



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE
E AUTOMAÇÃO - CEC AU**



HUGO OLIVEIRA ANDRADE QUINTO

CONSTRUÇÃO DE UMA BANCADA DIDÁTICA PARA PRÁTICAS DE AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

**MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO**

Ouro Preto, 2021

HUGO OLIVEIRA ANDRADE QUINTO

**CONSTRUÇÃO DE UMA BANCADA DIDÁTICA PARA PRÁTICAS DE
AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. José Alberto Naves Cocota Junior, DSc

Coorientador: Prof^ª. Luciana Gomes Castanheira, DSc

**Ouro Preto
Escola de Minas – UFOP
2021**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

- Q7c Quinto, Hugo Oliveira Andrade .
 Construção de uma bancada didática para práticas de automação industrial. [manuscrito] / Hugo Oliveira Andrade Quinto. - 2021.
 70 f.
- Orientador: Prof. Dr. José Alberto Naves Cocota Junior .
 Coorientadora: Profa. Dra. Luciana Gomes Castanheira.
 Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Controle e Automação .
 Área de Concentração: Engenharia de Controle e Automação.
1. Controlador automático. 2. controlador PI. 3. Automação industrial.
 I. Castanheira, Luciana Gomes. II. Junior , José Alberto Naves Cocota. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 681.51

Bibliotecário(a) Responsável: Angela Maria Raimundo - SIAPE: 1.644.803



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CONTROLE E AUTOMACAO



FOLHA DE APROVAÇÃO

Hugo Oliveira Andrade Quinto

Construção de uma Bancada Didática para Práticas de Automação Industrial

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação

Aprovada em 26 de fevereiro de 2021

Membros da banca

DSc - José Alberto Naves Cocota Júnior - Orientador (UFOP)
DSc - Luciana Gomes Castanheira - Coorientadora (UFOP)
MSc - João Carlos Vilela De Castro - (UFOP)
DSc - Paulo Marcos de Barros Monteiro - (UFOP)

José Alberto Naves Cocota Júnior, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 26/02/2021.



Documento assinado eletronicamente por **Jose Alberto Naves Cocota Junior, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 26/02/2021, às 15:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0140579** e o código CRC **A7B71D5F**.

*Dedico este trabalho aos meus pais, que são os meus maiores exemplos.
Sem vocês não seria possível a realização desse sonho. Muito obrigado.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradecer a Deus, por ter me concedido a oportunidade de formar em uma grande universidade e dado forças nos momentos mais difíceis.

A Escola de Minas e em especial ao Departamento de Engenharia de Controle e Automação e a todos os professores que me ajudaram a obter conhecimento durante essa caminhada.

Aos meus pais, Carlos Roberto de Andrade e Maria de Lourdes de Oliveira Andrade e minha irmã, Julia Oliveira Andrade Quinto, que mesmo longe sempre estiveram ao meu lado, incentivando e dando força para concluir mais essa etapa em minha vida.

Ao meu orientador José Alberto Naves Cocota Junior e a minha coorientadora Luciana Gomes Castanheira que me auxiliaram durante o projeto de conclusão de curso.

Também quero agradecer aos meus amigos Gabriel Almeida e Anderson Martins que ajudaram muito durante o trabalho de conclusão de curso e sem eles não conseguiria realizar esse projeto.

Por fim, agradecimentos a República “OsBartira”. Vocês foram minha família em Ouro Preto, incentivando no dia-a-dia, aconselhando e dando apoio nos momentos difíceis. Sem o apoio de todos vocês, essa batalha teria sido muito mais difícil.

*“Se você quer ser bem sucedido, precisa ter dedicação total,
buscar seu último limite e dar o melhor de si mesmo.” - (Ayrton Senna)*

RESUMO

Este trabalho tem como proposta construir uma bancada didática para execução de práticas de controle de velocidade de um motor de corrente contínua e controle de temperatura a partir de uma lâmpada incandescente. A bancada usa o Controlador Lógico Programável MicroLogix 1100 para realizar a supervisão do sistema que é constituído por um motor de corrente contínua, uma lâmpada incandescente e uma placa de circuito externa que por meio de um microcontrolador PIC faz o acionamento do motor e da lâmpada incandescente usando o módulo PWM. Para controlar a velocidade do motor e a temperatura da lâmpada o CLP baseia-se no método de controle PI. O sistema de controle é realizado a partir do *software* RSLogix Micro que possibilita modificar e monitorar os códigos colocados no controlador. Para realização da comunicação entre o CLP e o computador é usado o KEPServer. O Simulink é programa responsável por executar o experimento da curva de reação ao degrau e determinar os ganhos do controlador PI por meio das sintonias de Ziegler Nichols e Cohen Coon.

Palavras-chaves: Controlador Lógico Programável, controlador PI, Ziegler Nichols e Cohen Coon.

ABSTRACT

This work proposes to build a didactic workbench for the performance of speed control practices of a direct current motor and temperature control from an incandescent lamp. The bench uses the MicroLogix 1100 Programmable Logic Controller to supervise the system, which consists of a direct current motor, an incandescent lamp and an external circuit board that, by means of a PIC microcontroller, drives the motor and the incandescent lamp using the PWM module. To control the motor speed and the lamp temperature, the PLC is based on the PI control method. The control system is carried out using RSLogix Micro *software*, which makes it possible to modify and monitor the codes placed on the controller. KEPServer is used to communicate between the PLC and the computer. Simulink is the program responsible for executing the step reaction curve experiment and determining the PI controller gains through the tunings of Ziegler Nichols and Cohen Coon.

Key-words: Programmable Logical Controller, PI controller, Ziegler Nichols and Cohen Coon.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Imagem do CLP usado no projeto.	21
Figura 2 – Imagem do MODICON e seu criadores.	23
Figura 3 – Imagem de um supervisor de um CLP da 5ª geração.	24
Figura 4 – Funcionamento básico de um CLP.	24
Figura 5 – Exemplo de um programa usando Linguagem Ladder.	28
Figura 6 – Exemplo das aplicações do CLP em uma casa	31
Figura 7 – Exemplo das aplicações do CLP em uma industria	31
Figura 8 – Imagem do microcontrolador Intel 8048	32
Figura 9 – Diagrama de blocos de um controlador PID	34
Figura 10 – Imagem de uma curva de reação em formato de “S”	37
Figura 11 – Imagem que exibe a sensibilidade do sistema para sintonia de Ziegler Nichols	38
Figura 12 – Imagem que exibe a sensibilidade do sistema para sintonia de Cohen Coon	39
Figura 13 – Diagrama de blocos do sistema da bancada como um todo	45
Figura 14 – Diagrama de blocos que mostra o circuito completo do motor	46
Figura 15 – Imagem que mostra o motor e o disco acoplado para realizar a medida de velocidade	47
Figura 16 – Imagem dos gráficos usados para escolher a faixa de operação do controle de velocidade	48
Figura 17 – Diagrama de blocos que mostra o circuito completo de temperatura	49
Figura 18 – Diagrama de blocos que mostra o circuito completo da sinaleira	50
Figura 19 – Imagem da placa usando o ambiente 3D visualizer	51
Figura 20 – Imagem mostrando as trilhas do circuito da placa	51
Figura 21 – Imagem mostrando o programa usado no CLP	53
Figura 22 – Imagem do <i>setup</i> do bloco PID usado no trabalho	54
Figura 23 – Imagem do projeto do Simulink usado no trabalho	56
Figura 24 – Imagem da situação atual da bancada	57
Figura 25 – Imagem da curva de reação	58
Figura 26 – Imagem do ponto de inflexão escolhido	59
Figura 27 – Imagem da curva de reação	59
Figura 28 – Imagem dos valores arredondados	61
Figura 29 – Sistema em malha fechada com ganhos PI sintonizados por Ziegler Nichols	61
Figura 30 – Sistema em malha fechada com os instantes de entrada em regime permanente em destaque	63
Figura 31 – Sinal de erro para o sistema em malha fechada com ganhos PI sintonizados por Ziegler Nichols	64

Figura 32 – Sinal de controle do sistema em malha fechada com ganhos PI sintonizados por Ziegler Nichols	64
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Método de Ziegler Nichols	38
Tabela 2 – Método de Cohen Coon	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASCCI	Código Padrão Americano para Intercâmbio de Informações
BCD	Decimais Codificados em Binário
CLP	Controlador Lógico Programável
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CPU	Unidade Central de Processamento
DIP	Pacote Duplo em Linha
EEPROM	Memória Somente de Leitura Programável Apagável Eletricamente
EM	Escola de Minas
IC	Circuito Integrado
ID	Identidade
IHM	Interface Homem-Máquina
IP	Protocolo de Internet
LabCAM	Laboratório de Controle e Automação Multiusuário
LED	Diodo Emissor de Luz
OLE	Vinculação e Incorporação de Objetos
OPC	OLE para Controle de Processo
PCI	Placa de Circuito Impresso
PI	Proporcional Integral
PIC	Controlador de Interface Periférica
PID	Proporcional Integral Derivativo
PN	Positivo Negativo
PWM	Modulação por Largura de Pulso
RAM	Memória de Acesso Aleatório

RPS	Rotação Por Segundo
SCADA	Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados
SED	Sistemas de Eventos Discretos
SSR	Relé de Estado Sólido
UFOP	Universidade Federal de Ouro Preto

LISTA DE SÍMBOLOS

G_s	Ganho total da planta
K_p	Ganho proporcional
PB	<i>Proportional band</i>
K_i	Ganho integrativo
τ_i	Tempo de reset da ação integral
T_i	Tempo de reset da ação integral dividido por 60 segundos
K_d	Ganho derivativo
τ_d	Tempo de reset da ação derivativa
L	Atraso do sistema
τ	Constante de tempo
K	Ganho direto do sistema
$r(t)$	Sinal de referência no domínio do tempo
$u(t)$	Sinal de entrada no domínio do tempo
$y(t)$	Sinal de saída no domínio do tempo
y_o	Sinal de saída em regime permanente antes do degrau
y_∞	Sinal de saída em regime permanente após o degrau
u_o	Sinal de entrada constante antes do degrau
u_∞	Sinal de entrada constante após o degrau
m.s.t	Reta tangente ao ponto de derivada máxima da curva
RPS	Rotações por segundo
s	Variável complexa

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Objetivos Gerais	19
1.2	Objetivos Específicos	20
1.3	Motivação e Justificativa	20
2	REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1	Controlador Lógico Programável	21
2.1.1	<i>Introdução</i>	21
2.1.2	<i>Histórico</i>	21
2.1.3	<i>Evolução</i>	22
2.1.4	<i>Princípio de Funcionamento</i>	23
2.1.5	<i>Componentes</i>	25
2.1.6	<i>Entradas e Saídas</i>	25
2.1.6.1	Módulos Discretos	26
2.1.6.2	Módulos Digitais	26
2.1.6.3	Módulos <i>Binary-Coded Decimal</i> (BCD)	26
2.1.6.4	Módulo Contador	26
2.1.6.5	Módulos Inteligentes	26
2.1.6.6	Módulos de Controles de Malha	27
2.1.6.7	Módulos de Comunicação	27
2.1.6.8	Módulos de Rede	27
2.1.6.9	Módulos de Interface Homem-Máquina	27
2.1.6.10	Módulos Analógicos	28
2.1.7	<i>Lógica e Linguagem de Programação</i>	28
2.1.8	<i>Vantagens e Desvantagens do CLP</i>	29
2.1.9	<i>Aplicações</i>	30
2.2	Microcontrolador	30
2.2.1	<i>Introdução</i>	30
2.2.2	<i>Tipos de Microcontroladores</i>	30
2.2.3	<i>Dispositivos Internos</i>	32
2.2.3.1	Unidade Central de Processo (CPU)	32
2.2.3.2	Memória	32
2.2.3.3	Entradas e Saídas	33
2.2.3.4	Cronômetro	33
2.2.4	<i>Aplicações</i>	33
2.3	Controlador Proporcional Integrativo Derivativo (PID)	33

2.3.1	<i>Introdução</i>	33
2.3.2	<i>Funcionamento</i>	34
2.3.3	<i>Ações de Controle</i>	34
2.3.3.1	Ação Proporcional	35
2.3.3.2	Ação Integrativa	35
2.3.3.3	Ação Derivativa	35
2.3.4	<i>Tipos de Controle PID</i>	35
2.3.4.1	Proporcional (P)	36
2.3.4.2	Proporcional Integrativo (PI)	36
2.3.4.3	Proporcional Integral Derivativo (PID)	36
2.3.5	<i>Método de Sintonização pela Curva de Reação</i>	36
2.3.5.1	Ziegler Nichols	38
2.3.5.2	Cohen Coon	39
3	MATERIAIS E MÉTODOS	40
3.1	Métodos	40
3.2	Materiais Utilizados	40
3.2.1	<i>Controlador Lógico Programável Utilizado</i>	40
3.2.2	<i>Microcontrolador Utilizado</i>	40
3.2.3	<i>Sensores Utilizados</i>	41
3.2.4	<i>Componentes Eletrônicos</i>	41
3.2.4.1	Cristal Oscilador	41
3.2.4.2	Capacitor	41
3.2.4.3	Resistor	42
3.2.4.4	Diodo	42
3.2.4.5	Transistor	42
3.2.4.6	Relé	42
3.2.4.7	Relé de Estado Sólido	42
3.2.4.8	Amplificador	42
3.2.4.9	Conversor	43
3.2.4.10	Regulador	43
3.2.5	<i>Atuadores</i>	43
3.2.5.1	Motor	43
3.2.5.2	Lâmpada	43
3.2.6	<i>Software</i>	43
3.2.6.1	Proteus	43
3.2.6.2	Matlab	43
3.2.6.3	Simulink	44
3.2.6.4	KEPServer	44
3.2.6.5	RSLogix Micro	44

3.2.6.6	RSLinx Classic	44
3.2.6.7	BootP-DHCP-Tool	44
4	DESENVOLVIMENTO	45
4.1	Diagrama Esquemático da Bancada Didática	45
4.1.1	<i>Circuito de Acionamento do Motor</i>	<i>46</i>
4.1.2	<i>Circuito de Acionamento da Lâmpada Incandescente</i>	<i>49</i>
4.1.3	<i>Circuito de Acionamento da Sinaleira</i>	<i>50</i>
4.2	Placa de Circuito Impressa	50
4.3	Programação	51
4.3.1	<i>Controle de Velocidade</i>	<i>52</i>
4.3.1.1	Malha Fechada	52
4.3.1.2	Malha Aberta	53
4.3.2	<i>Leitura/Escrita da Memória do CLP</i>	<i>54</i>
4.3.2.1	Configurando o KEPServer	54
4.3.2.2	Configurando o Simulink	55
5	RESULTADOS	57
5.1	Estruturação da Bancada Didática	57
5.2	Análise de Dados Obtidos no Sistema do Motor de CC	57
5.2.1	<i>Resposta ao Degrau</i>	<i>57</i>
5.2.2	<i>Projetando o Controlador - Ziegler Nichols</i>	<i>60</i>
5.2.3	<i>Projetando o Controlador - Cohen Coon</i>	<i>61</i>
5.2.4	<i>Análise de erros dos resultados</i>	<i>62</i>
6	CONCLUSÃO	65
6.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	65
	REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

Em dezembro de 1792 foi fundada, no Rio de Janeiro, a primeira escola de engenharia do Brasil, a Real Academia de Artilharia, Fortificação e Desenho. Mais tarde, essa instituição de ensino passou a ser conhecida como Academia Militar. Posteriormente, no final do século XIX, Dom Pedro II juntamente com Claude Henri Gorceix fundou a Escola de Minas (EM) em 1876, onde idealizaram a melhoria e desenvolvimento dos métodos de estudo a partir da exploração mineral. Gorceix tinha um pensamento moderno e dizia que: “dirigindo-se unicamente à memória, paralisa-se o desenvolvimento da inteligência; ensina-se ao aluno a discorrer com acerto, mas não se lhe ensina a pensar e refletir”. Baseado nesse pensamento, ele criticava a pouca quantidade das aulas práticas que eram insuficientes para o ensino e com seus ideais vanguardistas, o “pai” da Escola de Minas a criou com o propósito de incentivar aulas práticas, visitas técnicas e atividades laboratoriais.

Considerando que a fomentação das atividades feitas em laboratórios no Brasil ocorreu a partir da fundação da EM, pode-se dizer que houve grande desenvolvimento nesses mais de um século, com várias fases nessa evolução e a criação de diferentes tipos de laboratórios, como:

- Laboratório *in loco*, que segundo o site [QueConceito \(2020\)](#), é um espaço físico que possui vários instrumentos, materiais ou equipamentos com o intuito de atender as demandas e necessidades das mais diversas práticas ou pesquisas, conforme a área do laboratório.
- Laboratório virtual, que é definido por [Queiroz et al. \(1998\)](#), como um laboratório que não existe de forma material, mas que contém as condições necessárias para a realização de experimentos. Ou seja, apesar dele não ser um laboratório físico, com prédio próprio, ele é capaz de executar simulações, permitindo cumprir todos os experimentos como se fosse um espaço físico real.
- Laboratório remoto, que de acordo com [Lelevé et al. \(2009\)](#), pode-se dizer que tem o princípio de permitir a execução de um experimento a distância, fazendo uso de equipamentos e instrumentos reais mesmo estando em diferentes locais, ou seja, ele torna possível a efetuação de experimentos onde os alunos possam alterar os parâmetros do sistema por meio da Internet, fazendo uso de uma interface.

Dentre as três formas de laboratório que foram supracitadas, o laboratório remoto foi o último a surgir, pois seu desenvolvimento teve como principal tecnologia a Internet. É ela quem torna possível o acesso em tempo real e o controle executado de forma remota. Pode-se dizer que ele surgiu de uma forma interessante, conforme a perspectiva escrita em [Zubía e Alves \(2012\)](#). Tudo começou na década de 90, quando o governo Clinton estabeleceu uma proposta de incentivo ao avanço da infraestrutura de informação. Resultante dessa iniciação e com o subsídio da NASA, criou-se o *Network for Engineering and Research in Oregon* (NERO), com a proposta

de melhorar e desenvolver um “Laboratório de Ensino de Controle de Padrão Industrial com Arquitetura Reconfigurável em Tempo Real”. Sendo assim, ele foi proposto como um projeto de demonstração de engenharia de controle de acesso remoto em tempo real.

Nos dias atuais a tecnologia remota vem ganhando cada vez mais espaço no âmbito educacional, isso acontece devido a sua influência nas aulas práticas, além de sua contribuição no ensino como um todo. Como foi apresentado no [Zubía e Alves \(2012\)](#), esse método possui vantagens como flexibilização dos horários/locais, proporciona maior interação entre professores, alunos e instituições distintas, incentiva diferentes modos de aprendizagem a partir do estudo autodirigido e ensino baseado na problematização. Além dos benefícios que foram citados anteriormente devem-se considerar motivos recentes que vieram como consequência da doença Covid-19, como maior procura de cursos-online, a necessidade de desenvolvimento do estudo a distância e a forma de adaptar o trabalho pós-pandemia.

Seguindo os ideais da Escola de Minas e motivado pelo desenvolvimento de novas pesquisas e modernização da educação foi proposto o uso do laboratório remoto para o ensino de automação industrial. Esse projeto foi iniciado com a intenção de tornar a instituição um lugar melhor para o aprimoramento dos seus alunos e para que eles possam chegar mais qualificados no mercado de trabalho. Baseado em [Rojko, Jezernik e Pester \(2011\)](#), pode-se dizer que essa tecnologia apoia a cooperação entre indústrias e universidades, onde se reduz a distância entre ambos e facilita o compartilhamento de informação entre estudantes e profissionais; o que traz como resultado um ganho de conhecimento pelas duas partes, pois de acordo com *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) a arquitetura flexível e configurável dos laboratórios remotos já são uma realidade no meio industrial.

A partir desses princípios o trabalho foi dividido em cinco capítulos. O primeiro apresenta um conteúdo de introdução do trabalho, retratando os objetivos e a justificativas. No capítulo dois é descrito o referencial teórico, onde é abordado os principais conceitos e aplicações do Controlador Lógico Programável (CLP) uso das suas saídas analógicas e digitais, controle PID, métodos de Ziegler Nichols e Cohen Coon. Como parte prática do estudo o capítulo três é apresentado o desenvolvimento do projeto com todas as etapas necessárias para a construção da bancada, incluindo a análise estrutural e testes para funcionamento. A aquisição de dados e discussão de resultados, os quais foram obtidos a partir do desempenho do trabalho é redigida no capítulo quatro. Por fim, no capítulo cinco, é apresentado uma breve conclusão tendo como suporte os resultados.

