

**INSTITUTO FEDERAL
DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA**
Goiás

SAMUEL RODRIGUES ARAÚJO

**CONTROLE DE VELOCIDADE DE MOTORES
DE INDUÇÃO TRIFÁSICO
UTILIZANDO DA METODOLOGIA PID**

VALPARAÍSO DE GOIÁS - GO

2024



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS VALPARAISO

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

TERMO 35/2024 - VAL-DAA/CP-VALPARA/IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia - Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho apresentado em evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome completo do(a) autor(a): Samuel Rodrigues Araújo

Matrícula: 20191150050266

Título do trabalho: CONTROLE DE VELOCIDADE DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICO UTILIZANDO DA METODOLOGIA PID

Autorização - Marque uma das opções

- ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
- ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
- ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

☐ O documento está sujeito a registro de patente.

☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.

☐ Outra justificativa: _____.

Declaração de distribuição não-exclusiva

O(A) referido(a) autor(a) declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Valparaíso de Goiás, 3 de outubro de 2024.

(assinado eletronicamente)

SAMUEL RODRIGUES ARAÚJO

Autor(a) e/ou Detentor(a) dos Direitos Autorais

Documento assinado eletronicamente por:

■ Samuel Rodrigues Araújo, 20191150050266 - Discente, em 03/10/2024 21:21:51.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 03/10/2024. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

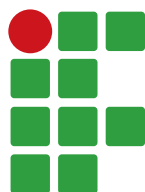
Código Verificador: 571944

Código de Autenticação: 1706aade26



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

BR 040, KM 6, Avenida Saia Velha, S/Nº, Área 8, None, Parque Esplanada V, VALPARAÍSO DE GOIÁS / GO, CEP 72876-601
(61) 3615-9210 (ramal: 9210)



**INSTITUTO FEDERAL
DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA**
Goiás

SAMUEL RODRIGUES ARAÚJO

**CONTROLE DE VELOCIDADE DE MOTORES
DE INDUÇÃO TRIFÁSICO
UTILIZANDO DA METODOLOGIA PID**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Valparaíso, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: PROF. ME. IVO JOSÉ DE OLIVEIRA , IFG

VALPARAÍSO DE GOIÁS - GO

2024

A663c

Araújo, Samuel Rodrigues.

Controle de velocidade de motores de indução trifásico
utilizando da metodologia PID./ Samuel Rodrigues Araújo.
- Valparaíso de Goiás, 2024.
101 f.: il.

Orientador: professor Me. Ivo José de Oliveira.
TCC (Graduação - Bacharelado em Engenharia
Elétrica) - - Instituto Federal de Goiás - IFG,
Campus Valparaíso de Goiás, 2024.

1. Controle de velocidade. 2. Controlador lógico
programável. 3. Automação. 4. Metodologia PID.
I. Oliveira, Ivo José de, orient. II. Título.

CDD 621.31



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS VALPARAÍSO

Termo de Aprovação

SAMUEL RODRIGUES ARAÚJO

CONTROLE DE VELOCIDADE DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICO UTILIZANDO DA METODOLOGIA PID

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Valparaíso de Goiás, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Monografia defendida e aprovada em 03 de outubro de 2024 pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Ivo José de Oliveira
Presidente da banca / Orientadora
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Profa. Ma. Larissa Rezende Assis ribeiro
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Profa. Dra. Jéssica Santoro Gonçalves Pena
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Valparaíso de Goiás – GO

2024

Documento assinado eletronicamente por:

- Jessica Santoro Goncalves Pena, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 08/10/2024 10:36:01.
- Ivo Jose de Oliveira, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 03/10/2024 21:02:43.
- Larissa Rezende Assis Ribeiro, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 03/10/2024 20:40:00.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 03/10/2024. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 571947
Código de Autenticação: 96684cbbe6



Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a minha família, pelo apoio incondicional e pela confiança depositada em mim ao longo de toda a minha jornada acadêmica. Em especial, a minha mãe, Genilda Rodrigues Teixeira, por sempre acreditar no meu potencial e me oferecerem suporte em todas as etapas desta caminhada.

Aos meus amigos, por estarem ao meu lado, oferecendo palavras de encorajamento e momentos de descontração, fundamentais para manter o equilíbrio durante os períodos mais desafiadores.

Ao meu orientador, Ivo José de Oliveira, pela paciência, pelos ensinamentos valiosos e pela orientação ao longo de todo este trabalho. Sua experiência e disposição em compartilhar conhecimento foram essenciais para o desenvolvimento deste projeto.

Por fim, agradeço a todos os professores e funcionários do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Câmpus Valparaíso (IFG-VAL), que contribuíram de alguma forma para a minha formação. Este trabalho é o resultado de anos de dedicação, aprendizado e esforço, e sou grato a cada pessoa que fez parte dessa trajetória.

Resumo

Este trabalho tem como objetivo demonstrar o que é o controle de velocidade de motores de indução trifásicos e seus modelos. Para isso, será utilizada a metodologia (PID), que é de grande relevância no controle de nível de fluidos em ambientes industriais. Além disso, será descrito sobre as metodologias que fundamentam a mudança de velocidade desses equipamentos. Também será apresentada uma breve discussão sobre a automação e seus impactos no mundo contemporâneo, destacando suas adversidades e virtudes tanto para o mundo corporativo quanto para o meio social. Por fim, o trabalho apresentará o modelo de automação (PID) e seus fundamentos, seguido de um exemplo prático desse controle. Nas demonstrações, será utilizado o kit educacional XC289, uma das bancadas didáticas disponíveis nos laboratórios de automação e controle do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Câmpus Valparaíso (IFG-VAL), usada para demonstrações em sala de aula.

Palavras-Chave: controle de velocidade; Controlador Lógico Programável; sistemas de produção; Automação; Metodologia PID.

Abstract

This paper aims to demonstrate what the speed control of three-phase induction motors and their models is. For this purpose, the PID methodology, which is of great relevance in fluid level control in industrial environments, will be used. Furthermore, the methodologies that underpin the speed variation of these devices will be described. A brief discussion on automation and its impacts on the contemporary world will also be presented, highlighting its challenges and benefits both for the corporate world and for society as a whole. Finally, the paper will present the PID automation model and its fundamentals, followed by a practical example of this control. In the demonstrations, the XC289 educational kit will be used, one of the instructional platforms available in the automation and control laboratories at Federal Institute of Education, Science and Technology of Goiás - Valparaíso Campus (IFG-VAL), used for classroom demonstrations.

Keywords: speed control; Programmable Logic Controller; production systems; Automation; PID Methodology.

Lista de Figuras

2.1	Simulação das THDs das correntes de saída dos inversores alimentando uma carga RL	25
2.2	Estator de motor trifásico	26
2.3	Campo Girante no Entreferro	27
2.4	Controle da velocidade pela resistência rotórica	30
2.5	Cascata Subsíncrona	31
2.6	Conversor de Frequência com Circuito Intermediário	33
2.7	Conversor de frequência com controle direto	35
2.8	Conversor de frequência com circuito intermediário de corrente	36
2.9	Forma de onda da corrente não senoidal	37
2.10	Conversor de frequência com circuito intermediário	37
2.11	Conversor de frequência com circuito intermediário variável	39
2.12	Sistema trifásico – bloco completo	40
2.13	Conversor de frequência autocomutados	42
2.14	Configuração básica de conversor de frequência com circuito intermediário constante	46
2.15	Parte inversora do conversor de frequência	47
2.16	Modulação de tensão contínua	48
2.17	Modulação senoidal	48
2.18	Perdas nos transistores IGBT	48
2.19	Modulação pelos flancos	49
2.20	Oscilações da modulação – formação da corrente	50
2.21	Formação da tensão de cada fase do sistema trifásico	50
2.22	Modulação PWM defasada de 120° – sistema trifásico	51
2.23	Chaveamento dos transistores IGBT	52

2.24 Corrente na capacitância dos cabos	53
2.25 Reator da saída – distâncias longas de cabos	54
2.26 Normalização da isolação dv/dt	55
2.27 Propagação pelo cabo – troca de energia – capacitância e indutância	56
2.28 Circuito equivalente de cabos	56
2.29 Comparação dos efeitos: reator e filtros.....	57
2.30 Inversores PWM e servomotor de ímã permanente	60
3.1 Diagrama em blocos de um sistema de controle com controlador PID.....	65
3.3 Período P_u	66
3.2 Diagrama Sintonia em Malha Fechada	66
3.4 Curva de resposta em forma de S	67
3.5 Método de Smith	69
4.1 Ciclo do controle de nível.....	72
4.2 Kit didático XC289	73
4.3 Medidor de nível	74
4.4 Bomba Centrífuga Trifásica	75
4.5 CLP S7 1200	76
4.6 Módulo de expansão SM1234	77
4.7 IHM.....	78
4.8 Inversor de Frequência.....	79
4.9 Esquema Elétrico IHM CLP Cartão.....	80
4.10 Esquema do Inversor.....	81
4.11 Passo a passo na tela inicial	81
4.12 Inserindo Cartão de Expansão	82
4.13 Configurando o Cartão de Expansão	83
4.14 Seção “Analog Outputs”	83
4.15 Criando a Lógica de Controle PID	84
4.16 Bloco PID Compact	84
4.17 inserção das variáveis.....	85
4.18 TAGs utilizadas.....	85
4.19 janela de configuração do bloco-Control Type	85

4.20 janela de configuração do bloco-process value limits	86
4.21 janela de configuração do bloco-process value scaling	86
4.22 janela de configuração do bloco-output value limits	86
4.23 selecionando a IHM.....	87
4.24 conectando ao CLP	87
4.25 modelo de tela IHM	88
4.26 Comportamento frequencial/nível com funcionamento normal.....	89
4.27 Região onde com o sistema inoperante	89
4.28 Mudança de escoamento	90
4.29 Momento onde se provoca a falha	91
4.30 Restabelecimento do sistema.....	92

Lista de Tabelas

2.1	Filtro na saída do inversor com diferentes configurações (ms)	58
2.2	Filtro na saída do inversor com diferentes configurações (μ s)	58
2.3	Filtro na saída do inversor com diferentes configurações (μ s)	59
3.1	Parâmetros do controlador PID pelo método de Ziegler-Nichols em malha fechada.....	67
3.2	Tabela de Sintonia pelo método de Ziegler-Nichols em malha aberta	68
3.3	Ajuste Fino	70
4.1	Tabela de Instrumentos e Ligações CLP	80
A.1	Glossário de Termos.....	98

Lista de Abreviaturas e Símbolos

Lista de Abreviaturas

(ω)	Velocidade Angular
f	Frequência
sen	Seno
φ	Fluxo magnético
φ_n	Ângulo de fase nominal
C	Capacitância
$C(s)$	Função de transferência no domínio da frequência
$c(t)$	Curva de Resposta
E	Força eletromotriz
$e(t)$	Erro em função do tempo
e^{-Ls}	Termo de atraso exponencial
$F(\alpha, t)$	Campo Magnético Resultante
$H(s)$	Função de Transferência
I_{QN}	Corrente quadrática nominal, calculada a partir da corrente nominal (I_N) e do fator de potência (φ_N)
I_Q	Corrente quadrática ajustada com base na frequência nominal (f_N) em relação à frequência atual (f) ou com base na velocidade nominal (n_N) em relação à velocidade atual (n)

I_{WN}	Corrente de excitação, calculada como o complemento quadrático da corrente nominal e da corrente quadrática nominal
I_W	Corrente de excitação ajustada para uma relação entre o torque atual (M) e o torque nominal (M_N)
i_c	Corrente na Capacitância
I_{QN}	Corrente quadrática nominal
I_Q	Corrente quadrática
i_s	Corrente do estator
I_{WN}	Corrente de excitação nominal
I_W	Corrente de excitação
I	Corrente de magnetização
k	Ganho
K_D	Ganho derivativo
K_i	Ganho Integrativo
k_p	Ganho Proporcional
K_u	Ganho nas Oscilações na Saída
kV/ms	Quilovolts por Milissegundo
kV/s	Quilovolts por Microssegundo
L	Resposta em Atraso
L_s	Indutância do estator
M	Torque
n	Velocidade angular
n_N	Velocidade nominal

P_u	Período de Oscilação
R_s	Resistência do estator
rad	Radianos
t_1	Primeiro ponto do método de Smith
t_2	Segundo ponto do método de Smith
T_d	Tempo Derivativo
T_i	Tempo Integrativo
$U(s)$	Função de transferência da entrada
$u(t)$	Saída em Função do Tempo
U_{cc}	Tensão em corrente contínua
U_{Lef}	Tensão eficaz trifásica
V	Tensão
V/f	Relação entre a tensão (V) e a frequência (f) aplicada ao motor, que influencia o torque e a velocidade
dv/dt	Derivada da Função Velocidade v em relação ao tempo t.
%M	Memória de Bits
%MD	Memória de Dupla Palavra
%MW	Memória de Palavras
π	Constante Pi
α	Variação do espaço
cos	Cosseno
F_m	Força Magnetomotriz
I	Corrente

i_a	Corrente da fase a
i_b	Corrente da fase b
i_c	Corrente da fase c
N	Número de espiras
t	Variação do tempo
ESCs	Controladores Eletrônicos de Estabilidade
VFDs	Inversores de Frequência Variável
AI	Entrada Analógica
AO	Saída Analógica
AQ	Saída Analógica
CLP	Controlador Lógico Programável
CSI	Current Source Inverter
CV	Cavalo-vapor, unidade de potência
DI	Entrada Digital
DO	Saída Digital
FCEM	Força Contraeletromotriz
HART	Highway Addressable Remote Transducer
IA	Inteligência Artificial
IFG-VAL	Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Goiás - Campus Valparaíso de Goiás
IGBTs	Transistor Bipolar de Porta Isolada-Insulated Gate Bipolar Transistors
IHM	Interface Homem-Máquina
Indústria 4.0	Quarta Revolução Industrial

Indústria 5.0 Quinta Revolução Industrial

IO	Entradas e saídas (Inputs/Outputs)
kPa	Quilopascal, unidade de pressão
mA	Miliamperes
mmca	Milímetros de coluna d'água, unidade de medida de pressão
ms	Milissegundo
OB	Organization Block-Bloco de Organização
P	Controle Proporcional
PD	Controle Proporcional Derivativo
PI	Controle Proporcional Integrativo
PID	Controle Proporcional, Integrativo e Derivativo
pol	Polegadas
PPR	Polipropileno Copolímero Random
PR	Sistema de Medição da Posição do Rotor
PWM	Modulação por Largura de Pulso-Pulse Width Modulation
TA	Tecnologias de Automação
TAG	Etiqueta ou Identificador
UOL	Portal de notícias O Universo Online
VAC	Tensão em corrente alternada (Volts AC)
VDC	Tensão em corrente contínua (Volts DC)
XC289	Kit didático de controle utilizado no laboratório do IFG-VAL

Sumário

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	CONCEITO DE AUTOMAÇÃO	19
1.1.1	AUTOMAÇÃO E MÃO DE OBRA.....	20
1.1.2	DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO DA AUTOMAÇÃO.....	21
1.2	MOTIVAÇÃO	22
1.3	OBJETIVOS	22
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	23
2	CONTROLE DE VELOCIDADE DE UM MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO	24
2.1	INTRODUÇÃO	24
2.2	CONTROLE COM FREQUÊNCIA CONSTANTE	28
2.2.1	CONTROLE PELA TENSÃO DO ESTATOR	28
2.2.2	CONTROLE PELA TENSÃO DO ROTOR: RESISTÊNCIA ROTÓRICA	29
2.2.3	CONTROLE PELA TENSÃO DO ROTOR: CASCATA SUBSÍNCRONA	31
2.3	CONTROLE COM FREQUÊNCIA VARIÁVEL	32
2.3.1	CONTROLE DIRETO – CONVERSOR DIRETO – CICLOCONVERSOR	33
2.3.2	CONTROLE INDIRETO COM CIRCUITO INTERMEDIÁRIO DE TENSÃO VARIÁVEL	34
2.3.3	CONTROLE INDIRETO COM CIRCUITO INTERMEDIÁRIO DE TENSÃO CONSTANTE	45
2.3.4	CONTROLE INDIRETO COM CIRCUITO INTERMEDIÁRIO DE TENSÃO CONSTANTE – PARTE INVERSORA	46
2.3.5	CONTROLE INDIRETO COM CIRCUITO INTERMEDIÁRIO DE TENSÃO CONSTANTE –PARTE INVERSORA: EFEITOS DA MODULAÇÃO PWM ...	51

2.3.6	CONTROLE INDIRETO COM CIRCUITO INTERMEDIÁRIO DE TENSÃO CONSTANTE (PARTE INVERSORA) EM SERVOMOTORES DE ÍMÃ PER- MANENTE	59
3	CONTROLADOR INDUSTRIAL PID	62
3.1	TIPOS DE CONTROLADORES INDUSTRIAIS	62
3.1.1	CONTROLADOR P	62
3.1.2	CONTROLADOR PI	63
3.1.3	CONTROLADOR PD	64
3.1.4	CONTROLADOR PID	64
3.2	SINTONIA DE CONTROLADORES PID	65
3.2.1	MÉTODO DE ZIEGLER NICHOLS	65
3.2.2	MÉTODO DE SMITH	68
3.2.3	AJUSTE MANUAL	69
4	MODELO DE CONTROLE PID EM UM CONTROLE DE NÍVEL DE TANQUES EM ESCOAMENTO CONTINUO	71
4.1	CONFIGURAÇÃO NO KIT XC289	71
4.1.1	VISÃO GERAL DA BANCADA	73
4.1.2	COMPONENTES UTILIZADOS NESSA APLICAÇÃO	74
4.1.3	ESQUEMA ELÉTRICO	80
4.1.4	PROGRAMAÇÃO NO CLP S7-1200	81
4.2	TESTES E ANÁLISES DO CONTROLE DE NÍVEL NO KIT DIDÁTICO XC289	88
4.2.1	TESTE DE FUNCIONAMENTO ESTÁVEL	88
4.2.2	TESTE VARIAÇÃO NO ESCOAMENTO DO TANQUE	90
4.2.3	TESTE REPOSTA A FALHAS NA ALIMENTAÇÃO ELÉTRICA DA BOMBA	90
5	CONCLUSÕES	93
5.1	CONCLUSÕES GERAIS	93
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
	APÊNDICE	98

Capítulo 1

Introdução

1.1 Conceito de automação

Para discutirmos o que é a Automação em geral e sua importância, é necessário refletir sobre o que de fato ela se refere. Em resumo, trata-se da habilidade de uma máquina ou de um sistema de máquinas ser operado automaticamente ou remotamente, com mínima interferência humana no local. Esse conceito pode ser ampliado com o controle adicional de processos automáticos, onde mecanismos e equipamentos fornecem dados e atuam de forma independente, ajustando suas ações de acordo com as variáveis coletadas. No entanto, o conceito de automação pode variar de acordo com o ambiente e a experiência da pessoa envolvida. Para uma dona de casa, pode ser a máquina de lavar roupa ou de lavar louça. Para um trabalhador da indústria automobilística, pode ser um robô. Para uma pessoa comum, pode ser a capacidade de retirar dinheiro de um caixa eletrônico [1].

A automação pode gerar vários benefícios com sua aplicação, como econômicos e de segurança. Uma máquina não tem necessidades fisiológicas, tornando possível sua operação contínua, o que, se fosse realizado por humanos, necessitaria de pausas para alimentação e descanso, além de questões sociais e psicológicas complexas. No entanto, é importante ressaltar que ainda não existe uma tecnologia capaz de tomar decisões lógicas de forma completamente autônoma (limitações que poderão desaparecer com a introdução de IA's). Isso torna necessária a supervisão e manutenção humana, com calibrações e revisões rotineiras, para que seu funcionamento seja preciso e não

cause mais problemas do que soluções [1].

1.1.1 Automação e mão de obra

Há muitas controvérsias sobre a relação entre a automação e a mão de obra humana, pois é clara a ameaça às vagas de emprego nos setores onde ela será aplicada.

Conforme matéria publicada no portal de notícias "O Universo Online" (UOL), em 2020, as indústrias brasileiras empregavam 7,652 milhões de trabalhadores, o que representava 20,5% do total de empregados no Brasil, uma grande parcela dos empregos do país. Sendo assim, esse setor tem um grande peso na empregabilidade, e mudanças nele sinalizam ameaças para todas essas pessoas que dedicaram suas vidas ao que fazem, da maneira que fazem. A maior parte das intenções de automatização de um projeto visa principalmente o corte de gastos, e entre eles estão os funcionários do setor [2].

É uma realidade muitas vezes romantizada como oportunidades de especialização, o que pode até ser verdade para os empregados mais experientes, cuja saída pode gerar desorganização no funcionamento do local. Porém, aqueles cuja influência não é prioritária acabam sendo prejudicados nesse processo, já que isso pode levar à redução da necessidade de mão de obra humana, potencialmente resultando em desemprego [3].

O relatório divulgado pelo Fórum Econômico Mundial prevê que, até 2025, a automação e a divisão do trabalho entre humanos e máquinas fecharão 85 milhões de empregos no mundo em empresas de médio e grande porte, abrangendo 15 setores e 26 economias, incluindo o Brasil [4].

É notável também citar os transtornos gerados na vida daqueles que se mantêm empregados, pois a cobrança por especialização, a mudança na rotina e uma possível dificuldade de adaptação à nova forma de trabalho geram frustração para o empregado, que, ao final do dia, provavelmente continuará recebendo a mesma remuneração [5].

1.1.2 Desenvolvimento Histórico da Automação

No século XX, a economia passou por uma grande transformação com o advento da industrialização de bens de consumo. Na busca por melhorar a eficiência dos modelos produtivos, a indústria evoluiu, caminhando em direção às Tecnologias de Automação (TA). Inicialmente, essa evolução ocorreu por sistemas mecânicos, depois se tornaram obsoletos devido à alta necessidade de manutenção, ao peso excessivo dos equipamentos, aos riscos de acidentes e às limitações estruturais desses sistemas [6].

