

CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIFACVEST  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
CLEIDSON JUNIOR ANTONIO DA SILVA

**MANUTENÇÃO PREDITIVA COM TECNOLOGIA IOT ATRAVÉS DE  
SENSORES DE VIBRAÇÃO EM MOTORES DE INDUÇÃO**

LAGES  
2019

CLEIDSON JUNIOR ANTONIO DA SILVA

**MANUTENÇÃO PREDITIVA COM TECNOLOGIA IOT ATRAVÉS DE  
SENSORES DE VIBRAÇÃO EM MOTORES DE INDUÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário UNIFACVEST como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Francieli Lima de Sá

LAGES

2019

## TERMO DE APROVAÇÃO

*Dedico este trabalho a Deus. Que esteve presente me dando força e vontade de continuar no decorrer da graduação. Dedico também aos meus Pais, vocês são minha inspiração.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, que tem me abençoado grandiosamente desde o início do curso. Agradeço aos meus amigos da graduação, que passaram junto comigo fases boas e ruins nos cinco anos de curso. Foi gratificante ver a evolução pessoal e profissional de cada um.

Agradeço em especial a meu pai - Nilton da Silva. Que nunca negou apoio e ajuda quando precisei, e minha mãe - Marta Antonio de Amorim da Silva, que mesmo de longa distância foi presente em tudo o que passei em Lages, me dando conselhos, puxões de orelha e palavras de conforto. Enfim, muitíssimo obrigado. Amo vocês!

## RESUMO

Falhas em motores elétricos podem acontecer quando menos se espera, por isso é necessário manter um controle integral de variáveis cruciais para o desempenho e eficiência do motor visando manter o mesmo em pleno funcionamento durante seu ciclo de trabalho. Buscando alcançar resultados de excelência na manutenção industrial através das mais novas tecnologias, garantindo 100% de produtividade, o presente trabalho mostra a importância da manutenção preditiva Online de motores elétricos, ilustrando sua eficiência comparando com métodos comuns utilizados na manutenção, precisão para tomada de decisões dos setores de planejamento de manutenção, nivelamento de informações do estado dos ativos através da comunicação multidirecional por meio de redes de comunicação, emissores de sinais e armazenamento de dados em nuvem. Além disso, serão apresentados no trabalho alguns métodos para detecção de falhas em motores elétricos, explicitando os conceitos e funcionalidades de cada modelo.

**Palavras-chave:** Internet das Coisas, Análise de vibração, Manutenção Preditiva, motor elétrico.

## ABSTRACT

Failures in electric motors can happen when you least expect them, so it is necessary to maintain complete control of variables crucial to motor performance and efficiency to keep the motor running smoothly during its duty cycle. Aiming to achieve results of excellence in industrial maintenance through the latest technologies, ensuring 100% productivity, the present work shows the importance of online predictive maintenance of electric motors, illustrating its efficiency compared to common methods used in maintenance, precision for decision making. sectors of maintenance planning, asset state leveling through multidirectional communication through communication networks, signal emitters and cloud data storage. In addition, some methods for fault detection in electric motors will be presented, explaining the concepts and functionalities of each model.

**Keywords:** Internet of things, Vibration analysis, Predictive Maintenance, Electric Motor.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da manutenção nas quatro gerações .....	24
Figura 2 - Principais aspectos das quatro gerações da manutenção .....	26
Figura 3 - Evolução dos tipos de manutenção .....	28
Figura 4 - Esquemática da vida de uma máquina ou equipamento.....	30
Figura 5 Movimento Oscilatório de um ponto P.....	36
Figura 6 Valor da Velocidade de vibração.....	37
Figura 7 Nomograma de vibração e critérios de vibração .....	38
Figura 8 Esquema básico de medição de vibração .....	39
Figura 9 - Funcionamento Transdutor de Deslocamento.....	40
Figura 10 - Instalação transdutor de deslocamento Indutivo.....	41
Figura 11 - Transdutor de vibração indutivo Trigger.....	42
Figura 12 - Forma construtiva do transdutor de velocidade .....	42
Figura 13 - Forma construtiva de um Acelerômetro com cristal Piezoelétrico .....	44
Figura 14 - Curva de resposta característica do Acelerômetro.....	45
Figura 15 - Forma de onda do sinal Analógico.....	46
Figura 16 - Forma de onda do sinal Digital .....	47
Figura 17 - Sinais no Domínio do Tempo e da Frequência .....	48
Figura 18 - Coleta das Amostras.....	48
Figura 19 - Limitando o Espectro da onda .....	49
Figura 20 - Digitalizando o Sinal .....	49
Figura 21 - Ciclo de Varredura (Scan) .....	51
Figura 22- Arquitetura Básica do CLP .....	53
Figura 23- Ligação de entrada NPN.....	55
Figura 24 - Ligação de entrada PNP.....	55
Figura 25- Ligação de Saída NPN.....	56
Figura 26 - Ligação de Saída PNP.....	56
Figura 27- Interface de Entrada Analógica.....	58
Figura 28- Ligação de Entrada Analógica de Tensão .....	59
Figura 29 - Ligação de Entrada Analógica de Corrente .....	59
Figura 30 - Interface De Saída Analógica .....	60
Figura 31 - Ligação da Saída Analógica de tensão .....	61
Figura 32 - Ligação de Saída Analógica de Corrente.....	62
Figura 33 - Trama Ethernet.....	64
Figura 34 - Exemplos de Aplicações com os canais Profinet .....	66
Figura 35 - Dedução da equação do conjugado em um objeto .....	67
Figura 36 - Motor de Indução Trifásico com rotor de gaiola.....	70
Figura 37 - Motor de Indução Trifásico do Tipo Rotor Enrolado.....	70
Figura 38 - Tensão Induzida Máxima.....	72
Figura 39 - Tensão e Corrente Máxima Induzida.....	72
Figura 40 - Tensão Líquida.....	72
Figura 41 - Circuito Equivalente de um Motor de Indução - com rotor e estator conectados por meio de um transformador ideal.....	73
Figura 42 - Etapas do Projeto.....	74
Figura 43 - Compressor de Amônia Mayekawa e motor Elétrico Weg 250 cv .....	75
Figura 44 - Compressor Mayekawa 2 e motor Weg 250 cv .....	76



Figura 45 - Sensor de Vibração IFM VTV122.....	77
Figura 46 - CLP Simatic S7-200 .....	78
Figura 47 - Posição correta de instalação do Sensor De Vibração VTV122 .....	79
Figura 48 - Montagem mecânica do Sensor de Vibração VTV122 .....	79
Figura 49 - Atribuição dos pinos sensor de vibração VTV122 .....	80
Figura 50 - Conexão do Sensor com o CLP S7-1200 .....	80
Figura 51 - Esquema de conversão de um sinal Analógico no CLP .....	81
Figura 52 - Blocos NORM_X e SCALE_X referente ao valor "Bom" .....	83
Figura 53 - Lógica de programação do valor "Bom" .....	83
Figura 54 - Blocos NORM_X e SCALE_X referente ao valor "Satisfatório" .....	84
Figura 55 - Lógica de programação do valor "Satisfatório" .....	84
Figura 56 - Blocos NORM_X e SCALE_X referente ao valor "Insatisfatório" .....	84
Figura 57 - Lógica de programação do valor "Insatisfatório" .....	85
Figura 58 - Blocos NORM_X e SCALE_X referente ao valor "Inaceitável" .....	85
Figura 59 - Lógica de programação do valor "Inaceitável" .....	85
Figura 60 - Alerta de nível "Bom" .....	86
Figura 61 - Alerta de nível "Satisfatório" .....	87
Figura 62 - Alerta de nível "Insatisfatório" .....	87
Figura 63 - Alerta de nível "Inaceitável" .....	88

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Custo de manutenção em relação ao faturamento Bruto .....	25
Tabela 2 Técnicas de Manutenção Preditiva .....	32
Tabela 3 Principais Variáveis e equipamentos que a utilizam .....	33
Tabela 4 - Variantes Ethernet.....	63
Tabela 5 - Conversão de entrada analógica.....	81
Tabela 6 - Declaração de Variáveis .....	82

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	–	Associação Brasileira de normas técnicas
Abraman	–	Associação Brasileira de manutenção e gestão de ativos
ADC	–	Conversor Analógico Digital
CLP	–	Controlador Lógico Programável
CPU	–	Unidade Central de Processamento
DC	–	Corrente Contínua
DIN	–	Instituto Alemão de Normatização
EMI	–	Alta imunidade a ruídos
E/S	–	Entrada / Saída
FCS	–	Sequência de vibração de quadro
IEC	–	Comissão Eletrotécnica Internacional
IOT	–	Internet das Coisas
IIOT	–	Industrial Internet das Coisas
IHM	–	Interface Homem Máquina
IRT	–	Tempo Real isócrono
ISO	–	Organização Internacional de Normatização
IEEE	–	instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
ML	–	Aprendizado de Máquina
NRT	–	Tempo não Real
RMS	–	Valor eficaz
RT	–	Tempo Real
SFD	–	Iniciar delimitador de quadros

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Ampère
$a$	Aceleração
$AGND$	Terra
$AIN$	Entrada Analógica
$\frac{bit}{s}$	Largura de banda
$\cos \Phi$	Cosseno de $\phi$
$e$	Deslocamento
$e(ind)$	Campo Magnético Induzido
$f$	Frequência
$H$	Intensidade de Campo Magnético
$I$	Corrente elétrica
$Kw$	Potência Elétrica
$Kwh$	Consumo de Energia Elétrica
$ms$	Massa sísmica
$MTBF$	Tempo médio entre falhas
$MTTR$	Tempo Médio entre Reparos
$\eta$	Rendimento
$NH3$	Amônia
$\eta(sinc)$	Velocidade do Campo Magnético
$P$	Potência Elétrica
$s$	Escorregamento
$\tau$	Torque
$\tau(ind)$	Torque Induzido
$v$	Velocidade
$V$	Tensão Elétrica
$Wp$	Energia Mecânica Potencial
$Wc$	Energia Mecânica Cinética
$w$	Trabalho

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
1.1 Objetivos	19
1.1.1 Objetivo geral	19
1.1.2 Objetivos específicos	19
1.2 Justificativa	19
1.3 Metodologia	20
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>21</b>
2.1 Conceitos de manutenção	21
2.2 Histórico da manutenção	23
2.2.1 Quarta revolução Industrial – Indústria 4.0	25
2.3 Modelos de manutenção	27
2.3.1 Manutenção Corretiva	28
2.3.2 Manutenção Preventiva Periódica	29
2.3.3 Manutenção com Base no Diagnóstico do estado do equipamento (Manutenção Preditiva)	29
2.4 Principais Técnicas de Manutenção Preditiva	31
2.5 Análise de vibração	34
2.5.1 Transdutores de vibração	39
2.6 Tratamento e Processamento de Sinais de entradas Analógicas	45
2.7 Redes <i>Ethernet</i>	62
2.7.1 Protocolo de Comunicação Profinet	65
2.8 MOTORES ELÉTRICOS	66
2.8.1 Conjugado ou Torque	67
2.8.2 Trabalho Mecânico	67
2.8.3 Potência	68
2.8.4 Rendimento	68
2.8.5 Campo Magnético	68
2.8.6 Motor de Indução Trifásico	69
<b>3 METODOLOGIA E MATERIAIS</b>	<b>74</b>
3.1 Definição dos Motores a serem analisados	74
3.1.1 Motor 1	74
3.1.2 Motor 2	75
3.2 Escolha e Orçamento dos Sensores	76

3.3 Escolha e orçamentação do CLP.....	78
3.4 Montagem e Instalação dos sensores.....	78
3.4.1 Montagem Mecânica.....	78
3.4.2 Conexão Elétrica.....	80
3.5 Programação do CLP.....	81
3.6 RESULTADOS.....	86
<b>4 CONCLUSÃO .....</b>	<b>89</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>90</b>
<b>APÊNDICE A – PROGRAMAÇÃO DO CLP.....</b>	<b>98</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento de novas tecnologias e a chegada da Indústria 4.0, surgiram novas demandas para atender processos de manufatura industriais com precisão e eficiência de modo a otimizar a disponibilidade de ativos afim de evitar paradas por manutenção. O IOT (internet das coisas) foi implantado na manutenção com a finalidade de auxiliar a detecção de anomalias em máquinas e equipamentos com alta precisão das informações e frequentes relatórios de condição do ativo disponibilizados para o usuário gestor e armazenando informações nas nuvens para gerenciamento do histórico de falhas. (BOND, 2017)

O objetivo da manutenção preditiva é reduzir o tempo de inatividade e o custo de manutenção sob a premissa de fabricação com falha zero, monitorando a condição de trabalho do equipamento e prevendo quando a falha do equipamento pode ocorrer. A previsão para futura falha potencial permite que a manutenção seja planejada antes que a falha aconteça. Idealmente, o cronograma de manutenção pode ser otimizado para minimizar o custo de manutenção e alcançar a fabricação com falha zero. No entanto, é difícil obter todas as vantagens da manutenção preditiva sem a fundação de técnicas de correlação, como o big data e computação em nuvem. A indústria 4.0 refere-se a uma quarta geração de atividade industrial como resultado da quarta revolução industrial caracterizada por sistemas inteligentes e soluções baseadas na internet. (Li e Wang, 2016)

Nos últimos anos, muitas iniciativas de manufatura promoveram a necessidade da instalação de produção inteligente afim de tornar o processo mais eficiente e eficaz utilizando a tecnologia. Iniciativas como a indústria 4.0 foram adotadas por vários países como um modelo baseado em processador inteligentes para melhorar a produtividade e eficiência numa esfera global. Recentemente, o conceito de fábrica conectada vem sido conseguido através do IOT aumentando a eficácia operacional em visibilidade das métricas de produção e processo nunca imaginado antes (BOND, 2017)

O desenvolvimento de tecnologias como I4.0 e IoT, traz consigo uma mudança de paradigma, melhorando a habilidade de reparo e substituição de componentes individuais, melhorando o entendimento da condição de um produto e do planejamento de manutenção baseado na disponibilidade de um volume de dados significativamente grande, o chamado Big Data. Sistemas dotados de sensores e gerenciamento de dados através da “nuvem” resultaram na migração do monitoramento ao nível do componente para o monitoramento a nível de todo sistema, além disso, também houve a migração do foco da manutenção, do planejamento baseado em recursos para o planejamento e otimização de todo o sistema (SOARES; MATHEUS, 2017)

De acordo com GILCHRIST (p. 14), A introdução da IOT na gestão de manutenção é recente, sendo utilizada inicialmente nas redes industriais de

comunicação com o objetivo de prever e diagnosticar problemas no processo produtivo. Consequentemente, proporcionou uma confiável base estratégica para as manutenções preditiva e proativa na indústria utilizando protocolos de comunicação como o industrial Ethernet que tem compatibilidade com o Ethernet que já é utilizado em alguns setores das indústrias.

A internet das coisas, originou um novo interesse em inovação em torno de soluções de monitoramento de condições de máquinas. A precisão de sensores melhores e mais baratos, ampla conectividade, análises mais sofisticadas, armazenamento de dados mais barato, e a tecnologia de armazenamento em nuvens abriu um novo conceito substituindo a manutenção de maneira geral. Utilizando o planejamento de manutenção através da manutenção preditiva com base em dados obtidos em tempo real, o tempo de inatividade não planejado é minimizado aumentando a lucratividade (PACKARD, 2017)

A IOT vem progredindo e suas aplicações aumentando cada vez mais. É a tecnologia que faz a comunicação para anexar coisas físicas a rede, analisando os dados tendo em muitas das vezes controle automático. A manutenção é uma das áreas de maior aplicação da IOT refletindo diretamente no plano de produção fabril (YAMATO; FUKUMOTO; KUMAZAKI, 2012)

A internet das coisas (IOT) e Big Data oferecem às empresas capacidade de agregar fontes de dados existentes, ganhar visibilidade e identificar padrões por meio de análises para melhorar as decisões de negócios. De acordo com um recente relatório de pesquisa conduzido pelo Aberdeen Group, as empresas “Best-in-Class” vem utilizando cada vez mais IOT e Big Data para implementar modelos de manutenção preditiva e melhorar suas eficiências operacionais (DELL IOT SOLUTIONS, 2016)

Manutenção preditiva se conceitua como a manutenção que avalia variáveis para antecipação de falhas, predizendo o momento em que equipamentos poderão ficar fora de operação por falha de manutenção. Essa técnica busca possíveis desvios que indicam um comportamento fora do padrão da máquina. Ao longo dos anos, alguns procedimentos foram desenvolvidos para a utilização da manutenção preditiva, tais como análises químicas de viscosidade, medição de variáveis por sensores eletrônicos, softwares de acompanhamento, etc. Esses procedimentos normalmente são executados por profissionais especializados. (LEME, 2017)

Motores elétricos representam uma grande e significativa importância nos processos de manufatura, porém, devido à grande quantidade de motores existentes



na indústria, se torna difícil o controle de manutenção e peças sobressalentes dos mesmos. (LEME, 2017)

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo geral

Apresentar resultados em análises preditivas online de motores elétricos com a tecnologia IOT, utilizando diversos métodos de medição, alguns protocolos de comunicação de dados mostrando as vantagens e desvantagens de cada um, além dos melhores meios de armazenamento e processamento de informações oriundas das medições realizadas através de sensores.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Dentre os principais objetivos podemos citar:

- Analisar variáveis de vibração de motores elétricos;
- Estudar o melhor meio para armazenar e apresentar gráficos do histórico de falhas;
- Apresentar os ganhos com a aplicação do sistema de monitoramento online;
- Apresentar os custos de aquisição, operação e manutenção do sistema de monitoramento *online*.

## 1.2 Justificativa

Devido a modernização dos modelos de manutenção, técnicas antigas vêm sendo substituídas por modelos modernos de manutenção com base em sistemas de informação afim de otimizar a precisão, qualidade e quantidade de informações transmitidas entre máquina e usuário. Motores elétricos são considerados o coração de equipamentos não estáticos, tendo em vista que a grande maioria de máquinas e equipamentos tem como força motriz de acionamento motores elétricos, que geralmente transmitem força para movimentar sistemas como redutores, bombas, esteiras, roscas transportadoras, fusos de elevadores, entre outros.

A importância de ter um controle rigoroso de motores elétricos se deve não apenas pelo fato do mesmo poder falhar, mas sim de operar dentro de condições favoráveis que garantam sua máxima eficiência, evitando gastos desnecessários com energia elétrica.

### **1.3 Metodologia**

O trabalho será apresentado por meio de uma pesquisa quanti-qualitativa. Será mostrado análises oriundas de artigos científicos, livros e revistas, gráficos e tabelas mostrando medições oriundas de testes práticos e aferições estatísticas.

O trabalho está estruturado em quatro capítulos. O primeiro se trata do capítulo introdutório apresentando resumidamente o desenvolvimento da pesquisa. O segundo capítulo mostra a fundamentação teórica para alicerçar através de trabalhos de vários autores todos os temas apresentados no trabalho. O terceiro capítulo apresenta a metodologia e materiais utilizados na execução do tema proposto, e também os custos de aquisição e instalação. Por fim, o quarto e último capítulo mostra as conclusões obtidas sobre o referendo trabalho.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Conceitos de manutenção

Segundo ABNT (1994), Manutenção é o arranjo das ações técnicas e administrativas, envolvendo as de supervisão, designado a manter ou recolocar um ativo em um estado que possa desempenhar sua função conforme seu estado original de funcionalidade.

Atualmente, manutenção se define como: “ Uma função empresarial, da qual se espera um sistematizado controle das instalações através de um conjunto de técnicas e padrões necessários para garantir o perfeito funcionamento dos equipamentos”. (Dias ([2005])

Órgãos normalizadores definem o conceito de manutenção, definindo-a como agregação de cuidados e metodologias técnicas necessários ao bom funcionamento e também ao restauro de máquinas, equipamentos, componentes e instalações. (ALMEIDA, 2017)

Dentre todos os adjetivos que definem manutenção, podemos conceituar os principais objetivos que conforme Silva Neto e Lima (2002), são:

- Prever uma margem de avarias ou quebras durante o processo produtivo;
- Manter o equipamento em condições de utilização seguras;
- Manter o máximo de eficácia dos equipamentos;
- Reduzir ao mínimo as paradas por avarias;
- Reduzir ao mínimo os custos da manutenção;
- Manter um alto nível técnico na execução dos trabalhos.

Existe, um grande volume de livros e artigos que tratam de manutenção dos mais variados tipos de máquinas e equipamentos, que na maioria das vezes são de natureza teórica baseadas em estatísticas na qual mostram a vida útil de cada máquina, equipamento ou componente. Livros textos tratam o assunto de maneira geral ou específica, apresentando interesses para a maior parte das instalações industriais. (NEPOMUCENO, 1989)

Para NEPOMUCENO (1989), toda e qualquer máquina e equipamento apresenta certa deterioração com o tempo. Com o aparecimento de tecnologias, técnicas visando a confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade foram criadas nas últimas décadas.

Com o surgimento da economia globalizada, verificou-se um aumento na demanda por produtos e serviços com alta qualidade e baixo custo, conseqüentemente, surgiu a necessidade na diminuição de quebras e falhas tendo em vista manter o valor agregado competitivo ao produto, resultando numa crescente ênfase em sua confiabilidade. (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011)

A confiabilidade é tratada geralmente de maneira intuitiva, porém, muitas são as dificuldades de contextualiza-la, tal dificuldade se deve as diversas situações que especialistas encontram nas suas atividades. De modo global, é possível definir confiabilidade como “um dispositivo que cumpre suas funcionalidades estabelecidas em projeto, independente de condições favoráveis ou adversas”. Para se garantir a confiabilidade de um sistema, é fundamental assegurar a confiabilidade de todos os componentes. (NEPOMUCENO, 1989)

Tendo em vista o processo de garantia da confiabilidade, torna-se necessário a intervenção em um sistema ou componente que apresenta condições de uso fora do padrão estabelecido, dentro deste conceito, NEPOMUCENO (1989) afirma que a concepção de manutenibilidade foi desenvolvida no início da revolução industrial, com o intuito de manter o maquinário trabalhando ininterruptamente. Porém a manutenção começou a ser estudada após o fim da segunda Guerra Mundial, influenciada por tecnologias criadas no período. Ulteriormente, teóricos equacionaram e contextualizaram o termo manutenibilidade, definindo como produto que executa satisfatoriamente as funções as quais foi destinado podendo ser sustentado durante sua vida útil com o menor custo e trabalho.

Atualmente, a ociosidade de máquinas e equipamentos decorrentes de quebras, baixo desempenho e qualidade são mensurados em grande parte das indústrias de manufatura através do indicador de Disponibilidade. Esse indicador enfatiza dentro do processo equipamentos com maior impacto na eficiência, possibilitando uma assertiva tomada de decisão da área de manutenção.

Disponibilidade é definida como a Capacidade de um item estar em condições de executar uma certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, levando-se em conta os aspectos combinados de sua confiabilidade, manutenibilidade e suporte de manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados. (ABNT, 1994, p.2)

A disponibilidade é uma métrica imprescindível utilizada na avaliação de confiabilidade e desempenho de equipamentos, sendo calculada de maneira global pela equação 1 (TELES, 2017).

$$\%Indisponibilidade = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \cdot 100 \quad (1)$$

Onde:

MTBF: *Mean Time Between Failures* – Tempo Medio entre Falhas;

MTTR: *Mean Time To Repair* – Tempo Médio para Reparo.

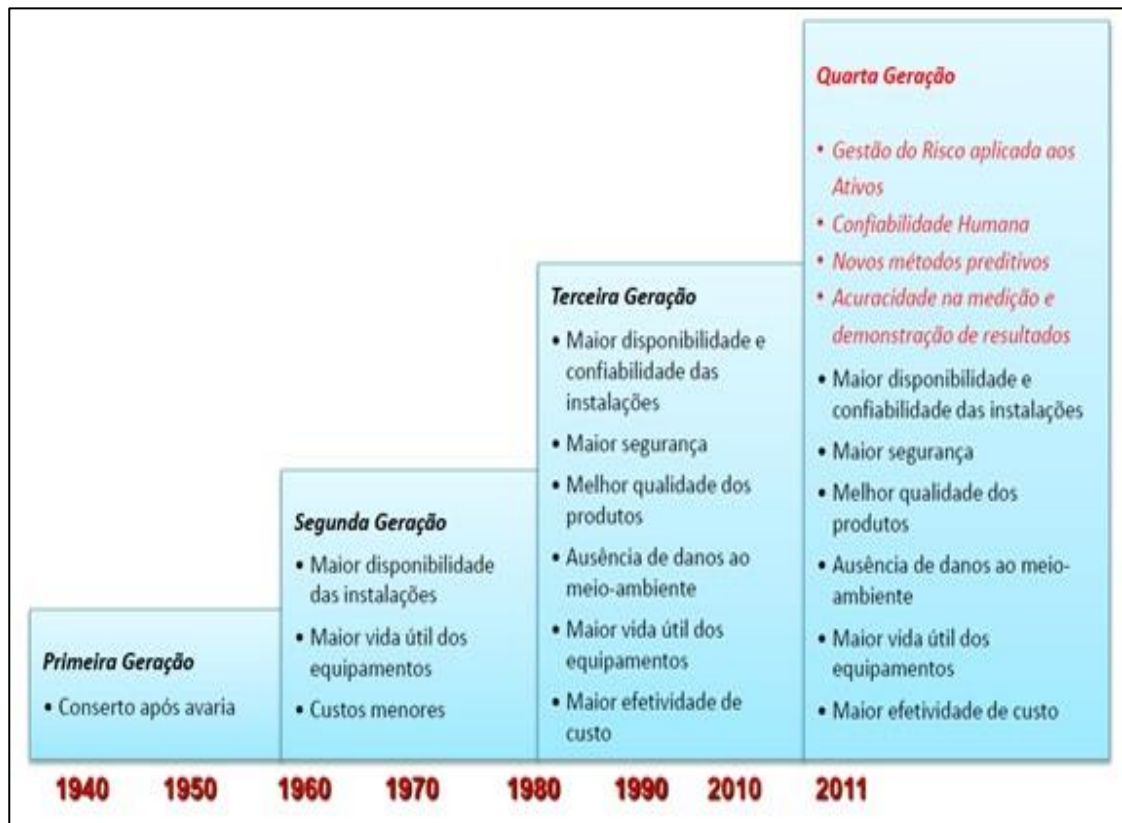
## 2.2 Histórico da manutenção

Segundo Moura et al. ([200-?]), a história da manutenção é resumida em quatro fases: A primeira fase abrange períodos anteriores a segunda guerra mundial onde as atividades eram geralmente braçais e indústria não era mecanizada, as manutenções eram geralmente realizadas após a quebra. A segunda fase se inicia da segunda guerra mundial até os anos 60, que foi marcado pelo aumento da demanda de produtos. Nesse período deu se início ao que é conhecido como manutenção preventiva, visando a realizações de atividades de manutenção antes da quebra. A terceira fase acontece a partir da década de 70, onde o conceito de qualidade foi inserido nos processos de manufatura com o intuito de entregar produtos com padrões estabelecidos por normas e leis atendendo exigências visando a segurança e meio ambiente.

Para Engeman (2016), a quarta geração da manutenção teve início em meados dos anos 2000, sendo subsequente extensão natural da terceira geração, onde os conceitos estabelecidos continuaram em vigor e os temas confiabilidade e disponibilidade se tornaram mais rigorosos e eficientes

A Figura 1.0 mostra os principais aspectos ocorridos nas quatro gerações.

