Et al, 2009, P. 151).

Em condição normal de funcionamento, o motor deve ser adequado à carga, ou seja, deve operar entre 75 e 100% da potência nominal. O motor bem dimensionado proporcionará uma máxima economia de energia, permitindo obter elevados rendimentos (FREITAS, 2013).

A Figura 8 apresenta comparativo entre as curvas de rendimento nominal de motores padrão (IR1), de alto rendimento (IR2) e os denominados Premium (IR3), para modelos de 4 polos.

Figura 8 - Rendimento Nominal para Motores Padrão (IR1), de Alto Rendimento (IR2) e Premium (IR3), 4 Polos



Fonte: Eletrobrás (2016)

Ao realizar o comparativo entre os motores de alto rendimento e rendimento padrão pode se observar que as principais vantagens do motor de alto rendimento são: temperatura de operação menor, maior vida útil devido ao menor estresse térmico, maior fator de potência, maior tolerância a condições de alimentação adversas por trabalharem magneticamente menos saturados (FREITAS, SILVA, et al., 2008). O rendimento (η) é a relação entre a potência mecânica no eixo do motor e a potência elétrica ativa que ele consome da rede de alimentação. A mesma pode ser expressa na equação (4):

$$\eta = \frac{P_M}{P_{in}} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

η = Rendimento [%];

P_M = Potência mecânica (saída) [kW];

P_{in} = Potência elétrica (entrada) [kW].

Assim a Potência de entrada é igual a “Potência de saída + Perdas”. As perdas podem ser classificadas como:

- Perdas fixas: independente da carga, portanto são as perdas nos núcleos e mecânicas, como o atrito no movimento de rotação e ventilação;
- Perdas variáveis: que variam com o carregamento do motor, são as perdas nos enrolamentos do estator, do rotor e as perdas consideradas suplementares (como o mau acoplamento do eixo).

Assim, as perdas de um motor variam de acordo com a carga aplicada no mesmo. Contudo, o rendimento (η) pode ser expresso na equação (5).

$$\eta = \frac{(P_{in}) - (P_{perdas})}{(P_{in})} \times 100 \quad (5)$$

Onde:

η = Rendimento [%];

P_{in} = Potência de entrada [kW];

P_{perdas} = Somatório das perdas [kW].

2.9 Eficiência dos motores elétricos

Quando analisado o consumo de energia elétrica, o setor industrial brasileiro é responsável por 35,9% (BEN, 2020), sendo que os motores elétricos são responsáveis por aproximadamente 25% de toda a energia consumida no país.

Segundo dados da Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos (ABRAMAN, 2022) aponta-se para uma idade média de motores elétricos no Brasil da ordem de 20 anos, não sendo raro encontrar equipamentos com 30 anos ou mais ainda em operação.

Como os motores são componentes fundamentais das instalações industriais, como elementos importantíssimos em vários processos, considerando que são normalmente muito antigos, construídos com tecnologias e matérias primas ultrapassadas, apresentam baixos índices de rendimento, o que implica em um alto consumo de energia.

Além do fato anteriormente mencionado, existem outras causas para a baixa eficiência dos motores elétricos na indústria, como a falta de adequação do motor à carga, e o baixo rendimento provocado pelo tempo de uso. Nesse caso o problema é provocado por manutenções inadequadas ou realizadas continuamente ao longo de sua vida útil, como por exemplo, inúmeras rebobinagens.

2.9.1 Operação do motor elétrico e estudo da carga

Os motores operam como força motriz em várias aplicações na indústria, onde destaca-se por exemplo: compressores (tema deste estudo), motobombas, guindastes, pontes rolantes, esteiras, elevadores, cabines de pintura, entre outras.

Sabe-se que para cada carga acionada, é necessário conhecer principalmente o conjugado resistente (força necessária para girar um determinado objeto) ou torque requerido pela mesma, além de outras características como o ponto de uso, temperatura ambiente, condições de aplicação (local abrigado ou não), rotação em condições nominais, etc. Assim, a potência nominal da carga (P_c) segundo (WEG, 2022) é dada pela equação (6):

(6)

$$P_c = (2\pi) \times (n_c) \times (C_{cn})$$

Onde:

P_c = potência nominal da carga [kW];

n_c = rotação nominal da carga [rps];

C_{cn} = conjugado nominal da carga [Nm].

Considerando que a equação (6) só é verdadeira para cargas com acoplamento direto, a mesma considera que o conjugado requerido pela carga (C_n) é igual ao conjugado nominal do motor. Quando o acoplamento entre o motor e carga for com redução de velocidade, o conjugado requerido pela carga deve ser referenciado ao eixo do motor (WEG, 2022), conforme equação (7):

(7)

$$C_n = \left(\frac{1}{\eta_{ac}}\right) \times \left(\frac{n_c}{n}\right) \times (C_{cn})$$

Onde:

η_{ac} = Rendimento do acoplamento [%];

n_c = Rotação nominal da carga [rps];

n = Rotação nominal do motor [rps];

C_{cn} = Conjugado nominal da carga [Nm].

A Tabela 3 apresenta alguns tipos de acoplamentos mais utilizados e seus respectivos rendimentos.

Tabela 3 - Acoplamentos e seus rendimentos

Tipo de acoplamento	Faixa de rendimento [%]
Direto	100
Polia com correia plana	95 - 98
Polia com correia em "V"	97 - 99
Engrenagem	96 - 99
Roda dentada (correia)	97 - 98

Fonte: Adaptado WEG (2022)

Contudo pode-se definir o rendimento do acoplamento (η_{ac}) pela equação (8):

(8)

$$\eta_{ac} = \frac{P_c}{P_n}$$

Onde:

P_c = Potência transmitida à carga [kW];

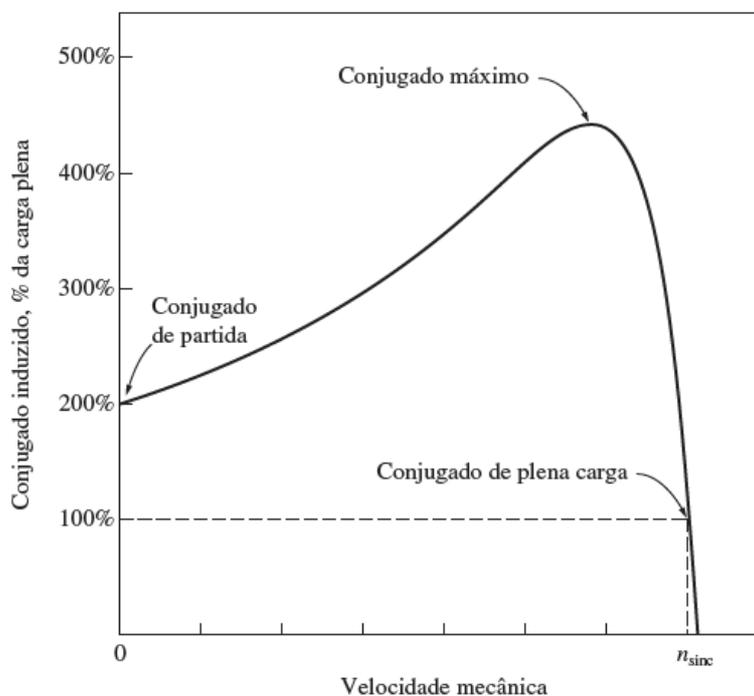
P_n = Potência nominal do motor [kW].

A Figura 9 apresenta a curva do conjugado induzido como uma porcentagem do conjugado de plena carga.

Considerando essa característica, observa-se algumas particularidades do comportamento do conjugado em um motor de indução; que o conjugado é nulo na velocidade síncrona e que há um conjugado máximo que não pode ser ultrapassado, com risco de dano ao motor.

Nota-se também que o conjugado de partida é maior que o de plena carga.

Figura 9 - Curva característica de conjugado x velocidade de um motor de indução



Fonte: Chapman (2013)

Já o conjugado resistente da carga (C_c) segundo (WEG, 2022), é o conjugado requerido pela carga, assim depende do tipo de carga a ser acionada pelo motor, podendo ser representado pela equação (9):

(9)

$$C_c = (C_o) + (K_c) x (n^x)$$

Onde:

C_c = Conjugado resistente da carga [Nm];

C_o = Conjugado da carga para rotação zero [Nm];

K_c = Constante que depende da carga.

n = Velocidade angular [rps].

x = Parâmetro que depende da carga.

Portanto o conjugado da carga varia de acordo com a rotação “ η ” e o parâmetro “ x ”. A Tabela 4 mostra a relação entre os modelos de carga e suas funções matemáticas.

Tabela 4 - Conjugado da carga e suas funções matemáticas

Conjugado carga	Função matemática	Exemplos de aplicação
Constante	$C_c = (C_o) + (K_c)$	Talhas, bombas à pistão.
Linear	$C_c = (C_o) + (K_c) x (\eta)$	Compressor de pistão, calandras, bombas de vácuo.
Quadrático	$C_c = (C_o) + (K_c) x (\eta^1)$	Compressor centrifugo, ventiladores.
Hiperbólico	$C_c = (C_o) + (K_c) x (\eta^2)$	Bobinadeira de fios, de papel, tornos.

Fonte: O Autor (2022)

2.9.2 Fonte motriz aplicada nos compressores alternativos de pistão

Os compressores alternativos de pistão, possuem ciclo de operação intermitente, normalmente trabalham um período em carga e em outro em alívio ou desligado, e conforme sua regulação mantem o sistema ou rede com ar comprimido estável quando dimensionados adequadamente (demanda x vazão do equipamento). Caso o ciclo de operação do compressor seja muito elevado, há uma grande

probabilidade de danificar o motor, principalmente por sobreaquecimento, falhas nos mancais, entre outras.

Outra particularidade pertinente a esse tipo de equipamento é o seu conjugado de partida, podendo tornar-se um problema quando aplicadas as formas de acionamento tradicionais, tais como: PD (partida direta) ou YD (partida estrela triângulo).

2.10 Tipos de acionamentos elétricos utilizados

2.10.1 Partida direta

Considerada a maneira mais simples de partir um motor de indução. Para esse modelo de acionamento, o motor parte com valores de conjugado (torque) e corrente de partida plenos, pois as bobinas recebem tensão nominal diretamente nos terminais de ligação do motor. Normalmente, o motor é ligado diretamente através de um contator, entretanto apesar da simplicidade e do baixo custo, deve-se observar que para este tipo de partida existem restrições de utilização, pois a corrente de partida de um motor de indução quando ligado diretamente à tensão da rede é normalmente de sete a oito vezes maior que a corrente nominal (informação contida na placa de identificação no motor), provocando principalmente queda de tensão no sistema de alimentação. Outro problema é a necessidade de sobredimensionar os cabos elétricos, contadores e disjuntores da instalação para suportar o pico de corrente e evitar um afundamento de tensão ainda maior.

Assim por restrições das concessionárias de energia brasileiras, que atribuem limites de potência (demanda) e queda de tensão, não é possível aplicar esse modelo de partida para motores de grande porte, limitada na maioria dos casos em 7,5 cv.

2.10.2 Partida estrela-triângulo

Modelo de acionamento que permite a alimentação do motor com redução de tensão nas bobinas durante a partida.

No momento da partida executa-se a ligação estrela (contadores K1 e K3) no motor, conforme Figura 10, onde o mesmo está apto a receber a maior tensão de conforme dados da placa de identificação e projeto, entretanto o motor é alimentado com a tensão de triângulo, ou seja a tensão da rede. De tal forma que o motor irá

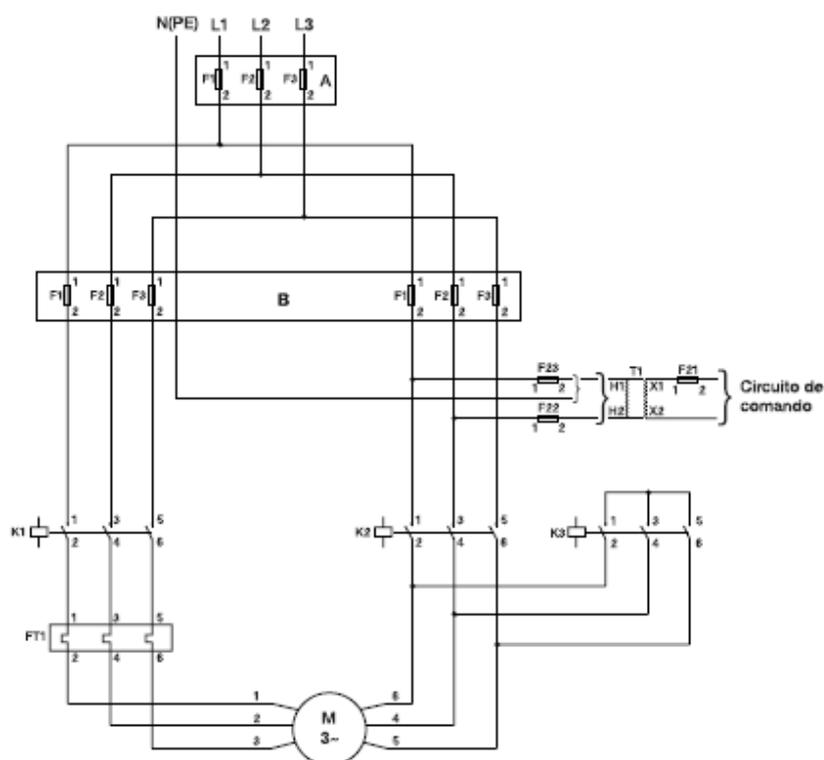
receber aproximadamente 58% ($1/\sqrt{3}$) da tensão que deveria receber. Após o período da partida, o motor deve ser ligado em triângulo (contatores K1 e K2) da Figura 10, assim as bobinas passam a receber a tensão nominal da rede.

Tal modelo de acionamento proporciona redução de corrente de partida para 33% de seu valor comparado com a PD (WEG, 2022).

Este tipo de partida é normalmente aplicado em motores cujo conjugado resistente de partida equivale a no máximo 1/3 do conjugado de partida do motor, sendo que isso normalmente acontece na partida de máquinas a vazio ou com pouca carga. Somente após ter atingido aproximadamente 90% da rotação nominal, a carga poderá ser aplicada.

O conjugado resistente da carga não deve ultrapassar o conjugado de partida do motor, nem a corrente no instante da comutação deve atingir valores inaceitáveis (elevados), pois neste caso aquela redução de corrente do primeiro instante da partida não ocorrerá no segundo momento. É importante para a partida estrela-triângulo que o motor tenha possibilidade de ligação em dupla tensão, (220/380V, 380/660V, 440/760V) e que a menor tensão coincida com a tensão da rede; normalmente para esse modelo de ligação, os motores possuem no mínimo seis cabos de ligação.

Figura 10 - Partida estrela-triângulo – circuito de força



Fonte: WEG (2022)

2.10.3 Partida *soft starter*

Equipamento eletrônico conhecido como *soft starter* é uma chave de partida construída através de um circuito eletrônico junto a um microprocessador que controla um conjunto de tiristores (SCR's) responsáveis pelo ajuste da tensão aplicada aos terminais do motor e conseqüentemente, através desses ajustes acessíveis, pode-se controlar o torque e a corrente de partida.

A chave *soft starter* é um tipo de “gradador” trifásico; gradadores são conversores estáticos que ter como função variar a tensão alternada eficaz. A carga é colocada diretamente em contato com a fonte, sem um tratamento intermediário de energia (BARBI I, 2000).

As chaves de partidas estáticas (*soft starter*) são chaves microprocessadas desenvolvidas para acelerar ou desacelerar e proteger os motores elétricos durante seu período partida, operação e parada. O controle de acionamento é feito através do ajuste de ângulo de disparo dos tiristores, assim controla-se a tensão aplicada no motor. Com o dimensionamento correto das variáveis, o torque e a corrente são ajustados de acordo com as necessidades das cargas (WEG, 2022).

As vantagens das chaves *soft starter* são:

- Partida e parada suave de motores assíncronos trifásicos;
- Reduz o pico de corrente de partida, diminuindo a carga no sistema elétrico;
- Evita grandes flutuações de tensão de linha;
- Aumento da vida útil de todo o sistema;
- Ajuste da tensão de partida por um tempo pré-definido;
- Pulso de tensão na partida para cargas com alto conjugado da partida;
- Proteções contra falta de fase, sobrecorrentes, subcorrentes, etc.

2.10.4 Partida com inversor de frequência

O inversor ou conversor de frequência é um dispositivo eletrônico que permite controlar a velocidade do motor elétrico de indução.

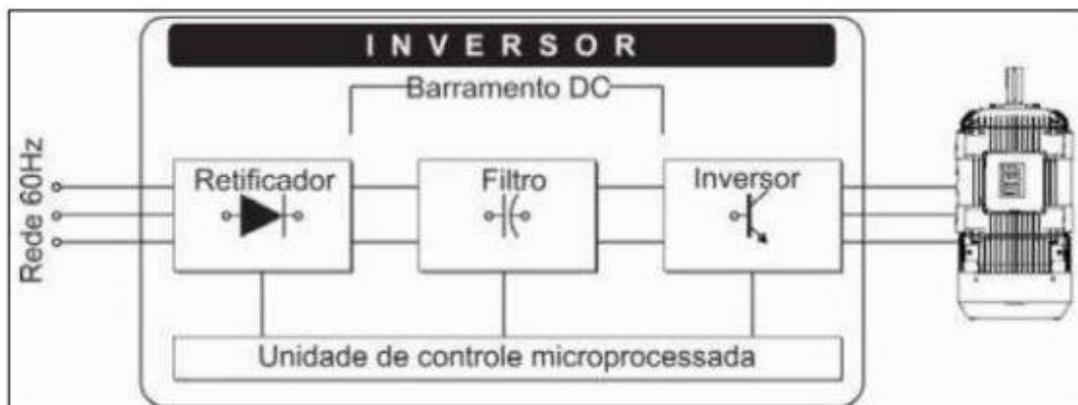
Projetado para variação contínua de velocidade, proporciona uma economia de energia melhorando o desempenho de máquinas e equipamentos, devido ao controle

da velocidade nos processos com redução de frequência e eliminação do pico de corrente na partida do motor (BRANDÃO ET AL, 2007).

Sua estrutura é constituída basicamente dos seguintes estágios: retificador, barramento CC com filtro capacitivo e inversor de tensão, apresentados no Figura 11.