Posteriormente, para mitigar esses problemas, houve uma transição para sistemas de Automação Analógica, que simplificaram os equipamentos, tornando-os menores. A substituição de componentes mecânicos por eletrônicos reduziu consideravelmente a taxa de manutenção, tornando o funcionamento das máquinas muito mais ágil [6].

Apesar de todas as vantagens da eletrônica, ainda havia espaço para aprimoramentos. Com a digitalização, viabilizada pela chegada dos semicondutores no final da década de 1960, um vasto leque de possibilidades se abriu. Essa tecnologia permitiu que os equipamentos se adaptassem ao seu funcionamento, oferecendo respostas inteligentes a situações adversas. O surgimento do computador possibilitou a criação de interfaces que atendiam às necessidades específicas de cada indústria, permitindo que engenheiros e desenvolvedores encontrassem soluções sob medida, reduzindo a necessidade de investimentos astronômicos e abrindo caminho para novas oportunidades [6].

Na década de 1960, foram introduzidos equipamentos que pavimentaram o caminho para a Indústria 4.0, utilizando a tecnologia computacional recém-desenvolvida no ambiente industrial de maneira inédita. O Controlador Lógico Programável (CLP), baseado em um computador digital dedicado às necessidades industriais, tornou-se um marco. Sua interface adapta-se às especificidades do ambiente, operando por botoeiras, sensores, relés ou contadores, elementos que possibilitam o alinhamento entre sistemas eletrônicos e mecânicos, incluindo aqueles de alta potência. O funcionamento do CLP é programado conforme as exigências da aplicação, proporcionando flexibilidade e eficiência ao controle industrial [7].

1.2 Motivação

Em meio ao universo da automação industrial, um elemento de grande relevância presente em quase todas as aplicações existentes é o controle de velocidade. Uma boa escolha da metodologia utilizada para esse controle será decisiva em termos de qualidade da energia no ambiente, funcionamento adequado do equipamento e redução da manutenção, o que resulta em menores custos operacionais.

Diante da relevância desse tema visando a crescente demanda por eficiência energética e sustentabilidade nas indústrias modernas, onde cada melhoria no controle de processos tem um peso enorme pra alcançar esses objetivos, este trabalho tem o intuito de descrever e demonstrar as principais metodologias de controle de velocidade de motores, e o recurso dos controladores industriais PID (que trazem maior precisão a essas operações), além de apresentar um exemplo prático de sua aplicação em um contexto industrial.

1.3 Objetivos

O trabalho demonstra a importância da automação e controle, que constituem a base fundamental da Indústria 4.0 e o pilar sobre o qual a Indústria 5.0 vem sendo edificada. O avanço da automação e a integração inteligente entre máquinas e humanos são fatores essenciais para essa nova fase da industrialização.

Além disso, o trabalho visa explicar, de forma concisa e clara, como é realizado o controle de velocidade de motores, destacando sua importância para o desempenho eficiente de processos industriais.

Por fim, será apresentada a metodologia PID (Proporcional, Integral e Derivativa), que é de suma importância para um controle preciso e eficiente de processos, garantindo maior estabilidade e otimização dos sistemas industriais.

1.4 Organização do Trabalho

O Capítulo 1 apresenta uma visão geral sobre a automação, onde as motivações e os objetivos foram descritos.

O Capítulo 2 destaca detalhes sobre o Controle de Velocidade de um Motor de Indução Trifásico, apresentado matematicamente o funcionamento dessa máquina, e como se baseia o controle pela frequência e apresenta os principais modelos de controle de velocidade existente.

O Capítulo 3 fala sobre as técnicas de controle Proporcional Integrativo e Derivativo (PID), o qual calibra as variáveis de saída com base das de entrada do sistema para garantir um funcionamento estável do mesmo.

No Capítulo 4 é feita apresentação de um modelo de controle de vazão, usando o controle PID, ajustando a velocidade de um bomba centrífuga, a partir da leitura de nível de um sensor de pressão.

Por fim, o Capítulo 5 apresenta a conclusão do trabalho.

Capítulo 2

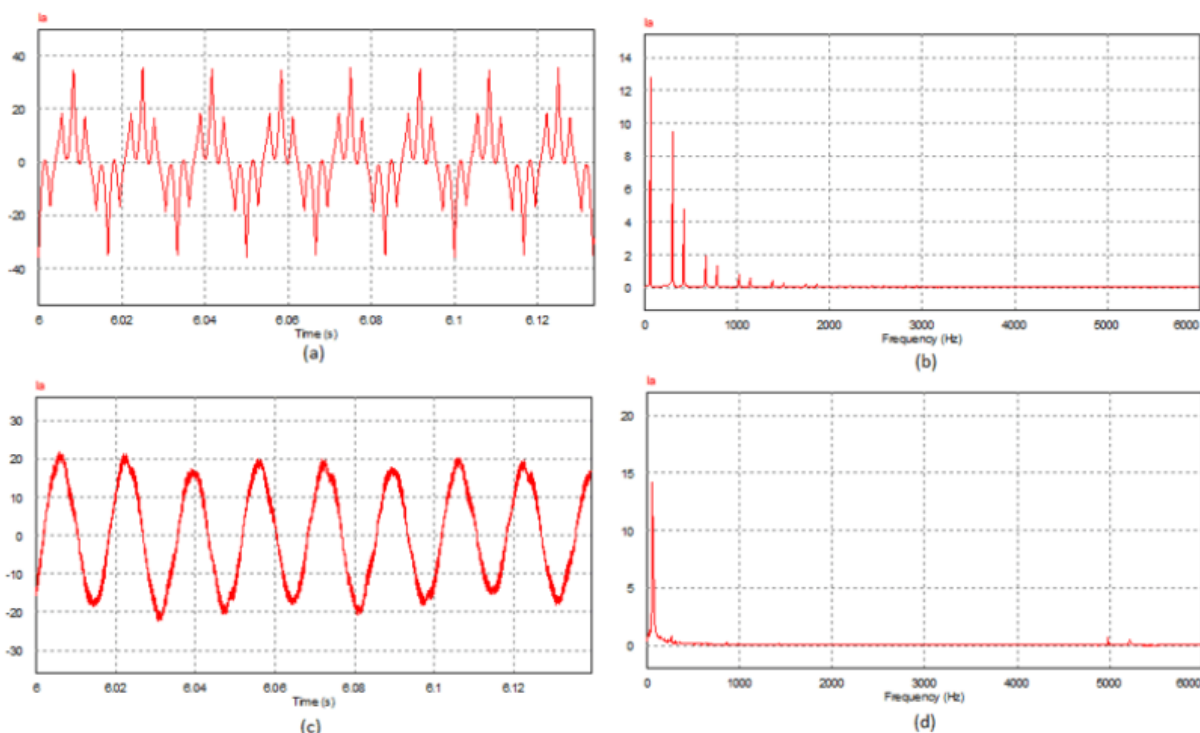
Controle de Velocidade de um Motor de Indução Trifásico

2.1 Introdução

Um dos principais objetivos do controle de velocidade é otimizar o desempenho de motores de indução trifásicos para uma aplicação eficiente em diversas áreas, como bombas, compressores, transporte e ventiladores. Isso gera oportunidades para o aumento da produtividade, flexibilidade na operação, economia de energia, além de evitar estresse desnecessário ao motor, prolongando sua vida útil e reduzindo os custos de manutenção [8].

No entanto, também existem pontos negativos, como a complexidade e o custo do sistema de controle, a redução na eficiência do motor pois ele passa a operar com um fator de potência menor, além do fato de que o controle de velocidade pode introduzir harmônicos no sistema elétrico conforme Figura 2.1, que podem interferir em outros dispositivos sensíveis conectados à mesma fonte de alimentação. Há diversos tipos de controle, dentre eles o controle por variação VFDs (Variadores de Frequência) e ESCs (Controladores Eletrônicos de Velocidade de tensão e por frequência), cada um com sua abordagem adequada para diferentes situações [8].

Figura 2.1: Simulação das THDs das correntes de saída dos inversores alimentando uma carga RL

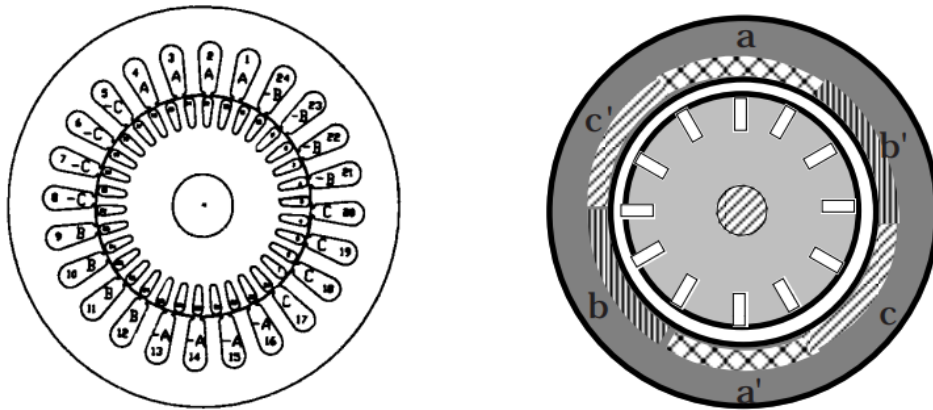


(a) Forma de onda da corrente na saída de um inversor de seis pulsos, (b) Espectro de Fourier da onda (a), (c) Forma de onda da corrente de saída de um inversor SPWM e (d) Espectro de Fourier da onda (c).

Fonte: Análise comparativa entre as distorções harmônicas totais das técnicas de 6 pulsos e de modulação por largura de pulso senoidal [9].

Para entender melhor o controle de velocidade, é necessário compreender o funcionamento de um motor de indução trifásico. Esses motores utilizam a indução eletromagnética a partir de uma estrutura conhecida como estator para gerar um campo magnético rotativo em uma peça chamada rotor. Desse princípio, entende-se por que a frequência e a tensão são capazes de controlar a velocidade do equipamento [8].

Figura 2.2: Estator de motor trifásico



Fonte: O Motor de Indução Trifásico Selecção e Aplicação [10].

O motor de indução trifásico é uma máquina elétrica que opera com corrente alternada em seu princípio de funcionamento. O estator, mostrado na Figura 2.2, é uma estrutura normalmente cilíndrica, feita de material ferromagnético, composta por três bobinas ou três conjuntos de bobinas conectadas a cada fase da rede elétrica, dispostas ao longo da estrutura com uma defasagem de $2\pi/3 \text{ rad}$ [10].

Com a oscilação senoidal da rede elétrica, ocorre o fenômeno do campo girante, caracterizado por um pulso eletromagnético que se move ao longo dessa estrutura. No rotor, temos uma estrutura de condutores curto-circuitados que, na presença do campo magnético do estator, induz um campo em si mesmo. Isso faz com que o rotor acompanhe o campo girante. Esse fenômeno é provado pelo *Teorema de Ferraris* descrito pelas equações 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4 [10]:

$$F_m = N \cdot I \quad (2.1)$$

$$N \cdot i_a = \sqrt{2} \cdot N \cdot I \cdot \cos(\omega t) \cdot \cos(\alpha) \quad (2.2)$$

$$N \cdot i_b = \sqrt{2} \cdot N \cdot I \cdot \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.3)$$

$$N \cdot i_c = \sqrt{2} \cdot N \cdot I \cdot \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \cdot \cos\left(\alpha - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (2.4)$$

Onde: N é o Número de espiras, i_a Corrente da fase a, i_b Corrente da fase b, i_c Corrente da fase c, I Corrente, α Variação do espaço, t Variação do tempo, e F_m a Força Magnetomotriz.

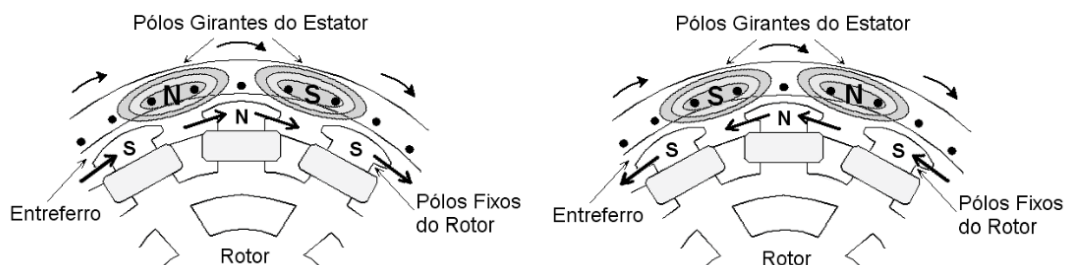
Com o somatório das forças magnetomotrizes, obtemos o Campo Magnético Resultante:

$$F(\alpha, t) = N_i = N \cdot i_a + N \cdot i_b + N \cdot i_c = \left(\frac{3}{2} \cdot \sqrt{2} N \cdot I\right) \cdot \cos(\omega t - \alpha) \quad (2.5)$$

Descrevendo em função do espaço por um ângulo de fase qualquer α e do tempo por t fixo, a variação sinusoidal do campo magnético ao longo da periferia do entreferro (ver Figura 2.3) ocorre com a velocidade angular ω . Esse campo magnético girante possui uma velocidade síncrona, que é a velocidade com que completa uma rotação em torno do estator. A velocidade está vinculada à frequência, já que $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$, gerando uma relação de proporcionalidade, denominada velocidade síncrona (N_s), determinada pela frequência da corrente alternada f e pelo número de polos P [10].

$$N_s = \frac{120 \times f}{P} \quad (2.6)$$

Figura 2.3: Campo Girante no Entreferro



Fonte: Motores Trifásicos De Corrente Alternada [11]

Dentre os métodos de controle de velocidade de equipamentos de campo girante e corrente alternada, temos a divisão em duas categorias:

Frequência constante: ocorre a variação de velocidade pela variação de escorregamento para uma frequência constante do campo girante. Nesse caso, apenas a tensão varia e, conseqüentemente, o campo magnético resultante $F(\alpha, t)$ é reduzido, diminuindo o torque, o que resulta em desaceleração devido à atuação das forças de atrito e outras forças às quais o motor está submetido.

Frequência variável: ocorre a variação de frequência, o que, conseqüentemente, altera a velocidade angular ω [12].

2.2 Controle com Frequência Constante

2.2.1 Controle pela Tensão do Estator

Ao se diminuir a tensão, o torque máximo é reduzido proporcionalmente ao quadrado da tensão, aumentando o escorregamento e reduzindo a velocidade do motor. Para motores da categoria D, a variação é maior, proporcionando mais variação de velocidade, com a ressalva de que o aumento do escorregamento também aumenta as perdas no entreferro. Devido a isso, essas aplicações ficam limitadas a cargas intermitentes [12].

Características

- Simplicidade na instalação e na montagem;
- Baixa faixa de variação de velocidade;
- Redução de torque;
- Redução da corrente de partida.

Aplicações

- Dispositivos de baixa inércia, devido à redução do torque;
- Não se justifica em projetos mais novos.

Esses equipamentos têm se tornado obsoletos, sendo encontrados apenas em instalações mais antigas que carecem de atualização, já que as técnicas modernas

são mais eficientes e apresentam menos perdas energéticas, além de oferecerem melhor controle de qualidade nos processos. Sua concepção não foi orientada para o ajuste de velocidade, mas sim para melhorar sistemas de partida suave, que mais tarde evoluíram para as chaves estáticas. Essa técnica também avançou no controle de temperatura em sistemas de aquecimento, ajustando a alimentação das resistências de forma mais eficiente [12].

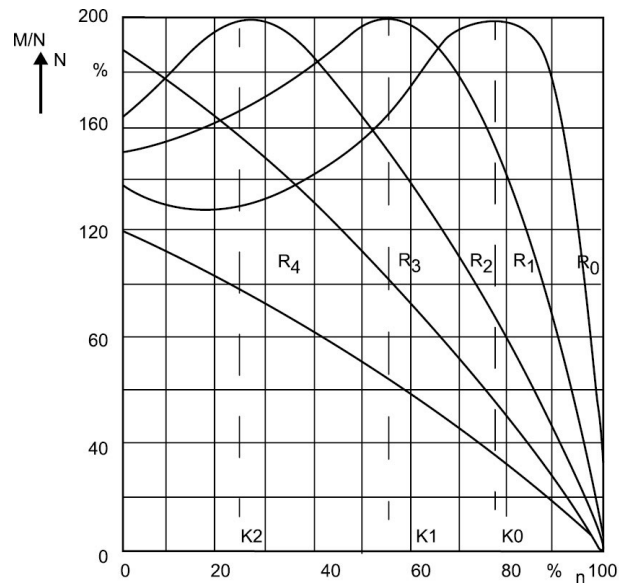
2.2.2 Controle pela Tensão do Rotor: Resistência Rotórica

A técnica de controle de velocidade de motores de indução envolve o uso de resistência rotórica externa e modulação por tiristores para variar o escorregamento e controlar a velocidade do motor. O modelo mais comum é o motor de anéis, que permite adicionar uma resistência externa ao rotor através de anéis deslizantes. Isso possibilita o controle da resistência do estator por meio de resistências externas, no gráfico da Figura 2.4 podemos ver o comportamento desse controle. Com o uso de uma ponte retificadora de tiristores, que modula a resistência rotórica, o motor pode controlar melhor a velocidade. O controle ocorre variando o ângulo de disparo dos tiristores, o que altera a resistência rotórica e, conseqüentemente, o escorregamento e a velocidade [12].

Perdas e eficiência: Embora o controle seja eficiente, o aumento do escorregamento também aumenta as perdas. Essas perdas são dissipadas externamente nas resistências rotóricas, e quanto menor a velocidade, maiores são as perdas [12].

Observação: O motor de categoria D possui alta resistência rotórica, o que aumenta o escorregamento e as perdas associadas [12].

Figura 2.4: Controle da velocidade pela resistência rotórica



Fonte: Acionamentos de Velocidade variável Conhecimentos básicos fundamentais Instruções gerais para acionamentos elétricos regulados Em velocidade variável e em corrente alternada [12].

Características

- Maior manutenção devido aos componentes adicionais;
- Alto torque de partida;
- Altas perdas no circuito rotórico;
- Sobredimensionamento do motor e necessidade de instalação de sistema de ventilação forçada independente.

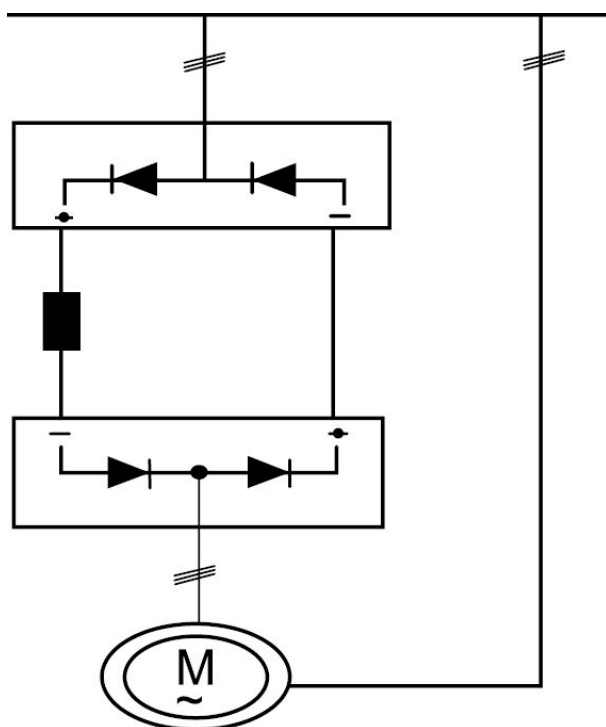
Aplicação

- Dispositivos de alta inércia, devido ao alto torque resultante pela relação V/f nominais;
- Não se justifica em projetos novos, especialmente com o uso de motores de anéis;
- Esta técnica também está em desuso.

2.2.3 Controle pela Tensão do Rotor: Cascata Subsíncrona

Semelhante à técnica anterior, mas com a diferença de que, em vez de dissipar as perdas rotóricas em resistências externas, essas perdas são devolvidas à rede elétrica por meio de uma ponte retificadora de tiristores Figura 2.5. A variação do ângulo de disparo dos tiristores permite controlar a tensão no rotor, criando uma contratensão que afeta a velocidade do motor, influenciando o escorregamento (diferença entre a velocidade síncrona e a velocidade do rotor) e, conseqüentemente, a velocidade da máquina. Isso resulta em economia de energia, que seria desperdiçada como calor [12].

Figura 2.5: Cascata Subsíncrona



Fonte: Acionamentos de Velocidade variável Conhecimentos básicos fundamentais Instruções gerais para acionamentos elétricos regulados Em velocidade variável e em corrente alternada [12].

Características

- Maior manutenção devido aos componentes adicionais;
- Alto torque de partida;
- As perdas do circuito rotórico são devolvidas para a rede de alimentação;

- Sobredimensionamento do motor e/ou necessidade de instalação de sistema de ventilação forçada independente.

Aplicação

- Dispositivos de alta inércia, devido ao alto torque resultante pela relação V/f nominais;
- Não se justifica em projetos novos, principalmente pelo uso de motores de anéis;
- Esta também é uma técnica em desuso.

Atualmente, soluções mais modernas substituíram as alternativas que buscavam resolver a variação de velocidade com frequência constante. Essas soluções tornaram inviável o desenvolvimento de sistemas antigos para novos projetos. Além disso, os motores de anéis podem ser curto-circuitados e transformados em motores de gaiola, adequados para controles de velocidade mais modernos [12].