Figura 1 – Evolução da manutenção nas quatro gerações



Fonte: (TROMBETA, 2017)

Devido ao aumento da demanda de produtos manufaturados atendendo todos os requisitos da terceira geração, processos começaram a ser mapeados visando o controle de custos, variável crucial para indústrias se manterem competitivas no mercado. A Tabela 1 da Abraman (Associação Brasileira de manutenção e gestão de ativos) apresenta o percentual do custo de manutenção em relação ao faturamento bruto nos mais diversos segmentos da indústria. (GONÇALVES JUNIOR; RIBEIRO; FRANCO, 2015)

Tabela 1- Custo de manutenção em relação ao faturamento Bruto

Setores	Percentual de faturamento Bruto
Alimento e Bebida	1,40
Automotivo e metalúrgico	3,46
Borracha e Plástico	4,00
Cimento e construção Civil	3,00
Eletrônico e Telecomunicações	4,00
Energia Elétrica	2,36
Farmacêutico	3,33
Fertilizante, Agroindústria e Químico	4,00
Hospitalar	2,50
Móveis	3,67
Máquinas e equipamentos	3,33
Mineração	8,67
Papel e Celulose	2,50
Predial	1,00
Petróleo	3,73
Petroquímico	1,67
Saneamento e Serviços	5,00
Siderúrgico	6,67
Têxtil	3,00
Transporte	10,00
Média Geral	4,47%

Fonte: (ABRAMAN, 2011)

### 2.2.1 Quarta revolução Industrial – Indústria 4.0

Também chamada de quarta revolução industrial, a indústria 4.0 almeja a integração de técnicas de fabricação avançadas ligadas ao IOT(Internet das coisas) para criação de um ágil ecossistema de fabricação digital com um nível altíssimo de automação, combinando tecnologias como o Industrial internet das coisas (IIOT), computação em nuvem, aprendizado de máquina (ML), realidade aumentada e

robótica avançada para criação de processos fabricação interconectados e inteligentes. (ZAIDI et al., 2019)

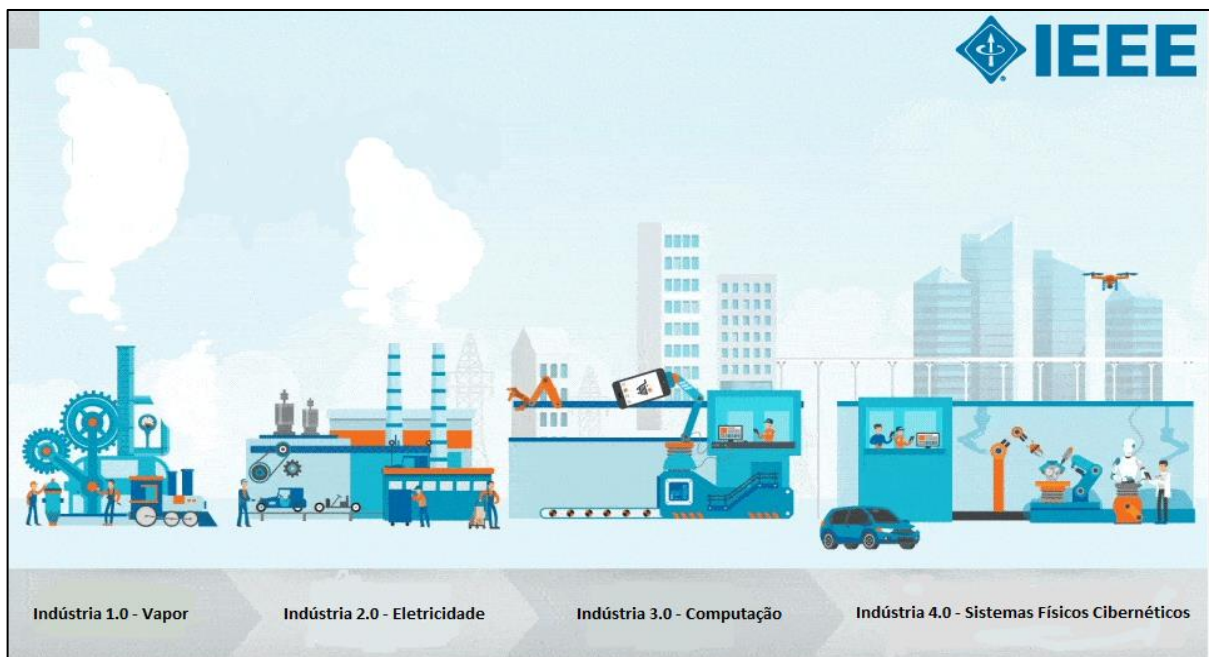
A implantação da indústria 4.0 traz ganhos significantes aos processos de manufatura aumentando a eficiência operacional por meio da análise de processos em tempo real ou até mesmo do controle de processos de ponta a ponta. Aumenta consideravelmente a produtividade realizando o tempo de inatividade zero através de manutenções proativas oriundas de processos digitais. (ZAIDI et al., 2019)

A quarta geração da indústria continua utilizando técnicas inseridas em gerações anteriores, porém expande e as coloca sob o controle de sistemas computacionais. Novas fábricas usarão sensores para monitoramento do fluxo de suprimentos, máquinas com inteligência artificial para controlar processos de fabricação. (GRIER, 2017)

A indústria 4.0 propõe a utilização da tecnologia da informação para redução de custos. Um sistema ciberfísico possibilitará o controle de dados e elementos dentro da fábrica, um software baseado em nuvem armazenará informações cruciais para tomadas de decisões inteligentes. (GRIER, 2017)

A Figura 2 apresenta os principais aspectos que marcaram as quatro gerações da manutenção.

*Figura 2 - Principais aspectos das quatro gerações da manutenção*



Fonte: Adaptado (IEEE, 2017)



Segundo Silveira (2017), o conceito de indústria 4.0 engloba as principais inovações tecnológicas das áreas de automação, tecnologia da informação aplicadas aos mais diversos segmentos da indústria. A partir de Sistemas Cyber-Físicos, internet das coisas e internet dos serviços, os processos de manufatura tendem a se tornar cada dia mais eficientes, autônomos e customizáveis.

O termo indústria 4.0 se originou a partir de um projeto de estratégias do governo alemão voltadas à tecnologia. O termo foi usado pela primeira vez na Feira de *Hannover* em 2011. Em Outubro de 2012 o grupo responsável pelo projeto, ministrado por *Siegfried Dais* (Robert Bosch GmbH) e *Kagermann* (acatech) apresentou um relatório de recomendações para o Governo Federal Alemão, a fim de planejar sua implantação. Então, em Abril de 2013 foi publicado na mesma feira um trabalho final sobre o desenvolvimento da indústria 4.0. Seu fundamento básico implica que conectando máquinas, sistemas e ativos, as empresas poderão criar redes inteligentes ao longo de toda a cadeia de valor que podem controlar os módulos da produção de forma autônoma. Ou seja, as fábricas inteligentes terão a capacidade e autonomia para agendar manutenções, prever falhas nos processos e se adaptar aos requisitos e mudanças não planejadas na produção. (SILVEIRA, 2017)

Existem algumas características que definem os sistemas de produção inteligentes da indústria 4.0. A capacidade de operação em tempo real consiste na aquisição, processamento e tratamento de dados gerando informações para tomadas de decisão em tempo real. Simulações virtuais permitem a rastreabilidade e monitoramento remoto dos processos por meio dos mais diversos tipos de sensores espalhados na planta. As tomadas de decisões poderão ser tomadas de forma descentralizada através de sistemas Cyber-Físicos, as máquinas não apenas receberão informações para sua lógica de funcionamento, mas também irão fornecer informações sobre seu ciclo de trabalho. Modularidade da produção de acordo com as demandas de produtos utilizando *backups* em máquinas. (SILVEIRA, 2017)

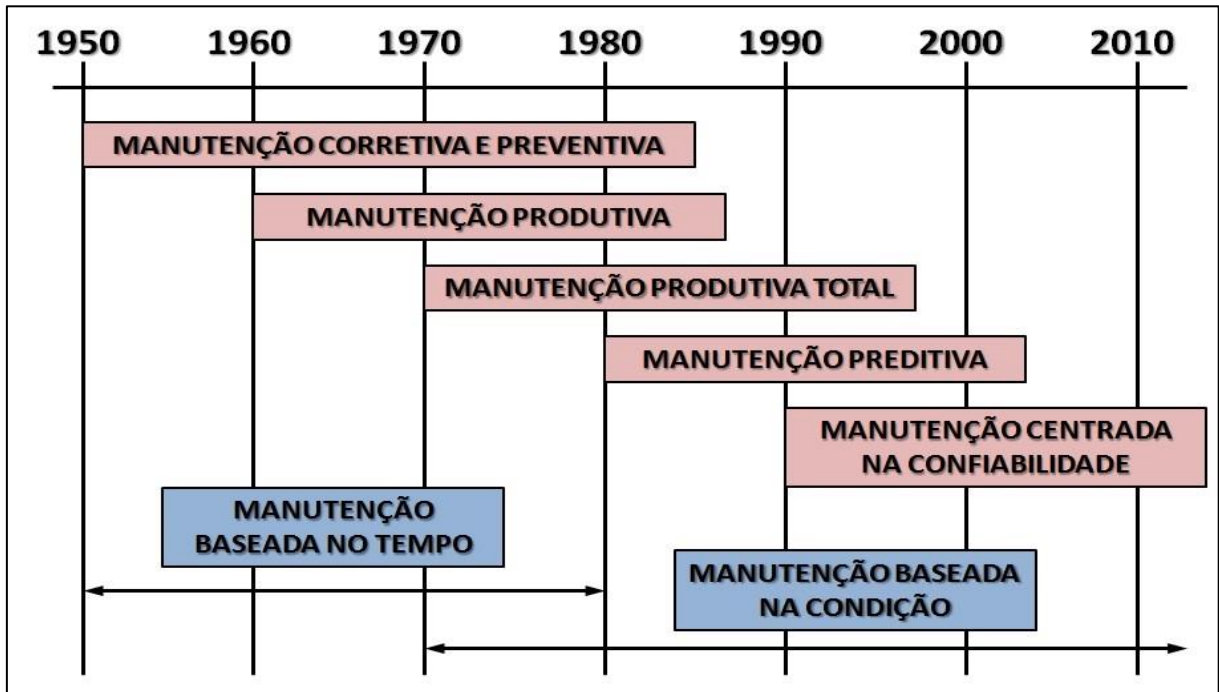
### **2.3 Modelos de manutenção**

A necessidade de distinção dos termos previsão e prevenção esclarece um conceito dentro da manutenção. A prevenção significa a troca do componente quando atingido seu tempo de vida útil, independente da condição que se encontra. Tal método é duvidoso levando em consideração as variáveis que são utilizadas para definir o tempo de troca. A previsão apresenta um método onde a troca é realizada de

acordo com a condição do componente ou equipamento, através de medições realizadas com determinada frequência. (NEPOMUCENO, 1989)

Os modelos de manutenção foram melhorados com o decorrer dos tempos, a Figura 3 explicita tal acontecimento.

Figura 3 - Evolução dos tipos de manutenção



Fonte: (MANUTENÇÃO, 2016)

### 2.3.1 Manutenção Corretiva

Este é o primeiro modelo de manutenção, trata-se do conserto após a quebra ou falha. Medida mínima para que o dispositivo funcione pois permite que opere com altas condições de descuidos, como exemplo, pode-se citar: falta de óleo em motores de combustão interna, falta de lubrificante em engrenagens e correntes, falta de líquido refrigerante ocasionando o superaquecimento, etc. (NEPOMUCENO, 1989)

A manutenção corretiva é vista com maus olhos, por se tratar de uma correção realizada pelo descuido com o ativo. Segundo Otani e Machado (2008), a quebra é prevista através do acompanhamento preditivo ou sensitivo, e por decisões gerenciais o reparo é realizado após a falha. Este conceito é conhecido como Manutenção corretiva planejada, que na maioria das vezes é realizada por questões de custo, onde

o componente é utilizado até o fim de sua vida útil, tendo a ressalva que a falha do componente não atingirá outras peças do sistema.

A manutenção corretiva não planejada ocorre de forma imprevista, geralmente causando danos ao sistema e gerando prejuízos financeiros.

Manutenção corretiva não planejada – correção da falha de maneira aleatória, ou seja, é a correção da falha ou desempenho menor que o esperado após a ocorrência do fato. Esse tipo de manutenção implica em altos custos, pois, causa perdas de produção e, em consequência, os danos aos equipamentos é maior. (OTANI; MACHADO, 2008)

### 2.3.2 Manutenção Preventiva Periódica

Também conhecida como método clássico de manutenção, se conceitua na substituição periódica de componentes que apresentam desgastes, geralmente é necessário de um alto número de técnicos e horas de serviço. Como consequência se torna inviável economicamente com altos custos de peças e mão de obra. Este tipo de manutenção requer planejamento prévio, visando o levantamento de peças, recursos necessários e alinhamentos com diversos setores do processo. A troca de peças baseada no tempo é definida através de dados estatísticos do processo, geralmente planos de ação oriundos de manutenções corretivas não planejadas e prescrições do fabricante. (NEPOMUCENO, 1989)

Resumidamente, Otani e Machado (2008) define manutenção Preventiva Periódica como “atuação realizada para reduzir falhas ou queda no desempenho, obedecendo a um planejamento baseado em períodos estabelecidos de tempo”.

### 2.3.3 Manutenção com Base no Diagnóstico do estado do equipamento

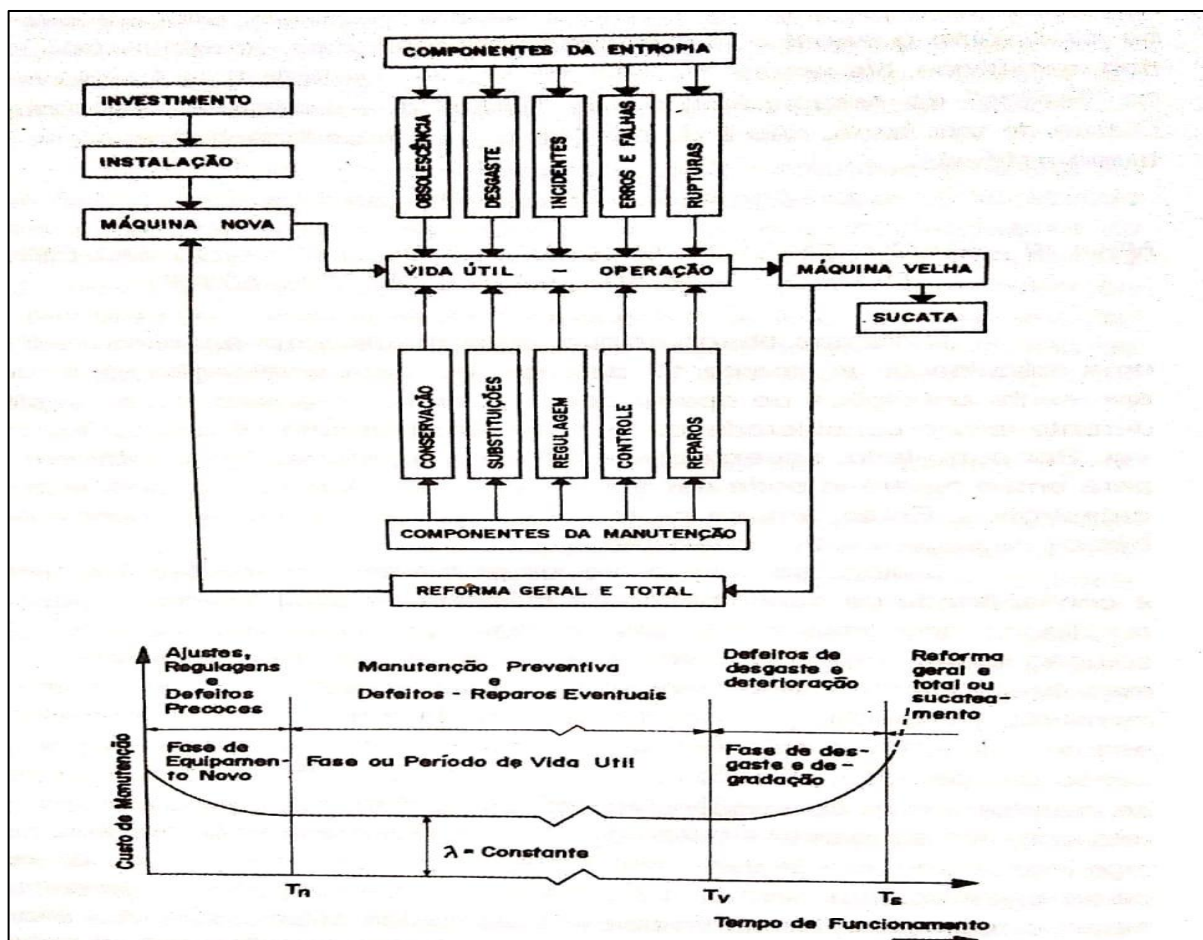
(Manutenção Preditiva)

Quando são consideradas anomalias associadas a segurança e confiabilidade de máquinas e equipamentos, é sabido que a solução ideal é intervir no ativo, providenciando uma eficaz manutenção afim de manter o dispositivo com desempenho aceitável no momento adequado. O momento de realizar a manutenção é definido através de um estudo cuidadoso e criterioso de vários elementos que contem a máquina, visando detectar uma eventual falha antes que a mesma se manifeste de maneira imprevista. Portanto, o procedimento correto consiste em prever a falha no lugar de presumi-la. A própria máquina fornece elementos que permitem

determinar o estado real dos seus componentes desde que seus elementos sejam estudados e verificados com atenção. Tais considerações mostram a eficiência e economia na boa aplicação da manutenção preditiva. (NEPOMUCENO, 1989)

A Figura 3 apresenta de maneira simplificada a vida útil de um equipamento ou máquina através de dois diagramas, um diagrama de blocos e um gráfico relacionando os tempos de manutenção com o de operação ou funcionamento normal. (NEPOMUCENO, 1989)

Figura 4 - Esquematização da vida de uma máquina ou equipamento



Fonte: (NEPOMUCENO, 1989)

Para Nepomuceno (1989), o equipamento emite informações que codificadas fornecem dados seguros sobre o real estado de cada componente. A manutenção preditiva consiste, na coleta de dados com relação às variáveis de interesse, compara os dados em função do tempo em funcionamento e interpreta as variáveis fornecendo informações que mostram o momento certo de intervir, antes que ocorra a falha.

A manutenção preditiva, tem como vantagem o conceito de intervir no momento adequado, a mesma vem ganhando cada vez mais espaço e se estabelecendo nos mais diversos segmentos da indústria que visam manter um alto padrão de manutenção. (NEPOMUCENO, 1989)

A manutenção preditiva é conhecida como manutenção sob a condição ou manutenção com base na situação do equipamento. É fundamentada na tentativa de definir o estado de funcionalidade futuro de uma máquina ou equipamento, através de dados coletados ao longo do tempo por uma instrumentação específica. Este tipo de manutenção possibilita a previsibilidade da deterioração do equipamento através do monitoramento de parâmetros do equipamento em funcionamento, prevenindo o acontecimento de falhas não planejadas. (TELES, 2018)

O termo associado a manutenção preditiva é “Predizer”, sendo esse o principal objetivo da mesma, predizer ou prevenir falhas nos equipamentos através de parâmetros indicando sua condição. Algumas variáveis como temperatura, vibração, pressão vazão, vazamentos, deterioração, etc. servem como informações para prevenção de falhas em máquinas e equipamentos. (SPAMER, 2009)

#### 2.4 Principais Técnicas de Manutenção Preditiva

Como premissa básica, a manutenção preditiva visa coletar dados que possibilitam análises de tendências, realizando a coleta de dados com o equipamento na maioria das vezes em operação, com o mínimo de interferência possível. É possível classificar as técnicas de manutenção preditiva pela grandeza medida. Vibração, temperatura e corrente elétrica são alguns exemplos de variáveis mensuradas nessa técnica. A Tabela 2 apresenta os modelos mais utilizados de manutenção preditiva. (SPAMER, 2009)

Tabela 2 Técnicas de Manutenção Preditiva

<b>Radiações Ionizantes</b> Raio X e Gamagrafia	<b>Fenômenos de Viscosidade</b> Líquidos Penetrantes
<b>Energia Eletromagnética</b> Partículas Magnéticas Correntes Parasitas	<b>Análises de Vibrações</b> Nível global, espectro de vibrações pulso de choque
<b>Análise de Óleos Lubrificantes ou Isolantes</b> Viscosidade, Número de neutralização, Teor de Água, insolúveis, Contagem de partículas metais, Tensão Interfacial, Rigidez Dielétrica, Ponto de Fulgor	<b>Análise de temperatura – Termometria</b> Termometria convencional Indicadores de temperatura Pirometria de Radiação Termografia
<b>Ferrografia</b> Ferrografia Quantitativa Ferrografia Analítica	<b>Verificações de Geometria</b> Metrologia Convencional Alinhamento de máquinas rotativas
<b>Ensaio Elétricos</b> Corrente, Tensão, Isolação, Perdas Dielétricas, Rigidez Dielétrica, Espectro de corrente ou tensão	<b>Forças</b> Células de carga, Teste de Pressão, Teste Hidrostático, Teste de Vácuo, Detecção de Trincas
<b>Energia Acústica</b> Ultrassom e Emissão Acústica	<b>Inspeção Visual</b> Endoscopia ou Boroscopia

Fonte: Adaptado (SPAMER, 2009)

É inviável tabelar ou classificar todos os métodos possíveis aplicáveis a cada tipo de equipamento devido ao alto número de grandezas que constituem o grupo principal de variáveis de monitoramento. A Tabela 3 indica resumidamente as principais variáveis e os equipamentos que as utilizam. (NEPOMUCENO, 1989)

Tabela 3 Principais Variáveis e equipamentos que a utilizam

<b>Observação Prática</b>	<b>Máquinas Rotativas</b>	<b>Dispositivos Estáticos</b>	<b>Dispositivos Elétricos</b>	<b>Instrumentos</b>	<b>Estruturas</b>
Ensaio Não Destrutivo					
Exame Visual					
Medidas e Análise de Vibração					
Medidas de Temperatura ou Pressão					
Medida do nível Sonoro					
Medida da Espessura - Corrosão					
Análise Química					
Verificação do Lubrificante					
Detecção de Vazamento de Fluidos					

Fonte: Adaptado (NEPOMUCENO, 1989)

Para fazer um diagnóstico preciso a respeito de uma anomalia existente no equipamento é necessário ter uma escala que permita diferenciar quando o valor é adequado ou não. O valor é obtido através da conversão da variável em um valor numérico. A conversão é realizada através de dispositivos que, na maioria das vezes são constituídos por transdutores. Resumidamente, transdutor é um dispositivo pronto a converter uma forma de energia em um valor determinado dentro de um limite inferior e superior, sem alteração da frequência e sem perdas. (NEPOMUCENO, 1989)

## 2.5 Análise de vibração

O fenômeno vibração, é caracterizado pela oscilação de um corpo sobre um ponto referencial ocasionado pela aplicação de uma força. São exemplos de movimentos vibratórios os pêndulos, cordas de instrumentos musicais, corpos em movimento, etc. Na indústria, as vibrações ocorrem em máquinas rotativas e alternativas, redutores, etc. (SPAMER, 2009)

Na manutenção, a medição e monitoramento das vibrações de máquinas e equipamentos, apresentam os melhores resultados. As vibrações mecânicas constituem um grupo de fenômenos comuns nas atividades do dia a dia, dentro da indústria as vibrações ocorrem em turbinas, máquinas girantes, etc. Uma vibração mecânica é o evento observado quando uma partícula executa movimento entorno uma posição de equilíbrio. Fisicamente, a vibração é o resultado da troca de energia entre dois “depósitos” de um mesmo sistema. Quando ocorre a troca de energia cinética em energia potencial e vice-versa, acontece a vibração. (NEPOMUCENO, 1989)

A análise de vibração é um método imprescindível na detecção precipitada de avarias, através do observação e análise da evolução de nível global de vibrações e das respectivas frequências na análise espectral. As vibrações se originam de um processo de deterioração ocasionado pela energia vibratória de vários componentes das máquinas. As vibrações podem perturbar o funcionamento ou até destruir equipamentos. A análise de vibrações é um dos indicadores mais precisos do estado de funcionamento da máquina. (SEQUEIRA, 2019)

Segundo Júnior (2009), qualquer movimento que se repita após um intervalo de tempo é conceituado vibração. O balançar de um pêndulo e o movimento de uma corda dedilhada são exemplos de vibração. A teoria da vibração se trata do estudo de movimentos oscilatórios de corpos e as forças associadas a eles. A vibração de um sistema envolve a transferência alternada de sua energia potencial para energia cinética e de energia cinética para energia potencial. As vibrações são classificadas como vibração livre, forçada, amortecida e não amortecida, linear e não linear, vibração determinística e aleatória.

Um sistema vibratório é um sistema dinâmico para o qual as variáveis como as excitações (entradas) e respostas (saídas) são dependentes do tempo. A resposta de um sistema vibratório depende das condições iniciais e excitações externas. Sistemas



vibratórios são complexos quando encontrados na prática, é impossível considerar todos os detalhes para uma precisa análise matemática. São consideradas somente as características mais importantes para prever o comportamento sob condições de entrada especificadas. (JÚNIOR, 2009)

As expressões matemáticas que descrevem a troca de energia cinética em potencial são descritas de acordo com as equações abaixo:

A Energia mecânica potencial do campo gravitacional é descrita pela equação 2. A energia mecânica potencial da mola é mostrada através da equação 3 e a equação 4 apresenta a energia mecânica Cinética da massa com velocidade  $v$ .

$$Wp = m \cdot g \cdot h \text{ (campo gravitacional)} \quad (2)$$

$$Wp = \frac{s \cdot x^2}{2} \text{ (mola)} \quad (3)$$

$$Wc = \frac{m \cdot v^2}{2} \text{ (massa com velocidade } v) \quad (4)$$

A energia Elétrica/Magnética potencial do capacitor é descrita pela equação 5. A energia Elétrica/Magnética cinética do indutor é deduzida através da equação 6.

$$Wp = \frac{C \cdot e^2}{2} \text{ (capacitor)} \quad (5)$$

$$Wc = \frac{L \cdot i^2}{2} \text{ (indutor)} \quad (6)$$

A Energia acústica potencial do volume de ar comprimido é expressada pela equação 7. A energia acústica cinética é apresentada através da equação 8.

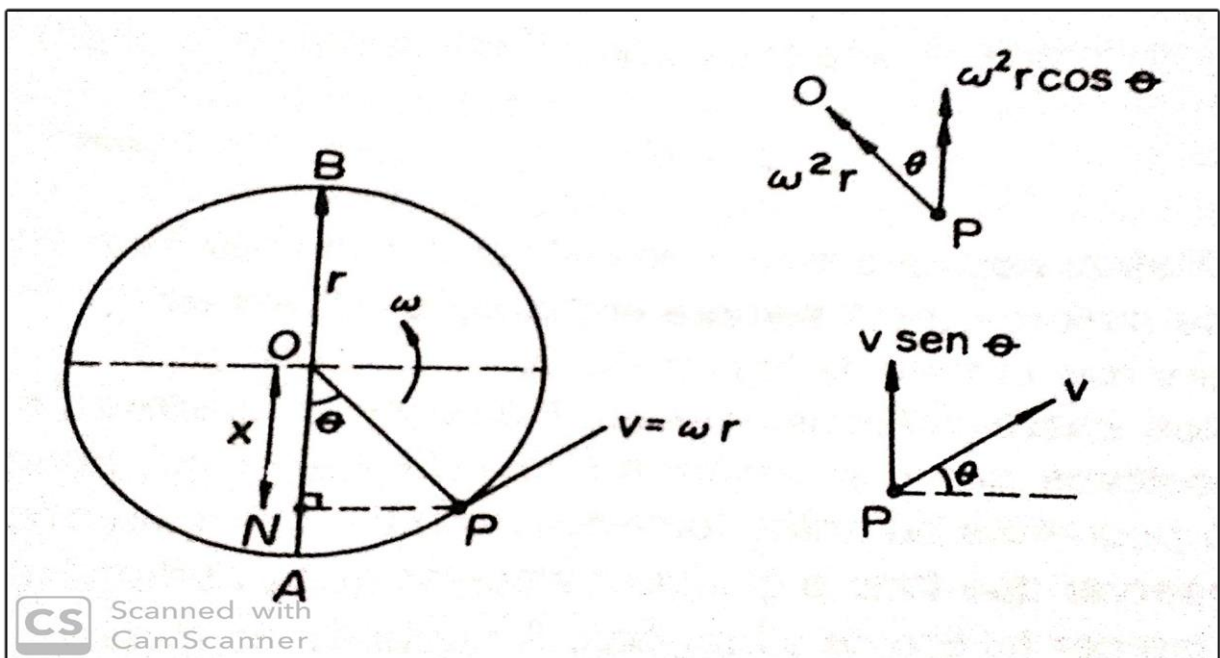
$$Wp = \frac{s \cdot x^2}{2} \text{ (volume de ar comprimido ou distendido)} \quad (7)$$

$$Wc = \frac{\rho \cdot V \cdot v^2}{2} \quad (8)$$

O fenômeno da vibração se inicia com o *deslocamento* de um ponto P no espaço, podendo ser medido pelo distanciamento do ponto P em relação a sua posição de repouso, esse deslocamento do ponto P implica a existência de *velocidade* que poderá ser variável. Se a velocidade for variável, existirá uma *aceleração* no movimento. (VIBRAÇÕES, 2019)

Nepomuceno (1989), descreve nas equações abaixo o deslocamento, velocidade e aceleração do movimento oscilatório. A Figura 5 explicita a dinâmica do ponto P com suas variáveis relacionadas.

Figura 5 Movimento Oscilatório de um ponto P



Fonte: Adaptado NEPOMUCENO, 1989)

As figuras 9,10 e 11 demonstram respectivamente o deslocamento (e), a velocidade (v) e a aceleração (a).

$$e = r \cos \omega t \quad (9)$$

$$v = \pm \omega \sqrt{r^2 - e^2} \quad (10)$$

$$a = -\omega^2 e \quad (11)$$

Os níveis aceitáveis de vibração costumam ser especificados em termos da resposta de um sistema com um grau de liberdade não amortecido sujeito à vibração harmônica. Os limites são mostrados em um gráfico denominado nomograma de vibração, o qual apresenta as variações das amplitudes e de deslocamento, velocidade e aceleração em relação à frequência de vibração. A faixa usual de vibração de maquinários industriais são: frequência = 10 a 100 Hz, amplitude de deslocamento = 0,01 a 1 mm. A severidade da vibração de maquinaria é definida em termos do valor rms da velocidade de vibração na ISO 2371 [9.3]. A definição ISO identifica 15 faixas de severidade de vibração na faixa de velocidade 0,11 a 71 mm/s para quatro classes de máquinas definidas como: pequenas, médias, grandes e turbo máquinas. Para aplicação desses critérios, a vibração deve ser mensurada em superfícies da máquina como tampas de mancal na faixa de frequência de 10 a 1000Hz. (JÚNIOR, 2009)

A Figura 6 mostra os valores rms da velocidade de vibração de equipamentos de acordo com sua classe.