- Ponte de diodos: Retificação (transformação CA – CC) da tensão proveniente da rede de alimentação;
- Filtro ou barramento CC: Regulação da tensão retificada com armazenamento de energia por meio de um banco de capacitores;
- Transistores IGBT: Inversão (transformação CC – CA) da tensão do barramento CC por meio de técnicas de modulação por largura de pulso (PWM). Este tipo de modulação permite a variação da tensão e da frequência de saída pela ação de transistores (WEG, 2022).

Figura 11 - Diagrama de blocos inversor de frequência



Fonte: Pinheiro (2015)

Dependendo da combinação de chaves abertas ou fechadas pode-se obter na saída do inversor, formas de onda diferentes. Estas chaves são implementadas nos inversores de frequência com dispositivos semicondutores chamados de transistores de potência. Os transistores mais frequentemente utilizados são os chamados IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) ou transistor bipolar de porta isolada (PINHEIRO, 2015).

2.11 Tipos de controle

Basicamente existem dois tipos de controle dos inversores de frequência:

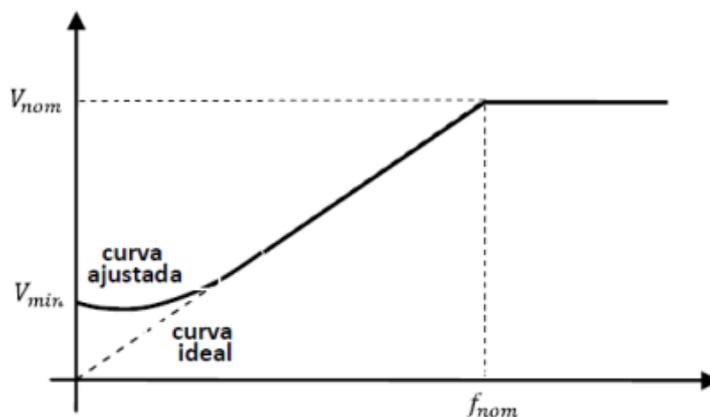
- Escalar (tensão/frequência).
- Vetorial;

Como o controle escalar é o tipo que mais se adequa à aplicação e controle de compressores e similares, pois proporciona correntes na carga menores que o modelo vetorial, assim optou-se apenas no estudo do modelo escalar.

2.11.1 Controle escalar

O controle escalar, também denominado V/f, impõe no motor uma determinada relação tensão/frequência, visando manter o fluxo magnético do motor aproximadamente constante. Este tipo de controle é aplicado quando não há necessidade de respostas rápidas aos comandos de torque e velocidade (FRANCHI, C. M, 2019); esse método de controle estará sendo aplicado na parte experimental.

Figura 12 - Curva tensão/frequência (V/f) do controle escalar



Fonte: Flores (2009)

Quando consideramos as condições de operação ideais, a variação da frequência neste modelo de controle é realizada linearmente até que seja obtida a tensão nominal do motor, entretanto, para frequências baixas, a curva é ajustada a fim de compensar a queda de tensão na impedância da estator, como indicado na Figura 12. Nota-se também na mesma figura, que é possível aumentar a frequência

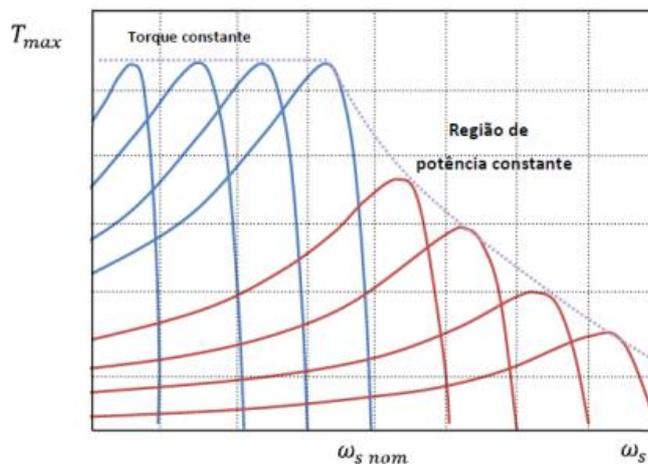
acima da frequência da rede, porém, a tensão não é aumentada acima da nominal; essa limitação de tensão pode ser tanto pelas características do motor (ou da carga) ou pela capacidade de fornecimento da rede.

No controle escalar, é possível obter uma precisão de velocidade de até 0,5% da rotação nominal do motor sem que haja variação na carga e de 3 a 5%, quando houver variação mecânica, de 0 a 100% do conjugado nominal (PAIXÃO, 2009, p. 41).

Quando a frequência do motor é maior que a nominal, o fluxo começa a diminuir e conseqüentemente o torque também começa a decrescer. Esta região é chamada de região de enfraquecimento de campo ou de potência constante, como pode ser observado na Figura 13.

Como há várias configurações em que a razão V/f é mantida constante, pois é viável operar com várias curvas para o torque, percebe-se que é possível mantê-lo constante em várias velocidades.

Figura 13 - Região de enfraquecimento de campo (torque x velocidade)



Fonte: Flores, 2009

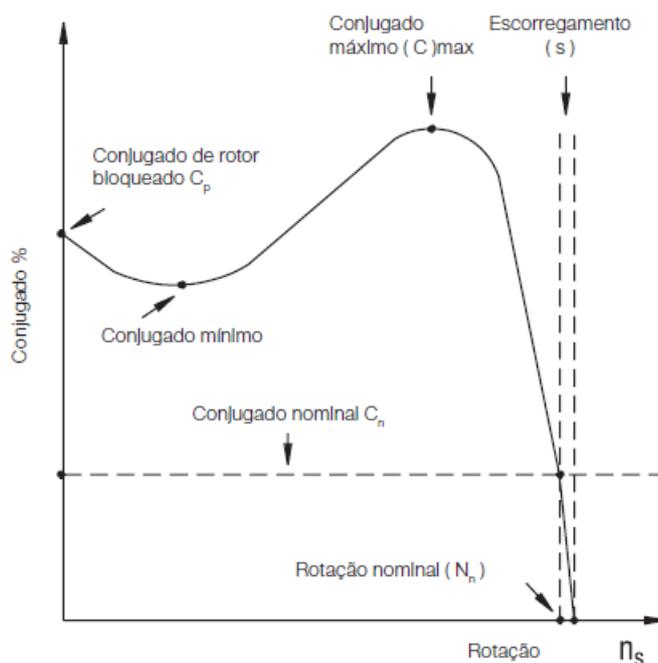
Uma situação importante, observada na Figura 14, é a flexibilidade de alto torque nas baixas velocidades, fato que ocorre também na velocidade inicial próximo a zero, constituindo na solução para problemas de partida que normalmente ocorrem quando o motor opera com frequência fixa.

O motor de indução tem conjugado igual a zero na velocidade síncrona. À medida que a carga aumenta, a rotação do motor vai diminuindo gradualmente, até

um ponto em que o conjugado atinge o valor máximo que o motor é capaz de desenvolver em rotação normal.

Caso o conjugado da carga aumente ainda mais, a rotação do motor cai bruscamente, podendo chegar a travar o rotor (WEG, 2022).

Figura 14 - Curva conjugado x rotação



Fonte: WEG (2022)

Iniciando com uma frequência baixa, onde gradativamente é aumentada, a velocidade de escorregamento do rotor é sempre pequena, pois o rotor opera na condição ideal para produção de torque, evitando os problemas do alto escorregamento, onde há baixo torque e alta corrente, como no caso da partida na frequência da rede.

Destaca-se que o controle é realizado em malha aberta e a precisão da velocidade é função do escorregamento do motor, que varia em função da carga, já que a frequência no estator é imposta (FRANCHI, 2008).

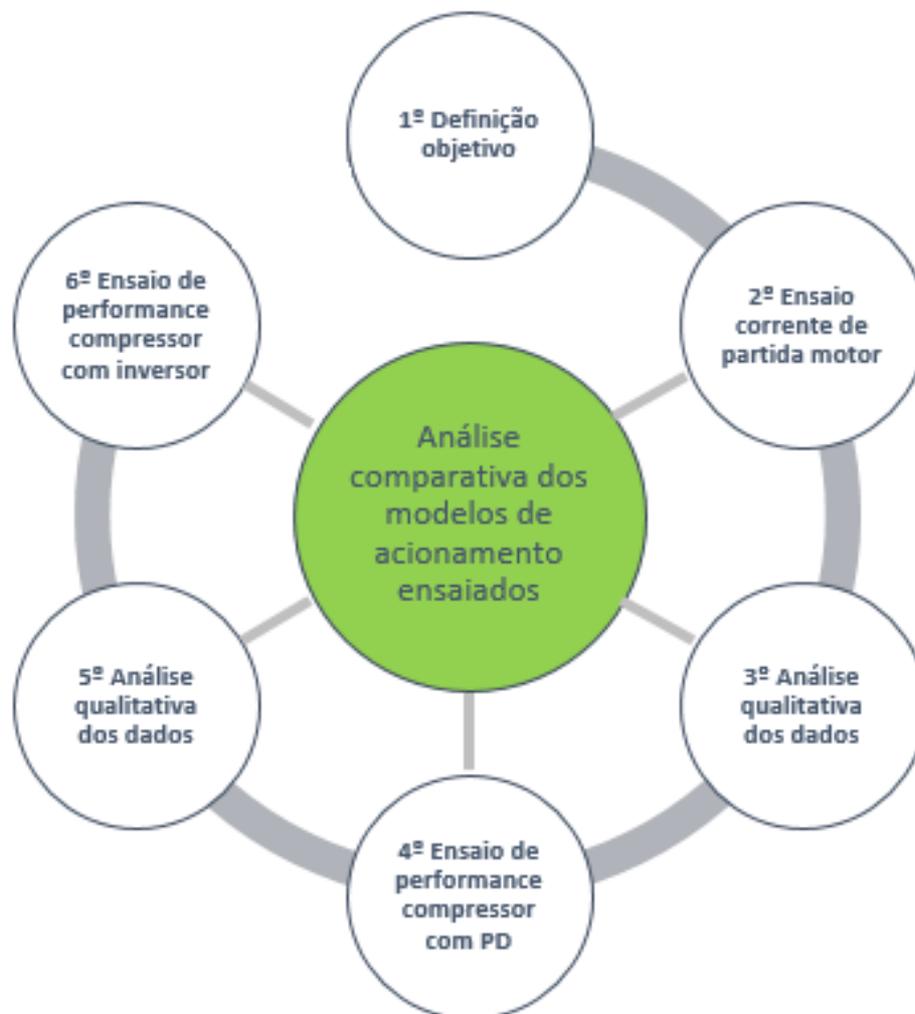
Com a utilização dos inversores é possível regular o motor na condição de operação desejada. Se um motor que não é alimentado por meio de um inversor de frequência fosse simplesmente ligado à rede elétrica, o mesmo não seria controlável pois estaria operando sempre nas condições nominais, em 50 ou 60Hz. Quando o motor opera abaixo das condições nominais, destaca-se o fato de deixar de utilizar a potência máxima e passará a usar uma potência ideal para cada condição de trabalho, ou aplicação, evitando-se desperdícios. (TEIXEIRA, 2012).

3 DESENVOLVIMENTO

Esse objeto de estudo tem como escopo a apresentação da metodologia empregada na parte experimental, simulações e ensaios efetuadas com protótipo de compressor alternativo de pistão + diversos acionamentos elétricos, baseada em dados adquiridos em laboratório, contemplando à uma base teórica visando explicar os resultados alcançados.

A Figura 15 apresenta fluxograma das etapas adotadas para obter os resultados finais.

Figura 15 - Fluxograma das etapas empregadas no estudo



Fonte: O Autor (2022)

Como principal objetivo a apresentação dos resultados experimentais de testes realizados com diferentes modelos de acionamentos elétricos, indicando:

- Análise da corrente de partida;
- Verificação da dinâmica de operação do compressor de pistão durante o funcionamento, analisando o consumo de energia;
- Oportunidades em ganhos energéticos e seus benefícios;
- Apresentação dos resultados obtidos com os testes realizados com inversor de frequência (comparativo da curva de consumo de energia);
- Análise da potência consumida entre os modelos de apresentados, partida com inversor de frequência e a partida direta;
- Verificação da viabilidade econômica da solução proposta.

Iniciou-se com a análise dos dados obtidos através dos ensaios da corrente de partida do motor trifásico aplicado em compressor alternativo de pistão isento de óleo. Com a finalidade de avaliar qual o tipo de acionamento aplicado no compressor apresenta um melhor desempenho, quando considerando o aspecto da corrente de partida, dado importantíssimo para avaliar a eficiência energética do conjunto. Esse por sua vez com potência nominal de 10 cv, deslocamento teórico de 40 PCM (Pés cúbicos por minuto), pressão de operação entre 5,5 a 8,3 Bar, montado sob reservatório de 417 litros.

Os resultados foram obtidos com o auxílio de osciloscópio digital de 4 canais, 200 MHz, modelo TDS2024C e da ponta de prova de corrente AC, modelo A621, com escala de medição de 100 mA a 2000 A pico, além de sinal de saída selecionável de 1mV/A, 10mV/A ou 100mV/A, ambos da TEKTRONIX.

Para análise dos dados obtidos através dos ensaios realizados, serão apresentadas as formas de onda da corrente elétrica em cada tipo de acionamento estudado, avaliando portanto os desempenhos. Assim é possível observar as diferenças entre as diversas formas de acionamentos elétricos, e criar uma interconexão com a teoria estudada.

A segunda etapa dos ensaios, foi realizada por meio de teste de performance do compressor acionado com Partida Direta. O teste de performance consiste em avaliar os seguintes dados gerais obtidos por meio de seus respectivos instrumentos de análise e leitura:

- Variáveis elétricas (tensão, corrente, fator de potência, potência, frequência), obtidas via analisador de energia da empresa Yokogawa, modelo “*Clamp-on Power Analyzer CW240*”, exposto no Anexo A;
- Pressão de operação do compressor (aplicando manômetro de precisão calibrado);
- Vazão do ar comprimido (via rotâmetros calibrados);
- Temperatura em inúmeras partes do compressor (termopares tipo T e J).

A partir desses resultados é possível avaliar o comportamento mecânico e elétrico e compará-los com os bancos de dados existentes, que são disponibilizados pelo fabricante do compressor e assim entender todo o processo de operação e compressão, buscando visualizar uma dinâmica que permita minimizar o consumo de energia elétrica e identificando possíveis oportunidades de elevar a eficiência do conjunto.

Na terceira etapa proposta foram realizados ensaios utilizando o acionamento por inversor de frequência, bem como foi realizando o mesmo teste de performance da etapa anterior. Entretanto, foram realizados alguns ajustes na dinâmica de operação, em determinadas faixas de frequência e pressões, pois assim há possibilidade de determinar a faixa de consumo de energia ideal, considerando uma relação de compressão (vazão) e frequência do motor (velocidade), e conseqüentemente determinar o ponto ideal de operação do motor considerando a carga aplicada.

De posse dos resultados é possível elaborar uma análise comparativa entre a frequência e o desempenho ideal, bem como com o desempenho a partir do acionamento direto na frequência da rede elétrica, nesse caso 60Hz, expondo gráficos que incluam a economia de energia e a performance na geração de ar comprimido.

Finalizando, será apresentado comparativo entre o acionamento do tipo velocidade variável e o modelo de velocidade constante, com a finalidade de expor as diferenças de consumo energético, de compressão (produção ar comprimido), onde pode-se analisar tecnicamente a forma de acionamento proposta na aplicação final.

Os dados levantados, os estudos realizados, bem como as análises efetuadas tem por objetivo estimar a possível economia de energia através da solução proposta.

Serão apresentados estudos de viabilidade econômica do acionamento com inversor de frequência, na qual a solução poderá a ser implantada em diversas situações similares (compressores a pistão) considerando cada dinâmica de operação.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O compressor alternativo de pistão utilizado para realização dos ensaios foi do tipo isento de óleo, aplicado normalmente em hospitais, clínicas médicas e odontológicas, apresenta as seguintes características:

- Deslocamento teórico/vazão: 40 PCM (Pés cúbicos por minuto, na qual 1 PCM representa 28,32 litros por minuto);
- Pressão de operação: de 5,5 à 8,3 Bar ou 80 à 120 Psi;
- Potência do motor elétrico trifásico: 10 cv (7,5 kW);
- Bloco compressor: 3 cilindro em “W”;
- Reservatório de ar: 417 litros.

As formas de onda apresentadas para a corrente de partida são provenientes dos ensaios contidos no banco de dados da Schulz Compressores S.A.

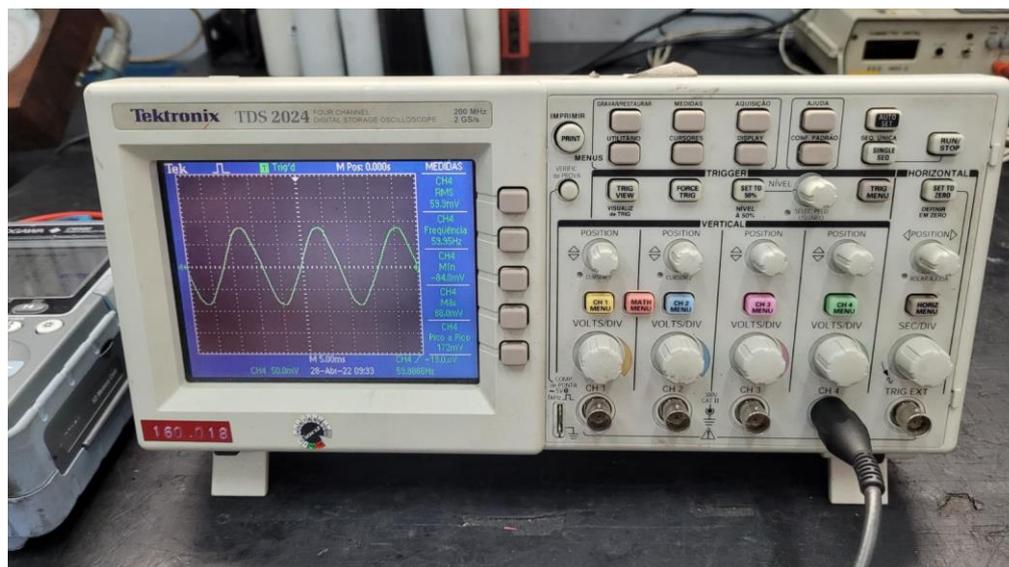
Para os ensaios denominados como performance são expostas várias curvas que relacionarão a produção de ar comprimido com a potência elétrica instantânea consumida, com a intenção de ratificar o método de operação do compressor envolvido, denominada dinâmica de trabalho, avaliando de tal maneira o consumo de energia.