2.3 Controle com Frequência Variável

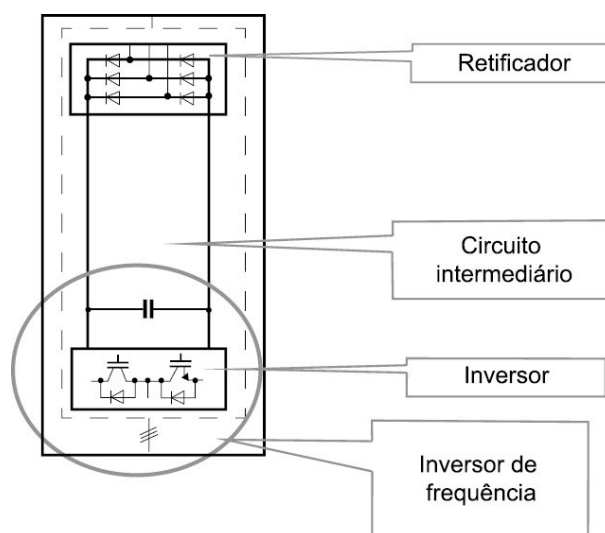
O fluxo interno da máquina depende da relação entre a tensão (V) e a frequência (f) da corrente que alimenta o motor. Assim, quando a frequência diminui, a tensão também precisa diminuir proporcionalmente para manter o fluxo constante. Isso garante que o torque do motor permaneça inalterado. Se a frequência aumenta, mas a tensão permanece constante, o fluxo diminui inversamente à frequência, resultando em uma redução do torque e do torque máximo do motor — fenômeno conhecido como a relação V/f [12].

Um conversor de frequência é utilizado para variar a frequência que alimenta o motor. Primeiramente, a tensão alternada da rede é retificada (convertida em tensão contínua). Em seguida, essa tensão contínua é invertida novamente para uma tensão alternada com frequência variável, resultando em uma forma de onda senoidal. O circuito responsável por esse processo é dividido nas seguintes etapas representadas na Figura 2.6 [12]:

- **Retificador:** converte a tensão alternada em tensão contínua;
- **Circuito intermediário:** mantém a tensão contínua e a prepara para a inversão;
- **Inversor:** converte a tensão contínua de volta para tensão alternada com frequência variável, alimentando o motor.

Observação: o termo "inversor de frequência" refere-se apenas à última etapa do processo, que converte a tensão contínua do circuito intermediário de volta para tensão alternada variável [12].

Figura 2.6: Conversor de Frequência com Circuito Intermediário



Fonte: Acionamentos de Velocidade variável Conhecimentos básicos fundamentais Instruções gerais para acionamentos elétricos regulados Em velocidade variável e em corrente alternada [12].

2.3.1 Controle Direto – Conversor Direto – Cicloconversor

Este é um controle de motores no qual não há circuito intermediário, e a frequência variável é gerada diretamente pela retificação da rede elétrica. A partir de três circuitos trifásicos alimentados por três secundários de um transformador, cria-se um circuito trifásico com tensão e frequência variáveis [12].

Nas pontes retificadoras, cada uma trabalha com um ângulo de disparo dos tiristores. Quando o ângulo é menor que 90° , ocorre a retificação; e, quando é maior que 90° , ocorre a inversão da onda, garantindo que tanto as partes positivas quanto as negativas da onda senoidal sejam geradas, alimentando o motor [12].

Características

- Operação em quatro quadrantes sem componentes adicionais: a máquina pode funcionar como motor, recebendo energia da rede, e como gerador, devolvendo energia para a rede, sem a necessidade de componentes adicionais;
- Velocidade de operação baixa e extremamente baixa;
- Máxima velocidade de 50% da frequência da rede de alimentação.

Aplicações

- Setores que demandam alta potência devido aos custos envolvidos e baixas velocidades operacionais, como laminação, mineração e fornos rotativos (por exemplo, de cimento);
- Aplica-se a motores síncronos ou assíncronos de média tensão e alta potência [12].

2.3.2 Controle Indireto com Circuito Intermediário de Tensão Variável

Essa tecnologia, que envolve a formação de um circuito intermediário com tensão variável, foi amplamente utilizada até o final da década de 1990. Naquela época, os transistores de potência ainda não estavam tão avançados, e a parte inversora era realizada por tiristores, que eram os semicondutores mais confiáveis na época [12].

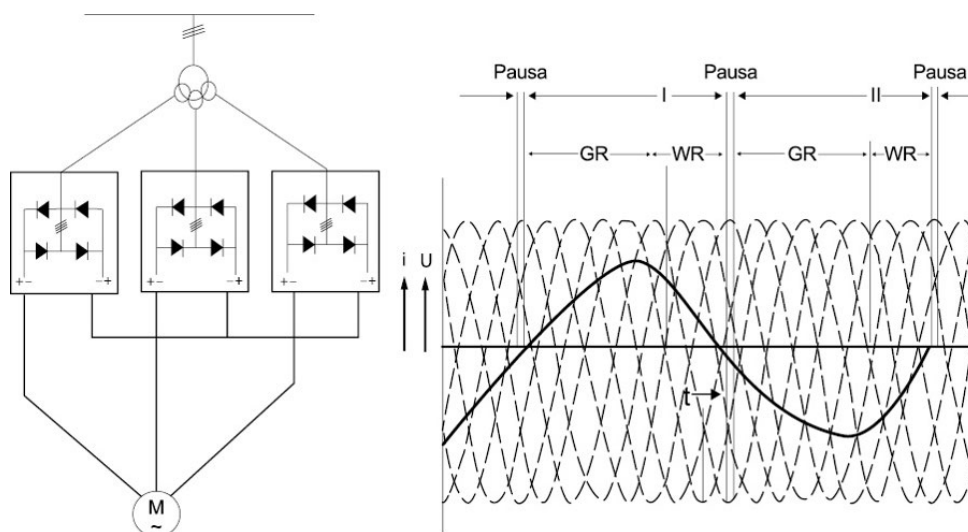
2.3.2.1 Conversores com Circuito Intermediário de Corrente

Este tipo de conversor foi muito usado em centrífugas de açúcar, podendo ainda encontrado em algumas usinas de açúcar e álcool. Sua regulação da corrente no circuito intermediário, responsável pela imposição da corrente de magnetização e de carga e feita na ponte retificadora controlada de tiristores, que fica na entrada do sistema Figura 2.7. A corrente do circuito intermediário pode ser controlada pelo ângulo

de disparo dos tiristores, o que impacta no fator de potência da rede de alimentação [12].

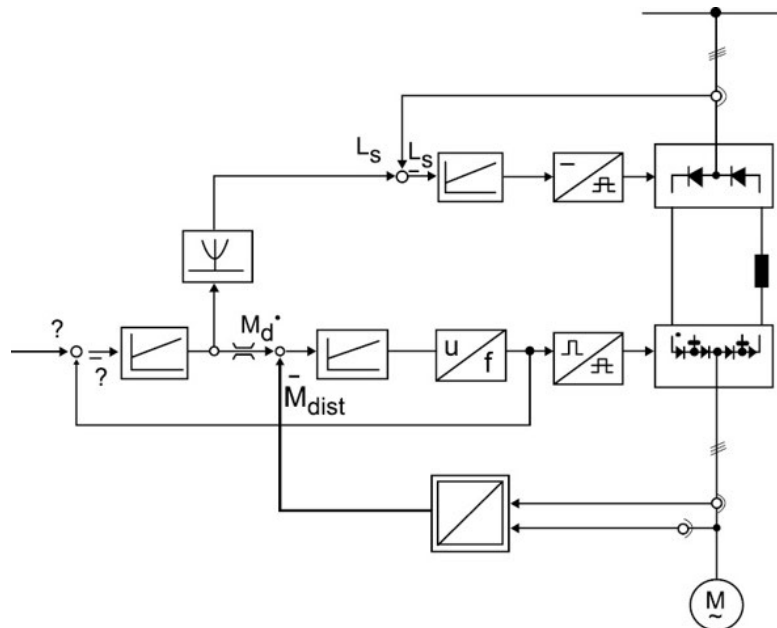
Esse regulador controla a corrente aparente e a corrente ativa é responsável pelo torque, enquanto a corrente reativa pelo fluxo. A saída do regulador de frequência, é a corrente ativa desejada para o torque, conforme mostrado na Figura 2.7.

Figura 2.7: Conversor de frequência com controle direto



Fonte: Acionamentos de Velocidade variável Conhecimentos básicos fundamentais Instruções gerais para acionamentos elétricos regulados Em velocidade variável e em corrente alternada [12].

Figura 2.8: Conversor de frequência com circuito intermediário de corrente



Fonte: Acionamentos de Velocidade variável Conhecimentos básicos fundamentais Instruções gerais para acionamentos elétricos regulados Em velocidade variável e em corrente alternada [12].

- $I_{QN} = I_N \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_N}$:

Esta fórmula representa a corrente quadrática nominal (I_{QN}), que é calculada a partir da corrente nominal (I_N) e do fator de potência (φ_N).

- $I_{WN} = \sqrt{I_N^2 - I_{QN}^2}$:

Esta fórmula calcula a corrente de excitação (I_{WN}) como o complemento quadrático da corrente nominal e da corrente quadrática nominal.

- $I_W = I_{WN} \cdot \frac{M}{M_N}$:

A corrente de excitação (I_W) é ajustada para uma relação entre o torque atual (M) e o torque nominal (M_N).

- $I_Q = I_{QN} \cdot \frac{f_N}{f} = I_{QN} \cdot \frac{n_N}{n}$:

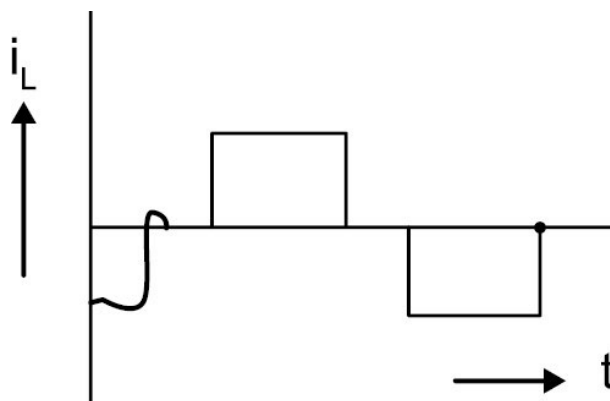
A corrente quadrática (I_Q) é ajustada com base na frequência nominal (f_N) em relação à frequência atual (f) ou com base na velocidade nominal (n_N) em relação à velocidade atual (n).

- $I = \sqrt{I_Q^2 + I_W^2}$:

Esta fórmula final calcula a corrente total (I) combinando as correntes quadrática (I_Q) e de excitação (I_W) de maneira quadrática.

A frequência é controlada na parte inversora do conversor, onde a corrente é comutada a cada 180° fornecendo a frequência e velocidade desejadas, formando uma corrente não senoidal no motor, conforme Figura 2.9.

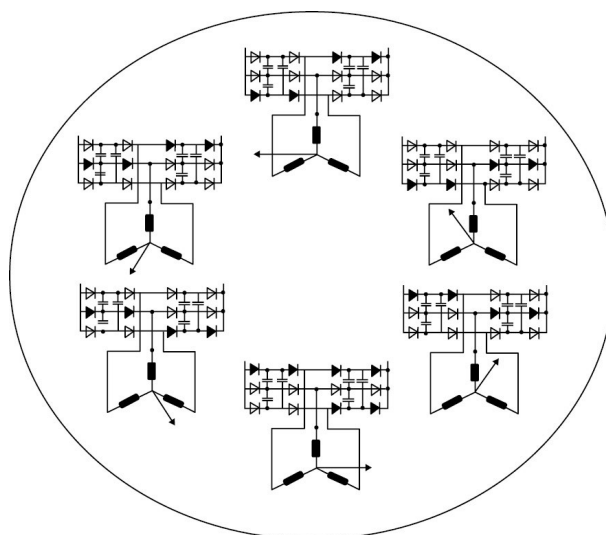
Figura 2.9: Forma de onda da corrente não senoidal



Fonte: Acionamentos de Velocidade variável Conhecimentos básicos fundamentais Instruções gerais para acionamentos elétricos regulados Em velocidade variável e em corrente alternada [12].

Essa corrente não senoidal gera um campo girante que comuta de posição a cada 60° , produzindo uma velocidade não homogênea e trancos como pode ser visto na Figura 2.10.

Figura 2.10: Conversor de frequência com circuito intermediário



Fonte: Acionamentos de Velocidade variável Conhecimentos básicos fundamentais Instruções gerais para acionamentos elétricos regulados Em velocidade variável e em corrente alternada [12].

Em velocidades abaixo de 10% da velocidade nominal, esses trancos se tornam

perceptíveis, impossibilitando o uso do motor. Entretanto, em velocidades maiores, a inércia da máquina suaviza esses trancos, permitindo uma operação mais homogênea e aceitável [12].

Para a comutação dos tiristores, mesmo em corrente contínua, é inserido um capacitor, para o bloqueio dos tiristores. Este sistema atua em conjunto com a indutância do motor, permitindo que a comutação seja dependente da carga, em consequência o inversor acaba "casando" com o motor, sendo ideal para aplicações monomotor. Essa indutância do circuito intermediário é responsável por limitar a corrente devido às diferenças entre as tensões instantâneas do retificador e do inversor, sendo dimensionada de modo que não haja corrente intermitente no circuito intermediário, mesmo há vazio [12].

Uma característica importante dos *CSI* é a possibilidade de operação em quatro quadrantes, pois mesmo utilizando uma ponte trifásica simples de tiristores e com corrente em um único sentido no retificador, é possível que haja devolução de energia para a rede de alimentação, sem componentes adicionais [12].

características

Os conversores com circuito intermediário de corrente apresentam as seguintes características:

- Operação em quatro quadrantes sem componentes adicionais.
- Velocidade de operação acima de 10% da velocidade nominal.
- Ideal para acionamentos monomotor.
- Aplicação preferencial para motores assíncronos.
- Fator de potência variável de acordo com as condições operacionais.

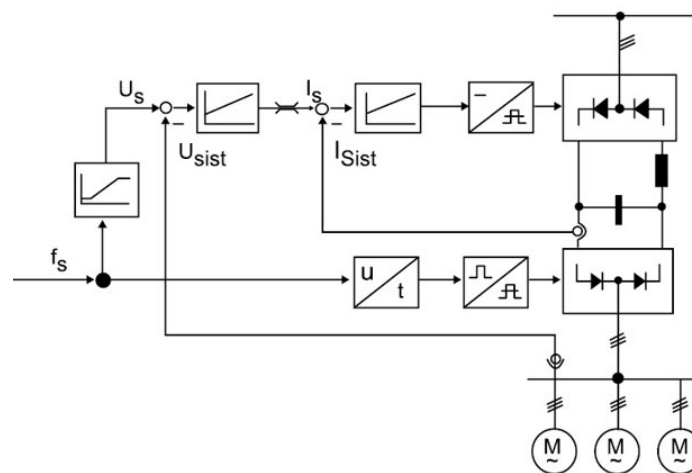
Aplicação

Este tipo de conversor tem sido amplamente utilizado em centrífugas de açúcar, bombas e ventiladores, além de outros processos que exigem frenagem. Entretanto, essa tecnologia está em desuso [12].

2.3.2.2 Conversores com Circuito Intermediário de Tensão Variável

São uma evolução dos conversores de corrente. Esse tipo de conversor utiliza, na entrada, uma ponte retificadora de tiristores que ajusta a tensão para cada frequência de operação, seguindo a relação V/f . O ajuste da tensão correta no estator do motor é feito compensando as perdas no circuito com base em medições de corrente Figura 2.11. A parte inversora controla a frequência [12].

Figura 2.11: Conversor de frequência com circuito intermediário variável



Fonte: Acionamentos de Velocidade variável Conhecimentos básicos fundamentais Instruções gerais para acionamentos elétricos regulados Em velocidade variável e em corrente alternada [12].

- $M = K \varphi I_W$:

Esta fórmula representa o torque (M) gerado pelo motor, que é proporcional ao fluxo magnético (φ) e à corrente de excitação (I_W). O fator de proporcionalidade é K .

- $\varphi = K \frac{V}{f} = I_\mu = I_Q$:

O fluxo magnético (φ) é determinado pela tensão (V) e pela frequência (f), e pode ser aproximado pela corrente de magnetização (I_μ) e pela corrente quadrática (I_Q).

- $I_{QN} = I_N \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_N}$:

A corrente quadrática nominal (I_{QN}) é calculada a partir da corrente nominal (I_N) e do ângulo de fase (φ_N).

- $I_{WN} = \sqrt{I_N^2 - I_{QN}^2}$:

Esta fórmula calcula a corrente de excitação nominal (I_{WN}), subtraindo a corrente quadrática nominal da corrente nominal.

- $I_W = I_{WN} \cdot \frac{M}{M_N}$:

A corrente de excitação (I_W) é ajustada conforme o torque atual (M) e o torque nominal (M_N).

- $I_Q = I_{QN} \cdot \frac{f_N}{f} = I_{QN} \cdot \frac{n_N}{n}$:

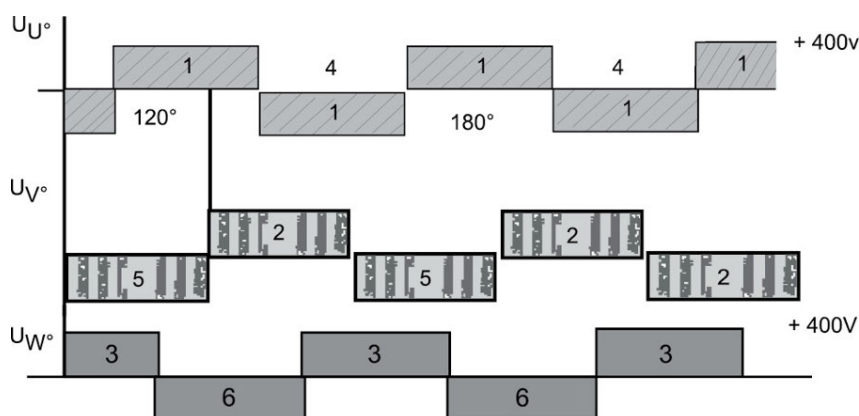
A corrente quadrática (I_Q) é ajustada pela razão entre a frequência nominal (f_N) e a frequência atual (f) ou a razão entre a velocidade nominal (n_N) e a velocidade atual (n).

- $I = \sqrt{I_Q^2 + I_W^2}$:

Esta fórmula calcula a corrente total (I) combinando, de maneira quadrática, a corrente de excitação (I_W) e a corrente quadrática (I_Q).

A tensão de saída para o motor é formada por um sinal não senoidal em formato de bloco. Cada fase da alimentação trifásica é comutada a cada 120°, e a tensão é comutada a cada 180°, gerando um campo girante que se movimenta em passos de 60°, (ver Figura 2.12), resultando em uma velocidade não homogênea e não concêntrica do campo magnético [12].

Figura 2.12: Sistema trifásico – bloco completo



Fonte: Acionamentos de Velocidade variável Conhecimentos básicos fundamentais Instruções gerais para acionamentos elétricos regulados Em velocidade variável e em corrente alternada [12].

Características

- Assim como no conversor de corrente, em velocidades abaixo de 10% da nominal, os trancos causados pela comutação da tensão são perceptíveis, dificultando a operação. No entanto, em velocidades mais altas, a inércia da máquina ajuda a suavizar esses trancos, permitindo um movimento mais homogêneo;
- Diferente do conversor de corrente, o conversor de tensão não permite a devolução de energia para a rede de alimentação sem componentes adicionais, o que limita a operação em quatro quadrantes;
- Acionamento mono e multimotor;
- Adequado para motores síncronos e assíncronos;
- Fator de potência ajustável de acordo com a carga.

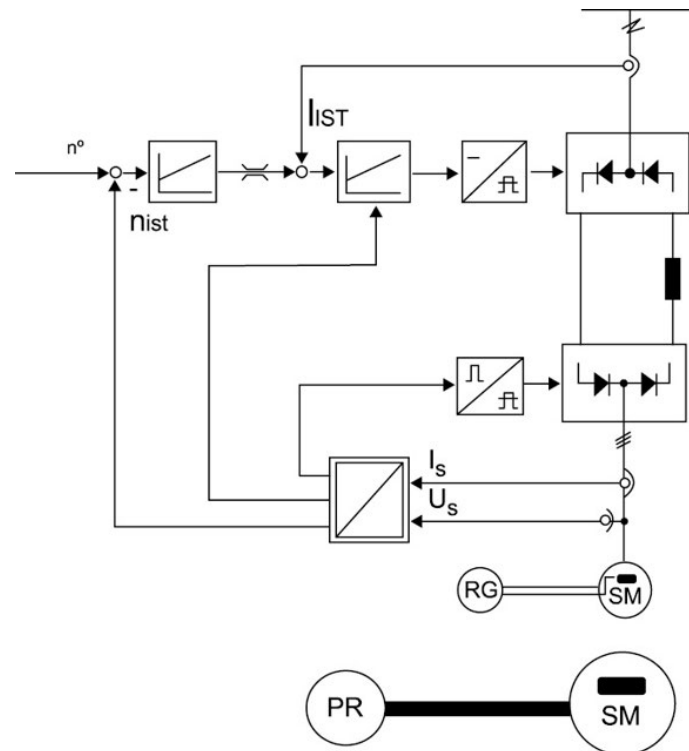
Aplicações A principal aplicação desse tipo de conversor é em máquinas com multimotores, como em máquinas têxteis, onde há necessidade de operação em altas frequências [12].

2.3.2.3 Conversores Autocomutados – Conversores com Circuito Intermediário de Corrente para Máquinas Síncronas

São ideais para grandes motores síncronos, proporcionando uma operação eficiente em quatro quadrantes e controle preciso do torque e da velocidade [12].

Nas pontes retificadoras de entrada, os ângulos de disparo dos tiristores são controlados conforme a sequência da rede de alimentação. Na ponte retificadora de saída (inversora), o disparo é ajustado com base na sequência da força contraeletromotriz (FCEM) gerada pela máquina síncrona, que serve de base para o controle de corrente e frequência no sistema (Figura 2.13) [12].

Figura 2.13: Conversor de frequência autocomutados



Fonte: Acionamentos de Velocidade variável Conhecimentos básicos fundamentais Instruções gerais para acionamentos elétricos regulados Em velocidade variável e em corrente alternada [12].