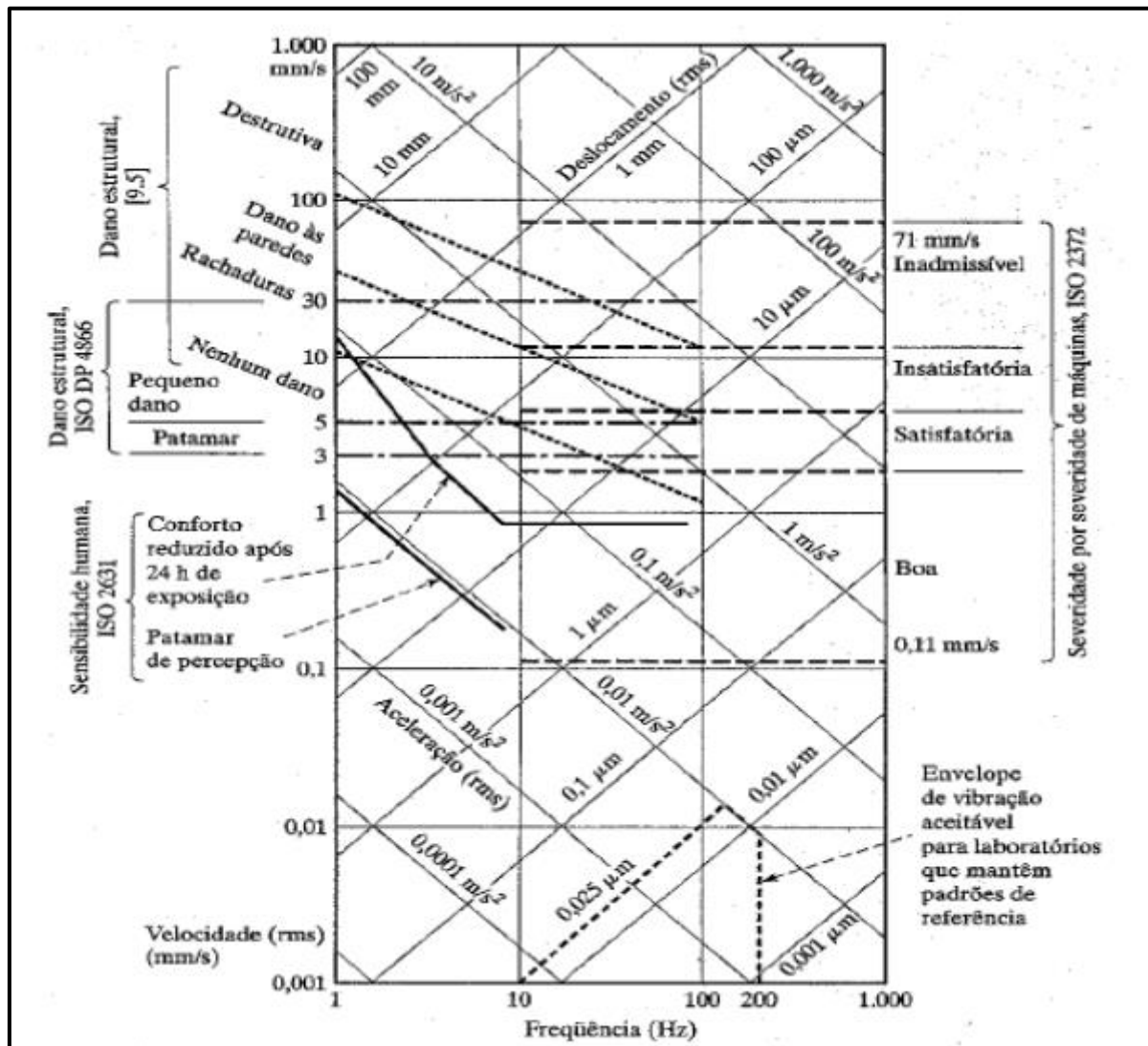
Figura 6 Valor da Velocidade de vibração

Nível	CLASSIFICAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS			
	Classe I - Até 15 Kw	Classe II - 15 À 75 Kw	Classe III - Acima de 75 Kw - Base Rígida	Classe IV - Acima de de 75 Kw - Base Flexível
	Valor da Velocidade de Vibração (mm/s)			
<b>A - Bom</b>	Até 0,71	Até 1,12	Até 1,8	Até 2,8
<b>B - Satisfatório</b>	0,71 À 1,8	1,12 À 2,8	1,8 À 4,5	2,8 À 7,1
<b>C - Insatisfatório</b>	1,8 À 4,5	2,8 À 7,1	4,5 À 11,2	7,1 À 18,0
<b>D - Inaceitável</b>	Acima de 4,5	Acima de 7,1	Acima de 11,2	Acima de 18,0

Fonte: Adaptado (AGROINDUSTRIAL, 2019)

A Figura 7 mostra o nomograma de vibração e os critérios de vibração.

Figura 7 Nomograma de vibração e critérios de vibração



Fonte: (GANZER, 2017)

A Figura 8 apresenta de forma resumida a esquematização de um sistema de medição de vibração. Na figura, a força dinâmica do corpo vibratório é convertida em sinal elétrico pelo transdutor ou sensor de vibração. Visto que o sinal de saída do transdutor (tensão ou corrente) é muito pequeno para ser registrado diretamente, um instrumento de conversão de sinal é utilizado para amplificar o sinal até o valor requerido. Os dados convertidos podem ser apresentados em computador, mostrador de inspeção visual, etc. Também podem ser registrados e armazenados para dados de histórico. (JÚNIOR, 2009)

Figura 8 Esquema básico de medição de vibração



Fonte: Adaptado (JÚNIOR, 2009)

### 2.5.1 Transdutores de vibração

Segundo Nepomuceno (1989), transdutores de vibração transformam o sinal mecânico originado pelas vibrações num sinal mensurável por métodos ópticos, gráficos, analógicos ou digital. Transdutores convertem sinais mecânicos em sinais elétricos. Na vibração, as variáveis de estudo são deslocamento, aceleração e velocidade, sendo que cada variável apresenta um transdutor para medir sua intensidade.

Um transdutor de vibrações é um dispositivo que fornece uma grandeza de saída correlacionada com a grandeza de movimentação mecânica de entrada. Os movimentos de translação são grandezas de deslocamento, velocidade e aceleração e as grandezas de saída são elétricas, como: carga elétrica, tensão, corrente, resistência e capacitância. A norma ISO 16063-1:1992, define transdutor como um dispositivo para a conversão de movimento mecânico a ser medido. (RIPPER, 2005)

Para a detecção vibrações, são utilizados transdutores de vibração mecânica. Existem vários tipos de transdutores, sendo o acelerômetro o mais utilizado devido à sua grande versatilidade, enquanto outros transdutores se resumem a aplicações específicas. O transdutor de deslocamento é aplicado quando sua instalação é permanente. O transdutor de velocidade é de restrita aplicação devido a fragilidade de seus componentes internos. Transdutores são instalados em diversos pontos da máquina para detecções nas direções radiais e axiais. (SEQUEIRA, 2019)

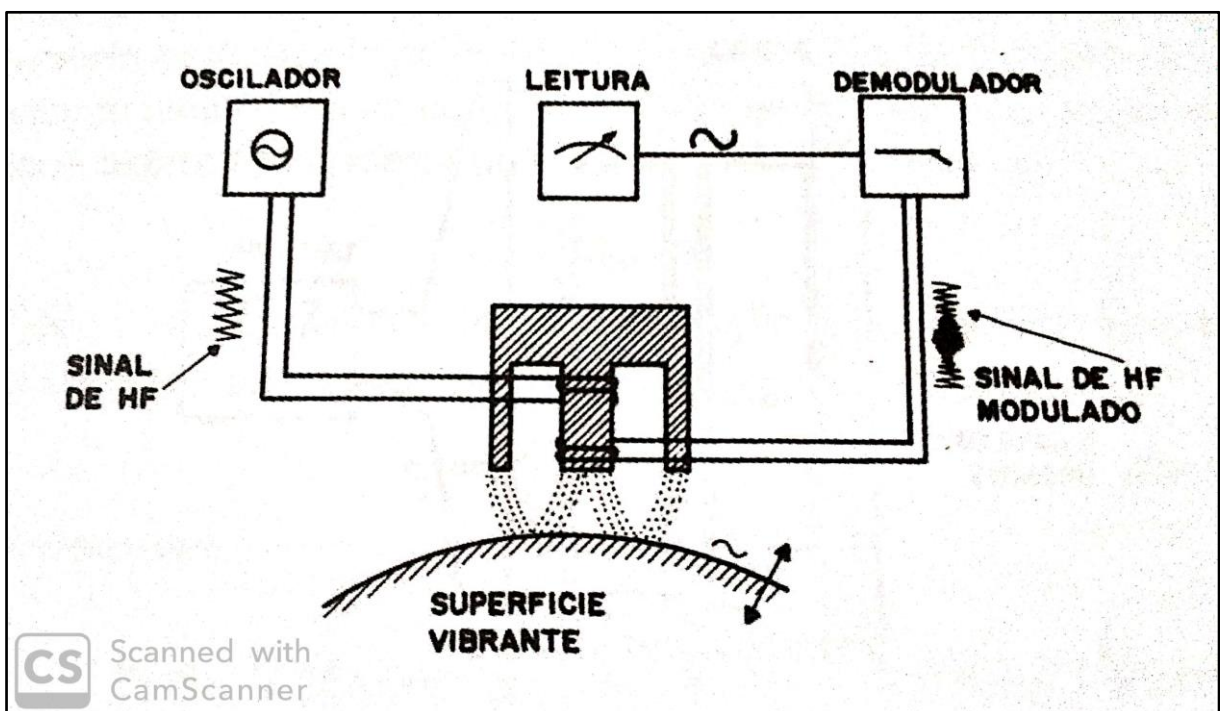
#### 2.5.1.1 Transdutores de Deslocamento

Este tipo de transdutor trabalha como um transformador que tem a sua armadura constituída pelo material cujo deslocamento se pretende medir. Esse transdutor apresenta a vantagem de não ter contato com a superfície medida, opera em altas

frequências, trabalha em DC e não apresenta partes móveis de modo que não se desgasta. Suas desvantagens são as irregularidades geométricas da superfície ensaiada e a limitação da faixa dinâmica devido as variações nas propriedades magnéticas e elétricas da superfície mensurada. (NEPOMUCENO, 1989)

A Figura 9 ilustra esquematicamente o transdutor. Aplicando-se uma corrente de alta frequência no primário aparecerá uma corrente no secundário, sendo o fluxo magnético fechado pela peça em vibração e que serve de armadura. Com a vibração desta última, a corrente do secundário será modulada pela vibração da armadura. A alta frequência aplicada funciona como portadora e é suficiente demodular para que se tenha o perfil da vibração. (NEPOMUCENO, 1989)

Figura 9 - Funcionamento Transdutor de Deslocamento



Fonte: (NEPOMUCENO, 1989)

Segundo Mathias (2017), transdutores de deslocamento são na maioria das vezes sensíveis a movimentos relativos, como por exemplo, a distância entre o sensor fixo em um mancal e um eixo vibrando. Os principais tipos de transdutores de deslocamento são:

- Indutivo: Funcionamento fundamentado na variação da relutância magnética de um ímã permanente através da movimentação alternada do material ferromagnético. (MATHIAS, 2017)
- *Eddy Current*: A geração de um campo magnético por um oscilador de alta frequência, com a aproximação alternada da peça provoca um efeito de modulação na amplitude da bobina secundária, em seguida o sinal é demodulado e transformado na forma de vibração requerida. (MATHIAS, 2017)

As Figuras 10 e 11 apresentamos modelos de transdutor de deslocamento Indutivo *Eddy Current* e *Trigger*.

Figura 10 - Instalação transdutor de deslocamento Indutivo



Fonte: (MATHIAS, 2017)

Figura 11 - Transdutor de vibração indutivo Trigger



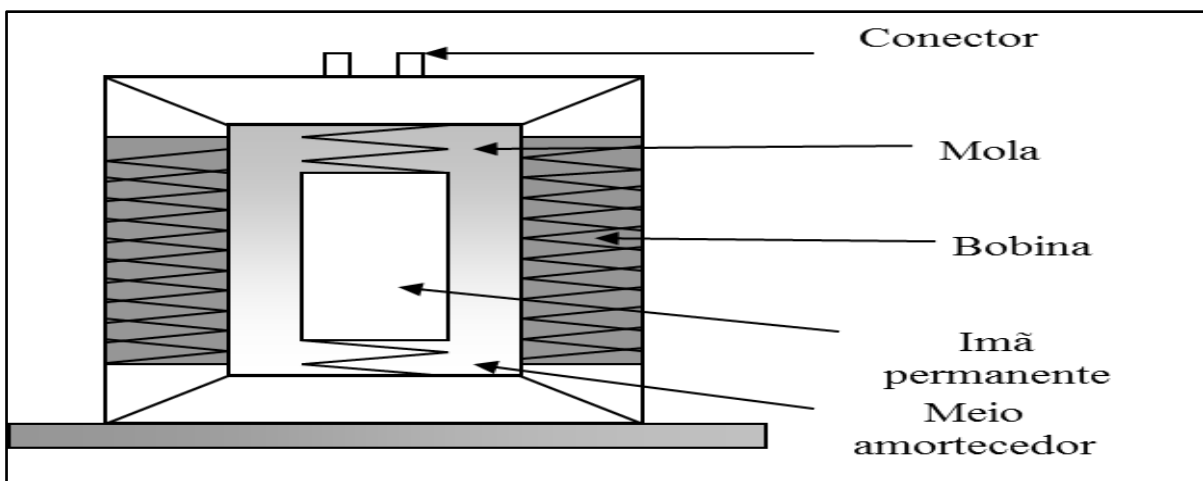
Fonte: Adaptado (MATHIAS, 2017)

### 2.5.1.2 Transdutores de Velocidade

De acordo com Mathias (2017), os transdutores de velocidade são construídos com bobinas suspensas em molas. A bobina é deslocada em um campo homogêneo de um ímã permanente através da vibração mecânica. A tensão induzida na bobina é proporcional ao número de interseções de linhas de força por unidade de tempo, sendo proporcional a velocidade da bobina.

A Figura 12 esquematiza a forma construtiva de um transdutor de velocidade.

Figura 12 - Forma construtiva do transdutor de velocidade



Fonte: (MATHIAS, 2017)



O tacômetro, também conhecido como gerador de pulso, é o tipo de transdutor de velocidade mais utilizado. Neste dispositivo, a informação gerada é uma quantidade estabelecida de pulsos elétricos para cada 360° de giro no eixo mecânico. É utilizado geralmente para medição de velocidade de esteiras, veículos, motores, etc. (FARIAS et al., 2011)

Tacômetros são Dínamos de corrente contínua que quando acionados por um eixo em rotação, criam uma tensão proporcional à velocidade angular do eixo. Não é aconselhável utilizá-los em baixas rotações. Produzem um número conhecido de pulsos por volta completa do eixo para medidas de velocidade angular. (DEMARCHI, 2011)

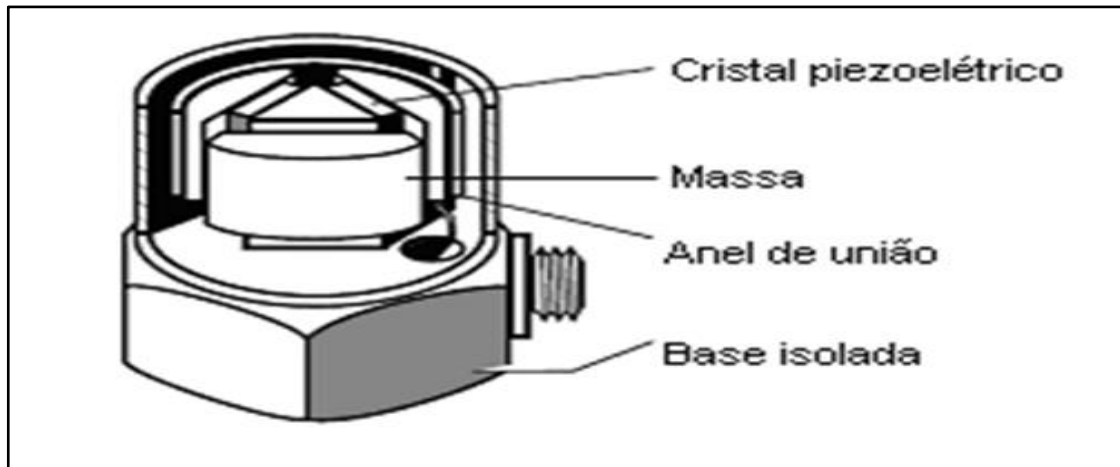
### 2.5.1.3 Transdutores de Aceleração - Acelerômetros

Os acelerômetros fazem parte de um grupo de transdutores cuja resposta é proporcional à aceleração, e é fortemente empregado no campo da medida e análise de vibrações. Tais transdutores são constituídos por elementos ferroelétricos que indicam uma diferença de potencial em suas extremidades quando comprimidos ou distendidos. Os mesmos são constituídos por cerâmicas orientadas, que apresentam o fenômeno da ferroeletricidade. (NEPOMUCENO, 1989)

Em geral, acelerômetros utilizam um cristal *piezoelétrico*, instalado entre a cobertura da cabeça do sensor e a massa sísmica do sensor. Quando forçado a uma aceleração, a massa exerce por inércia uma força no cristal e a diferença de potencial que surge entre os terminais ligados ao cristal é proporcional à aceleração medida. Os equipamentos eletrônicos atuais de condicionamento de sinais permitem avaliar com o auxílio dos acelerômetros os três parâmetros de monitoramento de vibração. (MATHIAS, 2017)

A Figura 13 ilustra de forma resumida a construção de um acelerômetro de cristal *piezoelétrico*.

Figura 13 - Forma construtiva de um Acelerômetro com cristal Piezoelétrico



Fonte: (MATHIAS, 2017)

O acelerômetro é o tipo de componente de sistema eletromecânico para medidas de vibração mais utilizado e difundido. Ele fornece uma tensão elétrica de saída proporcional ao sinal de aceleração. Com a integração da variável de saída se obtém uma tensão proporcional à velocidade de deslocamento e, com uma próxima integração, tem-se uma nova saída proporcional ao deslocamento. (FALCONE, 1979)

O princípio de funcionamento do acelerômetro se baseia nos cristais *piezoelétricos*, que depois de comprimidos, geram um sinal elétrico proporcional a aceleração. Quando está em funcionamento, o transdutor acompanha a vibração transmitida pelo equipamento em estudo, a massa no seu interior tende-se a manter parada no espaço. O transdutor de aceleração é fixado numa superfície em movimento, onde haverá um deslocamento provocado pela força motriz que dá origem ao movimento. Esta força é igual ao produto da aceleração com a massa sísmica, a equação 12 mostra a expressão. A massa sísmica do acelerômetro influencia a gama de frequências utilizáveis e sua sensibilidade. Por regra geral, quanto maior for o acelerômetro, maior a sua sensibilidade e menor a gama de frequências utilizáveis. Sua sensibilidade é mensurada em milivolts por unidade de aceleração “g” e é aproximadamente 20% da frequência de ressonância. (SEQUEIRA, 2019)

$$F = M_s \cdot a \quad (12)$$

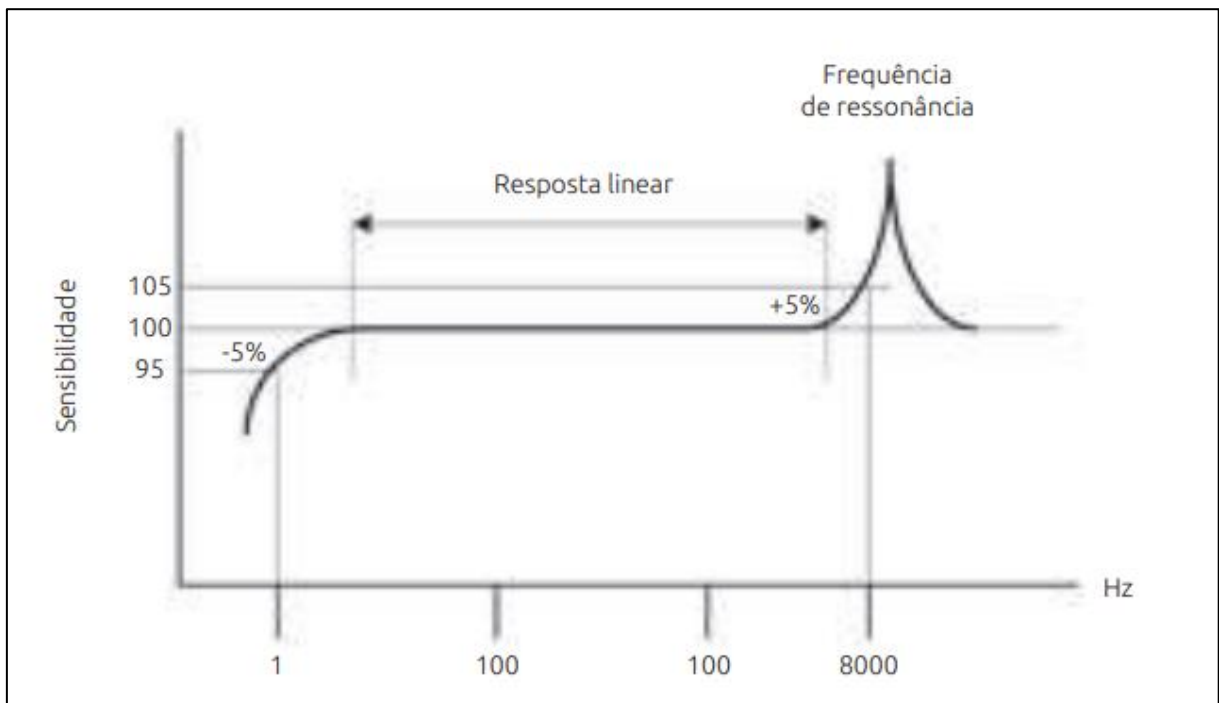
Onde:

$M_s$  – Massa Sísmica do Acelerômetro

$a$  - Aceleração

A Figura 14 mostra a curva característica da resposta em frequência de um acelerômetro *piezoelétrico*. As medições deverão confinar-se à posição linear da curva de resposta, onde se tem uma garantia que os valores medidos são proporcionais a vibração, a qual é limitada nas altas frequências pela ressonância de montagem do transdutor de aceleração. Em baixas frequências, o acelerômetro apresenta uma resposta não linear. Para altas frequências, o acelerômetro apresenta graficamente um comportamento linear dividido a influência da frequência de ressonância. (SEQUEIRA, 2019)

Figura 14 - Curva de resposta característica do Acelerômetro



Fonte: (SEQUEIRA, 2019)

## 2.6 Tratamento e Processamento de Sinais de entradas Analógicas

Todo sinal é quantificado através de expressões matemáticas com a leitura de variáveis de entrada de um sistema. Sistema é descrito como um conjunto de elementos que interagem entre si afim de realizar uma tarefa determinada, ele é geralmente composto por uma função, que é a razão no qual o sistema opera. As variáveis armazenam as informações processadas pelos elementos que interagem

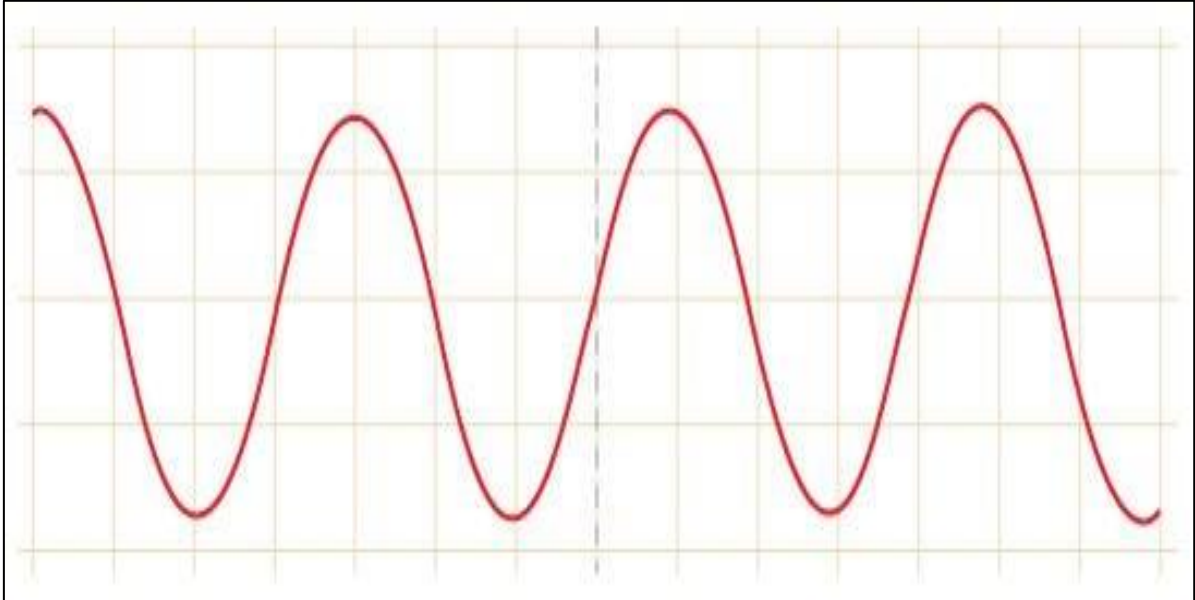
trocando informações para cumprir o objeto do sistema. A conexão possibilita a comunicação entre os elementos. (LA VEGA, 2019)

Segundo Ciriaco (2016), os sinais podem ser classificados como analógicos ou digitais, onde:

- Sinal Analógico: Representado por uma onda contínua variante em função do tempo. O sinal analógico trafega por vários valores existentes os extremos da onda trafegando por uma ampla faixa de frequências, resultando em um grande número de oscilações e conseqüentemente em queda de qualidade.
- Sinal Digital: o formato do sinal digital é menos complexo se comparado ao analógico devido apresentar apenas valores discretos no tempo e amplitude, o mesmo apresenta apenas valores inteiros. O sinal digital é mais preciso e tem maior qualidade devido à baixa oscilação.

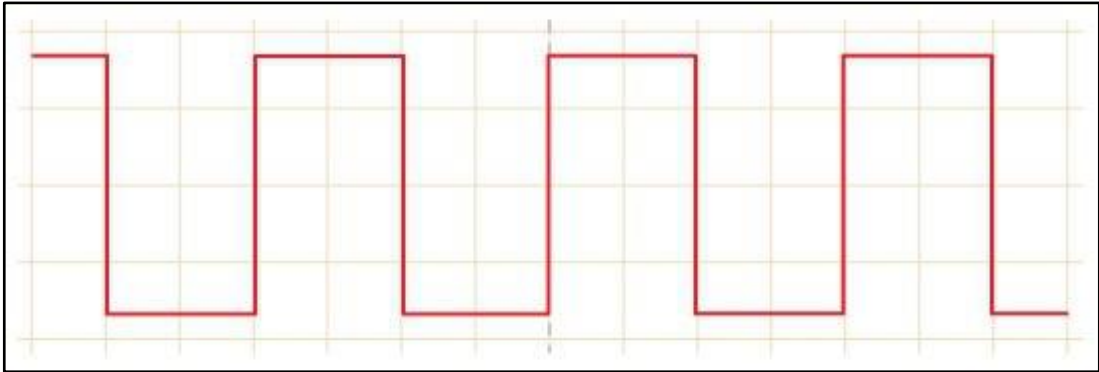
As Figuras 15 e 16 mostram as formas de ondas dos sinais analógicos e digitais no domínio do tempo.

*Figura 15 - Forma de onda do sinal Analógico*



Fonte: (CIRIACO, 2016)

Figura 16 - Forma de onda do sinal Digital



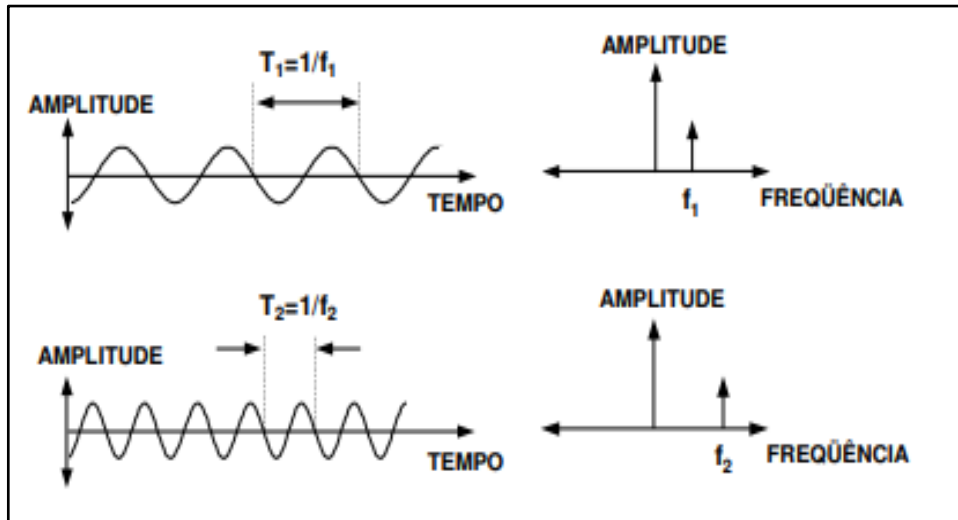
Fonte: (CIRIACO, 2016)

Para Pellenz (2005), o processamento de sinais pode ser analógico ou digital. É mais usual e indicado o processamento digital devido a facilidade em alterar, corrigir e atualizar aplicações; diminuições dos níveis de ruído, baixo custo e consumo de potência. O processamento analógico de sinais é realizado através de Capacitores, Resistores e indutores, as tolerâncias associadas a estes componentes como temperatura, variações de tensão e vibrações mecânicas afetam a eficiência de circuitos analógicos. O processamento digital é restrito a sinais de alta frequência devido conversores analógico para digital (ADC) não operarem rápido o suficiente e a alta complexidade para operar em tempo real. As vantagens do processamento digital de sinais são:

- Invariabilidade: Baixa sensibilidade para tolerâncias de componentes; baixa sensibilidade para mudanças de temperatura; baixa sensibilidade para efeitos de envelhecimento.
- Alta imunidade à ruídos.
- Na maioria das aplicações, o processamento digital de sinais oferece maior desempenho e baixo custo.