4.1. Ensaio corrente de partida

Com a utilização do osciloscópio, este por sua vez conectado na alimentação do motor elétrico trifásico aplicado no compressor, foi possível extrair os dados da corrente de partida em três ocasiões diferentes (tipos de acionamento), são elas: partida direta, estrela-triângulo e com inversor de frequência.

Nas seções posteriores serão apresentadas as imagens de tela capturadas pelo osciloscópio da Figura 16.

Figura 16 - Osciloscópio Tektronix aplicado nos ensaios



Fonte: O Autor (2022)

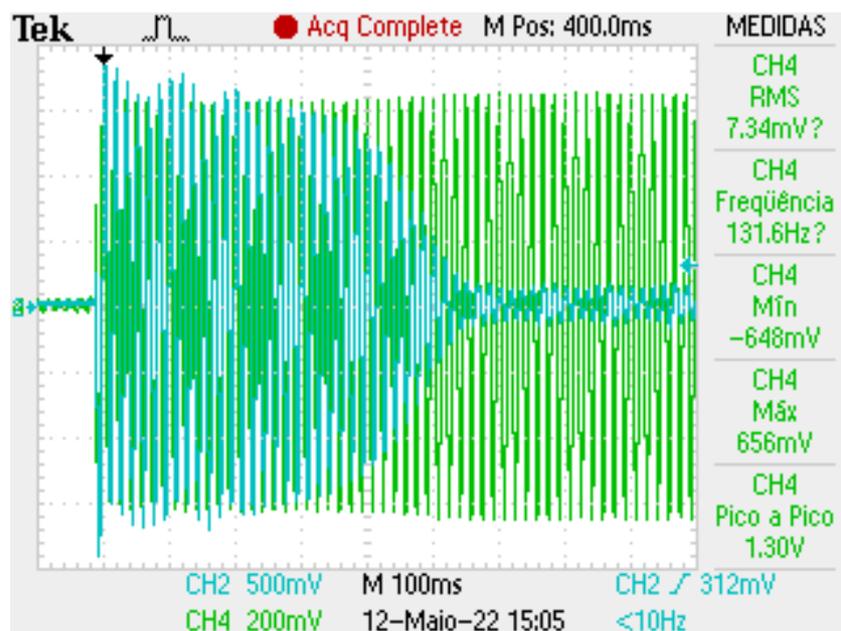
4.1.1. Ensaio com acionamento do tipo partida direta

Inicialmente optou-se na realização do ensaio de partida direta, com pressão nominal no sistema (em carga), portanto sem alívio, na qual o compressor estava próximo a pressão de desligamento, portanto 8,3 Bar ou 120 Psi, pois caso o sistema estivesse em alívio (sem carga), a partida do motor seria facilitada.

Independentemente do modelo de compressor, geralmente eles operam com ciclos distintos, denominados carga/alívio de maneira contínua; assim quando atingem a pressão mínima determinada em projeto, nesse caso 5,5 Bar, entram em carga, produzindo ar comprimido. Quando o compressor alcança a pressão máxima determinada (8,3 Bar) este passa a trabalhar em alívio, condição em que uma válvula mecânica é acionada e o ar comprimido é eliminado para a atmosfera, como um *by-pass*, não sendo descarregado para a rede local, ressalta-se que neste caso o compressor se mantém em operação com o motor em funcionamento, portanto consumido energia.

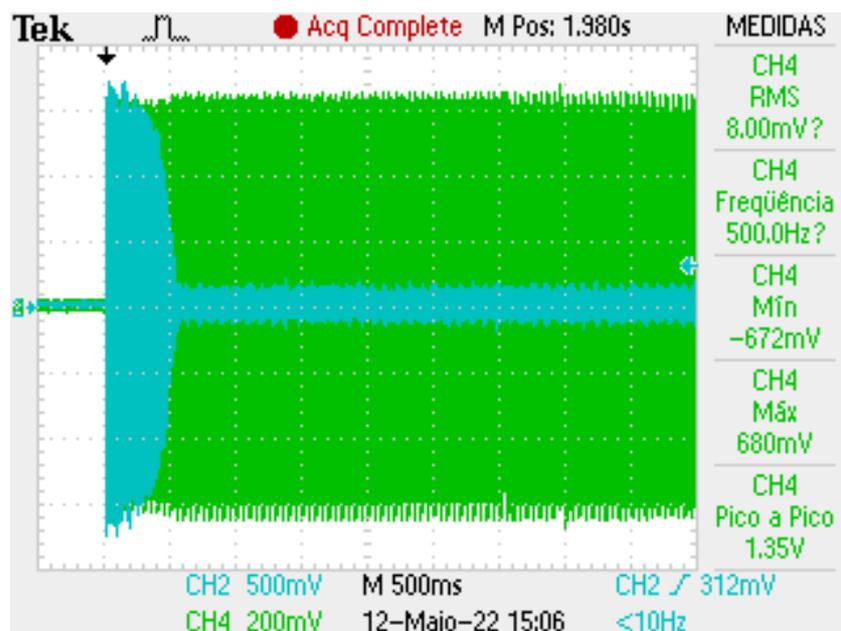
O comportamento da corrente de partida para o sistema mencionado anteriormente, partida direta sem o alívio mecânico da pressão do conjunto, está apresentado na Figura 17 para período de 100 ms e na Figura 18 para 500 ms, onde o “Canal 04” (verde) representa a tensão da rede [V], alimentação do motor; e o “Canal 02” (azul) a corrente elétrica [A]. Para as Figura 17 e 18 considerar a escala de corrente de 50A/DIV.

Figura 17- Corrente de partida com acionamento tipo PD 100 ms– sem alívio



Fonte: O Autor (2022)

Figura 18 - Corrente de partida com acionamento tipo PD 500 ms– sem alívio



Fonte: O Autor (2022)

Analisando as Figuras 17 e 18, nota-se que a forma de onda da corrente apresenta um pico de aproximadamente de 7 a 8 vezes maior que a corrente nominal do motor durante os 400 ms iniciais; e após 550 ms a corrente está próxima a nominal da aplicação algo próxima a 19,0A. Apesar de ser simples e ter o custo reduzido, o fato é que o problema desse modelo de acionamento elétrico está na forma de onda apresentada, pois a alta corrente de partida, próxima a 8x a nominal do motor, precisa

ser suportada pela infraestrutura elétrica para energização do compressor, sendo portanto necessário sobredimensionar a instalação elétrica como um todo, desde cabos, contadores, fusíveis, disjuntores entre outros componentes, tornando conseqüentemente o custo final elevado.

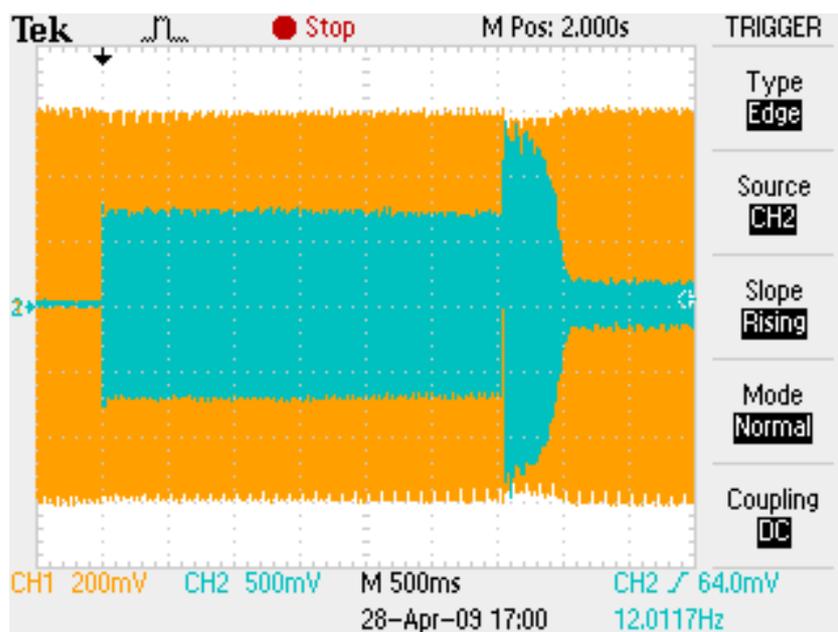
4.1.2. Ensaio com acionamento do tipo partida estrela-triângulo

Foram efetuados dois ensaios com o acionamento do tipo estrela-triângulo (YD), sendo o primeiro com válvula mecânica para proporcionar o alívio do sistema, portanto “sem carga”, e o segundo sem a válvula mencionada, portanto com sistema pressurizado. A válvula mencionada tem por objetivo facilitar a operação do compressor, principalmente nos momentos de partida.

A Figura 19 ilustra o comportamento da corrente elétrica no instante denominado “sem alívio”, sendo que a Figura 20, o momento “com alívio”, em ambos os ensaios a escala para o valor de corrente é de 50A/DIV.

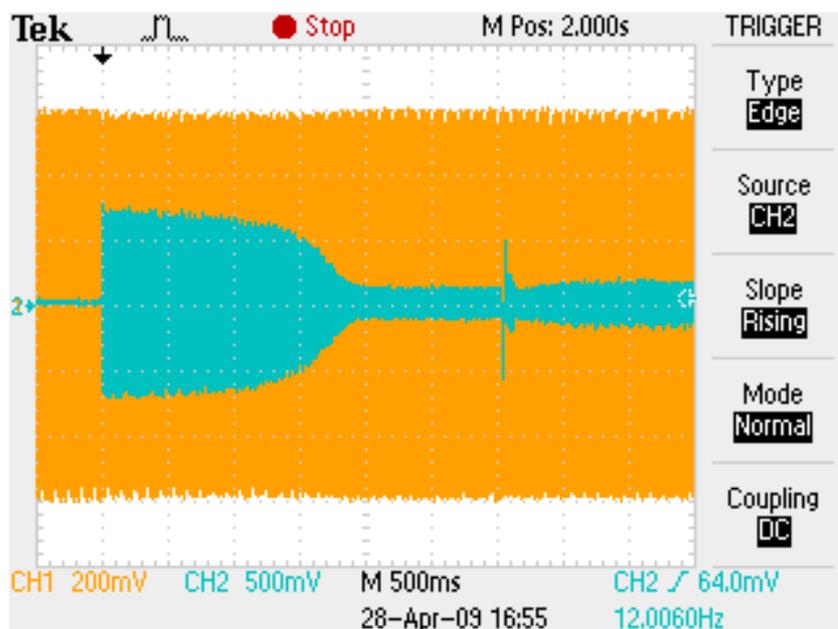
Analisando o comportamento de partida “sem alívio”, curva da corrente apresentada na Figura 19, percebe-se que após 3 segundos, tempo ajustado para a comutação YD, onde o motor já atingiu aproximadamente 85-90% da rotação nominal, nota-se a elevação de 7 vezes da corrente (pico), por aproximadamente 500ms, seguido de uma diminuição para o valor próximo a corrente nominal do motor (em regime).

Figura 19 - Corrente de partida com acionamento tipo YD – sem alívio



Fonte: Schulz Compressores (2009)

Figura 20 - Corrente de partida com acionamento tipo YD – com alívio



Fonte: Schulz Compressores (2009)

Quando observado o comportamento da operação “com alívio”, mostrado na Figura 20, nota-se que a amplitude da corrente elétrica anterior a comutação é inferior ao caso apresentado na Figura 19, no momento da comutação há também uma pequena elevação, porém com amplitude e tempo significativamente reduzidos em relação ao caso anterior, ressaltando que a escala da corrente (em verde) é de 50A/DIV.

Como dado comparativo, pode-se concluir que entre as condições de acionamento apresentadas, o modelo “com alívio” possui uma melhor resposta ao sistema elétrico, tendo uma menor corrente de partida para o modelo de compressor aplicado, mas não elimina a elevação no momento da comutação YD, pois esta é uma característica do tipo de acionamento aplicado, e pode ser classificada como uma ineficiência do modelo de partida adotado para o compressor em questão.

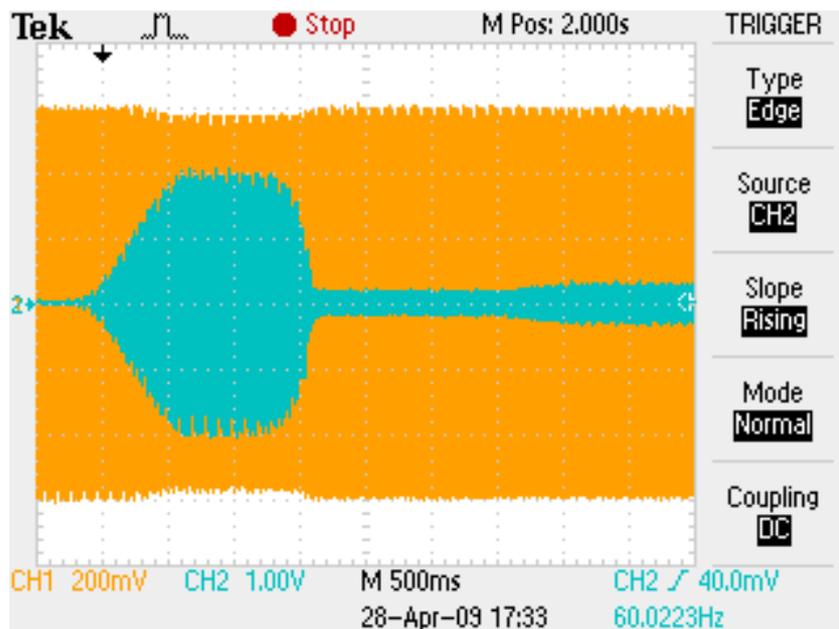
4.1.3. Ensaio com acionamento do tipo partida com *soft starter*

Para o acionamento com chave de partida suave (*Soft Starter* - SS) foram realizados ensaios similares aos já relatados, onde o primeiro foi utilizada a válvula de alívio mecânica e em seguida sem a utilização desta e com o sistema pressurizado.

A Figura 21 contempla o comportamento da corrente elétrica no ensaio denominado “com alívio” e a Figura 22, ilustra a condição “sem alívio”. Nota-se uma diferença entre os dois ensaios, contudo essa diferença é muito pequena de forma que

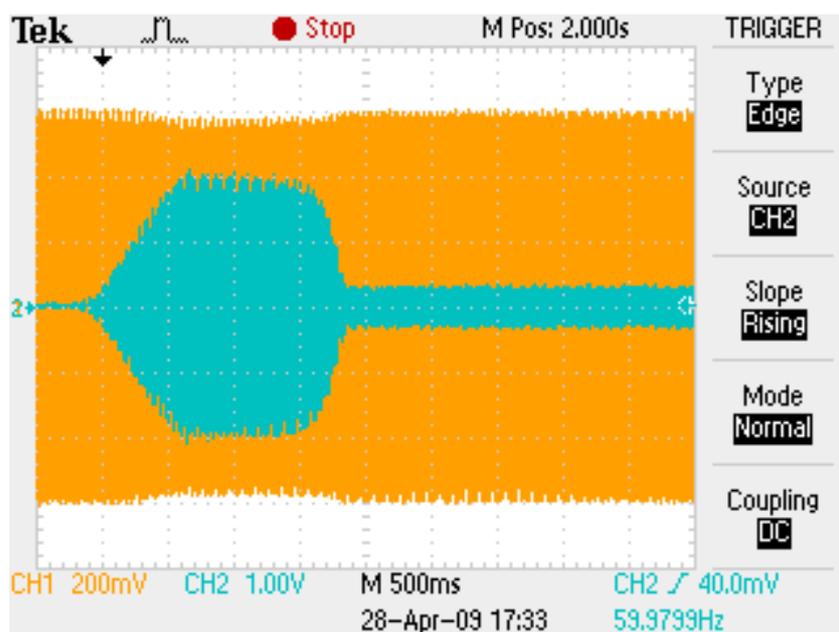
pode-se considerar as curvas similares, caracterizando assim não haver vantagem para o sistema elétrico em termos de eficiência energética. Já do ponto de vista da partida do motor, a existência da rampa de partida suave, facilita a operação do motor e se mostra superior aos acionamentos tipo partida direta (PD) e estrela-triângulo (YD), pois há ganhos consideráveis no momento da partida e conseqüentemente haverá no desligamento do equipamento durante o período ajustado.

Figura 21 - Corrente de partida com acionamento tipo SS – com alívio



Fonte: Schulz Compressores (2009)

Figura 22 - Corrente de partida com acionamento tipo SS – sem alívio



Fonte: Schulz Compressores (2009)

4.1.4. Ensaio com acionamento do tipo partida com inversor de frequência

Os ensaios realizados com os acionamentos tipo partida direta e estrela-triângulo comprovam suas limitações, sendo que o tipo PD apresenta elevada corrente na partida na aplicação, provocando afundamento de tensão ou variação de curta duração da tensão na rede em que o compressor está ligado, fenômeno denominado na literatura internacional como “*voltage sag*”, fato que gera a necessidade do sobre dimensionamento da infraestrutura da instalação elétrica.

Quando analisada a partida YD, o conjugado e a corrente de partida foram reduzidos a 1/3 de seus valores nominais, podendo ser um problema devido ao elevado conjugado de partida do compressor alternativo de pistão, mesmo quando aplicado o sistema de alívio mecânico ou válvula específica para o sistema de compressão, situação esta que eleva o custo total do equipamento, bem como não evita as elevações de corrente na comutação YD, apenas reduzindo a mesma no momento da partida.