- $M = K \varphi I_w$:

A fórmula do torque (M) gerado pelo motor é proporcional ao fluxo magnético (φ) e à corrente de excitação (I_w), com K sendo o fator de proporcionalidade.

- $\varphi = K \frac{V}{f} = I_\mu = I_Q$:

O fluxo magnético (φ) depende da tensão (V) e da frequência (f). Ele é aproximado pela corrente de magnetização (I_μ) e pela corrente quadrática (I_Q).

- $E = K \varphi n$:

A força eletromotriz (E) gerada no motor é proporcional ao fluxo magnético (φ) e à velocidade angular (n).

- $E = U_s + L_s \frac{di_s}{dt} + R_s i_s$:

A equação da tensão de saída (E) leva em consideração a tensão de alimentação (U_s), a indutância do estator (L_s) e a variação da corrente (i_s) no tempo, além da queda de tensão resistiva ($R_s i_s$).

- $I_{QN} = I_N \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_n}$:

A corrente quadrática nominal (I_{QN}) é calculada a partir da corrente nominal (I_N) e do ângulo de fase (φ_n).

- $I_{WN} = \sqrt{I_N^2 - I_{QN}^2}$:

Esta fórmula calcula a corrente de excitação nominal (I_{WN}), subtraindo a corrente quadrática nominal da corrente nominal.

- $I_W = I_{WN} \cdot \frac{M}{M_N}$:

A corrente de excitação (I_W) é ajustada em função do torque atual (M) e do torque nominal (M_N).

- $I_Q - I_{QN} \frac{f_N}{f} = I_{QN} \frac{n_N}{n}$:

A corrente quadrática (I_Q) é ajustada pela razão entre a frequência nominal (f_N) e a frequência atual (f), ou pela razão entre a velocidade nominal (n_N) e a velocidade atual (n).

- $I = \sqrt{I_Q^2 + I_W^2}$:

Esta fórmula combina a corrente de excitação (I_W) e a corrente quadrática (I_Q) para calcular a corrente total (I).

A regulação da corrente do circuito intermediário é feita pela ponte retificadora de tiristores, onde são definidas a corrente de magnetização e de carga. Isso controla o fator de potência na rede de alimentação com base no ângulo de disparo dos tiristores. A energia reativa necessária para a comutação do sistema é fornecida pela própria máquina, e o regulador de velocidade controla a corrente ativa, responsável pela formação do torque do motor. Essa corrente ativa é determinada pela medição da corrente total e pela tensão da máquina, que é função da FCEM [12].

Durante a partida ou em velocidades abaixo de 10% da velocidade nominal, a FCEM é muito baixa, necessitando de um sistema auxiliar de partida. Esse sistema pode ser realizado por chaveamento do circuito intermediário ou por um sistema de medição da posição do rotor (PR), criando um comutador eletrônico que transforma a máquina síncrona em uma espécie de motor de corrente contínua sem escovas, onde a armadura está no estator e a excitação está no rotor [12].

A indutância no circuito intermediário limita a corrente gerada pelas diferenças de tensões instantâneas entre o retificador e a carga da inversora. Assim, a indutância é dimensionada para evitar correntes intermitentes no circuito, mesmo quando o motor está sem carga [12].

Características

- Apesar de utilizar uma ponte trifásica simples de tiristores, o sistema permite a devolução de energia para a rede, operando em ângulos de disparo maiores que 90° , o que possibilita a operação em quatro quadrantes sem componentes adicionais;
- Construção simples da parte de potência, usando apenas tiristores;
- Operação em quatro quadrantes sem a necessidade de componentes adicionais;
- Capaz de operar a velocidades acima de 10% da nominal;
- Aplicação direcionada a motores síncronos, especialmente em grandes potências;
- O fator de potência é variável, de acordo com as condições da carga;
- Necessita de um sistema auxiliar de partida para rotações abaixo de 10%;
- Operação monomotor, ou seja, não é adequada para sistemas com múltiplos motores.

Aplicações Esse tipo de conversor é amplamente utilizado em máquinas de alta potência (em megawatts), como exaustores de fornos siderúrgicos, bombas, ventiladores e outros processos que requerem frenagem e controle preciso da velocidade [12].

2.3.3 Controle Indireto com Circuito Intermediário de Tensão Constante

É uma das tecnologias mais avançadas na área de conversores de frequência para máquinas de corrente alternada, revolucionando essa tecnologia especialmente a partir do final da década de 1990. Destaca-se pela confiabilidade e eficiência, facilitadas pelos avanços em transistores de potência, como os IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistors), e pela evolução dos microprocessadores industriais [12].

Sua estrutura básica é composta por uma ponte de diodos, que transforma a corrente alternada (CA) da rede em corrente contínua (CC). Esta corrente contínua é usada para alimentar o circuito intermediário. Diferente dos sistemas de controle direto com circuito intermediário de corrente, onde a corrente é a variável controlada, aqui a tensão é mantida constante no circuito intermediário, sendo essa a parte retificadora [12].

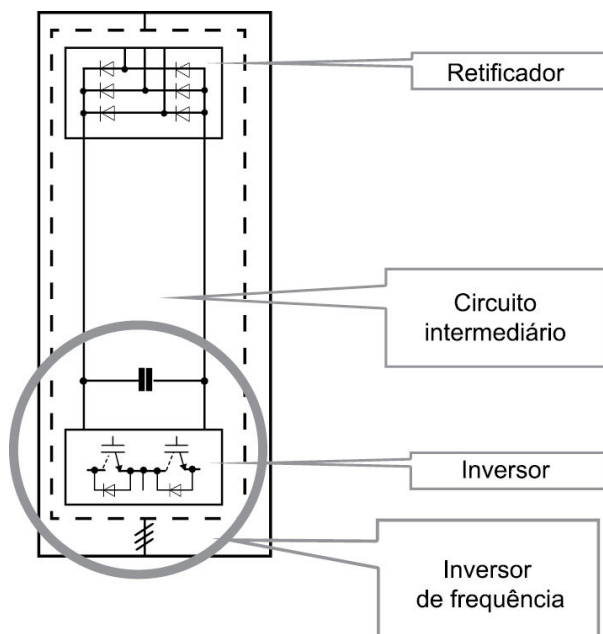
No circuito intermediário, há um banco de capacitores que serve para suavizar as oscilações da tensão retificada, garantindo uma tensão contínua constante. Além disso, esses capacitores fornecem a energia reativa necessária para o funcionamento de motores síncronos ou assíncronos. Por fim, o inversor, equipado com transistores de potência IGBT como pode ser visto na (Figura 2.14), converte novamente a corrente contínua em corrente alternada com a frequência e a amplitude desejadas. A modulação por largura de pulso (PWM) é geralmente usada para controlar o formato e a frequência da tensão de saída, possibilitando o controle da velocidade do motor [12].

Características:

- **Controle preciso da velocidade:** O inversor ajusta a frequência da corrente alternada, permitindo o controle preciso da velocidade do motor e mantendo a relação V/f constante.
- **Eficiência elevada:** Com o uso de transistores de potência modernos, como os IGBTs, o conversor oferece alta eficiência e menor perda de energia.
- **Capacidade de variação de velocidade:** O sistema é ideal para operar em uma ampla faixa de velocidades, tornando-o adequado para motores síncronos e

assíncronos.

Figura 2.14: Configuração básica de conversor de frequência com circuito intermediário constante



Fonte: Acionamentos de Velocidade variável Conhecimentos básicos fundamentais Instruções gerais para acionamentos elétricos regulados Em velocidade variável e em corrente alternada [12].

Aplicação Essa tecnologia é amplamente utilizada em motores industriais que exigem variação de velocidade, como em bombas, ventiladores e compressores, além de aplicações que demandam um controle preciso de torque e posição [12].

2.3.4 Controle Indireto com Circuito Intermediário de Tensão Constante – Parte Inversora

Na (Figura 2.15), temos um circuito intermediário de tensão contínua e constante que alimenta a parte inversora. Esse circuito é alimentado a partir de uma ponte retificadora trifásica. A tensão retificada U_{cc} pode ser calculada pela fórmula da tensão contínua média retificada de uma ponte de diodos trifásica [12]:

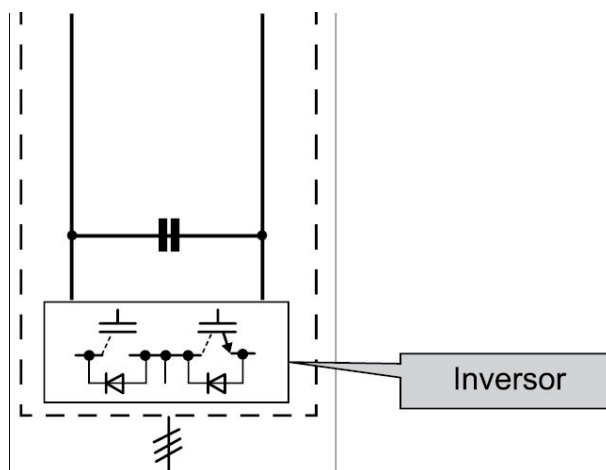
$$U_{cc} = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{Lef} \approx 1,35 \cdot U_{Lef} \quad (2.7)$$

Onde:

- U_{Lef} é a tensão eficaz trifásica.
- Para $U_{Lef} = 440 \text{ V}$, temos:

$$U_{cc} = 1,35 \cdot 440 \text{ V} \approx 600 \text{ V}_{cc} \quad (2.8)$$

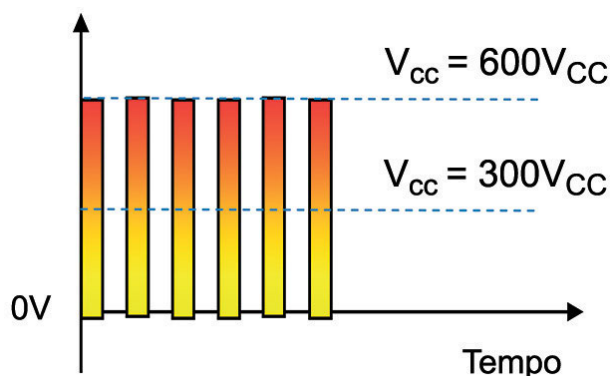
Figura 2.15: Parte inversora do conversor de frequência



Fonte: Acionamentos de Velocidade variável Conhecimentos básicos fundamentais Instruções gerais para acionamentos elétricos regulados Em velocidade variável e em corrente alternada [12].

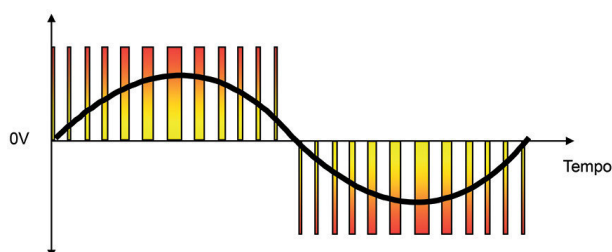
Com essa tensão contínua fixa de 600 V_{cc}, o inversor pode gerar uma tensão alternada variável de acordo com a relação V/f (tensão/frequência) que alimenta a máquina, utilizando um sistema de modulação por largura de pulsos (PWM). Na (Figura 2.16), a tensão contínua é chaveada pelos transistores IGBT, criando uma tensão alternada, onde a largura dos pulsos gerados produz uma onda senoidal (Figura 2.17). A qualidade da onda depende da frequência de modulação, podendo chegar a 12 kHz utilizando transistores IGBT [12].

Figura 2.16: Modulação de tensão contínua



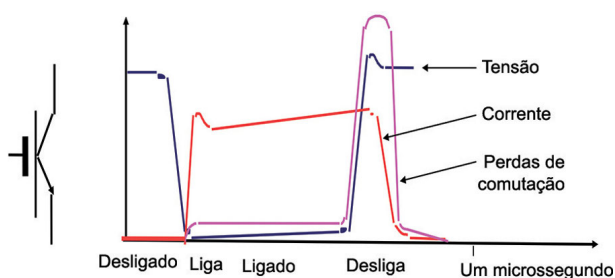
Fonte: Acionamentos de Velocidade variável Conhecimentos básicos fundamentais Instruções gerais para acionamentos elétricos regulados Em velocidade variável e em corrente alternada [12].

Figura 2.17: Modulação senoidal



Fonte: Acionamentos de Velocidade variável Conhecimentos básicos fundamentais Instruções gerais para acionamentos elétricos regulados Em velocidade variável e em corrente alternada [12].

Figura 2.18: Perdas nos transistores IGBT



Fonte: Acionamentos de Velocidade variável Conhecimentos básicos fundamentais Instruções gerais para acionamentos elétricos regulados Em velocidade variável e em corrente alternada [12].

Na (Figura 2.18), estão detalhadas as perdas nos transistores IGBT durante o processo de chaveamento. As principais fases são:

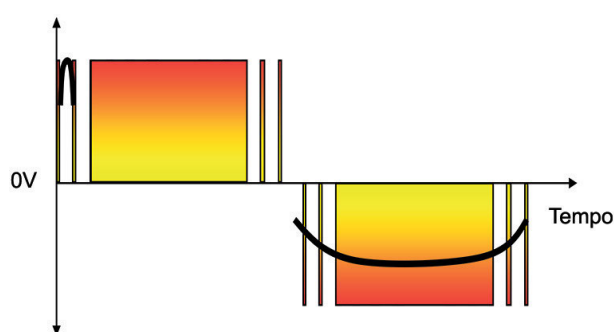
- Quando o IGBT está desligado, a corrente que o atravessa é muito baixa (corrente reversa) e a tensão sobre ele é alta, resultando em baixas perdas.
- Quando o IGBT está ligado, a corrente aumenta, mas a tensão sobre o transistor é baixa (entre 0,4 V e 0,7 V), resultando novamente em baixas perdas.
- No momento do desligamento, ocorre o maior pico de perda, pois a tensão aumenta rapidamente enquanto a corrente ainda está alta, até que esta comece a diminuir.

Caso a frequência de modulação seja muito alta, como 12 kHz, as perdas de comutação são significativas; porém, uma onda senoidal melhor é obtida com maiores frequências de modulação. Uma modulação entre 1,5 kHz e 2,5 kHz é suficiente para muitas aplicações industriais, graças à inércia das máquinas e das cargas mecânicas, que acabam por suavizar as oscilações no campo girante [12].

Se a frequência de operação da máquina aumenta e a tensão de saída se aproxima do valor máximo, ocorre a transição de uma modulação senoidal para a modulação pelos flancos, conforme mostrado na (Figura 2.19). Isso permite aproveitar ao máximo a tensão da rede de alimentação, obtendo a tensão de saída máxima, que pode ser igual à tensão contínua de entrada (600 V).

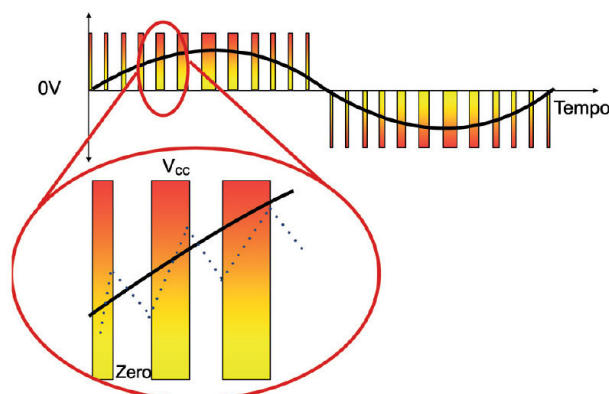
Observação: para motores de servomecanismos, uma modulação pelos flancos provoca oscilações no campo girante, causadas pela distorção da onda senoidal, assim a tensão de saída máxima é limitada a cerca de 85% da tensão de entrada (Figura 2.20) [12].

Figura 2.19: Modulação pelos flancos



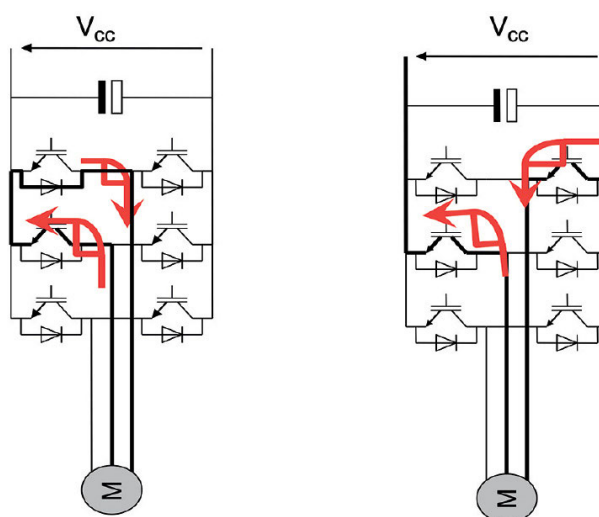
Fonte: Acionamentos de Velocidade variável Conhecimentos básicos fundamentais Instruções gerais para acionamentos elétricos regulados Em velocidade variável e em corrente alternada [12].

Figura 2.20: Oscilações da modulação – formação da corrente



Fonte: Acionamentos de Velocidade variável Conhecimentos básicos fundamentais Instruções gerais para acionamentos elétricos regulados Em velocidade variável e em corrente alternada [12].

Figura 2.21: Formação da tensão de cada fase do sistema trifásico



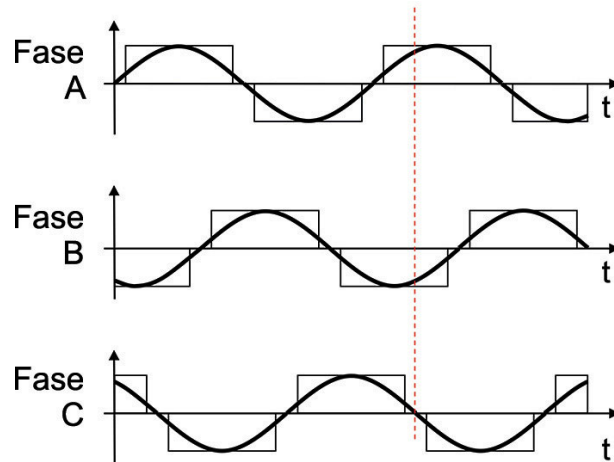
Fonte: Acionamentos de Velocidade variável Conhecimentos básicos fundamentais Instruções gerais para acionamentos elétricos regulados Em velocidade variável e em corrente alternada [12].

Na (Figura 2.21), temos a tensão de cada fase do sistema trifásico formada no motor. Ambos os IGBTs são ligados, aplicando a tensão do circuito intermediário U_{cc} sob duas fases do motor, aumentando a corrente. Quando um dos transistores é desligado, a corrente continua a circular devido à indutância do motor através dos diodos de recirculação; porém, a tensão aplicada é zero e, assim, essa corrente se dissipa. Este processo cria ondulações na corrente, chamadas de *ripples*, sobre a onda senoidal média [12].

Cada fase do sistema trifásico é defasada em 120° Figura 2.22, com o uso da

modulação PWM garantindo uma alimentação balanceada e contínua ao motor. Isso proporciona o funcionamento eficiente do motor com controle preciso de velocidade e torque [12].

Figura 2.22: Modulação PWM defasada de 120° – sistema trifásico



Fonte: Acionamentos de Velocidade variável Conhecimentos básicos fundamentais Instruções gerais para acionamentos elétricos regulados Em velocidade variável e em corrente alternada [12].

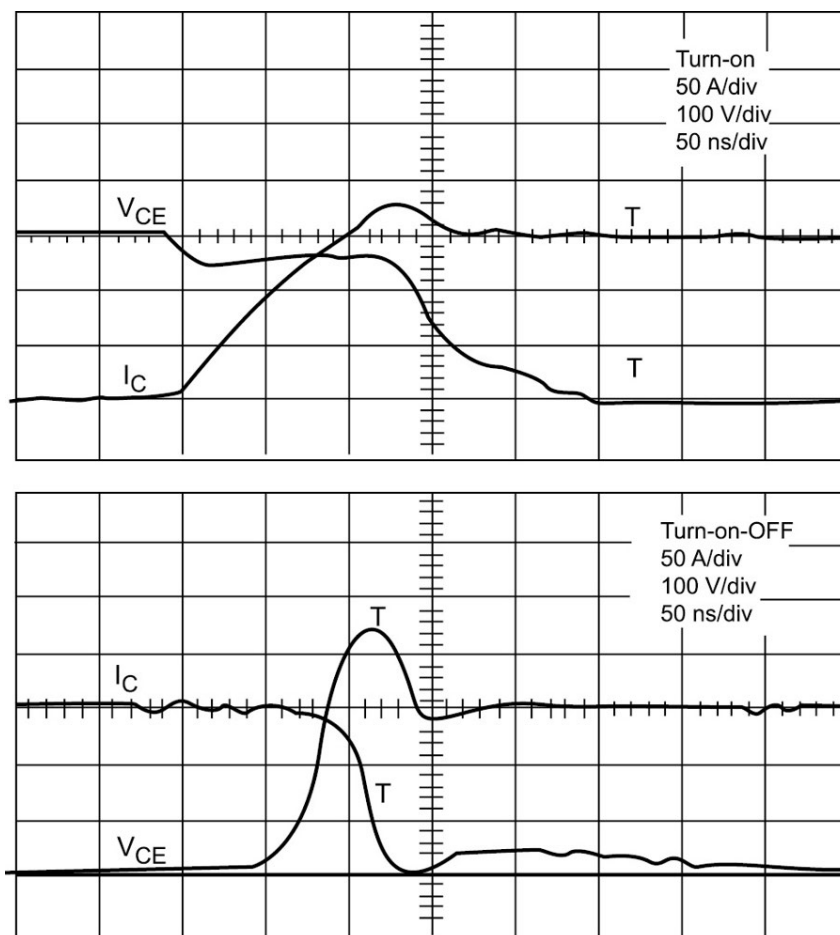
2.3.5 Controle Indireto com Circuito Intermediário de Tensão Constante –Parte Inversora: Efeitos da Modulação PWM

Devido aos efeitos da modulação PWM, o inversor, ao alimentar as máquinas, gera tensões e correntes que não são senoidais puras. Isso exige cuidados especiais para garantir o funcionamento adequado do sistema. A modulação por PWM resulta em variações rápidas de tensão ($\frac{dv}{dt}$) devido ao chaveamento dos transistores IGBT. Esse chaveamento ocorre em períodos muito curtos, entre 0,1 μ s e 0,5 μ s, gerando grandes variações de tensão que podem variar de 5 kV/ μ s a 10 kV/ μ s (Figura 2.23). Essas variações de tensão geram correntes de carga e descarga nos cabos com capacitância, conforme a equação [12]:

$$i_c = C \cdot \frac{dv}{dt} \quad (2.9)$$

onde i_c é a corrente na capacitância, C é a capacitância dos cabos e $\frac{dv}{dt}$ é a taxa de variação da tensão.