1.1 Objetivos Gerais

O objetivo do projeto foi a construção de uma bancada didática de acesso remoto que possibilite controlar velocidade de um motor de corrente contínua e a temperatura manipulando uma lâmpada incandescente, bem como acionar uma saída digital. Essa bancada também tem como propósito fazer com que os alunos tenham uma Aprendizagem Baseada em Problemas

(PBL).

1.2 Objetivos Específicos

- Produzir uma bancada que possibilite contribuição no ensino da automação industrial;
- Proporcionar maior flexibilidade de horário e local para o aluno realizar práticas.
- Aprimorar, modernizar e adaptar o ensino a distância pós-pandemia.
- Adquirir maior conhecimento de eletrônica, microcontroladores, redes, instrumentação e de alguns *software* como Matlab, Proteus, RSLinx e RSLogix;
- Compreender a importância de um projeto prático para o ensino de graduação.

1.3 Motivação e Justificativa

A origem desse projeto foi fundamentada no fato que a engenharia é um curso que demanda prática para formação adequada do aluno. Para construção da bancada, o autor desenvolveu competências na eletrônica, CLP e softwares para poder exercer a teoria aprendida durante o curso. Além dessas razões, também se deve citar que um laboratório remoto é capaz de atender a maior quantidade de alunos em relação ao laboratório “in loco” o que consequentemente tornar-se-á uma economia.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Controlador Lógico Programável

2.1.1 Introdução

Automação quase sempre é confundida com automatização. Automatização significa movimentos repetitivos e mecânicos, sem nenhuma correção, enquanto automação é fundamentada em um sistema de ativos que são usados para atingir o ótimo, ou seja, o sistema recebe informação, a analisa e executa a operação mais apropriada para atingir o que lhe é exigido. A partir disso, pode-se dizer que as ideias de automação começaram a ganhar força com o uso do Controlador lógico Programável, exemplo o que é exibido na figura 1. Essa ferramenta surgiu com a intenção de substituir componentes como relés, contadores e máquinas controladas numericamente (CNC) os quais compunham os antigos sistemas de controle. Esse dispositivo foi feito para suportar as condições de chão de fábrica como ruídos, trepidações, temperaturas, entre outros, contendo elementos com características apropriadas e uma interface imune a ruídos (ROSÁRIO, 2012).

Figura 1 – Imagem do CLP usado no projeto.



Fonte: (SISTEMAS..., 2020)

2.1.2 Histórico

Na idade média, quando ocorreu um grande desenvolvimento na ciência em âmbitos como mecânica, física e química, manifestou-se a ideia de substituir o homem pela máquina (NATALE, 2018). Tendo como fundamento esse propósito e a necessidade de modernização das indústrias em razão da competitividade, originou-se o conceito de automação, que foi descrito

como um conjunto de técnicas e procedimentos que iriam aumentar a produção, a qualidade e reduzir os custos.

Com o início da automação, as indústrias de processos começaram a desenvolver equipamentos de controle e medição, sendo eles elétricos e pneumáticos. Na década de 50 surgiu a máquina de comando numérico e deu mais força para o conceito promissor que ainda estava em seu início (ROSÁRIO, 2012). Esse instrumento foi feito para efetuar operações pré-programadas sem a necessidade de um operador. Consequentemente abriu novos horizontes para grandes mudanças na indústria. A evolução tecnológica como um todo agilizou os avanços dos CNC. Então podemos dizer que assim como componentes, válvulas e fios foram substituídos por transistores e pelas placas de circuitos integrados o CNC substituiu o sistema de comando que na época era feito de forma rígida por meio de fios (ROSÁRIO, 2012).

A evolução tecnológica continuava de forma acelerada e no final da década de 60 foi criado o Controlador Lógico Programável (CLP). Pouco mais tarde, aconteceu a introdução de microprocessadores e então as suas funções foram amplificadas. Com seu desenvolvimento, foi-se capaz de realizar controle de sistemas de eventos discretos (SED). Até a década de 80 os CLP's eram usados apenas para controlar sinais digitais. Neste período, suas comunicações foram aprimoradas e se tornou possível a conversão analógico/digital e digital/analógico, dessa forma o controle de rede passou a ser viável. Atualmente, um CLP como o representado na figura 1 oferece inúmeros benefícios como maior confiabilidade e flexibilidade, além da facilidade de serem reprogramáveis. Baseados nesses fatos, o CLP começou a fazer parte da história das indústrias e hoje se tornou indispensável no campo da automação, seja ela industrial ou educacional (ROSÁRIO, 2012).

2.1.3 Evolução

No final da década de sessenta a companhia americana Bedford lança no mercado um dispositivo de computação chamado MODICON (*Modular Digital Controller*), considerado o precursor do CLP. No entanto, o MODICON é um equipamento grande comparado com os atuais, mas para aquela época ele representou uma grande revolução, já que compactou toda uma sala de relés, cabos, entre outros equipamentos em um único dispositivo, como pode ser observado na figura 2.

A partir da introdução do MODICON ao mercado, os CLP's tiveram grande desenvolvimento de suas tecnologias. Consequentemente eles passaram por estágios os quais são chamados de geração. Ao todo foram cinco gerações que implementaram evoluções significativas ao CLP. Para mostrar esse constante desenvolvimento será citado abaixo informações as quais foram retiradas de Zancan (2002).

- 1ª geração: a programação era feita em Assembly, além disso, era preciso conhecer todo o hardware do equipamento e não era possível reprogramá-lo. Nessa geração era equipamentos dedicados somente aquele processo para o qual foi desenvolvido.

Figura 2 – Imagem do MODICON e seu criadores.



Fonte: (FARIAS, 2015)

- 2ª geração: foi quando surgiram as linguagens de nível médio, com elas foi elaborado o “programa monitor” que convertia o programa desenvolvido pelo usuário para a linguagem de máquina. Consequentemente a segunda geração permitiu a reprogramação do CLP, além de torná-lo mais acessível para pessoas que não tivessem grande conhecimento de programação.

- 3ª geração: os CLPs passaram a possuir entradas de programação, permitindo que fosse possível conectar teclados ou programadores portáteis. A partir disso começou a possibilidade de fazer a sua programação *in loco*. Como resultado, mais pessoas passaram a realizar a programação desse dispositivo e a linguagem de programação passou a se disseminar cada vez mais.

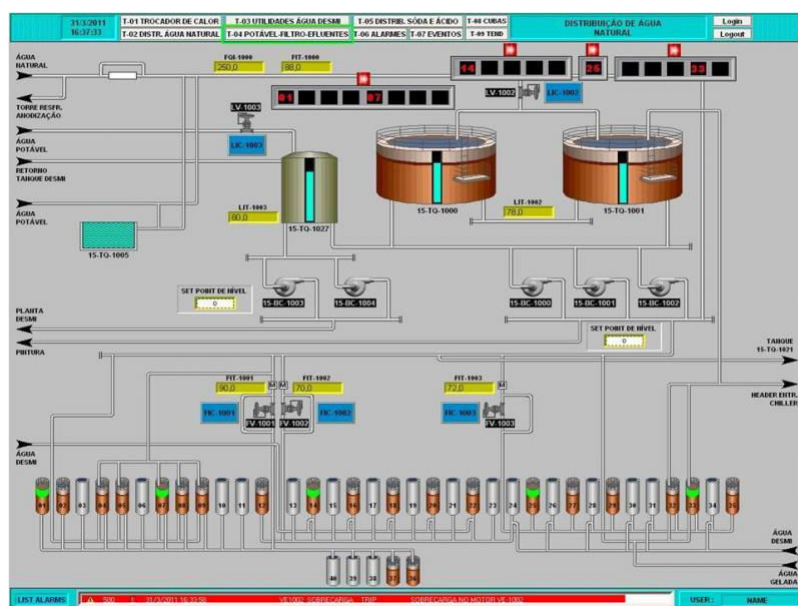
- 4ª geração: é colocada uma entrada para comunicação serial, e a programação passa a ser feita usando microcomputadores. Por conseguinte a este advento surgiu a possibilidade de implementar todas as funções e poder de processamento de um computador e consequentemente realizar testes e simulações antes de transferir o programa para o módulo do CLP.

- 5ª geração: os CLP's vêm com padrões de protocolo de comunicação, tendo o objetivo de facilitar a interface com equipamentos de outros fabricantes, com Sistemas Supervisórios e Redes Internas de comunicação. Esses CLP's são o que temos de mais avançado no mercado, sendo capazes de fazer a comunicação com os outros CLP's, atuadores, sensores, receber sinais, fazer conversão, além de poder colocar tudo na tela do computador para ser monitorado e controlado em tempo real, como exibido na figura 3.

2.1.4 Princípio de Funcionamento

Baseado em [Silveira e Lima \(2003\)](#), pode-se afirmar que o Controlador Lógico Programável é um computador "normal" com aplicações dedicadas a automação de processos em geral. Possui vários tipos de entradas, saídas, expansões, tamanhos e potências diferentes, os quais podem ter componentes como relés, transistores, etc. Sua alimentação é de 24V e se preciso pode ser usado alimentações externas para manter o sistema. Sendo assim, as I/O's podem ser analógicas ou digitais, sendo que o CLP pode fazer sua conversão quando necessário, as variáveis

Figura 3 – Imagem de um supervisório de um CLP da 5ª geração.

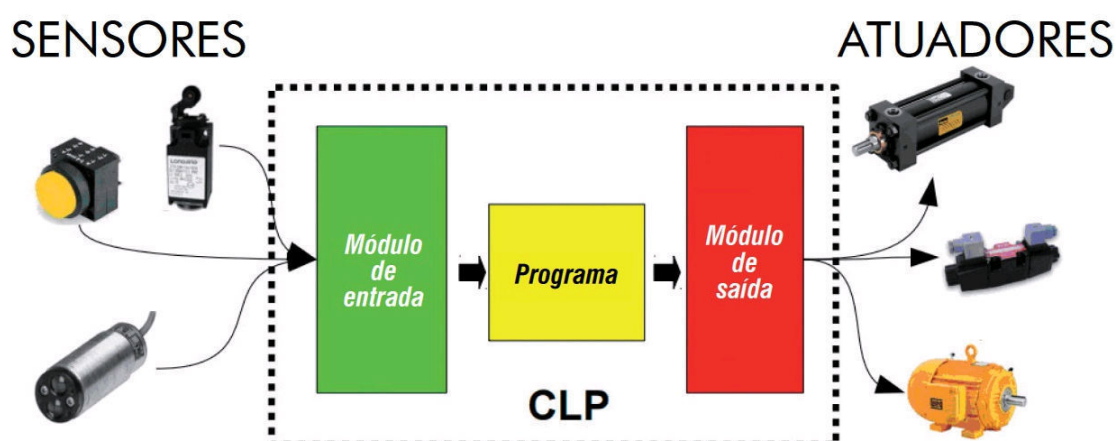


Fonte: (SISTEMA..., 2018)

são endereçadas usando o BIT, que é a menor unidade de processamento, e pode assumir apenas dois valores 0 ou 1 (NATALE, 2018).

Como exemplificado na figura 4, seu funcionamento ocorre a partir de um *software* que é usado para monitorar todo o sistema. Os dispositivos de entrada são responsáveis pela coleta de dados. Com os dados coletados o CLP faz a análise e então ativa os atuadores com a intenção de controlar o sistema.

Figura 4 – Funcionamento básico de um CLP.



Fonte: (TECNICAR..., 2020)

2.1.5 Componentes

O CLP é apresentado de duas formas básicas: compacta e modular. Na compacta a CPU e os módulos de entrada e saída estão no mesmo *rack*. Na modular a CPU e os módulos estão separados. Eles são montados em função da necessidade. Nos dois exemplos a arquitetura do controlador possui basicamente a unidade central de processamento (CPU), fonte de alimentação, base e módulos de entrada/saída (NATALE, 2018).

A CPU é o coração do sistema de um CLP, pois controla e supervisiona todas as operações, executando as instruções programadas armazenadas na memória (FRANCHI; CAMARGO, 2008). A central de processamento é constituída por memória RAM interna e memória EEPROM externa, que são usadas para armazenar o programa principal. Elas também servem para outras funções como armazenar provisoriamente status das I/O's e situação de funções internas, como temporizadores e contadores. Além da memória, a CPU possui o microprocessador, circuitos internos e um terminal de programação que atualmente foi substituído pelo computador.

A Fonte de Alimentação, segundo Roggia e Fuentes (2016) é quem tem a função de converter tensão de corrente alternada para uma tensão de corrente contínua, que também filtra e faz as estabilizações adequadas para o âmbito industrial. Suas saídas de voltagens são 5V, 12V e 24V.

A base é a responsável pela conexão mecânica e elétrica entre CPU, I/O's e fonte de alimentação. Possui um barramento de comunicação onde os sinais de dados, endereços, controle e tensão de alimentação estão presentes (ROSÁRIO, 2012).

O circuito de entrada/saída (I/O) é encarregado de fazer a vinculação entre a CPU e os módulos externos. A partir disso, as I/O's recebem e enviam os sinais proporcionais às variáveis presentes no sistema, podendo ser digital, analógico, discreto e inteligente de diferentes grandezas como temperatura, vazão, pressão e vibração (RIBEIRO, 1999).

2.1.6 Entradas e Saídas

Os módulos de entrada (*input*) e saídas (*output*) fazem a conexão física entre os módulos externos e a CPU do CLP. As entradas recebem os sinais externos. Eles vêm de várias fontes, digitais ou analógicas e são conectados com chaves, indicadores e outros equipamentos que coletam dados. As saídas são os pontos que emitem a ordem do controlador e são os responsáveis por comandar motores, válvulas e equipamentos de indicação. Normalmente os módulos possuem 4, 8, 12 ou 16 pontos de I/O's, que são feitos assim para economizar espaço e equipamentos. Conforme explicado em Ribeiro (1999), os tipos de módulos externos mais usados são discretos, digitais, BCD, contador, inteligentes, controle, comunicação, rede, interface homem-máquina e analógicos.

2.1.6.1 Módulos Discretos

São os mais usados no CLP. Eles podem ser tanto de corrente contínua (cc) quanto de corrente alternada (ca). Esses pontos possuem apenas dois estados: aberto ou fechado. Na posição de entrada eles são separados e distintos em sua natureza. No caso da saída eles são usados para controlar dispositivos que precisam de um sinal separado e distinto. Alguns dos instrumentos de entradas discretas são chaves (*Push-buttons*, *toggles*, limite, automáticas), portas lógicas, células fotoelétricas, contatos de *starters* de motores, relés, etc. Nas saídas discretas alguns dos instrumentos usados são anunciadores, relés de controle, lâmpadas, portas lógicas, buzinas (ROGGIA; FUENTES, 2016).

2.1.6.2 Módulos Digitais

Segundo Ribeiro (1999), também são conhecidos como módulos de registro. Foi dada uma atualização na capacidade de processamento do sinal comparado aos módulos discretos. Nas I/O's discretas podia-se usar apenas um bit para ler uma entrada ou para comandar uma saída. No caso dos módulos digitais é possível que vários bits sejam conectados com o controlador para se dispor de instrumentos os quais precisam que os dados sejam trabalhados de forma paralela, código BCD ou serial.

2.1.6.3 Módulos *Binary-Coded Decimal* (BCD)

São responsáveis pela comunicação paralela de dados entre o processador e os equipamentos de entrada e usados para a entrada de medidas em locais específicos da memória do CLP para que o programa seja empregado. Alguns dos parâmetros característicos são *presets* de contadores, temporizadores, e *setpoints* de controle de processo. Instruções específicas do controlador administram a corrente de dados das entradas para a CPU. No caso do barramento de saída ele é usado para que parâmetros calculados ou obtidos de entradas analógicas comuniquem com equipamentos externos (RIBEIRO, 1999).

2.1.6.4 Módulo Contador

Também chamado de acumulador, é quem possibilita que o CLP consiga fazer a contagem de eventos em alta velocidade sucedidos em equipamentos externos (ROGGIA; FUENTES, 2016).

2.1.6.5 Módulos Inteligentes

São fundamentados no microprocessador, pois ele possui habilidade de computação matemática, intertravamento, lógica e sequencial. São capazes de melhorar o desempenho da CPU, pois pode executar todas as tarefas fazendo com que amenize a carga e aperfeiçoe a velocidade da central de processos. As aplicações destes módulos aumentam ainda mais o

número de possibilidades do CLP, permitindo o anexo de sistemas como SCADA, aquisição de dados e sistema de controle distribuído (PETRUZELLA, 2014).

2.1.6.6 Módulos de Controles de Malha

De acordo com Ribeiro (1999), são tomados para executar a administração de malha fechada com algoritmos PID. Normalmente é usado em grandes sistemas para poder aliviar as tarefas da CPU principal.

2.1.6.7 Módulos de Comunicação

Também possuem entradas e saídas, porém sua principal função é fazer a ligação do CLP com os equipamentos externos. Os mais usados para executar a comunicação do CLP são ASCII, adaptador para I/O's remotas, serial e interface de redes. Os ASCII são usados como vínculo entre o controlador e equipamentos de portas seriais, para se comunicar com terminais de vídeo, impressoras, instrumentos digitais, entre outros que utilizam malha de corrente. Os adaptadores de rede normalmente têm uso em grandes sistemas que possuem muitas I/O's, sendo que algumas estão distantes. Logo seu uso pode significar uma economia significativa de fios, trabalho e dinheiro (RIBEIRO, 1999).

2.1.6.8 Módulos de Rede

Segundo Franchi e Camargo (2008), são indispensáveis pois facilitam a comunicação entre os níveis de uma indústria, fazendo com que o chão de fábrica possa trocar informações com outros departamentos como laboratórios e controle de produção. Para que isso fosse possível ocorreu o desenvolvimento de módulos que possibilitassem a integração entre CLP's e computadores tradicionais.

2.1.6.9 Módulos de Interface Homem-Máquina

De acordo com Petruzella (2014), é responsável por fazer a interface do operador. Para isso, possui uma unidade a qual pode fazer parte do sistema padrão ou ser oferecida como opção. Essa unidade tem duas possibilidades: pode ser construída com uma ligação direta ao CLP ou montada em um painel e depois ligada ao CLP. Suas principais serventias são acesso aos dados de apontamento, programação e análise. O módulo também possui equipamentos específicos os quais tornam possível o operador interagir com os registros do CLP e com as tabelas da malha, fazendo com que o projetista seja capaz de mudar as variáveis em tempo real e fazer a inspeção da malha, além de controlar manualmente saídas analógicas e ter acesso a informação do menu de processo.

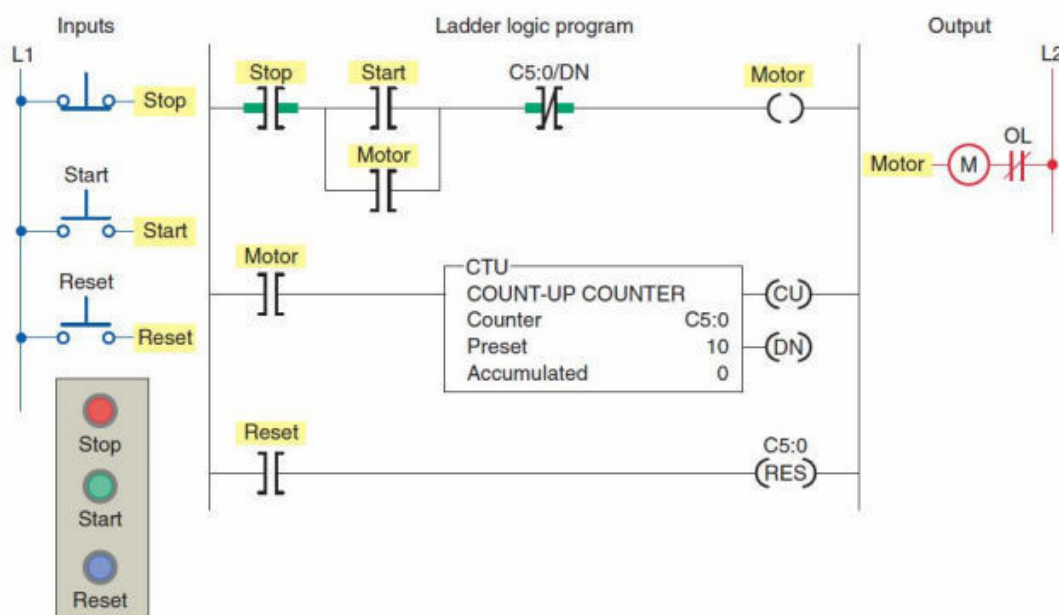
2.1.6.10 Módulos Analógicos

Proporcionam o CLP fazer de forma direta a medição das variáveis de processo e de controle dos equipamentos analógicos. Também responde pelo controle e supervisão das tensões e correntes dos sensores, válvulas, acionadores entre outros instrumentos. Estes sinais analógicos são convertidos para dados digitais por um componente eletrônico chamado conversor analógico digital (A/D) e a conversão digital para analógica é feita pelo conversor digital para analógico (D/A). Quando é necessária a conversão, o seu valor é transformado em um dado digital proporcional ao sinal analógico. No caso das entradas, alguns dispositivos usados são transmissores eletrônicos, instrumentos analíticos, potenciômetros e nas saídas os mais comuns são indicadores analógicos, motores, registradores, transdutores e válvulas elétricas (RIBEIRO, 1999).