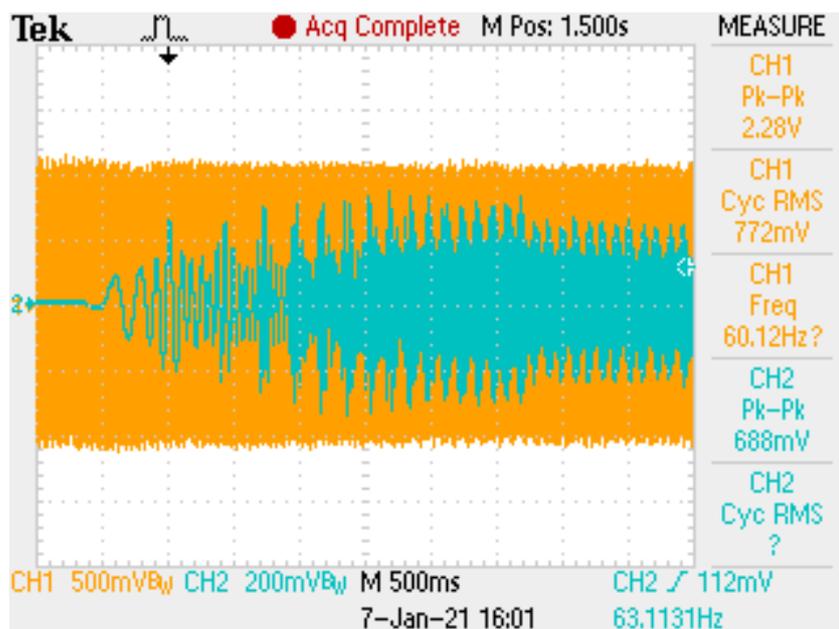
Para os ensaios com inversor de frequência, foi utilizado um equipamento comercial, portanto sem alterações em suas características, encontrado normalmente no mercado.

O equipamento em questão pertence à família CFW 500, com tensão nominal de 380-480V, corrente de saída de 24A, produzido pela empresa WEG Drives. O Anexo B apresenta o protótipo de acionamento montado para realiza dos ensaios.

As Figuras 23 (escala de tempo de 500ms) e 24 (escala de 250ms) apresentam a partida do compressor com inversor “sem alívio”.

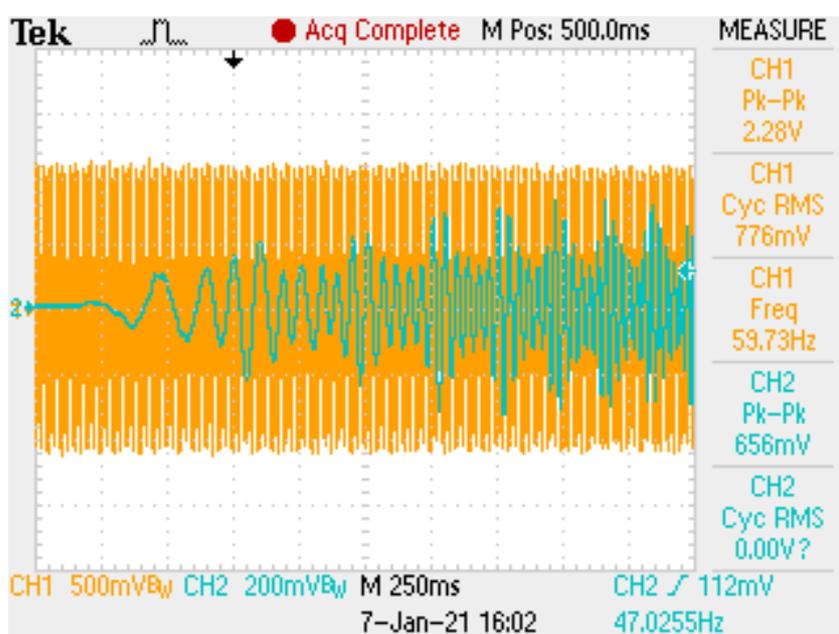
Observa-se que a corrente (curva azul) com amplitude linear quando comparada as apresentadas anteriormente (PD e YD). Cabe ainda ressaltar que “não ocorreram problemas” para movimentar a carga. Para os casos apresentados nas Figuras 23 e 24 a escala de corrente é de 10A/DIV (em verde).

Figura 23 - Corrente de partida com inversor de frequência 500ms - sem alívio



Fonte: Schulz Compressores (2021)

Figura 24 - Corrente de partida com inversor de frequência 250ms - sem alívio

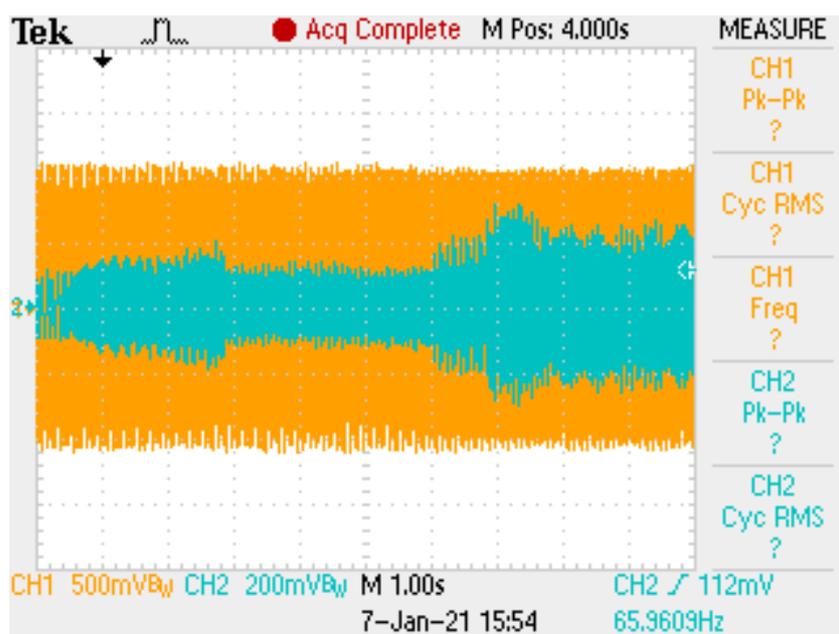


Fonte: Schulz Compressores (2021)

Analisando a Figura 25, onde o compressor foi ensaiado com de válvula de alívio mecânico, percebe-se a redução da corrente elétrica em relação ao caso sem alívio das Figuras 23 e 24, caracterizando um ganho efetivo de energia no momento da partida.

A Figura 25 apresenta escala de 10A/DIV (em verde) para a corrente elétrica medida.

Figura 25 - Corrente de partida com inversor de frequência – com alívio



Fonte: Schulz Compressores (2021)

Quando aplicado o inversor de frequência, há inúmeros benefícios para o compressor e conseqüentemente para o sistema elétrico, tais como:

- Inicialmente a diminuição considerável da corrente de partida;
- Não irão ocorrer trancos ou solavancos mecânicos, pois o compressor utiliza, nesse caso, sistema de acionamento por polia e correias;
- O inversor permite definir rampas de partida e parada mais ajustadas para o modelo de carga;
- Definição de torque mais elevado, conforme exigência da carga ou aplicação;
- Redução da corrente em regime, pois o controle pode ser aperfeiçoado para a operação contínua do compressor via ajuste da parametrização;
- Economia de energia quando o equipamento está em marcha (operação contínua), pois o mesmo pode modular a velocidade.

As verificações realizadas permitiram uma avaliação mais detalhada da forma de onda da corrente do compressor, proporcionando definir os próximos passos do estudo.

Conclusão prévia retirada dos ensaios realizados, são que os acionamentos dos tipos PD e YD apenas possuem como principal diferença o instante de partida do

compressor, pois quando o equipamento entra em carga, ambos são iguais para o sistema elétrico.

Nas próximas etapas desse estudo é apresentado comparativo entre os sistemas de acionamento com partida direta e com inversor de frequência para a aplicação proposta, pois os dois modelos de acionamento mencionados possuem diferenças pertinentes entre si, tanto no quesito partida como em operação (em regime). Serão analisados os comportamentos para ambos, tendo como objetivo descobrir qual proporcionará principalmente maior eficiência no quesito energia, bem como na geração do ar comprimido.

4.2. Ensaio de performance do conjunto acionamento-compressor

Essa sessão do trabalho trata do ensaio de performance com o acionamento tipo convencional, de velocidade fixa, onde o comportamento de PD ou YD são similares em regime e a aplicação do inversor de frequência, com a finalidade de avaliar o comportamento do conjunto durante a operação contínua do compressor, correlacionando algumas características mecânicas, como: pressão, temperatura nos pontos do bloco compressor e atmosfera, rotação do bloco compressor e vazão assim como algumas propriedades elétricas, como: tensão, corrente, potência e fator de potência.

A intenção dos gráficos do acionamento PD ou YD é apresentar a dinâmica de operação do compressor, sendo que trata-se do modelo habitual dos usuários (indústrias), na qual o gasto com energia é superior.

O ensaio com inversor de frequência apresenta melhor desempenho comparado com os acionamentos de velocidade fixa, além do melhor ponto de operação do conjunto, portanto um rendimento mais elevado, fatos comprovados através da análise dos gráficos, relacionando a compressão do ar com potência elétrica consumida.

4.2.1. Ensaio com acionamento do tipo PD/YD – operação contínua

Para esse ensaio foi utilizada uma fonte de tensão controlada, portanto a tensão estava teoricamente estabilizada, equipamento desenvolvido para esta finalidade e utilizado amplamente em laboratórios de ensaios elétricos.

Outro fato importante é que para as medições das variáveis mecânicas foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Rotâmetros: utilizados na medição da vazão instantânea;
- Manômetros: empregados nas leituras de pressão alguns pontos/entre estágios do compressor;
- Termopares: utilizados na verificação da temperatura de inúmeros pontos do bloco compressor e temperatura ambiente;
- Tacômetro: para medição da rotação do bloco compressor e motor elétrico;
- Higrômetro: para medição da umidade relativa do ar ou teor de vapor de água no ar;
- Barômetro: na verificação da pressão atmosférica.

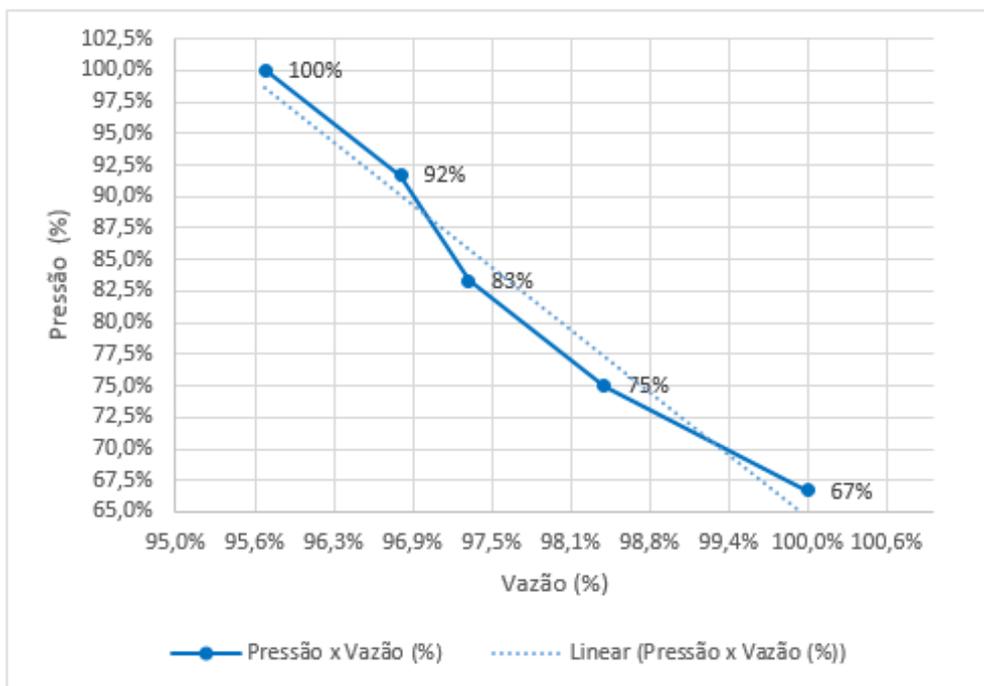
No Anexo A, pode-se visualizar as principais variáveis elétricas adquiridas durante a realização deste modelo de ensaio, como também dos demais tipos de acionamentos aplicados no compressor, todos com o uso do analisador de energia CW240.

Para tornar os ensaios fossem mais precisos, os mesmos foram realizados com diferentes pressões, vislumbrando obter uma curva de operação do conjunto acionamento/compressor mais linear.

Foram aplicados intervalos de 35 a 40 minutos entre as leituras das variáveis pois este tempo é necessário para estabilização e observação da operação como um todo; sendo que as variáveis apresentadas nos gráficos estão em valores percentuais.

A Figura 26 destaca a variação da pressão em função da vazão instantânea, lembrado que nesse caso a operação do conjunto é em 380V, rede de alimentação trifásica e com frequência de 60Hz.

Figura 26 - Pressão [Psi] x Vazão [PCM] com acionamento tipo PD/YD



Fonte: O Autor (2022)

Analisando os pontos apresentados no gráfico da Figura 26, percebe-se que uma elevação de aproximadamente 4,4% na vazão, proporcionará redução de 33,0% na pressão do compressor quando comparando o início e o fim da curva (pontos).

Como a vazão está diretamente associada ao consumo do ar comprimido, quando há um aumento da demanda do mesmo é comum que ocorram as oscilações ou quedas de pressão na rede do usuário final. Fato que foi abordado e mencionado nas opções de gerenciamento do ar comprimido, sessão 2.4 desse trabalho, podendo ser o controle realizado por cascata, carga/alívio; via gerenciador ou central, entre outros, a fim de manter a pressão da rede o mais estável possível.

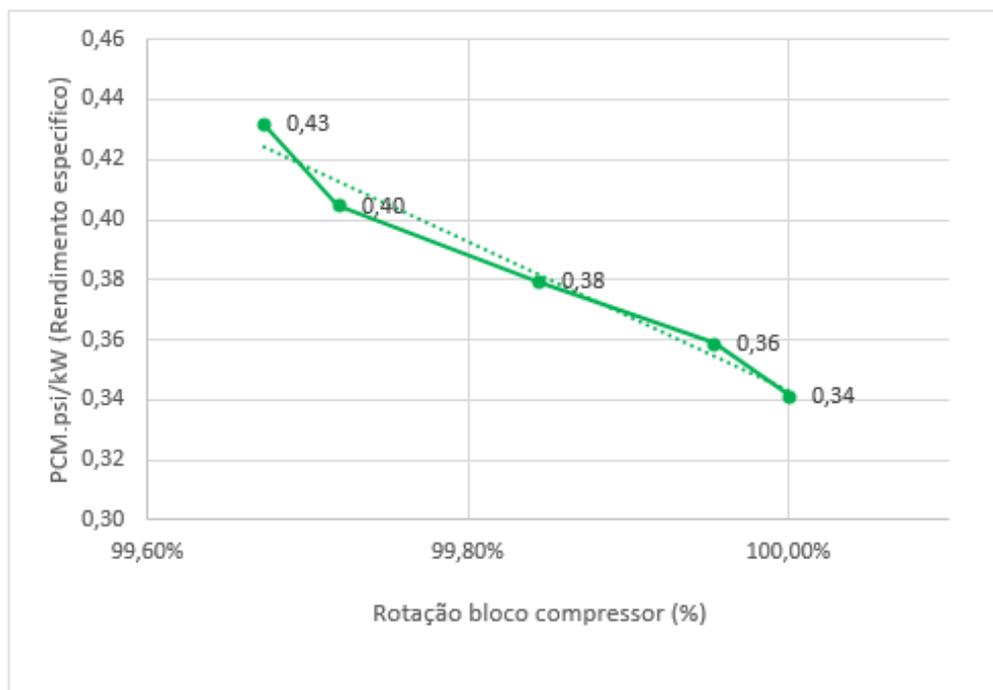
Fato importante é evitar faixas de pressão muito longas em conjunto com pressões da rede altas, situação que eleva consideravelmente o consumo de energia para produção do ar comprimido, pois os compressores estariam em carga plena ou alívio por um longo período.

Essa dinâmica, está diretamente relacionada a aplicação de compressores de velocidade variável acionados por inversores, pois os mesmos variam a frequência aplicada no motor conforme a demanda do ar comprimido, solução ideal para as oscilações na demanda, proporcionando ganho energético.

Observando a Figura 27 onde a mesma associa o rendimento específico [$PCM \cdot psi/kW$], comparando as variáveis de vazão do ar comprimido (em PCM), pressão

do sistema (em Psi), além da potência elétrica consumida (em kW); de tal maneira é presumível perceber se o conjunto de compressão está realmente sendo eficiente em relação as demais variáveis do sistema; portanto o gráfico está correlacionando o rendimento específico [$PCM \cdot psi/kW$] e a rotação do bloco compressor [%].

Figura 27 - Rendimento específico [$PCM \cdot psi/kW$] x Rotação bloco compressor [%]



Fonte: O Autor (2022)

Examinando o gráfico anterior, percebe-se que quando existe uma menor rotação do bloco compressor há um maior rendimento específico [$PCM \cdot psi/kW$], sendo que para esse tipo de equipamento sempre está associado o seguinte conceito:

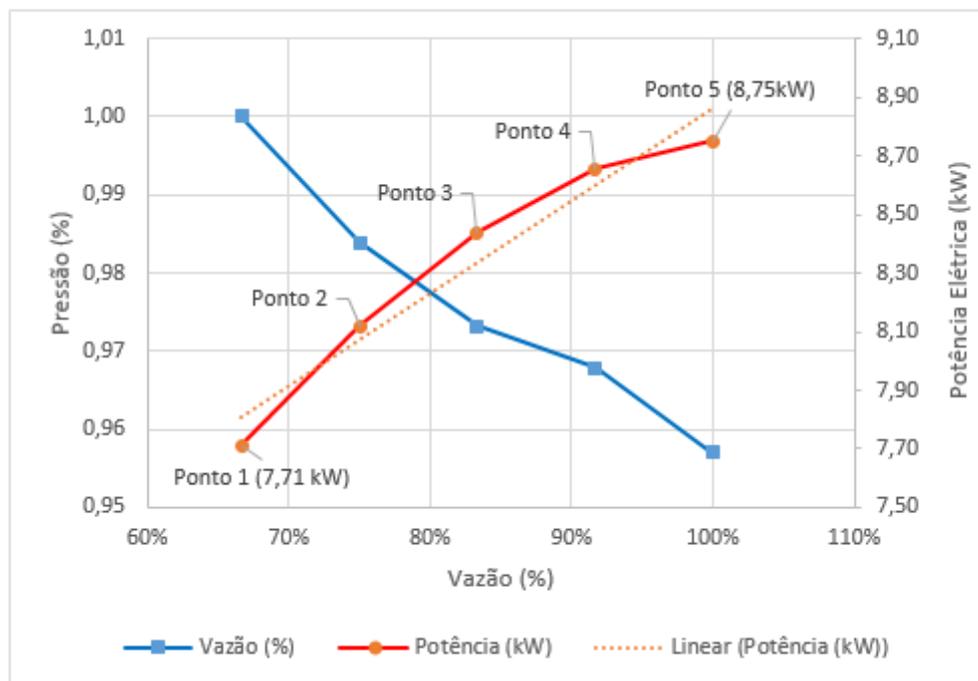
- Menor rotação - menor vazão → maior pressão de operação;
- Maior rotação - maior vazão → menor pressão de operação.