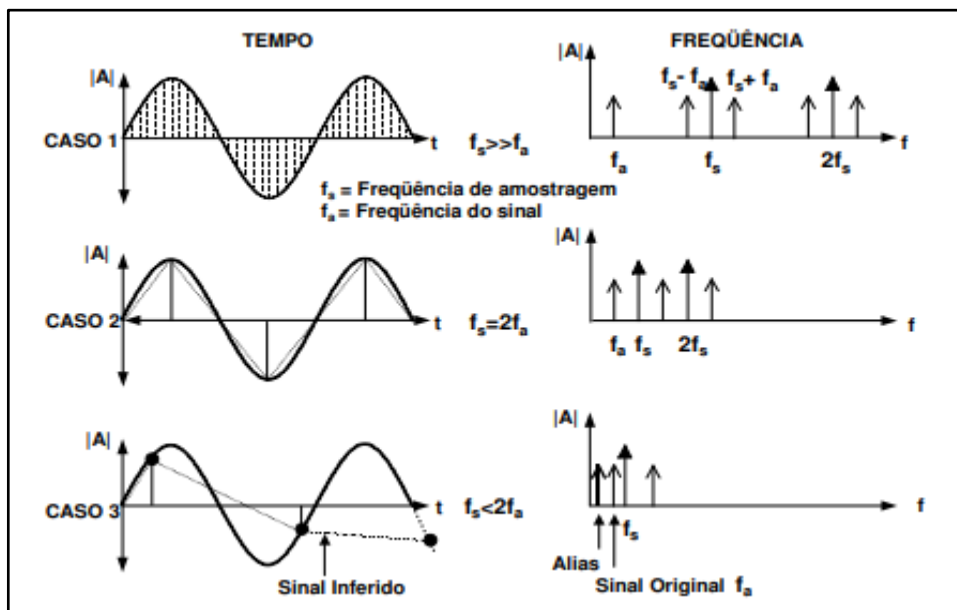
Segundo Pellenz (2005), os circuitos analógicos no processamento digital de sinais podem ser apresentados no domínio do tempo e frequência como mostrado na figura 17. No processo de digitalização do sinal, é retirado uma amostragem do gráfico de entrada analógica, limitado seu espectro e mitigado o erro. As figuras 18,19 e 20 mostram esquematicamente esse processo.

Figura 17 - Sinais no Domínio do Tempo e da Frequência



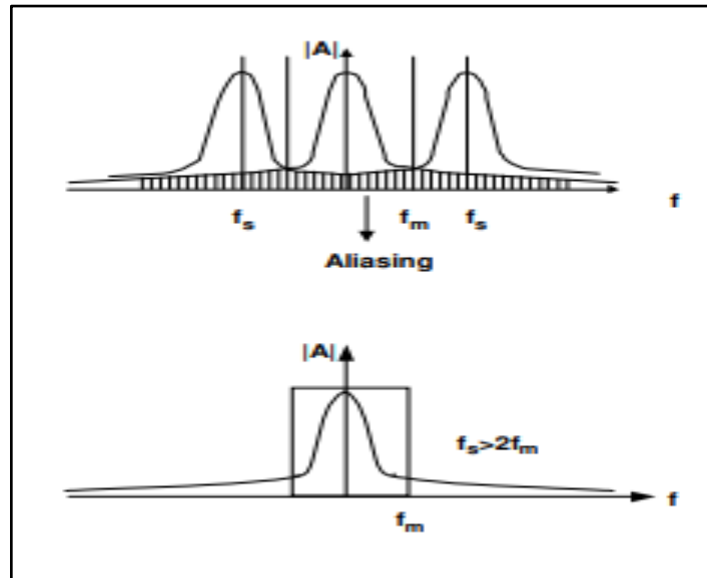
Fonte: Adaptado (PELLENZ, 2005)

Figura 18 - Coleta das Amostras



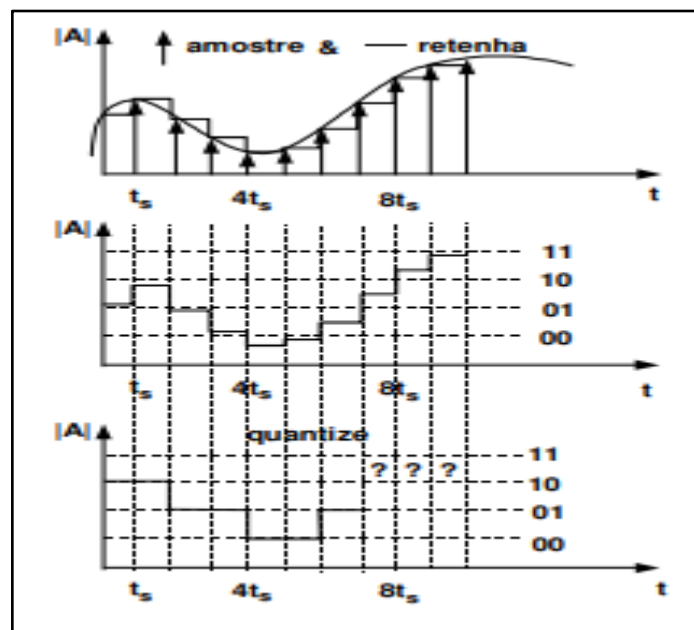
Fonte: Adaptado (PELLENZ, 2005)

Figura 19 - Limitando o Espectro da onda



Fonte: Adaptado (PELLENZ, 2005)

Figura 20 - Digitalizando o Sinal



Fonte: Adaptado (PELLENZ, 2005)

De acordo com Ferreira (2019), um dos dispositivos mais utilizados para tratamento e processamento de sinais analógicos é o CLP (controlador lógico programável)

### 2.6.1 Controlador Lógico Programável (CLP)

O controlador Lógico Programável (CLP) – ou PLC (*programmable Logic Controller*) – é definido como um dispositivo de estado sólido, um computador industrial capaz de armazenar instruções para o controle de um processo e a implementação de funções e blocos funcionais em um sistema (sequência lógica, temporização e contagem). Realiza também operação lógica e aritmética, manipulação de dados e comunicação em rede. É um equipamento que realiza o controle automatizado das atividades da planta. (SILVA, 2018)

Segundo Ufpr (2019), o CLP é um equipamento eletrônico digital com *hardware* e *software* para aplicações industriais. Utiliza uma memória programável para o armazenamento interno de instruções para específicas aplicações, tais como, lógica, sequenciamento, temporização, contagem e aritmética, com o intuito de controlar, através de módulos de entrada e saídas diversos tipos de máquinas e processos.

O CLP foi implementado em 1968, surgiu na *General Motors Corporation* devido a necessidade de readequar o processo através de controles lógicos. O mesmo foi criado com o intuito de ser facilmente programado e reprogramado para permitir que a sequência de operação executada por ele pudesse ser alterada, mesmo depois de instalado e ser de fácil manutenção. (UFPR, 2019)

#### 2.6.1.2 Funcionamento do Controlador Lógico Programável

De acordo com Silva (2018), o CLP substitui comandos elétricos convencionais mais simples, o mesmo possui um microcontrolador composto de sinais de entrada binários que executa um programa de controle. Durante a operação de leitura, os sinais das entradas são copiados para a memória de entrada. Essa informação armazenada na memória de entrada é utilizada durante a execução do programa. A operação do programa envia as informações para as saídas, sendo estes sinais de saída computados na operação e copiados da memória de saída para a interface de saída. Resumidamente, as operações de funcionamento são descritas como:

- Energização.
- Limpeza das memórias-imagem da entrada e saída.
- Teste de escrita/leitura da memória RAM.
- Teste de execução do programa usuário.

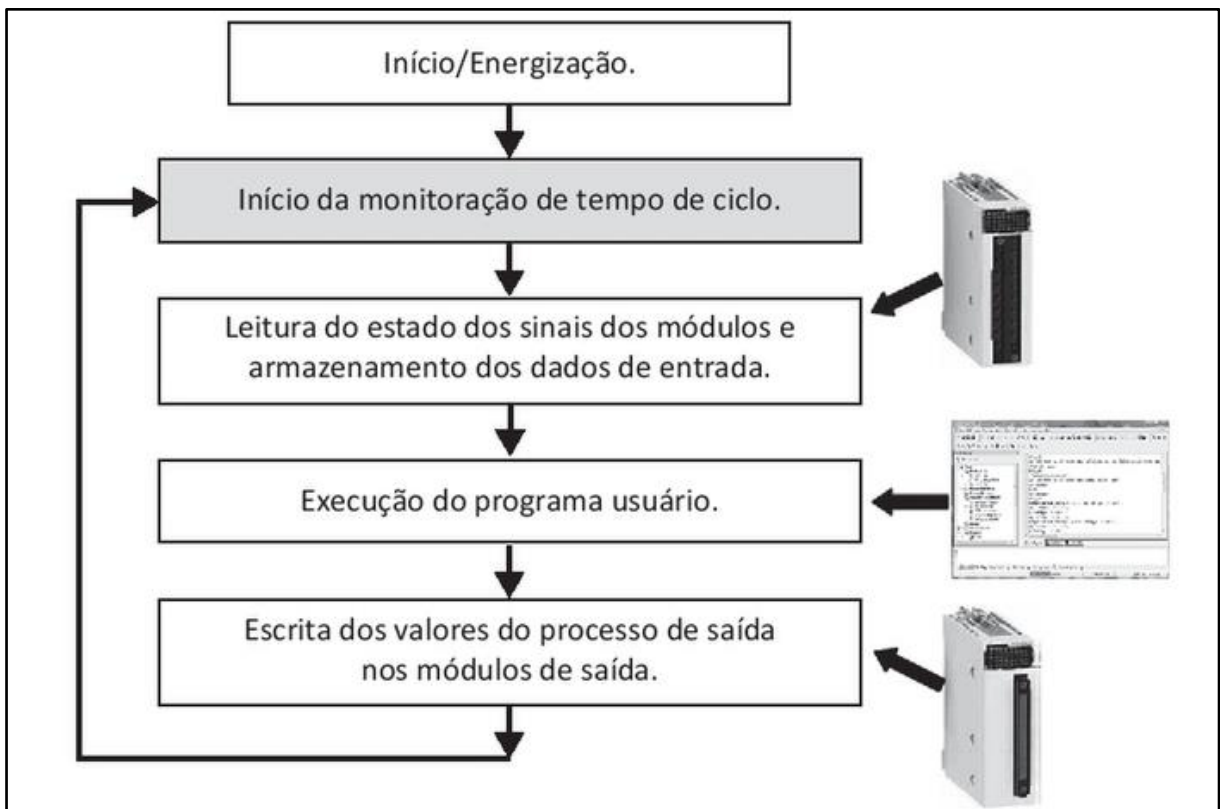


- Execução das rotinas de inicialização.
- Execução da varredura (*Scan*).

No processo de varredura (*Scan*), o CLP lê os estados de cada uma das entradas e verifica se alguma foi acionada. Após o ciclo de varredura, o CLP armazena os resultados obtidos na varredura em uma região. Esse resultado é consultado durante o processamento do programa usuário. Após executar o programa usuário e consultar o resultado armazenado, a CPU (Unidade Central de Processamento) atualiza as saídas, de acordo com as instruções definidas pelo usuário no programa. A CPU mostra o valor contido nas memórias das saídas e atualiza as interfaces. (SILVA, 2018)

O ciclo de varredura é representado pela Figura 21.

Figura 21 - Ciclo de Varredura (*Scan*)



Fonte: (SILVA, 2018)

De acordo com Antonelli (2019), o CLP executa uma série de operações quando é ligado, sendo descritas como:

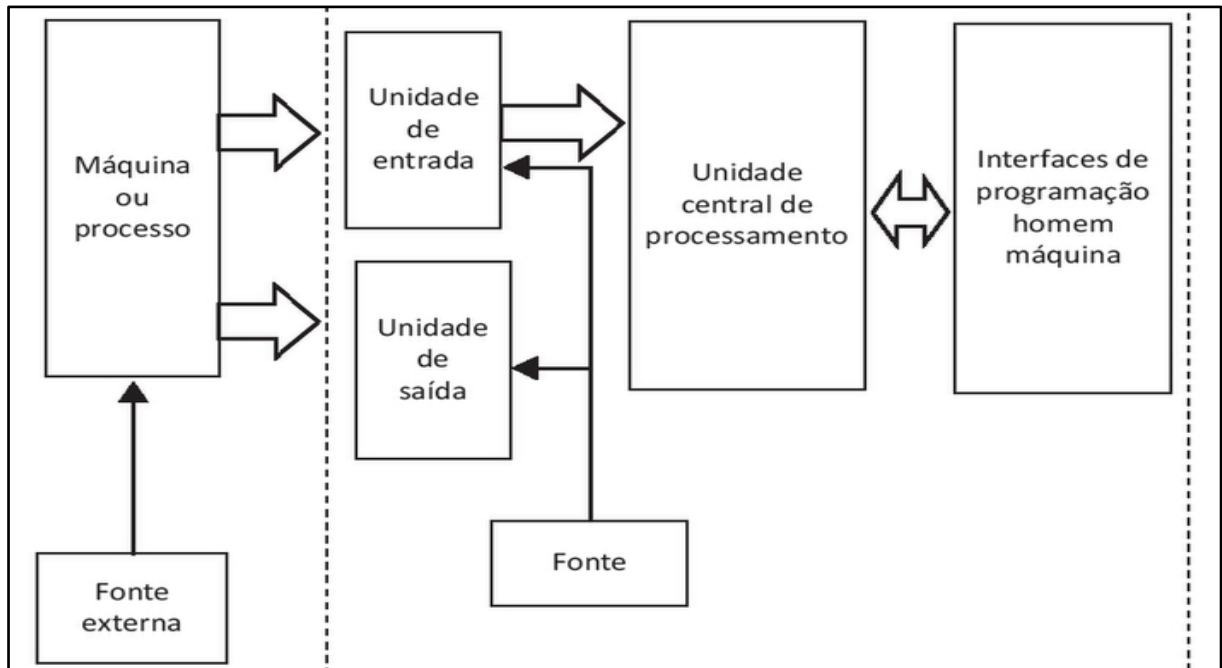
- Inicialização: Verifica o funcionamento eletrônico da CPU, memórias e circuitos auxiliares; verifica a configuração interna e compara os circuitos instalados; verifica o estado das chaves principais (*RUN*, *STOP*, *PROG*, etc); verifica a existência de um programa de usuário; desativa todas as saídas e emite um aviso de erro caso algum dos itens citados falhem.
- Verificação do estado das entradas: O CLP realiza a leitura de cada uma das entradas, verificando se foram acionadas. Este processo recebe o nome de Varredura (*Scan*) e geralmente leva milissegundos.
- Transferência para a memória: após o *Scan*, o CLP armazena os resultados obtidos em uma região de memória denominada de memória imagem das entradas e saídas. Essa memória é consultada pelo CLP no decorrer do processamento do programa do usuário.
- Comparação com o programa do usuário: Após executar o programa do usuário e consultar a memória imagem das entradas, o CLP atualiza o estado da memória imagem das saídas, de acordo com o algoritmo definido pelo usuário em seu programa.
- Atualização do estado das saídas: o CLP mostra o valor contido na memória das saídas atualizando as interfaces ou módulos de saída, então, inicia-se um novo ciclo de varredura.

### 2.6.1.3 Arquitetura do Controlador Lógico Programável

Na arquitetura básica do CLP, algumas características avançadas variam de fabricante para fabricante. São exemplos dessas características: capacidade relacionada ao número de entradas e saídas, memória, conjunto de instruções, velocidade de processamento, comunicação, confiabilidade, modularidade, IHM (Interface Homem Máquina), etc. (SILVA, 2018)

A Figura 22 ilustra esquematicamente a arquitetura básica de um Controlador Lógico Programável.

Figura 22- Arquitetura Básica do CLP



Fonte: (SILVA, 2018)

Silva (2018), detalha a função de alguns elementos da arquitetura básica do CLP:

- Unidade de entrada: recebe sinais elétricos do equipamento ou processo e tem compatibilidade com o circuito eletrônico do CLP.
- Unidade de Saída: recebe os sinais processadas pelo CLP e fornece um sinal elétrico para utilização na máquina ou processo.
- Unidade de processamento: dito como cérebro, administra todas as funções, recebe os sinais da unidade de entrada, executa a lógica do programa usuário e coloca o resultado na unidade de saída.
- Fonte de alimentação: dispõe a energia elétrica para o funcionamento do conjunto do CLP.

#### 2.6.1.4 Módulos de entrada e saída do CLP

Segundo Silva (2018), o CLP considerado ideal é aquele que se adapta às necessidades de aplicação interligadas à planta industrial compatíveis com sensores e atuadores.

Para Antonelli (2019), O Controlador Lógico programável aceita diversos módulos especiais, os módulos mais encontrados nos fabricantes são:

- Módulos Contadores de Fase única;
- Módulos contadores de Dupla fase;
- Módulos para Encoder incremental;
- Módulos para Encoder Absoluto;
- Módulos para Termopares (Tipo J, K, L, S, etc);
- Módulos para Termoresistências (PT-100, Ni-100, Cu-25, etc);
- Módulos para sensores de ponte Balanceada do tipo *Strain-Gauges*;
- Módulos para leitura de Grandezas Elétricas (Kw, Kwh, KQ, KQh, Cos fi, I, V, etc);
- Módulos *Ethernet*;
- Módulos de comunicação com Redes.

#### 2.6.1.5 Unidades de Entrada e Saída Digital

As unidades de entrada digital são modularizadas para conexão direta com os sinais dos transdutores e atuadores. As unidades E/S convertem os sinais elétricos do processo para os baixos níveis utilizados pelo controlador, que são providos de isolamentos ópticos com fotodiodo e fototransistor encapsulados em um dispositivo chamado acoplador óptico. As unidades de entrada e saída digital permitem apenas dois estados: aberto ou fechado. (SILVA, 2018)

De acordo com Antonelli (2019), entradas e saídas digitais são aquelas que permitem apenas dois estados possíveis, ligado ou desligado. Alguns exemplos de dispositivos que podem ser ligados a sinais digitais são:

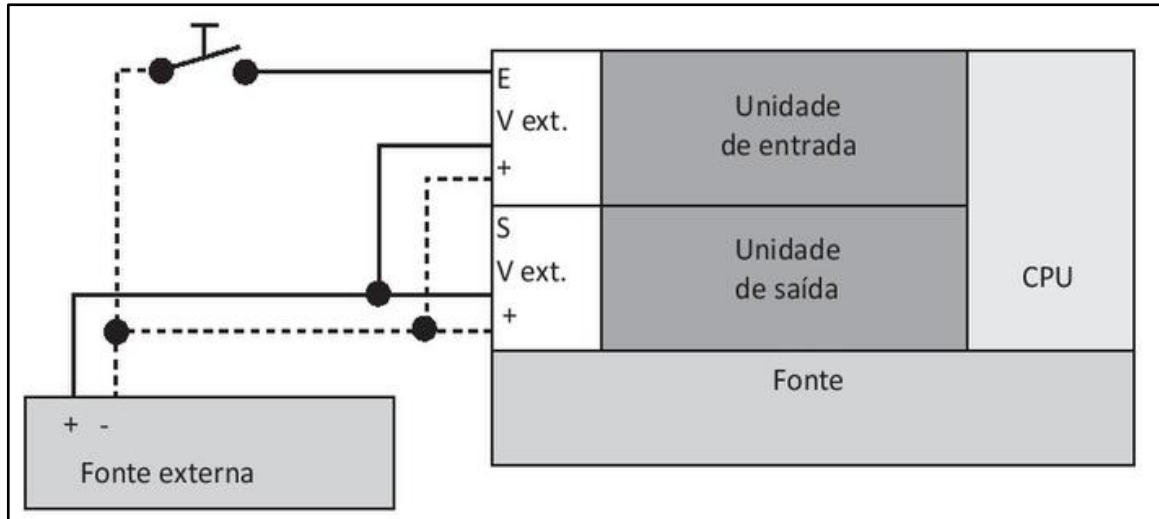
- Botoeiras;
- Chaves (ou micro) fim de curso;
- Sensores de proximidade indutivos ou capacitivos;
- Chaves Comutadoras;
- Etc.

As entradas digitais podem operar em corrente contínua ou em corrente alternada. Podem ser também do tipo N (NPN) ou do tipo P (PNP). No tipo N, é preciso fornecer o potencial negativo (terra e neutro) da fonte de alimentação ao terminal de entrada para ativar a mesma. No caso do tipo P, é necessário fornecer o potencial positivo (fase) para o terminal entrada. As entradas em corrente contínua (24 VCC – Valor comumente utilizado) são aplicadas quando a distância entre os dispositivos de

entrada e o CLP não ultrapassem os 50 metros. Caso contrário, os níveis de ruído podem provocar acionamentos acidentais. (ANTONELLI, 2019)

A Figura 23 ilustra esquematicamente a entrada digital do tipo N (NPN).

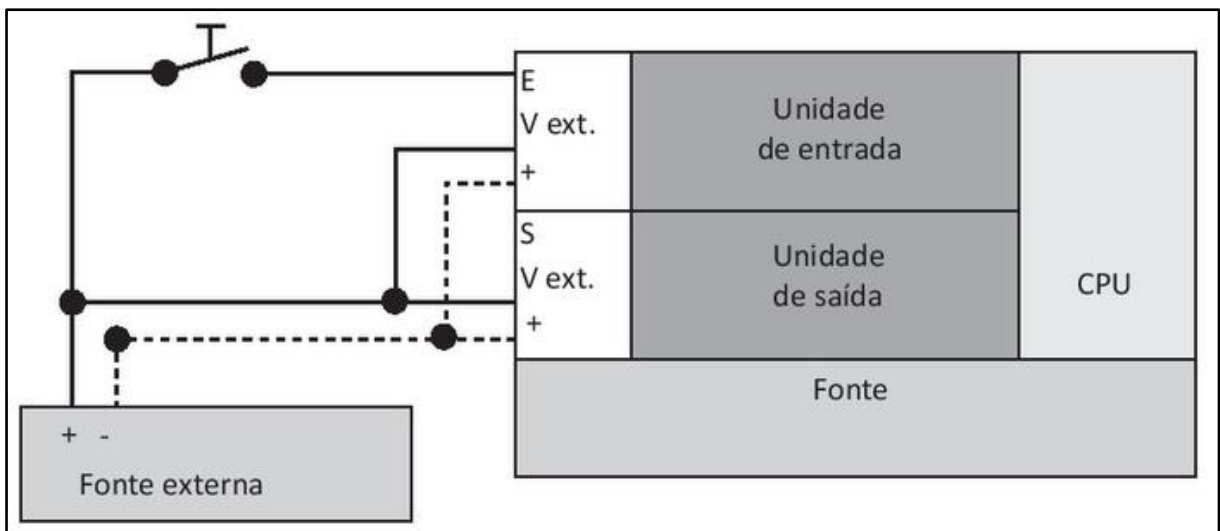
Figura 23- Ligação de entrada NPN



Fonte: (SILVA, 2018)

A Figura 24 ilustra esquematicamente a entrada digital do tipo P (PNP).

Figura 24 - Ligação de entrada PNP

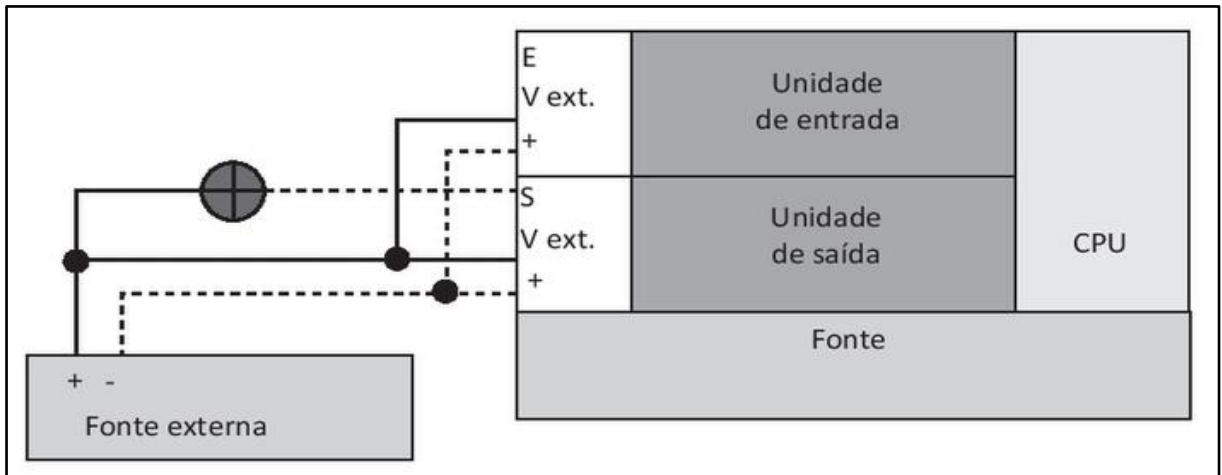


Fonte: (SILVA, 2018)

Na saída digital do tipo N, a mesma é ligada quando se coloca 0 Vcc no borne de saída. No acionamento, o CLP fornece negativo para a carga, que deve ser ligada entre o terminal de saída e o potencial positivo da fonte externa. (SILVA, 2018)

A Figura 25 apresenta a ligação de saída do tipo N (NPN).

Figura 25- Ligação de Saída NPN

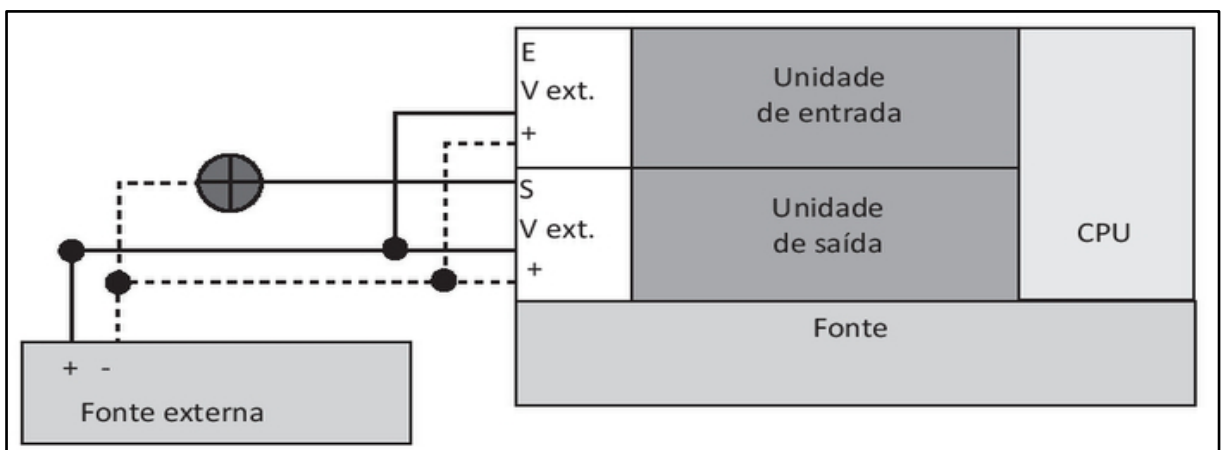


Fonte: (SILVA, 2018)

Na ligação de saída do tipo P, a mesma é ligada quando se coloca +24 Vcc no terminal de saída. No acionamento, o CLP fornece potencial positivo para a carga, que é ligada entre o terminal de saída e o potencial negativo da fonte externa. (SILVA, 2018)

A Figura 26 apresenta a ligação de saída do tipo P (PNP).

Figura 26 - Ligação de Saída PNP



Fonte: (SILVA, 2018)

### 2.6.1.6 Unidades Analógicas

O Controlador Lógico Programável trabalha com valores Booleanos, ou seja, 0 e 1, isso se aplica muito bem para sinais digitais. Porém, os sinais analógicos são contínuos e variam com o tempo dentro de um intervalo determinado de valores. Como exemplo: um sinal analógico de 0 – 10 volts. Este sinal pode variar de 0 a 10 volts e ter qualquer nível de tensão entre eles, para representação desses valores é utilizado os números binários. (FERREIRA, 2019)

O sinal de entrada analógica passa por um conversor A/D (Conversor Analógico/Digital) quando entra no CLP. Este componente transforma o sinal analógico em sinal digital e são esses sinais que apresentarão a representação de valor binário no CLP. Os sinais analógicos mais utilizados no CLP são a Tensão, Corrente e Resistência. (FERREIRA, 2019)

Unidades analógicas admitem mais de dois estados possíveis em um intervalo determinado de valores. É representado por uma grandeza que pode assumir qualquer valor entre dois limites determinados. As grandezas analógicas elétricas mais utilizadas por um CLP são tensão e corrente. (SILVA, 2018)

- Corrente: 0 a 20 mA; 4 a 20 mA.
- Tensão: 0 a 10 Vcc; 0 a 5 Vcc; -5 a +5 Vcc; -10 a +10 Vcc.