2.1.7 Lógica e Linguagem de Programação

Segundo Franchi e Camargo (2008), o programa completo que é usado na lógica de um sistema é chamado de Programa do Usuário. Ele deve ser escrito em uma linguagem que esteja regulamentada pela norma IEC-1131, que pode ser representada pelos seguintes modos: Diagrama de Contato, Bloco Lógico, Lista de Programa e Bloco de Função. Esse programa é feito em um aplicativo, que assim como a linguagem pode mudar dependendo do fabricante. De acordo com Rosário (2012), pode-se dizer que o aplicativo é o ponto central de um sistema, pois é nele que o programador define a sequência lógica para controlar o processo.

Figura 5 – Exemplo de um programa usando Linguagem Ladder.



Fonte: Autor

Segundo Franchi e Camargo (2008) a linguagem utilizada é chamada de diagrama LADDER e seu sistema é fundamentado em dois pontos: um é o fluxo de potência e o outro

é o sequenciamento de instruções, baseado nesses princípios. Quando ocorre a leitura de um programa, o controlador tem sua função executada com uma varredura sequencial das tarefas, começando da primeira indo até a última e então retornar a tarefa 1, como é exemplificado na figura 5.

2.1.8 Vantagens e Desvantagens do CLP

O CLP, desde quando chegou ao mercado, há cerca de 50 anos, faz muito sucesso devido às suas vantagens. Algumas das principais vantagens são:

- Comunicação: capacidade de controlar diversos tipos de equipamentos industriais, usando diversas linguagens e redes.
- Flexibilidade: segundo [Roggia e Fuentes \(2016\)](#), usando apenas um CLP pode-se controlar várias máquinas, sendo cada uma com seu programa específico. Isso é possível, pois tal equipamento possui muitas funções, devido a sua lógica que tem uma imensa versatilidade, sendo motivado pela sua habilidade de usar lógica discreta e analógica para controlar os sistemas.
- Capacidade: um CLP possui uma grande quantidade de entradas e saídas, sendo possível usar módulos de expansão para aumentá-las ainda mais. Sabendo que seu potencial é limitado apenas pelo tamanho da memória, pode-se afirmar que um CLP consegue controlar até mais de 1000 I/O's ([RIBEIRO, 1999](#)).
- Facilidade de expansão: com recursos de um CLP não é preciso grandes esforços ou mudanças para acrescentar novos I/O's, além do que, eles podem ser adicionados de forma gradual, tornando possível a instalação de um sistema aos poucos ([RIBEIRO, 1999](#)).
- Baixo custo: o CLP foi construído com o intuito de substituir os sistemas de relés. Sendo assim, eles tiveram custo que pudesse concorrer com o que já estava no mercado, ou seja, foram projetados para serem baratos quando comparados aos sistemas digitais de controle distribuído ([FRANCHI; CAMARGO, 2008](#)).
- Velocidade de operação: de acordo com [Petruszella \(2014\)](#), um CLP possui uma alta velocidade operacional para o seu programa. O tempo para a operação do controlador é de milissegundos e sua velocidade está atrelada a varredura do seu programa.

O CLP também possui algumas desvantagens, sendo que as principais são:

- Aplicações de programas fixos: quando o sistema possui uma função única, talvez não valha a pena fazer o uso de um CLP, pois no caso de um sistema não ter a necessidade de ser alterado, há outros equipamentos com custo mais baixo que podem ser utilizados ([RIBEIRO, 1999](#)).
- Considerações ambientais: segundo [Petruszella \(2014\)](#), apesar de um CLP ser projetado para suportar as dificuldades do chão de fábrica ainda há ambientes com alta temperatura e vibração, que podem afetar o seu desempenho, tornando assim inviável a sua utilização.

- De acordo com [Ribeiro \(1999\)](#), deve ser levado em consideração custo e objetivo para poder fazer a escolha do equipamento correto para o sistema.

2.1.9 Aplicações

O CLP pode ser usado para tornar qualquer sistema automático, sendo possível empregá-lo tanto em casas, como exemplificado na figura 6, quanto em indústrias como podemos ver na figura 7. Isso é possível pela capacidade que esse equipamento tem de administrar inúmeras variáveis as quais podem substituir o trabalho humano ([NATALE, 2018](#)). A partir dessas características ele possui várias aplicações, sendo que seu maior sucesso ocorreu no controle de processos industriais e na automação da manufatura. De acordo com [Roggia e Fuentes \(2016\)](#), o controlador surgiu para ajudar a automação a atingir seu objetivo de otimizar os sistemas e pode-se dividir suas aplicações em:

- Rígida: é utilizada em produções de grande volume, voltada para fabricação de um único tipo de produto, com pouca variação.
- Flexível: é utilizada em produções médias, onde acontece uma maior interação entre a parte mecânica e com os sistemas de informação e tecnologias eletrônicas embarcadas. Neste caso é possível a fabricação de vários produtos ao mesmo tempo, fazendo o uso do mesmo complexo.
- Programável: é utilizada para produções relativamente baixas e com diversidades significativas. O produto é fabricado em lote e a cada novo lote os equipamentos podem ser reprogramados.

2.2 Microcontrolador

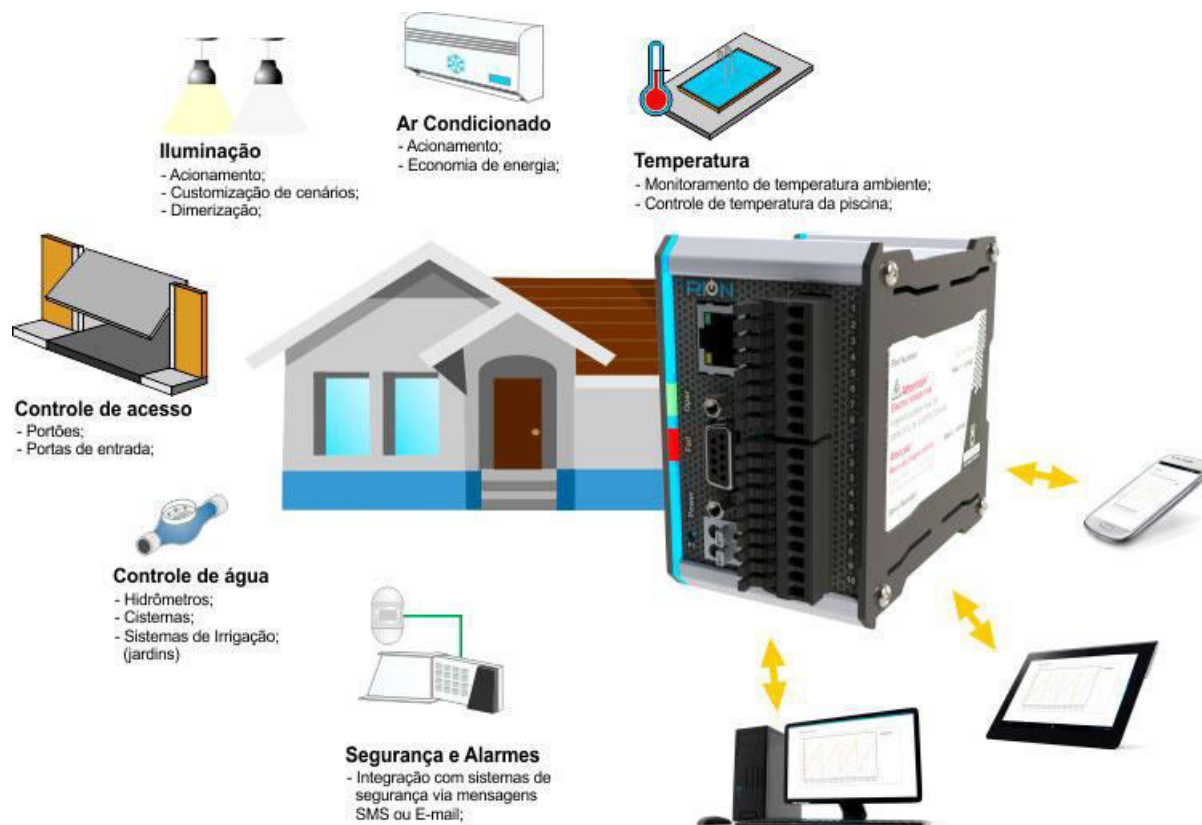
2.2.1 Introdução

Microcontrolador é, em uma definição simples, um pequeno computador o qual possui várias alternativas para serem exploradas, como temporizadores, dispositivos de comunicação, periféricos de entrada/saída, entre outros. Conforme explicado em [Gridling e Weiss \(2007\)](#) foi lançado em 1971 pela Intel, sendo o primeiro chamado de Intel 4004. Um pouco depois, em 1974, a empresa colocou no mercado um novo microcontrolador e seu nome era Intel 8048. Esse novo equipamento foi o primeiro microcontrolador a fazer sucesso, pois foi integrado aos teclados dos computadores, e como essa ferramenta estava em plena ascensão, o Intel 8048 também passou a ser muito produzido. Sendo assim, na figura 8 é mostrado o primeiro microcontrolador que obteve êxito em seu propósito.

2.2.2 Tipos de Microcontroladores

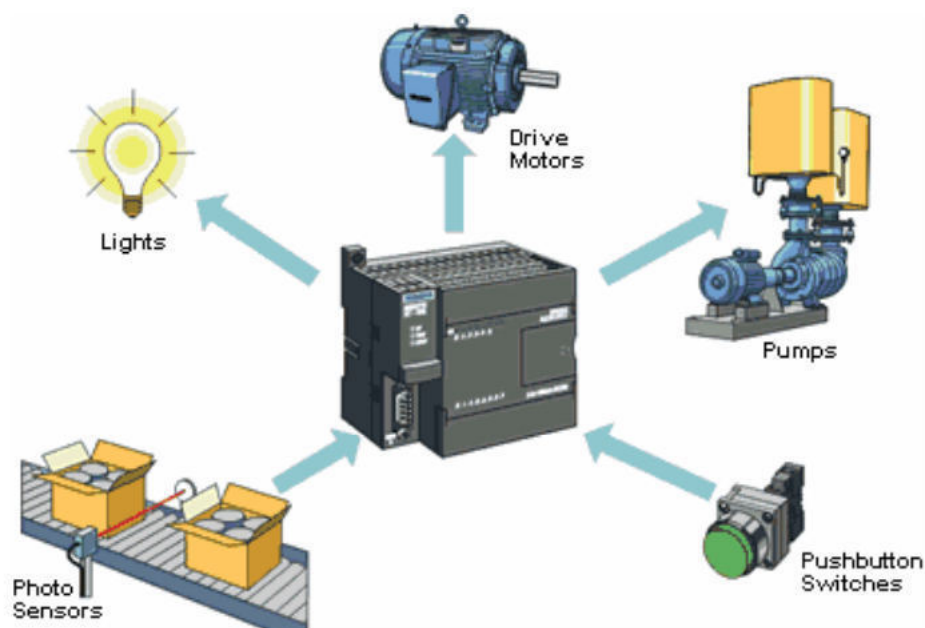
Como explicado anteriormente, o microcontrolador pode ser considerado como um computador que está ligado em um sistema, e assim como os computadores mais conhecidos como

Figura 6 – Exemplo das aplicações do CLP em uma casa



Fonte: (CONTROLADOR..., 2013)

Figura 7 – Exemplo das aplicações do CLP em uma industria



Fonte: (VIEIRA, 2010)

desktop ou laptop (notebook), também possui diferentes tipos de especificações, características e arquiteturas.

Figura 8 – Imagem do microcontrolador Intel 8048



Fonte: (INTEL..., 2014)

Sendo assim, um dos conceitos que é importante ser explicado, é a diferença entre a arquitetura de Von Neumann e Harvard. De acordo com a explicação feita em [Ferreira \(1998\)](#), a ideia apresentada por John Von Neumann é de um computador que pode memorizar seus programas no mesmo local que os dados, logo tornando possível manipular ambos, enquanto a arquitetura de Harvard tem a ideia de um trabalho mais rápido, e para isso possui duas memórias distintas e autônomas no que se diz respeito ao barramento e ligação ao processador.

Outro ponto importante que deve ser mencionado são as diferenças entre os fabricantes e quais suas principais características e aplicações. Por exemplo, segundo [Ordoñez, Pentead e Silva \(2005\)](#) os microcontroladores PIC 16Fxxx da Microchip, são de baixo custo e muito usado para estudos. O AT89C51 da Atmel é de alta performance e de nível industrial e o COP8CCE9 produzido pela National Instruments usado em aplicações de baixa EMI (Interferência Eletromagnética).

2.2.3 Dispositivos Internos

Sabendo que esse dispositivo é programado em linguagem Assembly e é utilizado em muitas aplicações de automação em diversas áreas do mundo, é preciso ter conhecimento que ele possui um poderoso conjunto de mecanismos internos. A partir disso, será citado abaixo os principais dispositivos internos do mesmo:

2.2.3.1 Unidade Central de Processo (CPU)

A CPU é a responsável por realizar as ações lógicas e matemáticas predispostas. Por isso, segundo [Gridling e Weiss \(2007\)](#), é uma das principais partes de um microcontrolador.

2.2.3.2 Memória

O microcontrolador possui três tipos de memórias: FLASH, RAM e EPROM. Logo, como é explicado em [Valdés e Areny \(2007\)](#) cada uma possui sua função. Por exemplo, a memória flash é encarregada de armazenar o programa e, mesmo sem alimentação, o que está contido nela não é apagado. A memória EPROM, assim como a memória FLASH é uma memória

não volátil, porém possui menor velocidade. Por fim, a memória RAM é diferente das anteriores, pois apenas armazena as variáveis enquanto o programa está sendo executado.

2.2.3.3 Entradas e Saídas

De acordo com [Gridling e Weiss \(2007\)](#), os microcontroladores têm como principal característica realizar o monitoramento e controle sobre outros equipamentos, e as suas entradas e saídas são as responsáveis para efetuar essa ideia. Sendo assim, os microcontroladores possuem, em sua maioria, de oito a trinta e dois pinos, sendo eles digitais e analógicos.

2.2.3.4 Cronômetro

Segundo [Deshmukh \(2005\)](#), estes módulos são formados por um contador que recebe uma incitação de um “clock” para incrementar ou decrementar o valor de sua contagem, sendo a precisão sua principal característica.

2.2.4 Aplicações

Os microcontroladores são normalmente usados em circuitos de controle e em sistemas os quais fornecem informações para o controle ser executado. Para que isso aconteça é preciso um programa responsável por instruí-lo. Isso é feito a partir de um *software* que faz a conversão da linguagem de programação para a linguagem de máquina. Outro ponto que é importante frisar são as placas desenvolvidas para que os microcontroladores sejam acoplados. Essas placas são circuitos que possuem periféricos os quais têm o intuito de complementar e facilitar as aplicações dos microcontroladores.

[Valdés e Areny \(2007\)](#) refere-se aos microcontroladores dizendo que devido à grande variedade de modelos e suas inúmeras aplicações, eles estão presentes em vários produtos da vida cotidiana. Sendo assim, o mercado mundial usa cada vez mais essa ferramenta para várias atividades nas mais distintas áreas. Exemplo disso, é que eles são usados em conceitos simples como relógios ou trancas e até equipamentos complexos como robótica móvel ([WOLF et al., 2009](#)). Por fim, deve-se ressaltar como é importante a escolha correta do microcontrolador que será usado no projeto ([ORDOÑEZ; PENTEADO; SILVA, 2005](#)).

2.3 Controlador Proporcional Integrativo Derivativo (PID)

2.3.1 Introdução

O controlador é uma ferramenta muito importante para a linha de produção industrial. É usado universalmente no controle de plantas industriais. Tal fato ocorre, pois esse método provou ser versátil e robusto no controle de muitas aplicações ([GOODWIN et al., 2001](#)). Está relacionado à área de instrumentação e é responsável pela regulação de processos industriais. Essa ferramenta proporcionou uma melhoria na quantidade e na qualidade da produção, devido

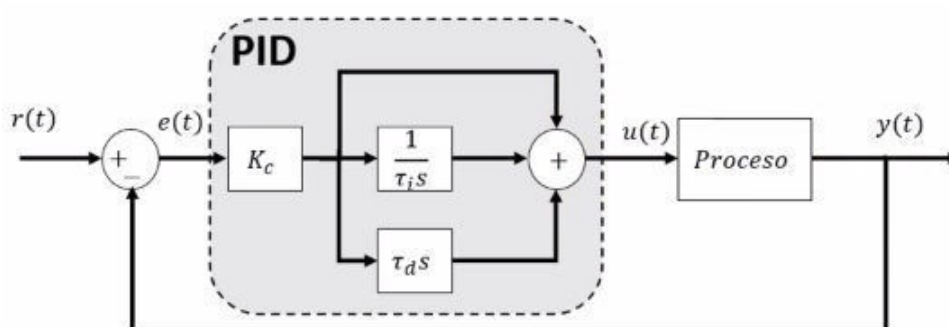
ao seu exímio gerenciamento sobre variáveis como vazão, temperatura, pressão entre outras, passando a ser essencial no mundo fabril.

2.3.2 Funcionamento

Descrevendo de forma sucinta, um controlador funciona da seguinte forma: ele recebe sinal de uma determinada variável e a compara com o valor preestabelecido. A diferença entre o valor recebido e o valor tido como referência é chamado de erro. Baseado no erro o controlador envia um sinal de saída pelo qual ele exerce uma atividade corretiva.

Para que os controladores funcionem de maneira efetiva existem leis de controle, que são usadas para supervisão e otimização do processo. Dentre as leis de controle existem algumas que são mais elementares, logo são mais usadas, pois sua simplicidade torna mais fácil seu manuseio. Exemplo disso é controle PID que segundo Åström e Hägglund (1995), na década de 90 cerca de noventa e cinco por cento das indústrias faziam uso deste controlador em sua malha de controle, sendo em sua maioria controladores PI. Como explicado em Goodwin et al. (2001), o controle PID pode ser descrito por funções de transferência relacionando o erro $e(t) = r(t) - y(t)$ e a saída do controlador $u(t)$, conforme exibido na figura 9.

Figura 9 – Diagrama de blocos de um controlador PID



Fonte: (PID..., 2014)

Por esta razão, Tuning (2003) explica que é necessário fazer sua análise e sintonização constantemente, pois está relacionado com o desempenho do processo.

2.3.3 Ações de Controle

O controlador é uma ferramenta a qual precisa que as suas variáveis estejam sempre sincronizadas com as necessidades do processo, pois é o responsável por minimizar o erro. No caso do controlador PID, para que o controle aconteça de maneira efetiva são adotados três parâmetros (proporcional, integrativo e derivativo) que são usados para o seu funcionamento. Além dos parâmetros P - proporcional, I - integrativo e D - derivativo, existe também o grau de liberdade do processo, que é definido a partir da variável de saída (TUNING, 2003). Assim sendo, a variável de saída do controlador é encarregada de emitir o sinal para controlar todo o processo.