Portanto nota-se que são relações inversamente proporcionais, impactando diretamente no consumo específico mencionado.

Esse sistema de relação pode ser aperfeiçoado quando aplicado inversor de frequência ao conjunto acionamento-compressor, tema abordado na próxima sessão.

Na Figura 28 é possível verificar a oscilação da vazão [%] e potência elétrica consumida [kW] em relação de pressão do sistema [%].

Figura 28 - Potência elétrica [kW] e vazão [%] x Pressão[%] com acionamento tipo PD/YD



Fonte: O Autor (2022)

É possível identificar na Figura 28, que o aumento da pressão provoca também a elevação da potência consumida (curva em vermelho), e que o aumento da vazão de ar comprimido resulta na redução da pressão (curva em azul), para a dinâmica de operação em tensão e frequência da rede elétrica constante.

Analisando os pontos 1 e 5 do gráfico, respectivamente com potência elétrica consumida de 7,71 kW e 8,75 kW; é possível identificar um aumento de aproximadamente 33% na pressão, equivalente a 2,76 Bar, elevando em 13,4% a potência consumida.

A observação mencionada anteriormente é de suma importância, pois é habitual na indústria que na identificação de pressão baixa na rede de ar, ocorram ajustes na tentativa de elevar a pressão de operação do(s) compressor(es), com a intenção de manter o sistema em operação para não impactar o sistema produtivo, por exemplo.

Acontece que esse é um procedimento ineficaz, pois para operação ideal do sistema de compressão, o correto é ter a vazão relativamente maior que a demanda de ar comprimido, pois esse fato provocará a utilização apropriada e não afetará consumos energéticos desnecessários quando os equipamentos são bem dimensionados.

4.2.2. Ensaio com acionamento via inversor de frequência – operação variável

O modo de operação de equipamentos com inversor de frequência mostram-se como solução tecnológica em relação às demais existentes no mercado e historicamente mais empregadas (já relatadas anteriormente).

A utilização do inversor de frequência possibilita controles mais precisos da carga, ajustes como rampas de aceleração para os momentos de partida e desaceleração no desligamento do motor, além de permitir os mesmos controles durante momentos em que a dinâmica de trabalho solicite variações na rotação do motor. Esse controle é possível pois o inversor altera a frequência da tensão aplicada no motor, conseqüentemente a rotação sofrerá mudanças.

Seguindo essa linha, pode-se acionar o compressor conforme a demanda de ar comprimido. Essa dinâmica de operação é possível com o controle realizado via PID (Proporcional, Integral e Derivativa) interno disponível no inversor de frequência. O PID fornece uma variação contínua da saída dentro de um mecanismo de realimentação de loop de controle para controlar com precisão o processo, removendo a oscilação e aumentando a eficiência, nesse caso via entrada analógica do inversor. Assim o controle é responsável pela realimentação da malha de controle, entretanto além dos parâmetros normais necessários para esse tipo de equipamento, tais como: dados do motor, rampas de subida e descida, velocidade mínima e máxima, parâmetros de alarmes e proteção, também um comando e ou equilíbrio mais preciso via algoritmo de controle disponível no inversor foi primordial para possibilitar o estudo e ensaios nesse caso, salientando que o controle utilizado foi do tipo tensão imposta, na qual utiliza a técnica PWM (Modulação por Largura de Pulso) para comando dos IGBT's.

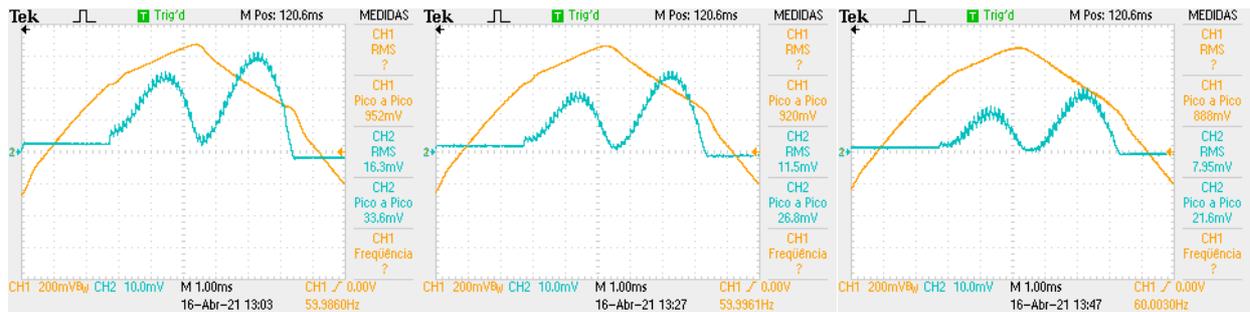
Também foi necessária a aplicação de um transdutor de pressão com saída de 4 - 20mA na entrada analógica do inversor na automação do acionamento elétrico, sendo um elemento que tem por finalidade a conversão de uma unidade para outra, no caso de pressão para sinal elétrico em corrente, pois esta é a variável de processo que permite o controle preciso durante a flutuação da demanda do ar comprimido da rede. O transdutor utilizado podendo ser denominado como referência de velocidade, permite a leitura da pressão em uma faixa de 0 e 16 Bar.

Com intenção de disponibilizar para o estudo um resultado mais preciso na medição da potência elétrica consumida pela carga, utilizou-se osciloscópio como instrumento de aquisição das grandezas elétricas fundamentais que são: a tensão e corrente, ambas na entrada de energia do acionamento elétrico.

A Figura 29 proporciona análise da evolução do instante da comutação e distorção da tensão na entrada do inversor de frequência (entrada retificador).

Através da Figura 29 foi possível calcular os valores exatos de consumo de energia em Watts e o fator de potência (FP), dentro de um ciclo da rede, para três consumos de ar distintos, considerando que a escala de corrente (linha verde) é de 10A/DIV.

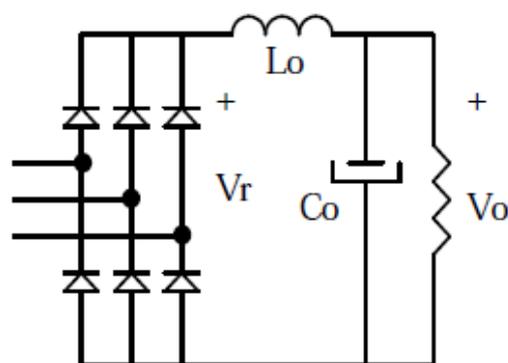
Figura 29 - Desempenho da tensão e corrente na entrada do inversor de frequência



Fonte: Schulz Compressores (2021)

Considerando a topologia do inversor de frequência (entrada), ponto onde foram efetuadas as medições durante a realização dos ensaios, onde o mesmo é genericamente constituído por um retificador trifásico de onda completa, não controlado, conforme Figura 30.

Figura 30 - Retificador trifásico, onda completa, não controlado



Fonte: UNICAMP (2022)

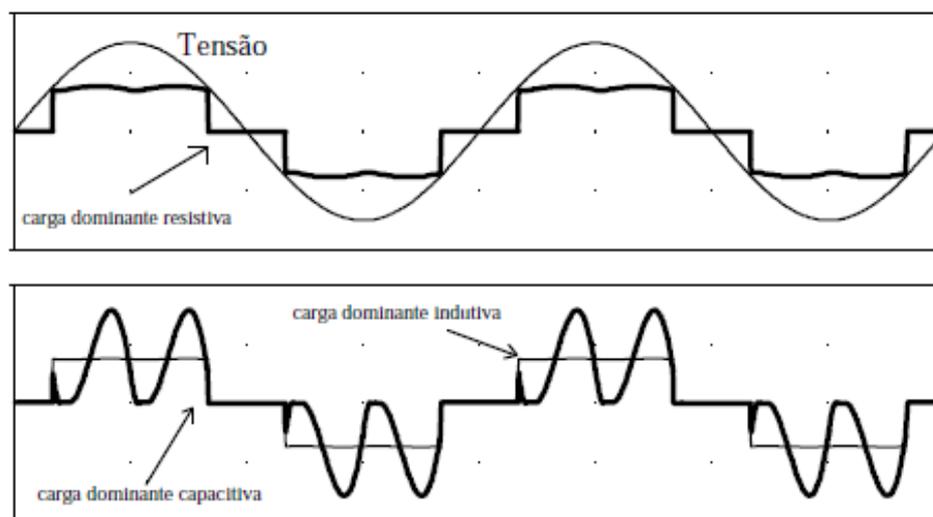
A Figura 31 ilustra as formas de ondas típicas considerando que o lado CC dos retificadores trifásicos (Figura 30), são formados pela união das cargas resistiva, indutiva ou capacitiva, onde no primeiro instante a corrente elétrica segue a mesma forma da

tensão sobre a carga, portanto uma retificação de 6 pulsos, já quando um filtro indutivo é utilizado, há um alisamento da corrente, de modo que a onda mostrar-se praticamente retangular.

Quando a análise é realizada com um filtro capacitivo, permanecendo também uma pequena indutância em série, obtém-se os picos de corrente. Com a elevação da indutância tem-se uma redução dos picos onde possivelmente a corrente não chega a se anular.

Quando realizado comparativo de análise entre a Figura 31 e a da leitura do osciloscópio (Figura 29) percebe-se que o fato mencionado é verdadeiro.

Figura 31 - Formas de onda no lado CA para retificador trifásico – com filtro, onda completa, não-controlado, alimentando diferentes tipos de carga

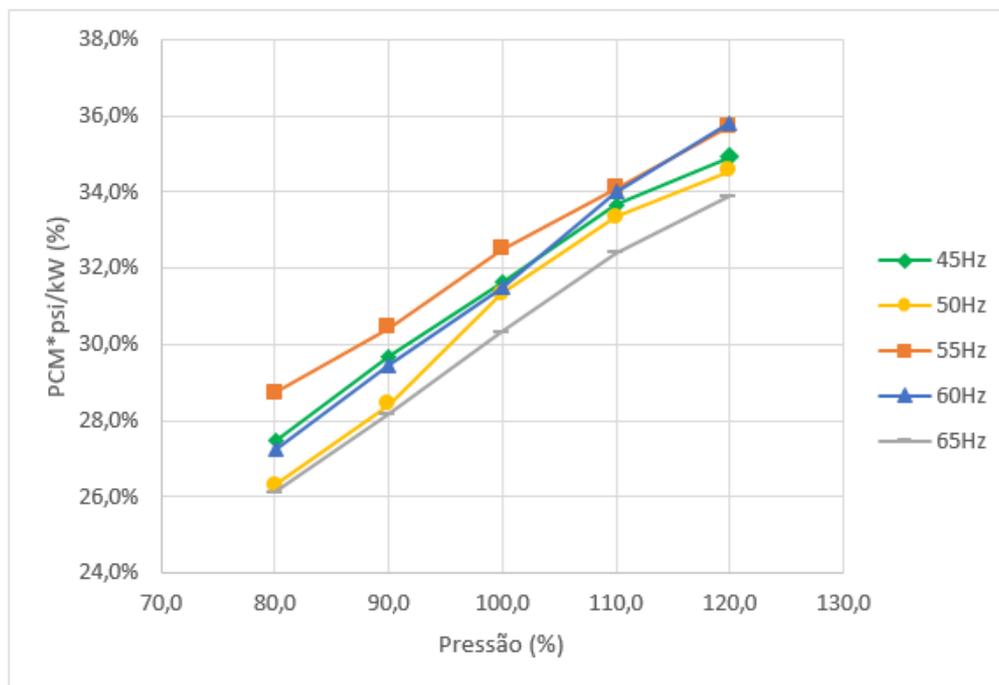


Fonte: SILVA A. (2016)

Para uma melhor análise dos resultados foram realizados ensaios de performance do compressor em cinco momentos diferentes, com o motor variando entre 45 a 65 Hz para cinco pressões diferentes.

A Figura 32 apresenta as curvas das frequências ensaiadas considerando o rendimento específico [$PCM \cdot psi/kW$], maneira definida como o modelo para descobrir em qual rotação (frequência) obtém-se performance mais eficaz na produção do ar comprimido pela potência consumida.

Figura 32 - Desempenho do conjunto em 45, 50, 55, 60 e 65 Hz



Fonte: O Autor (2022)

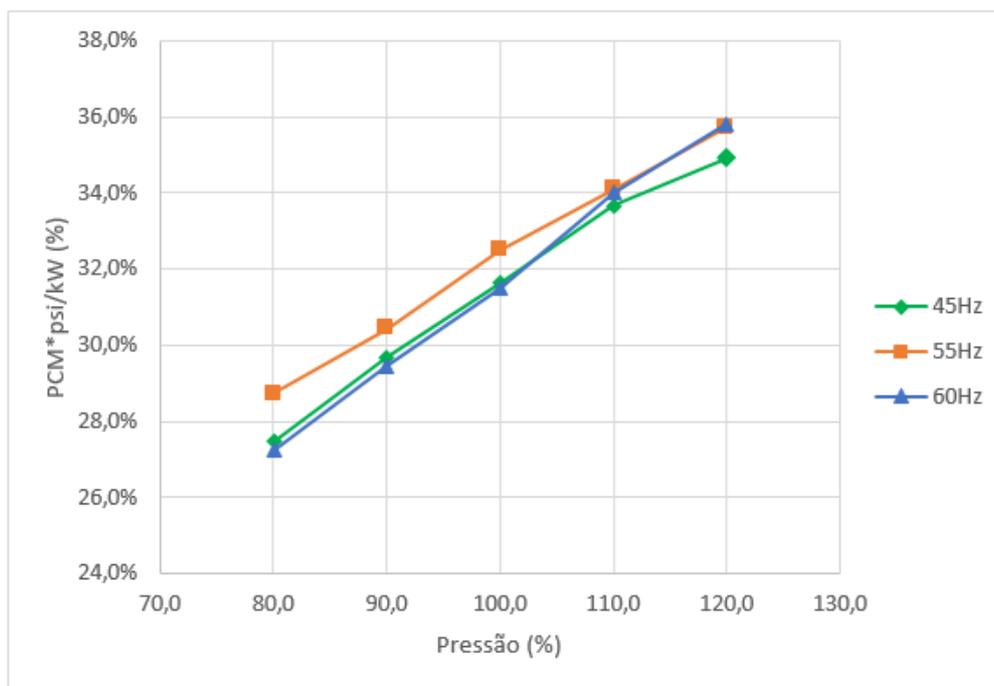
Analisando o gráfico da Figura 32 nota-se que comparativamente entre as cinco frequências testadas a com 45 Hz proporcionou o melhor resultado quando analisado a unidade [PCM.Psi/kW] e comparada com a de 60Hz que é a frequência nominal do motor e utilizada com acionamento PD ou YD, portanto possui a melhor performance na compressão do ar (pressão x vazão em PCM.Psi) para toda a faixa de pressão ensaiada, entre 80 a 120%.

É pertinente destacar, que as demais faixas testadas de 55, 60 e 65 Hz também apresentaram um comportamento linear com relação a performance do conjunto, pois o ensaio com várias faixas de frequências se mostraram importantes para definição da curva de consumo energético ideal para a solução, sendo eficaz na determinação do melhor ponto de operação entre rotação, torque, potência elétrica e eficiência energética.

A Figura 33 esboça de forma clara o comparativo de performance na compressão de ar do conjunto pela potência consumida, considerando as frequências de 45 e 55 Hz; onde a curva em 45 Hz proporciona uma produção de ar maior em 8,8% quando comparada com a rotação em 55 Hz, estando ambas reguladas na pressão nominal máxima de 120 Psi.

Destaca-se o fato que em 55 Hz o desempenho é similar ao de 45 Hz, na qual a tendência é de que esta seria talvez a “melhor faixa de operação” para o conjunto considerado acionamento com inversor, pois está próxima a frequência nominal do motor, porém com a redução da frequência há uma menor potência consumida.

Figura 33 - Comparativo de desempenho em 45 e 55 Hz



Fonte: O Autor (2022)

4.3. Comparativo entre velocidade fixa e velocidade variável

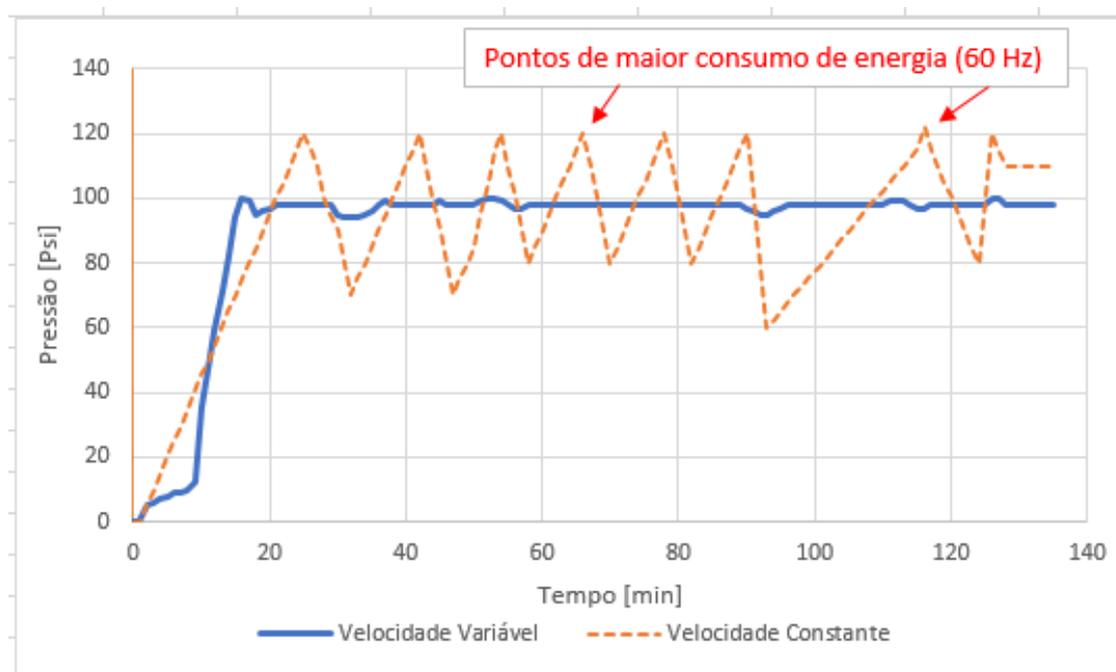
Durante os ensaios realizados e conseqüentemente estudados, foi necessário realizar outro comparativo para finalizar a análise da proposta desse trabalho; consiste em comparar os acionamentos em velocidade fixa (PD e YD) com velocidade estabelecida em 60 Hz utilizados habitualmente, portanto velocidade nominal do motor e o modelo com velocidade variável acionado por inversor de frequência na frequência de 45 Hz.