#### 2.6.1.6.1 Entrada Analógica

As entradas analógicas podem vir de sensores e transmissores, o trabalho desses dispositivos é converter em um sinal elétrico. Um exemplo é um transmissor de temperatura com saída de 4-10 mA. Conectado ao transmissor está um sensor de temperatura. O transmissor é calibrado para a faixa de 0-100° Celsius. Isso significa que quando a temperatura é de 0 graus, a saída do transmissor é de 4 mA, e para 100 graus a saída do transmissor será 20 mA. (FERREIRA, 2019)

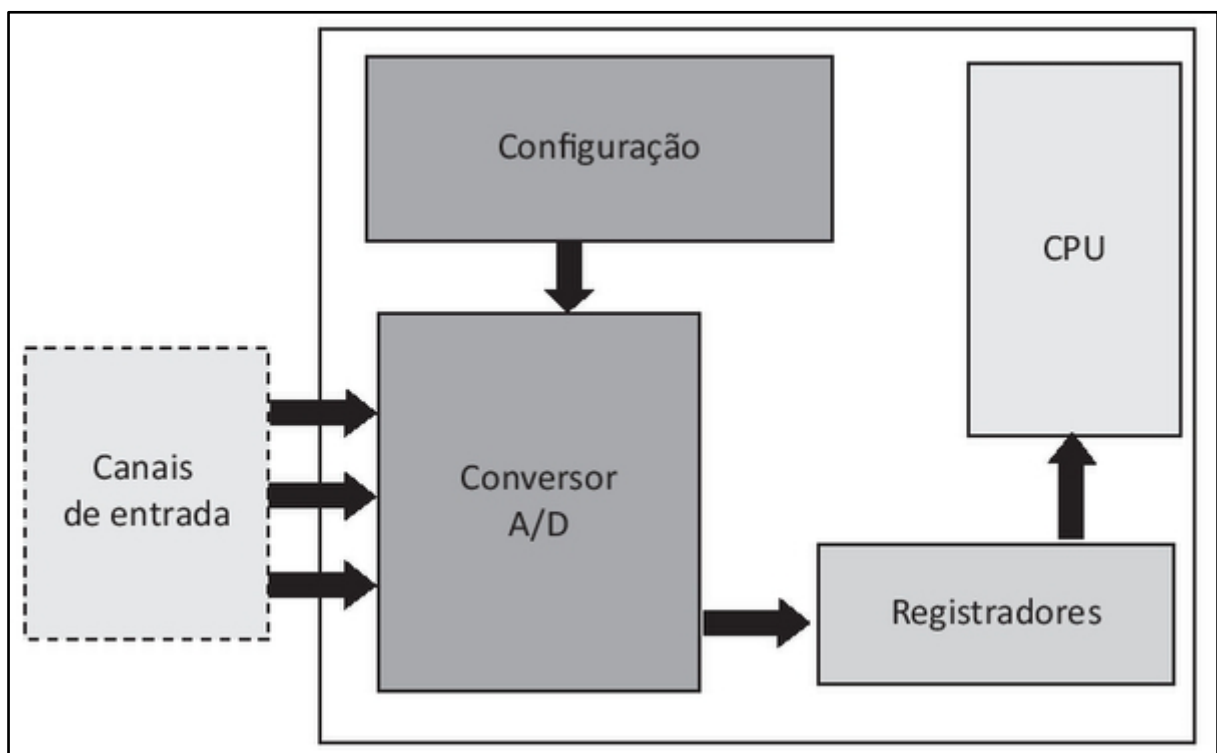
A resolução das entradas analógicas é normalmente mensurada em Bits. Uma entrada analógica com um maior número de bits permite uma representação mais eficaz da grandeza analógica. Como exemplo: uma placa de entrada analógica de 0 a 10 Vcc com uma resolução de 8 bits permite uma sensibilidade de 39,2 mV. Enquanto que a mesma faixa em uma entrada de 12 bits permite uma sensibilidade de 2,4 mV e uma de 16 bits permite uma sensibilidade de 0,2 mV. (ANTONELLI, 2019)

Segundo Silva (2018), a entrada analógica recebe sinal analógico e o transforma em valores numéricos. Os dispositivos mais utilizados nas entradas analógicas são:

- Sensores de pressão manométrica.
- Encoder.
- Transmissores de pressão, nível, vazão, temperatura, etc.
- Sensores de pressão mecânica, como célula de carga.

A Figura 27 ilustra a interface de entrada analógica.

Figura 27- Interface de Entrada Analógica



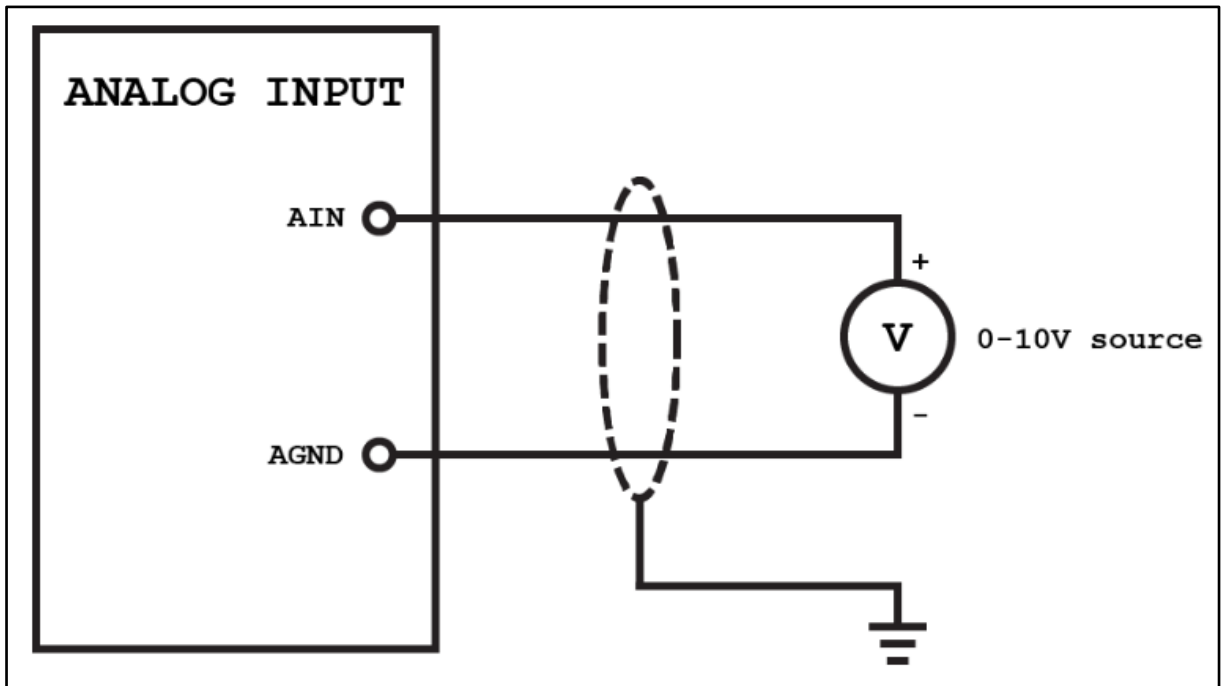
Fonte: (SILVA, 2018)

A Figura 28 mostra genericamente a ligação de entrada analógica de tensão. Para Ferreira (2019), a tensão é mensurada entre dois pontos. Sendo os dois terminais de medição definidos como:

- AGND: o terra ou referência para entradas analógicas.
- AIN: entrada analógica.



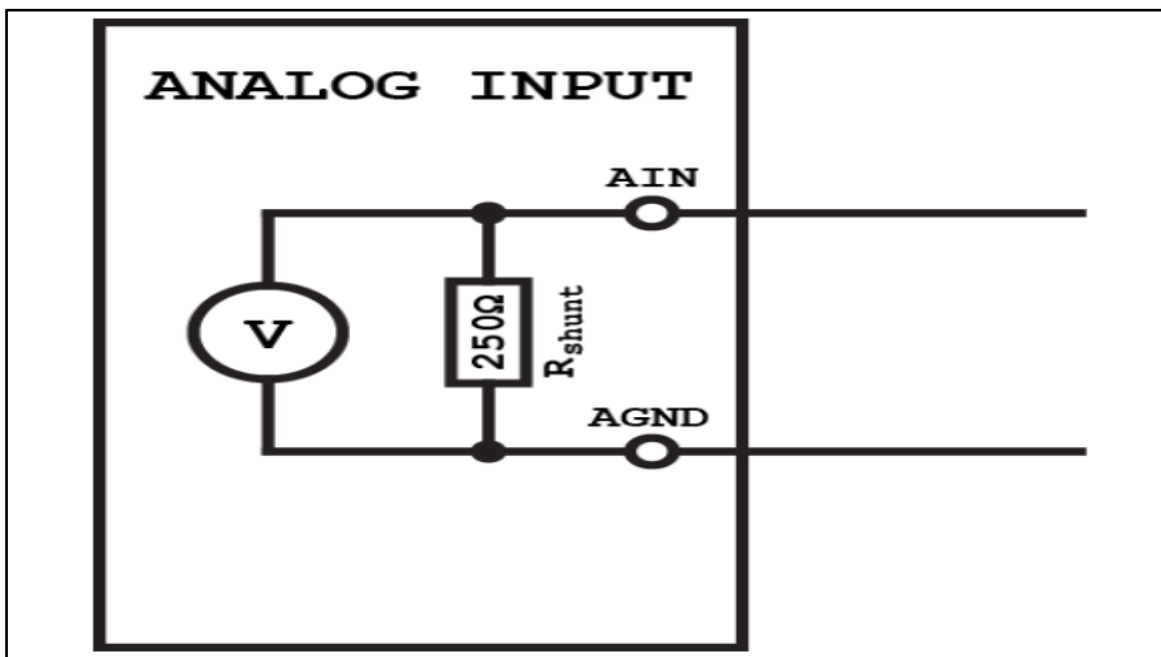
Figura 28- Ligação de Entrada Analógica de Tensão



Fonte: (FERREIRA, 2019)

A Figura 29 apresenta de forma simplificada a ligação de entrada analógica de corrente.

Figura 29 - Ligação de Entrada Analógica de Corrente



Fonte: (FERREIRA, 2019)

Na ligação de entrada analógica de corrente, o CLP não mensura a corrente. Então, o que acontece dentro do módulo de entrada analógica, um resistor é inserido entre o positivo (AIN) e o negativo (AGND). Isso compõe o circuito fechado e também converte o sinal de corrente em sinal de tensão por causa da Lei de Ohm, descrita na equação 13. (FERREIRA, 2019)

$$V(\text{Tensão}) = R(\text{Resistência}) \cdot I(\text{Corrente}) \quad (13)$$

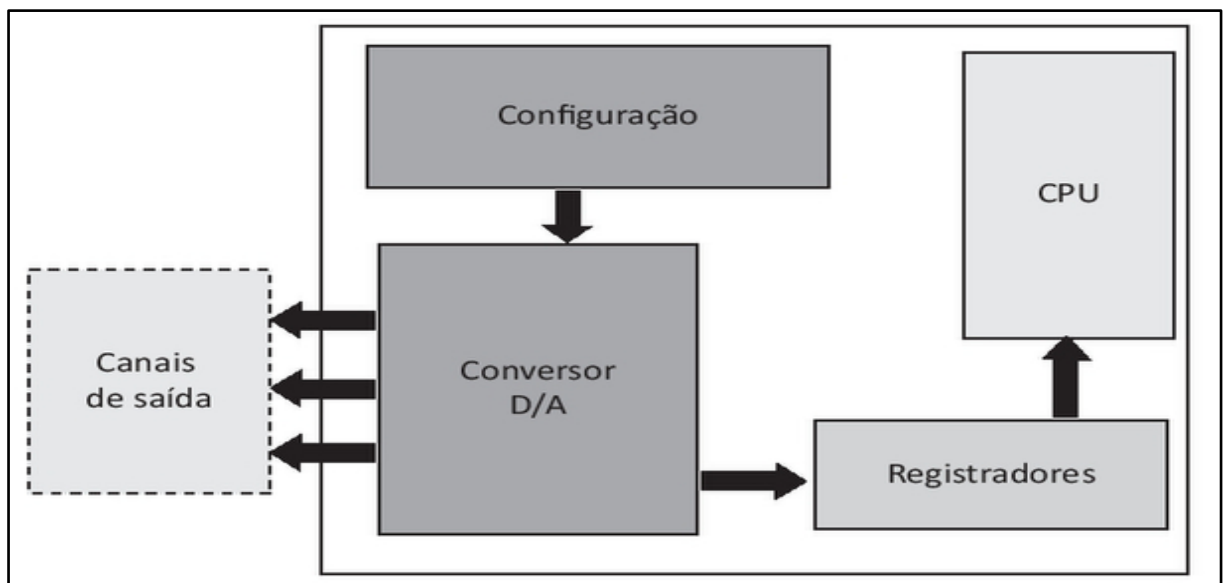
#### 2.6.1.6.2 Saída Analógica

Segundo Silva (2018), saídas analógicas convertem os valores numéricos em sinais de tensão ou corrente. Os mais comuns são de 0 a +10 Vcc ou de 0 a +5 Vcc. Para a corrente os valores são: 0 a 20 mA ou de 4 a 20 mA. Estes sinais são geralmente utilizados para controlar dispositivos do tipo:

- Inversores de Frequência;
- Válvulas proporcionais.
- Posicionadores rotativos.
- Servomotores CC.

A imagem 29 ilustra esquematicamente a interface de saída analógica.

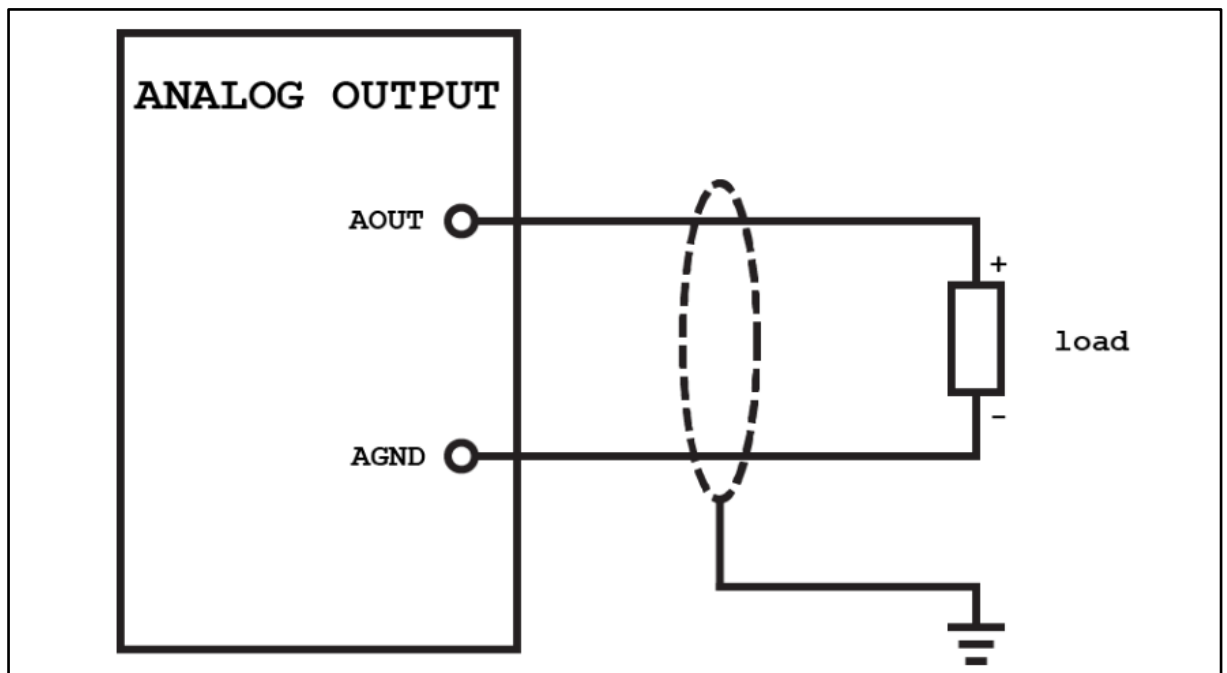
Figura 30 - Interface De Saída Analógica



De acordo com Ferreira (2019), as saídas analógicas tem similaridades com as entradas analógicas, porem existem diferenças na ligação e utilização do programa no CLP. As mesmas podem ser divididas em saídas de tensão e corrente.

A saída analógica de tensão é mostrada na Figura 31. Para realizar a sua ligação são necessários dois fios. Um lado positivo e um lado negativo da tensão, que neste caso é a saída de tensão analógica. (FERREIRA, 2019)

Figura 31 - Ligação da Saída Analógica de tensão

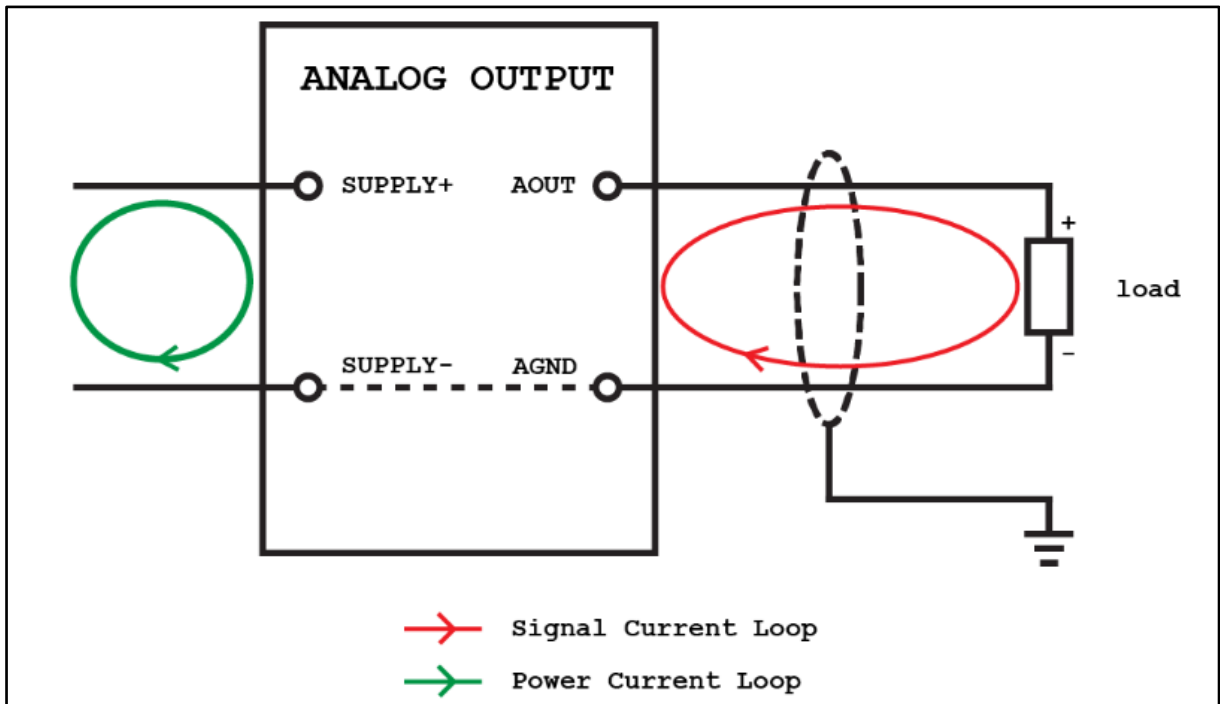


Fonte: (FERREIRA, 2019)

Existe uma grande diferença entre as saídas de corrente e tensão. Essa diferença é dada pela impedância da carga, pois onde as saídas de tensão requeriam uma impedância de carga mínima, as saídas de corrente têm uma impedância de carga máxima. Uma saída analógica de corrente de CLP tem uma impedância de carga máxima de 300-500 Ohms. (FERREIRA, 2019)

A Figura 32 mostra a ligação de saída analógica de corrente.

Figura 32 - Ligação de Saída Analógica de Corrente



Fonte: (FERREIRA, 2019)

## 2.7 Redes *Ethernet*

As redes *Ethernet* se estabeleceram como padrão de comunicação para redes locais desde a sua invenção, como a automação industrial se convergiu ao longo dos anos com a Tecnologia da Informação, as redes *Ethernet* se desenvolveram dentro da automação, adquirindo características que delinearão um cenário de total aderência aos novos projetos e atualização de sistemas para automação e controle. (VENTURELLI, 2017)

A partir da década de 80, o IEEE assumiu-se como o órgão normalizador para as redes locais através do projeto 802, a primeira versão da norma foi criada em 1983, sendo consolidada como a norma 802.3. (SÁ, 2016)

O padrão *Ethernet* define o meio físico de conexão do cabeamento e o controle de acesso da informação na rede e define o quadro (frame) de informação, tudo isso baseado nas normas IEEE 802.2 e IEEE 802.3. (VENTURELLI, 2017)

Segundo Sá (2016), *Ethernet* se estabelece numa estrutura em barramento, onde todos os computadores acedem em igualdade de circunstâncias. Os condutores físicos podem ser pares simétricos de cobre (UTP – *Unshielded Twisted Pair*) ou fibra

ótica. A Tabela 4 indica as variantes mais utilizadas atualmente. A variante “Base T”, é uma variante sobre cobre.

Tabela 4 - Variantes Ethernet

Variante	Débito Nominal	Meio Físico
10 Base T	10 Mbit/s	Cabo UTP
100 Base T	100 Mbit/s	Cabo UTP
1000 Base T	1 Gbit/s	Cabo UTP
GbE	1 Gbit/s	Fibra Ótica
10 GbE	10 Gbit/s	Fibra Ótica

Fonte: (SÁ, 2016)

De acordo com Venturelli, (2017), a rede *Ethernet* é amplamente aplicada na indústria, sendo as características necessárias para atender aos severos ambientes industriais são:

- Aplicação em Ambientes Severos (*Hardware*);
- Temperaturas não ambientes. Ex: -35°C à 75°C;
- Proteção Mecânica Especial;
- IP (Alto grau de Proteção);
- Suportar Vibração e Impacto;
- Alta Imunidade a Ruídos (EMI);
- Arranjos de Alta Disponibilidade (Redundâncias);
- Uso de protocolos Industriais.

Para Sá (2016), as LAN *Ethernet* utilizam o protocolo CSMA/CD (*Carrier Sense Multiple Acces With Colision Detection*) para fazer a gestão do modo de como os vários equipamentos partilham o barramento:

- Os equipamentos estão permanentemente a ler o estado do barramento para verificarem se existe alguma trama que lhes seja dirigida;
- Quando um equipamento necessita de enviar uma trama, aguarda que o barramento esteja livre para iniciar o seu envio.

Quando o equipamento envia a trama, o mesmo observa o barramento para detectar se outro está a enviar informação ao mesmo tempo. Caso ocorra uma colisão,

o equipamento espera um tempo aleatório para enviar novamente ao barramento. (SÁ,2016)

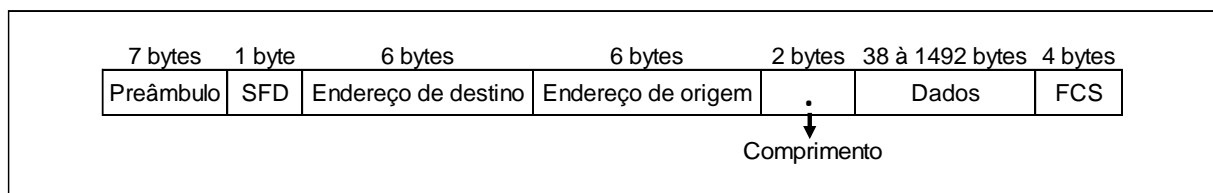
Uma das maiores barreiras quanto à aplicação da *Ethernet* na indústria se refere ao determinismo de rede, pois o princípio de colisão de dados não permite a certeza de entrega e recebimento de uma informação em uma base de tempo conhecida. As redes *Ethernet* baseiam-se no CSMA/CD e não permitem determinismo, pois trabalham com colisão de dados. O *Ethernet* Industrial utiliza características de controle de sincronismo dentro do seu protocolo, utilizando protocolos de rede como Profinet, Ethernet/IP, etc. (VENTURELLI, 2017)

Segundo Sá (2016), dentro de um ambiente com vários equipamentos, é necessário que cada um seja identificado por um endereço para haver comunicação entre eles. Cada interface *Ethernet* tem um endereço, formado por 6 bytes. Os três primeiros bytes indicam o fabricante. Os três últimos bytes indicam sequencialmente as interfaces que vão sendo produzidas. Estes endereços são colocados em todas as tramas de modo a indicar o destinatário e a origem. A trama *Ethernet* contém os seguintes campos:

- Preâmbulo: sequência de bits que serve para sincronizar os receptores: 7 bytes iguais a “10101010”;
- SFD (*Start Frame Delimiter*): marca o início da trama: 1 byte igual a “10101011”;
- Endereço destino/endereço origem: endereços de MAC de destino e origem. Um endereço de destino com os bits todos a “1”;
- FCS (*Frame Check Sequence*) – controle e sequencia de testes de erros.

A Figura 33 ilustra esquematicamente a trama *Ethernet*.

Figura 33 - Trama Ethernet



Fonte: Adaptado (SÁ,2016)

Para Venturelli (2017), os Switches são os principais componentes de uma Rede *Ethernet*, eles controlam os encaminhamentos de rede, são as chaves de conexão que gerem o tráfego de dados. As principais características dos *Switches* são:

- Automação das redes;
- Localização física (porta/segmento);
- Localização Lógica (rede/sub-rede);
- Priorização de mensagens;
- Identificação dos tipos de mensagens;
- Tratar erros e falhas;
- Gerenciar tempos e sincronismo

### 2.7.1 Protocolo de Comunicação Profinet

O profinet é uma rede padronizada pela Associação Profibus internacional como das redes de Ethernet industrial. A norma IEC61158-5 e IEC61158-5 regulamenta o Profinet. Existem dois tipos de redes Profinet: Profinet IO e Profinet CBA. Utiliza-se o Profinet IO em aplicações em tempo real e o Profinet CBA em aplicações que não exijam rapidez. (LUGLI, 2019)

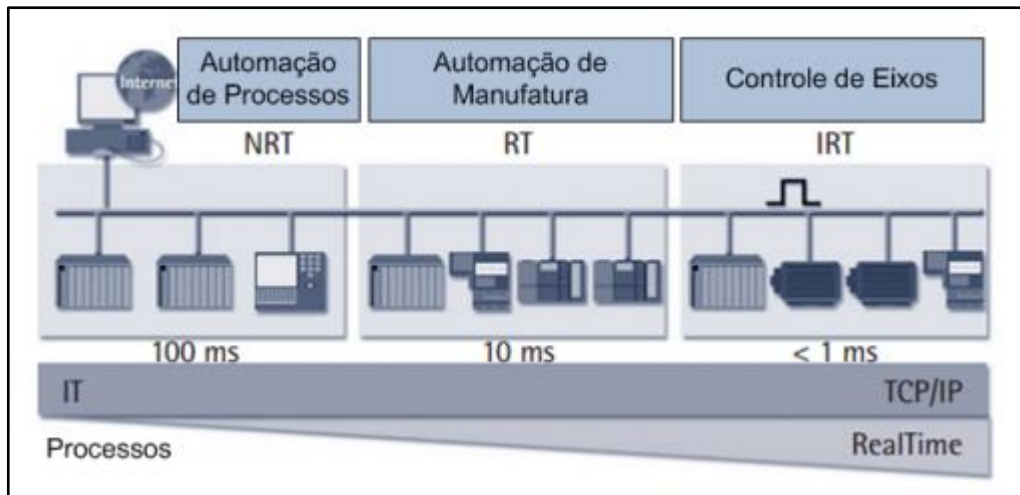
O Profinet (*Process Field Network*) é um protocolo de comunicação industrial aberto. O Profinet se baseia nos protocolos TCP, UDP E IP para configuração, troca de dados e diagnóstico de rede, sendo seus pontos fortes a criação de um ambiente de rede industrial integrado, robusto e seguro. Este protocolo foi criado com o intuito de satisfazer uma rede de comunicação industrial ideal. Suas características foram criadas e desenvolvidas pela Profibus Internacional. (OLIVEIRA, 2016)

De acordo com Oliveira (2016), o protocolo Profinet é dividido em três canais de comunicação diferenciados por níveis de performance para diversos tipos de processos industriais automatizados. Cada tipo de processo exige diferentes tempos de sincronização, que comandam o nível de performance da rede. A Figura 34 compara o tipo de aplicação com os canais Profinet.

- NRT (*Non Real Time*): para aplicações onde o tempo de ciclo não é crítico ( $\geq 100\text{ms}$ ).
- RT (*Real Time*): utiliza-se em processos que requerem maior precisão, possui característica de transmissão de dados em alta performance, tem tempos de ciclo mais rápidos ( $100 \geq t \geq 10\text{ms}$ ).

- IRT ( *Isynchronous Real Time*): para comunicação sincronizada pro clock, onde o tempo de ciclo é extremamente crítico ( $\leq 1$  ms).