2.3.3.1 Ação Proporcional

O ganho proporcional (K_p) tem a sua contribuição dependente do valor instantâneo do erro de controle. Sendo assim, um controlador proporcional pode controlar qualquer planta estável, no entanto o seu desempenho é limitado e seu regime permanente é diferente de zero. Também se usa o termo *proportional band* (PB) para descrever a ação proporcional. Essa expressão é definida como o erro necessário para produzir uma mudança de 100% na saída do controlador.

$$PB(\%) = \frac{100\%}{K_p} \quad (2.1)$$

2.3.3.2 Ação Integrativa

O ganho integrativo (K_i) está relacionado com o ganho proporcional (K_p) e τ_i que é o tempo de *reset* da ação integral. A sua contribuição é ajustada ao erro acumulado. Sendo assim, a sua reação sobre o modo de controle é lenta. Apesar de ser lenta, tem um desempenho fundamental para que o erro do regime permanente seja igual a zero. No entanto, por possuir um polo na origem do lugar das raízes, pode levar a instabilidade de uma planta com integrador, resultando no efeito conhecido como *wind-up*, (GOODWIN et al., 2001). O ganho integrativo pode ser expresso por:

$$K_i = \frac{K_p}{\tau_i} \quad (2.2)$$

2.3.3.3 Ação Derivativa

O ganho derivativo (K_d) está relacionado com o ganho proporcional (K_p) e τ_d que é o tempo de *reset* da ação derivativa. Logo, a sua contribuição acontece na taxa de variação do erro de controle. Sendo assim, é o modo rápido que na presença de erros constantes não atua. No entanto, tem como principal limitação a tendência de produzir grandes sinais de controle quando ocorrem erros de controle de alta frequência, sendo que os erros são estimulados por mudanças no ponto de ajuste ou ruídos de medição. Na implementação desse modo ocorre a adição de um zero. A partir disso, a constante de tempo da derivada passa a ser conhecida como τ_d e tem o seu valor normalmente escolhido entre 0,1 a 0,2 de τ_d (GOODWIN et al., 2001). Isso ocorre, pois quanto menor for τ_d , maior será a frequência do intervalo que a derivada filtrada se aproxima da derivada exata. O ganho derivativo pode ser expresso por:

$$K_d = K_p \cdot \tau_d \quad (2.3)$$

2.3.4 Tipos de Controle PID

Para projetar um controlador é necessário passar por várias etapas, como determinar valores dos parâmetros, valor desejado para variável de entrada, descobrir as principais carac-

terísticas da resposta ao degrau, entre outras. Todas essas etapas são feitas com a intenção de encontrar qual é o melhor método de controle PID para ser usado. Dentre os métodos de controle, o Proporcional, o Proporcional Integral e o Proporcional Integral Derivativo são os três mais usados. Sendo assim, é importante saber qual a função de cada parâmetro. Logo, como foi colocado por [Tuning \(2003\)](#), pode-se afirmar que o K_p é usado para diminuir o tempo de subida da resposta, o τ_d reduz o tempo de ultrapassagem e de acomodação e por fim o τ_i é o responsável por eliminar o erro do estado estacionário.

2.3.4.1 Proporcional (P)

Quando o método de controle usado é apenas o proporcional, que é o mais simples, a sua função é fundamentada apenas no valor de K_p . Como descrito anteriormente, é o ganho proporcional do processo. Neste caso, o controlador nada mais é do que um amplificador que possui um ganho constante e tem como grande inconveniência o fato de apresentar erro em regime permanente ([COPELAND, 2008](#)).

2.3.4.2 Proporcional Integrativo (PI)

Esse método de controle é o mais usado. Isso acontece, pois o método integrativo elimina o erro em regime ([TUNING, 2003](#)).

2.3.4.3 Proporcional Integral Derivativo (PID)

Esse método veio da ideia de adicionar a ação derivativa no método PI. A partir dessa adição, o erro e o tempo de acomodação tendem a diminuir, pois a ação derivativa faz uma leitura futura do que iria acontecer, e, baseado na sua taxa de variação o controlador toma medidas antecipadas para correção de erros vindouros ([ZHONG, 2006](#)). Esse método é o mais completo e faz com que o controle tenha o seu melhor desempenho. Porém, deve-se tomar cuidado com os ruídos já que a ação derivativa é muito suscetível a erros de alta frequência.

2.3.5 Método de Sintonização pela Curva de Reação

Muitas plantas, particularmente as decorrentes nas indústrias de processo podem ser satisfatoriamente descritas como um sistema de primeira ordem [Goodwin et al. \(2001\)](#), conforme apresentado na função de transferência abaixo:

$$G_c(s) = \frac{K \cdot e^{-sL}}{\tau s + 1} \quad (2.4)$$

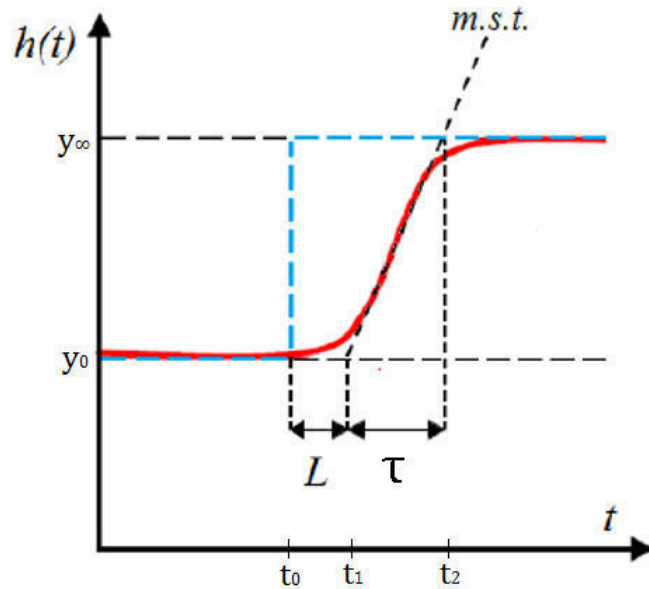
- L : é o atraso do sistema;
- τ : é a constante de tempo;
- K : é o ganho direto do sistema.

Para [Goodwin et al. \(2001\)](#), o modelo da planta pode ser encontrado baseando-se na experiência fazendo uso do seguinte procedimento:

1. Coloque a planta em regime estacionário em malha aberta, onde a saída inicial é dada por y_o e a entrada inicial é dada por u_o .
2. Após um intervalo de tempo, aplica-se um degrau, este deve estar entre 10 a 20% de seu fundo de escala do sinal de entrada.
3. Registra-se a saída da planta até que se instale o novo ponto de operação y_∞ .

A partir desse procedimento, os sistemas descritos pela Equação anterior podem apresentar uma curva de resposta semelhante à figura 10, que possui formato de “S”. Essa curva possui esse formato apenas em processos de segunda ordem ou de ordem superiores superamortecidos. A partir disso, ela é conhecida como a Curva de Reação do Processo, sendo que m.s.t é a reta tangente ao ponto de derivada máxima da curva.

Figura 10 – Imagem de uma curva de reação em formato de “S”



Fonte: [\(OLIVEIRA, 2016\)](#) modificada

O ganho direto do sistema (K) pode ser obtido pela Equação 2.5:

$$K = \frac{y_\infty - y_o}{u_\infty - u_o} \quad (2.5)$$

$$L = t_1 - t_0 \quad (2.6)$$

$$\tau = t_2 - t_1 \quad (2.7)$$

2.3.5.1 Ziegler Nichols

A sintonia empírica proposta por Ziegler Nichols tem como objetivo conseguir um amortecimento na resposta do sistema, com cerca de 25% do primeiro para o segundo pico da resposta, (GOODWIN et al., 2001). Baseado nos parâmetros encontrados na equação 2.4, Ziegler Nichols propôs encontrar os parâmetros do controlador de acordo com as fórmulas da tabela 1.

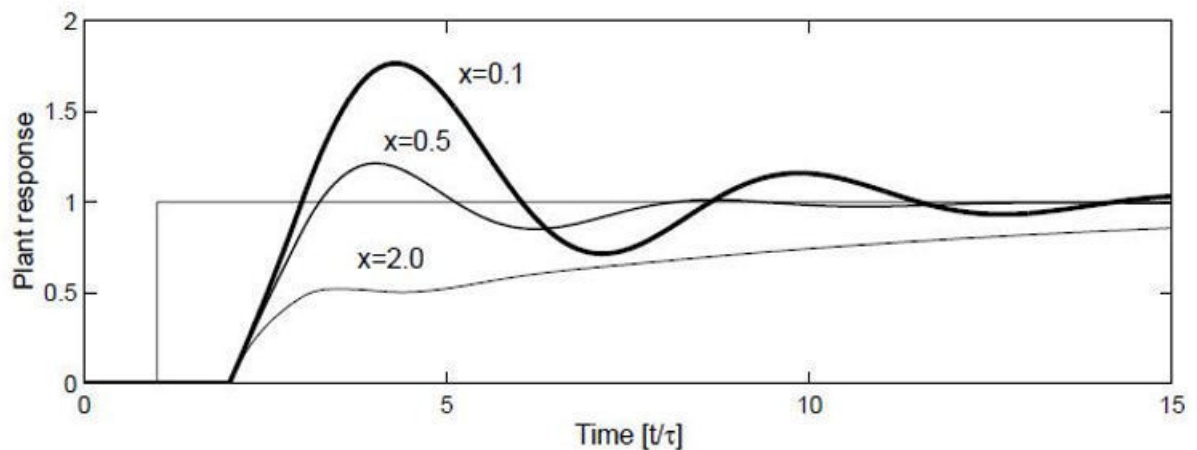
Tabela 1 – Método de Ziegler Nichols

Controle	K_p	τ_i	τ_d
P	$\frac{\tau}{KL}$	∞	0
PI	$\frac{0.9\tau}{KL}$	$3L$	0
PID	$\frac{1.2\tau}{KL}$	$2L$	$\frac{0.5}{L}$

Fonte: (GOODWIN et al., 2001)

Entretanto, esta sintonia revela uma elevada sensibilidade do desempenho para diferentes valores da razão entre atraso (L) e a constante de tempo (τ). Na figura 11 temos representado a saída de um controlador projetado por Ziegler Nichols em função de diferentes razões entre o atraso e a constante de tempo do sistema. Note que para atrasos pequenos em relação a elevadas constantes de tempo, o sistema passa a apresentar uma maior oscilação em sua saída, e à medida que a constante de tempo fica reduzida em relação ao atraso, o sistema fica superamortecido.

Figura 11 – Imagem que exhibe a sensibilidade do sistema para sintonia de Ziegler Nichols



Fonte: (GOODWIN et al., 2001)

2.3.5.2 Cohen Coon

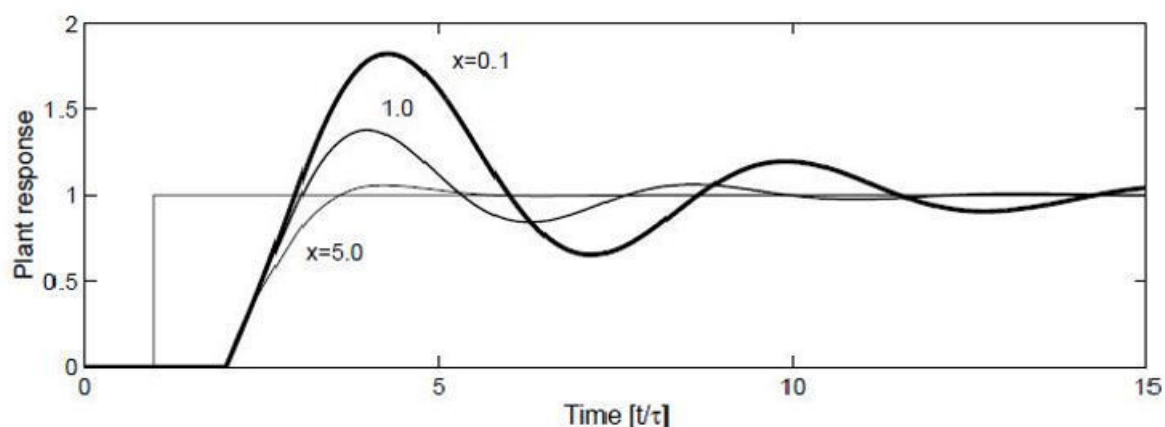
O engenheiro G.H.Cohen e o matemático G.A.Coon, que trabalhavam na empresa Taylor Instrument Companies, criaram o método de sintonização de Cohen Coon em 1953. De acordo com [Kuyvenhoven \(2002\)](#), esse método, assim como Ziegler Nichols também fundamenta-se no processo de declínio de 1/4 da resposta que é causado por um distúrbio como mostra a figura 12. A partir disso, Cohen Coon avançou nos estudos para encontrar as configurações que levam uma menor dependência do controlador em relação a razão do atraso e a constante de tempo como mostrado na tabela 2 ([GOODWIN et al., 2001](#)).

Tabela 2 – Método de Cohen Coon

Controle	K_p	τ_i	τ_d
P	$\frac{\tau}{KL} \cdot \left(1 + \frac{L}{3\tau}\right)$	0	0
PI	$\frac{\tau}{KL} \cdot \left(0.9 + \frac{L}{12\tau}\right)$	$L \cdot \left(\frac{30\tau+3L}{9\tau+20L}\right)$	0
PID	$\frac{\tau}{KL} \cdot \left(\frac{4}{3} + \frac{L}{4\tau}\right)$	$L \cdot \left(\frac{32\tau+6L}{13\tau+8L}\right)$	$\frac{4L\tau}{11\tau+2L}$

Fonte: ([GOODWIN et al., 2001](#))

Figura 12 – Imagem que exhibe a sensibilidade do sistema para sintonia de Cohen Coon



Fonte: ([GOODWIN et al., 2001](#))

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Métodos

O trabalho foi realizado, baseando na ideia de fazer o controle de três ativos de forma remota. Sendo assim, o primeiro passo foi projetar e construir uma placa de circuito impresso a qual seria responsável pela parte eletrônica do trabalho, tornando possível o controle de um motor, uma lâmpada incandescente e um LED. O segundo passo foi estudar o Controlador Lógico Programável e fazer o programa, o qual seria o encarregado de controlar todo o sistema. Com o programa e a placa prontos começou o terceiro passo, que se trata da parte de comunicação entre o CLP e os ativos. Por fim, com o trabalho funcionando foram feitos testes, usando os métodos de sintonização de Ziegler Nichols e Cohen Coon.

Como explicado acima, o trabalho foi fundamentado na prática e na teoria. Uma pesquisa teórica foi executada com o propósito de revisar conceitos, ideias e teorias que são pertinentes. Enquanto uma pesquisa prática é descrita por manusear variáveis associadas ao projeto com o princípio de testar as teorias que foram usadas. Esse método segue as convicções de uma pesquisa quantitativa, que segundo [Gerhardt e Silveira \(2009\)](#), deve ser quantificada e objetiva. Além disso, é um método baseado nos ideais positivistas, onde o resultado é relevante apenas quando apoiado em dados brutos, métodos imparciais e normatizados. Sendo assim, esse procedimento usa meios matemáticos para descrever a influência das variáveis no projeto e nos resultados encontrados.

3.2 Materiais Utilizados

3.2.1 Controlador Lógico Programável Utilizado

O CLP usado é o MicroLogix 1100 1763-L16BWA, um "Small Logic Controller" que tem dez entradas digitais, sendo que quatro delas são high-speed, duas entradas analógicas com voltagem de 0...10Vcc, sendo possível acoplar expansões 1762. Além disso, essa ferramenta possui seis saídas digitais e todas elas são individualmente isoladas. Devido à necessidade de mais I/O's analógicas, também foi usado a expansão 1762-IF2OF2 que adiciona duas entradas e duas saídas analógicas.

3.2.2 Microcontrolador Utilizado

Dentre os microcontroladores disponíveis no laboratório da universidade o PIC18F4550 foi a melhor opção, já que possui duas entradas/saídas analógicas. Esse microcontrolador faz parte de uma família de dispositivos a qual possui vantagens devido a seu custo-benefício. Esse dispositivo dispõe de quarenta pinos, sendo que eles são responsáveis por várias funções como

modules (timer, PWM, compare), I/O's analógicas e digitais, etc. Dentre os pinos que o PIC possui estão sendo utilizados o 1 e o 2, que são entradas analógicas as quais estão responsáveis de receber os sinais do CLP para controlar o motor/lâmpada. O pino 33 é uma entrada digital que recebe o sinal do CLP para controlar a sinaleira. Os pinos 16 e 17 são saídas analógicas de controle PWM que são responsáveis por emitir comandos para motor/lâmpada. Por fim, o pino 19 é uma saída digital simples que emite o sinal para a sinaleira.

3.2.3 Sensores Utilizados

Foram usados dois sensores no trabalho: um sensor óptico e um sensor de temperatura. O sensor óptico usado é a Chave Óptica PHCT203, que é um sensor baseado no sentido da visão, de acordo com [Borges et al. \(2005\)](#). É construído usando o princípio de emissão e recepção de luz infravermelha e trabalha em uma faixa de onda que possui comprimentos entre 700nm a 750nm. A partir dessa ideia, foi acoplado ao motor um disco com uma ranhura para interromper o infravermelho e conseguir medir suas rotações. O sensor de temperatura utilizado é o LM35 e conforme explicado em [Poonam e Mulge \(2013\)](#), dentre suas vantagens possui mais recursos de memória, processamento e comunicação do que outros sensores similares. Além disso, é um equipamento cujo circuito integrado de precisão tem uma tensão de saída linear e correspondente a temperaturas em graus Celsius. Outro fato importante é que esse sensor não precisa de calibração externa e tem faixa para leitura de temperatura entre -55C a 150C, o que é suficiente para realização dos experimentos.

3.2.4 Componentes Eletrônicos

3.2.4.1 Cristal Oscilador

O equipamento usado é de 8Mhz, sendo a sua função determinar precisamente a sincronia de tempo (clock) das ações do microcontrolador. Para isso, o princípio de funcionamento do cristal é fundamentado no efeito piezoelétrico e através da sua vibração entra em ressonância criando um sinal elétrico cuja frequência possui enorme exatidão ([VARELA; MALTA; TORRESI, 2000](#)).

3.2.4.2 Capacitor

No trabalho foram usados vários tipos de capacitores os quais tinham os seguintes valores 1nF, 100nF, 330nF, 1uF e 100uF, o seu emprego foi devido a necessidade de armazenar cargas elétricas em seu interior. Tal fato é possível, pois segundo [Evans \(1999\)](#), capacitores são produzidos fazendo uso de duas placas condutivas, anodo e catodo, as quais são separadas por uma substância isolante. Por meio disso, o equipamento reage à circulação da corrente elétrica a partir do acúmulo de cargas.

3.2.4.3 Resistor

Os resistores usados foram de 10k e 1,2k. Esses dispositivos são feitos de materiais os quais possuem alta resistência elétrica e tem a intenção de controlar a corrente elétrica que circula pelos circuitos. Tal fato acontece por meio do efeito Joule, que transforma energia elétrica em energia térmica (ALEXANDER; SADIKU, 2013).

3.2.4.4 Diodo

O diodo usado foi o 1N4007. Como explicado em Marques (1997), é um semicondutor que faz com que a corrente passe apenas em um sentido, para que isso aconteça sua construção é feita por uma junção PN que quando polarizada no sentido correto permite que a corrente elétrica flua com uma pequena queda de tensão. Em outras palavras, podemos dizer que o diodo funciona como uma via de mão única para a eletricidade.

3.2.4.5 Transistor

O transistor usado no projeto foi o TIP31C. Esse componente normalmente feito de silício e germano tem a função de amplificar a corrente elétrica. (MARQUES, 1997).

3.2.4.6 Relé

No trabalho foi necessário o uso de um relé eletromecânico de 5v, o qual foi responsável para fazer o chaveamento de uma das lâmpadas. O seu funcionamento, segundo Braga (2017), é baseado em um campo magnético produzido quando uma bobina é acionada pela corrente elétrica, logo uma haste metálica é atraída e ao mover-se faz o circuito se fechar ou se abrir.

3.2.4.7 Relé de Estado Sólido

O relé de estado sólido, também conhecido como SSR (*Solid State Relay*), que foi usado no projeto é o G3MB-202p. Sua função é realizar o chaveamento do atuador utilizado no sistema térmico, uma lâmpada incandescente, a partir de um sinal de saída em PWM do microcontrolador. O SSR foi escolhido visto que, em relação aos relés comuns possui várias vantagens como baixa potência necessária para seu disparo, alta velocidade de chaveamento, além da maior vida útil, sem ter o desgaste físico e ruído elétrico.