Dados de consumo entre os usuários mostram que a demanda média de operação, considerando a vazão necessária para aplicação de compressor de 40 PCM, é próxima aos ensaios em 45 Hz apresentados anteriormente para o conjunto acionado por inversor.

A Figura 34 estabelece comparativo entre os modelos com velocidade constante (curva tracejada na cor laranja) e o de velocidade variável (linha em azul), considerando a demanda média.

As curvas mostram claramente a dinâmica de operação contínua entre o modelo de velocidade fixa, com picos entre carga e alívio onde o compressor oscila entre a pressão máxima de trabalho e a pressão de mínima/religa. Já o modelo de velocidade variável apresenta consumo e operação linear (velocidade próxima a 45 Hz), sendo o valor adotado posteriormente para o cálculo de retorno de investimento (*payback*), abordado em outra sessão.

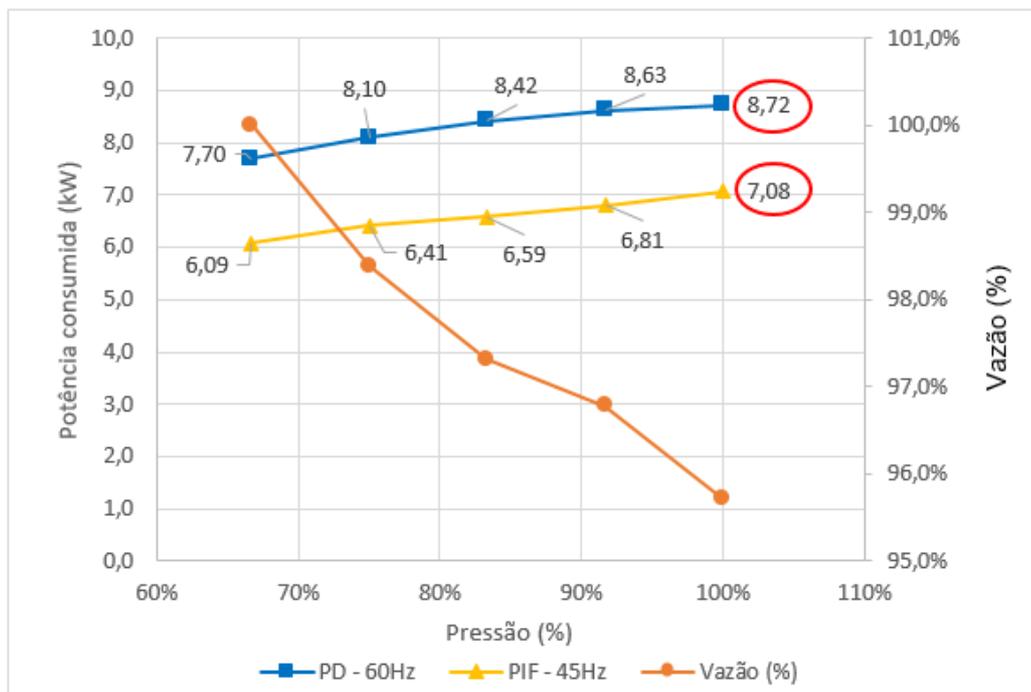
Figura 34 - Comparativo entre demanda média [Velocidade Fixa x Velocidade Variável]



Fonte: O Autor (2022)

O gráfico apresentado na Figura 35 ilustra a potência consumida no acionamento do tipo partida direta (PD), portanto na frequência nominal da rede em 60 Hz e a partida com inversor de frequência (PIF) em 45 Hz ambos nos mesmos níveis de pressão, relacionando a capacidade de produção do ar comprimido, a mesma definida como [PCM.psi].

Figura 35 - Potência consumida [kW] x Pressão x Vazão (PD e PIF)



Fonte: O Autor (2022)

Observando as curvas apresentadas na Figura 35, percebe-se que na pressão máxima, existe uma redução de 1,64 kW na potência consumida, correspondendo à (-18,80%), sendo o menor ponto de redução para a potência consumida. Considerando a análise entre todas as faixas, portanto os cinco pontos expostos no gráfico e as médias dos valores apresentados, nota-se atenuação de 1,73 kW, portanto (-20,80%) na potência elétrica média consumida.

Considerando que a potência consumida menor, que está diretamente relacionada a redução da velocidade motor, onde a produção de ar comprimido será também menor, conseqüentemente a vazão de ar comprimido do compressor, porém é uma circunstância admissível, considerando cada aplicação e necessidade do usuário, pois trata-se de uma dinâmica de operação, onde há momentos em que o compressor estará com demanda reduzida.

A utilização do inversor de frequência possibilita de forma eficaz a adaptação da demanda de ar comprimido pela velocidade instantânea do motor, fato que conseqüentemente possibilita economia de energia elétrica.

Os ensaios realizados com acionamento do compressor alternativo de pistão por inversor de frequência, seguem a mesma sistemática dos compressores rotativos de parafusos de velocidade variável encontrados em larga escala na indústria, porém nesse caso há necessidade de um ajuste mais cuidadoso pois o compressor alternativo de

pistão possui uma dinâmica diferente, sendo que o mesmo não é projetado para operação contínua; porém a sistemática de produção conforme a demanda de ar comprimido instantânea é válida, pois o mesmo irá se adequar conforme necessidade da rede, circunstância comum na indústria.

Na sessão da “Análise da Efetividade da Solução Proposta”, será apresentado comparativo de viabilidade econômica entre os modelos de acionamento de velocidade fixa e variável.

No caso do modelo de velocidade variável, será avaliado considerando a frequência máxima de 45 Hz, pois essa foi a que obteve o melhor resultado na produção de ar comprimido por potência consumida; onde o cálculo será o mais próximo do modo de operação para o compressor de pistão estudado.

Vale destacar que o ideal para estudo da faixa de operação, é a realização da coleta de dados de uma determinada fonte consumidora de ar comprimido, na qual é plenamente possível estabelecer a real necessidade de ar comprimido e posteriormente determinar qual a frequência correta de operação e/ou mais eficaz para o compressor acionado por inversor de frequência, bem como o período em que o mesmo deverá estar ligado, além da verificação se o equipamento atende a necessidade; ou se o mesmo está dimensionado incorretamente.

5 ANÁLISE DA EFETIVIDADE DA SOLUÇÃO PROPOSTA

Após a realização dos ensaios mencionados nas sessões anteriores, com objetivo de comprovar a efetividade da solução proposta pelo trabalho com inversor de frequência (PIF) para acionamento de compressores alternativos de pistão, foi realizada análise da viabilidade financeira da solução, considerando também o modelo de acionamento no formato básico, portanto de velocidade fixa, neste caso partida direta (PD).

As informações de potência consumida apresentadas pelos dois modelos de acionamento, considerando o formato de operação empregada pelos usuários, definida como a dinâmica de operação mais utilizada, será possível avaliar a energia elétrica consumida [kWh].

Para um melhor entendimento, optou-se por um contexto de uma unidade consumidora hipotética industrial com tensão de fornecimento pertencente ao Subgrupo A3 que é de 69 kV, segundo os modelos de tarifação vigentes e disponibilizados pela concessionária de energia elétrica de Santa Catarina (Celesc, 2022) e informações contidas no Manual de Tarifação Elétrica do PROCEL (Agosto/2011) de acordo com a Eletrobrás, além da Resolução Normativa nº414/2010 (ANEEL).

Nesse cenário estipulou-se que a indústria possui horário de consumo entre as 6:00 às 18:00, durante 24 dias úteis ao mês, sendo 2 turnos com escala 6 x 1 (6 dias trabalhados e 1 dia de folga), portanto não opera durante horário de ponta, tendo como modalidade:

- Tarifária horária verde: aplicada às unidades consumidoras do grupo A, caracterizada por tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica, de acordo com as horas de utilização do dia, assim como de uma única tarifa de demanda de potência.

Contudo será exposto também o *payback* considerando a tarifa do Subgrupo A3a que possui tensão de fornecimento entre 30kV a 44kV, a fim de comparar a economia de energia [R\$/kWh] em ambos os casos.

Considerando que a indústria tenha demanda instável no consumo de ar comprimido, fato que justifica a utilização do acionamento de velocidade variável; assim foi determinado que a frequência de operação contínua em que a vazão do compressor irá suprir a necessidade da indústria é de 45 Hz, onde foi comparado com o acionamento

tipo partida direta em 60 Hz. Para a situação mencionada foram realizados cálculos do consumo de energia para uma hora de operação do compressor, a diferença em reais para as taxas vigentes atualmente em Santa Catarina, o ganho financeiro (*saving*), além do mais importante, que é o retorno financeiro da solução ou *payback*; de tal forma será possível estimar o tempo em que a solução proporcionará o retorno mencionado. Para análise da efetividade econômica da solução, serão utilizados os principais índices ou indicadores econômicos para avaliar investimentos, que são:

- VPL: valor presente líquido;
- TIR: taxa de juros para a qual o VPL torna-se zero, considerada um complemento ao VPL;
- ROI: percentual de retorno sobre o investimento inicial;
- SELIC: taxa básica de juros anual, sendo o principal instrumento de política monetária utilizado pelo Banco Central do Brasil;
- Payback: retorno financeiro do investimento, sendo o período entre o início do projeto e o instante em que há fluxo acumulado positivo;
- TMA: Taxa Mínima de Atratividade.

O *payback* é um indicador que fornece ao investidor uma estimativa do período total para a recuperação do investimento inicial; fato que pode acontecer após meses ou anos, assim há necessidade de compará-lo com o tempo para retorno do capital investido. Nesse estudo será estipulado o modelo de *payback* descontado, na qual o mesmo informa o período que se dará a recuperação do valor investido, atendendo o custo do dinheiro no tempo, o objetivo é estimar o período necessário para que o investimento inicial seja inteiramente coberto.

Como etapa inicial será realizado o cálculo do investimento do acionamento proposto com inversor de frequência, considerando os principais componentes elétricos, eletro eletrônicos, mecânicos, além da mão de obra necessária para montar a solução, e assim conseqüentemente adequar um compressor alternativo de velocidade fixa (PD) em um modelo de velocidade variável (PIF).

A Tabela 5 apresenta os preços dos principais componentes necessários para montagem do acionamento proposto com inversor de frequência, sendo que foram realizadas três cotações com revendas de materiais elétricos, portanto preços praticados no mercado varejista e expostos no Anexo C, relacionam os principais componentes necessários para montagem da solução básica do acionamento, além da mão obra para

adequação do compressor, assim pode ser considerado como o investimento total. Além do próprio inversor, irão compor a solução outros componentes importantes como: painel elétrico, transdutor de pressão, relés acopladores, botão liga/desliga, botão de emergência, chave seccionadora para a porta do painel, micro ventilador para retirar o calor gerado dentro do painel, bornes de passagem, bornes fusíveis, condutores, terminais elétricos, entre outros; para todos os itens foi considerado o menor preço entre as propostas. Também foi contabilizado o valor da mão de obra técnica de um profissional da área para realizar a montagem e parametrização do inversor, nesse caso foi estimado seis horas, considerando que os arquivos padrões já estejam definidos.

Tabela 5 - Investimento total do acionamento

Item	Descrição	Quantidade (peça ou metro)	Preço total (R\$)
1	Inversor de frequência 3F, corrente 25A, 380-480V, com IO's digitais e analógicas	1	5.537,58
2	Transdutor de pressão range 0 a 16 bar, de 4 a 20mA, rosca ¼" NPT	1	305,09
3	Painel elétrico IP44, dimensões 600mm (A) x 480mm (L) x 220mm (P)	1	301,76
4	Botão de emergência, tamanho 22mm	1	23,52
5	Bloco de contato para botão de emergência 1NF	2	14,16
6	Relé acoplador 8A, 2 contatos NAF, tensão 220V	2	145,22
7	Micro ventilador 120 x 120mm, tensão nominal 127/220V	1	57,00
8	Filtro tipo veneziana de ventilação para painel elétrico 150 x 150mm, c/filtro	2	108,48
9	Seccionadora rotativa para porta de painel 3P de 25A + haste + manopla, 690V	1	298,35
10	Disjuntor bipolar de 6A, 230V, curva C	1	41,47
11	Borne, tipo conector passagem 2,5mm ²	10	32,90
12	Borne, tipo conector porta fusível 2,5mm ²	2	29,80
13	Fusível de 1,6A retardado para borne 2,5mm ²	2	0,32
14	Botão duplo liga/desliga, contatos 1NA + 1NF	1	66,61
15	Cabos diversos (1,5mm ² e 6mm ²)	50 + 6	50,00
16	Terminais elétricos (1,5mm ² e 6mm ²)	100	30,00
17	Mão de obra técnica	6	900,00
		Total	R\$ 7.942,26

Fonte: O Autor (2022)

Com relação ao cálculo de economia de energia, o mesmo foi efetuado comparando o acionamento de velocidade fixa (PD) versus o de velocidade variável exposto na Tabela 6.

No estudo verificou-se que a dinâmica de operação do compressor alternativo de pistão é do tipo intermitente, considerando que o mesmo trabalha 70% em carga plena (comprimindo ar da atmosfera); e 30% em alívio (não comprimindo ar), porém consumindo aproximadamente de 30% da potência nominal.

Para o modelo de acionamento com inversor será considerado os mesmo 70% com geração de ar comprimido em carga plena e 30% desligado, portanto sem consumo de energia elétrica. Toda dinâmica de operação relatada será utilizada nos cálculos para determinar a potência consumida pelo compressor em carga/alívio.

Para a tarifa horária verde e subgrupo A3 o valor utilizado para os cálculos de energia consumida [R\$/kWh] foi de R\$ 0,33592; na qual a diferença para 01 hora em operação do compressor, o mesmo proporciona *saving*, portanto ganho financeiro comparado com o modelo habitualmente utilizado.

Tabela 6 - Comparativa da energia consumida – PD x PIF (Subgrupo A3)

Acionamentos	Modo operação	Intermitência (%)	Potência média ensaios (kW)	Energia consumida total (kWh)	R\$/kWh	Custo em R\$ (1hora)	Saving (R\$)
PD	Carga plena	70	8,301	6,5613	0,33592	2,2040	0,6502
	Alívio	30	2,502				
PIF	Carga plena	70	6,608	4,6256	0,33592	1,5538	
	Alívio	-	-				

Fonte: O Autor (2022)

Diante do investimento da solução proposta com inversor de frequência igual a R\$ 7.942,26; cálculo baseado pelas melhores propostas apresentadas e expostas na Tabela 5, onde o *saving* estimado por hora é de R\$ 0,6502; considerando que o equipamento estará operando 12 horas diárias pois foi estimado que a indústria opera em 2 turnos de 6 horas, durante 24 dias, sendo possível calcular assim o prazo estimado para retorno do investimento.

Para realização do estudo econômico foi adotado como Taxa Mínima de Atratividade (TMA) de 12,75%; definido como um valor percentual que indica que o mínimo admissível para que um investimento seja realizado, e que o dinheiro seja aplicado, valor comparado com taxa SELIC praticada atualmente. Para efeito comparativo pode ser definida como a taxa limite utilizada em financiamentos ou em aplicações financeiras. A Tabela 7 apresenta o cálculo do retorno de investimento conforme dados relatados anteriormente.

Tabela 7 - Cálculo retorno de investimento (Subgrupo A3)

Período (anos)	Fluxo de caixa (R\$)	Valor presente (R\$)	Valor presente acumulado (R\$)	Análise de investimento	
0	- 7.942,26	- 7.942,26	- 7.942,26	Investimento inicial	R\$ 7.942,26
1	2.247,09	1.992,99	- 5.949,27	Taxa mínima atratividade (TMA)	12,75%
2	2.247,09	1.767,61	- 4.181,66	Tempo em anos (<i>payback</i>)	4,99
3	2.247,09	1.567,73	- 2.613,93	Taxa interna de retorno (TIR)	26,63%
4	2.247,09	1.390,45	- 1.223,48	Valor presente líquido (VPL) - 5	R\$ 9,73
5	2.247,09	1.233,21	9,73	Valor presente líquido (VPL) - 12	R\$ 5.506,45
6	2.247,09	1.093,76	1.103,49	<p>TIR > = TMA → ACEITÁVEL TIR < TMA → REJEITÁVEL</p> <p>VPL > = (0) → ACEITÁVEL VPL < (0) → REJEITÁVEL</p>	
7	2.247,09	970,07	2.073,56		
8	2.247,09	860,38	2.933,94		
9	2.247,09	763,08	3.697,02		
10	2.247,09	676,79	4.373,81		
11	2.247,09	600,26	4.974,07		
12	2.247,09	532,38	5.506,45		

Fonte: O Autor (2022)

A primeira coluna da Tabela 7 apresenta o “Período” calculado que foi de 12 anos; a segunda coluna apresenta o “Fluxo de caixa”, esse contemplando o valor inicial do investimento (negativo) e conseqüentemente as entradas ou economia de energia; já a terceira traz o “Valor presente”, na qual envolve a relação entre a TMA, o período o fluxo de caixa; na quarta coluna é apresentado o “Valor presente acumulado” este está relacionado com o valor presente.

Diante dos cálculos efetuados nota-se que com a dinâmica de consumo apresentada, somente no 5º ano, o investimento começará a dar retorno financeiro de R\$ 9,73 (*payback* de 4,99 anos).

Quando a análise é estendida para o período de 12 anos, o Valor presente líquido (VPL) é de R\$ 5.506,45; além de apresentar Taxa interna de retorno (TIR) de 23,63%; assim pode-se afirmar que trata-se de um bom investimento para médio/longo prazo.

A utilização da TIR é uma metodologia frequentemente utilizada na análise de viabilidade (investimentos), pois irá definir a taxa de desconto que deve ter um determinado fluxo de caixa, com a intenção de zerar o VPL. Quando a TIR do projeto analisado ultrapassar a TMA, trata-se de um investimento aceitável, caso seja menor, o mesmo deverá ser recusado. A vantagem desse procedimento é sua fácil compreensão e divulgação na área de projetos e de investimentos dentro das empresas.