Figura 34 - Exemplos de Aplicações com os canais Profinet



Fonte: (OLIVEIRA, 2016)

## 2.8 MOTORES ELÉTRICOS

Antes de entrar no contexto de motores elétricos, é importante entender o que é máquina elétrica. Uma máquina elétrica é um dispositivo que pode converter energia mecânica em energia elétrica como a energia elétrica em energia mecânica. Quando o dispositivo é utilizado para converter energia elétrica em mecânica, é denominado Gerador. Quando utilizado para converter energia elétrica em energia mecânica, é chamado de motor. No cotidiano, motores elétricos se apresentam em diversos lugares. Nas residências, motores elétricos acionam freezers, geladeiras, liquidificadores de ar, etc. Nas indústrias, motores elétricos fazem parte de todas as etapas do processo. Naturalmente, para fornecer energia elétrica para os motores, há necessidade de geradores. (CHAPMAN, 2013)

Motores elétricos possuem conceitos básicos sobre o seu funcionamento. Conjugado, trabalho, campo magnético, potência, etc. são alguns exemplos.



### 2.8.1 Conjugado ou Torque

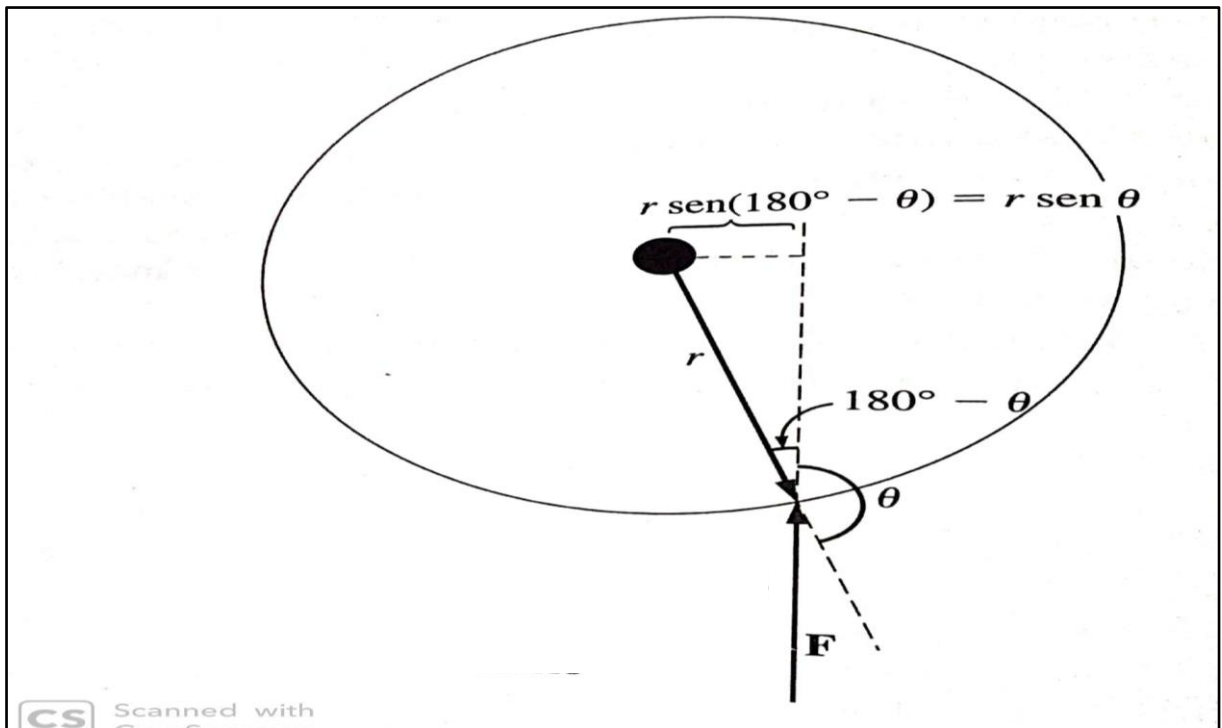
O conjugado (também conhecido como torque ou momento binário) é a medida do esforço necessário para girar um eixo. (WEG, 2019)

Segundo Chapman (2013), o conjugado de um objeto é definido como o produto da força aplicada ao objeto multiplicado a menor distância entre a reta de ação da força e o eixo de rotação do objeto.

A equação 14 expressa matematicamente a formulação do torque seguindo o modelo da figura 35.

$$\tau = rF\text{sen}\theta \quad (14)$$

Figura 35 - Dedução da equação do conjugado em um objeto



Fonte: (CHAPMAN, 2013)

### 2.8.2 Trabalho Mecânico

Para Chapman (2013), denomina-se Trabalho (W) no movimento retilíneo, a aplicação de uma força que se desloca por uma distância. Para o movimento de rotação, trabalho é a aplicação de um conjugado por um ângulo. A equação 15 deduz o Trabalho W para o movimento de rotação.

$$W = \int \tau \theta \quad (15)$$

### 2.8.3 Potência

Genericamente, a potência pode ser definida como a taxa de produção de trabalho por unidade de tempo. (CHAPMAN, 2013)

A Equação 16 mostra a formulação da Potência para o movimento linear.

$$P = Fv \quad (16)$$

A Equação 17 apresenta a fórmula da potência para o movimento de rotação.

$$P = \tau\omega \quad (17)$$

### 2.8.4 Rendimento

O motor elétrico absorve energia elétrica da linha e a converte em energia mecânica no eixo. O rendimento define a eficiência com que é feita essa transformação. (WEG, 2019)

A equação 18 define as variáveis do rendimento  $\eta$ .

$$\eta = \frac{100 \cdot P(\text{kW})}{U \cdot I \cdot \cos\phi \cdot \sqrt{3}} \quad (18)$$

### 2.8.5 Campo Magnético

De acordo com Chapman (2013), os campos magnéticos constituem os mecanismos fundamentais pelo qual a energia é convertida de uma forma em outra em motores e geradores elétricos. São quatro os princípios básicos que descrevem como os campos magnéticos são utilizados nesses dispositivos.

- Um fio condutor de corrente produz um campo magnético em sua vizinhança.
- Um campo magnético variável no tempo induzirá uma tensão em uma bobina se esse campo passar através dessa bobina.
- Um fio condutor de corrente, na presença de um campo magnético, tem uma força induzida nele. (Principal fundamento de ação de motor)
- Um fio movendo-se na presença de um campo magnético tem uma tensão induzida nele.

A lei fundamental que dita a produção de um campo magnético por uma corrente é a lei de Ampère, descrita pela equação 19. Em que H é a intensidade do campo magnético produzido pela corrente líquida  $I(líq)$  e  $dl$  é um elemento diferencial de comprimento ao longo do caminho de integração. No S.I, I é medida em ampères e H em ampères-espiras por metro. (CHAPMAN, 2013)

$$\oint H \cdot dl = I(líq) \quad (19)$$

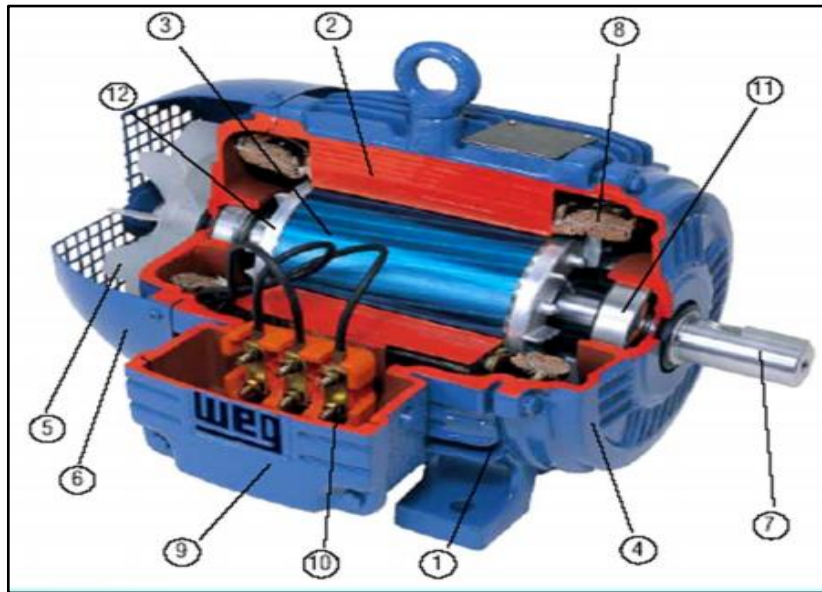
### 2.8.6 Motor de Indução Trifásico

O motor de Indução é uma das máquinas mais robustas e utilizadas na indústria. Seu estator é constituído por chapas de aço de alta qualidade. A superfície interna tem ranhuras para acomodar um enrolamento trifásico. O rotor é formado por chapas de material ferromagnético com ranhuras, o enrolamento do rotor pode ser do tipo rotor de gaiola ou do tipo rotor enrolado. (TORO, 1990)

A Figura 36 mostra a característica construtiva e os principais componentes do motor de indução Trifásico do tipo rotor de gaiola. Abaixo está a descrição dos itens numerados referente ao motor:

- 1 – Carcaça do estator;
- 2 - Núcleo Magnético do estator;
- 3 – Núcleo Magnético do rotor;
- 4 – Tampa dianteira;
- 5 – Ventilador;
- 6 – Tampa defletora;
- 7 – Eixo do rotor;
- 8 – Enrolamento trifásico;
- 9 – Caixa de ligação;
- 10 – Terminais de ligação;
- 11 – Rolamentos dos mancais.

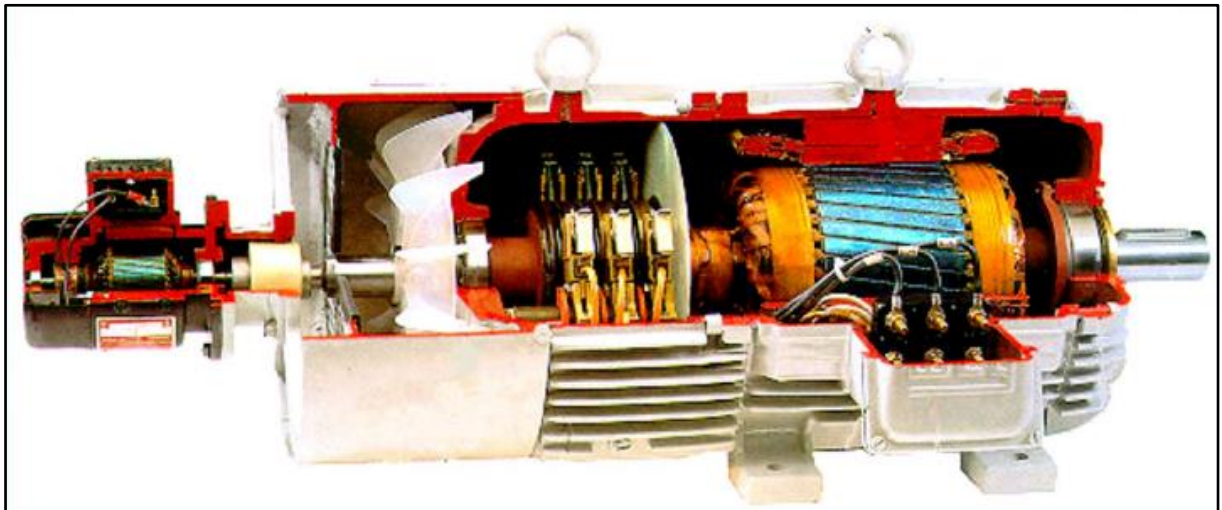
Figura 36 - Motor de Indução Trifásico com rotor de gaiola



Fonte: (HENRIQUE, 2019)

A Figura 37 apresenta a característica construtiva do motor de indução trifásico do tipo rotor enrolado.

Figura 37 - Motor de Indução Trifásico do Tipo Rotor Enrolado



Fonte: (HENRIQUE, 2019)

O campo girante gerado pelo enrolamento do estator corta os condutores do rotor, tendo como consequência a indução de tensões. Visto que o enrolamento do rotor está curto-circuitado pelos anéis, as tensões induzidas fazem com que correntes

circulem, as quais, por sua vez, reagem com o campo para produzir um torque eletromagnético resultando na ação motora. (TORO, 1990)

Um aspecto que distingue os motores de indução é que eles são máquinas com excitação única. As correntes circulam no enrolamento de armadura por indução, criando uma distribuição ampère-condutor que interage com a distribuição de campo para produzir um torque líquido unidirecional. A frequência da corrente induzida no condutor é ditada pela velocidade do rotor na qual está colocada. A relação entre a velocidade do rotor e a frequência da corrente de armadura é tal que dá uma distribuição ampère-condutor resultante que é estacionária em relação à distribuição do campo. A máquina de indução com excitação única é capaz de produzir torque a qualquer velocidade abaixo da velocidade síncrona. Devido a isso, a máquina de indução é classificada como uma máquina assíncrona. (TORO, 1990)

A velocidade de rotação do campo magnético é dada pela equação 20, mostrada abaixo.

$$n(sinc) = \frac{120 \cdot f(se)}{P} \quad (20)$$

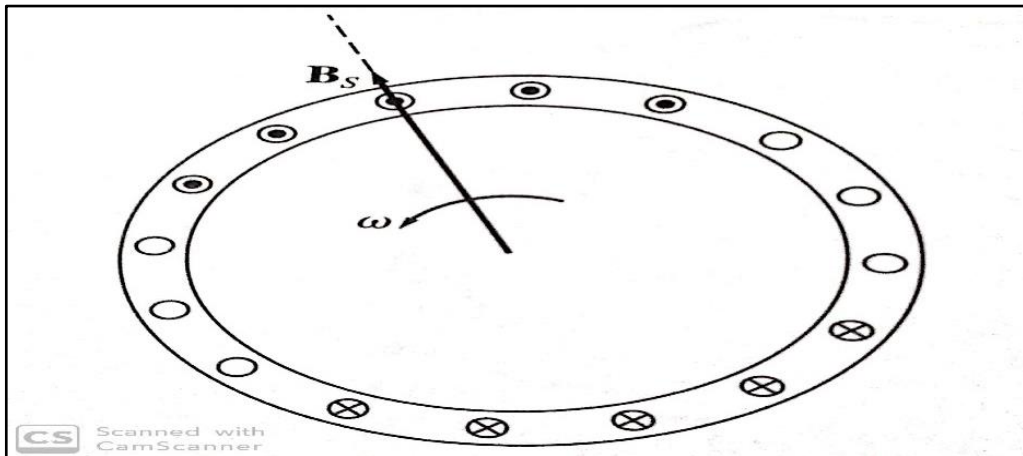
Onde  $f(se)$  é a frequência do sistema aplicada ao estator em hertz, e  $P$  é o número de polos da máquina.

A tensão induzida é fornecida através da equação 21. Em que  $v$  é a velocidade da barra em relação ao campo magnético.  $l$  corresponde ao comprimento do condutor dentro do campo magnético e  $v$  é a velocidade da barra em relação ao campo magnético.

$$e(ind) = (v \times B) \cdot l \quad (21)$$

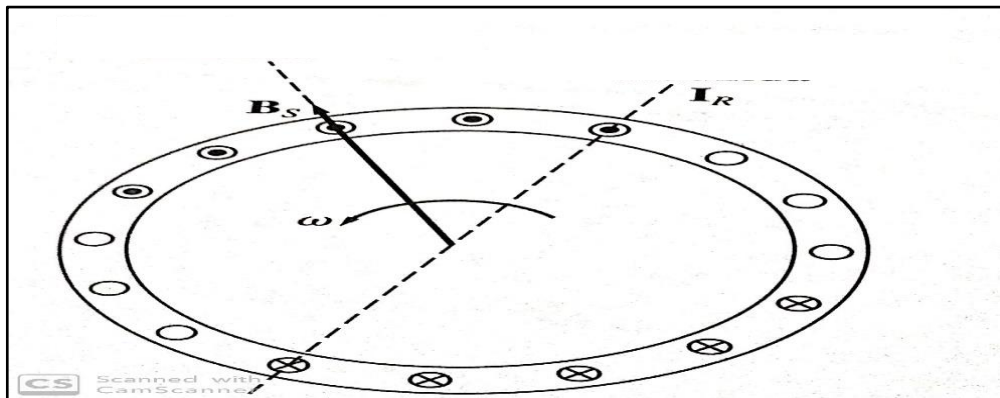
As Figuras 38,39 e 40 ilustram a produção de conjugado induzido em um motor de indução. (38) O campo girante de estator  $B_s$  induz uma tensão nas barras do rotor; (39) a tensão no rotor produz um fluxo de corrente no rotor, que está atrasado em relação à tensão devido a indutância do rotor; (40) a corrente do rotor produz um campo magnético girante  $B_r$  que está atrasado em  $90^\circ$  em relação a ela própria. O campo  $B_r$  interage com  $B_{liq}$  produzindo um conjunto anti-horário na máquina. (CHAPMAN, 2013)

Figura 38 - Tensão Induzida Máxima



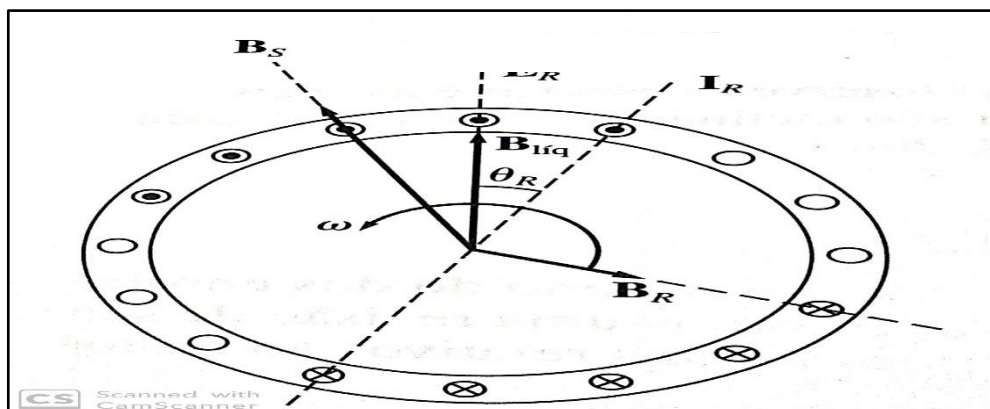
Fonte: (CHAPMAN, 2013)

Figura 39 - Tensão e Corrente Máxima Induzida



Fonte: (CHAPMAN, 2013)

Figura 40 - Tensão Líquida



Fonte: (CHAPMAN, 2013)

O conjugado induzido é dado pela Equação 22.

$$\tau(ind) = kBr X Bs \quad (22)$$

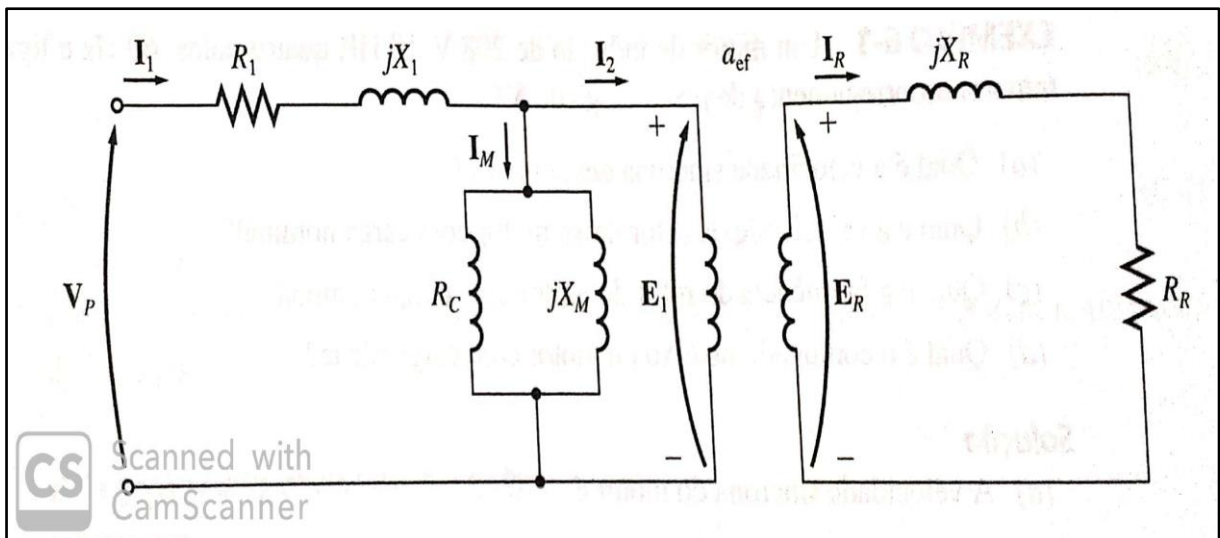
Onde  $Br$  é o campo magnético do rotor e  $Bs$  o campo magnético do estator.

Segundo Toro (1990), a diferença de velocidade entre os campos magnéticos do rotor e do estator é chamada de escorregamento ( $s$ ), sendo uma variável muito importante para o motor de indução. A Equação 23 mostra a fórmula do escorregamento. Onde  $n$  representa a velocidade real do motor e  $ns$  a velocidade de escorregamento em rpm.

$$s = \frac{ns - n}{ns} \quad (23)$$

O circuito equivalente de um motor de indução é representado pela Figura 41. Um motor de indução baseia-se na indução efetuada pelo circuito do estator de tensões e correntes no circuito do rotor. O circuito equivalente de um motor de indução é muito semelhante ao circuito equivalente de um transformador. (CHAPMAN, 2013)

Figura 41 - Circuito Equivalente de um Motor de Indução - com rotor e estator conectados por meio de um transformador ideal

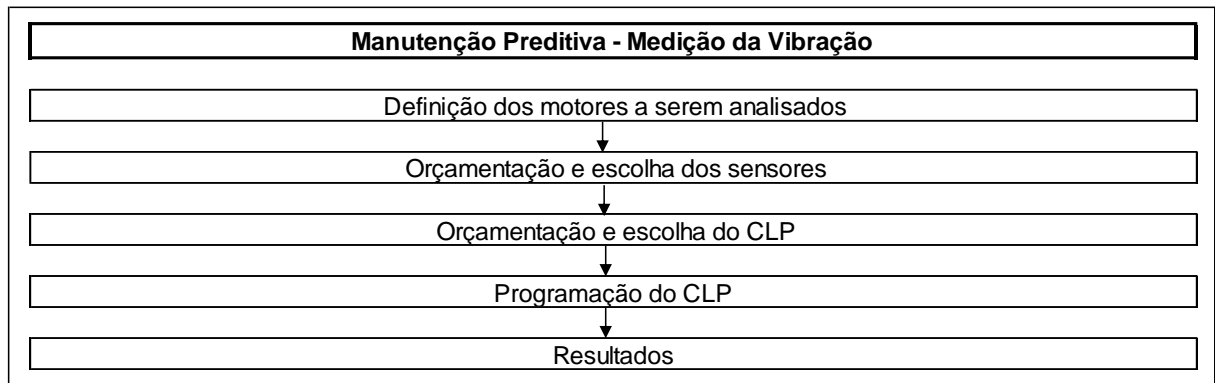


Fonte: (CHAPMAN, 2013)

### 3 METODOLOGIA E MATERIAIS

O presente capítulo apresenta os métodos utilizados em todas as etapas do projeto, mostrando a justificativa econômica e de viabilidade utilizada em cada etapa. A Figura 42 ilustra a esquematização das etapas.

Figura 42 - Etapas do Projeto



Fonte: (O AUTOR, 2019)

#### 3.1 Definição dos Motores a serem analisados

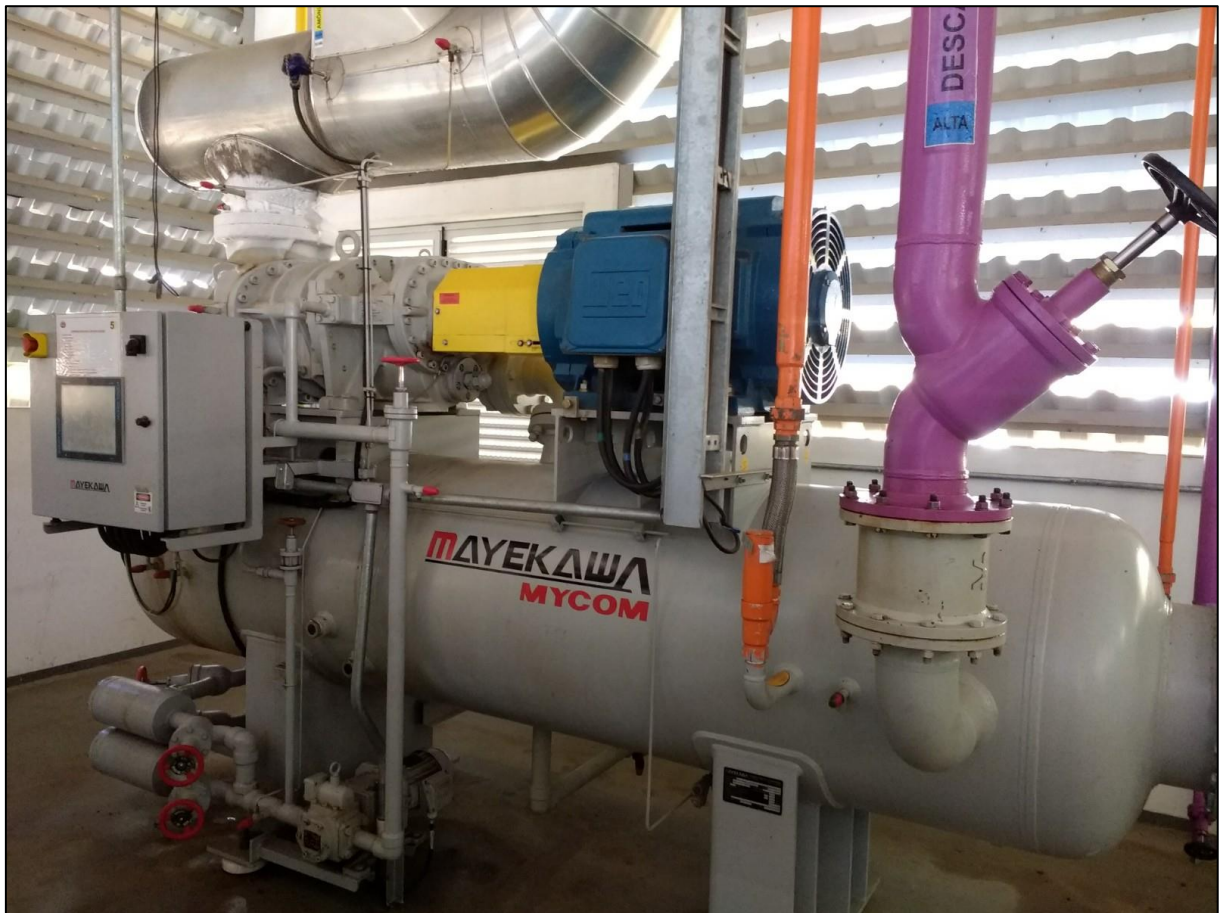
Foi escolhido dois motores para instalação dos sensores de vibração dentro da unidade de produção de Pizzas e lasanhas da Seara Alimentos, Unidade Lages/SC. Estes motores acionam dois compressores de Amônia (NH<sub>3</sub>), que são responsáveis pela refrigeração de dois tuneis de congelamento girantes e algumas câmaras de resfriamento, sendo máquinas de alta criticidade no processo. Possíveis falhas nestes motores podem gerar prejuízos de grande proporção na planta industrial, tendo em vista perdas como indisponibilidade de produção, ociosidade da mão de obra operacional, energia elétrica, perda de produto, etc.

##### 3.1.1 Motor 1

O primeiro motor elétrico aciona o compressor de amônia Mayekawa 1, se trata de um motor Weg de alto rendimento com potência de 250 cv. A Figura 43 ilustra o equipamento.



Figura 43 - Compressor de Amônia Mayekawa e motor Elétrico Weg 250 cv



Fonte: (O AUTOR, 2019)

### 3.1.2 Motor 2

O segundo motor alimenta o segundo compressor de amônia Mayekawa. Este também possui potência de 250 cv e as mesmas características do motor 1. A Figura 44 mostra a instalação do compressor e motor.

Figura 44 - Compressor Mayekawa 2 e motor Weg 250 cv



Fonte: (O AUTOR, 2019)

### 3.2 Escolha e Orçamentação dos Sensores

Por ser tratar da medição de vibração de motores críticos dentro do processo, foi priorizado na escolha dos sensores o quesito “*qualidade*” do produto. Dentro das fabricantes consultadas, foi escolhido o sensor de vibração VTV122, da *IFM ELETRÔNICA*. O valor unitário do mesmo é de 1.882,00 R\$, totalizando 3.764 R\$ na compra de 2 unidades.

Segundo Electronic (2019), as principais características do sensor de vibração VTV122 são:

- Monitoramento permanente confiável da vibração total conforme DIN ISO 10816;
- Técnica de ligação de dois condutores;
- Ampla faixa de temperatura operacional e alto grau de proteção;

- Invólucro compacto e robusto para atender aos requisitos de ambientes industriais duros;
- Medição de vibração na faixa de 0 a 25 mm/s;
- Tensão de operação de 9,6 a 32 VDC;
- Corrente de saída analógica de 4 à 20mA;
- Erro de medição de aproximadamente +- 3%;
- Temperatura de trabalho de -30°C à 125°C.

A Figura 45 mostra o modelo do sensor VTV122.

*Figura 45 - Sensor de Vibração IFM VTV122*



Fonte: (ELECTRONIC, 2019)

### 3.3 Escolha e orçamentação do CLP

O CLP escolhido para aplicação foi o Simatic S7-1200 da Siemens, o motivo crucial que levou a escolha do CLP foi a relação custo-benefício. O Valor do S7-1200 varia em torno de 3500 R\$.