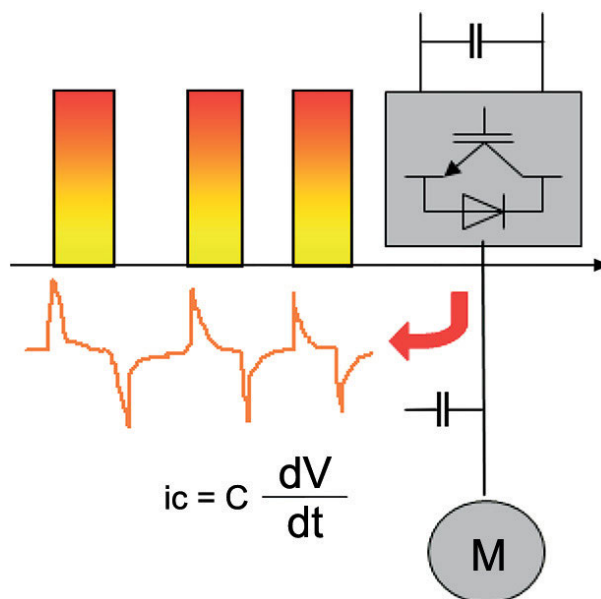
Figura 2.23: Chaveamento dos transistores IGBT



Fonte: Acionamentos de Velocidade variável Conhecimentos básicos fundamentais Instruções gerais para acionamentos elétricos regulados Em velocidade variável e em corrente alternada [12].

Essa corrente de carga e descarga tem a mesma frequência da modulação; assim, quanto maior for a capacitância dos cabos, maior será essa corrente. Isso pode se tornar um problema se os cabos forem longos ou estiverem em paralelo, sobrecarregando o inversor. Na (Figura 2.24), é mostrado como a corrente aumenta com a capacitância dos cabos [12].

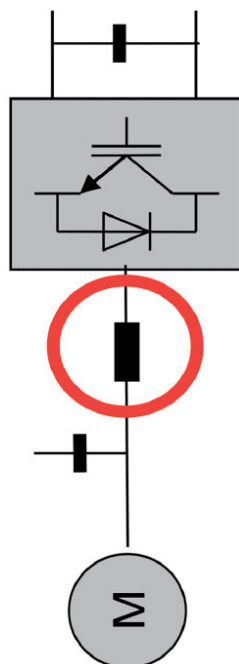
Figura 2.24: Corrente na capacitância dos cabos



Fonte: Acionamentos de Velocidade variável Conhecimentos básicos fundamentais Instruções gerais para acionamentos elétricos regulados Em velocidade variável e em corrente alternada [12].

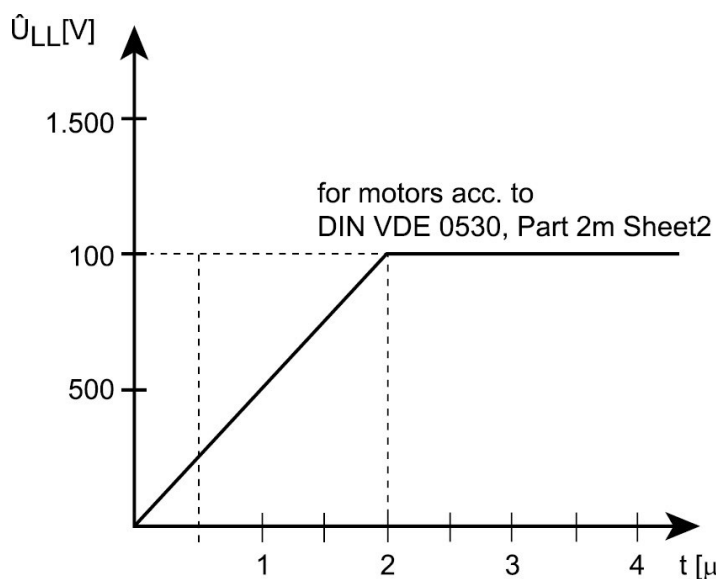
Para mitigar esses efeitos, são utilizados reatores de saída, especialmente se a distância entre o inversor e a máquina ultrapassar 75 metros ou mais. Os reatores injetam indutância ao circuito, compensando o efeito da capacitância (Figura 2.25) [12].

Figura 2.25: Reator da saída – distâncias longas de cabos



Fonte: Acionamentos de Velocidade variável Conhecimentos básicos fundamentais Instruções gerais para acionamentos elétricos regulados Em velocidade variável e em corrente alternada [12].

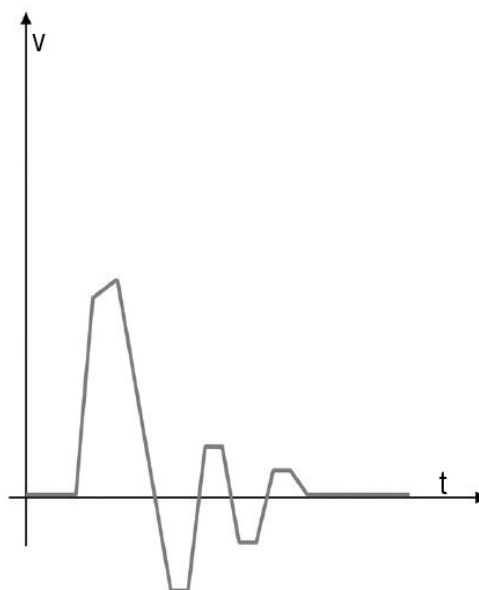
Além dos reatores, filtros dv/dt também são usados para suavizar as variações de tensão e proteger os motores contra os efeitos da modulação PWM. Esses filtros ajudam a limitar o gradiente de tensão, protegendo o isolamento dos motores (Figura 2.26) [12].

Figura 2.26: Normalização da isolação dv/dt 

Fonte: Acionamentos de Velocidade variável Conhecimentos básicos fundamentais
Instruções gerais para acionamentos elétricos regulados Em velocidade variável e em
corrente alternada [12].

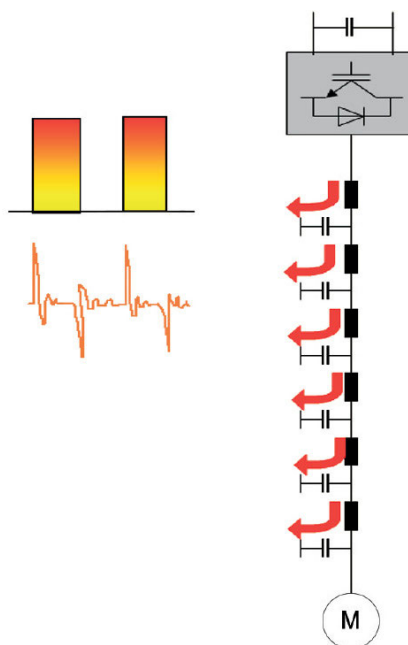
Outro aspecto importante é que, devido à propagação de ondas ao longo dos cabos, a combinação de capacitância e indutância dos cabos pode resultar em oscilações com sobreposição dos picos de tensão (Figura 2.28). Essas oscilações podem resultar em sobretensões até duas vezes maiores que a tensão do circuito intermediário (V_{cc}), conforme mostrado na (Figura 2.27) [12].

Figura 2.27: Propagação pelo cabo – troca de energia – capacitância e indutância



Fonte: Acionamentos de Velocidade variável Conhecimentos básicos fundamentais Instruções gerais para acionamentos elétricos regulados Em velocidade variável e em corrente alternada [12].

Figura 2.28: Circuito equivalente de cabos



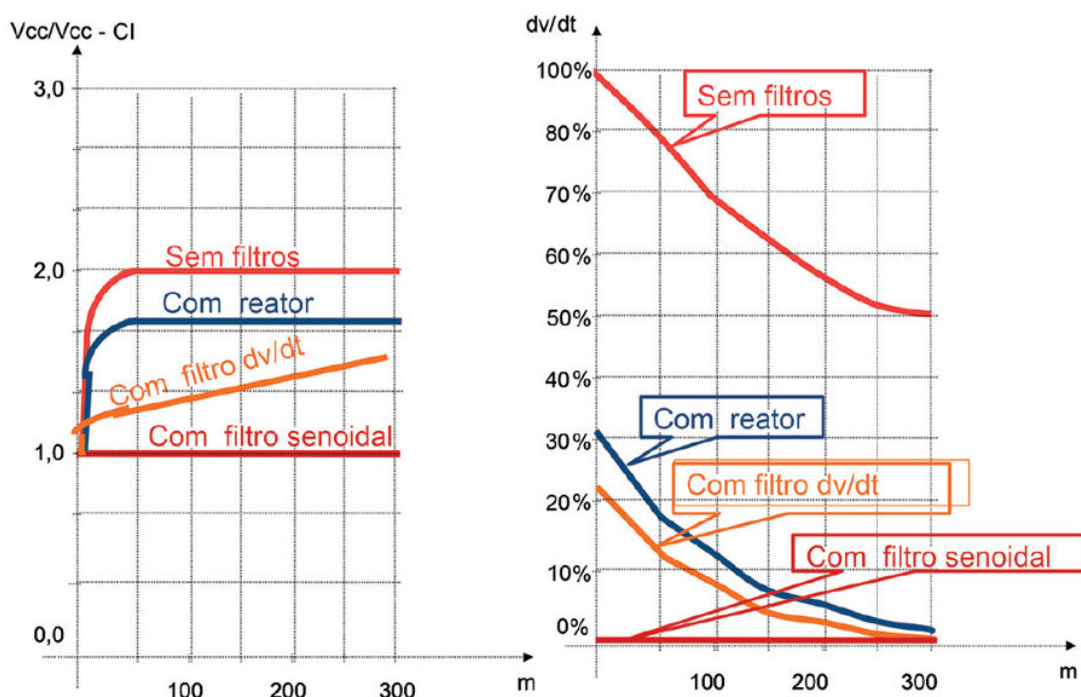
Fonte: Acionamentos de Velocidade variável Conhecimentos básicos fundamentais Instruções gerais para acionamentos elétricos regulados Em velocidade variável e em corrente alternada [12].

Caso os motores não sejam projetados para suportar essas tensões elevadas ou o gradiente $\frac{dv}{dt}$, pode ocorrer dano no isolamento ao longo do tempo. Isso também

pode causar problemas como faíscas de corrente nas conexões internas dos motores, levando à deterioração gradual do equipamento [12].

Uma alternativa são os filtros senoidais, uma solução mais avançada para corrigir os problemas causados pela modulação PWM, especialmente em aplicações que exigem longas distâncias de cabos ou que necessitam de operação com sucessivas variações de velocidade. Eles suavizam a forma da onda, aproximando-a de uma senoide pura, eliminando os efeitos de $\frac{dv}{dt}$ e propagação indesejada. Além disso, eliminam a necessidade de reatores de saída, tornando-os uma solução preferível em certas situações (Figura 2.29) [12].

Figura 2.29: Comparação dos efeitos: reator e filtros



Fonte: Acionamentos de Velocidade variável Conhecimentos básicos fundamentais Instruções gerais para acionamentos elétricos regulados Em velocidade variável e em corrente alternada [12].

As tabelas 2.1, 2.2 e 2.3 descrevem o comportamento da tensão no cabo utilizando os métodos de filtragem que foram citados.

Tabela 2.1: Filtro na saída do inversor com diferentes configurações (ms)

Filtro na saída do inversor	dv/dt (kV/ms) com 100 m de cabo	Pico de tensão com 100 m de cabo
Sem filtro	5 a 10 kV/ms	2 vezes Vcc Cir. Interm.
Com reator de saída	Reduz para menos de 15% = 0,75 a 1,5 kV/ms	Reduz para 1,7 vezes Vcc Cir. Interm.
Com filtro dv/dt	Reduz para menos de 10% = 0,5 a 1 kV/ms	Reduz para 1,35 vezes Vcc Cir. Interm.
Com filtro senoidal	Reduz para 0%	Reduz para 1 vez Vcc Cir. Interm.

Fonte: Acionamentos de Velocidade variável Conhecimentos básicos fundamentais Instruções gerais para acionamentos elétricos regulados Em velocidade variável e em corrente alternada [12].

Tabela 2.2: Filtro na saída do inversor com diferentes configurações (μ s)

Filtro na saída do inversor	dv/dt (kV/μs) com 100 m de cabo	Pico de tensão com 100 m de cabo
Sem filtro	5 a 10 kV/ μ s	2 vezes Vcc Cir. Interm.
Com reator de saída	Reduz para menos de 15% = 0,75 a 1,5 kV/ μ s	Reduz para 1,7 vezes Vcc Cir. Interm.
Com filtro dv/dt	Reduz para menos de 10% = 0,5 a 1 kV/ μ s	Reduz para 1,35 vezes Vcc Cir. Interm.
Com filtro senoidal	Reduz para 0%	Reduz para 1 vez Vcc Cir. Interm.

Fonte: Acionamentos de Velocidade variável Conhecimentos básicos fundamentais Instruções gerais para acionamentos elétricos regulados Em velocidade variável e em corrente alternada [12].

Tabela 2.3: Filtro na saída do inversor com diferentes configurações (μs)

Filtro na saída do inversor	dv/dt (kV/μs) com 100 m de cabo	Pico de tensão com 100 m de cabo
Sem filtro	5 a 10 kV/ μs	2 vezes Vcc Cir. Interm.
Com reator de saída	Reduz para menos de 15% = 1 kV/ μs	Reduz para 1,7 vezes Vcc Cir. Interm.
Com filtro dv/dt	Reduz para menos de 10% = 0,5 a 1 kV/ μs	Reduz para 1,35 vezes Vcc Cir. Interm.
Com filtro senoidal	Reduz para 0%	Reduz para 1 vez Vcc Cir. Interm.

Fonte: Acionamentos de Velocidade variável Conhecimentos básicos fundamentais Instruções gerais para acionamentos elétricos regulados Em velocidade variável e em corrente alternada [12].

2.3.6 Controle Indireto com Circuito Intermediário de Tensão Constante (Parte Inversora) em Servomotores de Ímã Permanente

O controle aplicado a servomotores de ímã permanente exige cuidados especiais, especialmente no que diz respeito à sincronização entre o inversor PWM (Modulação por Largura de Pulso) e a força contraeletromotriz (FCEM) gerada pelos ímãs permanentes do motor [12].

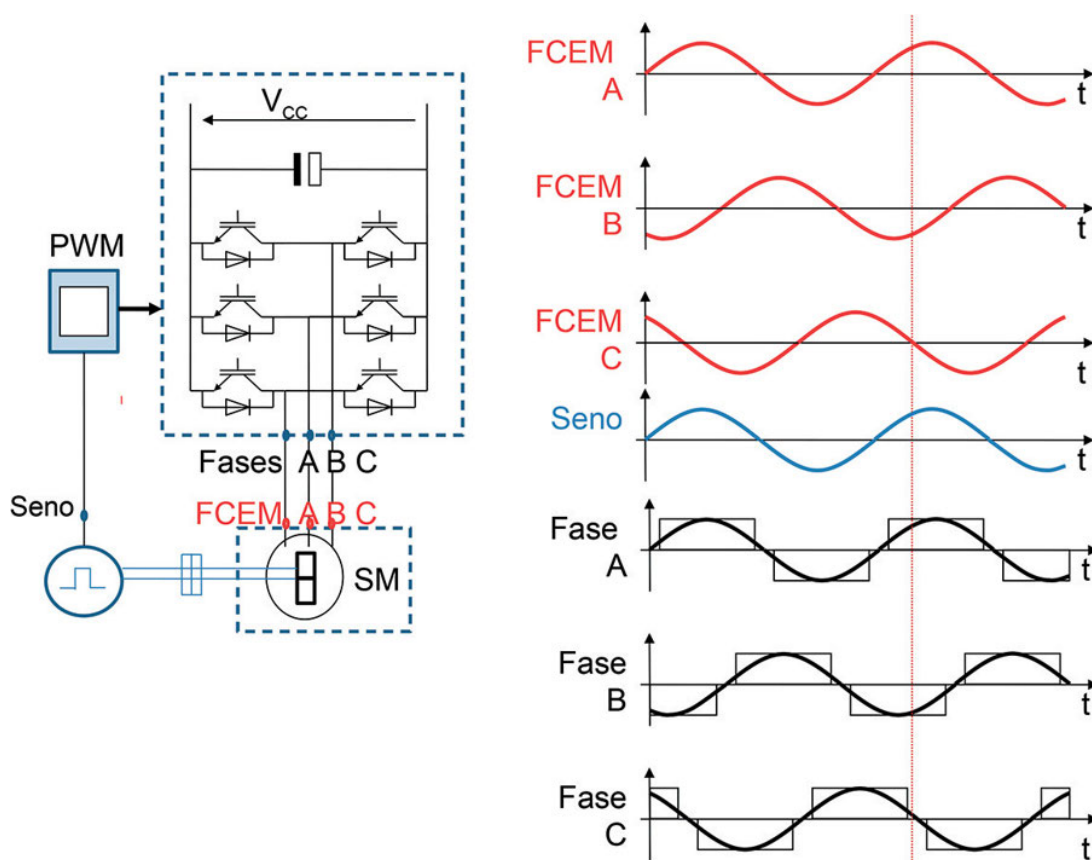
O inversor com modulação PWM gera três tensões defasadas em 120° quando aplicado a máquinas de indução (Figura 2.30), criando um sistema trifásico que alimenta de maneira estável a máquina assíncrona. Essas tensões induzem uma força contraeletromotriz, que se ajusta automaticamente ao comportamento dinâmico do motor, sem a necessidade de ajustes contínuos de sincronização. No entanto, em servomotores de ímã permanente, esse comportamento é mais restrito. A força contraeletromotriz (FCEM) nesses motores já possui uma posição definida pelo campo magnético criado pelos ímãs permanentes, exigindo que o PWM esteja sincronizado com precisão [12].

Se ocorrer uma defasagem entre o PWM e a FCEM, pode haver uma diferença de tensão que resulta em picos de corrente através da impedância dos condutores, destacando a importância da proteção do inversor contra sobrecorrente em caso de

falhas [12].

Para garantir essa sincronização, são utilizados sensores como o "encoder sen/cos" ou "resolver" (Figura 2.30). Esses dispositivos fornecem uma referência da posição do rotor, gerando uma onda senoidal que representa a posição angular do rotor. Com esses dados, o inversor ajusta o PWM de modo que a forma de onda gerada esteja em fase com a FCEM [12].

Figura 2.30: Inversores PWM e servomotor de ímã permanente



Fonte: Acionamentos de Velocidade variável Conhecimentos básicos fundamentais Instruções gerais para acionamentos elétricos regulados Em velocidade variável e em corrente alternada [12].

Este processo de sincronização é crucial, pois qualquer desajuste na montagem do motor pode resultar em problemas operacionais, como perda de desempenho. Em inversores modernos, essa tarefa de ajuste é simplificada com ajustes automáticos. Eles detectam automaticamente o ângulo de defasagem necessário e sincronizam o PWM com a FCEM sem intervenção manual. Basta inserir o ângulo de ajuste como parâmetro no inversor para corrigir qualquer desalinhamento de fase, o que é especialmente útil em aplicações onde a manutenção do motor é frequente ou onde

ajustes de precisão são críticos para o controle do motor [12].

Capítulo 3

Controlador Industrial PID

3.1 Tipos de Controladores Industriais

Um controlador possui a função de alinhar o valor da saída de acordo com o valor de entrada de um sistema, visando modificar sua dinâmica e satisfazer determinadas especificações no que diz respeito à resposta do mesmo [13].

3.1.1 Controlador P

No controle proporcional é produzido pelo sinal de saída proporcional ao erro obtido na realimentação 3.2. O controlador P tem sua saída definida pela função expressa na equação.

$$u(t) = K_p \cdot e(t) \quad (3.1)$$

Nessa equação k_p é a constante proporcional, $u(t)$ representa a saída em função do tempo e $e(t)$ é a entrada menos o erro em função do tempo [13].

características

- Simples implementação;
- O aumento do ganho proporcional acelera a resposta;

- O aumento de K_p diminui o erro de regime;
- Em geral, o aumento de K_p torna o sistema mais oscilatório, podendo instabilizá-lo;
- Melhora o regime e piora o transitório, sendo bastante limitado;
- A resposta proporcional pode ser ajustada a partir da constante de ganho K_p ;
- Quanto maior a constante K_p , maior será o ganho do erro e mais instável será o sistema;
- Se a constante K_p for muito pequena, menor será o seu tempo de resposta.

3.1.2 Controlador PI

Além do controle proporcional também se realiza o controle integral, onde se considera a taxa de variação do sinal de saída para eliminar o erro de estado estacionário ver (Figura 3.2). Como consequência, o regime transitório é prejudicado pelo acréscimo de polos ao sistema que o desestabilizam e aumentam o tempo de acomodação, por isso a componente proporcional é inserida ao controlador para melhorar a resposta transitória expressa pela equação [13]

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (3.2)$$

Em que k_p é o ganho proporcional e k_i é o ganho integrativo.

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad (3.3)$$

Onde k_i é mostrado em função do ganho proporcional (k_p) e do tempo integrativo (T_i) [13].