Com o objetivo de aprofundar o estudo da efetividade econômica da proposta, foram efetuados cálculos similares aos anteriores, entretanto considerando uma unidade consumidora com fornecimento em tensão inferior a 2,3 kV, do grupo B e subgrupo B2, onde o valor de energia é de R\$ 0,53224, a Tabela 8 apresenta o comparativo entre os dois tipos de acionamentos, sendo que proporciona um *saving* por hora de R\$ 1,0302.

Tabela 8 - Comparativa da energia consumida – PD x PIF (Grupo B - Subgrupo B2)

Acionamentos	Modo operação	Intermitência (%)	Potência média ensaios (kW)	Energia consumida total (kWh)	R\$/kWh	Custo em R\$ (1 hora)	Saving (R\$)
PD	Carga plena	70	8,301	6,5613	0,5322	3,4921	1,0302
	Alívio	30	2,502				
PIF	Carga plena	70	6,608	4,6256	0,5322	2,4619	
	Alívio	-	-				

Fonte: O Autor (2022)

Para esse caso e considerando a mesma dinâmica de operação, a Tabela 9 mostra que no 3º ano, com *payback* de 2,80 anos, o investimento apresentará retorno financeiro de R\$ 500,63.

Considerando análise para o período de 12 anos, apresentou VPL de R\$ 13.367,60; com TIR de 44,28%; na qual pode-se afirmar que é um ótimo investimento para curto prazo, com valores de VPL e TIR muito atrativos.

Tabela 9 - Cálculo retorno de investimento (Grupo B - Subgrupo B2)

Período (anos)	Fluxo de caixa (R\$)	Valor presente (R\$)	Valor presente acumulado (R\$)	Análise de investimento	
0	- 7.942,26	- 7.942,26	- 7.942,26	Investimento inicial	R\$ 7.942,26
1	3.560,58	3.157,94	- 4.784,32	Taxa mínima atratividade (TMA)	12,75%
2	3.560,58	2.800,83	- 1.983,48	Tempo em anos (<i>payback</i>)	2,80
3	3.560,58	2.484,11	500,63	Taxa interna de retorno (TIR)	44,28%
4	3.560,58	2.203,20	2.703,83	Valor presente líquido (VPL) - 5	R\$ 500,63
5	3.560,58	1.954,06	4.657,89	Valor presente líquido (VPL) - 12	R\$ 13.367,60
6	3.560,58	1.733,09	6.390,98	<p>TIR > = TMA → ACEITÁVEL TIR < TMA → REJEITÁVEL</p> <p>VPL > = (0) → ACEITÁVEL VPL < (0) → REJEITÁVEL</p>	
7	3.560,58	1.537,11	7.928,09		
8	3.560,58	1.363,29	9.291,38		
9	3.560,58	1.209,13	10.500,50		
10	3.560,58	1.072,40	11.572,90		
11	3.560,58	951,13	12.524,03		
12	3.560,58	843,57	13.367,60		

Fonte: O Autor (2022)

Assim a solução viabiliza realmente economia de energia elétrica, proporcionado redução de gastos com energia elétrica pela indústria, além de um acionamento mais harmonioso sem solavancos ao motor, pois permite operações suaves, com menores impactos a rede elétrica, quando comparado aos sistemas convencionais. É relevante que a aplicação de inversor de frequência no compressor alternativo de pistão irá reduzir consequentemente gastos de manutenção.

6 CONCLUSÃO

Considerando que o objetivo desse trabalho acadêmico foi de avaliar os diversos modelos de partida para motores elétricos aplicados em compressores alternativos de pistão, na qual foi comprovado que a solução com inversor de frequência apresenta vantagens em relação aos modelos tradicionais proporcionando uma maior eficiência do ponto de vista de consumo de energia elétrica.

Ponto importante do trabalho foi a avaliação de questões associadas a eficiência no sistemas de ar comprimido, pois é tema discutido e que tem grande impacto na indústria, pois o ar comprimido tem elevado consumo e conseqüentemente desperdícios, principalmente quando relacionado ao consumo de energia elétrica.

Um dos fatos relevantes comprovados, é que a corrente de partida nos motores utilizados em compressores alternativos de pistão podem chegar entre 7 a 8 vezes a corrente nominal; portanto nesse caso, a instalação elétrica do usuário deverá ser projetada para suportar essa elevada corrente de partida; isso quer dizer que durante o tempo da partida, para a instalação elétrica, é como se tivéssemos vários compressores operando simultaneamente; conseqüentemente impacta na necessidade de aumentar a capacidade de toda a estrutura elétrica; elevando de tal maneira os gastos.

Quando realizada a aplicação de acionamento via inversor de frequência diminuimos consideravelmente a corrente de partida, com valores muito próximos a nominal do motor, proporcionando redução significativa do custo da infraestrutura, além de não ocorrerem mais oscilações na rede elétrica devido aos picos de partida.

Com os ensaios efetuados foi possível verificar também a possibilidade de aumento na rotação do motor, para valores além da nominal, possibilidade de proporcionar aumento na vazão final do compressor de ar. A solução pode oportunizar redução no consumo de energia de até 20%, quando o compressor está em operação conforme determinações do fabricante, portanto em ciclos corretos; além dos ganhos de ordem mecânica e teoricamente em futuras manutenções.

A solução proporciona maior confiabilidade quando comparado com os acionamentos eletromecânicos tradicionais, o compressor contará com maior segurança, pois o inversor possui inúmeras proteções incorporadas, por exemplo: falta de fase, sentido de giro (pois caso esteja com o sentido de giro errado, o bloco compressor não refrigera e pode ser seriamente avariado), sobrecorrente (caso ocorra algum problema no bloco compressor que eleve a corrente do motor ou caso o ocorra

falha que aumente a pressão), subtensão, sobretensão, muitas delas configuráveis; conta ainda com acionamento remoto (liga/desliga), totalizador de horas em operação, protocolos de comunicação, entre outras vantagens.

Ressalta-se que para demanda de ar com tendência de consumo constante esse modelo de acionamento (PIF) não será tão satisfatório para aplicação, pois os modelos com velocidade fixa (PD, YD ou SS) possivelmente serão mais eficientes que o de velocidade variável, quando operando de maneira contínua.

Grandes dificuldades também foram encontradas durante a realização do estudo, como a montagem do protótipo, definição dos ensaios ideais para efeito comparativo, quais as curvas de performance mais eficazes para utilização no comparativo entre os sistemas de acionamento, definição do modelo de parametrização ideal para a dinâmica de operação proposta, todos alinhados aos estudos relacionados a parte mecânica do conjunto compressor/motor.

Mediante os inúmeros ensaios realizados na fase experimental desse trabalho, aliado ao estudo do retorno de investimento, pode-se comprovar que a solução é viável, pois apresenta *payback* aceitável para os dois exercícios de custos financeiros realizados, fato que comprova que os objetivos foram atingidos conforme proposta inicial do trabalho acadêmico, afirmando a efetividade financeira da solução proposta, com confiabilidade comprovada, além do objetivo geral que é a “Eficiência Energética” nos sistemas de ar comprimido.

O argumento proposto nesse trabalho não finaliza aqui, pois almeja outras oportunidades de estudo, pois há inúmeras oportunidades de análise comparativas, como a concepção de motores assíncronos dedicados para aplicação (projeto de motor especial), pois o estudo da dinâmica de operação do compressor proporcionou aberturas de outras possibilidades. Outro fato seria o estudo com motores mais eficientes, como por exemplo de ímãs permanentes, pois o uso de inversor de frequência já proporciona essa aplicação, situação que não é possível com acionamentos do tipo PD ou YD.

Realização de estudo de caso, contemplando comparativo de uma indústria utilizando equipamento com acionamento convencional, portanto partida direta ou estrela-triângulo com a solução proposta (inversor de frequência), de tal maneira será possível avaliar uma unidade consumidora literalmente e assim comprovar as vantagens.

Implantação de IHM (interface homem máquina) para visualização de variáveis de processo, como pressão, corrente, tensão, entre outras seria uma ótima opção para o usuário final.

REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 17094-1: **Máquinas Elétricas Girantes – Parte 1: Motores de indução trifásicos – Requisitos**. 77p. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2018.

ABNT. NBR 17094-1: **Máquinas Elétricas Girantes – Parte 3: Motores de indução trifásicos – Métodos de ensaios**. 121p. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2018.

ABRAMAN - **Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos**. Disponível em: < <https://abramanoficial.org.br/page/revista-manutencao> >. Acesso em 20 fev. 2022.

ACORDI Vasques Pacheco, Eduardo. **Eficiência energética de compressores de parafuso com variador de velocidade**. Estudo de caso/ Eduardo Acordi Vasques Pacheco. – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2018. VIII, 47 p.:

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica – Brasil, Tarifas Consumidores. 2022. Disponível em: < <https://antigo.aneel.gov.br/postos-tarifarios> >. Acesso em 25 mai. 2022.

ANEEL - Resolução Normativa nº 414, de 9 de setembro de 2010.

BARBI, Ivo. **Eletrônica de Potência**. 3. ed. Florianópolis: UFSC, 2000. 407 p.

Celesc - Centrais Elétricas de Santa Catarina S.A. 2020. Disponível em: < <https://www.celesc.com.br/tarifas-de-energia#tarifas-vigentes> >. Acesso em 26 mai. 2022.

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. Stephen J. Chapman; tradução: Anatólio Laschuk. – 5. ed. – Dados eletrônicos. – Porto Alegre: AMGH, 2013.

Compressores de ar de acionamento de velocidade variável (VSD). 2022. Disponível em: < <https://www.atlascopco.com/ptbr/compressors/wiki/compressed-air-articles/what-is-a-vs-d-compressor> >. Acesso em: 25 mar. 2022.

Compressores: guia básico / Eletrobrás [et al.]. Brasília: IEL/NC, 2009. 138 p. : il.

Consuar, Soluções em ar comprimido. Disponível em: < http://www.consuar.com.br/index_arquivos/ageracao.htm >. Acesso em: 10 abr. 2022.

Danfoss, Transmissores de pressão. Disponível em: < <https://www.danfoss.com/pt-br/products/sen/sensors-and-transmitters/industrial-pressure-transmitters/#tab-overview> >. Acesso em: 06 mai. 2022.

ELETRÓBRAS/PROCEL - Manual de Tarifação da Energia Elétrica. Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). Por dentro da conta de luz: informação de utilidade pública/ Agência Nacional de Energia Elétrica. 7. ed. - Brasília: ANEEL, 2016. 40 p.:il.

Eletrobrás et al. Compressores: guia básico. Brasília: IEL/NC, 2009.

Eletrobrás Motor Elétrico Premium – Rio de Janeiro: Eletrobras, 2016.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética] Balanço Energético Nacional (BEN) 2019: Ano base 2018, 2019. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br>>. Acesso em: 10 abril 2022.

FARGON, **Manual tratamento ar comprimido. 2006.** Disponível em: <http://www.fargon.com.br/manuais/manual_tratamento_ar_comprimido_Fargon.pdf> . Acesso em 02 jun. 2022.

FIALHO, Arivelto Bustamante. **Automação pneumática:** projetos, dimensionamento e análise de circuitos. 5. ed. São Paulo: Érica, 2011.

FLORES, D. C.; **Estudo e implementação de um inversor de frequência baseado em processador de sinais.** Pelotas: Centro politécnico da Universidade Católica de Pelotas, Trabalho de Conclusão de curso em Engenharia Elétrica; 2009.

FRANCHI, C.M. **Acionamentos elétricos.** 4. ed. São Paulo, Brazil: Érica LTDA., 2008.

FRANCHI, Claiton Moro. **Electrical Machine Drives:** fundamental basics and practice. Boca Raton, Fl: Taylor & Francis Group Llc, 2019. 403 p.

FREITAS, P. C. F. D. et al. **Comparação dos Rendimentos dos Motores da Linha Padrão e de Alto Rendimento sob o Enfoque da Eficiência Energética.** Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica, 2008

FREITAS, Gabriel. V. C. **Eficiência Energética em Motor de Indução Trifásico Através do uso de Inversor de Frequência PWM.** 85 p. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Ijuí, 2013.

GARCIA, A.G.P. **Impacto da lei de eficiência energética para motores elétricos no potencial de conservação de energia na indústria.** Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

Gitman, Lawrence J.. **Princípios de administração financeira.** 12. ed. São Paulo, Brasil: Pearson Prentice Hall, 2010.

JESUS, C. S. A. D. **Otimização energética em uma unidade industrial – O caso da Cerutil.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica / Energia e Automação Industrial) – Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, Instituto Politécnico de Viseu, 2012.

KARMOUCHE, A. R. **Análise da eficiência energética em compressores a pistão em sistemas de ar comprimido**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2009.

K. Ogata, **Engenharia de Controle Moderno**. 4ª edição, Guanabara Koogan, Rio de Janeiro, 2003.

LUGLI, Alexandre B. ARAUJO, Fábio M. FLORIANO, Giovanni H F. SILVA, João P d S. HENRIQUES, João P. VOLPATO, Romulo M. MASSELLI, Marcelo C. **Controle vetorial e escalar para motores de indução trifásicos**. 2015. Artigo II Seminário de Automação Industrial e Sistemas Eletro - Eletrônicos – SAISEE (ISSN 2319-0280), Minas Gerais, 2015.

MAMMED FILHO, J. **Instalações elétricas industriais**. 3. ed. Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos, 1989. 528p.

Manual inversor de frequência CFW 500. 2022. Disponível em: < WEG-CFW500-manual-de-programacao-10006739493-pt.pdf>. Acesso em 02 abr. 2022.

MARQUES, M. C. S., Haddad, J., & Martins, A. R. S. (Coord.). (2006). **Conservação de energia: eficiência energética de equipamentos e instalações** (3. ed.). Itajubá: Eletrobrás, Procel Educação, Unifei, Fupai.

MESQUITA, R. P. **Análise de viabilidade técnica-econômica para a aplicação de inversores de frequência em sistemas de bombeamento de baixa potência**. 2009. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Transmissão e Conversão de Energia) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009.

MONTEIRO, M.A.G.; ROCHA, C.A. **Eficiência energética em sistemas de ar comprimido**. Rio de Janeiro: Eletrobras; Procel, 2005. 208 p. (Manual Prático)

PAIXÃO, J. P. **Controle de velocidade de motores elétricos**. 2009. 81 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Especialização em Automação Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

PARKER TRAINING. **Dimensionamento de redes de ar comprimido**. Jacareí, 2006. Apostila M1004 BR.

PINHEIRO, Diego. 2015. **Análise dos distúrbios no transitório de partida de motores de indução trifásicos**. Tese (Bacharelado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Pará - Campus Tucuruí.

PINTO, Alvaro Braga Alves. Et al. **Motor elétrico: guia básico**. Brasília. IEL/NC. 2009. Volume único 194p.

PROCEL. **Programa nacional de conservação de energia elétrica**. Dados da instituição, 2012. Disponível em: <www.eletrobras.gov.br/EM_Programas_Procel/default.asp>. Acesso em: 03 mai. 2022.

ROLLINS, John P. (Ed.). **Manual de ar comprimido e gases**. [Compressed air and gas institute, 5th ed. (inglês)]. Tradução e revisão técnica de Bruno Eugen Buck. São Paulo: Prentice-Hall, 2004.

SCHULZ Compressores S.A, 2022. Disponível em: <<https://www.schulz.com.br/linha/industrial>>. Acesso em 05 fev. 2022.

SIEMENS, 2021. Soft Starter. Disponível em: <https://cache.industry.siemens.com/dl/files/752/109753752/att_961612/v1/manual_softstarter_3RW55_and_3RW55_Failsafe_pt-BR.pdf>. Acesso em 10 fev. 2022.

SILVA, Alisson da Costa. “**Sistema de Controle e Regulação em Equipamentos Elétricos**”, MARINHA DO BRASIL CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE GRAÇA ARANHA, Rio de Janeiro, 2016, 58P.

SILVA, F. L. B. S. FILHO. “**Estudo da Eficiência Energética no Sistema de ar comprimido da unidade V da Vicunha**”, Universidade Federal do Ceará – UFC, 2011, 40P.

STULL, Roland B. **The Atmospheric Boundary Layer**. In: WALLACE, John M.; HOBBS, Peter V. Atmospheric Science: An Introductory Survey. 2ª Washington: Elsevier, 2006. Cap. 9, p. 375-412.

TEIXEIRA, D. A. P.. **Motor de Indução Trifásico, o motor da indústria**. Disponível em: <<http://www.artigonal.com/tecnologias-artigos/motor-de-inducao-trifasico-o-motor-da-industria-5785432.html>>. Acesso em 10 abr. 2022.

UNICAMP, 2022. CONVERSORES CA-CC – RETIFICADORES. Disponível em: <<https://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/eltpot/cap3.pdf>>. Acesso em 10 mai. 2022

V. Brandão, P. Thé Pontes, R. S. Moreira, A. B. Schmidlin Jr, C. R. **Simulação do Percentual de Eficiência Energética em um Sistema de Ar Comprimido com acionamento a velocidade variável**. Anais II Congresso da ABEE 2007 em Vitória - ES, Brasil ABEE e CBEE.

WAYNE Compressores, 2022. Disponível em: <<https://www.wayne.ind.br/categoria/compressores-de-pistao/>>. Acesso em 30 mai. 2022.

WEG. **Motores de indução alimentados por conversores de frequência PWM**. Jaraguá do Sul – SC. Setembro 2006. Disponível em: <www.weg.net>. Acesso em 30 mar. 2022.

WEG. **Guia de especificação motores elétricos**. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h32/hc5/WEG-motores-eletricos-guia-de-especificacao-50032749-brochure-portuguese-web.pdf>>. Acesso em 22 abr. 2022.