3.2.4.8 Amplificador

O equipamento utilizado foi o AD826AN. É um amplificador operacional duplo, conforme o datasheet. É um sistema integrado o qual possui dois amplificadores diferenciais independentes e de alto ganho. Tal instrumento possui um encapsulamento DIP com oito pontas e é ideal para aplicações as quais precisam de estabilidade no ganho de tensão.

3.2.4.9 Conversor

O conversor utilizado foi o ICL7660S, que executa a conversão da tensão de alimentação do positivo para negativo em uma faixa de 1,5V até 12V. Segundo o datasheet, esse conversor pode ser conectado para funcionar como um dobrador de tensão e gerar até 22,8 V com uma entrada de 12 V e também pode ser usado como multiplicador ou divisor de tensão.

3.2.4.10 Regulador

O regulador de tensão utilizado foi o KA7810, como explicado em seu datasheet, é um regulador linear positivo integrado com três terminais. A sua principal função é manter, de forma estável, a tensão dentro dos limites exigidos pelo circuito elétrico que está sendo alimentado.

3.2.5 Atuadores

3.2.5.1 Motor

O motor usado foi um PREMOTEC 9905 120 18614 de 12V corrente contínua. Segundo [Fowler \(1994\)](#), o princípio básico de funcionamento de um motor de corrente contínua é que quando se passa uma corrente elétrica pelas bobinas é criado o campo magnético e a partir das forças de atração e repulsão proporcionadas pelo mesmo é gerado o torque e a rotação do motor.

3.2.5.2 Lâmpada

No trabalho foi usado uma lâmpada incandescente de 15 watts - 127 volts da marca Foxlux. O funcionamento de uma lâmpada incandescente ocorre de maneira simples, quando um filamento de tungstênio se aquece devido a corrente elétrica que passa por ele é gerado calor e luminosidade. Para diminuir o desgaste do filamento é introduzido no bulbo da lâmpada uma mistura de gases, normalmente sendo usado argônio e nitrogênio ([BASTOS, 2011](#)).

3.2.6 Software

3.2.6.1 Proteus

Para fazer a placa que contém os circuitos eletrônicos do sistema foi necessário fazer testes e simulações. Para isso o Proteus 8.9 foi o software escolhido. Esse programa possui inúmeras possibilidades como montar o circuito elétrico completo, sendo possível escolher cada componente que será usado. Também é possível fazer o layout do sistema da placa antes da impressão, além de permitir a visualização em 3D de como a placa irá ficar depois de pronta.

3.2.6.2 Matlab

Foi o software usado para plotar os gráficos os quais são responsáveis para mostrar as medidas de velocidade do motor e a variação de temperatura, causada pela lâmpada e fazer

cálculos do modelo e do controlador.

3.2.6.3 Simulink

É um *software* toolbox integrado ao Matlab usado para modelar, simular e analisar sistemas dinâmicos. Sendo assim, é possível usá-lo para projetar e testar uma grande variedade de sistemas. Ao contrário do MATLAB que tem a sua programação feita em linhas de comandos, o Simulink usa uma interface gráfica baseada em diagramas de blocos para realizar suas atividades, o que consequentemente facilita a interação com o utilizador. Então, devido essa facilidade foi o escolhido para a execução do sistema desenvolvido durante o trabalho.

3.2.6.4 KEPServer

É um servidor OPC, as siglas OPC, significam *OLE for Process Control*. OLE, significa *Object Linking Embedding*, que é um padrão industrial desenvolvido para viabilizar a comunicação entre dispositivos com protocolos distintos. A partir disso, o KEPServer foi o *software* de comunicação escolhido para realizar a troca de dados entre o CLP e o Matlab.

3.2.6.5 RSLogix Micro

O CLP usado é fabricado pela Allen-Bradley. Sendo assim, foi preciso usar o software da mesma empresa para que houvesse compatibilidade e fácil comunicação entre o computador e o CLP. O RSLogix Micro é um programa de fácil acesso e que possibilita criar, modificar e monitorar os programas colocados no controlador.

3.2.6.6 RSLinx Classic

É o software responsável pela comunicação entre o computador e o CLP. Além disso, pode exercer outras funções como otimização e diagnóstico de dados. O RSLinx Classic é também responsável por outros dispositivos além da família RSLogix, como RSNetWorx, RSView32, aplicações IHM (Interface Homem Máquina), etc.

3.2.6.7 BootP-DHCP-Tool

Foi preciso o uso dessa ferramenta que permite fixar o endereço IP em um dispositivo. Outro motivo para a escolha desse software é a compatibilidade com os equipamentos da Rockwell.

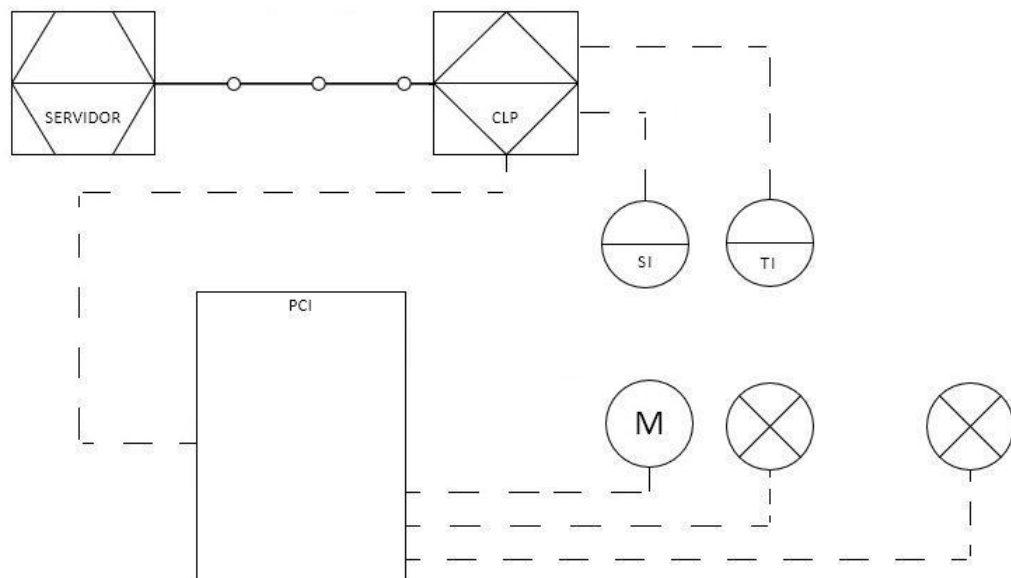
4 DESENVOLVIMENTO

Para desenvolver um laboratório remoto é preciso antes construir uma bancada que opere *in loco*, para após os testes bem sucedidos fazer a transição da forma de comunicação. Sendo assim, foi usado um CLP para fazer o controle de temperatura usando uma lâmpada incandescente como fonte de calor e o controle de velocidade de um motor fazendo uso de um sensor óptico. Também foi sugerido colocar uma sinaleira para representar o acionamento de uma saída digital.

4.1 Diagrama Esquemático da Bancada Didática

Com o foco definido foi preciso construir todo um sistema usando um CLP; uma placa, a qual possui todos os circuitos dos itens que seriam controlados; os atuadores, os sensores, que seriam responsáveis; para leitura das variáveis controladas (velocidade e temperatura); e por fim o servidor. Sendo assim, foi iniciado o desenvolvimento do que seria preciso para que todos os atuadores funcionassem de forma correta como exibido na figura 13.

Figura 13 – Diagrama de blocos do sistema da bancada como um todo



Fonte: Autor

- CLP: Controlador Lógico Programável
- PCI: Placa de Circuito Impresso
- M: Motor
- X: Lâmpada

- TI: Indicador de temperatura
- SI: Indicador de velocidade

4.1.1 Circuito de Acionamento do Motor

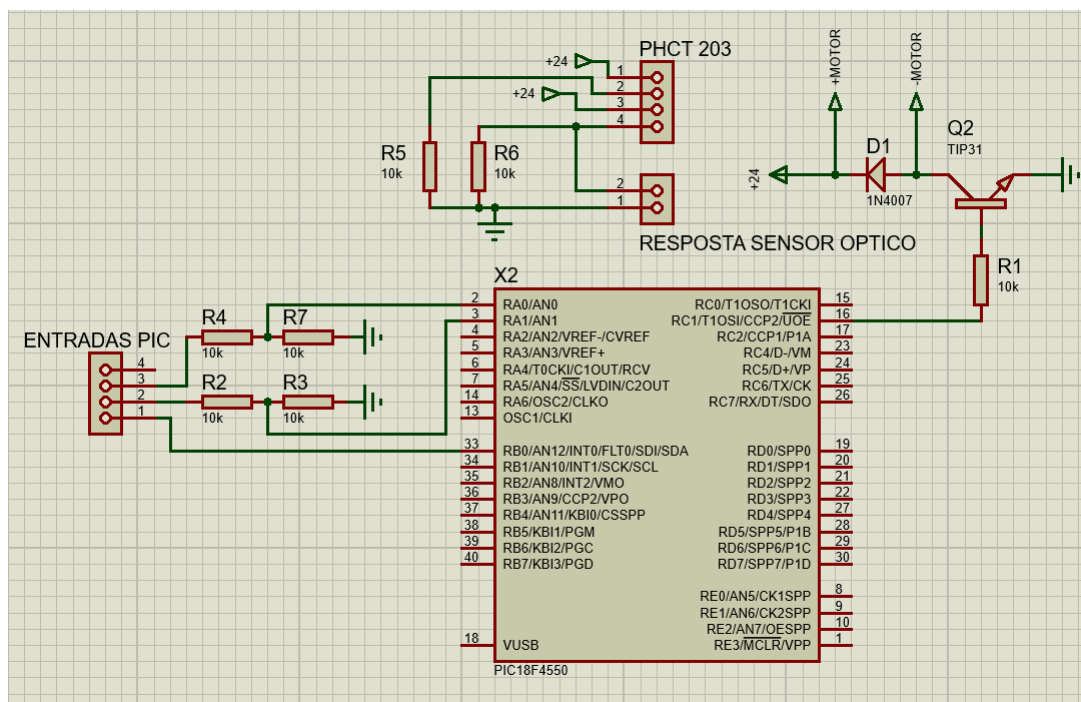
O microcontrolador usado no trabalho foi o PIC18F4550. As entradas analógicas desse microcontrolador recebem sinal de 0 a 5 Vcc, enquanto as saídas analógicas do CLP enviam um sinal de 0 a 10 Vcc. Logo, para ajustar o sinal que o PIC recebe do CLP foi usado um circuito de divisor de tensão com dois resistores de 10k ohms.

Para o circuito de controle de velocidade a função do PIC é converter um sinal analógico de saída do CLP em um sinal modulado por largura de pulso (PWM), para realizar o acionamento do motor de CC por meio de um módulo de potência. Sendo assim, os pinos usados foram o 3, que é uma entrada analógica, e o 16, que é uma saída de sinal PWM.

Como citado anteriormente, foi preciso usar o circuito de módulo de potência como pré-amplificador. A sua função é amplificar os sinais provenientes da fonte para que possam chegar com eficiência ao motor. Para isso foi usado uma resistência de 10k de ohms, o transistor TIP31C e o diodo 1N4007 como mostra a figura 14.

Por fim, para medir a velocidade do motor de CC e realizar seu controle, foi usado um sensor óptico o qual está alinhado com um disco que fica acoplado ao eixo do motor, como está exibido na figura 15. Esse circuito possui dois resistores de 10k ohms, um sensor óptico PHCT203 e o disco que possui uma ranhura, diâmetro de 60 mm e a espessura de 2 mm.

Figura 14 – Diagrama de blocos que mostra o circuito completo do motor

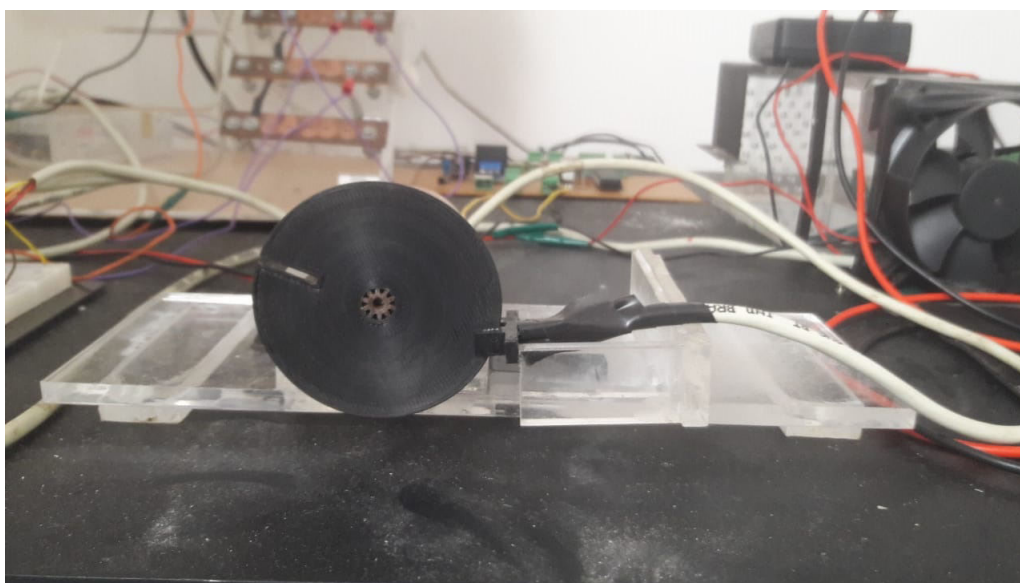


Fonte: Autor

No diagrama mostrado acima as I/Os utilizadas são:

- Entrada 1 que está conectada ao pino 33 do PIC é o sinal de comando do CLP para acionar uma sinaleira.
- Entrada 3 que está conectada ao pino 2 do PIC é o sinal de comando do CLP para acionar o motor.
- Pino 16 é responsável pelo sinal de saída PWM o qual aciona o motor de corrente contínua.

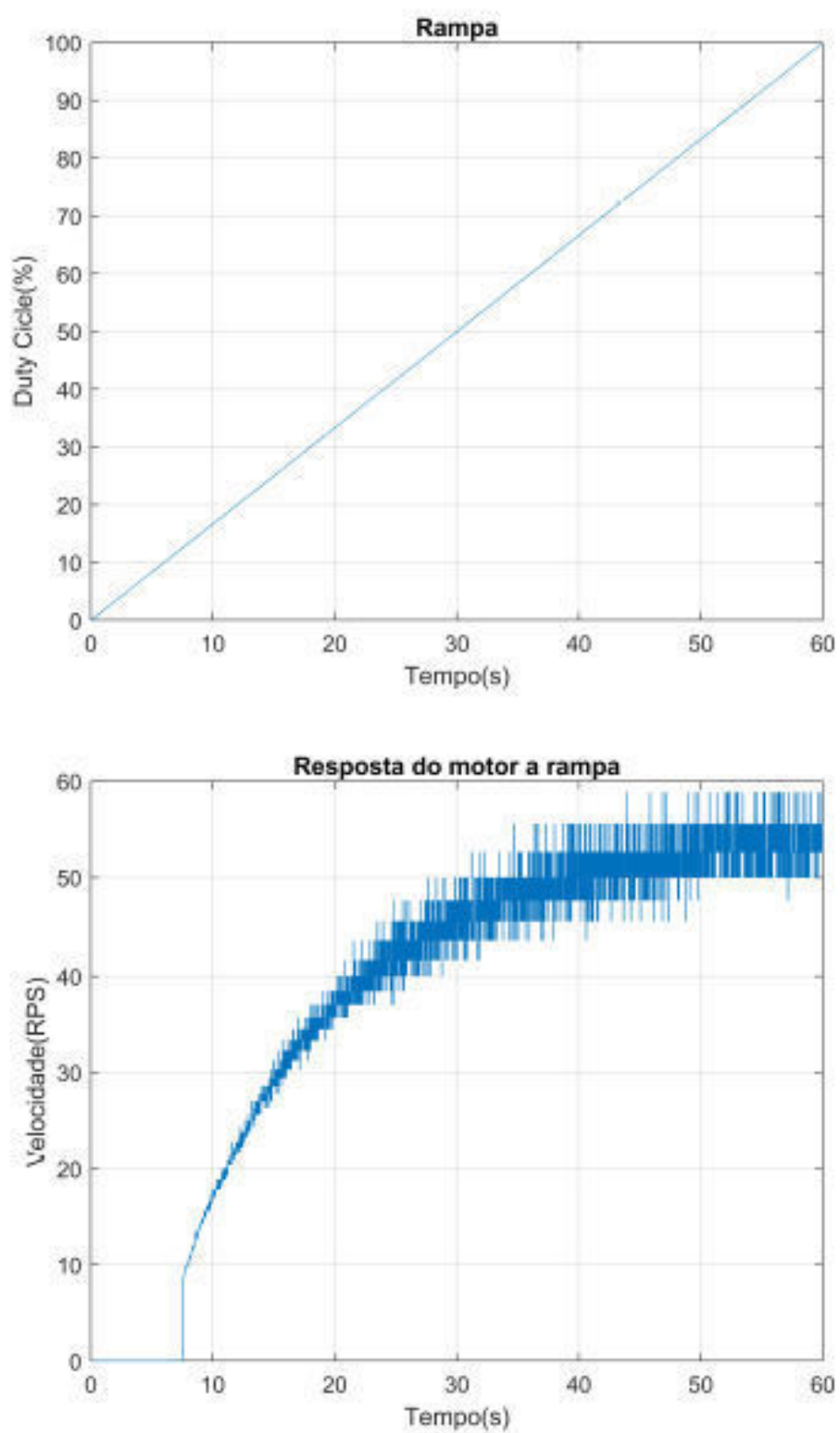
Figura 15 – Imagem que mostra o motor e o disco acoplado para realizar a medida de velocidade



Fonte: Autor

Com o sistema de acionamento do motor pronto é preciso fazer o ensaio com a intenção de escolher qual seria a faixa de velocidade ideal para realizar o controle do circuito, essa curva de resposta do motor é exibido na figura 16. Baseado na curva citada anteriormente, concluiu-se que a melhor faixa de velocidade para se realizar o controle é entre 10 e 30 RPS, ou seja, o valor que está entre 8 a 30 *Duty Cicle (%)* para acionamento do PWM.

Figura 16 – Imagem dos gráficos usados para escolher a faixa de operação do controle de velocidade



Fonte: Autor

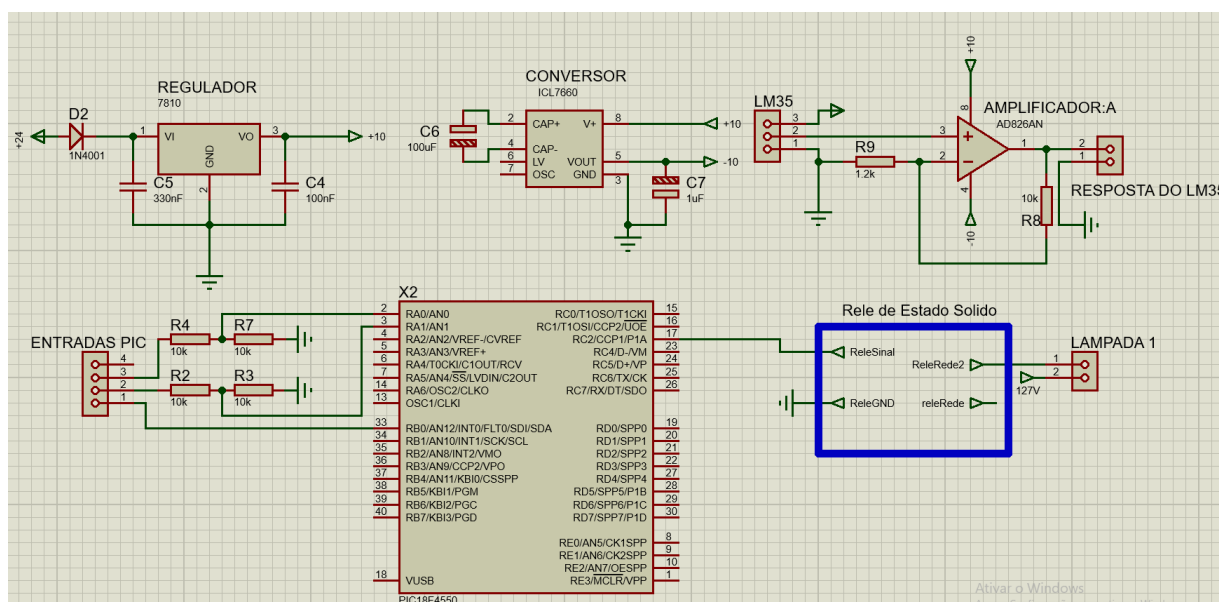
4.1.2 Circuito de Acionamento da Lâmpada Incandescente

Neste trabalho foi usado um relé de estado sólido, pois um relé convencional não é capaz de ser acionado na frequência desejada para o circuito de potência, que é o responsável pelo acionamento da lâmpada. Para medir a temperatura foi usado o sensor LM35 e um sistema para amplificar a tensão de saída, já que os sinais do sensor tem uma amplitude de zero a um volt e o CLP faz leitura de zero a dez volts.