3.1.3 Controlador PD

O controlador PD por sua vez, soma as funções proporcional e derivativa, com intuito de diminuir o tempo de acomodação e melhora a estabilidade do sistema, e introduz ao sistema um efeito de antecipação que tem a função de iniciar uma ação corretiva mais rápida, porém aumenta-se o tempo de subida e não corrige o erro de estado estacionário [13].

$$u(t) = K_p e(t) + k_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (3.4)$$

Onde k_d é em função do ganho proporcional (k_p) e do tempo derivativo (T_d).

$$K_d = K_p T_d \quad (3.5)$$

3.1.4 Controlador PID

O controlador PID une PI e PD, em um único controlador, assim elimina-se o erro em regime permanente pela componente integrativa, a proporcional elimina as oscilações e a parte derivativa fornece ao sistema uma ação corretiva antecipada [13].

Equações do Controlador PID

Saída do controlador no domínio do tempo

$$u(t) = K_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (3.6)$$

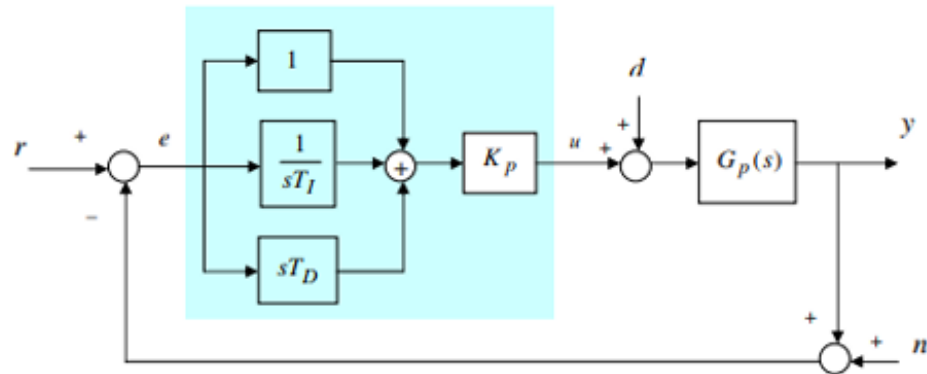
Função de transferência no domínio da frequência:

$$C(s) = k_p + \frac{K_i}{s} + sK_D \quad (3.7)$$

ou

$$C(s) = k_p \left[1 + \frac{1}{sT_i} + sT_D \right] \quad (3.8)$$

Figura 3.1: Diagrama em blocos de um sistema de controle com controlador PID



Fonte: Material Didático XC289 [13].

No controlador P os parâmetros K_i e K_D são nulos, no controlador PD anula-se K_i e no controlador PI K_D é zero [13].

3.2 Sintonia de Controladores PID

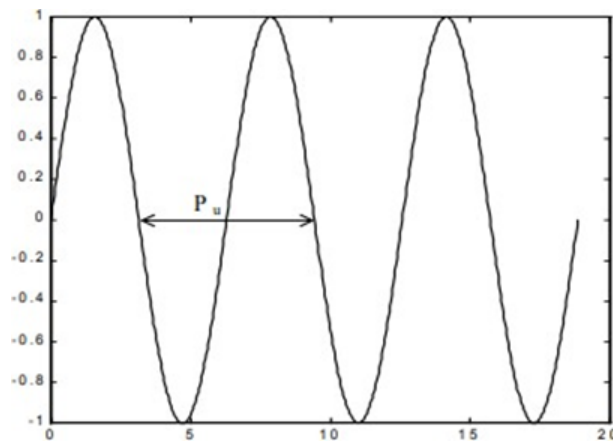
Processo de cálculo dos parâmetros do controlador visando garantir um determinado desempenho pré-estipulado. Os controladores são utilizados com o objetivo de garantir estabilidade, índices e coeficientes de desempenho e robustez ao sistema [13].

3.2.1 Método de Ziegler Nichols

Os métodos de sintonia de Ziegler Nichols foram propostos para determinar os valores de k_p , T_i e T_d em sistemas que não tenham um modelo matemático conhecido proporcionando a ele um desempenho satisfatório. Existem dois métodos de Ziegler Nichols, Sintonia em malha fechada e Sintonia em malha aberta [13].

3.2.1.1 Sintonia em Malha Fechada

Também chamado de método da sensibilidade limite, e baseado no ganho crítico, que é o ganho mínimo para que o processo seja criticamente estável, e no período crítico, que é o período do ganho crítico. Para encontrar os parâmetros do controlador

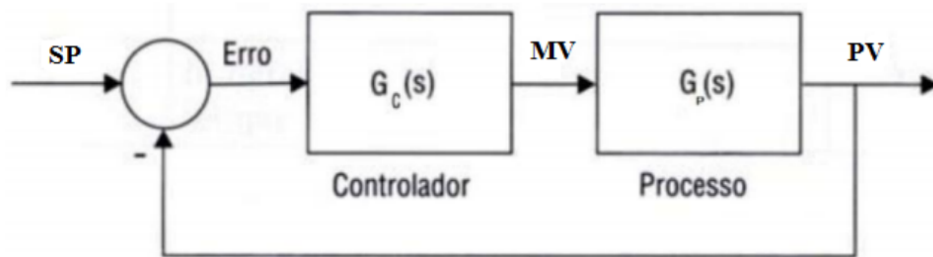
Figura 3.3: Período P_u 

Fonte: Material Didático XC289 [13].

através desse método deve-se seguir os passos a seguir [13]:

- 1 - Montar um sistema, ilustrado no diagrama da (Figura 3.2).

Figura 3.2: Diagrama Sintonia em Malha Fechada



Fonte: Material Didático XC289 [13].

- 2 - Anular k_i e k_d ;

3 - Aumentar gradativamente o valor de k_p até que atinja-se o limite da estabilidade, identificado por oscilações sustentadas na resposta do sistema. O ganho utilizado para obter as oscilações na saída é denominado K_u [13];

4 - Através do gráfico (Figura 3.3) obtido com o ganho K_u , se obtém o período de oscilação P_u . [13];

- 5 - Através da (Tabela 3.1), calcular os valores de k_p , T_i e T_d .

Tabela 3.1: Parâmetros do controlador PID pelo método de Ziegler-Nichols em malha fechada

Controlador	k_p	T_i	T_d
P	$0.5K_u$	∞	0
PI	$0.45K_u$	$P_u/1.2$	0
PID	$0.6K_u$	$P_u/2$	$P_u/8$

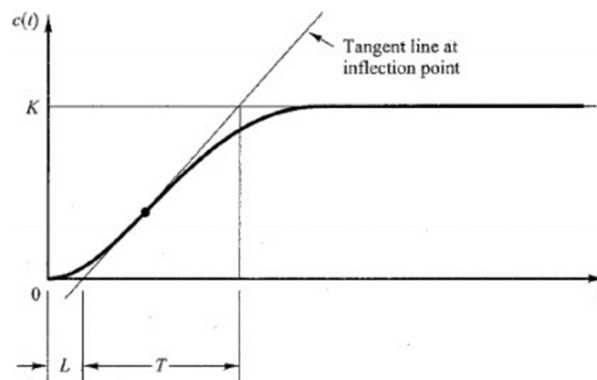
Fonte: Material Didático XC289 [13].

Se a saída não exibir uma oscilação para nenhum valor de K_P , conclui-se que esse método não pode ser aplicado [13].

3.2.1.2 Sintonia em Malha Aberta

Esse método se aplica aos sistemas que têm a curva de resposta ao degrau de entrada em forma de S, como mostrado na (Figura 3.4)

Figura 3.4: Curva de resposta em forma de S



Fonte: Material Didático XC289 [13].

Quando a resposta apresenta a forma de S ela pode se caracterizar pelo atraso L e pelo tempo T , os quais são determinados pela reta tangente ao ponto de inflexão da curva de resposta e determinando a interseção da linha tangente com o eixo dos tempos e linha $c(t) = k$. Sistemas com esse tipo de resposta podem ter sua função de transferência aproximada através da equação [13]:

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{ke^{-Ls}}{Ts + 1} \quad (3.9)$$

por meio da (Tabela 3.2) de Sintonia pelo método de Ziegler-Nichols em malha

aberta pode-se calcular os parâmetros K_p , T_i e T_D

Tabela 3.2: Tabela de Sintonia pelo método de Ziegler-Nichols em malha aberta

Controlador	K_p	T_i	T_D
P	$\frac{T}{K L}$	-	-
PI	$0.9 \frac{T}{K L}$	$\frac{L}{0.3}$	-
PID	$1.2 \frac{T}{K L}$	$2L$	$0.5L$

Fonte: Material Didático XC289 [13].

3.2.2 Método de Smith

O método de Smith também pode ser aplicado em sistemas que apresentam sua resposta em forma de S. Ele propõe que os valores de L e T sejam estipulados de tal forma que o modelo e as respostas reais coincidam em dois pontos na região de elevada taxa de mudança [13].

Para a aplicação desse método deve-se considerar inicialmente:

$$H(s) = \frac{K e^{-Ls}}{Ts + 1} \quad (3.10)$$

Assim, para um degrau de amplitude M tem-se:

$$H(s) = \frac{K e^{-Ls}}{Ts + 1} M \quad (3.11)$$

partindo disso recomenda-se utilizar os pontos:

$$t_1 = L + \frac{T}{3} \quad (3.12)$$

$$t_2 = L + T \quad (3.13)$$

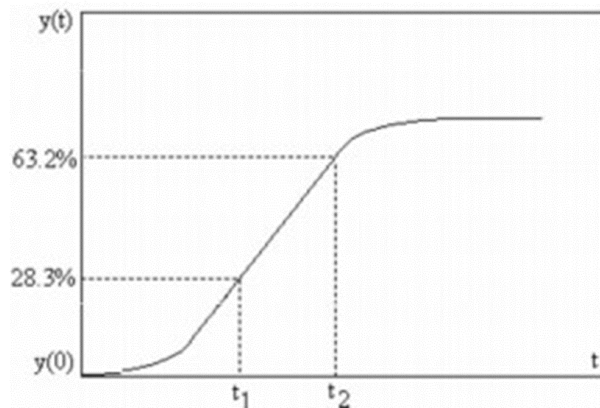
Considerando que:

$$y\left(L + \frac{T}{3}\right) = KM[1 - e^{-0.333}] = 0.283\Delta y \quad (3.14)$$

$$y(L + T) = KM[1 - e^{-1}] = 0.632\Delta y \quad (3.15)$$

A partir dos valores de t_1 e t_2 , mostrados no gráfico da (Figura 3.5), pode-se calcular o valor de T e L utilizando as equações a seguir [13]:

Figura 3.5: Método de Smith



Fonte: Material Didático XC289 [13]

$$T = \frac{3}{2}(t_2 - t_1) \quad (3.16)$$

$$L = t_2 - T \quad (3.17)$$

3.2.3 Ajuste Manual

Os métodos para determinação dos parâmetros de um controlador nem sempre são suficientes para se obter a melhor resposta do sistema controlado. Por conta disso, muitas vezes é recomendado que, após obter os valores de K_p , T_i e T_D , seja feito um ajuste fino dos parâmetros do controlador levando em conta a resposta apresentada pelo sistema controlado. A (Tabela 3.3) mostra as características das respostas e as medidas de ajuste para cada respectivo problema [13].

Tabela 3.3: Ajuste Fino

Problema	Medida de Ajuste
Resposta muito lenta	Aumentar ganho proporcional
Resposta excessivamente oscilatória	Aumentar Tempo derivativo
Sobrepassagem excessiva	Reduzir taxa integral
Resposta inicialmente rápida e em seguida muito lenta	Aumentar taxa integral

Fonte: Material Didático XC289 [13].

Capítulo 4

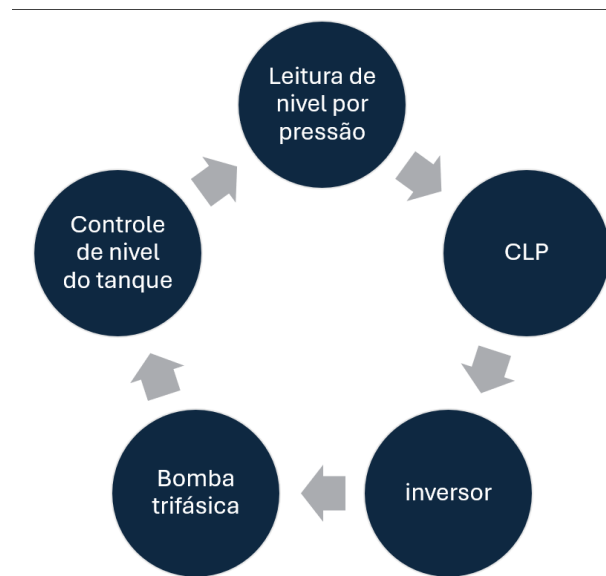
Modelo de Controle PID em um Controle de nível de tanques em escoamento contínuo

4.1 Configuração no kit XC289

No kit XC289 (uma das bancadas didáticas presentes nos laboratórios do IFG-VAL) é possível demonstrar diversos tipos de controle sistemas de automação comumente usado em plantas industriais, em diversas aplicações, nesse capítulo é descrito e apresentado o modelo de controle de nível possível nesse equipamento.

A partir de um medidor de nível que utiliza da leitura de pressão gerada pela energia potencial gravitacional do líquido em um tanque, e enviado a um CLP os parâmetros necessários para que um controle PID nele configurado, realize o controle de velocidade por frequência variável, de uma bomba equipada com um motor de indução trifásico, e assim alterando a vazão da alimentação de um tanque, em relação o escoamento nas tubulações de saída do mesmo, de modo que o líquido mantenha o nível setado no equipamento, a Figura 4.1 representa o ciclo de etapas nas quais esse controle se baseia [14].

Figura 4.1: Ciclo do controle de nível



Fonte: Autoria própria

As três componentes do controlador PID funcionam da seguinte maneira:

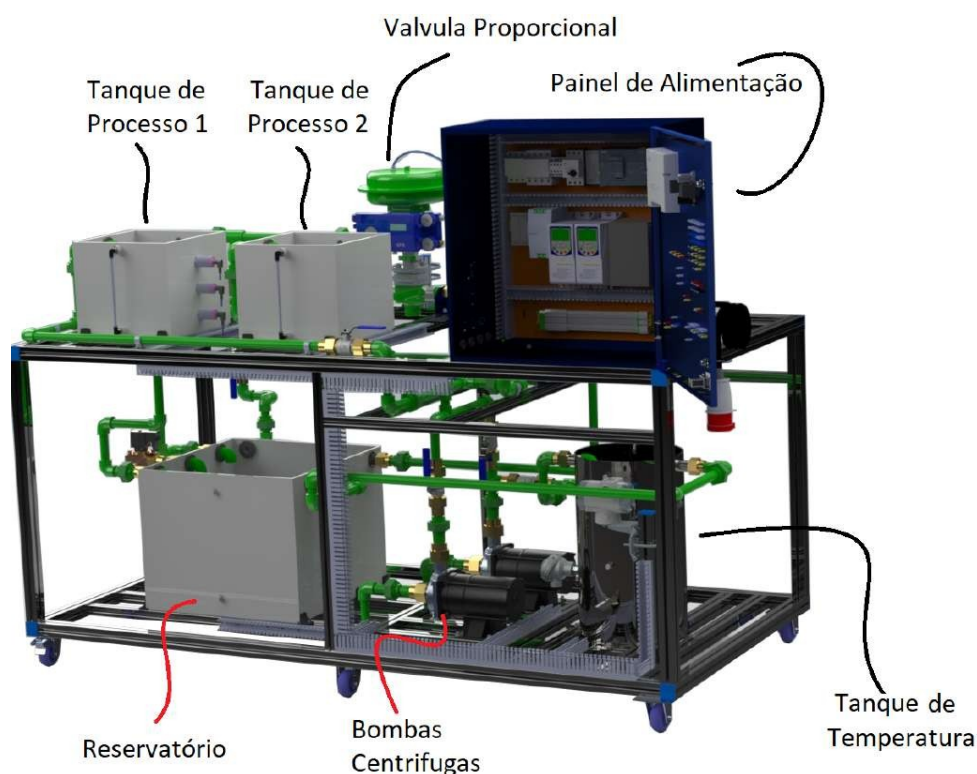
- Proporcional (K_p): Aumenta a velocidade da bomba procurando a um valor proporcional ao setado na programação do CLP (Set Point).
- Integral (K_i): Corrige erros acumulados ao longo do tempo, controlando a bomba afim de eliminar o erro de estado estacionário. Simplificando ele vai buscar estabilizar as oscilações de nível e velocidade.
- Derivativa (K_d): Previne oscilações em excesso, antecipando mudanças na vazão e no nível, variando a velocidade prevenindo mudanças no nível decorrentes de fatores que já são característicos do sistema, exemplo: turbulência no escoamento do líquido. [14].

4.1.1 Visão Geral da Bancada

Com foco em temas relacionados a Controle de Processos, Controle PID e Métodos de Sintonia de Controladores, o kit didático XC289 foi desenvolvido para disponibilizar ao estudante recursos que permitam explorar as variáveis mais comuns no meio industrial [14].

O XC289 é construído em uma bancada de perfil de alumínio, com tanques de aço inox e poliuretano, além de instrumentos e componentes comumente utilizados na indústria, o painel elétrico é fabricado em aço carbono, e toda a tubulação é feita em PPR Termofusão (caraterizado por suporta altas temperaturas), utilizando tubos de 25 mm, conforme mostrado na (Figura 4.2) [14].

Figura 4.2: Kit didático XC289



Fonte: Manual do usuário XC289 [14].

4.1.2 Componentes utilizados nessa aplicação

Para o controle de nível são utilizados os seguintes componentes do Kit didático XC289:

Medidor de nível (Figura 4.3)

- Alimentação: 10 a 30 VDC;
- Fabricante: Smar;
- Modelo: LD301H-51I-BU11-011;
- Tipo de conexão: 2 fios saída 4-20mA/hart;
- Temperatura do Fluido: -10 a +80 °C;
- Faixa de Medição: 0-10kPa (0-1000mmca).

Figura 4.3: Medidor de nível



Fonte: Manual do usuário XC289 [14].

Bomba centrífuga (Figura 4.4)

- Alimentação: Trifásico 220 VAC
- Fabricante: DANCOR
- Modelo: CAM W-6C
- Potência: 1 CV
- Acionamento: Via Inversor de Frequência

Figura 4.4: Bomba Centrífuga Trifásica



Fonte: Manual do usuário XC289 [14].

CLP S7-1200 (Figura 4.5)

- Alimentação: 24 VDC
- Fabricante: Siemens
- Modelo: 6ES7234-4HE32-0XB0
- IO's: 4 AI, 2 AO $\pm 10V/0-20mA$

Figura 4.5: CLP S7 1200



Fonte: Manual do usuário XC289 [14].

Módulo de expansão SM1234 (Figura 4.6)

- Alimentação: 24 VDC
- Fabricante: Siemens
- Modelo: 6ES7234-4HE32-0XB0
- IO's: 4 AI, 2 AO $\pm 10V/0-20mA$

Figura 4.6: Módulo de expansão SM1234



Fonte: Manual do usuário XC289 [14].

IHM (Figura 4.7)

- Alimentação: 24 VDC
- Fabricante: Siemens
- Modelo: 6AV2123-2GB03-0AA0
- Tela: KTP700 7 pol

Figura 4.7: IHM



Fonte: Manual do usuário XC289 [14].

Inversor de Frequência (Figura 4.8)

- Alimentação: 220 V
- Fabricante: WEG
- Modelo: CFW500A04P3B2NB20
- Potência: 0,5 CV (0,37 kW)
- Frequência de Alimentação: 50...60 Hz
- IO's: 4 DI, 1 DO, 1 AI

Figura 4.8: Inversor de Frequência

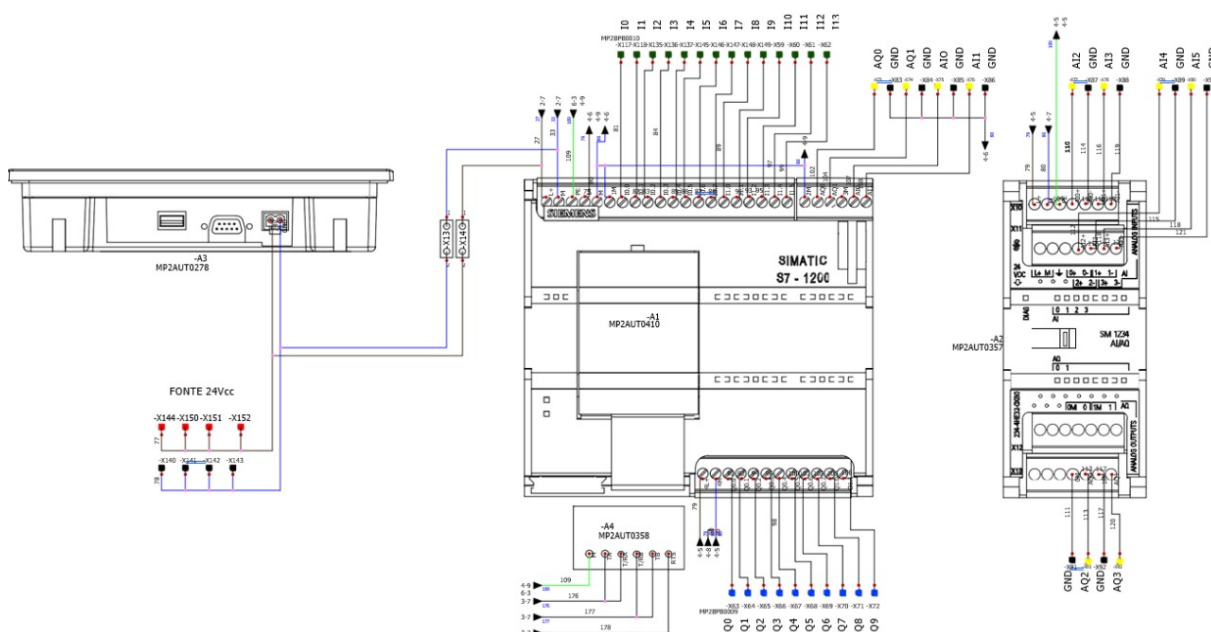


Fonte: Manual do usuário XC289 [14]

4.1.3 Esquema Elétrico

A (Figura 4.9) demonstra como e feita a conexão dos cabos ligados a IHM, CLP e seu cartão de expansão no painel do kit XC289.