O Simatic S7-1200 é um PLC geralmente utilizado para modular tarefas de automação de baixo custo com eficiência. Podendo recorrer a uma grande variedade de componentes de sistema. (SIEMENS, 2019)

A Figura 46 ilustra o CLP Simatic S7-1200.

*Figura 46 - CLP Simatic S7-200*



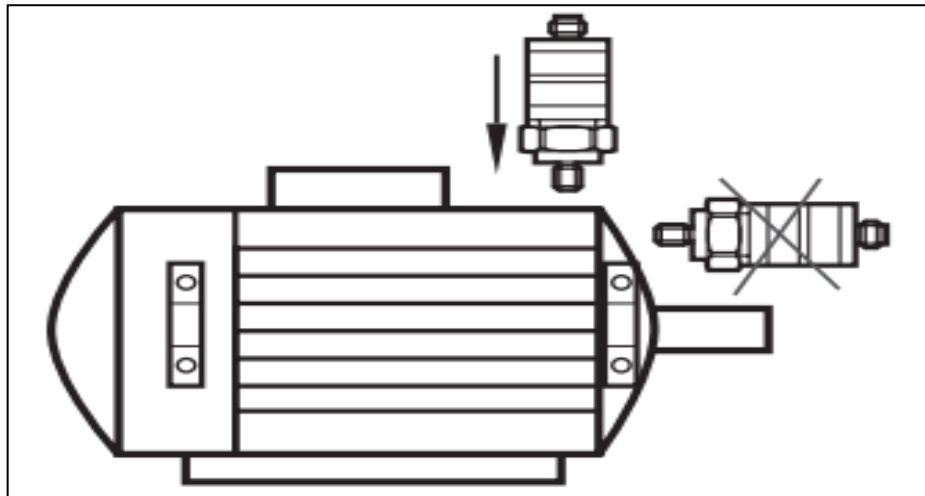
Fonte: (SIEMENS, 2019)

### 3.4 Montagem e Instalação dos sensores

#### 3.4.1 Montagem Mecânica

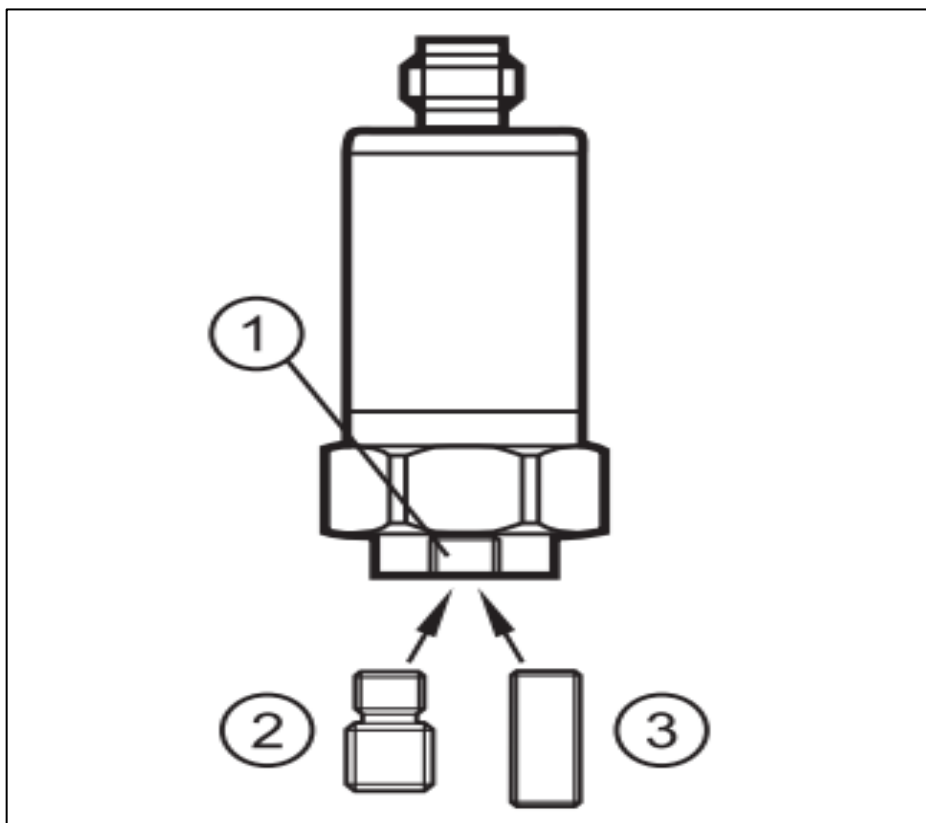
Os sensores devem ser instalados sobre a parede de carcaça maciça e na posição vertical em relação à superfície do motor. O parafuso M3 deve ser apertado com um torque de 8 Nm. As figuras 47 e 48 apresentam a forma correta de instalação.

Figura 47 - Posição correta de instalação do Sensor De Vibração VTV122



Fonte: (ELECTRONIC, 2019)

Figura 48 - Montagem mecânica do Sensor de Vibração VTV122

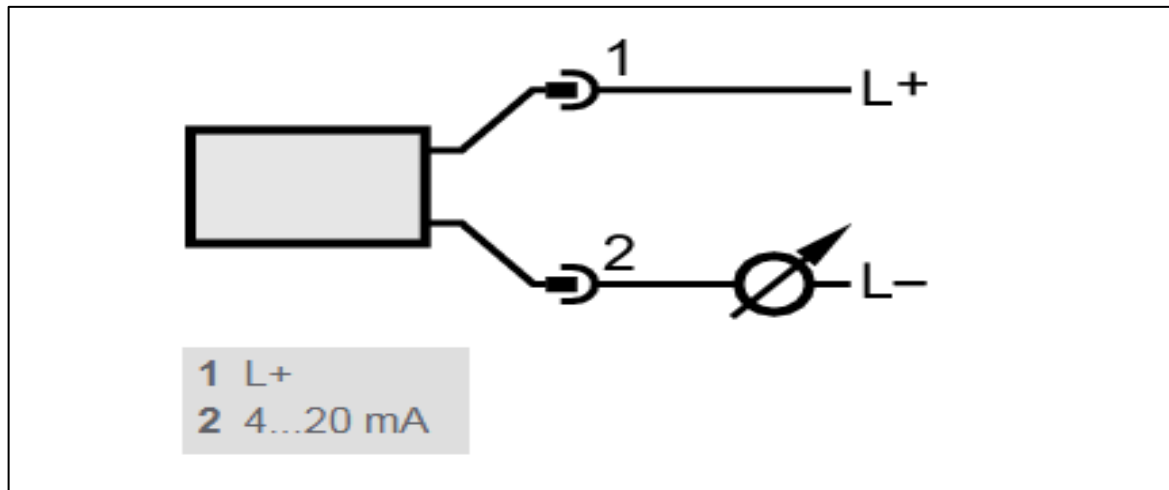


Fonte: (ELECTRONIC, 2019)

### 3.4.2 Conexão Elétrica

O sensor VTV122 é composto por uma conexão elétrica M12 com 4 pinos. A figura 49 mostra a atribuição dos pinos.

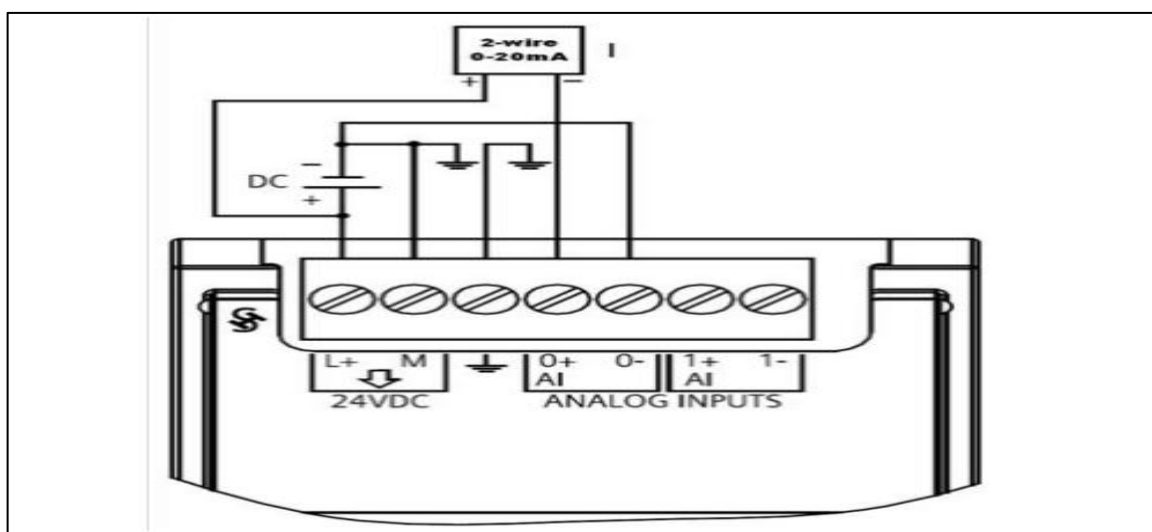
Figura 49 - Atribuição dos pinos sensor de vibração VTV122



Fonte: (ELECTRONIC, 2019)

A ligação elétrica nas entradas analógicas do CLP é representada pela Figura 50. Por se tratar de um transdutor que emite sinal analógico de corrente, o sensor é de 2 fios.

Figura 50 - Conexão do Sensor com o CLP S7-1200



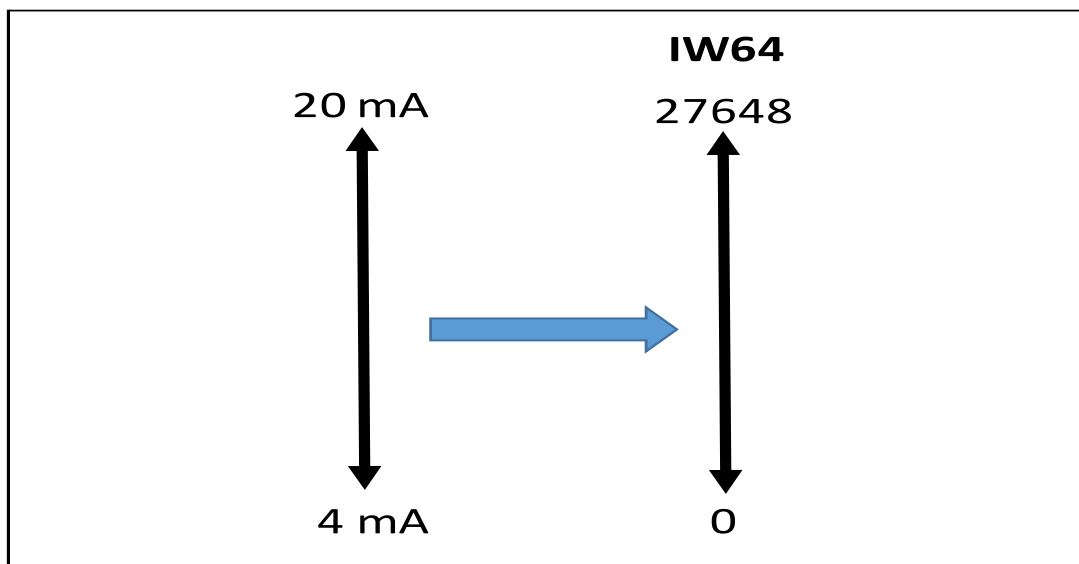
Fonte: (SOUZA, 2015)

### 3.5 Programação do CLP

O *Software* utilizado para programação do CLP Siemens Simatics S7-1200 é o TIA Portal, em seu décimo quarto volume.

Foi criado no CLP uma função de leitura da entrada e saída analógica. O sinal de entrada analógico de 4 à 20mA que sai do sensor de vibração chegará no endereço IW64, onde é feito um cálculo matemático para ajuste de escala. A faixa de 0 à 27648 do valor de conversão se deve ao modelo adotado pela Fabricante Siemens A Figura 51 ilustra a conversão no sinal analógico do sensor no CLP.

Figura 51 - Esquema de conversão de um sinal Analógico no CLP



Fonte: (O Autor, 2019)

A Tabela 5 apresenta o modelo de conversão do sinal analógico de entrada, o valor de engenharia a ser mensurado e o valor inteiro do CLP.

Tabela 5 - Conversão de entrada analógica

	Range de sinal (Elétrico)	Valor de Engenharia	Valor Inteiro do CLP
<b>Mínimo</b>	4 mA	0 mm/s	0
<b>Máximo</b>	20 mA	25 mm/s	27000

Fonte: (SOUZA, 2015)

Os limites máximo e mínimo serão calculados através do bloco NORM\_X, e convertidos pelo SCALE\_X. Os valores lidos pelo CLP são do tipo inteiro e dever ser convertidos para Real, essa operação é realizada através do NORM\_X. (SOUZA, 2015)

As variáveis de entrada e saída são apresentadas na tabela 6.

*Tabela 6 - Declaração de Variáveis*

	<b>Name</b>	<b>Address</b>	<b>Data type</b>	<b>Comments</b>
<b>Input</b>	Entrada_Analog_0	%IW64	Real	Entrada Analógica Sensor 1
	Entrada_Analog_1	%IW66	Real	Entrada Analógica Sensor 2
<b>Output</b>	Saida_Analog_0	%QW80	Real	Saída Analógica Sensor 1
	Saida_Analog_1	%QW81	Real	Saída Analógica Sensor 2
	Saida_Digit_0.0	%Q0.0	Bool	Saída digital do valor bom Sensor 1
	Saida_Digit_0.1	%Q0.1	Bool	Saída digital do valor satisfatório Sensor 1
	Saida_Digit_0.2	%Q0.2	Bool	Saída digital do valor insatisfatório Sensor 1
	Saida_Digit_0.3	%Q0.3	Bool	Saída digital do valor inaceitável Sensor 1
	Saida_Digit_1.0	%Q1.0	Bool	Saída digital do valor bom Sensor 2
	Saida_Digit_1.1	%Q1.1	Bool	Saída digital do valor satisfatório Sensor 2
	Saida_Digit_1.2	%Q1.2	Bool	Saída digital do valor insatisfatório Sensor 2
	Saida_Digit_1.3	%Q1.3	Bool	Saída digital do valor inaceitável Sensor 2

Fonte: (O AUTOR, 2019)

O programa será feito no diagrama de blocos na linguagem de programação Ladder, apresentado nas próximas figuras e nos apêndices do presente trabalho. As variáveis de entrada são os dois sensores analógicos de 4 a 20 mA. As saídas serão variáveis Reais apresentando a vibração dos motores e emitindo sinais informando o valor da vibração numa IHM. As faixas de vibração foram definidas de acordo com os valores estabelecidos na figura 6, sendo considerado satisfatório vibrações de até 4,5 mm/s, insatisfatórios valores que variam entre 4,5 e 11,2 mm/s e inaceitáveis valores acima de 11,2 mm/s.

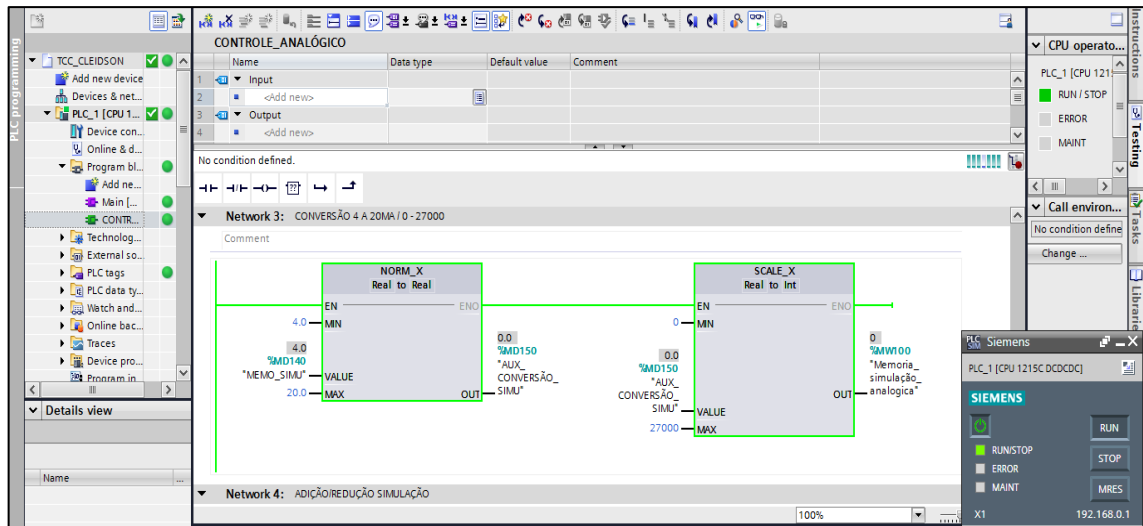
A seguir será apresentado a programação do CLP dentro de todos os limites de vibração do sensor VTV122. As figuras 52 e 53 apresentam as linhas de programação referente ao valor “Bom” de vibração, com limite superior em 1,8 mm/s.

A imagem 52 mostra os blocos de normatização e escalonamento do valor “Bom”. O bloco NORM\_X tem na sua entrada o sinal analógico do sensor de vibração, contendo os valores mínimo e máximo de 4 mA e 20 mA respectivamente. A saída do



bloco NORM\_X é ligada em série com o bloco SCALE\_X que depois do processamento dentro dos limites estabelecidos de 0 a 27000 mostram o valor em mm/s em sua saída.

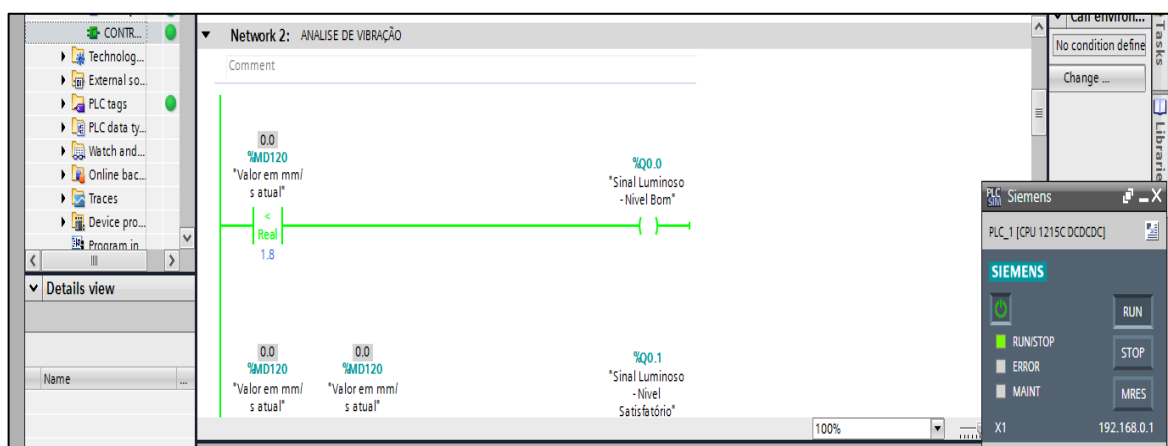
Figura 52 - Blocos NORM\_X e SCALE\_X referente ao valor "Bom"



Fonte: (O AUTOR, 2019)

A imagem 53 ilustra a lógica referente ao valor "Bom" de vibração, a saída digital %Q0.0 mostra ao usuário o sinal luminoso representando o nível Bom.

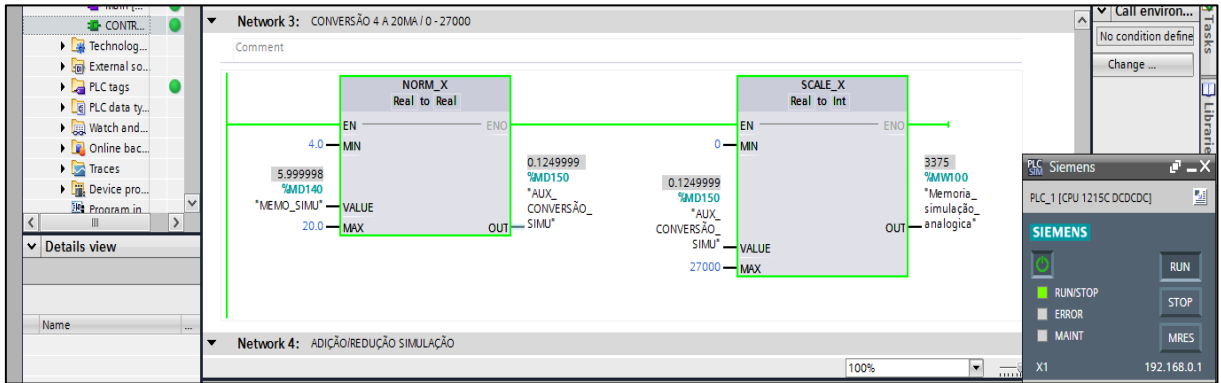
Figura 53 - Lógica de programação do valor "Bom"



Fonte: (O AUTOR, 2019)

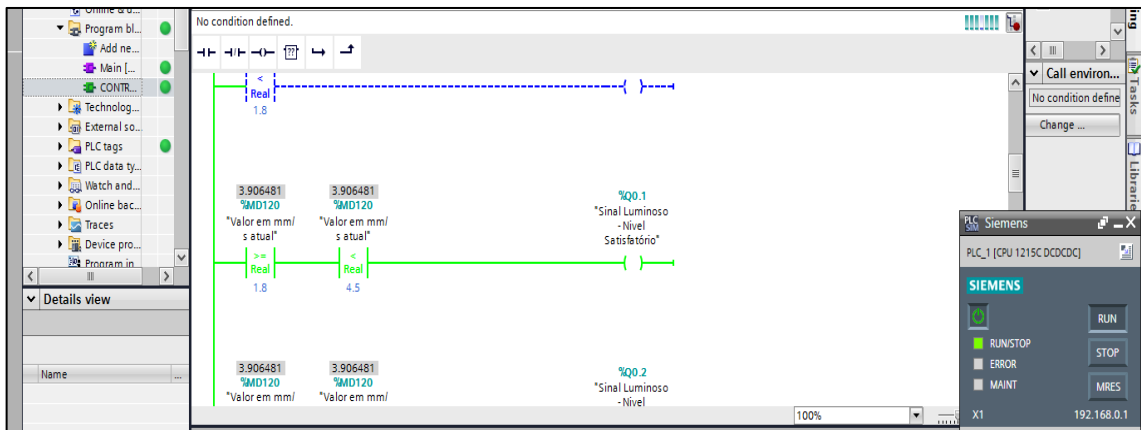
As imagens 54 e 55 apresentam os blocos e lógica de programação do valor "Satisfatório".

Figura 54 - Blocos NORM\_X e SCALE\_X referente ao valor "Satisfatório"



Fonte: (O AUTOR, 2019)

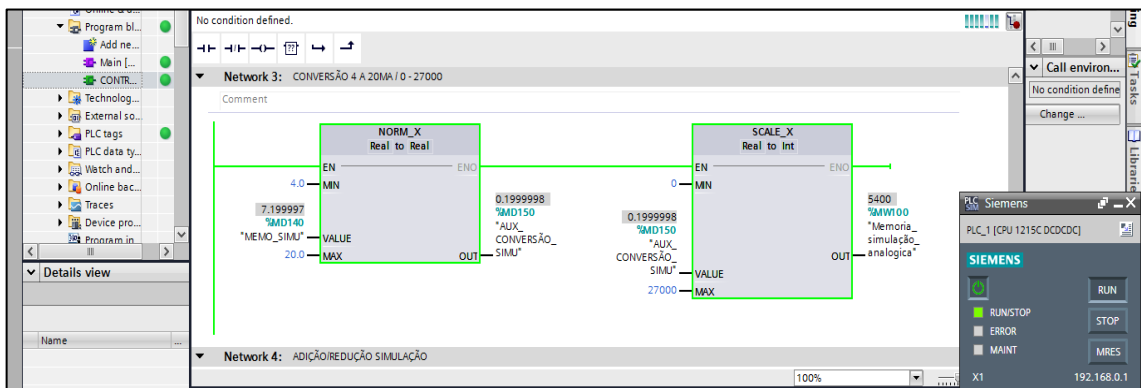
Figura 55 - Lógica de programação do valor "Satisfatório"



Fonte: (O AUTOR, 2019)

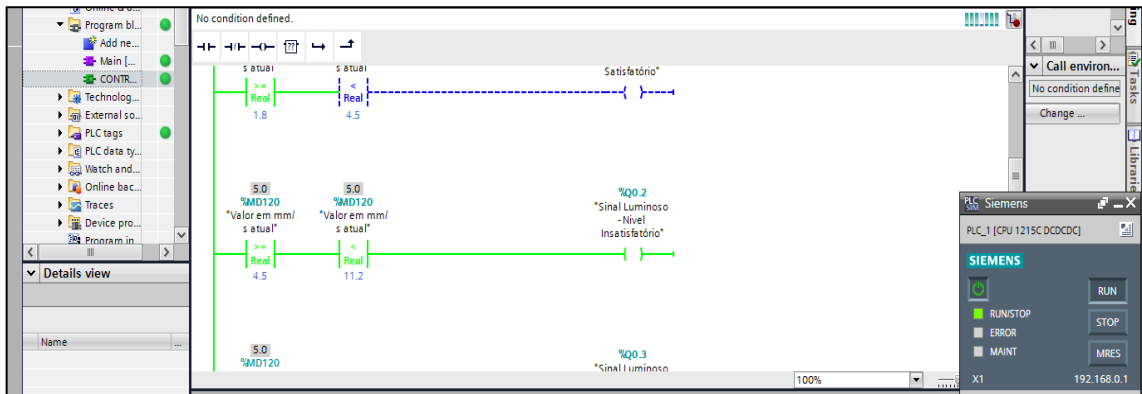
As imagens 56 e 57 apresentam os blocos e lógica de programação do valor "Insatisfatório".

Figura 56 - Blocos NORM\_X e SCALE\_X referente ao valor "Insatisfatório"



Fonte: (O AUTOR, 2019)

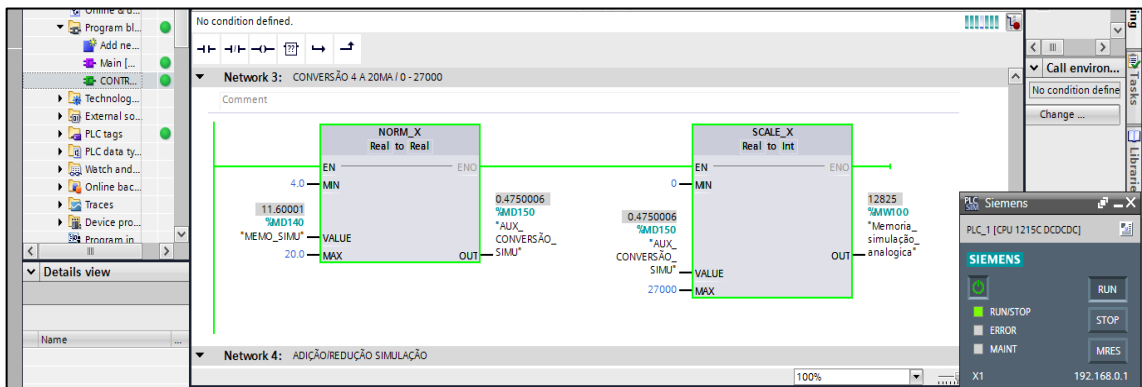
Figura 57 - Lógica de programação do valor "Insatisfatório"



Fonte: (O AUTOR, 2019)

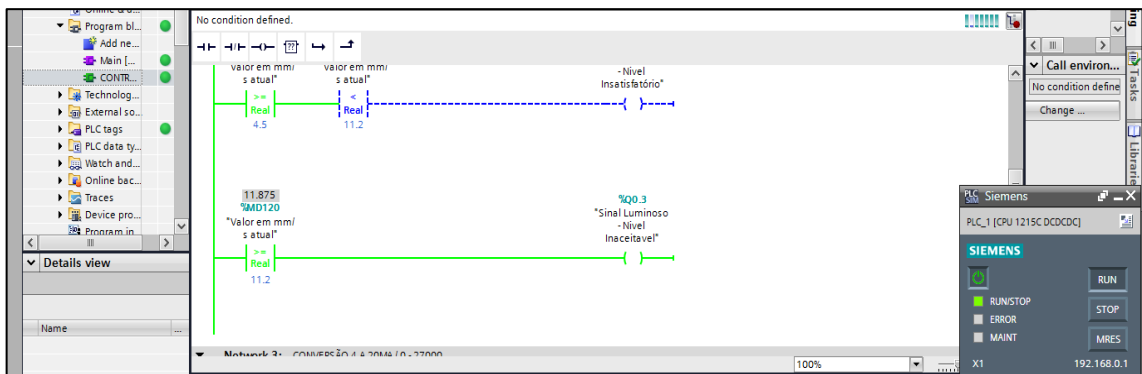
As imagens 58 e 59 mostram os blocos e lógica de programação do valor "Inaceitável". Este é o valor crítico de vibração.