Nesse circuito de amplificação foram usados o amplificador AD826AN, um resistor de 1,2k ohms e um resistor de 10k ohms como mostrado na figura 17. Após passar pelo circuito de amplificação o sinal é aumentado cerca de 8,3 vezes e a resposta do LM35 é enviada para a entrada analógica 0 da expansão 1762-IF2OF2 do CLP.

Porém, para o amplificador AD826N funcionar ele precisa de ser alimentado por uma tensão de $\pm 10V$, onde o pino 8 é a entrada para o $V+$ e o pino 4 é a entrada para o $V-$. Sendo assim, foi necessário o uso de um regulador de tensão, que foi utilizado para reduzir a tensão de 24V para 10V+. Além disso, também foi preciso de um conversor para executar a conversão e equalização da tensão de 10V+ para 10V-. Para o circuito do regulador, foram usados o regulador KA7810, um diodo 1N4001, um capacitor de 330nF e um capacitor de 100nF; e para o circuito de conversão foram usados um conversor ICL7660S, um capacitor de 100nF e um capacitor de 1nF; conforme mostrado na figura 17.

Figura 17 – Diagrama de blocos que mostra o circuito completo de temperatura



Fonte: Autor

No diagrama mostrado acima as I/Os utilizadas são:

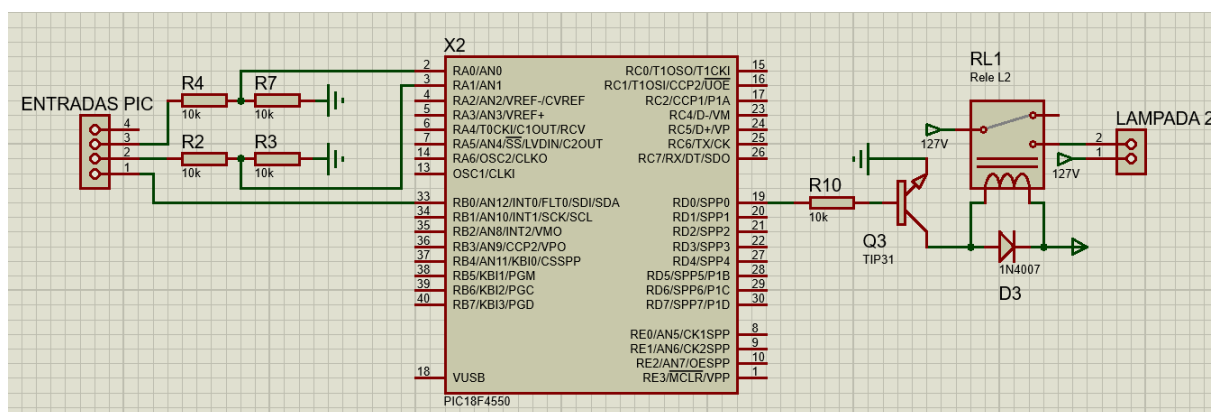
- Entrada 2 que está conectada ao pino 3 do PIC é o sinal de comando do CLP para acionar a lâmpada.
- Pino 17 é responsável pelo sinal de saída PWM o qual aciona a lâmpada incandescente.

4.1.3 Circuito de Acionamento da Sinaleira

No circuito da sinaleira, assim como nos circuitos anteriores, o PIC18F4550 também foi responsável pelo sinal de comando do CLP para acionar a sinaleira. Essa escolha foi feita, pois era preciso que a placa de circuito impressa tivesse o menor tamanho possível e o microcontrolador ainda tinha várias portas que não estavam sendo utilizadas.

Além do que foi citado acima, foi preciso usar um circuito de módulo de potência para amplificar o sinal e garantir que ele chegasse com eficiência no atuador. Então foi usado um resistor de 10k de ohms e o transistor TIP31C. E para isolar o circuito de acionamento da lâmpada foi usado um relé e um diodo roda livre que foi conectado em paralelo a bobina do relé, como mostrado na figura 18.

Figura 18 – Diagrama de blocos que mostra o circuito completo da sinaleira



Fonte: Autor

No diagrama mostrado acima as I/Os utilizadas são:

- Entrada 1 que está conectada ao pino 33 do PIC é o sinal de comando do CLP para acionar uma sinaleira.
- Pino 19 é responsável pelo sinal de comando da sinaleira.

4.2 Placa de Circuito Impressa

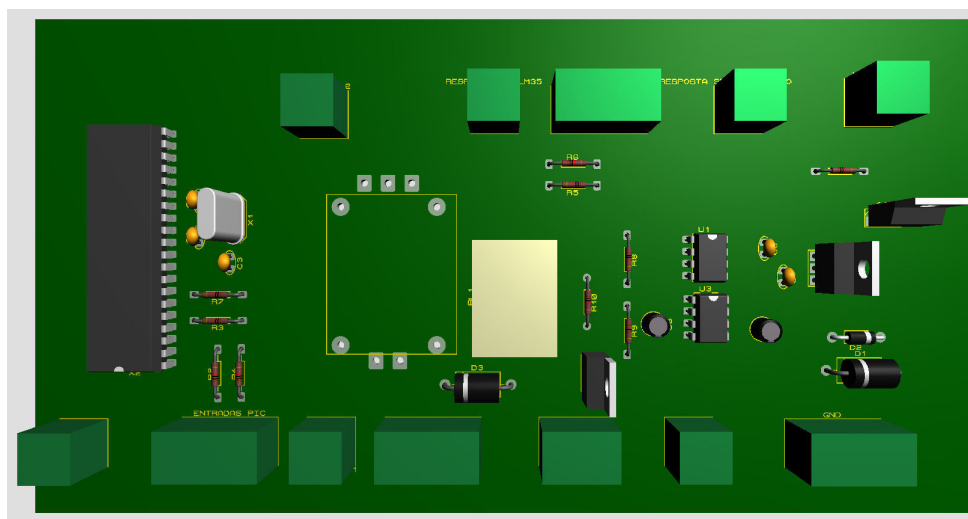
Para a construção da placa foi usado o *software* PROTEUS/ISIS (versão 8.9). Ele foi escolhido devido a sua grande biblioteca a qual possui uma imensa diversidade de componentes e *packages*, além dessa diversidade, ele possui um ótimo ambiente de desenvolvimento e simulação para se fazer placas eletrônicas onde se é possível até visualizar em 3D como será o resultado final do projeto. Apoiado nessas qualidades sabia-se que esse programa seria o ideal para a construção e configuração do projeto, já que atendia a todas as necessidades.

Com as ideias prontas e o *software* definido, o próximo passo para produção da placa foi estabelecer as suas dimensões. Depois foram feitas várias simulações e ajustes onde ocorreram tanto mudanças nas trilhas, quanto nos locais dos componentes (figuras 19 e 20). Com o projeto

pronto a placa foi impressa no Laboratório de Controle e Automação Multiusuário (LabCAM) da Escola de Minas.

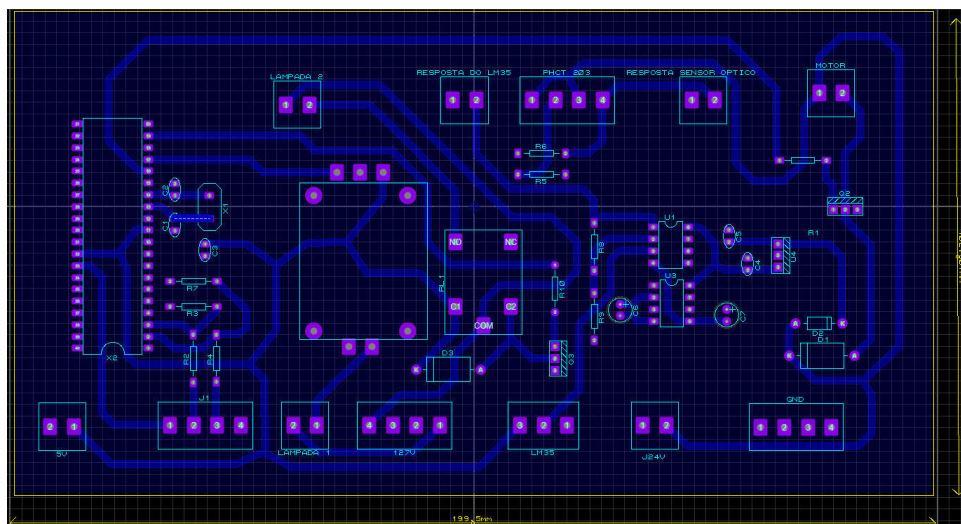
Com a placa de circuito externa impressa, o próximo passo foi soldar os componentes e realizar os testes. Para a execução dos testes a placa era alimentada por três fontes, uma fonte de 5V para o PIC, uma fonte de 12V para a lâmpada e uma fonte de 24V para o regulador de tensão.

Figura 19 – Imagem da placa usando o ambiente 3D visualizer



Fonte: Autor

Figura 20 – Imagem mostrando as trilhas do circuito da placa



Fonte: Autor

4.3 Programação

Com toda a parte física pronta foi preciso estabelecer a comunicação entre o CLP e o servidor, além de fazer o programa responsável para controlar todo o sistema. Para isso, foi preciso usar três *softwares* da Allen-Bradley. O primeiro foi o BootP-DHCP-Tool, que funciona

de forma simples e é usado apenas para definir o IP do equipamento que está sendo usado. O segundo *software* que é o RSLinx Classic, é usado para estabelecer a conexão entre o CLP e o servidor, por meio de um IP. Por último, o RSLogix Micro é usado para implementar o código do programa que está incumbido de cumprir todo os ideais do trabalho, de realizar a leitura das variáveis de temperatura, de velocidade e fazer o controle do sistema em malha aberta e malha fechada bem como no acionamento de uma sinaleira.

4.3.1 Controle de Velocidade

4.3.1.1 Malha Fechada

Para o desenvolvimento do programa foi preciso primeiro, explorar o RSLogix Micro, que até então não era conhecido pelo autor. Com um maior conhecimento do *software* citado partiu-se para a implementação do programa.

Na linha (000) o bloco (MOV) foi anexado com a variável HSC:0.ACC, onde HSC significa *high speed counter* que é uma entrada que possibilita contar pulsos em alta velocidade.

Na linha (001) foi adicionada o bloco (NEQ), que é responsável por fazer uma comparação entre o valor momentâneo, que está na variável L9:0 e o último valor computado anteriormente, que está na variável L9:1.

Na linha (002) é adicionado novamente um bloco (MOV), que tem a função de toda vez que o valor de L9:0 for modificado fazer a atualização do valor de L9:1.

Na linha (003) tem o bloco (TON) que é o contador de tempo e que usa a variável T4:0 para armazenar seus valores, sendo que o tempo é de 1 milissegundo. Ainda na linha (003) tem a variável DN que é acionada caso se passar mil milissegundos sem que o motor dê uma volta.

Na linha (004) tem um bloco (MOV) que é acionado sempre que a variável DN for acionada, esse bloco tem a função de estar zero na variável F8:0. A variável F8:0 sendo igual a zero significa que o motor está parado.

Na linha (005) é adicionado um bloco (OSR). Seu acionamento é feito quando a variável B3:0/0 é acionada. O bloco (OSR) *One Shot Rising* é usado para dar um pulso sempre que se tiver uma borda de subida.

Na linha (006) tem os blocos (NEQ) e (DIV), onde o bloco (DIV) só é acionado caso T4:0 seja diferente de zero e o B3:0/2 tenha sido acionado. Com as duas condições realizadas o bloco (DIV) usa as variáveis T4:0 e F8:0 para fazer o cálculo da velocidade.

Na linha (007) é colocado o bloco (OSF) *One Shot Falling* que é acionado quando o B3:0/2 for acionado. Sua função é aplicar uma borda de decida que acionará a variável B3:0/4.

Na linha (008) tem o (RES) que é usado para resetar a variável T4:0. Isso acontece sempre que B3:0/4 for acionada. Ou seja, sempre que B3:0/4 for acionado a variável T4:0 é resetada.

Na linha (009) é adicionado um bloco (MOV), que faz a substituição da variável N7:0 para a variável O:1.0, que é o valor de saída.

Na linha (010) é colocado um bloco (SCP), onde são usadas as variáveis F8:0 e N7:1. Esse bloco é usado para fazer as escalas dos valores da velocidade que é entre 0 e 59 e transformá-los em valores que serão enviados para o bloco (PID) que estão entre 0 e 16383.

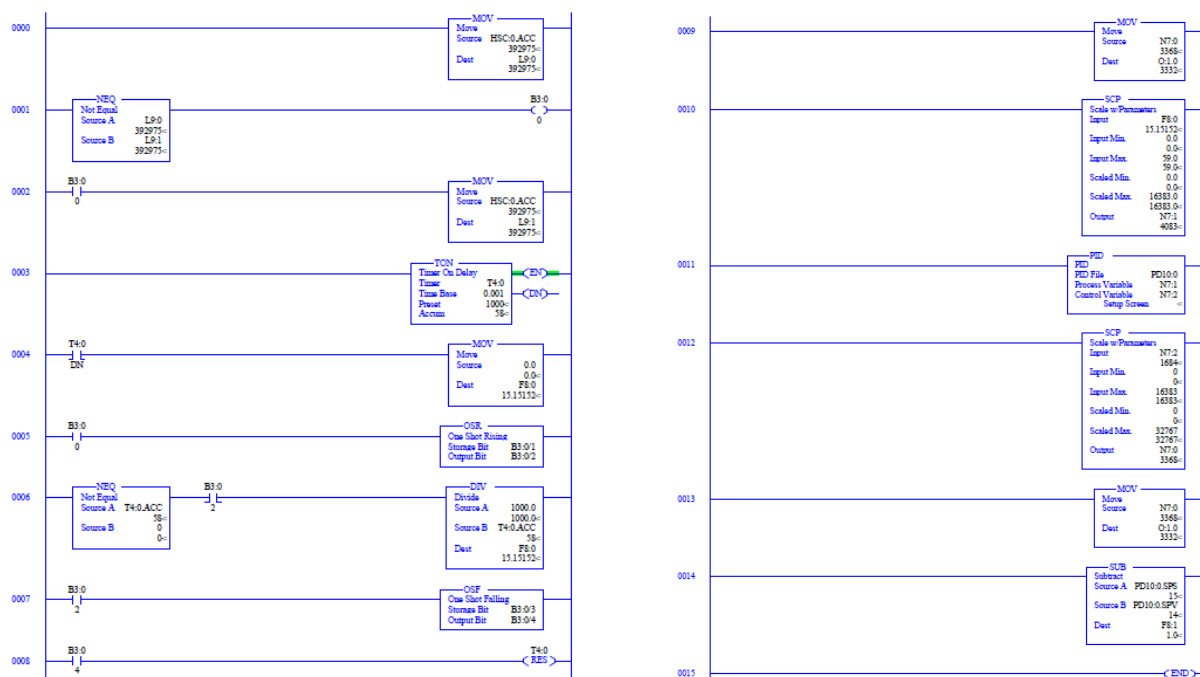
Na linha (011) tem o bloco (PID), que possui as variáveis PD:10, N7:1 e N7:2. A variável PD:10 é onde todos os parâmetros e configurações desejadas para o PID são salvas. A variável N7:1 é uma variável de processo, a qual é a velocidade do motor; e por fim, a variável N7:2 que é a variável de controle, que é o valor de saída do bloco (PID).

Na linha (012) é colocado novamente um bloco (SCP) para fazer a transformação da escala de 0 a 16383, que são os valores do bloco (PID), para 0 a 32767 que são os valores da saída analógica do CLP.

Na linha (013) é colocado um bloco (MOV), sendo o responsável por mover o valor de saída do CLP, que está na variável N7:0, para a saída analógica, que está na variável O:1.0.

Na linha (014) é usado o bloco (SUB) para se fazer o cálculo do valor do erro, o qual é armazenado na variável F8:1.

Figura 21 – Imagem mostrando o programa usado no CLP



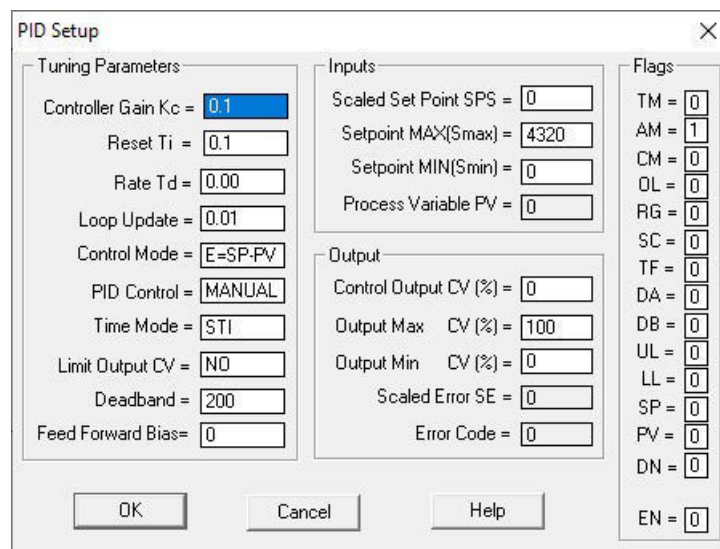
Fonte: Autor

4.3.1.2 Malha Aberta

O mesmo código utilizado em malha fechada também é empregado em malha aberta. A diferença é que conforme explicado no manual do CLP, quando a opção “PID control” está em

“manual”, como mostrado na figura 22, o controle PID não funciona. Então, com bloco PID, linha 011, estando desativado é possível fazer o sistema trabalhar em malha aberta.

Figura 22 – Imagem do *setup* do bloco PID usado no trabalho



Fonte: Autor

4.3.2 Leitura/Escrita da Memória do CLP

Para realizar a leitura e a escrita na memória foram usados dois *softwares*, o Simulink e o KEPServer. O KEPServer tem como principal função ser um servidor OPC, ou seja, é ele que realiza a comunicação entre CLP's, de diversas marcas e modelos, e o Computador. Para isso, é usado um protocolo com *tags* e vetores os quais permitem a troca de informações, como leitura e escrita de variáveis. Enquanto o Matlab/Simulink é o *software* usado no computador para fazer a comunicação OPC. Ele tem a função de ler e escrever diretamente os valores nas variáveis do CLP conforme o usuário desejar, para isso são usados os blocos de controles que executam as atividades desejadas, conforme exibido na figura 23. Sendo assim, é possível programar experimentos e usar os dados obtidos para fazer gráficos como a curva de reação.

4.3.2.1 Configurando o KEPServer

Para configurar o ambiente KEPServer, foram realizados os seguintes passos:

1) O primeiro passo foi selecionar e configurar o canal responsável para realizar o trabalho. Neste caso, o *Device driver* usado foi o ControlLogix Ethernet com *Optimization Method* de *Write only latest value for all tags*.

2) Próximo passo foi adicionar o dispositivo que será usado, configurando detalhes como o ID do dispositivo e o *timing* de comunicação. No trabalho, o dispositivo usado foi um MicroLogix 1100, com ID 192.168.120.200, sendo que, o *Connect timeout* foi de 3 segundos e o *Request timeout* foi de 1000 milissegundos.

3) Por fim, o último passo foi adicionar as tags que serão usadas no trabalho. Sendo que no trabalho foram adicionadas 4 tags com *name*, *address* e *data type*. Sendo que abaixo estão as tags adicionadas no trabalho

- *name* Error, *address* F8:1 e *data type* Float.
- *name* OUT, *address* N7:0 e *data type* Word.
- *name* RPM, *address* F8:0 e *data type* Float.
- *name* SetPoint, *address* PD10:0.SPS e *data type* Word.