Figura 4.9: Esquema Elétrico IHM CLP Cartão



Fonte: Manual do usuário XC289 [14].

A partir da (Tabela 4.1) obtemos a relação de componentes e as respectivas portas nas quais estão ligados ao CLP, sendo nessa aplicação utilizado apenas o transmissor de nível.

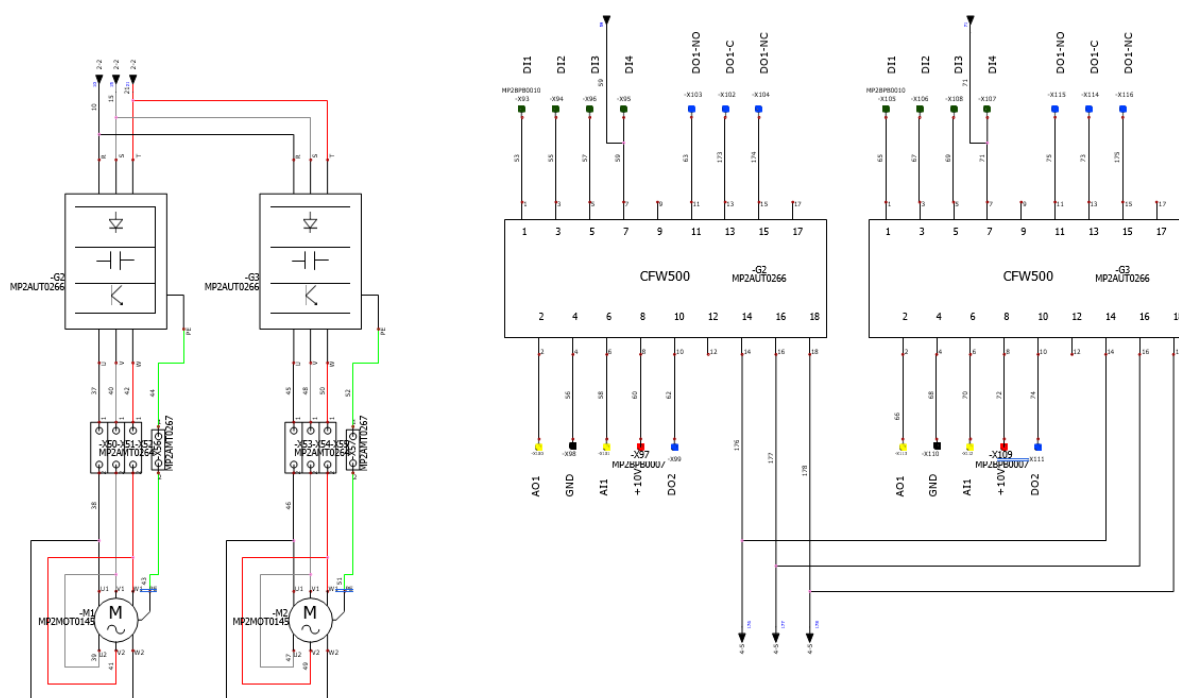
Tabela 4.1: Tabela de Instrumentos e Ligações CLP

Instrumento	Conexão CLP
Transmissor de Nível	AI3
Transmissor de Temperatura	AI4
Transmissor de Vazão	AI5
Válvula Proporcional Saída do Tanque de Processo	AQ0
Válvula Proporcional Entrada do Tanque de Processo	AQ2
Controlador de Potência do Aquecedor	AQ3

Fonte: Manual do usuário XC289 [14].

Já na (Figura 4.10) é descrito como esse cabeamento configura-se ao inversor de frequência WEG

Figura 4.10: Esquema do Inversor

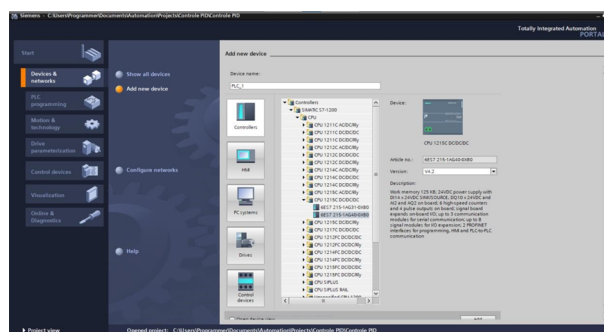


Fonte: Manual do usuário XC289 [14].

4.1.4 Programação no CLP S7-1200

Para que o CLP realize o procedimento no qual desejamos, é necessário que ele seja programado, anteriormente para que possa saber quais métodos seguir, sendo assim nessa seção será abordada, o passo a passo da configuração necessária para o controle de nível, no kit didático XC289.

Figura 4.11: Passo a passo na tela inicial



Fonte: Manual de Programação Controle PID– Siemens TIA Portal [15].

Na (Figura 4.11), é mostrado o início do procedimento para programar o CLP existente na bancada, que é o modelo 6ES7 215-1AG40-0XB0, versão V4.2. Para

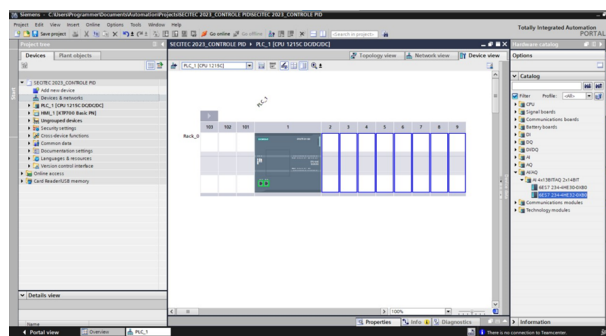
iniciar a programação, e feito os seguintes passos [15]:

- Selecione a aba “Devices & Networks” e “Add new device”,
- Selecione o CLP com o código 6ES7 215-1AG40-0XB0.
- Clique no botão “Add”, indicado no ícone 3.

O endereço IP do CLP é 192.168.1.193, [15].

4.1.4.1 Inserindo Cartão de Expansão

Figura 4.12: Inserindo Cartão de Expansão



Fonte: Manual de Programação Controle PID– Siemens TIA Portal [15].

Para a leitura do nível de água no reservatório, controle de velocidade das bombas, são utilizadas saídas e entradas analógicas. Para isso, é necessário a inserção do cartão de expansão no projeto.

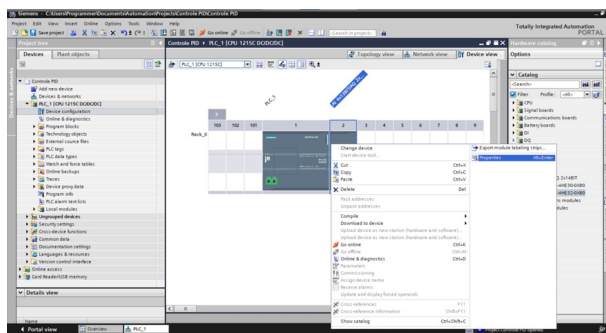
O cartão presente no painel é o modelo 6ES7 234-4HE32-0XB0. no qual pode ser localizado no TIA PORTAL na seguinte aba, conforme ilustrado na (Figura 4.12) [15].

4.1.4.2 Configurando o Cartão de Expansão

Todos os dispositivos que comunicam via entradas e saídas analógicas utilizam um sinal de 4 a 20 mA. Para configurar o cartão de expansão, é seguido os seguintes passos:

- Configuração das Entradas Analógicas: Clique com o botão direito do mouse sobre o cartão de expansão e seleciona a opção "Propriedades". Na janela que se abre, será escolhida a seção "Analog Inputs" e configurado os quatro canais conforme mostrado na (Figura 4.13).

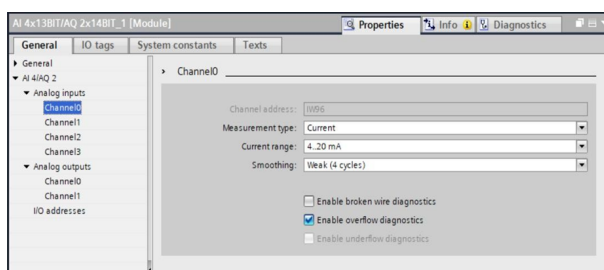
Figura 4.13: Configurando o Cartão de Expansão



Fonte: Manual de Programação Controle PID– Siemens TIA Portal [15].

- Configuração das Saídas Analógicas: É repetido o processo de configuração para os canais na seção "Analog Outputs", conforme ilustrado na (Figura 4.14) [15].

Figura 4.14: Seção "Analog Outputs"



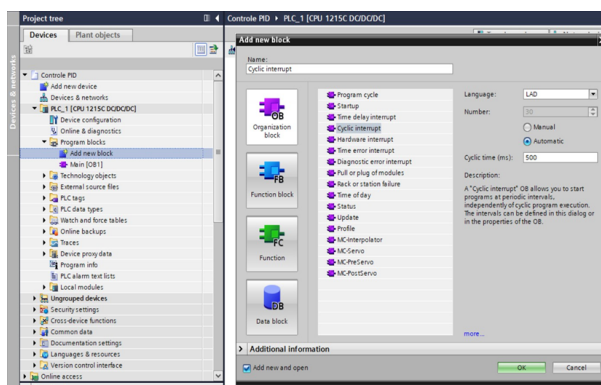
Fonte: Manual de Programação Controle PID– Siemens TIA Portal [15].

4.1.4.3 Criando a Lógica de Controle PID

O bloco de controle PID utiliza uma boa capacidade de processamento da CPU. Levando em conta que o controle PID depende da leitura de sinais de campo (como pressão, temperatura, nível, etc.), e considerando que esses sinais demoram um certo tempo para atualizar, não é necessário rodar o controle PID a cada ciclo do CLP [15].

Para isso, utiliza o bloco OB "Cyclic Interrupt". Esse bloco permite determinar a frequência com que as tarefas inseridas serão executadas. Conforme a (Figura 4.15) e definido o tempo de ciclo para 500 ms [15].

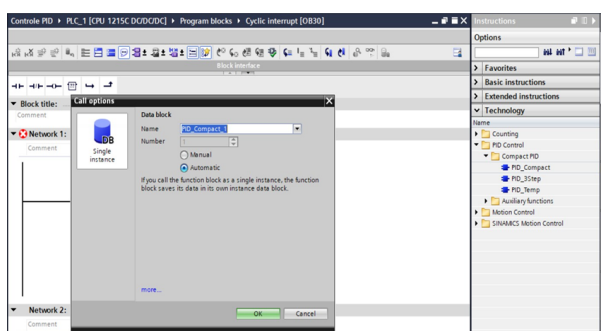
Figura 4.15: Criando a Lógica de Controle PID



Fonte: Manual de Programação Controle PID– Siemens TIA Portal [15].

Dentro da OB Cyclic Interrupt, é inserido o bloco PID Compact. Descrito na (Figura 4.16) [15].

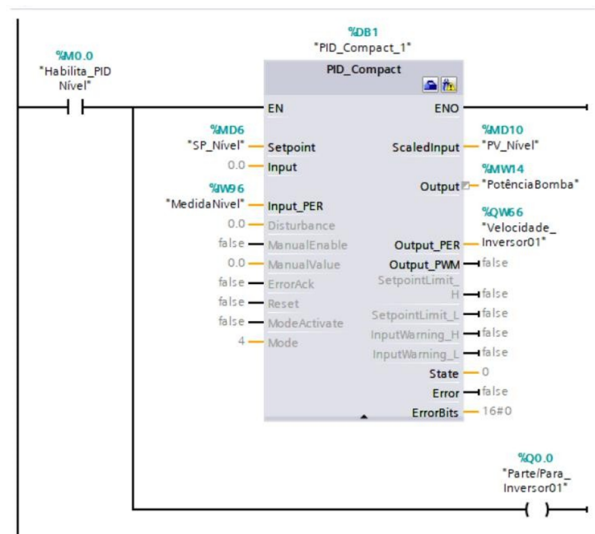
Figura 4.16: Bloco PID Compact



Fonte: Manual de Programação Controle PID– Siemens TIA Portal.[15]

Após a inserção do bloco PID, são adicionadas as variáveis nos campos do bloco conforme a (Figura 4.18) (os endereços devem ser os mesmos). Depois de concluída a inserção das variáveis, será configurado o bloco. Onde o acesso é feito no ícone de "maleta azul" no canto superior direito ver(Figura 4.17) [15].

Figura 4.17: inserção das variáveis



Fonte: Manual de Programação Controle PID– Siemens TIA Portal [15].

A figura 4.18 abaixo trás os detalhes das TAGs utilizadas.

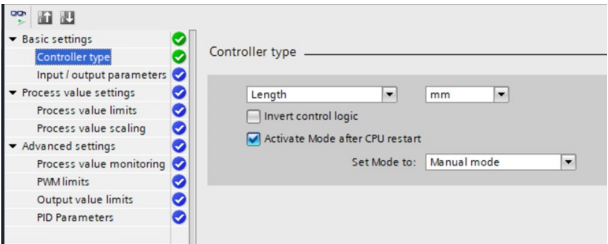
Figura 4.18: TAGs utilizadas

PLC tags				
	Name	Tag table	Data type	Address
1	MedidaNivel	Default tag table	Int	%IW96
2	PartePara_Inversor01	Default tag table	Bool	%Q0.0
3	Velocidade_Inversor01	Default tag table	Int	%QW66
4	SP_Nivel	Default tag table	Real	%MD6
5	Habilita_PIDNivel	Default tag table	Bool	%MD0
6	PotênciaBomba	Default tag table	Int	%MW14
7	PV_Nivel	Default tag table	Real	%MD10

Fonte: Manual de Programação Controle PID– Siemens TIA Portal [15].

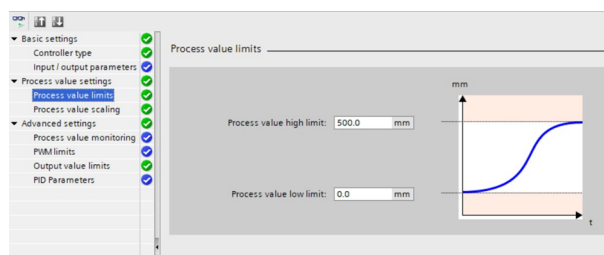
Neste exemplo, iremos fazer um controle PID aplicado ao nível de água no reser- vatório, onde a leitura do nível de água é dada em milímetros de coluna d’água e o meio de controle é a velocidade da bomba de abastecimento. Os dados setados deverão ser conforme as (Figuras: 4.19, 4.20, 4.21 e 4.22) abaixo:

Figura 4.19: janela de configuração do bloco-Controle Type



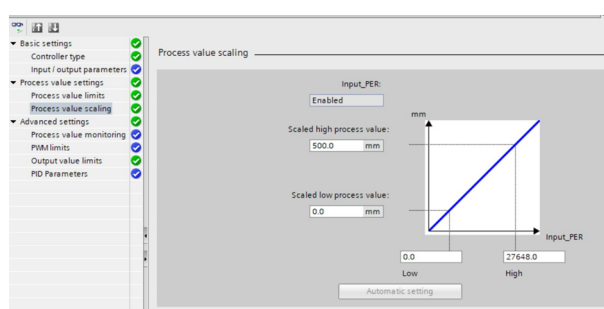
Fonte: Manual de Programação Controle PID– Siemens TIA Portal [15].

Figura 4.20: janela de configuração do bloco-process value limits



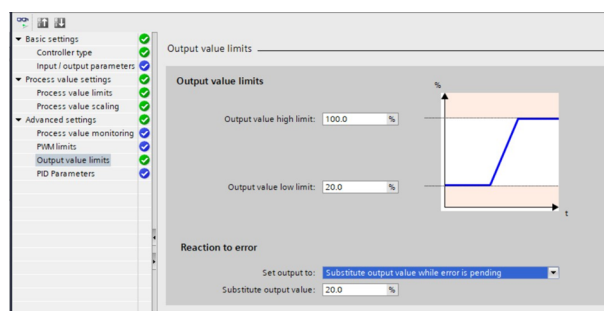
Fonte: Manual de Programação Controle PID– Siemens TIA Portal [15].

Figura 4.21: janela de configuração do bloco-process value scaling



Fonte: Manual de Programação Controle PID– Siemens TIA Portal [15].

Figura 4.22: janela de configuração do bloco-output value limits

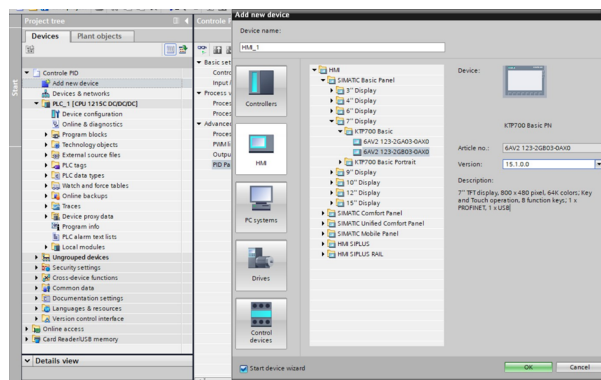


Fonte: Manual de Programação Controle PID– Siemens TIA Portal [15].

4.1.4.4 Criando Tela de Controle na IHM

Para uma melhor experiência, deve se criar uma tela de controle na IHM. Primeiro é inserida a IHM ao projeto. A IHM instalada na bancada é a de modelo 6AV2 123-2GB03-0AX0 , versão 15.1.0.0 ver (Figura 4.23).

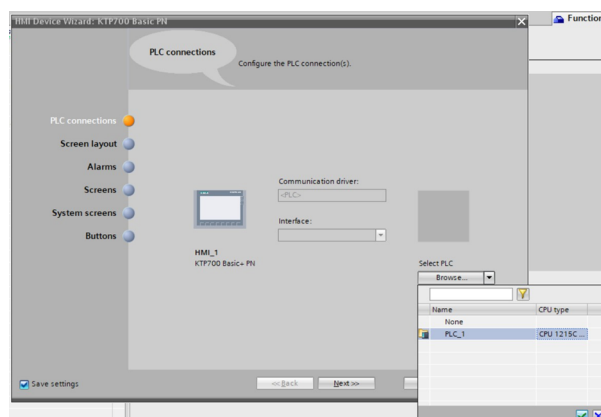
Figura 4.23: selecionando a IHM



Fonte: Manual de Programação Controle PID– Siemens TIA Portal [15].

É feita a seleção do CLP conforme a imagem 4.24

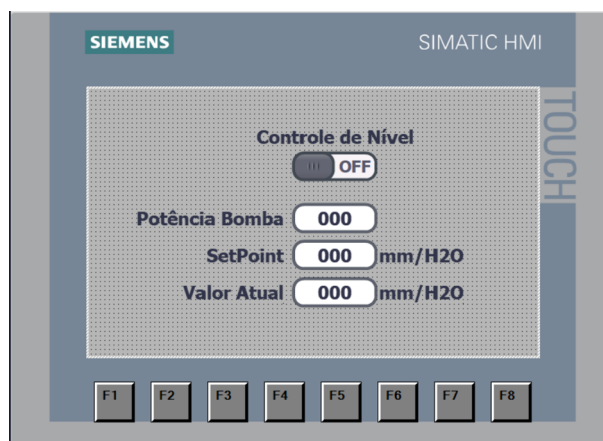
Figura 4.24: conectando ao CLP



Fonte: Manual de Programação Controle PID– Siemens TIA Portal [15].

A tela na (Figura 4.25) abaixo é um modelo atende perfeitamente a nossa necessidade. O botão de controle de nível está associado à variável %M0.0, potência da bomba à %MW14, o valor setado à %MD6 e valor atual à %MD10

Figura 4.25: modelo de tela IHM



Fonte: Manual de Programação Controle PID– Siemens TIA Portal [15].

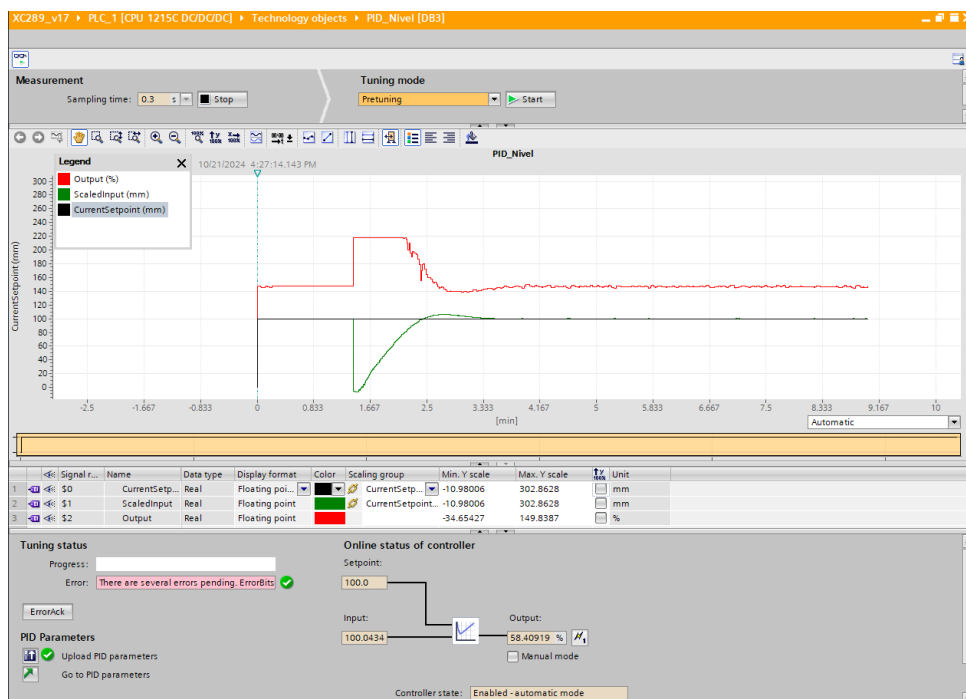
4.2 Testes e Análises do controle de nível no kit didático XC289

Para demonstrar em prática que foi apresentado nesse trabalho, essa seção apresenta gráficos de leitura da (variação de proporcional do nível do líquido, e da velocidade da bomba) desse sistema, nos quais foram gerados pelo próprio software que programa o CLP (TIA portal), partir de testes feitos em laboratório

4.2.1 Teste de funcionamento estável

Ao ligar o equipamento de início vemos o controle proporcional P agindo, acelerando a bomba na frequência máxima, e diminuindo a velocidade em seguida (gráfico em vermelho) conforme o nível (gráfico em verde) aproxima do valor de set point (reta em preto), podemos notar a *curva* s características desse tipo de controle em ambos os gráficos, outro ponto interessante são os padrões formados no gráfico de velocidade após o sistema se estabelecer, gerados pelo controle derivativo PD, e a redução da amplitude nas oscilações, ao decorrer do tempo demonstrando a atuação do controle integrativo PI (Figura 4.26).