Figura 58 - Blocos NORM\_X e SCALE\_X referente ao valor "Inaceitável"



Fonte: (O AUTOR, 2019)

Figura 59 - Lógica de programação do valor "Inaceitável"

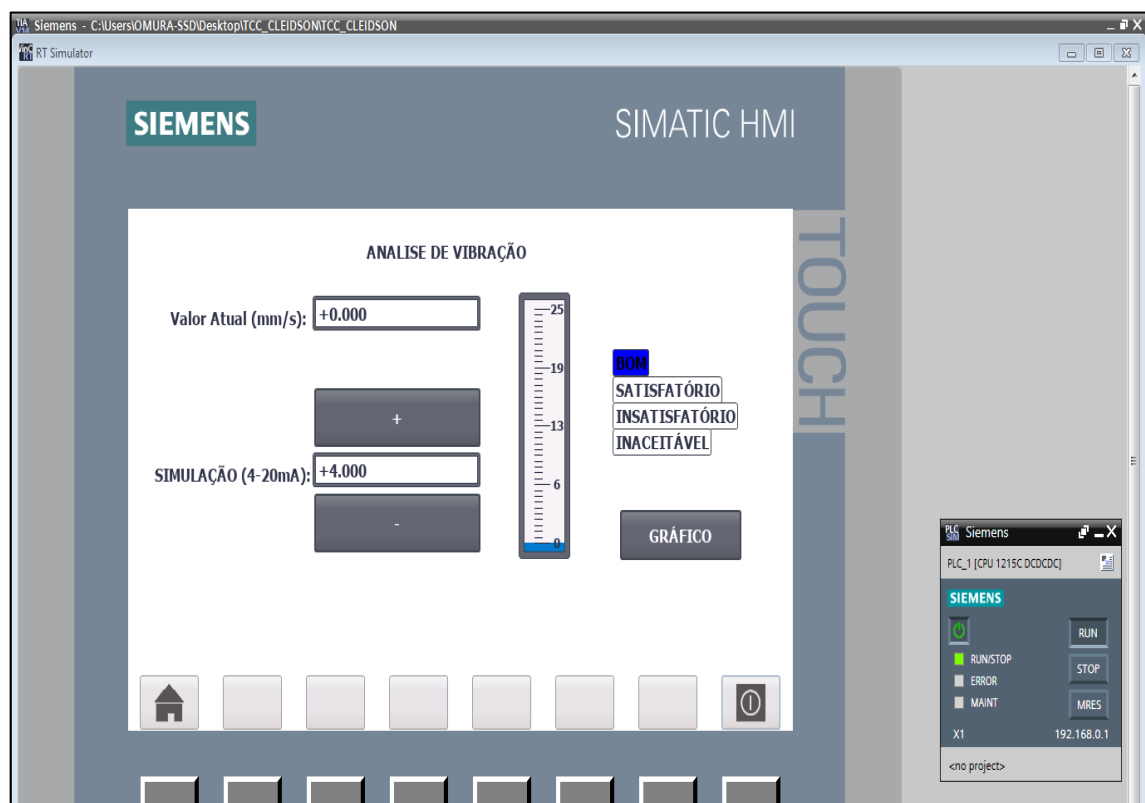


Fonte: (O AUTOR, 2019)

### 3.6 RESULTADOS

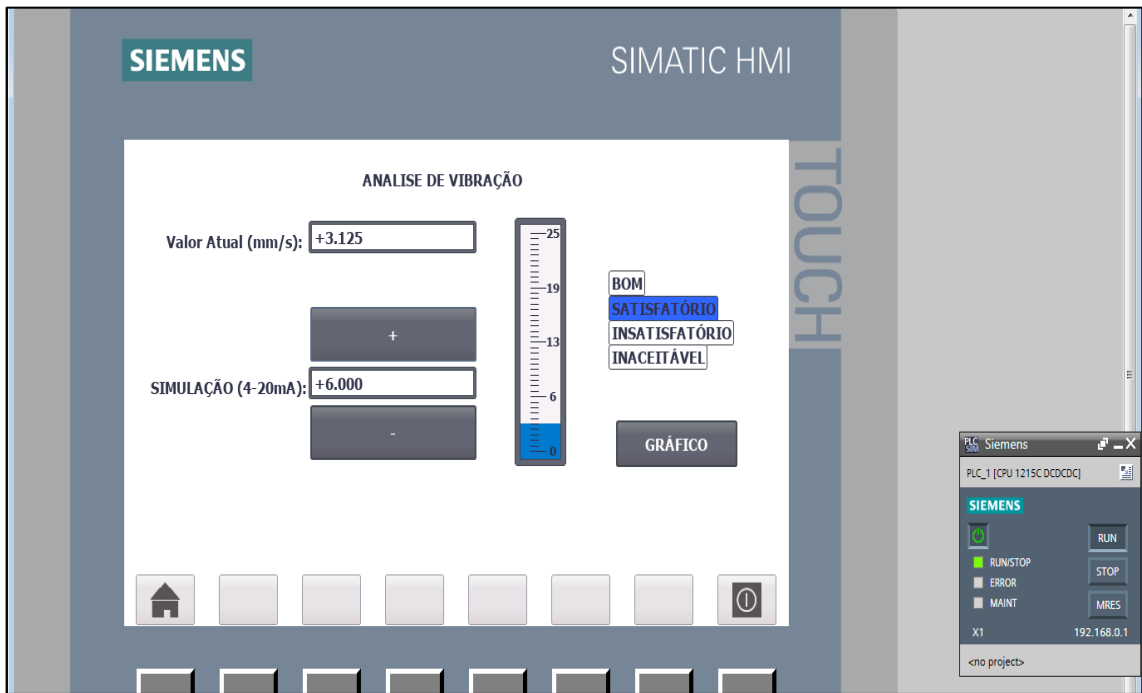
Os resultados foram gerados através de um simulador digital representando a saída do sensor de vibração contendo a escala real de 4 à 20 mA do sensor VTV 122. A representação gráfica será apresentada nas figuras abaixo na IHM virtual SIMATIC HMI do software TIA PORTAL da Siemens. Os alertas dos níveis de vibração “Bom”, “Satisfatório”, “Insatisfatório” e “Inaceitável” são mostrados para o usuário/operador através das figuras 60, 61, 62 e 63.

Figura 60 - Alerta de nível "Bom"



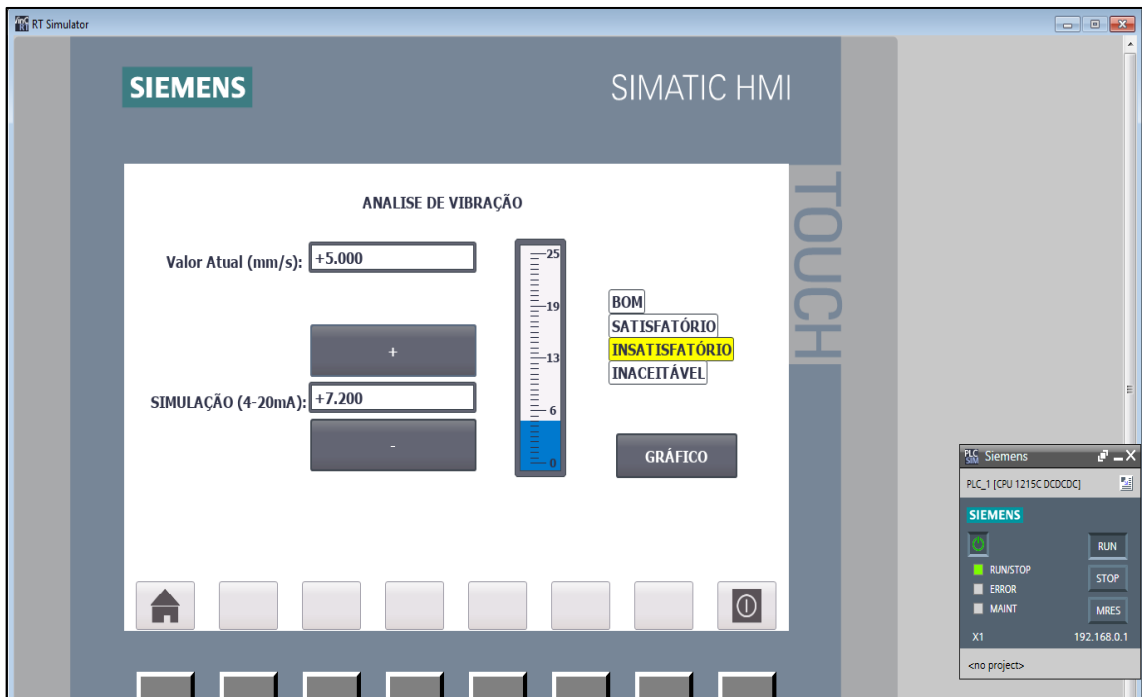
Fonte: (O AUTOR, 2019)

Figura 61 - Alerta de nível "Satisfatório"



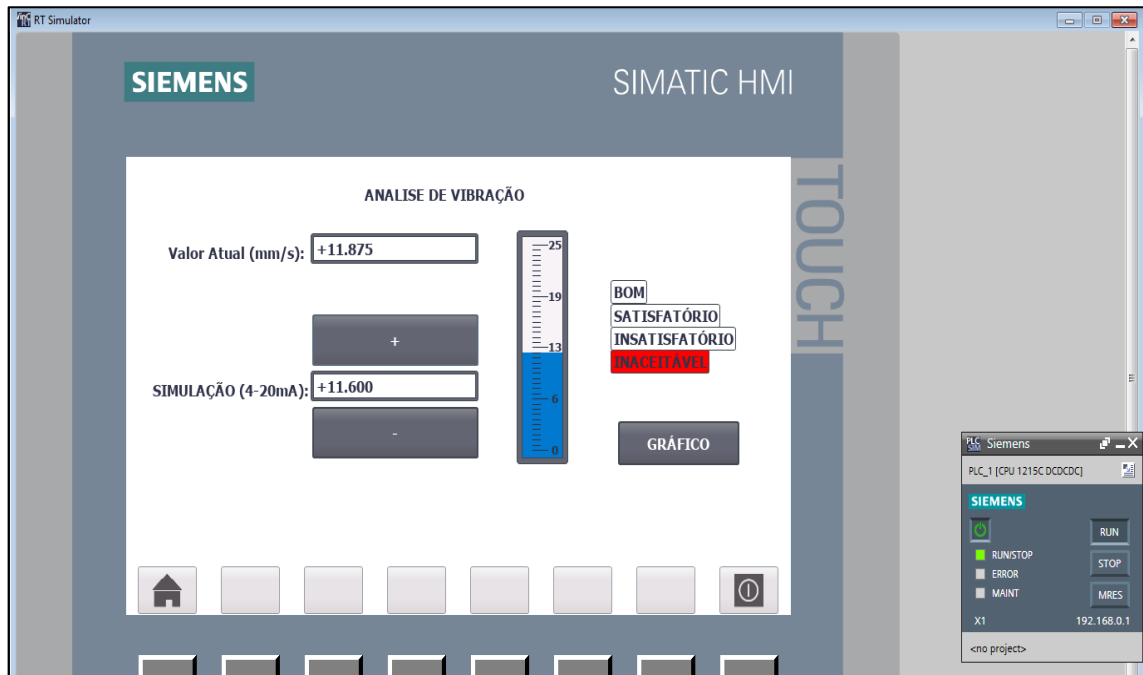
Fonte: (O AUTOR, 2019)

Figura 62 - Alerta de nível "Insatisfatório"



Fonte: (O AUTOR, 2019)

Figura 63 - Alerta de nível "Inaceitável"



Fonte: (O AUTOR, 2019)

## 4 CONCLUSÃO

Os métodos de manutenção foram se modernizando, surgindo a necessidade de criar sistemas para minimizar falhas não planejadas. Processos de manufatura estão se tornando cada vez mais inteligentes e robustos, variáveis do processo são mapeadas e gerenciadas desde o abastecimento de matéria prima até a expedição do produto final.

A manutenção preditiva tem papel fundamental para garantir o funcionamento do processo, pois visa antever a falha e sinalizar o momento certo para atuar. Os sistemas de manutenção preditiva usuais não garantem uma máxima eficiência pois as medições são realizadas em grandes intervalos de tempo, tendo possibilidade de ocorrer falhas nesses intervalos. O sistema de manutenção preditiva com monitoramento online sana essa lacuna da manutenção preditiva clássica, pois além de monitorar a máquina em tempo real, emite sinais de alerta quando o sistema entra em falha.

A aplicação da ideia proposta gerou resultados satisfatórios. A praticidade na leitura e interpretação dos sinais de vibração apresentados na IHM possibilita o fácil entendimento da condição de atuação dos motores analisados. Em caso de falha no motor, além do alerta virtual, é gerado um alarme luminoso no entorno da instalação afim de nivelar a informação caso o operador não olhe a IHM.

A tomada de decisão gerada no tempo certo por este sistema de manutenção preditiva evita falhas de grande impacto em qualquer processo de manufatura, tendo em vista que o tempo para realizar o reparo no motor elétrico é alto.

A ideia inicial de realizar a medição da vibração nos motores de maior impacto no processo da Seara Alimentos minimiza o risco de grandes paradas. Porém fica a lacuna com relação ao grande número de motores existentes na planta. No momento, realizar esse tipo de manutenção em todos os motores se torna inviável devido ao alto custo de instalação do sistema. A instalação gradativa ao longo do tempo é a solução adequada, visando diluir o custo com o tempo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGROINDUSTRIAL, Gatec Gestão. **Projeto Manutenção Preditiva: Análise de vibrações**. Disponível em: <[www.gatec.com.br](http://www.gatec.com.br)>. Acesso em: 21 set. 2019.

ALMEIDA, Paulo Samuel de. **Gestão da Manutenção: Aplicada as áreas Industrial, Predial e Elétrica**. São Paulo: Saraiva, 2017. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=XLdiDwAAQBAJ&pg=PT16&dq=conceitos+manuten%C3%A7%C3%A3o&hl=pt-PT&sa=X&ved=0ahUKEwiQq97S7dLhAhV7I7kGHd-fCywQ6AEIOzAD#v=onepage&q=conceitos%20manuten%C3%A7%C3%A3o&f=false>>. Acesso em: 15 abr. 2019. **Citação com autor incluído no texto:** Almeida (2017)

ANTONELLI, Pedro Luis. **Introdução aos Controladores Lógicos Programáveis (CLPs)**. Disponível em: <<http://www.ejm.com.br/download/Introducao%20CLP.pdf>>. Acesso em: 29 set. 2019

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **5462: NBR 5462**. Rio de Janeiro: Abnt, 1994. Disponível em: <<https://www.passeidireto.com/arquivo/44813945/nbr-5462-1994>>. Acesso em: 15 abr. 2019.

BOND, JACKSON. IOT ENABLES: PREDICTIVE MAINTENANCE. 2017. 9 p. Artigo (CHIEF PRODUCT OFFICER)- SN, [S.l.], 2017. Disponível em: <<https://generisgp.com/wp-content/uploads/2018/02/IoT-Enables-Predictive-Maintenance.pdf>>. Acesso em: 10 nov. 2018.

CHAPMAN, Stephen J.. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: Mc Graw Hill, 2013. 684 p.

CIRIACO, Douglas. **Qual a diferença entre o sinal analógico e o digital?** 2016. Disponível em: <<https://canaltech.com.br/curiosidades/qual-a-diferenca-entre-o-sinal-analogico-e-o-digital-65147/>>. Acesso em: 28 set. 2019.



DELL IOT SOLUTIONS. sn. Predictive Maintenance Solution Brief: Six steps to using the IoT to deliver maintenance efficiency. 2016. 4 p. Artigo (sn)- sn, [S.I.], 2016. Disponível em: <[https://i.dell.com/sites/doccontent/shared-content/data-sheets/en/Documents/DELL\\_PdM\\_Blueprint\\_Final\\_April\\_8\\_2016.pdf](https://i.dell.com/sites/doccontent/shared-content/data-sheets/en/Documents/DELL_PdM_Blueprint_Final_April_8_2016.pdf)>. Acesso em: 20 nov. 2018.

DEMARCHI. **Tacômetros de Velocidade e Vazão**. 2011. Disponível em: <<https://www.docsity.com/pt/transdutores-de-velocidade/4763867/>>. Acesso em: 26 set. 2019.

DIAS, Sidnei Lopes. **A CULTURA DA MUDANÇA E A MUDANÇA DE CULTURA**. [s.l]: Abraman, [2005]. Disponível em: <<http://www.abraman.org.br/Arquivos/105/105.pdf>>. Acesso em: 15 abr. 2019.

ELECTRONIC, Ifm. **Manual de operação Sensor de vibração VBN001**. Disponível em: <<https://www.ifm.com/mounting/80270675PT.pdf>>. Acesso em: 06 nov. 2019.

ELECTRONIC, Ifm. **Sensores e transmissores de vibração**. 2019. Disponível em: <<https://www.ifm.com/br/pt/product/VNB001>>. Acesso em: 21 out. 2019.

ENGEMAN. **A manutenção como ferramenta estratégica para o crescimento**. 2016. Disponível em: <<https://blog.engeman.com.br/manutencao-estrategica/>>. Acesso em: 15 abr. 2016

FALCONE, Aurio Gilberto. **Eletromecânica: Transformadores e Transdutores, Conversão Eletromecânica de Energia**. São Paulo: Blucher, 1979. (1).

FARIAS, André et al. **Transdutores de Velocidade**. 2011. Disponível em: <<https://www.docsity.com/pt/transdutores-de-velocidade-1/4848829/>>. Acesso em: 26 set. 2019.

FERREIRA, Matheus. **Tudo Sobre os Sinais Analógicos de Entrada e Saída do CLP e Programação**. 2019. Disponível em: <<https://www.linkedin.com/pulse/tudo->

sobre-os-sinais-anal%C3%B3gicos-de-entrada-e-sa%C3%ADda-do-ferreira/>.  
Acesso em: 29 set. 2019.

FOGLIATTO, Flávio Sanson; RIBEIRO, José Luis Duarte. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda, 2011. Disponível em: <[https://books.google.com.br/books?id=\\_GhSnuKRBtwC&pg=PT237&dq=conceitos+manuten%C3%A7%C3%A3o&hl=pt-PT&sa=X&ved=0ahUKEwiQq97S7dLhAhV7I7kGHd-fCywQ6AEILjAB#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?id=_GhSnuKRBtwC&pg=PT237&dq=conceitos+manuten%C3%A7%C3%A3o&hl=pt-PT&sa=X&ved=0ahUKEwiQq97S7dLhAhV7I7kGHd-fCywQ6AEILjAB#v=onepage&q&f=false)>. Acesso em: 16 abr. 2019.

FRANCO SOARES, Matheus. Manutenção inteligente: tendências e desafios. 2017. 11 p. Artigo (Acadêmico de Engenharia)- UNIMEP, Ponta Grossa, 2017. Disponível em: <<http://www.aprepro.org.br/conbrepro/2017/down.php?id=3497&q=1>>. Acesso em: 01 nov. 2018.

GANZER, Lucas. **ANÁLISE DE VIBRAÇÃO PARA DETECÇÃO DE DEFEITOS EM UM MOTOR DE UM REFINADOR DE MADEIRA**. 2017. Disponível em: <[http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/8787/1/GP\\_COEME\\_2017\\_1\\_06.pdf](http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/8787/1/GP_COEME_2017_1_06.pdf)>. Acesso em: 21 set. 2019.

GILCHRIST, A. **Industry 4.0**. The Industrial Internet of Things. 1ª ed., Califórnia: Apress, 2016.

GRIER, David Alan. **Industrie 4.0: A New Industrial Revolution?** 2018. Disponível em: <<https://www.computer.org/publications/tech-news/closer-than-you-might-think/industrie-4.0-a-new-industrial-revolution>>. Acesso em: 04 ago. 2019.

GONÇALVES JUNIOR, Jairo José Modesto; RIBEIRO, Marcos Valério; FRANCO, Bruno Chaves. **CUSTO DE MANUTENÇÃO DE ATIVOS NUMA ÓPTICA OPERACIONAL E ESTRATÉGICA NO AMBIENTE INDUSTRIAL**. [s.l]: Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, 2015. Disponível em: <<https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos15/23022234.pdf>>. Acesso em: 17 abr. 2019.

HENRIQUE, Hélio. **Motores Trifásicos de CA**. Disponível em: <<https://docente.ifrn.edu.br/heliopinheiro/Disciplinas/maquinas-acionamentos-eletricos/aula-de-motores-trifasicos-de-ca>>. Acesso em: 07 out. 2019.

HEWLETT PACKARD. Enterprise. Predictive maintenance: machine condition monitoring meets the IoT. 2017. 8 p. Artigo (Hewlett Packard Enterprise Development LP)- SN, Germany, 2017. Disponível em: <<https://h20195.www2.hp.com/v2/getdocument.aspx?docname=a00017840enw>>. Acesso em: 20 nov. 2018.

IEEE. **IEEE is Fueling the Fourth Industrial Revolution**. 2017. Disponível em: <<https://innovate.ieee.org/innovation-spotlight-ieee-fueling-fourth-industrial-revolution/>>. Acesso em: 04 ago. 2019.

INDIAMART. **Siemens S7-200 PLC**. Disponível em: <<https://www.indiamart.com/proddetail/siemens-s7-200-plc-11595063788.html>>. Acesso em: 04 nov. 2019.

LAVEGA, Alexandre Santos de. **Apostila de Teoria para Fundamentos de Processamento Digital de Sinais**. 2019. Disponível em: <[http://www.telecom.uff.br/~delavega/public/DSP/apostila\\_teo\\_dsp.pdf](http://www.telecom.uff.br/~delavega/public/DSP/apostila_teo_dsp.pdf)>. Acesso em: 28 set. 2019.

LEME, Murilo Oliveira. **METODOLOGIA DE MANUTENÇÃO PREDITIVA PARA MOTORES ELÉTRICOS BASEADA EM MONITORAMENTO DE VARIÁVEIS FÍSICAS E ANÁLISE MULTICRITÉRIO**. 2017. Disponível em: <[http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/2905/1/PG\\_PPGE\\_D\\_Leme%2C%20Murilo%20Oliveira\\_2017.pdf](http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/2905/1/PG_PPGE_D_Leme%2C%20Murilo%20Oliveira_2017.pdf)>. Acesso em: 18 set. 2019.

LIMA JÚNIOR, José Juliano de. **Vibrações Mecânicas**. 4. ed. São Paulo: Pearson, 2009. 448 p.

LI, Zhe; WANG, Kesheng. Industry 4.0 – Potentials for Predictive Maintenance. 2016. 5 p. Article (Academic Engineering)- University of Science and Technology Trondheim,

Norway, China, 2016. 1. Disponível em: <<https://www.atlantispress.com/proceedings/iwama-16/25862217>>. Acesso em: 06 nov. 2018.

LUGLI, Alexandre Baratella. **UMA VISÃO DO PROTOCOLO INDUSTRIAL PROFINET E SUAS APLICAÇÕES**. Disponível em: <[http://www.profibus.org.br/artigos\\_tecnicos/uma-visao-do-protocolo-industrial-profinet-e-suas-aplicacoes](http://www.profibus.org.br/artigos_tecnicos/uma-visao-do-protocolo-industrial-profinet-e-suas-aplicacoes)>. Acesso em: 03 out. 2019.

MANUTENÇÃO - EVOLUÇÃO HISTÓRICA. [s.l]: Manutenção Centrada em Confiabilidade, 2016. Disponível em: <<http://mcc-facic.blogspot.com/2016/01/manutencao-evolucao-historica.html>>. Acesso em: 17 abr. 2019.

MATHIAS, Mauro Hugo. **FERRAMENTAS DE DIAGNÓSTICO DE MÁQUINAS**. Guaratinguetá: Unesp, 2017.

MOUBRAY, John. RCM II – Reliability – centered Maintenance. second edition, New York: Industrial Press Inc, 1997 .

MOURA, Fernando Luís de et al. **PROPOSTA DE METODOLOGIA DE TRABALHO COM TÉCNICAS DE MANUTENÇÃO PREDITIVA E PREVENTIVA**. [s.l]: Abramam, [200-?]. Disponível em: <<http://www.abraman.org.br/arquivos/170/170.pdf>>. Acesso em: 16 abr. 2019.

NEPOMUCENO, Lauro Xavier. **Técnicas de Manutenção Preditiva**. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 1989. 501 p.

OLIVEIRA, Vinicius de Souza Lima. **PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO PROFINET PARA REDES DE AUTOMAÇÃO**. 2016. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10018680.pdf>>. Acesso em: 03 out. 2019.

PELLENZ, Marcelo E.. **Processamento Digital de Sinais (PDS)**. 2005. Disponível em: <<https://www.ppgia.pucpr.br/~marcelo/pds/apostila%20pds.pdf>>. Acesso em: 29 set. 2019.

RIPPER, Gustavo Palmeira. **PADRONIZAÇÃO PRIMÁRIA EM METROLOGIA DE VIBRAÇÕES**. 2005. Disponível em: <[http://repositorios.inmetro.gov.br/bitstream/10926/164/1/Ripper\\_2005.pdf](http://repositorios.inmetro.gov.br/bitstream/10926/164/1/Ripper_2005.pdf)>. Acesso em: 24 set. 2019.

SÁ, Rui. **Introdução às Redes de Telecomunicações**. 3. ed. Lisboa: Fca, 2016. 294 p.

SEQUEIRA, Cláudia. **Sensores para medições de Vibrações Mecânicas – Acelerômetros**. Disponível em: <<http://revistamanutencao.pt/PDF/116/M116AT1.pdf>>. Acesso em: 24 set. 2019.

SIEMENS. **SIMATIC S7 - 1200**: A integração faz a diferença. Disponível em: <[https://w3.siemens.com.br/automation/br/pt/automacao-e-controle/automacao-industrial/simatic-plc/s7-cm/s7-1200/Documents/Brochura\\_SIMATIC\\_S7\\_1200\\_portugues.pdf](https://w3.siemens.com.br/automation/br/pt/automacao-e-controle/automacao-industrial/simatic-plc/s7-cm/s7-1200/Documents/Brochura_SIMATIC_S7_1200_portugues.pdf)>. Acesso em: 10 nov. 2019.

SILVA, Edilson Alfredo da. **INTRODUÇÃO ÀS LINGUAGENS DE PROGRAMAÇÃO PARA CLP**. São Paulo: Blucher, 2018. 354 p.

SILVA NETO, João Cirilo da; LIMA, Antônio Marcos Gonçalves de. **Implantação do Controle de Manutenção**. [s.l]: [n.a], 2002. Disponível em: <<http://www.mantenimentomundial.com/notas/11controle.pdf>>. Acesso em: 16 abr. 2019.

SILVEIRA, Cristiano Bertulucci. **O Que é Indústria 4.0 e Como Ela Vai Impactar o Mundo**. 2017. Disponível em: <<https://www.citisystems.com.br/industria-4-0/>>. Acesso em: 04 ago. 2019.

SOUZA, Leandro Costa de. **TIA Portal: Conversão de Escalas**. 2015. Disponível em: <<https://w3.siemens.com.br/home/br/pt/pvendas/Documents/S7-1200%20-%20Conversao%20de%20Escalas.pdf>>. Acesso em: 11 nov. 2019.

SPAMER, Fernanda Rosa. **Técnicas Preditivas de Manutenção de Máquinas Rotativas**. 2009. Disponível em: <<https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/7208/1/monopoli10000900.pdf>>. Acesso em: 11 ago. 2019.

TELES, Jhonata. **Manutenção Preditiva: O que é e como ela pode te ajudar!** 2018. Disponível em: <<https://engeteles.com.br/manutencao-preditiva/>>. Acesso em: 11 ago. 2019.

TELES, Jhonata. **Como calcular disponibilidade de equipamentos industriais?** Brasília: Engeteles, 2017. Disponível em: <<https://engeteles.com.br/como-calcular-disponibilidade/>>. Acesso em: 16 abr. 2019.

TORO, Vicente del. **FUNDAMENTOS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS**. New Jersey: Ltc, 1990. 550 p.

TROMBETA, Alessandro. **50 Tons para a Manutenção Classe Mundial**. 2017. Disponível em: <<https://manutencao.net/artigo/50-tons-para-a-manutencao-classe-mundial/#.XUZNIQVkjIU>>. Acesso em: 26 jun. 2017.

UFPR. **CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMÁVEIS - CLP**. Disponível em: <<http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasivan/AULACLIP.pdf>>. Acesso em: 20 set. 2019.

VENTURELLI, Márcio. **Redes Ethernet Industrial: Conceito e aplicação na Automação e Controle Industrial**. 2017. Disponível em: <<https://www.automacaoindustrial.info/redes-ethernet-industrial-conceito-e-aplicacao-na-automacao-e-controle-industrial/>>. Acesso em: 01 out. 2019.

VIBRAÇÕES, Análise de. **Análise de vibrações**. Disponível em: <<https://essel.com.br/cursos/material/01/Manutencao/34manu2.pdf>>. Acesso em: 20 set. 2019

WEG. **Motores Elétricos**. Disponível em: <<http://www.coe.ufrj.br/~richard/Acionamentos/Catalogo%20de%20Motores.pdf>>. Acesso em: 06 out. 2019.

YAMATO, Yoji; FUKUMOTO, Yoshifumi; KUMAZAKI, Hiroki. Proposal of Real Time Predictive Maintenance Platform with 3D Printer for Business Vehicles. 2012. 5 p. Artigo (Software Innovation Center,)- NTT Corporation, Tokyo, Japan, 2012. Disponível em: <<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1611/1611.09944.pdf>>. Acesso em: 10 nov. 2018.

ZAIDI, Syed A. R. et al. **Design and Analysis of Communication Interfaces for Industry 4.0**. 2019. Disponível em: <<https://www.comsoc.org/publications/journals/ieee-jsac/cfp/design-and-analysis-communication-interfaces-industry-40>>. Acesso em: 04 ago. 2019.

## APÊNDICE A – PROGRAMAÇÃO DO CLP