4.3.2.2 Configurando o Simulink

Para configurar o ambiente Simulink, foram realizados os seguintes passos:

1) O primeiro passo foi criar um *Blank Model*. Depois, adicionou-se o bloco *OPC configuration*. Esse bloco tem a função de selecionar o servidor e configura a comunicação. No caso, o *software* OPC usado no trabalho foi o KEPServer.

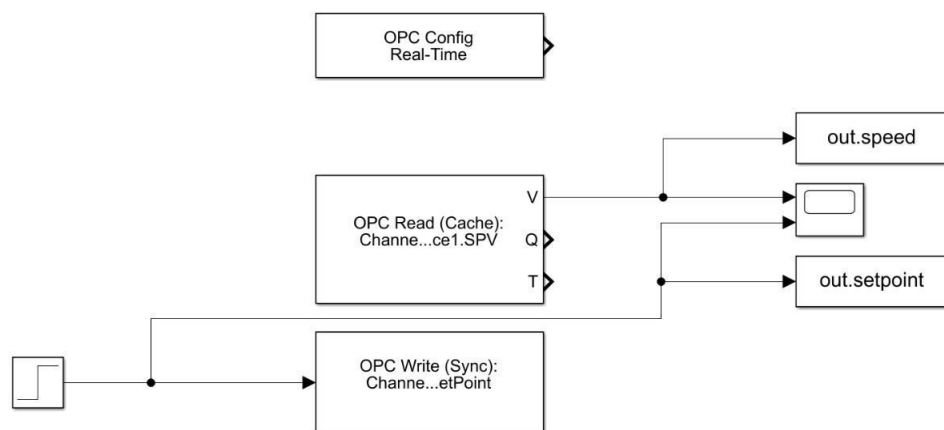
2) Próximo passo foi adicionar o bloco *OPC Read*. Esse bloco vai permitir ler as tags criadas no servidor OPC. Além disso, foi através dele que se configuraram as tags. No trabalho, as tags lidas são Error e RPM.

3) Depois do *OPC Read*, deve-se adicionar o *OPC Write*, ele tem a função de configurar o tempo de amostragem e selecionar as tags que serão usadas para escrever. No trabalho as tags usadas para escrever foram OUT e SetPoint e o tempo de amostragem foi de 0.01 segundo.

4) Depois adicionado o bloco “*To Workspace*”. Esse bloco permite exportar as leituras realizadas para o *Workspace* do Matlab, sendo que para efetuar as exportações foram usadas vias OPC. No trabalho foram usados dois blocos “*To Workspace*”, com os nomes de speed e setpoint, além disso a configuração usada em *Save format* foi *Structure With Time*.

5) Por fim, adicionou-se o bloco *Step*. Esse bloco tem a função de configurar o degrau usado no experimento. No caso do trabalho, o valor inicial foi de 10000 bits e valor final de 15000 bits, com o *step time* de 30 segundos.

Figura 23 – Imagem do projeto do Simulink usado no trabalho



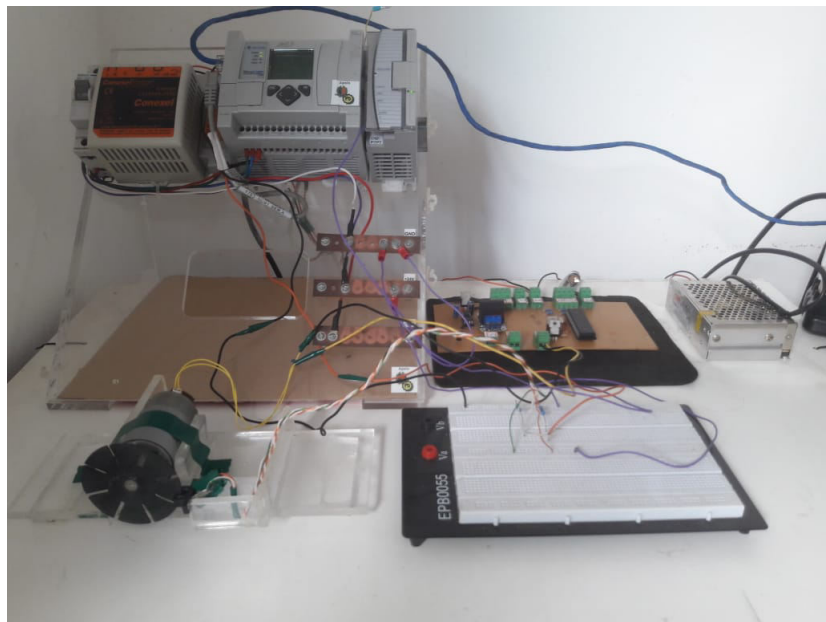
Fonte: Autor

5 RESULTADOS

5.1 Estruturação da Bancada Didática

Não foi possível fazer a confecção da versão final da placa de circuito impressa, realizar os ajustes finais da parte estrutural da bancada e efetuar a impressão do disco com as medidas finais e a quantidade ideal de ranhura. Tal fato ocorreu em função do isolamento social imposto pela pandemia. Apesar das questões citadas anteriormente conseguiu-se implementar a bancada conforme apresentado na figura 24.

Figura 24 – Imagem da situação atual da bancada



Fonte: Autor

5.2 Análise de Dados Obtidos no Sistema do Motor de CC

Fazendo uso da bancada foram feitos vários testes para se chegar aos resultados esperados. Serão apresentadas as etapas para construir a curva de reação dos métodos de Ziegler Nichols e Cohen Coon, sendo ambos aplicados ao controlador PI de velocidade.

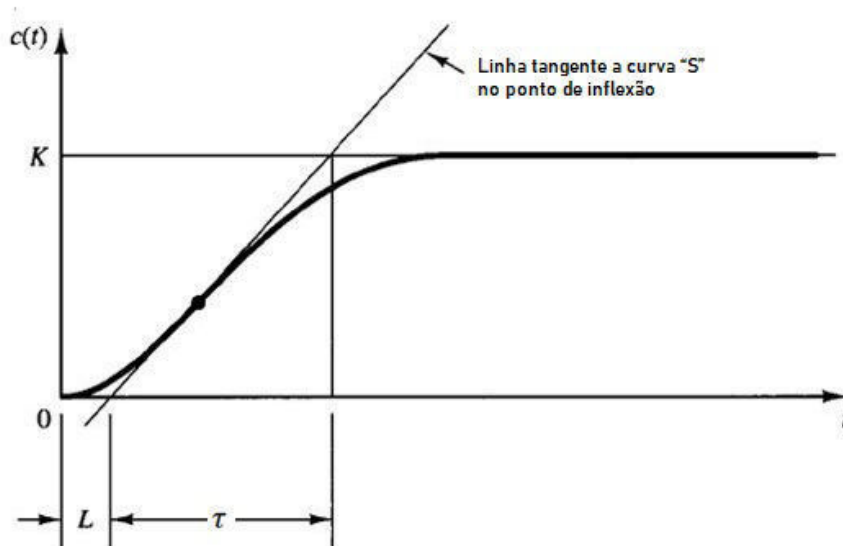
5.2.1 Resposta ao Degrau

Para adquirir os dados foi utilizado o método da curva de reação, o qual é desenvolvido a partir da resposta ao degrau em malha aberta. Com finalidade de executar esse método, o sistema deve estar em regime permanente. A partir disso é aplicado um degrau com amplitude entre dez e vinte por cento do fundo de escala. Após a aplicação do degrau deve-se esperar o tempo

suficiente para que o sistema volte a operar em regime permanente, fazendo assim uma curva em formato de “S”. A partir da curva de reação são encontrados os valores dos parâmetros K , L e τ .

Para encontrar os valores dos parâmetros é preciso usar o ponto de inflexão, que é o ponto mais alto da derivada de primeira ordem após a realização do degrau. Fazendo uso do ponto de inflexão escolhido, deve-se traçar uma linha tangente a ele como exibido na figura 25. Sendo assim, os valores de L e τ serão medidos sobre o eixo do tempo. Logo, a distância entre zero e onde a linha tangente encostar-se ao eixo do tempo, será medido o valor do tempo de atraso (L). Por fim, a constante de tempo (τ) é dada pelo tempo entre o ponto em que a linha tangente encosta no eixo do tempo até quando essa mesma linha se encontra com a reta do ganho da planta (K). Consequentemente os parâmetros são empregados para encontrar K_p , τ_i e τ_d fazendo uso das tabelas de Ziegler Nichols e Cohen Coon.

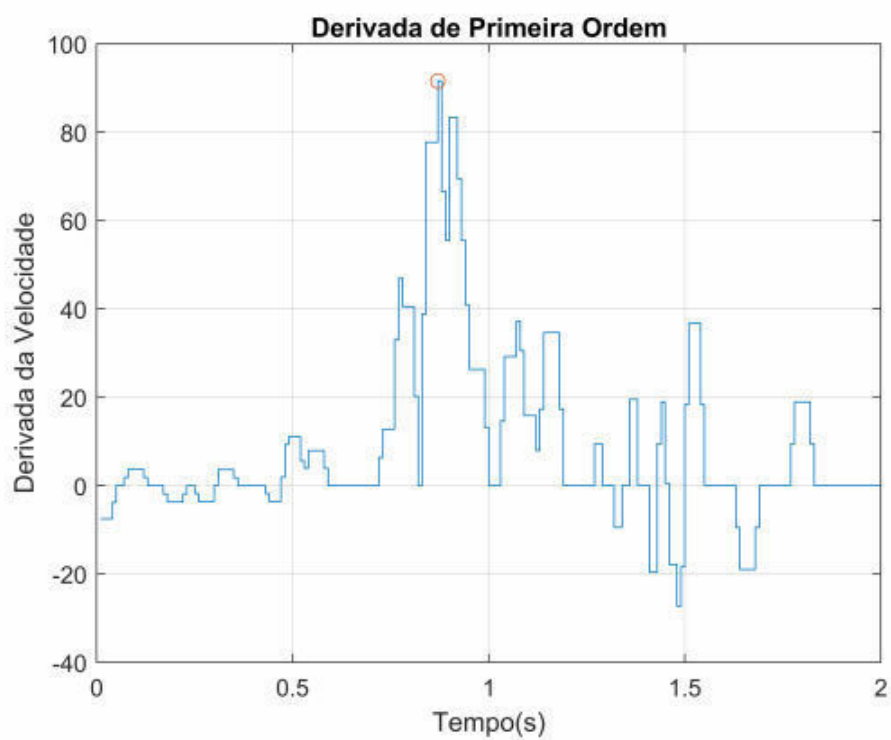
Figura 25 – Imagem da curva de reação



Fonte: (LIMA; GODOI, 2012) modificado

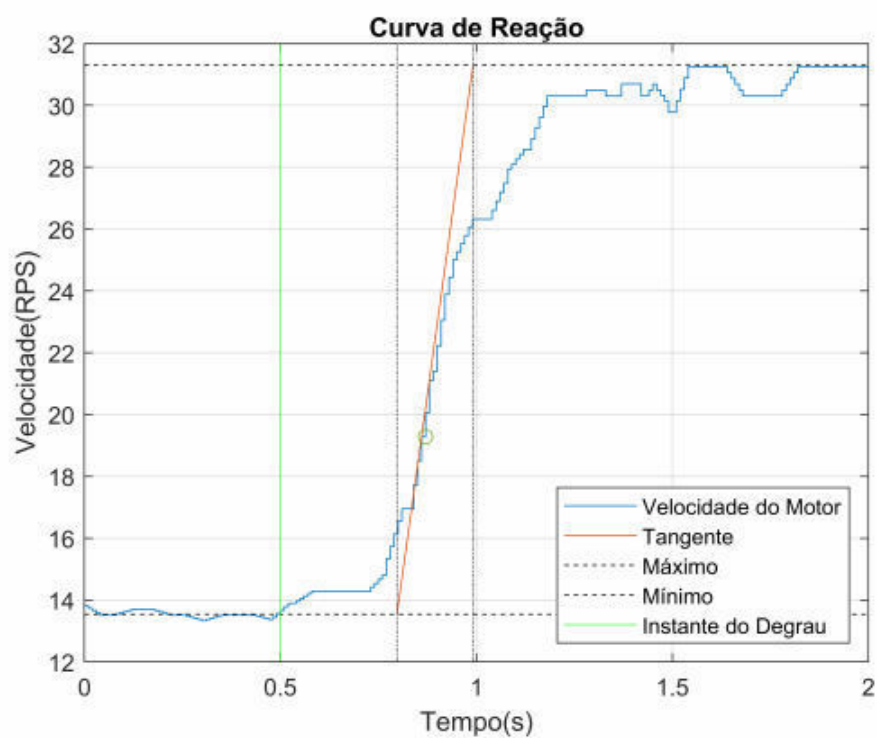
Conforme os passos explicados acima, o experimento foi feito usando o Simulink, tendo seu fundo de escala em 23767 bits e intervalo de amostragem de cinquenta milissegundos. Sendo assim, o experimento começa com o sistema em regime permanente possuindo valor inicial de 13300 bits. Com o sistema em regime permanente, foi aplicado um degrau de 12% do fundo de escala, que representa 2800 bits. Após aplicar o degrau foi esperado o sistema voltar ao estado de regime permanente para finalizar o experimento e plotar os gráficos. Fundamentado no gráfico da derivada de primeira ordem, foi encontrado o ponto de inflexão, conforme mostra a figura 26. Usando o ponto de inflexão encontrado a partir da derivada de primeira ordem, foi traçado uma tangente na curva de reação, como exibido na figura 27. Logo, baseando-se na curva de reação foram obtidos os valores de K , L , τ :

Figura 26 – Imagem do ponto de inflexão escolhido



Fonte: Autor

Figura 27 – Imagem da curva de reação



Fonte: Autor

- $K = 1.9728$
- $L = 0.2973$
- $\tau = 0.1940$ segundo

5.2.2 Projetando o Controlador - Ziegler Nichols

Baseado na equação do ganho total mostrada abaixo, foi projetado o controlador PI usando o método de Ziegler Nichols. Para isso, foi preciso encontrar o ganho proporcional K_p e, o ganho integrativo K_i . No entanto, para encontrar o valor de K_i é preciso encontrar o tempo integrativo τ_i , já que se sabe que K_i é igual a K_p/τ_i . Sendo assim, foram usadas as fórmulas da tabela 1 como mostrado abaixo.

$$G_s = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i \cdot s} \right) \quad (5.1)$$

$$K_p = \frac{0.9\tau}{KL} = 0.9 \frac{0.1940}{1.9728 \cdot 0.2973} = 0.298 \quad (5.2)$$

$$\tau_i = \frac{L}{0.3} = \frac{0.2973}{0.3} = 0.991 \text{ segundo} \quad (5.3)$$

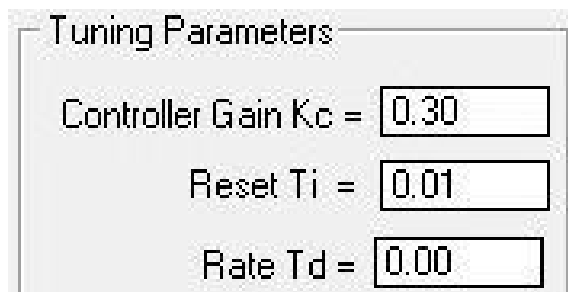
Para implementar o controlador foi necessário mudar a escala do tempo integrativo da sintonia de segundos para minutos, que corresponde a escala de tempo do CLP conforme apresentado no manual. Sendo assim, foi preciso dividir o tempo integrativo (τ_i) por sessenta para encontrar o *reset time* T_i (tempo do *reset time* da integral em minutos).

$$T_i = \frac{\tau_i}{60} = \frac{0.991}{60} = 0.017 \text{ minuto} \quad (5.4)$$

Após obter os resultados de K_p e T_i foi preciso arredondar os valores encontrados, como exibido na figura 28, pois o *software* do controlador possui apenas duas casas decimais, conforme

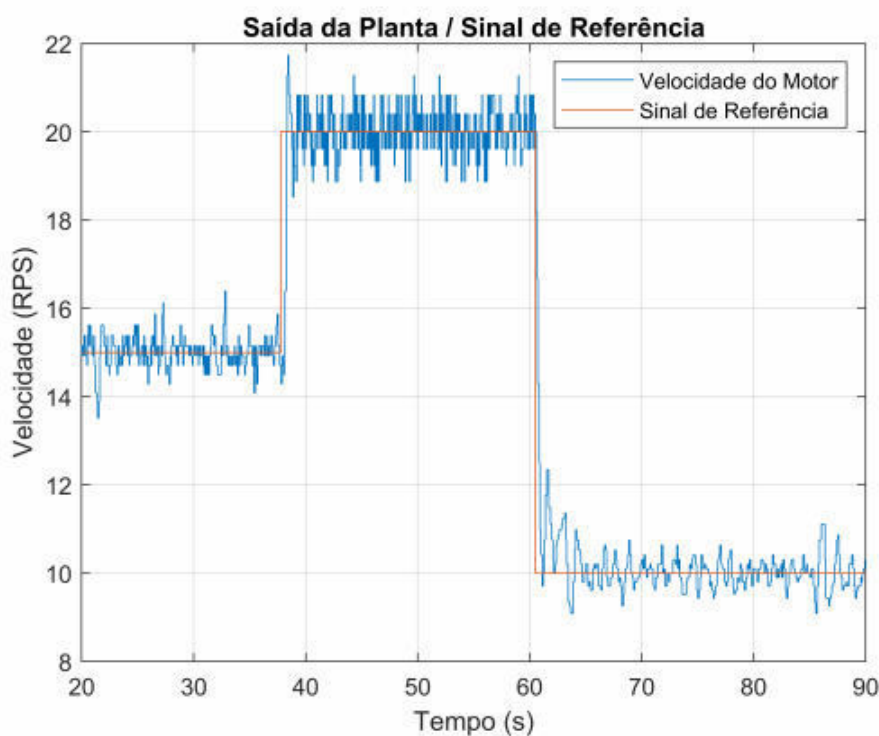
apresentado no manual. A partir disso, foi implementado o controlador sintonizado pelo Ziegler Nichols por meio da curva de reação, conforme mostrado na figura 29.

Figura 28 – Imagem dos valores arredondados



Fonte: Autor

Figura 29 – Sistema em malha fechada com ganhos PI sintonizados por Ziegler Nichols



Fonte: Autor

5.2.3 Projetando o Controlador - Cohen Coon

Baseado na equação de ganho, que é exibida abaixo, foi projetado o controlador PI usando o método de Cohen Coon. Para isso, encontrou-se o ganho proporcional K_p e o ganho integrativo K_i . No entanto, como explicado anteriormente, para encontrar o valor de K_i foi preciso encontrar o tempo integrativo τ_i . Sendo assim, usou-se as fórmulas da tabela 2 como mostrado abaixo.

$$G_s = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i \cdot s} \right) \quad (5.5)$$

$$K_p = \frac{\tau}{KL} \left(0.9 + \frac{L}{12\tau} \right) = \frac{0.1940}{1.9728 \cdot 0.2973} \left(0.9 + \frac{0.2973}{12 \cdot 0.1940} \right) = 0.340 \quad (5.6)$$

$$\tau_i = \frac{L(30\tau + 3L)}{9\tau + 20L} = \frac{0.2973(30 \cdot 1.9728 + 3 \cdot 0.2973)}{9 \cdot 0.1940 + 20 \cdot 0.2973} = 0.258 \text{ segundo} \quad (5.7)$$

Para implementar o controlador trocou-se a escala do tempo integrativo da sintonia de segundos para minutos, que corresponde a escala de tempo do CLP, conforme apresentado no manual. Sendo assim, dividiu-se o tempo integrativo (τ_i) por sessenta para encontrar o reset da integral em minutos T_i .

$$T_i = \frac{\tau_i}{60} = \frac{0.258}{60} = 0.004 \text{ minuto} \quad (5.8)$$

Após obter os resultados de K_p e T_i não foi possível realizar os experimentos, pois o valor de T_i não tinha casas decimais suficientes para realizar a execução do controle. Conforme explicado no capítulo 5.2.2, o *software* do CLP possui apenas duas casas decimais, enquanto a T_i teve uma resposta de três casas decimais. Logo se impossibilitou implementar o controlador por meio de Cohen Coon.