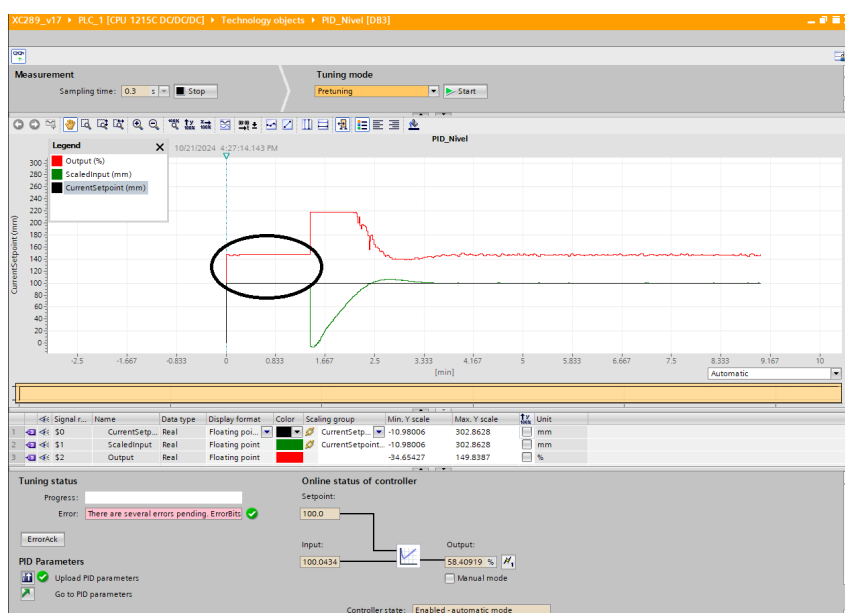
Figura 4.26: Comportamento frequencial/nível com funcionamento normal



Fonte: Autoria própria

Observação: Os níveis de frequência registrados antes do acionamento da bomba (área circutada na Figura 4.27), é um dado que deve ser ignorado, já que é a forma que o programa esboça o gráfico quando o sistema fica inoperante e não condiz com a realidade já que o nível é mínimo e a bomba está parada.

Figura 4.27: Região onde com o sistema inoperante



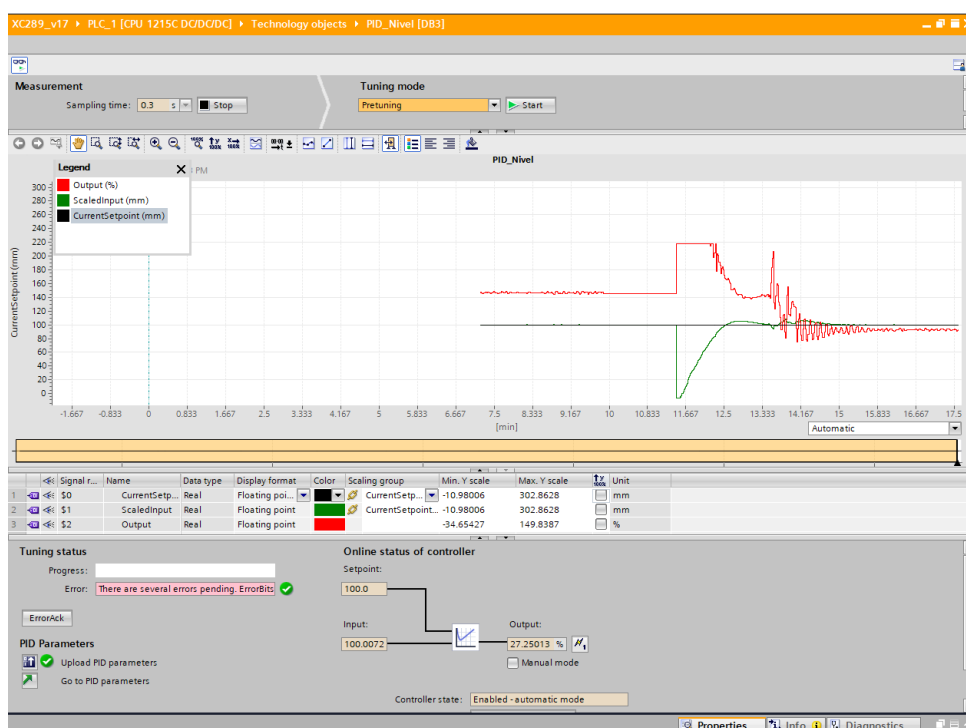
Fonte: Autoria própria

4.2.2 Teste variação no escoamento do tanque

O equipamento é desligado e todo o líquido do tanque escoado para o reservatório principal da bancada. Novamente partimos o sistema até uma razoável estabilização, com isso foi ajustado o escoamento do tanque, diminuindo a vazão de saída repentinamente, simulando a imprevisibilidade desse tipo de sistema em aplicações reais.

Nota-se que o PID estabiliza a velocidade abaixo da setada anteriormente caracterizando que necessita de uma vazão de entrada menor, para manter o nível do tanque. Além do notável aumento na amplitude das ondas geradas no gráfico do controle de velocidade, nesse processo, decorrentes da perturbação que foi gerada no sistema, que rapidamente diminuem por conta da atuação do controle Integrativo PI (Figura 4.28).

Figura 4.28: Mudança de escoamento



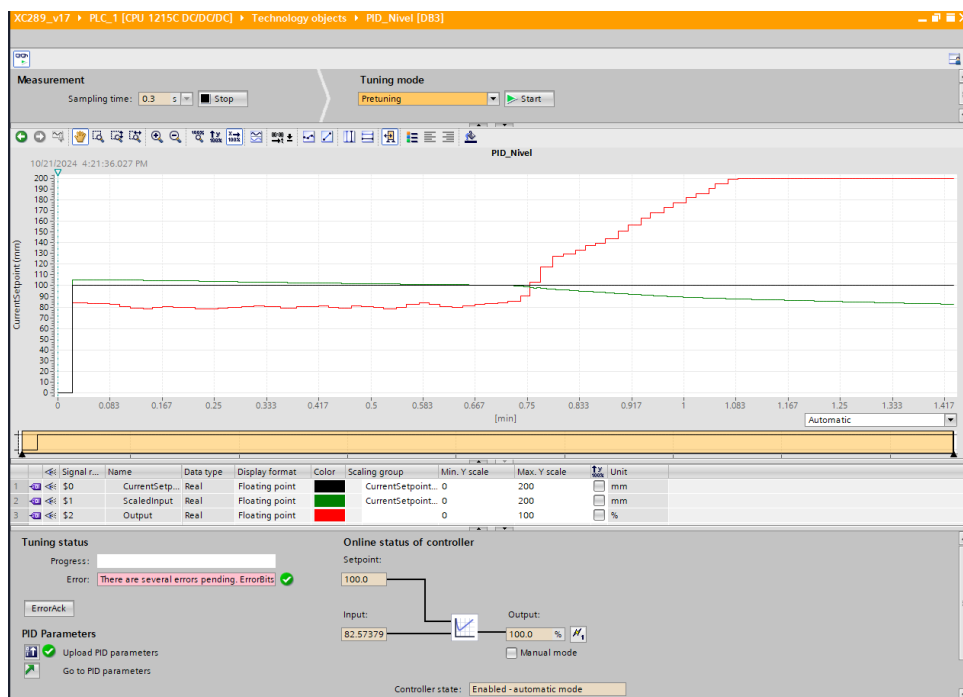
Fonte: Autoria própria

4.2.3 Teste reposta a falhas na alimentação elétrica da bomba

É feita uma breve pausa no fornecimento energia para a bomba, para simular as situações de: oscilação ou quedas na rede, e defeitos que cause uma parada ou

mudança no funcionamento da bomba (Figura 4.29). É interessante notar após a queda de velocidade o nível começa a cair mais há uma defasagem notável do momento de religamento, ao início da curva de restabelecimento do nível ideal (Figura 4.30). Tal análise pode servir como um ensaio de precisão, nos permitindo observar claramente o tempo de resposta do sistema, na aplicação a que está inserido.

Figura 4.29: Momento onde se provoca a falha



Fonte: Autoria própria

Observação: O início da queda da velocidade não aparece no gráfico, pois o sistema busca desligar gradativamente o motor, estendendo o gráfico por um longo período até a parada total do sistema. Para uma visualização melhor do que será de fato analisando, a parte inicial desse trecho de desaceleração foi omitida.

Capítulo 5

Conclusões

5.1 Conclusões Gerais

Neste Trabalho, foi realizada, uma breve introdução do que é automação industrial, seu desenvolvimento e história. Explorado os aspectos fundamentais e do controle de velocidade de motores de indução trifásicos, detalhada as técnicas de controle e características dos sistemas envolvidos, seguido de uma demonstração de controle de velocidade gerenciada por um controle (PID):

Automação Industrial: O trabalho citou a importância crescente da automação na indústria moderna, dando ênfase a temas como a substituição da mão de obra humana por sistemas automatizados para aumentar a eficiência e a precisão dos processos produtivos. Uma reflexão sobre a interação entre automação e mão de obra com um olhar crítico a redução de postos de trabalho, citando também o fato de criar novas oportunidades em setores de manutenção, desenvolvimento e gestão.

Controle de Velocidade de Motores de Indução Trifásicos: A pesquisa demonstrou controle de velocidade desses motores, inicialmente expondo a estrutura desse equipamentos e demonstrando a lógica matemática por trás do controle de velocidade, em seguida é apresentado os principais métodos que se dividem em controle de tensão controle de frequência e aplicações mistas, citando características positivas e negativas, suas aplicações, e se já são obsoletos ou não.

Tipos de Controladores Industriais: Apresenta os controladores P, PI, PD e PID,

evidenciou a importância da sintonização correta desses dispositivos para garantir o desempenho ideal dos sistemas de controle. E citou método de garantia de estabilidade e a eficiência desses controles.

Modelo de Controle PID: Apresentação de um modelo de controle PID em um controle de vazão, por meio do kit didático XC289 e os instrumentos usados na demonstração desse tipo de controle, com a configuração no CLP Siemens.

Em síntese, este trabalho demonstra a relevância desse modelo de controle no mercado, fornecendo uma base sólida para futuras investigações e aplicações na área de engenharia elétrica, oferecendo uma visão clara das técnicas e práticas existentes, servindo como um guia para profissionais e acadêmicos interessados nesse tema.

Referências Bibliográficas

- [1] RIBEIRO, M. A. *Automação industrial 4ª edição*. [S.l.]: Tek Treinamento Consultoria Ltda Salvador, 1999.
- [2] UOL ESTADÃO, V. N. *indústria gera 35 mil empregos em 2020, mas fecha 1 mi de vagas em 10 anos*. Acesso em: 9 de junho de 2024. Disponível em: <<https://economia.uol.com.br/noticias/estadao-conteudo/2022/07/21/ibge-industria-gera-35-mil-empregos-em-2020-mas-perda-desde-2011-soma-1-milhao.htm>>.
- [3] JOE, g. N. T. *A Relação Complexa entre Robotização e Desemprego: Um Exame Cauteloso dos Impactos Econômicos e Sociais*. Acesso em: 9 de junho de 2024. Disponível em: <<https://joe.com.br/2023/12/10/a-relacao-complexa-entre-robotizacao-e-desemprego-um-exame-cauteloso-dos-impactos-economicos-e-sociais/>>.
- [4] GLOBO.COM, M. C. G. *Automação deve acabar com 85 milhões de empregos nos próximos 5 anos, diz relatório do Fórum Econômico Mundial*. Acesso em: 18 de junho de 2024. Disponível em: <<https://g1.globo.com/economia/concursos-e-emprego/noticia/2020/10/21/automacao-deve-fechar-85-milhoes-de-empregos-diz-relatorio-do-forum-economico-mundial.ghtml>>.
- [5] FREYSSINET, M. *Automação e Qualificação da Força de Trabalho*. Acesso em: 29 de junho de 2024,. Disponível em: <<http://freyssenet.com/files/Automaticao>
- [6] NASCIMENTO, A. B. *Um Breve Tópico na História da Automação: do Painel Elétrico ao Controlador Lógico Programável*. Acesso em: 13 de maio de 2024. Disponível em: <https://monografias.ufop.br/bitstream/35400000/4991/9/MONOGRAFIA_BreveTópicoHistória.pdf>.

- [7] BALL, K. *How Programmable Logic Controllers Emerged from Industry Needs. Control Engeneering*. Acesso em: 7 de maio de 2022. Disponível em: <<https://www.controleng.com/articles/how-programmable-logic-controllers-emerged-from-industry-needs/>>.
- [8] COMPRACO , Luciano Bertene . *Controle de velocidade de um motor de indução trifásico: O poder da precisão*. Acesso em: 26 de junho de 2024,. Disponível em: <<https://compraco.com.br/blogs/tecnologia-e-desenvolvimento/controle-de-velocidade-de-um-motor-de-inducao-trifasico-o-poder-da-precisao>: :text=Vantagens
- [9] MENDOÇA, L. A. C. *Análise comparativa entre as distorções harmônicas totais das técnicas de 6 pulsos e de modulação por largura de pulso senoidal*. Acesso em:30 de junho de 2024,. Disponível em: <<https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-eletrica/distorcoes-harmonicas>>.
- [10] GUEDES, M. V. *O Motor de Indução Trifásico Seleção e Aplicação*. Acesso em: 29 de junho de 2024,. Disponível em: <http://www.estgv.ipv.pt/paginaspessoais/vasco/textos/MI_selaplic.pdf>.
- [11] IDEA, I. d. D. e. A. P. *Motores Trifásicos De Corrente Alternada*,. Acesso em: 30 de junho de 2024, , apostila 4 do curso de Noções Básicas em Motores Elétricos Trifásicos. Disponível em: <<https://portalidea.com.br/cursos/noes-bsicas-em-motores-eltricos-trifsicos-apostila04.pdf>>.
- [12] JUNIOR, N. de O. *Acionamentos de Velocidade variável Conhecimentos básicos fundamentais Instruções gerais para acionamentos elétricos regulados Em velocidade variável e em corrente alternada*. Acesso em: 30 de junho de 2024,. Disponível em: <<https://artliber.com.br/amostra/acionamentos.pdf>>.
- [13] SILVEIRA, F. da. *Material Didático XC289 - Controle de nível, Vazão e Temperatura* , Exsto Tecnologia Ltda. Revisão de: 08 de novembro de 2022. Disponível em: <<http://exstoacademy.exsto.com.br/>>.
- [14] MOTA, M. A. *Manual do usuario XC289 - Controle de nível, Vazão e Temperatura* , Exsto Tecnologia Ltda. Revisão de: 21 de outubro de 2022. Disponível em: <<http://exstoacademy.exsto.com.br/>>.

- [15] FRANÇA, L. *Manual de Programação Controle PID – Siemens TIA Portal*. Criado em:janeiro de 2024.
- [16] INDUSTRY, S. A. *SIMATIC S7-1200 Programmable controller System Manual*. Criado em: maio de 2009. Disponível em: <www.siemens.com>.
- [17] BEZERRA, T. B. *Desenvolvimento de um Conversor A/D Integrador com Faixa de Entrada e Resolução Programável a Capacitor Chaveado*. Criado em:janeiro de 2010. Disponível em: <<https://tede2.ufma.br/jspui/bitstream/tede/486/1/Tiago>>.
- [18] MIRANDA, J. C. *IEC-61850: Interoperabilidade e Intercambialidade entre Equipamentos de Supervisão, Controle e Proteção Através das Redes de Comunicação de Dados*. Criado em: 2009. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18154/tde-16062009-102211/publico/Juliano.pdf>>.
- [19] SOUZA, F. P. d. *Correção do fator de potência para instalações de baixa potência empregando filtros ativos*. Criado em:julho de 2000. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/78268>>.
- [20] SANTOS LUCAS A. M. SILVA, C. S. F. S. C. J. B. B. N. B. S. P. M. A. M. V. L. F. M. V. O. N. G. A. A. F. L. B. P. *Internet das Coisas: da Teoria à Prática*. Acesso em: 21 de setembro de 2024. Disponível em: <<https://homepages.dcc.ufmg.br/mmvieira/cc/papers/internet-das-coisas.pdf>>.
- [21] BAYER MOACIR ECKHARDT, R. M. F. M. *Automação de Sistemas*. Criado em:janeiro de 2010. Disponível em: <<https://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/18451/material/Apostila%202.pdf>>.
- [22] SANTOS, M. H. P. *Controle ativo da corrente entre pontes retificadoras a tiristor conectadas em paralelo aplicadas na excitação de geradores*. Criado em:Agosto de 2007. Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/30371407.pdf>>.

Apêndice

Tabela A.1: Glossário de Termos

Termo	Conceito
AI (Entrada Analógica)	Terminal no CLP utilizado para receber sinais analógicos, como de sensores de nível, pressão e temperatura[16].
AQ (Saída Analógica)	Terminal no CLP utilizado para enviar sinais analógicos, geralmente entre 0 e 10V ou 4 a 20 mA, para controlar dispositivos externos[16].
Bloco de Dados (DB)	Bloco usado para armazenar dados de variáveis em CLPs[16].
Bloco de Função (FB)	Um tipo de bloco utilizado em CLPs que permite a criação de funções reutilizáveis, com memória de instância[16].
Bloco PID Compact	Bloco funcional dentro do CLP que implementa o controle PID para uma variável de processo específica, como controle de nível de água em um reservatório[16].
Cartão de Expansão	Módulo que adiciona entradas e saídas extras a um CLP, permitindo a comunicação com mais dispositivos[16].
CLP (Controlador Lógico Programável)	Dispositivo responsável por executar as funções de controle em um sistema automatizado, programando as ações com base nas entradas e saídas configuradas[16].

Termo	Conceito
Conversor (Analógico Digital)	A/D Dispositivo ou função que converte sinais analógicos em sinais digitais para processamento em sistemas de automação[17].
Conversor D/A (Digital para Analógico)	Dispositivo ou função que converte sinais digitais em sinais analógicos para controle de atuadores[17].
CPU (Unidade Central de Processamento)	Parte do CLP responsável por executar as instruções e processar os dados do programa[16].
Cyclic Interrupt	Um tipo de bloco organizacional que permite a execução periódica de tarefas em intervalos de tempo configuráveis no CLP[16].
Endereço IP	Número único atribuído a cada dispositivo em uma rede, usado para identificar e se comunicar com ele.[18]
Erro de Controle	Diferença entre o valor desejado (setpoint) e o valor medido (process variable) em um sistema de controle.
Escorregamento	A diferença entre a velocidade síncrona do campo magnético girante e a velocidade do rotor do motor[12].
Fator de Potência	Razão entre a potência ativa e a potência aparente processada por um dipolo elétrico. Representa a razão entre a potência média - potência ativa - efetivamente consumida/fornecida e a potência média que seria consumida por uma carga resistiva utilizando a mesma capacidade do sistema – potência aparente. Corresponde à parcela da carga que pode ser representada por um resistor (toda carga resistiva pura apresenta fator de potência unitário)[19].
FBD (Function Block Diagram)	Linguagem de programação gráfica usada para controle em automação industrial, representando as operações como blocos de funções interconectados[16].

Termo	Conceito
IHM	Interface Homem-Máquina, dispositivo que permite a interação entre o operador e o sistema automatizado[16].
Internet das Coisas (IoT)	Rede de dispositivos físicos conectados à internet, permitindo a troca de dados e a automação de processos[20].
Linguagem LAD	Linguagem de programação gráfica para CLPs, representando lógicas de controle com base em diagramas de relés[16].
OB (Bloco Organizacional)	Bloco no CLP responsável por organizar e gerenciar a execução do programa principal[16].
Protocolo MODBUS	Protocolo de comunicação amplamente utilizado em automação industrial, permitindo a troca de dados entre dispositivos como CLPs, sensores e sistemas supervisórios[16].
Protocolo PROFIBUS	Padrão de comunicação digital usado em automação industrial para conectar e controlar dispositivos em uma rede de automação[21].
Pulso de Largura Modulada (PWM)	Técnica de modulação de sinais controlando a largura de pulsos aplicados[16].
SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition)	Sistema de supervisão e controle que permite monitorar e controlar processos industriais remotamente, coletando dados em tempo real[21].
TCP/IP	Protocolo de comunicação utilizado em redes de computadores e automação industrial para permitir a troca de dados entre dispositivos[18].
Tempo de Ciclo	Tempo necessário para o CLP completar uma varredura completa do programa, incluindo a leitura de entradas, execução de lógica e atualização de saídas[16].

Termo	Conceito
Tiristor	Componente eletrônico utilizado em circuitos de controle de potência, como inversores e retificadores, capaz de conduzir corrente em uma direção quando acionado por um pulso[22].
Tensão Nominal	Valor de tensão elétrica especificado para o funcionamento adequado de um dispositivo ou sistema elétrico[12].
Tensão Terminal	Tensão disponível nos terminais de um motor ou outro dispositivo elétrico, após considerar quedas de tensão no circuito de alimentação[12].