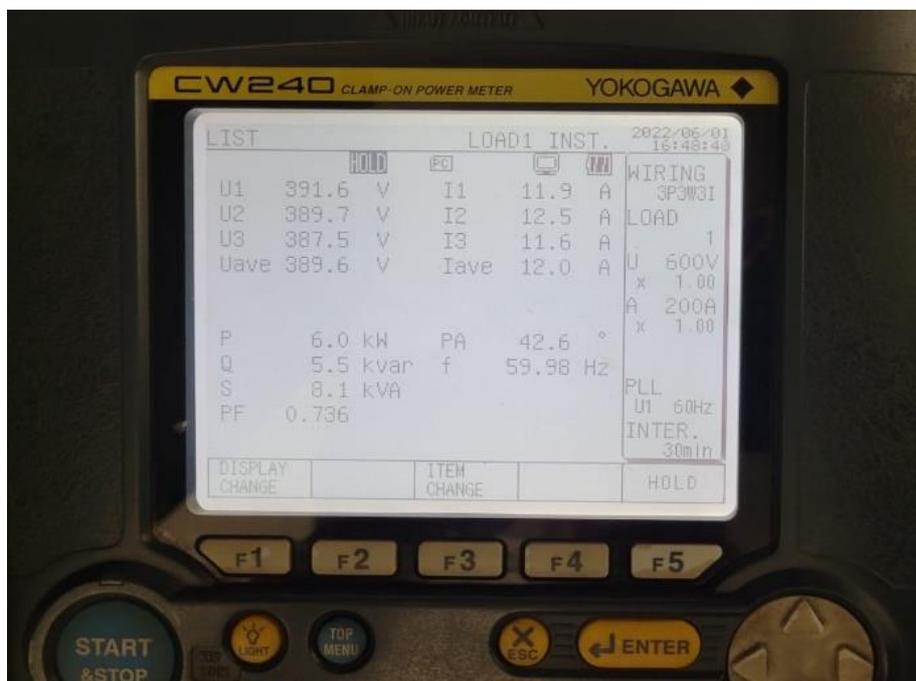
ANEXO A - Analisador de energia, modelo CW240 / Yokogawa, utilizado na aquisições variáveis elétricas

Figura 36 - Analisador de energia utilizado nos ensaios



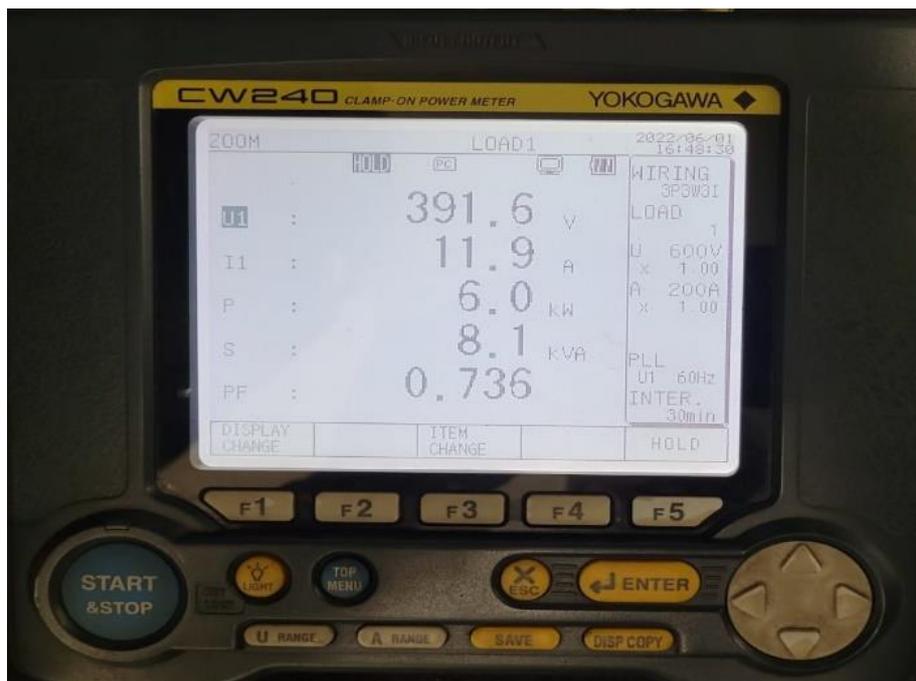
Fonte: <https://mesindustrial.com.br/fornecedores/yokogawa/mes-industrial-yokogawa-catalogo-portugues-bu05.pdf>

Figura 37 - Leitura de tensão, corrente, potência, FP, frequência (valor instantâneo)



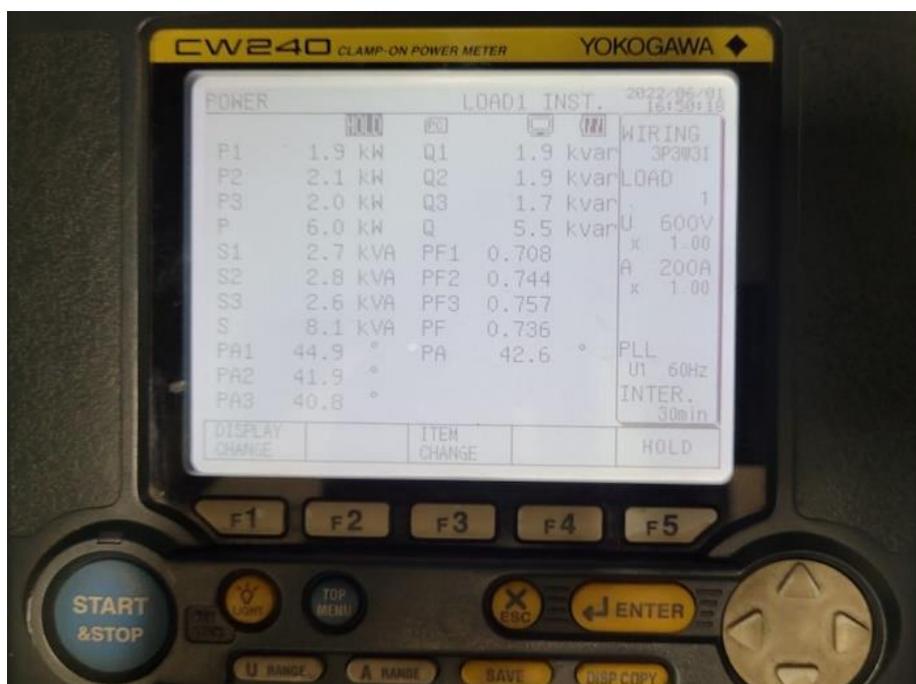
Fonte: O Autor (2022)

Figura 38 - Médias da tensão, corrente, potências e fator de potência (valor instantâneo)



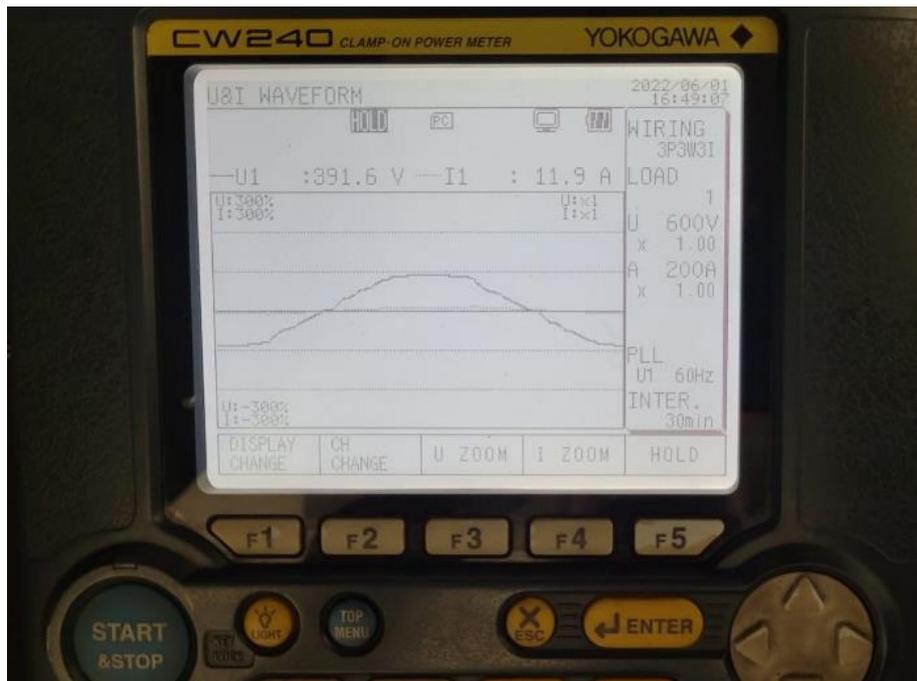
Fonte: O Autor (2022)

Figura 39 - Potências elétricas (valor instantâneo)



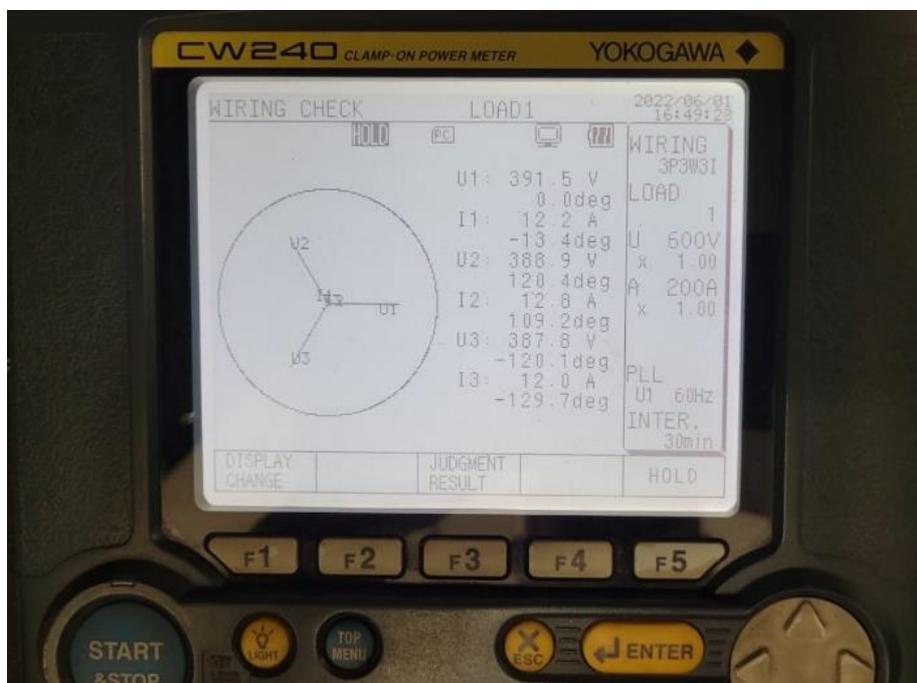
Fonte: O Autor (2022)

Figura 40 - Forma de onda, tensão e corrente de cada fase (valor instantâneo)



Fonte: O Autor (2022)

Figura 41 - Análise gráfica, ângulos de fase (valor instantâneo)



Fonte: O Autor (2022)

ANEXO B - Protótipo chave de partida com inversor de frequência, montada para realização dos ensaios

Figura 42 - Parte interna da chave de partida com inversor de frequência



Fonte: O Autor (2022)

Figura 43 - Frontal do protótipo da chave de partida com inversor de frequência



Fonte: O Autor (2022)

ANEXO C - Cotações materiais elétricos para montagem da solução proposta com inversor de frequência

Figura 44 - Cotação componentes elétricos Andra



Material[®] Elétricos

ANDRA SA ELECTRIC SOLUTIONS
RUA XV DE NOVEMBRO, 3935
GLORIA - JOINVILLE - SC 89216202
Tel:(47) 34197000 Fax:(47) 34197000
Cnpj: 47674429000551
Ie: 255149034
www.andra.com.br

Joinville, 2 de Junho de 2022

Orçamento: F02239/5

Conforme solicitado, segue proposta comercial

Item	Qtde	Descrição dos Produtos	Ncm	Um	Pr. Unit.	Pr. Total	Prev. Entrega	% Icms
01	1,00	INVERSOR FREQ 15CV 11KW 380/440V ATV71HD11N4Z TRIF TERM GRA - SCHNEIDER	8504.40.50	PC	10.286,82	10.286,82	24/06/22	12
02	1,00	QUADRO COMANDO 600X500X250MM CMF-17 C/FLANGE IPS4 - OPCAO	8536.10.00	PC	428,27	428,27	24/05/22	17
03	1,00	BOTAO 22MM 1NF VM SOCO EMERG GIR D40MM PLAST XA2ES542 - SCHNEIDER	8536.50.90	PC	23,52	23,52	24/05/22	17
04	1,00	BLOCO CONTATO 1NF M20-1B - METALTEX	8536.50.90	PC	7,08	7,08	24/05/22	17
05	1,00	CHAVE SECCION 3P 25A FIX/BASE REV/ROT MAN VM MSWR25-3 1268 - WEG	8536.50.90	PC	447,58	447,58	24/05/22	17
06	1,00	DISJUNTOR 2P 2A C 3KA 230V MDW-C2-2 10076383 - WEG	8536.20.00	PC	41,47	41,47	24/05/22	17
07	10,00	CONECTOR PASSAGEM 2,5MM MTB2,SEN PITS32/35 - METALTEX	8536.90.40	PC	3,29	32,90	24/05/22	17
08	2,00	CONECTOR PORTA-FUS SAKS1 PA BG C019126.00 - CONEXEL	8536.10.00	PC	50,60	101,20	24/05/22	17
09	2,00	FUSIVEL VIDRO 5X20MM 1,5A - FUSIBRAS	8536.10.00	PC	0,54	1,08	24/05/22	17
10	1,00	CONTR. LOGICO PROGRAMAVEL - DIVERSOS	7326.19.00	PC	4.758,00	4.758,00	08/09/22	17
11	1,00	COTADO NOSSO CLP PLC300 COM IHM INCORPORADA. - DIVERSOS	7326.19.00	PC	0,01	0,01	27/05/22	17

Total: 16.127,93

Forma de Pagamento : 28 DDL
Valores em reais
Frete: FOB

Estamos a disposicao para quaisquer esclarecimentos que se fizerem necessarios.

Atenciosamente

Geovani
geovani@andra.com.br
47 3419 7008

Ativar o Windows
Acesse Configurações

Fonte: Andra Materiais Elétricos (2022)

Figura 46 - Cotação componentes elétricos Dimensional



dimensional
A Sonapar Company

DIMENSIONAL BRASIL SOLUÇÕES LTDA
AV ARMANDO FRACCHINI, 180
C/P 13481315 - LINHOS - SP
CNPJ 067348007652
Insc. Est. 47192227112
Tel.
www.dimensional.com.br



EPIs
Uma unidade de negócio
que oferece soluções em
Equipamentos de Proteção
Individual, Coletores
e Serviços.

Orçamento No. 1394649

01/06/2022

ITEM	CÓDIGO	DESCRIÇÃO	C. FISCAL	ICMS	QTD	UNID	PREÇO UNITÁRIO	PREÇO TOTAL	ICMS ST	FATURAMENTO EM
1	113303	INVERSOR 3F 380-480V 24A 16CV RFI CFW6000MPT4800C3-IMP5M 14000466 WEG	3604630	12,00	1	PC	7.698,76	7.698,76	0,00	até 16 dias
2	243491	QUADRO COMANDO 500 AC 600 600X 250MM C/PLANCE CORRIGIDA 901127 COMAR	3636100	12,00	1	PC	674,14	674,14	0,00	até 1 dia
3	35434	BOTÃO CDD 40MM VM 25MM 1NF CDR 3586130148001CA0 A701001213981 SIEMENS	3636090	4,00	1	PC	67,03	67,03	0,00	até 23 dias
4	35363	BLOCO CONTATO 1NF 35864001AA101CA0 A7010001214001 SIEMENS	3636090	4,00	1	PC	13,03	13,03	0,00	até 23 dias
5	127967	ROLE INTERFACE 2VCC BA LED VO 26EV 482712040025PA FINISOR	36364100	4,00	2	PC	72,61	145,22	0,00	até 16 dias
6	94007	VENTILADOR MINI ABAL EMB AL 120220V PT 3001200120MM 611AL 611ALCO 40101 VENTISILVA	3416590	12,00	1	PC	140,07	140,07	0,00	até 1 dia
7	281204	CONJUNTO EXAUSTOR GRELHA/FILTRO IP54 1300130 96100 30010010 TASC0	3414920	12,00	1	PC	61,51	61,51	0,00	até 1 dia
8	165462	INTERRUPTOR SECCIONADOR 3P 25A 600VCA 10KA C/MANOPLA VCCFO SCHNEIDER	3636090	4,00	1	PC	426,20	426,20	0,00	até 23 dias
9	962565	DISJUNTOR MINI 2P 6A 22000VCA CURVA B 3KA 65L1006080 SIEMENS	3636000	4,00	1	PC	118,87	118,87	0,00	até 1 dia
10	220524	CONNECTOR PASSAGEM PA CZ 24A 2,5MM2 (PT2,5 3208610 PHOENIX CONTACT	3636090	4,00	10	PC	3,67	36,70	0,00	até 1 dia
11	219448	CONNECTOR PORTA FUSIVEL PA PT 0(6,0 X 20MM) 6,3A 02-4 MM2 U LINGHESI 300100 PHOENIX CONTACT	3636100	4,00	2	PC	44,36	88,72	0,00	até 40 dias
12	1187176	CONTROL CLP 24V 80(A) 40 TRANS 6011012200000A1 SIEMENS	36371020	4,00	1	PC	771,78	771,78	0,00	até 23 dias
13	100101	INTERFACE CLP KTP400 6AV7122200000A0 SIEMENS	3636090	4,00	1	PC	4.336,52	4.336,52	0,00	até 1 dia
SUB-TOTAL								14.408,56	0,00	
SUGESTÃO INVERSOR										
14	160867	INVERSOR 3F 380-480V 25A 16CV V20 65L321058631110V SIEMENS	3604630	4,00	1	PC	5.537,58	5.537,58	0,00	até 23 dias
15	22965	INVERSOR 3F 380-480V 24A 16CV ATV710 ATV710H011NE SCHNEIDER	3604630	4,00	1	PC	6.139,48	6.139,48	0,00	até 220 dias
16	169896	INVERSOR 3F 380-480V 23,1A 16CV ACS36403623A14 3AL40000058102 ABB	3604630	4,00	1	PC	7.688,05	7.688,05	0,00	até 21 dias
SUB-TOTAL								19.365,11	0,00	
VALORES TOTAIS DESTE ORÇAMENTO:										
									TOTAL SEM ICMS ST	30.803,66
									TOTAL ICMS ST	0,00
									TOTAL COM ICMS ST	30.803,66

Em caso de fechamento do pedido de compras, torna-se imprescindível a referência do nosso número de orçamento em seu pedido.

*** FATURAMENTO MÍNIMO DE R\$ 500,00 PARA DENTRO DO ESTADO EMISSOR ***

*** FATURAMENTO MÍNIMO DE R\$ 1.000,00 PARA FORA DO ESTADO EMISSOR ***



Chame seu Anjo da Guarda
Plantão 24 Horas: (19) 3446-7400