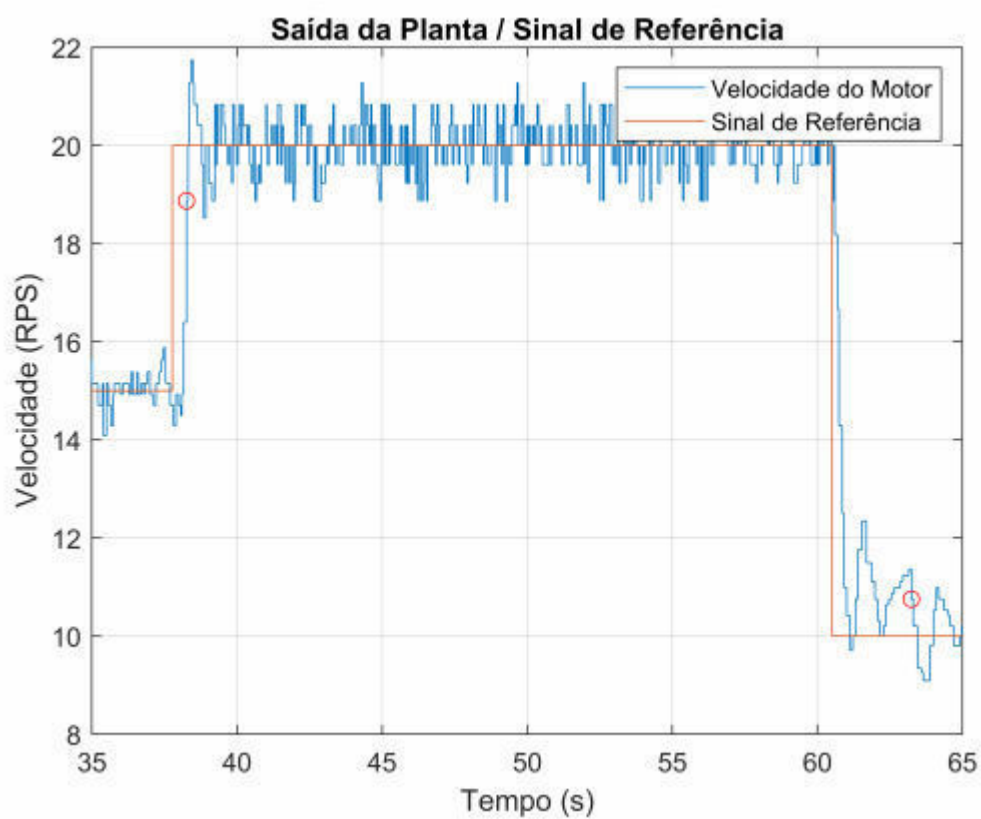
5.2.4 Análise de erros dos resultados

Para analisar os resultados do projeto de controle foi usada uma margem de erro com valor de 10%.

A partir disso, escolheu-se o intervalo de 35 a 65 segundos de um experimento (figura 30) para a análise do sistema em malha fechada. Baseado nos dados do gráfico determinou-se que o regime estacionário ao degrau de 20 RPS foi alcançado aos 38.26 segundos, sabendo que o degrau foi aplicado aos 37.77 segundos, conclui-se que o tempo de acomodação foi de 0.49 segundos. Após o controle com sinal de referência de 20 RPS ficar aproximadamente 20 segundos em regime permanente foi aplicado um degrau para 10 RPS. Então, se observou que o regime estacionário foi alcançado aos 63.24 segundos. Conhecendo que esse degrau foi aplicado aos 60.51 segundos, constata-se que o tempo de acomodação foi de 3.14 segundos.

Apoiado nos resultados pode-se afirmar que o tempo para a estabilidade ser atingida foi curto, porém como não foi realizado o experimento de Cohen Coon não se teve um ponto de

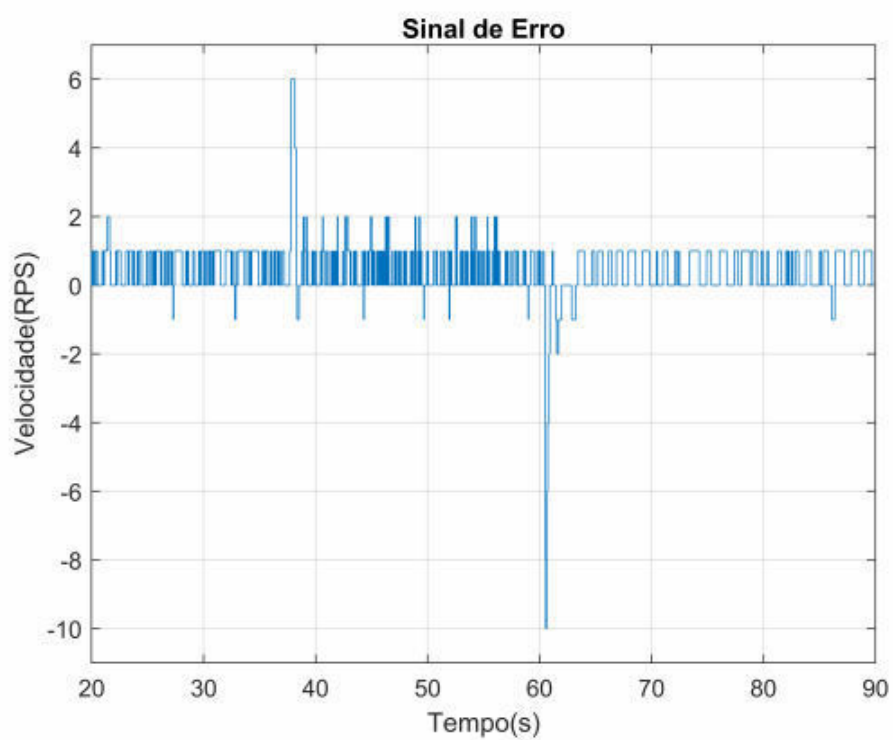
Figura 30 – Sistema em malha fechada com os instantes de entrada em regime permanente em destaque



Fonte: Autor

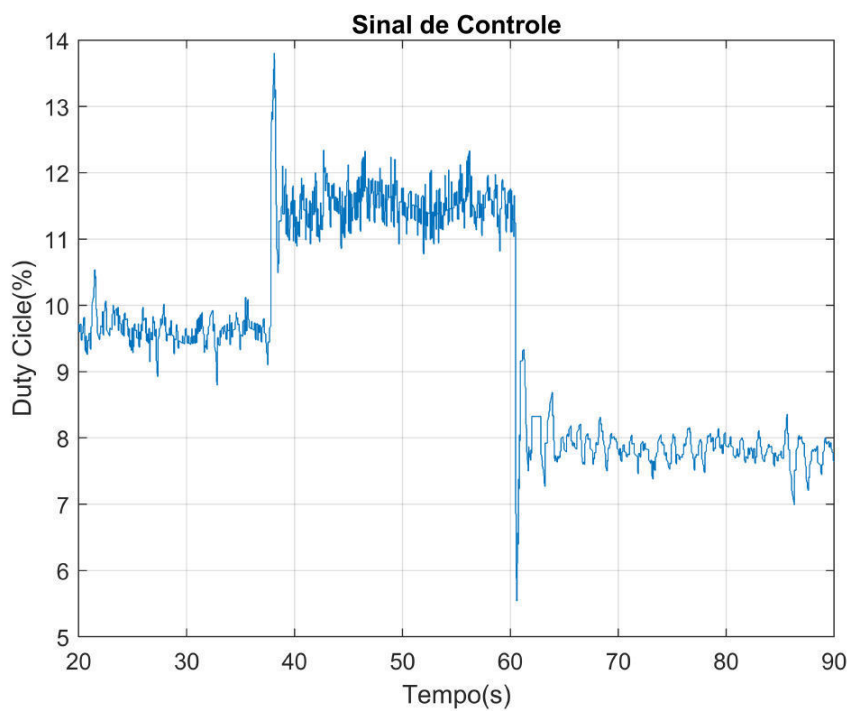
comparação como era esperado. Apesar de não ter a comparação com Cohen Coon, os resultados de Ziegler Nichols foram considerados satisfatórios, já que o regime permanente foi rapidamente atingido e o sinal de erro foi pequeno (figura 31 e 32).

Figura 31 – Sinal de erro para o sistema em malha fechada com ganhos PI sintonizados por Ziegler Nichols



Fonte: Autor

Figura 32 – Sinal de controle do sistema em malha fechada com ganhos PI sintonizados por Ziegler Nichols



Fonte: Autor

6 CONCLUSÃO

Inicialmente o objetivo do projeto era a construção de uma bancada didática a qual pudesse ser operada de forma remota. A partir dessa proposta foi iniciado o projeto da bancada para ser controlada *in loco*. Logo, foi desenvolvida uma placa responsável pelo controle de velocidade e de temperatura, além da programação do CLP e a produção de resultados os quais tiveram respostas satisfatórias. No entanto, devido aos vários contratempos que foram causados pela pandemia não foi possível finalizar o projeto o qual havia sido proposto.

Outro fato é que devido o *lockdown* causado pelo covid-19, não foi possível ter acesso a UFOP e o LabCAM que é o local onde o projeto estava sendo desenvolvido. Então, a confecção de uma nova placa de circuito impresso com as melhorias e a comunicação remota que era a parte final do trabalho não pôde ser efetuada.

Durante o período de trabalho no laboratório foi desenvolvida a parte física da banca, a qual foi usada para fazer experimentos, conforme explicado durante o trabalho. Sendo assim, pode-se afirmar que apesar da proposta de construir uma bancada didática remota não ter sido cumprida, o projeto ainda é uma ferramenta capaz de cooperar com o ensino da UFOP no curso de Controle e Automação. Tal afirmação está fundamentada no fato de que os experimentos de Ziegler Nichols e Cohen Coon tiveram resultados dentro do esperado. Sendo assim, a bancada poderá ser usada em aulas práticas ou como forma de exemplo por professores.

Dados os resultados finais apresentados pela bancada e o desenvolvimento pessoal, pode-se concluir que o projeto apresentou ótimo desfecho. Essa afirmação é possível, pois além da bancada ser capaz de ajudar no aperfeiçoamento do laboratório ela também ajudou a desenvolver e aprimorar conhecimentos práticos e teóricos. Nesses dois aspectos houve grande crescimento onde se podem executar conceitos que foram aprendidos durante todo o curso e realizar atividades práticas que até então não se havia feito.

6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Como recomendação para trabalhos futuros no aperfeiçoamento da bancada uma das principais sugestões é o projeto da sintonia e implementação do controlador de forma remota, já que esse era um dos pontos relevantes do projeto. Uma sugestão para melhorar os resultados dos experimentos é substituir o encoder incremental (conjunto disco e sensor óptico) por um tacômetro com melhor acurácia. Outra sugestão é o desenvolvimento da interface Web, pois ela facilita o acesso e a interação dos alunos com a bancada de forma remota.

Por fim, outro ponto que pode ser aprimorado é a estrutura final da bancada. A sugestão é projetar um suporte onde possa fixar todas as ferramentas usadas no projeto (CLP, placa de circuito impressa, fonte externa e as partes do motor e caixa térmica).

REFERÊNCIAS

- ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. *Fundamentos de circuitos elétricos*. 5. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2013. Citado na página 42.
- ÅSTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. *PID controllers: theory, design, and tuning*. Pittsburgh: Instrument society of America Research Triangle Park, NC, 1995. Citado na página 34.
- BASTOS, F. C. Análise da política de banimento de lâmpadas incandescentes do mercado brasileiro. *Rio de janeiro: UFRJ/COPPE*, 2011. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético). Citado na página 43.
- BORGES, A. et al. Sensores opticos de passagem e medição de distancia. *Brasília: UnB*, 2005. 2005. Citado na página 41.
- BRAGA, N. C. *Relés: Circuitos e aplicações*. 1. ed. Florianópolis: Editora Newton C. Braga, 2017. Citado na página 42.
- CONTROLADOR para automação residencial. 2013. Disponível em: <[https://www-hitecnologia.com.br/automacao-industrial/controlador-automacao-residencial](https://www.hitecnologia.com.br/automacao-industrial/controlador-automacao-residencial)>. Acesso em: 28 out. 2020. Citado na página 31.
- COPELAND, B. R. *The design of PID controllers using Ziegler Nichols tuning*. 2008. Disponível em: <http://educypedia.karadimov.info/library/Ziegler_Nichols.pdf>. Citado na página 36.
- DESHMUKH, A. V. *Microcontrollers: theory and applications*. 1149. ed. New Delhi: Tata McGraw-Hill Education, 2005. Citado na página 33.
- EVANS, D. A. *Capacitor*. [S.l.]: Google Patents, 1999. US Patent 5,982,609. Citado na página 41.
- FARIAS, A. *CLP – Controlador lógico Programável. PLC – Programmable Logic Controllers*. 2015. Disponível em: <<https://www.clpware.com.br/sistema-supervisorio-ellipse>>. Acesso em: 23 out. 2020. Citado na página 23.
- FERREIRA, J. M. M. *Introdução ao projecto com sistemas digitais e microcontroladores*. 1. ed. Porto: FEUP Edições, 1998. Citado na página 32.
- FOWLER, R. J. *Electricidad principios y aplicaciones*. 1. ed. Barcelona: Reverté, 1994. Citado na página 43.
- FRANCHI, C. M.; CAMARGO, V. L. A. de. *Controladores lógicos programáveis: sistemas discretos*. 5. ed. São Paulo: Saraiva Educação SA, 2008. Citado 4 vezes nas páginas 25, 27, 28 e 29.
- GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. *Métodos de pesquisa*. 1. ed. Belo Horizonte: Plageder, 2009. Citado na página 40.
- GOODWIN, G. C. et al. *Control system design*. 1. ed. Valparaíso: Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall,, 2001. Citado 7 vezes nas páginas 33, 34, 35, 36, 37, 38 e 39.

GRIDLING, G.; WEISS, B. Introduction to microcontrollers. *Vienna University of Technology Institute of Computer Engineering Embedded Computing Systems Group*, 2007. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, v. 15, n. 15, p. 1704–1710, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 30, 32 e 33.

INTEL MCS-48. 2014. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Intel_MCS-48>. Acesso em: 28 out. 2020. Citado na página 32.

KUYVENHOVEN, N. Pid tuning methods an automatic pid tuning study with mathcad. *Calvin college ENGR*, 2002. v. 315, 2002. Citado na página 39.

LELEVÉ, A. et al. Remote laboratory - towards an integrated training system. In: *4th International Conference on Information Technology Based Higher Education and Training (ITHET 2003)*. Marrakech, Morocco: [s.n.], 2009. p. 6. Citado na página 18.

LIMA, J. S.; GODOI, J. d. B. *Sintonia de Controladores PID através de Algoritmos Genéticos*. 2012. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/JessLimaS/sintonia-de-controladores-pid-atravs-de-algoritmos-genticos>>. Acesso em: 29 nov. 2020. Citado na página 58.

MARQUES, A. E. B. *Dispositivos semicondutores: diodos e transistores*. 1. ed. São Paulo: Saraiva Educação SA, 1997. Citado na página 42.

NATALE, F. *Automação Industrial-Série Brasileira de Tecnologia*. 10. ed. São Paulo: Saraiva Educação SA, 2018. Citado 4 vezes nas páginas 21, 24, 25 e 30.

OLIVEIRA, L. O. M. *WebLab Gorceix*. 2016. Disponível em: <<http://200.239.165.38-/CurvadeReacao.aspx>>. Acesso em: 7 nov. 2020. Citado na página 37.

ORDOÑEZ, E. D. M.; PENTEADO, C. G.; SILVA, A. C. R. da. *Microcontroladores e FPGAs: aplicações em automação*. 1. ed. São Paulo: Novatec Editora, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.

PETRUZELLA, F. D. *Controladores lógicos programáveis*. 4. ed. São Paulo: AMGH Editora, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 29.

PID microcontroller block diagram. 2014. Disponível em: <<https://www.controleng.com-/articles/2020-engineers-choice-awards/>>. Acesso em: 7 nov. 2020. Citado na página 34.

POONAM, Y. M.; MULGE, Y. Remote temperature monitoring using lm35 sensor and intimate android user via c2dm service. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, 2013. v. 2, n. 6, p. 32–36, 2013. Citado na página 41.

QUECONCEITO. *Conceito de Laboratório*. 2020. Disponível em: <<https://queconceito.com.br-/laboratorio>>. Acesso em: 19 jun. 2020. Citado na página 18.

QUEIROZ, L. R. d. et al. Um laboratório virtual de robótica e visão computacional. 1998. [sn], 1998. Dissertação de Mestrado. Citado na página 18.

RIBEIRO, M. A. *Automação industrial*. Salvador: Tek Treinamento Consultoria Ltda, 1999. Citado 6 vezes nas páginas 25, 26, 27, 28, 29 e 30.

ROGGIA, L.; FUENTES, R. C. Automação industrial. *Rede e-Tec Brasil, Colégio Técnico e Industrial de Santa Maria-RS*, 2016. Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 2016. Citado 4 vezes nas páginas 25, 26, 29 e 30.

ROJKO, A.; JEZERNIK, K.; PESTER, A. International e-pragmatic network for adult engineering education. In: IEEE. *2011 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*. Amman, Jordan, 2011. p. 34–39. Citado na página 19.

ROSÁRIO, J. M. *Automação industrial*. 1. ed. São Paulo: Editora Baraúna, 2012. Citado 4 vezes nas páginas 21, 22, 25 e 28.

SILVEIRA, L.; LIMA, W. Q. Um breve histórico conceitual da automação industrial e redes para automação industrial. *Redes para Automação Industrial. Universidade Federal do Rio Grande do Norte*, 2003. IEEE, p. 16, 2003. Citado na página 23.

SISTEMA supervisorío elipse. 2018. Disponível em: <[https://slideplayer.com.br/slide/1131863-/
/](https://slideplayer.com.br/slide/1131863-/)>. Acesso em: 27 out. 2020. Citado na página 24.

SISTEMAS de controlador lógico programável MicroLogix 1100. 2020. Disponível em: <<https://www.rockwellautomation.com/pt-br/products/hardware/allen-bradley/programmable-controllers/micro-and-nano-controllers/micrologix-family/micrologix-1100-controllers.html>>. Acesso em: 23 out. 2020. Citado na página 21.

TECNICAR PARKER STORE BRASIL CLP PCLPNG. 2020. Disponível em: <http://www-tecnicar.com.br/noticias/o-que-e-o-clp/attachment/tecni-ar_parker_store_brasil_clp_pclpng/>. Acesso em: 28 out. 2020. Citado na página 24.

TUNING, P. C. Sintonia de controladores regulatórios. *Bol. téc. Petrobras*, 2003. v. 46, n. 3/4, p. 383–410, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 36.

VALDÉS, F.; ARENY, R. P. *Microcontroladores fundamentos y aplicaciones con PIC*. 1149. ed. Espanha: Marcombo, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.

VARELA, H.; MALTA, M.; TORRESI, R. M. Técnicas in situ de baixo custo em eletroquímica: a microbalança a cristal de quartzo. *Química Nova*, 2000. SciELO Brasil, v. 23, n. 5, p. 664–679, 2000. Citado na página 41.

VIEIRA, F. *Para você Eletricista – Introdução ao CLP*. 2010. Disponível em: <<https://blogdaliga.com.br/para-voce-eletricista-introducao-ao-clp/>>. Acesso em: 28 out. 2020. Citado na página 31.

WOLF, D. F. et al. Robótica móvel inteligente: Da simulação às aplicações no mundo real. In: SN. *Mini-Curso: Jornada de Atualização em Informática (JAI), Congresso da SBC*. São Carlos-SP, Brasil, 2009. p. 13. Citado na página 33.

ZANCAN, M. D. Controladores programáveis. *e-Tec Brasil-Escola técnica Aberta do Brasil. Santa Maria, Brasil*, 2002. Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 2002. Citado na página 22.

ZHONG, J. Pid controller tuning: A short tutorial. *Mechanical Engineering, Purdue University*, 2006. p. 1–10, 2006. Citado na página 36.

ZUBÍA, J. G.; ALVES, G. R. *Using remote labs in education: two little ducks in remote experimentatio*. 8. ed. Bilbao: Universidad de Deusto, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.